

目次

Schurer 型 q -Phillips 算子的逼近性质	任美英(1)
超 Heisenberg-Virasoro 代数的 Hom-李超代数结构	黄忠铄(7)
傅里叶级数的若干应用	叶丽霞,王川(12)
浦城丹桂冠型因子与叶片性状的相关性分析	杜云爽,胡金涛,陈佳,吴承祯,李键(15)
$\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的制备、表征及光催化活性	康巧梅,郑敏芬(22)
树莓果酒工艺优化及其蒸馏酒香气成分分析	廖婷,刘运伙,傅锦凌(29)
永安贡川会清桥构造与功能解析	涂焯(35)
博弈论及哈里斯鹰算法的桥梁安全模糊评估模型	杨悦,李永超,陈孝国,裴世博(40)
海绵城市技术在节水型高校创建中的实践 ——以福建林业职业技术学院为例	薛翔鸿(46)
协同过滤算法在微信推荐小程序的应用	刘彦会(51)
群体智能优化算法的区域景观规划方法	周芸(58)
RFS-RF 的局部非线性模型辨识新方法	姜洋,马砚秋,陈榕,刘景良,张羲岭(63)

武夷学院学报



国际标准连续出版物号: ISSN 1674-2109

国内统一连续出版物号: CN 35-1293/G4

第 43 卷 第 6 期 总第 236 期

2024 年 6 月 (月刊)

编辑委员会

顾问:	付贤智	黄汉升	兰思仁
	杨江帆	李宝银	
主任:	吴承祯		
副主任:	郑细鸣		
编委:	(以姓氏笔画为序)		
	卢道明	任宇红	刘卫群
	许亦善	李远华	李宝银
	杨昇	吴承祯	沈慧芳
	张乔根	张志雄	张国林
	张品端	陈铎	郑细鸣
	赵升云	姜景莲	姚进生
	郭翠莲	梁丽萍	雷能忠
	廖斌		

编辑部

主编:	吴承祯		
副主编:	郑细鸣	沈慧芳	陈果
责任编辑:	叶丽娜	白琳	魏琛
	马阿曼	黄超	
英文审译:	魏景春		

JOURNAL OF WUYI UNIVERSITY

目次
CONTENTS

支持向量机的电子商务用户购买行为检测
..... 周宓(70)

大学生体质健康测试压力与锻炼拖延的关系:自我控制的
中介作用
..... 王伟杰,邵华,郝思哲(75)

UC3842 的开关电源项目式教学方法应用
..... 赵玉超,江田辉(81)

工程教育认证视域下“新能源发电技术”课程教学改革与实践
..... 张春(86)

机器人应用基础实践教学
..... 阚保强(93)

体验式教学在应用型本科高校“食品化学”教学中的应用
..... 于立志,范俐,徐新丽(98)

应用型高校“光纤通信技术”课程混合式教学创新实践
..... 谢晖(104)

Schurer 型 q -Phillips 算子的逼近性质

任美英

(武夷学院 数学与计算机学院, 福建 武夷山 354300)

摘要: 引进一类保持线性函数的 Schurer 型 q -Phillips 算子, 并利用 q -微积分的相关理论研究该算子列的一些逼近性质, 得到算子列的一个 Korovkin 型收敛定理和一个 Voronovskaja 型结果, 同时给出该算子列的收敛速度的一些估计。

关键词: Schurer 型 q -Phillips 算子; q -积分; Korovich 型定理; Voronovskaja 型结果; 收敛性

中图分类号: O174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0001-06

自 1997 年 Phillips^[1]提出并研究 q -Bernstein 算子以来, q -微积分在逼近论中得到广泛的应用, 获得很多研究成果^[2-6]。Yüksel^[7]研究 q -Phillips 算子的逼近性质, Ren^[8]研究 q -Phillips 算子的统计逼近性质, 引进并研究了修正 q -Phillips 算子^[9]。Lin 等^[10]研究 Stancu 型 q -Phillips 算子。目的是引进一类保持线性函数的 Schurer 型 q -Phillips 算子, 并研究该算子的逼近性质。

引入 q -整数和 q -微积分的若干概念^[11-15]。对任意固定的实数 $q > 0$ 和非负整数 k, q -整数和 q -阶乘分别定义为

$$[k]_q = \begin{cases} \frac{1-q^k}{1-q}, & q \neq 1, \\ k, & q = 1; \end{cases}$$
$$[k]_q! = \begin{cases} [k]_q [k-1]_q \cdots [1]_q, & k \geq 1, \\ 1, & k = 0. \end{cases}$$

对非负整数 $n, k, n \geq k, q$ -二项式系数定义为

$$\begin{bmatrix} n \\ k \end{bmatrix}_q = \frac{[n]_q!}{[k]_q! [n-k]_q!}.$$

两个 q -模拟指数函数分别定义为

$$e_q(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{[n]_q!} = \frac{1}{(1-(1-q)x)_q^{\infty}}, |x| < \frac{1}{1-q}, |q| < 1;$$

$$E_q(x) = \sum_{n=0}^{\infty} q^{n(n-1)/2} \frac{x^n}{[n]_q!} = (1+(1-q)x)_q^{\infty}, |q| < 1.$$

这里 $(1+x)_q^{\infty} = \prod_{j=0}^{\infty} (1+q^j x)$, 易知

$$e_q(x)E_q(-x) = e_q(-x)E_q(x) = 1.$$

q -Jackson 积分和 q - Γ 义积分分别定义为

$$\int_0^a f(t) d_q(t) = a(1-q) \sum_{n=0}^{\infty} f(aq^n) q^n, a > 0; \int_0^{\infty/A} f(t) d_q(t) =$$

$$(1-q) \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{q^n}{A}\right) \frac{q^n}{A}, A > 0. \text{ 假设级数绝对收敛。}$$

对 $t > 0, q$ -Gamma 函数定义为

$$\Gamma_q(s) = K(A, s) \int_0^{\infty/A(1-q)} t^{s-1} e_q(-t) d_q(t). \text{ 其中:}$$

$$K(A, s) = \frac{A^s}{1+A} \left(1 + \frac{1}{A}\right) q^s (1+A)_q^{1-s}. \text{ 特别地, 对 } s \in \mathbb{N},$$

$$K(A, s) = q^{s(s-1)/2}, K(A, 0) = 1 \text{ 且 } \Gamma_q(s+1) = [s]_q \Gamma_q(s), \Gamma_q(1) = 1.$$

对 $f \in C[0, \infty), q \in (0, 1), x \in [0, \infty), n \in \mathbb{N}, q$ -Phillips

收稿日期: 2022-09-01

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2018J01428);

武夷学院科技创新发展基金项目
(2018J01428-02)。

作者简介: 任美英(1965-), 女, 汉族, 教授, 主要从事函数逼近论研究。

算子定义^[7]为

$$P_n^q(f;x)=[n]_q \sum_{k=1}^{\infty} p_{n,k}(x,q) \int_0^{\infty A(1-q)} q^{k(k-1)} p_{n,k-1}(t,q) f(t) d_q(t) + e_q(-[n]_q x) f(0), \quad (1)$$

其中:

$$p_{n,k}(x,q) = \frac{([n]_q x)^k}{[k]_q!} e_q(-[n]_q x). \quad (2)$$

对 $f \in C[0, \infty), q \in (0, 1), x \in [0, \infty), p \in N \cup \{0\}, n \in N$

引进 Schurer 型 q -Phillips 算子定义为

$$\tilde{P}_n^{q,p}(f;x)=[n+p]_q \sum_{k=1}^{\infty} p_{n+p,k}(qx,q) \int_0^{\infty A(1-q)} q^{k(k-1)} p_{n+p,k-1}(t,q) f(t) d_q(t) + e_q(-q[n+p]_q x) f(0), \quad (3)$$

其中: $p_{n,k}(x,q)$ 由式(2)给出。

1 引理

引理 1^[7] 让 $m \in N \cup \{0\}$, 对式(2)给出的 $p_{n,k}(x,q)$,

$$\text{有 } \int_0^{\infty A(1-q)} t^m p_{n,k}(t;q) d_q(t) = \frac{[k+m]_q!}{[n]_q^{m+1} [k]_q! q^{(k+m+1)(k+m)/2}}.$$

引理 2 对式(3)给出的算子 $\tilde{P}_n^{q,p}(f;x)$, 让 $e_m(t) = t^m, t=0, 1, 2, 3, 4$, 则

$$(i) \tilde{P}_n^{q,p}(e_0;x) = 1;$$

$$(ii) \tilde{P}_n^{q,p}(e_1;x) = x;$$

$$(iii) \tilde{P}_n^{q,p}(e_2;x) = \frac{x^2}{q^2} + \frac{[2]_q x}{q^2 [n+p]_q};$$

$$(iv) \tilde{P}_n^{q,p}(e_3;x) = \frac{x^3}{q^6} + \frac{[2]_q q + [4]_q}{q^6 [n+p]_q} x^2 + \frac{[2]_q [3]_q}{q^5 [n+p]_q^2} x;$$

$$(v) \tilde{P}_n^{q,p}(e_4;x) = \frac{x^4}{q^{12}} + \frac{[2]_q q^2 + [4]_q q + [6]_q}{q^{12} [n+p]_q} x^3 + \frac{[2]_q [3]_q q^2 + [2]_q [5]_q q + [4]_q [5]_q}{q^{11} [n+p]_q^2} x^2 + \frac{[2]_q [3]_q [4]_q}{q^9 [n+p]_q^3} x.$$

证明:(i)由引理 1 可知,

$$\begin{aligned} \tilde{P}_n^{q,p}(e_0;x) &= \sum_{k=1}^{\infty} q^{k(k-1)/2} p_{n+p,k}(qx,q) + e_q(-q[n+p]_q x) = \\ &= \left[\sum_{k=1}^{\infty} q^{k(k-1)/2} \frac{(q[n+p]_q x)^k}{[k]_q!} + 1 \right] e_q(-q[n+p]_q x) = \\ &= E_q(q[n+p]_q x) e_q(-q[n+p]_q x) = 1. \end{aligned}$$

(ii)由引理 1 可知,

$$\begin{aligned} \tilde{P}_n^{q,p}(e_1;x) &= \sum_{k=1}^{\infty} q^{(k^2-3k)/2} \frac{[k]_q}{[n+p]_q} p_{n+p,k}(qx,q) = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} q^{(k^2-3k)/2} \frac{[k]_q}{[n+p]_q} \frac{(q[n+p]_q x)^k}{[k]_q!} e_q(-q[n+p]_q x) = \\ &= x E_q(q[n+p]_q x) e_q(-q[n+p]_q x) = x. \end{aligned}$$

(iii)由引理 1 可知,

$$\tilde{P}_n^{q,p}(e_2;x) = \sum_{k=1}^{\infty} q^{(k^2-5k-2)/2} \frac{[k]_q [k+1]_q}{[n+p]_q^2} p_{n+p,k}(qx,q).$$

利用 $[k]_q [k+1]_q = [k]_q [k-1]_q + q^{k-1} [2]_q [k]_q$, 有

$$\begin{aligned} \tilde{P}_n^{q,p}(e_2;x) &= \frac{1}{[n+p]_q^2} \sum_{k=2}^{\infty} q^{(k^2-5k-2)/2} \frac{(q[n+p]_q x)^k}{[k-2]_q!} e_q(-q[n+p]_q x) + \\ &= \frac{[2]_q}{[n+p]_q^2} \sum_{k=1}^{\infty} q^{(k^2-3k-4)/2} \frac{(q[n+p]_q x)^k}{[k-1]_q!} e_q(-q[n+p]_q x) = \\ &= \left(\frac{x^2}{q^2} + \frac{[2]_q x}{q^2 [n+p]_q} \right) E_q(q[n+p]_q x) e_q(-q[n+p]_q x) = \\ &= \frac{x^2}{q^2} + \frac{[2]_q x}{q^2 [n+p]_q}. \end{aligned}$$

(iv)由引理 1 可知,

$$\tilde{P}_n^{q,p}(e_3;x) = \sum_{k=1}^{\infty} q^{(k^2-7k-6)/2} \frac{[k]_q [k+1]_q [k+2]_q}{[n+p]_q^3} p_{n+p,k}(qx,q).$$

利用 $[k]_q [k+1]_q [k+2]_q = [k]_q [k-1]_q [k-2]_q + (q[2]_q + [4]_q)$

$$q^{k-2} [k]_q [k-1]_q + [2]_q [3]_q q^{2k-2} [k]_q,$$

经计算可得

$$\begin{aligned} \tilde{P}_n^{q,p}(e_3;x) &= \left(\frac{x^3}{q^6} + \frac{[2]_q q + [4]_q}{q^6 [n+p]_q} x^2 + \frac{[2]_q [3]_q}{q^5 [n+p]_q^2} x \right) E_q(q[n+p]_q x) \\ &= e_q(-q[n+p]_q x) = \\ &= \frac{x^3}{q^6} + \frac{[2]_q q + [4]_q}{q^6 [n+p]_q} x^2 + \frac{[2]_q [3]_q}{q^5 [n+p]_q^2} x. \end{aligned}$$

(v)由引理 1 可知,

$$\tilde{P}_n^{q,p}(e_4; x) = \sum_{k=1}^{\infty} q^{\binom{k^2-9k-12}{2}} \frac{[k]_q [k+1]_q [k+2]_q [k+3]_q}{[n+p]_q^4} P_{n+p,k}(qx, q).$$

利用

$$\begin{aligned} & [k]_q [k+1]_q [k+2]_q [k+3]_q = \\ & [k]_q [k-1]_q [k-2]_q [k-3]_q + \\ & (q^2[2]_q + [4]_q q + [6]_q) q^{k-3} [k]_q [k-1]_q [k-2]_q + \\ & ([2]_q [3]_q q^2 + [2]_q [5]_q q + [4]_q [5]_q) q^{2k-4} [k]_q [k-1]_q + \\ & [2]_q [3]_q [4]_q q^{3k-3} [k]_q, \end{aligned}$$

经计算可得

$$\begin{aligned} \tilde{P}_n^{q,p}(e_4; x) = & \left(\frac{x^4}{q^{12}} + \frac{[2]_q q^2 + [4]_q q + [6]_q}{q^{12}[n+p]_q} x^3 + \frac{[2]_q [3]_q q^2 + [2]_q [5]_q q + [4]_q [5]_q}{q^{11}[n+p]_q^2} x^2 + \right. \\ & \left. \frac{[2]_q [3]_q [4]_q}{q^9 [n+p]_q^3} x \right) E_q(q[n+p]_q, x) e_q(-q[n+p]_q, x) = \\ & \frac{x^4}{q^{12}} + \frac{[2]_q q^2 + [4]_q q + [6]_q}{q^{12}[n+p]_q} x^3 + \frac{[2]_q [3]_q q^2 + [2]_q [5]_q q + [4]_q [5]_q}{q^{11}[n+p]_q^2} x^2 + \\ & \frac{[2]_q [3]_q [4]_q}{q^9 [n+p]_q^3} x. \end{aligned}$$

引理 3 设 $\{q_n\}$ 满足 $q_n \in (0, 1)$, $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n^n = c$

(c 是常数), 则对 $\forall x \in [0, \infty)$, 有

$$(i) \lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n} \tilde{P}_n^{q_n,p}((t-x)^2; x) = 2(1-c)x^2 + 2x;$$

$$(ii) \lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}^2 \tilde{P}_n^{q_n,p}((t-x)^4; x) = 12x^2 + 28(1-c)x^3 + 12(1-c)^2 x^4$$

证明: (i) 基于 $\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)$ 是线性算子, 根据 $[n+p]_{q_n} =$

$$\frac{1-q_n^{n+p}}{1-q_n} \text{ 和引理 2, 有}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n} \tilde{P}_n^{q_n,p}((t-x)^2; x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ [n+p]_{q_n} \left(\frac{1}{2} - 1 \right) x^2 + \frac{[2]_{q_n} x}{q_n} \right\} =$$

$$2(1-c)x^2 + 2x.$$

$$(ii) \tilde{P}_n^{q_n}((t-x)^4; x) =$$

$$\begin{aligned} & \frac{[2]_{q_n} [3]_{q_n} [4]_{q_n}}{q_n [n+p]_{q_n}^3} x + \frac{x^2}{[n+p]_{q_n}^2} \left(\frac{[2]_{q_n} [3]_{q_n} q_n^2 + [2]_{q_n} [5]_{q_n} q_n + [4]_{q_n} [5]_{q_n}}{q_n^{11}} \right. \\ & \left. \frac{4[2]_{q_n} [3]_{q_n}}{q_n} + \frac{x^3}{[n+p]_{q_n}} \left(\frac{[2]_{q_n} q_n^2 + [4]_{q_n} q_n + [6]_{q_n}}{q_n^{12}} - \frac{4([2]_{q_n} q_n + [4]_{q_n})}{q_n^6} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{6[2]_{q_n}}{q_n} \right) + \left(\frac{1}{q_n^{12}} - \frac{4}{q_n^6} + \frac{6}{q_n^2} - 3 \right) x^4 = A_{n,q_n} + B_{n,q_n} + C_{n,q_n} + D_{n,q_n}. \end{aligned}$$

基于 $q_n \in (0, 1)$, $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$, 时, $n \rightarrow \infty$ 由可得 $[n]_{q_n} \rightarrow \infty$ ^[16],

$$\text{且 } [n+p]_{q_n} = [n]_{q_n} + q_n^n [p]_{q_n}, [n]_{q_n} = \frac{1-q_n^n}{1-q_n}, \text{ 易知 } \lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}^2 A_{n,q_n} =$$

$$0, \lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}^2 B_{n,q_n} = 12x^2,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}^2 D_{n,q_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1-q_n^{n+p}}{1-q_n} \right)^2 \frac{1-4q_n^6 + 6q_n^{10} - 3q_n^{12}}{q_n^{12}} x^4 =$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1-q_n)^{n+p} \frac{-3q_n^{10} - 6q_n^9 - 3q_n^8 + 3q_n^6 + 6q_n^5 + 5q_n^4 + 4q_n^3 + 3q_n^2 + 2q_n + 1}{q_n^{12}} x^4 =$$

$$12(1-c)^2 x^4.$$

经类似计算可得, $\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}^2 C_{n,q_n} = 28(1-c)x^3$, 因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}^2 \tilde{P}_n^{q_n}((t-x)^4; x) = 12x^2 + 28(1-c)x^3 + 12(1-c)^2 x^4.$$

2 主要结果及其证明

让 $m > 0$, 令 $B_m[0, \infty) = \{f|f[0, \infty) \rightarrow R, |f(x)| \leq M_f(1+x^m)\}$,

其中 M_f 是仅依赖于 f 的正常数。构造

$$C_m[0, \infty) = \{f|f \in B_m[0, \infty) \cap C[0, \infty), \|f(x)\|_m = \sup_{x \in [0, \infty)} \frac{|f(x)|}{1+x^m}\},$$

$$C_m^*[0, \infty) = \{f|f \in C_m[0, \infty), \exists \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{1+x^m} < \infty\}.$$

对 $\delta > 0$, 函数 f 在区间 $[0, a]$ ($a > 0$) 上的连续模定义

$$\text{为: } \omega_\delta(f, \delta) = \sup_{|t-x| \leq \delta} \sup_{t \in [0, a]} |f(t) - f(x)|.$$

当 $f \in C_m[0, \infty)$, 有 $\lim_{\delta \rightarrow 0^+} \omega_\delta(f, \delta) = 0$.

下面给出算子列 $\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)$ 的 Korovkin 型定理。

定理 1 设 $q_n \in (0,1)$, 则对任意 $f \in C_2^*[0, \infty)$, 序列 $\{\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)\}$ 在区间 $[0, A] (A > 0)$ 上一致收敛于 f 当且仅当 $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$ 。

证明: 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$ 。对固定的 $A > 0$, 考虑格同态 $T_A: C[0, \infty) \rightarrow C[0, A]$ 满足 $T_A(f) = f|_{[0, A]}$, 则对 $e_m(t) = t^m, m = 0, 1, 2$, 可知 $T_A(\tilde{P}_n^{q,p}(e_m; \cdot))$ 在 $[0, A]$ 上一致收敛于 $T_A(t^m), m = 0, 1, 2$ 。由文献[17]中命题 4.2.5(6)的证明知, $f \in C_2^*[0, \infty), C[0, 1]$ 与同构, 且集合 $\{1, t, t^2\}$ 是 $C_2^*[0, \infty)$ 中的 Korovkin 集合。因此, 对 $f \in C_2^*[0, \infty)$, 利用通常的 Korovkin 型性质^[17], 由 $T_A(\tilde{P}_n^{q,p}(e_m; x))$ 在 $[0, A]$ 上一致收敛于 $T_A(x^m), m = 0, 1, 2$, 可得 $\{\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)\}$ 在 $[0, A]$ 上一致收敛于 f 。

另一方面, 若对 $f \in C_2^*[0, \infty)$, 序列 $\{\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)\}$ 在 $[0, A]$ 上一致收敛于 f , 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$ 。若不然, $q_n \in (0, 1)$, 则必存在一个子列 $\{q_{n_k}\} \subset (0, 1)$, 使得 $\lim_{k \rightarrow \infty} q_{n_k} = q_0 \in (0, 1)$, 于是

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{[n_k + p]_{q_{n_k}}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1 - q_{n_k}}{1 - q_{n_k + p}} = 1 - q_0。 从而有$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\tilde{P}_{n_k}^{q_{n_k}, p}(t^2; x) - x^2) = \left(\frac{1}{2} - 1\right)x^2 + \frac{1 - q_0^2}{2}x \neq 0。$$

这表明序列 $\{\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)\}$ 在 $[0, A]$ 上非一致收敛于 f , 与已知矛盾。因此, $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$, 定理得证。

由定理 1, 可以得到算子列 $\{\tilde{P}_n^{q,p}(f; x)\}$ 的 Voronovskaja 型结果。

定理 2 设序列 $\{q_n\}$ 满足 $q_n \in (0, 1), \lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$ 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n^n = c$ (c 是常数), 则对任意 $f \in C_2^*[0, \infty)$ 使得 $f, f'' \in C_2^*[0, \infty)$ 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}(f; x) - f(x)) = [(1-c)x + 1]xf''(x)$ 。

证明: 让 $f, f', f'' \in C_2^*[0, \infty)$ 且 $x \in [0, \infty)$ 固定。利用泰勒

公式有 $f(t) - f(x) = f'(x)(t-x) + \frac{f''(x)}{2}(t-x)^2 + \psi(t, x)(t-x)^2$, 其中 $\psi(\cdot, x) \in C_2^*([0, \infty))$ 且 $\psi(t, x) \rightarrow 0 (t \rightarrow x)$ 。从而由引理 2 可得

$$[n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}(f; x) - f(x)) = \frac{f''(x)}{2}[n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}((t-x)^2; x)) + [n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}(\psi(t, x)(t-x)^2; x))。 (4)$$

由 Schwartz 不等式, 有

$$[n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}(\psi(t, x)(t-x)^2; x)) \leq \sqrt{\tilde{P}_n^{q,p}(\psi^2(t, x); x)} \cdot \sqrt{[n+p]_{q_n}^2(\tilde{P}_n^{q,p}((t-x)^4; x))}。 (5)$$

又注意到 $\psi^2(x, x) = 0$ 且 $\psi^2(\cdot, x) \in C_2^*[0, \infty)$, 因此, 由已知 $\lim_{n \rightarrow \infty} q_n = 1$ 及定理 1 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{P}_n^{q,p}(\psi^2(t, x); x) = \psi^2(x, x) = 0。 (6)$$

于是, 结合式(5)、式(6)及引理 3(ii), 可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}(\psi(t, x)(t-x)^2; x)) = 0。 (7)$$

从而由式(4)、式(7)及引理 3(i), 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} [n+p]_{q_n}(\tilde{P}_n^{q,p}(f; x) - f(x)) = [(1-c)x + 1]xf''(x)。 定理得证。$$

定理 3 让 $f \in C_2^*[0, \infty), q \in (0, 1), \omega_{a+1}(f, \delta)$ 是函数 f 在区间 $[0, a+1] (a > 0)$ 上的连续模, 则

$$\|\tilde{P}_n^{q,p}(f; \cdot) - f\|_{C[0, a]} \leq 6M_f(1+a^2)\delta_n^{q,p}(a) + 2\omega_{a+1}(f, \sqrt{\delta_n^{q,p}(a)}),$$

其中:

$$\delta_n^{q,p}(a) = \left(\frac{1}{q^2} - 1\right)a^2 + \frac{[2]_q a}{q^2[n+p]_q}, \|f\|_{C[0, a]} = \max\{|f(x)|, x \in [0, a]\}。$$

证明: 对 $x \in [0, a]$ 和 $t > a+1$, 因为 $t-x > 1$, 所以

$$|f(t) - f(x)| \leq M_f(2+x^2+t^2) \leq M_f(2+3x^2+2(t-x)^2) \leq 6M_f(1+a^2)(t-x)^2。 (8)$$

对 $x \in [0, a]$ 和 $0 \leq t \leq a+1$, 有

$$|f(t) - f(x)| \leq \omega_{a+1}(f, |t-x|) \leq \left(1 + \frac{|t-x|}{\delta}\right)\omega_{a+1}(f, \delta)。 (9)$$

因此, 由式(8)(9)知, 对 $x \in [0, a]$ 和 $t \geq 0$, 有

$$|f(t)-f(x)| \leq 6M_f(1+a^2)(t-x)^2 + (1 + \frac{|t-x|}{\delta})\omega_{a+1}(f,\delta).$$

从而,对 $x \in [0,a]$ 和 $q \in (0,1)$,由 Schwartz 不等式可得

$$\left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq \tilde{P}_n^{q,p}(|f(t)-f(x)|;x) \leq 6M_f(1+a^2)\tilde{P}_n^{q,p}((t-x)^2;x) + \omega_{a+1}(f,\delta)(1 + \frac{1}{\delta} \sqrt{\tilde{P}_n^{q,p}((t-x)^2;x)}),$$

且

$$\tilde{P}_n^{q,p}((t-x)^2;x) = (\frac{1}{q^2}-1)x^2 + \frac{[2]_q x}{q^2[n+p]_q} \leq (\frac{1}{q^2}-1)a^2 + \frac{[2]_q a}{q^2[n+p]_q}.$$

$$\text{记 } \delta_n^{q,p}(a) = (\frac{1}{q^2}-1)a^2 + \frac{[2]_q a}{q^2[n+p]_q}, \text{ 则}$$

$$\left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq 6M_f(1+a^2)\delta_n^{q,p}(a) + \omega_{a+1}(f,\delta)(1 + \frac{1}{\delta} \sqrt{\delta_n^{q,p}(a)}).$$

取 $\delta = \sqrt{\delta_n^{q,p}(a)}$, 则

$$\left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq 6M_f(1+a^2)\delta_n^{q,p}(a) + 2\omega_{a+1}(f, \sqrt{\delta_n^{q,p}(a)}), \text{ 定理得证。}$$

记 $C_B[0,\infty) = \{f | f \text{ 在 } [0,\infty) \text{ 上连续有界}\}$, 对 $x \in [0,\infty)$ 和 $a \in (0,1)$, a 阶 Lipschitz 型极大函数定义^[18]为

$$\tilde{\omega}_a(f;x) = \sup_{t \neq x, t \in [0,\infty)} \frac{|f(t)-f(x)|}{|t-x|^a}. \quad (10)$$

借助 a 阶 Lipschitz 型极大函数, 给出算子列 $\{\tilde{P}_n^{q,p}(f;x)\}$ 的局部估计。

定理 4 让 $a \in (0,1)$, $f \in C_B[0,\infty)$, 则对 $\forall x \in [0,\infty)$,

$$\text{有 } \left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq \tilde{\omega}_a(f;x) \left[(\frac{1}{q^2}-1)x^2 + \frac{[2]_q x}{q^2[n+p]_q} \right]^{\frac{a}{2}}.$$

证明: 利用(10)式, 有 $|f(t)-f(x)| \leq \tilde{\omega}_a(f;x) |t-x|^a$, 从而有

$$\left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq \tilde{P}_n^{q,p}(|f(t)-f(x)|;x) \leq \tilde{\omega}_a(f;x) \tilde{P}_n^{q,p}(|t-x|^a;x).$$

取 $r = \frac{2}{a}$, $\frac{1}{s} = 1 - \frac{1}{r}$, 利用 Hölder 不等式, 有

$$\left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq \tilde{\omega}_a(f;x) \tilde{P}_n^{q,p}(|t-x|^2;x)^{\frac{a}{2}}.$$

由引理 2 知, $\tilde{P}_n^{q,p}((t-x)^2;x) = (\frac{1}{q^2}-1)x^2 + \frac{[2]_q x}{q^2[n+p]_q}$, 因此

$$\left| \tilde{P}_n^{q,p}(f;x)-f(x) \right| \leq \tilde{\omega}_a(f;x) \left[(\frac{1}{q^2}-1)x^2 + \frac{[2]_q x}{q^2[n+p]_q} \right]^{\frac{a}{2}}, \text{ 定理得}$$

证。

参考文献:

- [1] PHILLIPS G M. Bernstein polynomials based on the q -integers[J]. Annals of Numerical Mathematics, 1997, 4:511-518.
- [2] AGRATINI O, NOWAK G. On a generalization of Bleimann, Butzer and Hahn operators based on q -integers [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53(5/6):699-706.
- [3] ÖRKÜ M, DOĞRU O. Statistical approximation of a kind of Kantorovich type q -Szász-Mirakjan operators [J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 2012, 75 (5):2874-2882.
- [4] KAJLA A, ISPIR N, AGRAWAL P N, et al. q -Bernstein-Schurer-Durrmeyer type operators for functions of one and two variables [J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 275:372-385.
- [5] HERDEM S, BÜYÜKYAZICI I. Weighted approximation by q -Ibragimov-Gadjiev operators [J]. Mathematical Communications, 2020, 25:201-212.
- [6] 任美英. 一类保持线性函数的算子的逼近[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2022, 8(4):462-465.
- [7] YÜKSEL I. Approximation by q -Phillips operators[J]. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 2011, 40(2):191-201.
- [8] REN Meiyang. Weighted statistical approximation properties of the q -Phillips operators [C]// CAO B Y, NASSERI H. Fuzzy Information & Engineering and Operations Research & Management. Advances in Intelligent Systems and Computing. Berlin: Springer, 2014:375-383. DOI:10.1007/978-3-642-38667-1_37.
- [9] 任美英, 曾亮. 修正 q -Phillips 算子的逼近性质[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(1):16-20.
- [10] LIN Q, QI R. Stancu type generalization of the q -Phillips operators[J]. Numerical Algorithms, 2016, 72:181-193.
- [11] SOLE A D, KAC V. On Integral representations of q -gamma and q -beta functions[J]. Mathematics, 2003, 16(1):11-29. DOI:

- 10.48550/arXiv.math/0302032.
- [12] GASPER G, RAHMAN M. Basic hypergeometric series[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [13] JACKSON F H. On q -definite integrals[J]. Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics, 1910, 41: 193–203.
- [14] KAC V, CHEUNG P. Quantum Calculus [M]. New York: Springer-Verlag, 2002.
- [15] KOELINK H T, KOORNWINDER T H. q -special functions, a tutorial[J]. Amer Math Soc (Providence, RI), 1994(1): 46–128. DOI: 10.48550/arXiv.math/9403216.
- [16] VIDENSKII V S. On q -Bernstein polynomials and related positive linear operators (in Russian)[J]. Problems of Modern Mathematics and Mathematical Education, 2004, 118–126.
- [17] ALTOMARE F, CAMPITI M. Korovkin-type approximation theory and its applications[A]. In: de Gruyter Studies in Mathematics, Berlin: Walter de Gruyter & Co, 1994(17): xii, 627.
- [18] LENZE, B. On Lipschitz-type maximal functions and their smoothness spaces[J]. Indagationes Mathematicae (Proceedings), 1988, 91(1): 53–63.

Approximation Properties of Schurer Type q -Phillips Operators

REN Meiyang

(School of Mathematics and Computer Science, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300)

Abstract: Since 1997 Phillips G M proposed and studied the q -Bernstein operators, q -calculus has been widely used in approximation theory. In this paper, we introduce a class of Schurer type q -Phillips operators which preserve linear functions, and study some approximation properties of the operators by using the relevant theory of q -calculus, a Korovkin type convergence theorem and a Voronovskaja type result are obtained for the operators, and some estimates of the convergence rate are given.

Key words: schurer type q -Phillips operators; q -integral; Korovich type theorem; Voronovskaja type result; convergence

(责任编辑: 叶丽娜)

超 Heisenberg-Virasoro 代数的 Hom-李超代数结构

黄忠铤

(武夷学院 数学与计算机学院, 福建 武夷山 354300)

摘要: Hom-李超代数是 Hom-李代数的推广演化发展而来, Hom-李代数是一类同时满足反对称和 Hom-Jacobi 等式的非结合代数。试图进一步确定超 Heisenberg-Virasoro 代数上的 Hom-李超代数结构, 证明超 Heisenberg-Virasoro 代数上的 Hom-李超代数结构是非平凡的。

关键词: 超 Heisenberg-Virasoro 代数; Hom-李超代数; 偶超空间自同态

中图分类号: O152.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0007-05

Hom-李代数^[1]是指一类非结合代数, 且同时满足反对称和 Hom-Jacobi 等式, 是李代数概念的其中一种推广的代数形式。提出 Hom-李代数概念主要源于 Hartwig^[1]对 Witt 代数和 Virasoro 代数的形变及其理论基础关系的进一步研究。Hom-李代数与变形的矢量场, Yang-Baxter 方程, 辫子群表示及量子群有关。关于 Hom-李代数结构问题的理论与研究及方法都有很多。Chen 等^[2]讨论有限维李代数的 Borel 子代数上的正则 Hom-李结构。陈秋帆等^[3]研究得到扭 Schrödinger-Virasoro 代数上存在非平凡的 Hom-李代数结构。

Ammar 等^[4]将 Hom-李代数推广得到 Hom-李超代数。因此 Hom-李超代数便开始逐渐更广泛深入的加以研究。Cao 等^[5]得到在有限维单李超代数上仅有平凡 Hom-李超代数。Ammar 等^[6-7]研究 Hom-李超代数的表示理论和同调理论, 并给出可以使 Hom-Lie 超代

数成为完备的 Hom-Lie 超代数的充分条件, 并由此条件建立完备的 Hom-Lie 超代数族。SUN 等^[8]研究 Hom-李超代数上的双导子和交换线性映射。Farhangdoost 等^[9]研究交感 Hom-李超代数。Hou 等^[10]研究 Hom-李超代数上的积结构和复结构, 给出了积结构和复结构存在的充要条件, 并给出一些特殊的积结构和复结构。黄忠铤^[11]确定 Ramond $N=2$ 超共形代数上的 Hom-李超代数结构是平凡的。

关于超 Heisenberg-Virasoro 代数的研究, Chen 等^[12]研究一类超 Heisenberg-Virasoro 代数上的模, Li 等^[13]研究超 Heisenberg-Virasoro 代数上的双导子, 并发现超 Heisenberg-Virasoro 代数存在非内超斜对称超导子。Adamovi 等^[14]研究 $N=1$ 超 Heisenberg-Virasoro 顶点代数在零级的表示理论。

证明超 Heisenberg-Virasoro 代数存在非平凡的 Hom-李超代数结构。

收稿日期: 2023-01-13

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2022J011203); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JT180559)。

作者简介: 黄忠铤(1973-), 女, 汉族, 教授, 主要从事李代数的研究。

1 预备知识

\mathbf{Z} 表示整数集, \mathbf{Z}^* 表示非零整数集, \mathbf{C} 表示复数集, \mathbf{C}^* 表示非零复数集。所有的代数(向量空间)都定义在复数集上。

定义 1.1^[5] 一个 Hom-李超代数是一个三元组 $(V, [,], \sigma)$, 其中 V 是一个超空间, 双线性映射 $[,] : V \times V \rightarrow V, \sigma : V \rightarrow V$ 是一个偶超空间自同态, 对任意 $x, y, z \in V$ 满足

$$\begin{aligned}
 [x, y] &= -(-1)^{|x||y|} [y, x], \\
 (-1)^{|x||z|} [\sigma(x), [y, z]] + (-1)^{|y||x|} [\sigma(y), [z, x]] + (-1)^{|z||y|} [\sigma(z), [x, y]] &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

引理 1.1^[15] Virasoro 代数 Vir 上的任一自同态 $\sigma : \text{Vir} \rightarrow \text{Vir}$ 都有

$$\begin{aligned}
 \sigma(L_n) &= \frac{1}{k} a^n L_{kn} + \delta_{n,0} \frac{1-k^2}{24k} c, \\
 \sigma(c) &= kc,
 \end{aligned}$$

其中 $k \in \mathbf{Z}^*, a \in \mathbf{C}$.

定义 2.2^[13] 超 Heisenberg-Virasoro 代数 (记为 R), 是一个 \mathbf{Z}_2 阶化李超代数且 $R = R_{\bar{0}} + R_{\bar{1}}, R_{\bar{0}} = \text{span}_c \{L_m, I_n, c \mid m, n \in \mathbf{Z}\}, R_{\bar{1}} = \text{span}_c \{G_r \mid r \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}\}$, 有如下李括号:

$$\begin{aligned}
 [L_m, L_n] &= (n-m)L_{m+n} + \frac{1}{12}(m^3-m)\delta_{m+n,0} c, [L_m, G_r] = rG_{m+r}, \\
 [L_m, I_n] &= nI_{m+n}, [G_r, G_s] = 2I_{r+s}, \\
 [I_m, I_n] &= [I_m, G_r] = 0, n, m \in \mathbf{Z}, r \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}.
 \end{aligned}$$

2 超 Heisenberg-Virasoro 代数 R 上的偶超空间自同态

确定超 Heisenberg-Virasoro 代数 R 上的偶超空间自同态环。

引理 2.1 超 Heisenberg-Virasoro 代数 R 上的任一非零偶超空间自同态 ϕ , 则有

$$\phi(G_s) \in \text{span}_c \{G_r \mid r \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}\}, \forall s \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}.$$

定理 2.1 超 Heisenberg-Virasoro 代数 R 上的任一非零偶超空间自同态 ϕ 都有

$$\begin{aligned}
 \phi(L_n) &= \frac{1}{k} a^n L_{kn} + (bn+\gamma) a^n I_{kn} + \delta_{n,0} \frac{1-k^2}{24k} c, \phi(I_n) = a^n g_n I_{kn}, \\
 \phi(G_r) &= a^r g_r G_{kr}, \phi(c) = kc.
 \end{aligned}$$

其中 $n \in \mathbf{Z}, r \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z}^*, a, g_n \in \mathbf{C}^*, b, \gamma \in \mathbf{C}$.

证明 设 ϕ 是 R 上的任一非零偶超空间自同

态。根据引理 1.1, 首先设

$$\phi(L_n) \equiv \frac{1}{k} a^n L_{kn} + f_n I_{kn} \pmod{\mathbf{C}c}, \phi(I_n) \equiv g_n I_{kn} \pmod{\mathbf{C}c},$$

其中 $f_n, g_n \in \mathbf{C}, k \in \mathbf{Z}^*, a \in \mathbf{C}^*, n \in \mathbf{Z}$.

2.1 证 $\phi(L_n) \equiv \frac{1}{k} a^n L_{kn} + (bn+\gamma) a^n I_{kn} \pmod{\mathbf{C}c}$

因为 $\phi[L_m, L_n] = [\phi(L_m), \phi(L_n)]$, 且

$$\begin{aligned}
 \phi[L_m, L_n] &\equiv (n-m)\phi(L_{m+n}) \pmod{\mathbf{C}c} \equiv \\
 &(n-m) \frac{1}{k} a^{m+n} L_{k(m+n)} + f_{m+n} I_{k(m+n)} \pmod{\mathbf{C}c}, \\
 [\phi(L_m), \phi(L_n)] &\equiv [\frac{1}{k} a^m L_{km} + f_m I_{km}, \frac{1}{k} a^n L_{kn} + f_n I_{kn}] \pmod{\mathbf{C}c} \equiv \\
 &\frac{1}{k^2} a^{m+n} [L_{km}, L_{kn}] + \frac{1}{k} a^n f_n [L_{km}, I_{kn}] + \\
 &\frac{1}{k} a^m f_m [I_{km}, L_{kn}] + f_m f_n [I_{km}, I_{kn}] \pmod{\mathbf{C}c} \equiv \\
 &(\frac{1}{k} a^{m+n} (n-m) L_{k(m+n)} + (a^n n f_n - a^m m f_m) I_{k(m+n)}) \pmod{\mathbf{C}c},
 \end{aligned}$$

可得

$$\begin{aligned}
 (n-m) \frac{1}{k} a^{m+n} L_{k(m+n)} + f_{m+n} I_{k(m+n)} &\equiv \\
 (\frac{1}{k} a^{m+n} (n-m) L_{k(m+n)} + (a^n n f_n - a^m m f_m) I_{k(m+n)}) &\pmod{\mathbf{C}c},
 \end{aligned}$$

所以 $(n-m)f_{m+n} = a^n n f_n - a^m m f_m$ 。取 $m=1$, 有 $(n-1)f_{n+1} = a^n n f_n - a^1 f_1$, 因而 $(n-1) \frac{f_{n+1}}{a^{n+1}} = n \frac{f_n}{a^n} - \frac{f_1}{a}$ 。

再令 $h_n = \frac{f_n}{a^n}$ 代入, 故 $(n-1)h_{n+1} = nh_n - h_1$ 。设 h_n 是关于 n 的多项式, 得到 $h_n = bn + \gamma$, 其中 $b, \gamma = h_1 - b \in \mathbf{C}$ 为常数。从而 $f_n = (bn + \gamma) a^n$ 。所以

$$\phi(L_m) \equiv \frac{1}{k} a^m L_{km} + (bm+\gamma) a^m I_{km} \pmod{\mathbf{C}c},$$

其中 $a \in \mathbf{C}^*, b, \gamma \in \mathbf{C}, k \in \mathbf{Z}^*, n \in \mathbf{Z}$ 。

2.2 证 $\phi(I_n) \equiv a^n g_n I_{kn} \pmod{\mathbf{C}c}$

因为 $\phi[L_m, I_n] = [\phi(L_m), \phi(I_n)]$, 又有

$$\begin{aligned}
 \phi[L_m, I_n] &\equiv n\phi(I_{m+n}) \pmod{\mathbf{C}c} \equiv ng_{m+n} I_{k(m+n)} \pmod{\mathbf{C}c}, \\
 [\phi(L_m), \phi(I_n)] &\equiv [\frac{1}{k} a^m L_{km} + (bm+\gamma) a^m I_{km}, g_n I_{kn}] \pmod{\mathbf{C}c} \equiv \\
 &[\frac{1}{k} a^m I_{km}, g_n I_{kn}] \pmod{\mathbf{C}c} \equiv \\
 &a^m g_n I_{k(m+n)} \pmod{\mathbf{C}c},
 \end{aligned}$$

所以 $ng_{m+n} I_{k(m+n)} \equiv a^m g_n I_{k(m+n)} \pmod{\mathbf{C}c}$ 。可得 $g_{m+n} = a^m g_n$ 。令

$n=0$, 有 $g_n = a^n g_0$ 从而 $\phi(I_n) = a^n g_0 I_{kn} \pmod{\mathbf{C}c}$, 其中 $g_0 \in \mathbf{C}^*$.

2.3 求 $\phi(L_0), \phi(c)$

当 $n \neq 0$ 时, 依据 $\phi[L_n, L_{-n}] = [\phi(L_n), \phi(L_{-n})]$, 及

$$\phi[L_n, L_{-n}] = -2n\phi(L_0) + \frac{n^3 - n}{12}\phi(c),$$

$$[\phi(L_n), \phi(L_{-n})] = -\frac{2n}{k}L_0 + \frac{k^3 n^3 - kn}{12k^2}c - 2n\gamma I_0,$$

解得

$$-2n\phi(L_0) + \frac{n^3 - n}{12}\phi(c) = -\frac{2n}{k}L_0 + \frac{k^3 n^3 - kn}{12k^2}c - 2n\gamma I_0. \quad (2)$$

令 $n=1$, 有

$$\phi(L_0) = \frac{1}{k}L_0 + \gamma I_0 + \frac{1 - k^2}{24k}c. \quad (3)$$

将 $\phi(L_0)$ 代入(2)式, 整理得

$$\begin{aligned} (-2n) \left(\frac{1}{k}L_0 + \frac{1 - k^2}{24k}c + \gamma I_0 \right) + \frac{n^3 - n}{12}\phi(c) = \\ -\frac{2n}{k}L_0 + \frac{c}{12k}(k^2 n^3 - n) - 2\gamma n I_0. \end{aligned}$$

取 $n=2$, 所以

$$\phi(c) = kc. \quad (4)$$

2.4 求 $\phi(I_0)$

当 $n \neq 0$ 时, 由 $\phi[L_n, I_{-n}] = [\phi(L_n), \phi(I_{-n})]$, 及

$$\phi[L_n, I_{-n}] = \phi(-nI_0) = -n\phi(I_0),$$

$$[\phi(L_n), \phi(I_{-n})] = \left[\frac{1}{k}a^n L_{kn} + (bn + \gamma)a^n I_{kn}, a^{-n} g_0 I_{-n} \right] = -n g_0 I_0,$$

解得 $n\phi(I_0) = n g_0 I_0$. 当 $n=1$ 时, 可得

$$\phi(I_0) = g_0 I_0. \quad (5)$$

2.5 求 $\phi(G_r)$

设 $\phi(G_{\frac{1}{2}+n}) = \sum_{p \in \mathbf{Z}} h_{n,p} G_{\frac{1}{2}+p}$. 因为

$$\phi[L_0, G_{\frac{1}{2}+n}] = \left(\frac{1}{2} + n \right) \phi \left(G_{\frac{1}{2}+n} \right) = \left(\frac{1}{2} + n \right) \sum_{p \in \mathbf{Z}} h_{n,p} G_{\frac{1}{2}+p},$$

$$[\phi(L_0), \phi(G_{\frac{1}{2}+n})] = \left[\frac{1}{k}L_0 + \gamma I_0, \sum_{p \in \mathbf{Z}} h_{n,p} G_{\frac{1}{2}+p} \right] =$$

$$\frac{1}{k} \sum_{p \in \mathbf{Z}} h_{n,p} \left(\frac{1}{2} + p \right) G_{\frac{1}{2}+p},$$

依据 $\phi[L_0, G_{\frac{1}{2}+n}] = [\phi(L_0), \phi(G_{\frac{1}{2}+n})]$, 解得

$$\left(\frac{1}{2} + n \right) h_{n,p} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{2} + p \right) h_{n,p}.$$

因此 $\frac{1}{2} + n - \frac{1}{2k} - \frac{p}{k} = 0$, 所以 $p = k \left(\frac{1}{2} + n - \frac{1}{2k} \right)$, 从而

$$\phi(G_{\frac{1}{2}+n}) = h_{n,p} G_{\frac{1}{2}+p} = h_{n,p} G_{\frac{1}{2} + k \left(\frac{1}{2} + n - \frac{1}{2k} \right)} = h_{n,p} G_{k \left(\frac{1}{2} + n \right)}.$$

$$\text{记 } \phi(G_{\frac{1}{2}+n}) = h_n G_{k \left(\frac{1}{2} + n \right)}.$$

$$\text{又因为 } \phi \left[G_{\frac{1}{2}+p}, G_{\frac{1}{2}+q} \right] = \left[\phi \left(G_{\frac{1}{2}+p} \right), \phi \left(G_{\frac{1}{2}+q} \right) \right], \text{ 而}$$

且

$$\phi \left[G_{\frac{1}{2}+p}, G_{\frac{1}{2}+q} \right] = 2\phi(I_{1+p+q}) = 2a^{1+p+q} g_0 I_{k(1+p+q)},$$

$$\left[\phi \left(G_{\frac{1}{2}+p} \right), \phi \left(G_{\frac{1}{2}+q} \right) \right] = \left[h_p G_{k \left(\frac{1}{2} + p \right)}, h_q G_{k \left(\frac{1}{2} + q \right)} \right] = 2h_p h_q I_{k(p+q+1)},$$

整理可得

$$h_p h_q = a^{p+q+1} g_0. \quad (6)$$

在(6)中取 $p=q=0$, 有 $h_0^2 = a g_0$, 得到 $h_0 = \pm (a g_0)^{\frac{1}{2}}$. 在

(6)中取 $q=0$, 解得

$$h_p = a^p h_0 = \pm a^{p + \frac{1}{2}} g_0^{\frac{1}{2}},$$

故

$$\phi \left(G_{\frac{1}{2}+n} \right) = h_n G_{k \left(\frac{1}{2} + n \right)} = \pm a^{n + \frac{1}{2}} g_0^{\frac{1}{2}} G_{k \left(\frac{1}{2} + n \right)},$$

即 $\phi(G_r) = \pm a^r g_0^{\frac{1}{2}} G_{kr}$, 其中 $n \in \mathbf{Z}, r \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}, a, g_0 \in \mathbf{C}^*$.

定理得证。

3 超 Heisenberg-Virasoro 代数上的 Hom-李超代数结构

确定超 Heisenberg-Virasoro 代数上的 Hom-李超代数结构。

定理 3.1 设 σ 是超 Heisenberg-Virasoro 代数 R 上任一非零的偶超空间的自同态。如果李代数 (R, σ) 是一个 Hom-李超代数, 则 σ 有

$$\sigma(L_n) = L_n + \gamma I_n, \quad \sigma(I_n) = I_n, \quad \sigma(G_r) = G_r, \quad \sigma(c) = c,$$

其中 $n \in \mathbf{Z}, r \in \frac{1}{2} + \mathbf{Z}, \gamma \in \mathbf{C}$. 从而超 Heisenberg-Virasoro 代数存在非平凡的 Hom-李超代数结构。

证明 设 σ 是 R 上的任一非零的偶超空间自同态, 如果 (R, σ) 是一个 Hom-李超代数, 则满足(1)式。

3.1 证 $\sigma(L_n) = L_n + \gamma I_n$

由(1)式, 对任意 $m, n, p \in \mathbf{Z}$, 有

$$\begin{aligned}
 &(-1)^{|L_n||L_p|}[\sigma(L_m), [L_n, L_p]] + (-1)^{|L_n||L_m|}[\sigma(L_n), [L_p, L_m]] + \\
 &(-1)^{|L_p||L_n|}[\sigma(L_p), [L_m, L_n]] = 0. \\
 &\text{可得} \\
 &\frac{1}{k} a^m(p-n)(n+p-km)L_{km+np} + \frac{1}{k} a^n(m-p)(m+p-kn)L_{kn+pm} + \\
 &\frac{1}{k} a^p(n-m)(m+n-kp)L_{kp+mn} + (bm+\gamma)a^m(-km)(p-n)L_{km+np} + \\
 &(bn+\gamma)a^n(-kn)(m-p)L_{kn+pm} + (bp+\gamma)a^p(-kp)(n-m)L_{kp+mn} = \\
 &0.
 \end{aligned}$$

由 m, n, p 的任意性, 因此 $k=1$ 。从而

$$\begin{aligned}
 &a^m(p-n)(n+p-m) + a^n(m-p)(p+m-n) + \\
 &a^p(n-m)(m+n-p) = 0, \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &(bm+\gamma)a^m(p-n)(-m) + (bn+\gamma)a^n(m-p)(-n) + \\
 &(bp+\gamma)a^p(n-m)(-p) = 0. \quad (8)
 \end{aligned}$$

式(7)中令 $m=3, n=1, p=2$, 解得 $4a-4a^2=0$ 。因为 $a \neq 0$, 可得 $a=1$ 。代入式(8),

$$(bm+\gamma)(p-n)m + (bn+\gamma)(m-p)n + (bp+\gamma)(n-m)p = 0. \quad (9)$$

式(9)中取 $m=0, n=1, p=-1$, 整理得 $-(b+\gamma) + (-b+\gamma) = 0$, 所以 $b=0$ 。在式(9)中取 $b=0$, 有

$$\gamma(p-m)m + \gamma(m-p)n + \gamma(n-m)p = 0,$$

此式恒成立。故

$$\sigma(L_n) = L_n + \gamma I_n.$$

3.2 证 $\sigma(I_n) = I_n$

由于

$$\begin{aligned}
 &(-1)^{|L_n||L_p|}[\sigma(L_m), [L_n, I_p]] + (-1)^{|L_n||L_m|}[\sigma(L_n), [I_p, L_m]] + \\
 &(-1)^{|L_p||L_n|}[\sigma(I_p), [L_m, L_n]] = 0. \quad (10)
 \end{aligned}$$

因为 $\sigma(I_n) = a^n g_0 I_{kn}$, 由(10)整理可得

$$[L_m + \gamma I_m, p I_{np}] + [L_n + \gamma I_n, -p I_{mp}] + [a^n g_0 I_{kp}, (n-m) L_{m+n}] = 0,$$

所以

$$p(n+p)I_{m+np} - p(p+m)I_{mp+ni} + (m-n)kp a^n g_0 I_{kp+m+n} = 0, \quad (11)$$

因此 $k=1$ 。代入(11)整理可得

$$p(n+p) - p(p+m) + (m-n)g_0 a^n = 0,$$

化简为 $p(m-n)(g_0 a^n - 1) = 0$ 。因为 m, n, p 的任意性, 所以 $g_0 a^n = 1$ 。取 $p=0$, 因此 $g_0 = 1$, 从而 $a=1$ 。故 $\sigma(I_n) = I_n$ 。

3.3 讨论 $\sigma(G_r)$

情形 1 当 $\phi(G_r) = a^r g_0 \frac{1}{2} G_{kr}$ 时。由

$$(-1)^{|L_n||G_r|}[\sigma(L_m), [G_r, G_s]] + (-1)^{|G_r||L_n|}[\sigma(G_r), [G_s, L_m]] +$$

$$(-1)^{|G_r||G_s|}[\sigma(G_s), [L_m, G_r]] = 0,$$

所以

$$[L_m + \gamma I_m, 2I_{r+s}] + \left[a^r g_0 \frac{1}{2} G_{kr}, -s G_{m+s} \right] - \left[a^s g_0 \frac{1}{2} G_{ks}, r G_{m+r} \right] = 0,$$

整理为

$$(r+s)I_{m+r+s} - a^r g_0 \frac{1}{2} s I_{kr+m+s} - a^s g_0 \frac{1}{2} r I_{ks+m+r} = 0. \quad (12)$$

因为 m, r, s 的任意性, 可得 $k=1$ 。从而 $r+s - a^r g_0 \frac{1}{2} s - a^s g_0 \frac{1}{2} r = 0$,

即 $(r+s) \left(1 - a^r g_0 \frac{1}{2} \right) = 0$ 。由 r, s 的任意性, 故 $a^r g_0 = 1$ 。由

r 的任意性, 从而 $a=1, g_0=1$ 。

由

$$(-1)^{|L_n||G_r|}[\sigma(L_m), [L_n, G_r]] + (-1)^{|L_n||L_m|}[\sigma(L_n), [G_r, L_m]] +$$

$$(-1)^{|G_r||L_n|}[\sigma(G_r), [L_m, L_n]] = 0,$$

有

$$[L_m + \gamma I_m, r G_{nr}] + [L_n + \gamma I_n, -r G_{mr}] + \left[a^r g_0 \frac{1}{2} G_{kr}, -(n-m) L_{m+s} \right] = 0,$$

所以有

$$r(n+r)G_{m+nr} - r(m+r)G_{m+r} - (n-m)kr a^r g_0 \frac{1}{2} G_{kr+m+n} = 0.$$

由 m, n, r 的任意性, 得到 $k=1$ 。因此有

$$r(n+r) - r(m+r) - (n-m)r = 0,$$

此式恒成立。

情形 2 当 $\phi(G_r) = -a^r g_0 \frac{1}{2} G_{kr}$ 时。

由

$$(-1)^{|L_n||G_r|}[\sigma(L_m), [G_r, G_s]] + (-1)^{|G_r||L_n|}[\sigma(G_r), [G_s, L_m]] +$$

$$(-1)^{|G_r||G_s|}[\sigma(G_s), [L_m, G_r]] = 0,$$

所以

$$[L_m + \gamma I_m, 2I_{r+s}] + \left[-a^r g_0 \frac{1}{2} G_{kr}, -s G_{m+s} \right] - \left[-a^s g_0 \frac{1}{2} G_{ks}, r G_{m+r} \right] = 0,$$

整理得

$$(r+s)I_{m+r+s} + a^r g_0 \frac{1}{2} s I_{kr+m+s} + a^s g_0 \frac{1}{2} r I_{ks+m+r} = 0, \quad (13)$$

由 m, r, s 的任意性, 所以 $k=1$ 。因此 $r+s + a^r g_0 \frac{1}{2} s + a^s g_0 \frac{1}{2} r = 0$,

即 $(r+s) \left(1 + a^r g_0 \frac{1}{2} \right) = 0$ 。由 r, s 的任意性, 所以 $a^r g_0 = -1$ 。由

r 的任意性, 所以 $a=1, g_0 = -1$ 。因此有 $\sigma(G_r) = G_r$ 。

由

$$(-1)^{|L_m||c_r|}[\sigma(L_m), [L_n, G_r]] + (-1)^{|L_n||L_m|}[\sigma(L_n), [G_r, L_m]] +$$

$$(-1)^{|c_r||L_n|}[\sigma(G_r), [L_m, L_n]] = 0,$$

可得

$$[L_m + \gamma I_m, rG_{m+r}] + [L_n + \gamma I_n, -rG_{m+r}] + \left[-d_{g_0}^{\frac{1}{2}} G_{kr}, (n-m)L_{m+n} \right] = 0.$$

所以有

$$r(n+r)G_{m+r} - r(m+r)G_{m+r} + (n-m)krd_{g_0}^{\frac{1}{2}}G_{kr} = 0,$$

由 m, n, r 的任意性, 所以 $k=1$ 。所以

$$r(n+r) - r(m+r) - (n-m)r = 0,$$

此式恒成立。

3.4 证 $\sigma(c) = c$

由 $\sigma[L_3, L_{-3}] = [\sigma(L_3), \sigma(L_{-3})]$, 及

$$\sigma[L_3, L_{-3}] = \sigma(-6L_0 + 2c) = -6L_0 - 6\gamma I_0 + 2\sigma(c),$$

$$[\sigma(L_3), \sigma(L_{-3})] = [L_3 + \gamma I_3, L_{-3} + \gamma I_{-3}] = -6L_0 + 2c - 6\gamma I_0,$$

得到 $\sigma(c) = c$ 。

定理得证。

参考文献:

- [1] HARTWIG J T, LARSSON D, SILVESTROV S D. Deformations of Lie algebras using σ -derivations [J]. Journal of Algebra, 2006, 295(2): 314–361.
- [2] CHEN Z, YU Y. Regular Hom–Lie structures on Borel subalgebras of finite–dimensional simple Lie algebras [J]. Communications in Algebra, 2020, 48(5): 2065–2071.
- [3] 陈秋帆, 吴桐. 扭 Schrödinger–Virasoro 代数上的 Hom–李代数结构[J]. 数学学报(中文版), 2023, 66(4): 739–746.
- [4] AMMAR F, MAKHLOUF A. Hom–Lie superalgebras and Hom–Lie admissible superalgebras [J]. Journal of Algebra, 2010, 324(7): 1513–1528.
- [5] CAO B, LUO L. Hom–Lie superalgebra structures on finite–dimensional simple Lie superalgebras [J]. Journal of Lie Theory, 2012, 23(4): 1115–1128.
- [6] AMMAR F, MAKHLOUF A, SAADAOUI N. Cohomology of Hom–Lie superalgebras and q -deformed Witt superalgebra [J]. Czech Math J, 2013, 63: 721–761.
- [7] ARMAKAN A, RAZAVI A. Complete Hom–Lie superalgebras [J]. Communications in Algebra, 2020, 48(2): 651–662.
- [8] SUN B, MA Y, CHEN L Y. Biderivations and commuting linear maps on Hom–Lie algebras [J]. ArXiv, 2005: 11117.
- [9] FARHANGDOOST M R, ATTARI POLSANGI A R. Characterization of a special case of Hom–Lie superalgebra [J]. Journal of Finsler Geometry and its Applications, 2022, 3(1): 118–126.
- [10] HOU Y, TANG L M, CHEN L Y. Product and complex structures on Hom–Lie superalgebras [J]. 2021, 49: 3685–3707.
- [11] 黄忠铤. Ramond $N=2$ 超共形代数上的 Hom–李超代数结构 [J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2022, 31(1): 5–13.
- [12] CHEN H, DAI X, HONG Y. A class of super Heisenberg–Virasoro algebras [J]. ArXiv preprint, 2009: 06853, 2020.
- [13] LI J, SUN J. Super–biderivations on the super Heisenberg–Virasoro algebra [J]. Linear and Multilinear Algebra, 2021: 1–11.
- [14] ADAMOVI D, JANDRI B, RADOBOLJA G. The $N=1$ super Heisenberg–Virasoro vertex algebra at level zero [J]. Journal of Algebra and Its Applications, 2022, 21(12).
- [15] 赵开明. Virasoro 代数的自同构和自同态 [J]. 系统科学与数学, 1992(1): 1–4.

The Hom–Lie Superalgebra Structure On the Super Heisenberg–Virasoro Algebra

HUANG Zhongxian

(School of Mathematics and Computer Science, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300)

Abstract: Hom–Lie superalgebras are generalized from Hom–Lie algebras. Hom–Lie algebras are a class of anticommutative algebras that satisfy antisymmetric and Hom–Jacobi identity. We attempt to determine all Hom–Lie superalgebra structures on the super Heisenberg–Virasoro algebra. And we prove that there exist some nontrivial Hom–Lie superalgebra structures on the super Heisenberg–Virasoro algebra.

Key words: Super Heisenberg–Virasoro Algebra; Hom–Lie superalgebra; even superspace endomorphism

(责任编辑: 叶丽娜)

傅里叶级数的若干应用

叶丽霞, 王川

(武夷学院 数学与计算机学院, 福建 武夷山 354300)

摘要:通过几类经典实例,探讨傅里叶级数在数项级数求和、常微分方程和波动方程中的应用。通过选取合理的函数,将其展开成傅里叶级数,傅里叶级数在某个特殊点的值得数项级数的和。考虑二阶常微分方程的通解的结构具有傅里叶级数的形式,通过待定系数法,求得微分方程的通解。对于具有初边值问题的波方程,通过变量替换法,得出具有傅里叶级数的非平凡的特解,利用逐项求导和积分的方法,得出傅里叶系数,从而得出该波方程的特解。

关键词:傅里叶级数;求和;常微分方程;波动方程

中图分类号: O29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0012-03

1 研究背景

傅里叶级数是数学中的一个重要概念,它是指任何周期函数都可以用正弦和余弦函数的无穷级数来表示,其理论广泛地应用于数论、组合数学、偏微分方程、信号分析、图像处理等领域^[1-5,6]。韦兰英^[4]探讨利用傅里叶级数求解几类常见的数项级数的和。利用傅里叶级数求解数项级数的和关键在于选择合适的函数展开成傅里叶级数,通过取特殊点的值得到该数项级数。樊龙^[5]在给出利用一类函数展开成傅里叶级数可求解 p 级数($p>1$ 且为偶数)的和。通过几类典型例子探讨傅里叶级数的应用,主要研究利用傅里叶级数求解数项级数的和、常微分方程的通解以及波动方程的柯西问题,对本科阶段数学分析课程的教学研究具有一定的实用价值。

2 傅里叶级数有关理论

设函数 $f(x)$ 是定义在 $[-\pi, \pi]$ 上的连续函数,并在内具有连续二阶导数,则函数 $f(x)$ 的傅里叶级数为

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)),$$

其中

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx,$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx (n=0, 1, 2, 3, \dots),$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx (n=0, 1, 2, 3, \dots).$$

这里若 $f(x)$ 是偶函数,则傅里叶系数

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) dx, a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos(nx) dx (n=0, 1, 2, 3, \dots),$$

$b_n=0$;若 $f(x)$ 是奇函数,则傅里叶系数

$$a_0=0, a_n=0, b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin(nx) dx (n=0, 1, 2, 3, \dots).$$

3 应用举例

例1 求数项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2}$ 的和^[7]。

解:设 $f(x)=x^2, x \in [-\pi, \pi]$,偶函数,则傅里叶系数为

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x^2 dx = \frac{2\pi^2}{3}, a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} x^2 \cos(nx) dx = \frac{4(-1)^n}{n^2},$$

$b_n=0$ 。

则 $f(x)$ 可以展开成傅里叶级数,则

收稿日期:2023-11-17

基金项目:福建省教育厅中青年项目(JAT220386)。

作者简介:叶丽霞(1987-),女,汉族,讲师,主要从事复杂系统定性理论的研究。

$$x^2 = \frac{\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4(-1)^n}{n^2} \cos(nx) \right), \quad (1)$$

将 $x=\pi, x=0$ 分别带入式(1)中,可得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) = \frac{\pi^2}{6}, \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n^2} = \frac{\pi^2}{12}, \quad (3)$$

两式相加,可得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8}.$$

利用傅里叶级数还可以求解 p 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$ ($p>1$,

且 p 为偶数)的和,只要取函数 $f(x)=x^{2k}$, ($k \in \mathbf{Z}^+$) 在 $(-\pi, \pi)$ 上展开成傅里叶级数,取傅里叶级数在某个特殊点的值便可求出该 p 级数的和^[5].

例 2 利用傅里叶级数求解级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n-1)}$ 的和^[7].

解:考虑周期为 2π 的函数

$$f(x) = \begin{cases} \pi-x, & -\pi \leq x < 0, \\ x-\pi, & 0 \leq x < \pi. \end{cases}$$

显然 $f(x)$ 为奇函数,则 $f(x)\cos(nx)$ 为奇函数, $f(x)\sin(nx)$ 为偶函数,则

$$a_0=0, \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x)\cos(nx)dx=0,$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (\pi-x)\sin nx dx = -\frac{2}{n\pi} \int_0^{\pi} (\pi-x)d\cos nx = \frac{2}{n}.$$

则 $f(x)$ 可展开的傅里叶级数为:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(nx). \quad (4)$$

当 $x=\frac{\pi}{2}$ 时,有

$$\frac{\pi}{2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{2n-1} (-1)^{n-1},$$

则

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} (-1)^n = -\frac{\pi}{4}.$$

例 3 无阻尼自由振动方程

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{g}{l}\varphi(t) = 0^{[8]}. \quad (5)$$

解:方程(5)的通解 $\varphi(t)$ 展开为傅里叶级数

$$\varphi(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)), \quad (6)$$

则 $\varphi(t)$ 的二阶导为

$$\varphi''(t) = -\sum_{n=1}^{\infty} n^2 (a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)), \quad (7)$$

将式(6)和式(7)带入方程(5),可以得到

$$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(\frac{g}{l} - n^2 \right) a_n \sin nt + \left(\frac{g}{l} - n^2 \right) b_n \cos nt \right) = 0, \quad (8)$$

其中: $a_0=0, a_k, b_k$ 为任意值,记 $a_k=A, b_k=B$,其余系数全为 0,可得该方程的通解为

$$\varphi(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right) + B \sin\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right).$$

该方程是高阶线性其次微分方程,利用特征方程法求解较为简便快捷.利用傅里叶级数求解其通解,适用于特征值为复数根,对非线性微分方程可利用傅里叶级数求其近似解.

例 4 波动方程的初边值问题^[6]为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, & (9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} t=0: u=x, \frac{\partial u}{\partial t} = \sin x, & (10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x=0, x=l: u=0. & (11) \end{cases}$$

解:考虑分离变量法得到方程(9)满足边界条件(11)的非平凡的特解为

$$u_k(x,t) = X_k(x)T_k(t) =$$

$$\left(A_k \cos\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) + B_k \sin\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) \right) \sin \frac{k\pi}{l} x, (k=1,2,\dots),$$

则满足初始条件(10)的特解具备傅里叶级数形式:

$$u(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k \cos\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) + B_k \sin\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) \right) \sin \frac{k\pi}{l} x, \quad (12)$$

则级数(12)逐项求偏导可得

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{k\pi a}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \left(-A_k \sin\left(\frac{k\lambda a}{l} t\right) + B_k \cos\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) \right) \sin \frac{k\pi}{l} x.$$

由初始条件(10)可得

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin \frac{k\pi}{l} x = x, \\ \psi(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k k\pi a}{l} \sin \frac{k\pi}{l} x = \sin x. \end{cases}$$

显然, A_k 和 $\frac{B_k k\pi a}{l}$ 分别是 $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 在 $[0, l]$ 上

傅里叶级数的正弦项的系数, 则有

$$\begin{cases} A_k = \frac{2}{l} \int_0^l x \sin \frac{k\pi x}{l} dx = \frac{2l}{k\pi} (-1)^{k-1}, \\ B_k = \frac{2}{l} \int_0^l \sin x \sin \frac{k\pi x}{l} dx = \frac{2l \sin l}{a(k^2\pi^2 - l^2)}. \end{cases}$$

该波动方程的解为

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{2l}{k\pi} (-1)^{k-1} \cos\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) + \frac{2l}{a(k^2\pi^2 - l^2)} \sin l \sin\left(\frac{k\pi a}{l} t\right) \right) \sin \frac{k\pi}{l} x.$$

4 结论

通过例 1 和例 2 说明利用傅里叶级数可求解部分分数项级数的和, 通过例 3 说明利用傅里叶级数求解

常微分方程的通解, 通过例 4 说明利用傅里叶级数求解波动方程的柯西问题, 对本科阶段中求解数项级数的和、常微分方程的通解以及波动方程的柯西问题提供一种有效的方法。

参考文献:

- [1] 姜世杰, 余红英. 傅里叶级数在数字信号处理中的应用[J]. 科技信息, 2011(14):92.
- [2] 刘维慧, 代坤, 李洪亮, 等. 基于 RLC 回路的傅里叶级数分解问题的分析与验证[J]. 大学物理, 2020, 39(10):38-41+85.
- [3] 焦红英, 刘卫江. 利用函数的傅里叶展开式求级数的和[J]. 高等数学研究, 2011(5):36.
- [4] 韦兰英. 傅里叶级数在级数求和中的应用 [J]. 高师理科学刊, 2018, 38(6):67-69.
- [5] 樊龙. p 级数求和的两种方法[J]. 山西大同大学学报(自然科学报), 2016, 32(6):9-10, 35.
- [6] 谷超豪, 李大潜. 数学物理方程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [7] 华东师范大学数学系. 数学分析[M](第 3 版). 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [8] 王高雄, 周之铭. 常微分方程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.

Some Applications of Fourier Series

YE Lixia, WANG Chuang

(School of Mathematics and Computer, Wuyishan, Fujian 354300)

Abstract: By using several classic examples, this paper discusses the application of Fourier series in the summation of Multinomial series, ordinary differential equations and wave equations. By choosing a reasonable function and expanding it into a Fourier series, the value of the Fourier series at a particular point is found as a sum of several terms of the series. The general solution of a second-order ordinary differential equation is considered as the form of a Fourier series, by the method of coefficients to be determined, it is derived. For a wave equation with an initial margin problem, a nontrivial special solution with a Fourier series is derived by the variable substitution method, and the Fourier coefficients are derived by utilizing a term-by-term method of derivatives and integrals to arrive at a special solution of this wave equation.

Key words: Fourier series; summation; ordinary differential equations; wave equation

(责任编辑: 叶丽娜)

浦城丹桂冠型因子与叶片性状的相关性分析

杜云爽¹, 胡金涛¹, 陈佳¹, 吴承祯², 李键^{1*}

(1.福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2.武夷学院 生态与资源工程学院, 福建 武夷山 354300)

摘要:运用单因素方差分析、Pearson相关性分析、冗余分析和多元线性回归法对浦城丹桂(*Osmanthus fragrans*, 'Pucheng Dan')叶片功能性状指标与冠型因子的相关性进行研究。结果表明:着枝角和分枝率是与叶片功能性状相关性较强的两种冠型因子。着枝角与叶长、叶宽、叶厚、叶面积、叶周长、叶干重和叶鲜重都表现出正相关;分枝率和下级枝数量都与叶长、叶宽、叶面积、叶干重和叶鲜重表现出负相关。树冠圆满度与枝条长度的提高有助于叶片生长,胸径与比叶面积呈负相关,其他冠型因子与叶片功能性状相关性较小。结果表明:浦城丹桂叶片性状受枝条分布情况的影响,一级枝着枝角、下级枝数量与分枝率是与叶片相关性较强的冠型因子,研究结果可为优化浦城丹桂冠型结构提供依据和参考。

关键词:浦城丹桂;比叶面积;冗余分析;功能性状;多元线性回归

中图分类号:Q945.45 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0015-07

树冠作为树木进行多种生理活动的重要场所,其形态结构可以反映出树木对资源的获取能力与分配结果^[1-3]。枝条作为树冠的骨架,其结构决定了树冠走向与形状,而枝条大小和分枝结构又是树木对种植措施的综合反映^[4],对树木生产力和木材品质有直接影响,因而明晰枝条分布规律有助于加深对树木生长过程的理解,从而优化营林措施。分枝大小直接影响单株树木总叶面积和相对光合能力,同时也能展示环境对其生长发育过程的影响^[5]。而枝条整体形状展现了树木横向与纵向延伸情况,提供了树冠生长动态和树冠之间竞争相互作用的信息^[6]。且分枝的几何结构特征对森林的阳光与降水截获量、空气温湿度、土壤蒸发量、林冠与环境能量交换等都有影响^[7-9]。因此,研究

分枝大小和形状可以为评估树木生长状况提供理论参考^[10]。

叶片作为植物与环境接触面积最大的器官,可以反映植物适应环境变化所形成的生存策略^[11],其与树木获取资源能力、物种共存和物种分布都有密切关系^[12-14],因此叶片性状可以很好地反映物种对气候变化的响应^[15]。已有研究证明,不同树龄的叶片性状存在显著差异^[16],不同龄级树木可能通过枝条性状影响叶片性状,从而间接影响植物生存能力与分布格局。分枝结构与叶片性状的研究对于观赏性树木来说尤为重要,它们不仅影响树木生长情况,还决定了树木外形,从而影响观赏性树木价值,因而研究分枝结构与叶片性状的关系有助于观赏性树木的培育。

浦城丹桂(*Osmanthus fragrans*, 'Pucheng Dan')是桂花(*Osmanthus fragrans* Lour.)的重要品种之一^[17],是经过长期自然和人工选育的观赏和城市绿化植物品种。丹桂在我国栽培历史悠久,因其香气浓郁,观赏性极强,常被用于园林绿化、行道树木和盆栽观赏。但长期以来,对于丹桂的研究多集中于个体生长与桂花产量方面,而作为观赏性树种,对其枝条结构与叶片相

收稿日期:2023-11-22

基金项目:福建农林大学林学高峰学科建设项目
(71201800705)。

作者简介:杜云爽(1999-),女,蒙古族,在读研究生,主要从事森林资源可持续经营与管理的研究。

通信作者:李键(1982-),男,汉族,博士,副教授,主要从事森林资源可持续经营与管理的研究。

关性的研究鲜见报道。因此,以浦城丹桂为研究对象,测量其叶片长度、宽度、厚度等叶片性状以及枝条长度、分枝率等冠型性状,通过单因素方差分析和 Pearson 相关性分析探究枝干与叶片相关性,使用逐步回归分析法筛选与叶片性状有显著相关性的冠型因子,从而明晰浦城丹桂冠型因子对叶片性状的影响,以期作为浦城丹桂的冠型优化与品种定向培育提供研究基础和数据累积。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究样地位于福建省武夷山市武夷学院,东经 117° 37'22"~118° 19'44"、北纬 27° 27'31"~28°4'49"。武夷山市东、西、北部三面环山,中南部较平坦,为山地丘陵区,地貌层次分明,呈梯状分布^[18]。气候季节性变换明显,日照充足,雨量丰沛,夏季高温多雨,偶有台风,冬季温暖湿润,年均降水量为 2 000 mm 以上,年均相对湿度 78%,有雾日超过 60 d^[19]。该地区属于丹霞地貌,广布变质岩。土壤主要类型以山地红壤为主,土壤黏重厚,呈酸性^[20]。武夷学院样地内树种多样,分布不均,林分结构较为复杂。

1.2 数据采集

对武夷学院样地内共 220 株丹桂进行调查,根据径级进行编号分组,分析每株树木生长情况,最终按比例从不同径级中选出共 50 株生长状况良好的丹桂作为研究对象(表 1)。测量并记录每株丹桂树高(tree height, H , m)、胸径(diameter at breast height, DBH, cm)、南北冠幅(crown width, W , m)等数据,随后自下而上将每株树木所有基径大于 1.5 cm 的分枝作为一级枝进行编号,用钢尺测量一级枝基径、长度(branches length, BL , cm)、着枝角(枝条基部与树干夹角,branch angle, BA , °),并将一级枝上所有基径大于 1.5 cm 的分枝作为二级枝,记录二级枝数量(branches number, BN)。

于每株丹桂东、西、南、北四个方向的上、中、下三个层次各选取一枝标准树枝,从各个标准枝内、中、外三个位置各采集一片完整、健康的树叶。每株丹桂采集叶片 36 片,天平测量每片叶片鲜重(leaf fresh weight,

LFW, 精确到 0.000 1 g),使用游标卡尺(精度 0.01 mm)避开叶脉测量叶片厚度(leaf thickness, LT , mm),智能叶面积测量仪 YMJ-D 测量叶长(leaf length, LL , cm)等数据,测量完成后将样品在 105 °C 烘箱中烘至恒重并称量叶干重(leaf dry weight, LDW , 精确到 0.000 1 g)。最后将每棵样本树木所有叶片与枝干数据取平均值作为该样本树木的性状数据。

表 1 不同径级浦城丹桂分布情况

Tab.1 The distribution of in different diameter class

径级	总数	样本数	占比/%
6	18	4	22.2
8	35	8	22.9
10	22	5	22.7
12	31	7	22.6
14	22	5	22.7
16	17	4	23.5
18	22	5	22.7
20	18	4	22.2
22	18	4	22.2
24	17	4	23.5

1.3 数据处理

树冠圆满度(crown-fullness ratio, RC)是冠幅与树冠长度之比,比叶面积(specific leaf area, SLA)是单叶面积与其干重之比,分支率(branching ratio, BR)是一级枝数量与二级枝数量之比,它们都是评价树木生长情况的常用指标,其计算公式为

$$RC = \frac{W}{LC}, \quad (1)$$

$$SLA = \frac{LA}{LFW}, \quad (2)$$

$$BR = \frac{BN_1}{BN_2}, \quad (3)$$

其中: RC 为树冠圆满度; W 为树木冠幅; LC 为树冠长度; SLA 为比叶面积; LA 为叶片面积; LFW 为叶片干重; BR 为分支率; BN_1 为一级枝数量; BN_2 为二级枝数量。

首先使用变异系数和单因素方差分析研究不同径级叶片性状的差异,通过 Pearson 相关性分析明晰叶片功能性状与枝干的相关性。挑选出与叶片性状有显著相关性的枝干数据,使用冗余分析深入探讨枝干对叶片性状的影响。其次将枝干数据作为自变量,叶片性状数据作为因变量建立多元线性回归方程,再使用逐步回归法筛选出对叶片性状有显著影响的枝干

数据拟合最优模型。文章中的数据整理在 Excel 2016 中进行,数据分析与作图基于 Excel 2016 和 R-4.1.2 实现。

2 结果与分析

2.1 浦城丹桂冠型因子与叶片性状统计结果

实验中用到的叶功能性状包括 LL、LW、LT、LA、LP、LFW、LDW 和 SLA,冠型因子包括 H 、 W 、RC、BL、BA、DBH、BR、BN,统计结果见表 2。

表 2 浦城丹桂性状描述性统计

Tab.2 Description statistics of sample wood function trails

变量名称	最小值	最大值	平均值	标准差
LL/cm	82.91	142.61	118.76	11.80
LW/cm	28.02	37.06	32.56	2.21
LT/mm	0.23	0.37	0.29	0.03
LA/cm ²	1 442.92	3 193.62	2 393.79	344.61
LP/cm	191.58	355.75	269.88	26.41
LFW/g	0.45	0.99	0.72	0.10
LDW/g	0.23	0.48	0.39	0.05
SLA	53.54	69.36	62.89	3.70
H/h	2.10	6.10	4.03	0.90
W/m	1.54	5.52	2.75	0.92
RC	1.46	5.00	3.47	0.92
BL/cm	101.67	529.50	277.86	105.25
BA/(°)	10.05	66.40	31.14	12.50
DBH/cm	4.65	18.63	10.49	4.04
BR	0.15	0.67	0.38	0.11
BN	1.50	6.50	2.89	1.01

由表 2 可知,样地中不同个体浦城丹桂间 LA 和 BL 变异幅度较大,而 LT、LDW 与 BA 变异幅度较小;此外,样本浦城丹桂 RC 变异性也较小。这些结果可能说明了样地中的个体都生长在较为适宜的环境中,种内与种间竞争压力较小,枝条可以自由地舒展。

2.2 不同径级叶片性状的变化

总体来看,浦城丹桂叶片性状在不同径级变异系数都呈“先增高后稳定”的趋势(表 3),大部分性状的变异系数最高值出现在第七到九径级,变异系数平均值最高的为 LFW(CV=32.40%)和 LDW(CV=32.01%),其次依次为 LA、LW、LP、LL、LT 和 SLA,这说明叶片鲜重和叶片干重在种群内部差异较大。单因素方差分析结果表明,不同径级叶片的叶长与叶宽之间有差异极其统计学意义($P<0.01$),其他叶片性状在不同径级丹桂个体之间差异不具有统计学意义($P>0.05$)。

2.3 冠型因子与叶片性状相关性分析

相关性分析结果如图 1 所示,LT 与 DBH、RC、BA 呈正相关,与 W 、 H 、BN 呈负相关;LW 与 RC、DBH、BA 呈正相关,与 BN 呈负相关;LL 与 BA 呈正相关,主要与 RC、 W 和 DBH 呈负相关;LFW 主要与 BA 呈正相关,与 DBH、 W 、 H 、BL、RC 呈负相关;LDW 与 BA 呈正相关,主要与 W 呈负相关;LDW、LA 与 SLA 都和 BA 呈正相关。

表 3 浦城丹桂叶片性状变异系数

Tab.3 Coefficient of variation of leaf functional traits

径级	叶鲜重 LFW	叶厚 LT	叶长 LL	叶宽 LW	叶面积 LA	叶周长 LP	叶干重 LDW	比叶面积 SLA
1	0.294 41	0.153 87	0.139 45	0.328 72	0.257 77	0.137 53	0.294 07	0.132 30
2	0.364 21	0.154 30	0.207 46	0.172 39	0.349 87	0.210 22	0.360 52	0.130 82
3	0.334 63	0.182 72	0.156 34	0.169 66	0.294 73	0.165 39	0.323 16	0.127 64
4	0.342 39	0.150 64	0.165 56	0.178 87	0.316 68	0.169 86	0.326 97	0.143 44
5	0.297 88	0.112 29	0.137 09	0.159 32	0.259 08	0.136 79	0.307 15	0.101 53
6	0.282 50	0.152 80	0.154 69	0.158 88	0.285 96	0.215 49	0.284 66	0.108 40
7	0.349 58	0.176 63	0.189 57	0.172 73	0.320 66	0.192 45	0.349 10	0.115 52
8	0.300 07	0.104 88	0.148 53	0.149 37	0.275 61	0.147 65	0.296 86	0.095 56
9	0.344 11	0.151 72	0.143 16	0.165 97	0.273 71	0.147 45	0.342 10	0.121 05
10	0.330 16	0.121 07	0.133 45	0.186 12	0.266 56	0.142 12	0.317 30	0.092 47
平均值	0.324 00	0.146 09	0.157 53	0.184 20	0.290 07	0.166 50	0.320 19	0.116 87

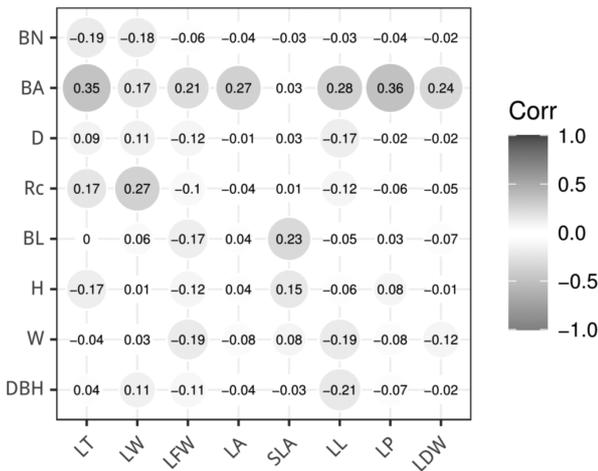


图1 浦城丹桂冠型因子与叶片功能性状相关性

Fig.1 Correlation between crown factors and leaf functional traits of sample wood

2.4 冠型因子与叶片性状的冗余分析

对叶片性状数据进行去趋势分析,结果表明四个排序轴的长度梯度均小于3,说明使用线性模型的冗余分析更适合进一步探究冠型因子对叶片性状的影响。RDA结果表明,筛选出冠型因子的前两个轴累计解释量达到99.96%,说明实验结果较好地反映出冠型因子与叶片性状的关系。

前两个排序轴与冠型因子相关系数见表4,与第一排序轴相关性较高的冠型因子有W、BL、BA和BR,说明这四个冠型因子对叶片性状的影响比较显著。RDA排序图结果见图2, BL、BA和H与大部分叶片性状表现出正相关,W、RC、DBH、BN和BR则与大部分叶片性状呈负相关。其中H、DBH、RC和BN箭头较短,表明它们对叶片性状影响较小,而BL、BA和BR是对叶片性状影响较大的冠型因子。

表4 叶片性状 RDA 排序前两轴与冠型因子的相关性系数

Tab.4 Correlation coefficient between the first two axes of leaf functional traits RDA ranking and crown factors

冠型因子	第一排序轴	第二排序轴
H	0.087 84	-0.178 844
W	-0.182 52	0.017 429
RC	-0.091 85	0.115 751
BL	0.224 08	0.050 081
BA	0.597 12	-0.430 076
DBH	-0.086 89	0.232 975
BR	-0.307 85	-0.095 211
BN	-0.090 49	-0.003 197
累计变异/%	99.850	99.960 0

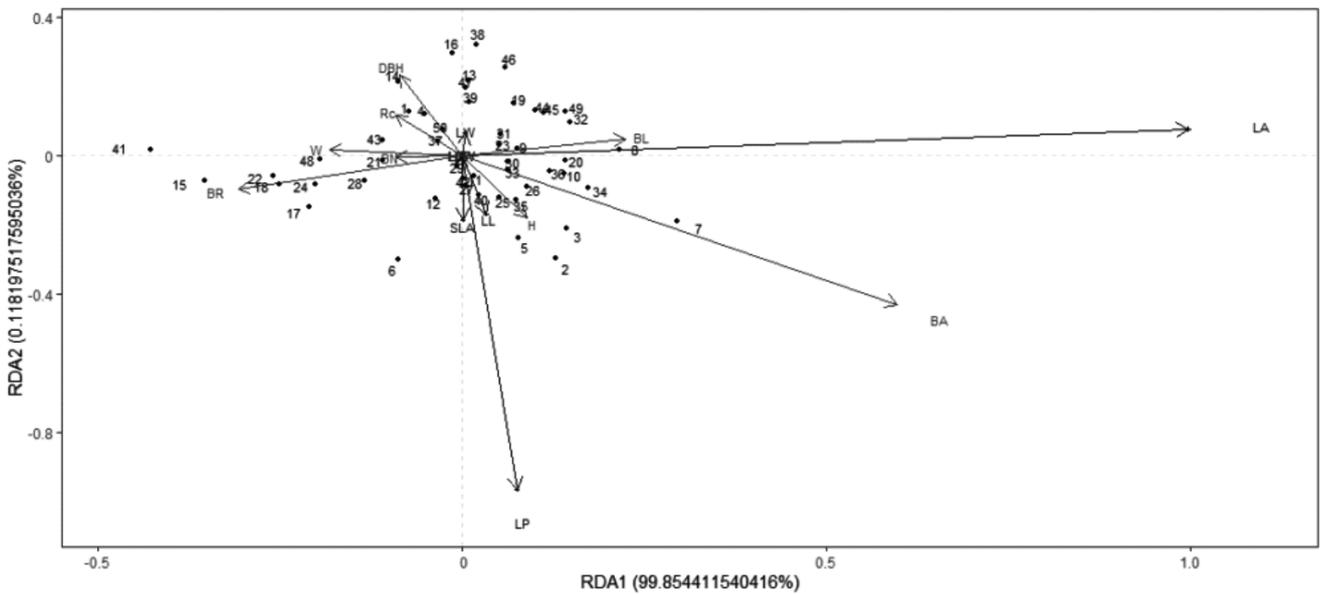


图2 浦城丹桂冠型因子与叶片功能性状 RDA 排序

Fig.2 RDA ordination of crown factors and leaf functional traits of sample wood

2.5 构建逐步回归模型

应用逐步回归法建立线性回归模型,逐个剔除回归值最小的枝干数据,得到浦城丹桂叶功能性状与冠型性状的线性回归模型。结果如表5所示,所有回归

模型的P值均小于0.05,说明各个模型都通过显著性检验。

其中: x_1 表示BN; x_2 表示BR; x_3 表示RC; x_4 表示BA; x_5 表示DBH; x_6 表示BL。由线性回归模型可以看

出,BN和BR对大部分叶片性状都有影响,RC、BA、DBH和BL对部分叶片性状有影响。

表5 叶片功能性状与冠型因子的回归方程

Tab.5 Regression equation between leaf functional traits and crown factors

叶片性状	叶片性状 Y 与冠型因子 X 的回归方程
LL	$Y_1=179.147-8.867x_1-90.479x_2$
LW	$Y_2=39.4454+0.6704x_3-1.5441x_1-12.3460x_2$
LT	$Y_3=0.2636809+0.0009245x_4$
LA	$Y_4=4286.4-280.3x_1-2817.7x_2$
LP	$Y_5=246.199+0.7606x_4$
LFW	$Y_6=1.21371-0.07449x_1-0.72834x_2$
LDF	$Y_7=0.68073-0.04285x_1-0.44509x_2$
SLA	$Y_8=61.695784-0.441897x_5+0.020986x_6$

3 讨论

叶片性状会随着叶龄和生长环境发生变化^[21-22]。早期的叶片生长旺盛,为获取足够的阳光,会在叶面积上投入更多的资源^[23],使得叶面积较大。且叶龄较小的叶片由于代谢速率高,其含水量一般也较高^[24]。随着叶龄增长,叶片代谢水平有所降低,因此叶片含水率降低,干物质含量增加。本研究结果表明浦城丹桂叶鲜重、叶干重和叶面积在各个径级内差异都比较大,这可能是实验中采集到的叶片叶龄不同导致的。成长时期的差异可能是不同径级丹桂叶片鲜重、干重以及面积等性状变异系数较大的原因之一。

植物的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用主要发生在树冠上,由地上部分光合作用累积的干重约占植物总干重的90%以上^[27],因此冠型结构对植物生长发育十分重要。而枝条是决定冠型结构的主要因素,枝条走向影响树冠外形与叶片分布,从而影响植物的光合作用^[28]。实验相关性分析显示,着枝角与大部分叶片性状呈正相关,这可能是样本生长环境资源充足的结果。着枝角展示树木对空间资源利用的能力,随着着枝角变大,树木总体获得阳光、二氧化碳的能力有所增强。Oguchi等^[30]在研究桦树、槭树和白杨成熟叶片生理结构和光合特性的响应时发现,高光照强度下成长的叶片,其成熟叶片的光合效率和叶片厚度都有所升高。此外叶片还可通过这种方法抵御阳光对叶片的

灼伤,这可能是实验中着枝角与叶片厚度正相关性较强的原因之一。武夷山光照充足使得浦城丹桂成熟叶片较厚,着枝角在植物成熟过程中随叶片厚度增加而逐渐变大。随着着枝角变大,叶片更加充分地利用阳光,这使得树木在单位面积叶片上投入更多资源^[31],从而进一步提高叶片厚度。

叶片作为植物地上部分的重要器官,其形态与数量跟植物资源利用效率有密切关联^[32],也是判断树木生产力和生长状况的常用指标^[33]。比叶面积是衡量叶片生长情况时被广泛应用的变量,它与包括叶片相对增长率、光合作用速率、叶片气体交换能力、叶片寿命等众多性状有密切关联,因此了解比叶面积变化规律对研究植物生长发育过程十分有必要^[34]。比叶面积更多地展现植物对环境变化的反应^[38],枝干结构对其影响较小,这可能是本实验中叶功能性状与枝干性状相关性都不强的原因。

分枝率体现植物对空间资源的利用潜能和策略^[39],当植物生长在水分充足的条件下时会选择降低在分枝率上的“投资”,并尽可能将枝条伸长以占据更多空间^[40]。宋会兴等^[41]在研究马尾松分枝率策略时提出,在顶端优势的作用下低层枝条分枝率会降低,由此树木可将更多资源分配于向上生长以获取更多阳光。而生长在胁迫环境下的植物则倾向于降低叶面积等性状,节省更多资源用于抵抗胁迫^[42]。实验结果与之类似,从线性回归模型可以看出,分枝率与下级枝数量与叶片大小以及重量相关的性状几乎都表现出负相关。这可能是作为样本的浦城丹桂生长条件较好,环境资源充足,种内与种间竞争平和,可以充分利用空间资源。因此树木在减少分枝的同时叶片增大以便获取更多阳光等养分,这对浦城丹桂种植密度的选择有重要的参考价值。

4 结论

通过对武夷山浦城丹桂冠型因子与叶片性状的相关性分析和线性回归分析发现,在资源较为充裕的情况下,浦城丹桂冠型因子能够有限影响叶片的生长情况,其中,一级枝着枝角、下级枝数量与分枝率是与叶片相关性较强的冠型因子,其他冠型因子与叶片相

关性较小。

参考文献:

- [1] PEASE C M , BULL J J . A critique of methods for measuring life history trade - offs [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 1988, 1(4):293-303.
- [2] REEKIE E G .An explanation for size-dependent reproductive allocation in *Plantago major* [J]. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76(1):43-50.
- [3] 董灵波,刘兆刚,李凤日. 基于线性混合模型的红松人工林枝条大小预测模型[C].第十届中国林业青年学术论坛论文集, 2012:1-13.
- [4] DANIEL W GILMORE. Equations to describe crown allometry of *Larix* require local validation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 148(1) : 109-116.
- [5] MAGUIRE D A , HANN D W . Constructing models for direct prediction of 5-year crown recession in southwestern Oregon Douglas-fir [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(7):1044-1052.
- [6] FLECK, MOLDER, JACOB, et al. Comparison of conventional eight -point crown projections with LIDAR -based virtual crown projections in a temperate old-growth forest [J]. *Ann Forest Sci*, 2011, 2011,68(7):1173-1185.
- [7] ELLSWORTH D S , REICH P B . Canopy structure and vertical patterns of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest[J]. *Oecologia*, 1993, 96(2):169-178.
- [8] PARKER G G . Structure and microclimate of forest canopies. [J]. *Forest Canopy*, 1995.
- [9] 李德志, 臧润国. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展[J]. *世界林业研究*, 2004(3):12-16.
- [10] 高慧淋,董利虎,李凤日. 基于修正 Kozak 方程的人工樟子松树冠轮廓预估模型[J]. *林业科学*, 2019, 55(8): 84-94.
- [11] 杨继鸿,李亚楠,卜海燕,等. 青藏高原东缘常见阔叶木本植物叶片性状对环境因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(10):863-876.
- [12] REICH P B , CORNELISSEN H . The world - wide ‘fast - slow’ plant economics spectrum: a traits manifesto [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 102(2):275 - 301.
- [13] IM PÉREZ-RAMOS, L MATÍAS, L GÓMEZ-APARICIO, et al. Functional traits and phenotypic plasticity modulate species coexistence across contrasting climatic conditions[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):2555.
- [14] VESK P A , MORRIS W K , NEAL W C , et al. Transferability of trait - based species distribution models [J]. *Ecography*, 2020.
- [15] N, A, SOUDZILOVSKAIA, et al. Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term climate warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(45):18180-18184.
- [16] HIETZ P , ROSNER S , HIETZ-SEIFERT U , et al. Wood traits related to size and life history of trees in a Panamanian rainforest[J]. *New Phytologist*, 2017,213(1):170-180.
- [17] 张育松,严锦华,金剑荣,等. 浦城丹桂花茶的窈制与开发[J]. *福建茶叶*, 2014, 36(02):22-23.
- [18] REICH P B , WALTERS M B , ELLSWORTH D S . Leaf age and season influence the relationships between leaf nitrogen, leaf mass per area and photosynthesis in maple and oak trees[J].*Plant, Cell and Environment*, 1991(14):251-259.
- [19] SULTAN S E . Phenotypic plasticity for plant development, function and life history[J]. *Trends in Plant Science*,2000(5): 537-542.
- [20] SIMS D A , PEARCY R W . Response of leaf anatomy and photosynthetic capacity in *Alocasia macrorrhize*(Araceae) to a transfer from low to high light[J]. *American Journal of Botany*, 1992(79):449-455.
- [21] 李火根. 杨树冠型、根系的分形特征及杨树改良策略[D]. 南京:南京林业大学, 2003.
- [22] LI F . Modeling crown profile of *Larix olgensis* trees[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(5):16-24.
- [23] OGUCHI R , HIKOSAKA K , HIROSE T . Leaf anatomy as a constraint for photosynthetic acclimation: differential responses in leaf anatomy to increasing growth irradiance among three deciduous trees [J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 28(7):916-927.
- [24] NIINEMETS, TENHUNEN J D . A model separating leaf structural and physiological effects on carbon gain along light gradients for the shade-tolerant species *Acer saccharum*[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 20(7):845-866.
- [25] SANDRA D , DIEGO E G , WILSON P J , et al. Leaf traits as indicators of resource - use strategy in floras with succulent species[J]. *New Phytologist*, 2002, 154(1):147-157.
- [26] 苏磊,杨浩,徐杰. 木本植物构件生态学研究概述[J]. *世界林业研究*, 2014, 27(2):17-22.
- [27] MEZIANE D , SHIPLEY B . Interacting determinants of

- specific leaf area in 22 herbaceous species: Effects of irradiance and nutrient availability[J]. *Plant Cell & Environment*, 1999, 22,447–459.
- [28] KRNER C. Some often overlooked plant characteristics as determinants of plant growth: A Reconsideration [J]. *Functional Ecology*, 1991,5(2):162–173.
- [29] 张亚雄, 王焯, 李广德, 等. 三倍体毛白杨分枝格局对不同土壤供水水平的响应[J]. *林业科学*, 2021,57(3):145–151.
- [30] GUO W , LI B , ZHANG X , et al. Architectural plasticity and growth responses of *Hippophae rhamnoides* and *Cara-gana intermedia* seedlings to simulated water stress[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69(3):385–389.
- [31] 宋会兴, 黎云祥, 苏智先. 马尾松苗木分枝率研究[J]. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 2001(2):158–160.
- [32] 李罡, 张文辉, 于世川, 等. 辽东栎林内不同小生境下幼树植冠构型分析[J]. *西北植物学报*, 2016,36(3):588–595.

Correlation Analysis between Leaf Traits and Crown Factors of *Osmanthus fragrans*, ‘Pucheng Dan’ Based on Stepwise Regression

DU Yunshuang¹, HU Jintao¹, CHEN Jia¹, WU Chengzhen², LI Jian¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002;

2. School of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300)

Abstract: The correlation between leaf functional traits and stem factors of *Osmanthus fragrans*, ‘Pucheng Dan’ was analyzed by one-way ANOVA, Pearson correlation analysis, redundancy analysis, and multiple linear regression. The results showed that branch angle and branching rate were two factors that had a strong correlation with leaf functional traits. Branch angle was positively correlated with leaf length, leaf width, leaf thickness, leaf area, leaf circumference, leaf dry weight, and leaf wet weight. Branching rate and the number of branches were negatively correlated with leaf length, leaf width, leaf area, leaf dry weight, and leaf wet weight. The improvement of crown completeness and branch length was beneficial to leaf growth, DBH was negatively correlated with specific leaf area, and other branch factors had little correlation with leaf functional traits. The results indicated that the leaf traits of *Osmanthus fragrans*, ‘Pucheng Dan’ were affected by the distribution of branches, and the branch angle, the number of branches, and the branching rate were the branch factors strongly correlated with leaves. The research results can provide basis and reference for optimizing the crown structure of *Osmanthus fragrans*, ‘Pucheng Dan’.

Key words: *Osmanthus fragrans*, ‘Pucheng Dan’; specific leaf area; redundancy analysis; functional trait; multiple linear regression

(责任编辑:叶丽娜)

$\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的制备、表征及光催化活性

康巧梅, 郑敏芬

(闽南科技学院 生命科学与化学学院, 福建 泉州 362332)

摘要:采用水热法将五水合硝酸铋和二水合钨酸钠结合制备出钨酸铋催化剂,然后加入硝酸镧及钛酸丁酯,利用水热法、凝胶溶胶法制备出 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 催化剂。采用 X 射线衍射、红外光谱、紫外-可见漫反射光谱进行催化剂表征;以罗丹明 B 作为污染物,在氙灯的辐射下,探究其光催化活性和最优制备条件。催化剂表征结果表明: $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 催化剂的结晶度和峰强度良好,纯 Bi_2WO_6 和 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的红外谱图的特征峰大致相近, $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 催化剂禁带宽度为 1.36 eV,小于 Bi_2WO_6 的禁带宽度(1.64 eV)。光催化活性实验结果表明: $\text{Bi}_2\text{WO}_6:\text{La}(\text{NO}_3)_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 摩尔比为 1:4.2,反应时间为 12 h,煅烧温度为 120 °C,光催化剂的活性最好。当催化剂投加量为 0.1 g,罗丹明 B 初始浓度为 50 mg/L 时,光催化条件最优,光催化 180 min,降解率可达到 95%。

关键词: $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$;降解率;罗丹明 B;光催化活性

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0022-07

钨酸铋(Bi_2WO_6)是一种最简单的 Aurivillius 型氧化物,它是由 $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ 层和 WO_6 层以钙钛矿片状交替排列逐步形成的层状结构^[1]。实验制备主要是以五水合硝酸铋和二水合钨酸钠进行合成反应,该催化剂可以用来降解水中的污染物。二氧化钛具有耐酸碱、价格便宜、不含重金属、安全、无二次污染等优点,所以被广泛应用于各行各业^[2]。在氙灯光源的照射下,二者均具有一定的催化性能。早期,在杀菌防腐、治理有机污染等方面起着很大作用的无毒、活性高、稳定性好、成本低廉的 n 型半导体 TiO_2 倍受研究者们青睐^[3]。由于二氧化钛和铋系催化剂因在光催化方面具有独特的特点,成为目前研究人员关注的两种光催化剂,只

是它们各自都存在明显的缺陷^[4]。 TiO_2 借助一些金属离子掺杂改性后,能够克服二氧化钛只能吸收紫外线的不足,从而使 TiO_2 的吸光范围扩大至可见光区^[4]。实验通过引入镧系离子掺杂,增强光催化剂活性。因稀土金属离子 La^{3+} 的电子构型具有独特性,并且可在氧化钛晶格中脱去氧,形成氧空位,提高光的利用率^[5]。通过复合改性、构建异质结及掺杂改性所得的“ $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ ”复合催化剂,催化活性均比单一 Bi_2WO_6 以及二复合物的活性高^[6]。

为研究 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 样品的光催化活性,实验对其物质摩尔比、反应时间、煅烧温度、催化剂投加量、污染物初始浓度进行探讨,确定出最优的制备和降解条件。

收稿日期:2023-09-18

基金项目:闽南科技学院教改项目(MKJG-2022-008);闽南科技学院教改项目(MKJG-2018-015);福建省“大学生创新创业训练计划”项目(S201912992008);环境科学省级一流专业建设(SJZY-2022-02)。

作者简介:康巧梅(1985-),女,汉族,副教授,主要从事水处理的研究。

1 实验部分

1.1 药品与仪器

五水硝酸铋、钛酸四丁酯、无水乙醇、乙二醇、浓硝酸、罗丹明 B、钨酸钠、硝酸镧、冰醋酸,均为分析纯,市售。

X 射线衍射仪(XRD, D8 Advance 型),德国布鲁

克公司;紫外可见漫反射仪(UV-Vis DRS,UH4150型),Hitachi 日立公司;傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR,IRAffinity-1S型),日本岛津公司;可见分光光度计(WF J 7200型),尤尼柯(上海)仪器有限公司。

1.2 光催化剂的制备

(1)Bi₂WO₆的制备。称取 4.851 3 g Bi(NO₃)₃·5H₂O,将其溶解在 20 mL 的硝酸溶液中,超声 30 min,记溶液 1。另称取 1.611 2 g 的 Na₂WO₄·2H₂O,溶解在 10 mL 的蒸馏水后,超声 30 min,记溶液 2。将溶液 2 缓慢滴加至溶液 1,搅拌 1 h 后移到反应釜中,120 °C 反应 12 h。待冷却至室温,用蒸馏水和无水乙醇对其冲洗三次,最后将样品放入烘箱,70 °C 烘干 8 h,待冷却到室温后进行研磨,即得到 Bi₂WO₆ 样品。

(2)Bi₂WO₆/TiO₂的制备。取 2 g 上述 Bi₂WO₆ 样品,缓慢加入 18 mL 的无水乙醇和 2 mL 的乙二醇,充分混合后,超声 40 min,待完成后继续磁力搅拌,而后量取 11 mL 的钛酸正丁酯缓慢的滴加到上述溶液中。取 2.5 mL 的冰醋酸溶液,逐滴加入,待到形成凝胶状态后,静置 1 h,将其转入烘箱里,温度为 120 °C 时间为 12 h,反应结束后取出,待冷却到室温后,进行研磨,即可得到 Bi₂WO₆/TiO₂ 样品。

(3)Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂的制备。称量 0.212 7 g 的 La(NO₃)₃·6H₂O 溶解于 100 mL 的 HNO₃ 溶液,用玻璃棒搅拌均匀,配置成 La(NO₃)₃·6H₂O 溶液。量取 18 mL 的无水乙醇溶液和 2 mL 的乙二醇溶液,充分混合后缓慢添加到 2 g Bi₂WO₆ 样品中,搅拌均匀后超声 40 min,继续在磁力搅拌器上搅拌,而后量取 11 mL 的钛酸正丁酯缓慢的滴加到上述溶液。待到形成凝胶状态后,静置 1 h,而后放入烘箱,120 °C 反应 12 h,反应完成后取出,待冷却到室温后,进行研磨即可得到四份 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 样品。

1.3 光催化降解实验

光催化反应的光源为 500 W 氙灯。取 100 mL 10 mg/L 罗丹明 B,加入一定量的复合光催化剂,暗反应 30 min,使目标降解物达到吸附平衡,然后将溶液置于氙灯上进行光催化反应,期间每隔一定时间取约 5 mL 混合液在转速为 10 000 r/min 的离心机上离心 5 min。离心后取上清液,测量吸光度。

2 结果与讨论

2.1 样品表征分析

2.1.1 纯 Bi₂WO₆ 和 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 的 XRD 谱图分析

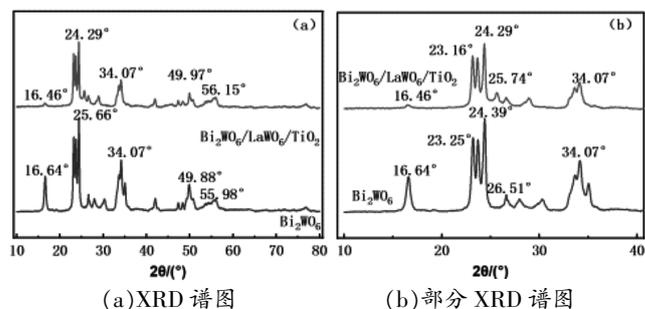


图 1 纯 Bi₂WO₆ 和 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 的 XRD 谱图

Fig.1 XRD spectra of pure Bi₂WO₆ and Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂

由图(a)可知,纯 Bi₂WO₆ 样品和 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 样品,二者衍射峰形明显,纯 Bi₂WO₆ 和 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 两个样品有着较为相似的衍射峰型。说明 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 催化剂对晶体结构影响较小,仍具有较好的结晶度。由图(b)可知,Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 相较于 Bi₂WO₆ 的衍射峰较为弱化,尤其是第一个峰较为明显。这是由于初始阶段稀土元素的掺杂抑制晶粒尺寸增长,降低了晶胞体积,增加比表面积^[7],但仍具有较高的相似性。样品纯 Bi₂WO₆ 的主要衍射峰几乎与标准卡片(PDF#39-0256)^[8]相吻合。并且在 2θ 为 16.64°、23.25°、25.66°、34.07°、49.88°、55.98° 等出现了显著的特征衍射峰,分别对应于 Bi₂WO₆ 的(021)、(040)、(131)(151)、(202)、(133)晶面衍射。每一个衍射峰都可以在标准卡片中被找到,说明该样品具有较好的晶型和结晶度。样品 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂,将其与标准卡片进行分析,可以看到其衍射峰几乎与(PDF#39-0256)^[8],(PDF#21-2172)^[9],(PDF#27-0265)^[6]三张标准卡片相吻合。在 2θ 为 23.67°、24.29°、34.07°、49.97°、56.15° 等出现显著的特征衍射峰,分别对应于正交晶系^[10](PDF#39-0256)纯 Bi₂WO₆ 的晶面衍射。在 2θ 为 25.74°、49.97°、56.15° 等出现显著的衍射峰,分别对应于锐钛矿相^[11]的 TiO₂(PDF#21-1272)标准卡片(101)、(200)、(211)晶面衍射。在 2θ 为 25.74°、34.07°、56.15° 等处出现显著的峰,分别对应于 La₂WO₆ 标准卡片(PDF#27-0265)的(102)、(103)、(312)晶面

衍射。这说明 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 仍有 Bi_2WO_6 的存在。由图可发现, $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的衍射峰和纯 Bi_2WO_6 样品的衍射基本一致, 说明 La_2WO_6 和 TiO_2 的掺杂不会很大程度影响纯 Bi_2WO_6 的晶体结构和结晶度, 但由于 XRD 只能进行简单物相分析, 故对掺杂后样品的各项性能还需要进一步测试表征。

2.1.2 纯 Bi_2WO_6 和 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的 FT-IR 光谱图分析

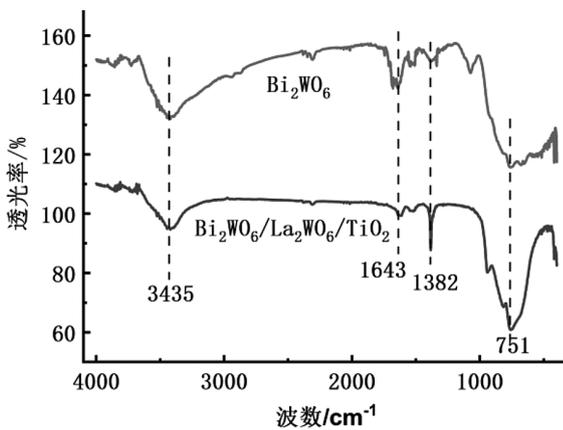


图2 纯 Bi_2WO_6 和 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 催化剂的红外光谱图

Fig.2 Infrared spectra of pure Bi_2WO_6 and $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ catalyst

傅里叶红外光谱法是一种根据分子中的原子间的相对振动、旋转和化学键的振动等信息来确定物质分子结构的方法^[12]。样品前处理采用压片法, 以溴化钾为稀释剂, 进行测定。从图 2 可以分析出, 纯 Bi_2WO_6 在波数为 751、1 643、3 435 cm^{-1} 处有明显的特征峰, 并且 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 在这三个地方出现了较为相似的特征峰。对于纯 Bi_2WO_6 样品, 400~1 000 cm^{-1} 之间的峰属于 Bi-O、W-O 拉伸和 W-O-W 桥连接拉伸模式^[13]。其中, 波数在 751 cm^{-1} 属于 W-O-W 伸缩振动, 在 1 643 cm^{-1} 处的峰属于 O-H 的弯曲振动^[13]。而 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 样品, 波数在 400~1 100 cm^{-1} 间吸收峰为 TiO_2 、 La_2O_3 的伸缩振动峰^[7], 其中, 751 cm^{-1} 的波数属于 W-O 伸缩振动。 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的红外图谱中同时出现 Bi_2WO_6 的特征峰, 说明其复合成功。另外, 位于 1 643、3 435 cm^{-1} 处的特征峰其原因在于 C=O 和 -OH 官能团^[14], 可能是来源于反应体系中溶剂乙二醇和样品制备洗涤过程中的残留乙醇^[15]。将两个谱图加以比较, 发现明显的特征峰大致相近, 纯

Bi_2WO_6 的红外特征峰仍存在于 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 样品中, 说明纯 Bi_2WO_6 的结构没有发生变化, La_2WO_6 和 TiO_2 的共掺杂对纯 Bi_2WO_6 结构的产生的影响较小。以上 XRD 也可以说明此现象。

2.1.3 纯 Bi_2WO_6 和 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的 UV-Vis DRS 光谱图分析

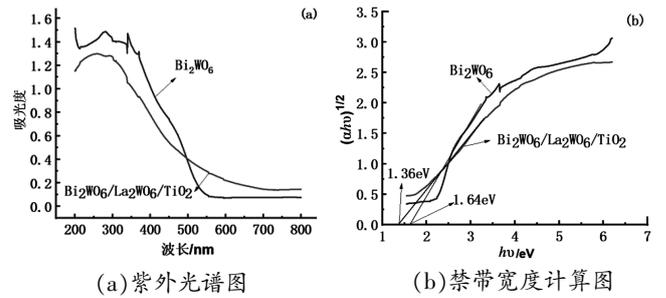


图3 纯 Bi_2WO_6 和 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 催化剂的 UV-Vis DRS 谱图及其禁带宽度示意图

Fig.3 UV-Vis DRS spectra for pure Bi_2WO_6 and $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ composite catalyst and their band width diagrams

从图 3(a)可知, Bi_2WO_6 和 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 催化剂在 200~400 nm 的范围内有明显吸收, 且掺杂改性后的催化剂在 400~800 nm 显示出更强的吸收, 吸收带有明显提高。谱图呈阶梯状, 表明可见光的吸收不是由于杂质能级的跃迁, 而是由本征能带跃迁引起的^[16]。在图 3(a)的基础上, 可以得到图(b)中的 $(\alpha hv)^{1/2} \sim hv$ 的曲线, 通过公式^[17]可以计算出其禁带宽度。 Bi_2WO_6 催化剂的禁带宽度约为 1.64 eV, 而掺杂改性后的催化剂禁带宽度为 1.36 eV, 说明改性后催化剂的禁带宽度减少, $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 的光催化效果更好。

2.2 光催化活性分析

2.2.1 不同催化剂催化活性的评价

根据上述制备方法制备出 Bi_2WO_6 、 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ 之后, 在 100 mL, 50 mg/L 的罗丹明 B 溶液中放入 0.1 g 催化剂, 按照所述光催化降解过程步骤进行操作, 结果如图 4 所示。

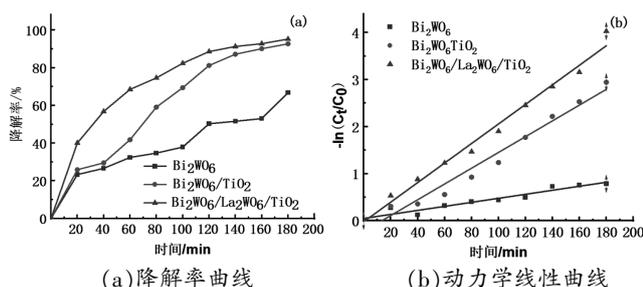


图4 Bi₂WO₆、Bi₂WO₆/TiO₂、Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 三种不同催化剂的降解图

Fig.4 Degradation diagram of three different catalysts of Bi₂WO₆、Bi₂WO₆/TiO₂、Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂

从图4(a)可以看出,Bi₂WO₆的催化活性最低,Bi₂WO₆/TiO₂的催化活性因为二者共掺杂^[18]产生反应其催化效果会略高于Bi₂WO₆,而镧系离子掺杂改性制备的Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂催化剂光催化活性明显最高,120 min降解率达到90%以上,其效果最好。分析认为,因为掺杂稀土金属La³⁺,将La³⁺引入到TiO₂的晶格中,TiO₂出现杂质能级,电子从价带进入到导带杂质能级时,所需能量减少,拓宽了TiO₂的光吸收范围^[6]。从图4(b)的动力学线性曲线可知,三复合物的动力学拟合曲线斜率最大,说明其光催化降解速率最大,因此,可以得出,通过将三者结合所制备的Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂,光催化活性最好。

2.2.2 不同摩尔比对光催化活性的影响

按Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O摩尔比为1:3.4、1:4.2、1:5.1、1:5.9制备催化剂。在100 mL,50 mg/L的罗丹明B溶液中放入0.1 g催化剂,按照所述光催化降解过程步骤进行操作,结果如图5所示。

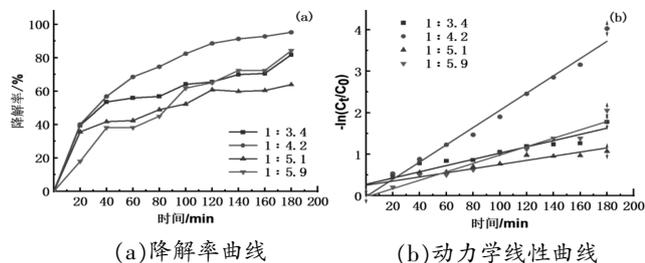


图5 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂光催化剂不同Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O投加比的降解图

Fig.5 Degradation diagram of Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ photocatalyst with different Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O ratio

如图5(a)可以看出当Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O摩尔比为1:4.2时,催化剂的降解效果最好。分析认为,

在不满足最佳掺杂比的情况下,光催化剂无法形成足够的捕获光生载流子的陷阱,从而致使无法有效分离电子-空穴对,因此无法获得最佳的催化性能^[7]。通过图5(b)可知,当二者摩尔比为1:4.2时,其动力学拟合曲线斜率最大,因此可以表明其降解速率最大,因此选用Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O摩尔比为1:4.2进行催化剂的制备。

2.2.3 不同反应时间对光催化活性的影响

根据上述催化剂的制备方法,按Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O摩尔比为1:4.2进行投加,水热反应温度120℃,水热反应时间分别为10、12、14、16 h。在100 mL 50 mg/L的罗丹明B溶液中放入0.1 g催化剂,按照所述光催化降解过程步骤进行操作,结果如图6所示。

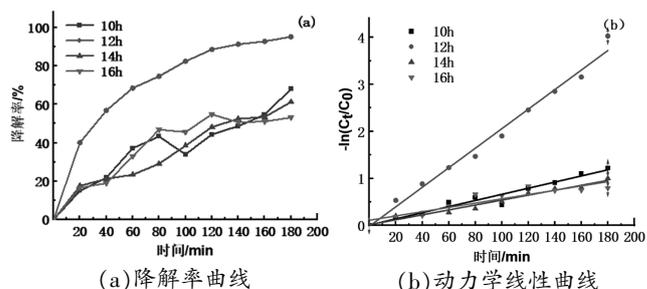


图6 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂光催化剂不同反应时间降解图
Fig.6 Degradation diagram of Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ photocatalyst at different reaction times

从图6(a)可以看出,当反应时间为12 h时,光催化的降解效果最好。分析认为,样品的氙灯光源吸收并非来自于杂质能级的跃迁,而是来自于样品自身的得以承载结构的电子跃迁^[19]。反应时间12 h的样品是具有较好的氙灯光源吸收的特性。通过图6(b)的动力学线性曲线可知,当反应时间为12 h时,催化剂所对应的拟合曲线斜率最大,即可说明其降解速率最大。因此当反应时间为12 h时,其光催化降解效果最佳。

2.2.4 不同煅烧温度对光催化活性的影响

按Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O摩尔比为1:4.2进行投加,水热反应时间为12 h,煅烧温度分别为100、120、140、160℃进行催化剂的制备。在100 mL 50 mg/L的罗丹明B溶液中放入0.1 g催化剂,按照所述光催化降解过程步骤进行操作,如图7所示。

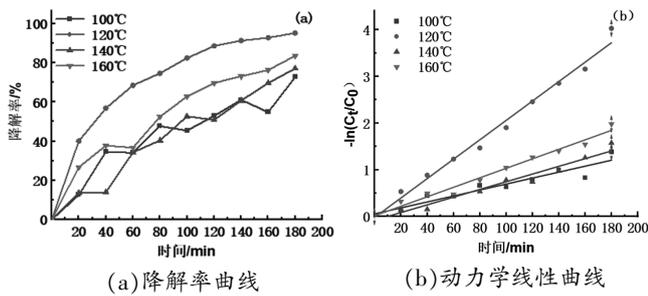


图7 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂光催化剂不同煅烧温度降解图
Fig.7 Degradation diagram of Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ photocatalyst at different calcination temperatures

从图7(a)可以看出,当煅烧温度为120℃时,光催化的降解效果最好。分析认为,随着焙烧温度的升高,催化剂的结晶度和粒径会增加,导致其比表面积以及吸附能力降低,使降解率下降^[20]。通过图7(b)的动力学线性曲线可知,当煅烧温度为120℃时,其催化剂所对应的动力学拟合曲线的斜率最大,说明其降解速率最大。因此当煅烧温度为120℃时,其光催化降解效果最佳。

2.2.5 不同光源对催化剂的光催化降解效果

Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O按1:4.2的摩尔比进行投加,反应时间控制在12h,煅烧温度为120℃,得到Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂催化剂,在100mL 50mg/L的罗丹明B溶液中放入0.1g催化剂,分别采用过滤紫外部分的250W氙灯、500W氙灯以及太阳光作为光源,考察不同光源对催化剂降解效果的影响,结果如图8所示。

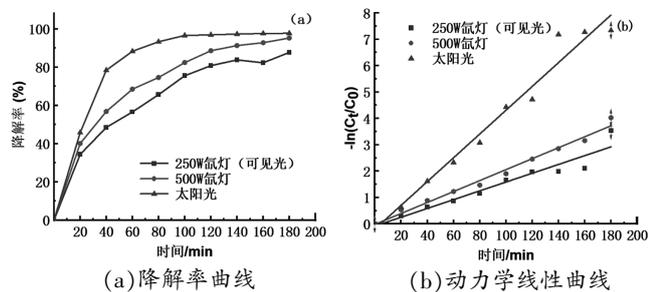


图8 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂光催化剂不同光源条件下降解图
Fig.8 Degradation diagram of Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ photocatalyst under different light sources

从图8(a)可以看出,太阳光,250W氙灯(可见光)和500W氙灯在180min均可达到90%的降解率,具有良好的催化效果。但太阳光的降解效果更好,在60min时,其降解率就达到近90%。太阳光的光谱范围较宽,

且太阳光含有紫外线部分,相较于氙灯具有更多的能量,其强度较高,催化剂对染料的吸附效果更好,在太阳光的照射下,催化剂在100min内对罗丹明B的降解率高达96.6%。

2.2.6 催化剂的不同投加量对光催化活性的影响

Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O按摩尔比1:4.2进行投加,水热反应时间为12h,煅烧温度为120℃进行制样,得到Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂催化剂,分别称取0.05、0.1、0.15、0.2g的催化剂,置于100mL 50mg/L的罗丹明B溶液中,并按照上述降解过程步骤分别进行操作,结果如图9所示。

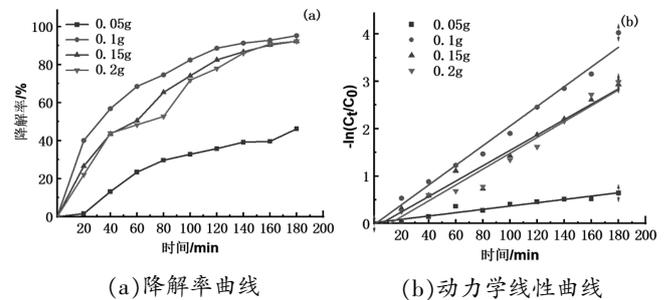


图9 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂光催化剂不同投加量降解图
Fig.9 Degradation diagram of Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ photocatalyst with different dosage

如图9(a)所示,当Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂催化剂投加量为0.1g时,其降解效果最佳。随着催化剂投加量的增加,降解率逐渐下降。其原因是:过多催化剂的加入会导致反应溶液中过多的催化剂粉末悬浮,溶液的透光性变差,光能损失较多不能充分到达催化剂表层,光能利用率下降,导致光催化性能降低^[21]。当催化剂投加量为0.05g时,可能是催化剂的用量较少时,不能提供足够的活性位点来满足反应体系的要求^[22]。通过图9(b)的动力学线性曲线可知,当催化剂投加量为0.1g时,其动力学拟合曲线所产生的斜率最大,说明其降解速率最大。所以,当催化剂投加量为0.1g时,其降解效果最好。

2.2.7 催化剂对罗丹明B不同初始浓度的光催化降解效果

Bi₂WO₆:La(NO₃)₃·6H₂O按摩尔比1:4.2进行投加,水热反应时间为12h,煅烧温度为120℃进行制样,得到Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂催化剂,分别量取0.1g的催化剂,依次置于100mL,10、20、30、40、50、60mg/L的罗

丹明 B 溶液中,按照上述降解过程进行操作,结果如图 10 所示。

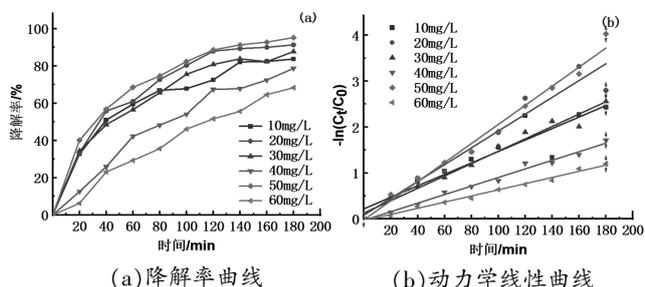


图 10 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 光催化剂不同初始浓度降解图

Fig.10 Degradation diagram of Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ photocatalyst at different initial concentrations

由图 10(a)可以看出,当罗丹明 B 初始浓度为 50 mg/L 时,其催化剂降解效果最佳。其原因是:光照强度和投加量一定的情况下^[23],活性位点的数量保持不变,罗丹明 B 浓度偏高或偏低会使光降解效果下降。当浓度大于 50 mg/L 时,它本身的色度也就越高,光的透射能力就变差,催化剂表面受到的光照变弱,因此降解效果变差^[23]。罗丹明 B 溶液初始浓度从 10 mg/L 增加到 40 mg/L 的过程中,10 与 20 mg/L 相较而言虽效果不如 50 mg/L,但仍具有较高的降解率,然而当浓度逐渐变大时,溶液中的有机大分子增多,催化剂表面吸附了大量的有机大分子,导致催化剂表面的活性位点被掩盖^[22],导致光催化反应受到影响,降解率下降。通过图 10(b)的动力学线性曲线可知,当罗丹明 B 初始浓度为 50 mg/L 时,其动力学拟合曲线所产生的斜率最大,说明其降解速率最大。所以,当罗丹明 B 初始浓度为 50 mg/L 时,其降解效果最好。

3 结论

实验主要通过水热法和凝胶溶胶法进行 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 的制备,通过控制单一变量,得出最佳的制备条件。催化剂通过 XRD、FT-IR 以及 UV-Vis DRS 方法进行表征,将罗丹明 B 染液作为主要降解物质,探究其光催化性能。从 XRD 图谱可知,Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 催化剂的结晶度和峰强度较好,Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 的衍射峰和纯 Bi₂WO₆ 的衍射基本相同。从 FT-IR 图谱可知,纯 Bi₂WO₆ 和 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 的红外谱图的特征峰大致相近,La₂WO₆ 和 TiO₂ 的共

掺杂对纯 Bi₂WO₆ 结构的改变影响不大。从 UV-Vis DRS 图谱可知,Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 催化剂禁带宽度为 1.36 eV,比 Bi₂WO₆ 催化剂的禁带宽度 (1.64 eV) 小,说明 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 对光的利用程度会更好。

通过光催化活性实验的测定可知,Bi₂WO₆ 和 La(NO₃)₃·6H₂O 按投加比为 1:4.2,水热反应时间为 120 °C 下反应 12 h,70 °C 下烘干 8 h,所制得的 Bi₂WO₆/La₂WO₆/TiO₂ 光催化剂比纯 Bi₂WO₆ 催化剂降解效果更好,而在太阳光条件下效果更佳。投加 0.1 g 催化剂降解 100 mL 50 mg/L 的罗丹明 B 染液,在 500 W 氙灯照射下,光催化 180 min,降解率可达到 95%。其最佳投加量为 0.1 g,最佳浓度为 50 mg/L。

参考文献:

- [1] WAN J, DO X, WANG R, et al. Mesoporous nanoplate multi-directional assembled Bi₂WO₆ for high efficient photocatalytic oxidation of NO[J]. *Chemosphere*, 2018,193:737-744.
- [2] CHEN H, LIU H, GUO Y, et al. Hierarchically ordered mesoporous TiO₂ nanofiber bundles derived from natural collagen fibers for lithium and sodium storage[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017,193:737-744.
- [3] HU X, ZHU Q, WANG X, et al. Nonmetal-metal-semiconductor-promoted P/Ag/Ag₂O/Ag₃PO₄/TiO₂ photocatalyst with superior photocatalytic activity and stability [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(34):17858-17865.
- [4] 黄婷婷. 二氧化钛和钨酸铋光催化材料的修饰改性与光催化性能[D]. 武汉:中南民族大学,2018.
- [5] 张成江,田丽君,陈连清,等. 拓朴相变制备具有拓宽可见光响应范围的 Ti³⁺自掺杂 3D 空盒状 TiO₂[J]. *催化学报*, 2018,39(8):1373-1383.
- [6] 冯旭峰. Bi₂WO₆、BiVO₄ 的制备、改性及光催化性能研究[D]. 西安:长安大学,2021.
- [7] 钟爽,孙锐,李晨阳,等. 一种可见光响应型镧掺杂钨酸铋催化剂及其制备方法:2018,10373222[P]. 2024-07-16.
- [8] 陈明. 改性 CuFe₂O₄ 的制备及其光催化性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
- [9] 郑文礼,刘佳琪,吴朝阳,等. 水热法制备二氧化锡/钨酸铋复合光催化材料及其催化活性研究[J]. *人工晶体学报*, 2022,51(3):502-507.
- [10] 王勇,解杰,汪国树,等. TiO₂ 纳米片薄膜的制备及光电性能研究[J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2022(7):45.

- [11] 王泽普. 钨, 铋掺杂及 $g-C_3N_4$ 复合钨酸铋的制备与表征[D].保定:河北大学,2020.
- [12] 颜培培. 钨酸铋的水热合成及光催化改性的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [13] ALI A , BAHETI V , MLILIKTY J . Energy harvesting performance of silver electroplated fabrics[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 231: 33–40.
- [14] 申久英. 钨酸铋及其复合材料的制备与光催化还原 Cr(VI) 研究[D].福州:福建工程学院,2021.
- [15] 余忠雄. 纳米钨酸铋光催化材料的制备及其性能研究[D].广州:暨南大学,2016.
- [16] 杨俊. 铋基复合光催化剂的合成及机理研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [17] 廖臣兴. 铋系可见光响应型复合光催化剂的设计,合成及水体净化的应用研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [18] 李红章,刘新华,吴筱. 钨酸铋光催化剂制备及改性的研究进展[J].安徽化工,2013,39(5):5.
- [19] XU L , YANG X , ZHAI Z , et al. EDTA-mediated shape-selective synthesis of Bi_2WO_6 hierarchical self-assemblies with high visible-light-driven photocatalytic activities [J]. CrystEngComm, 2011, 13: 7267–7275.
- [20] BERA K K , CHAKRABORTY M , MONDAL M , et al. Synthesis of α - β Bi_2O_3 heterojunction photocatalyst and evaluation of reaction mechanism for degradation of 罗丹明 B dye under natural sunlight [J]. Ceramics International, 2020, 46(6): 7667–7680.
- [21] 王文杰. 钨酸铋基复合光催化剂的制备及其光催化降解罗丹明 B 的研究[D].西安:西北大学,2021.
- [22] 繆圣超. 金属-有机框架基(MOFs)复合材料的制备及其在有机污染物光降解中的应用[D].南京:南京师范大学,2020.
- [23] 葛远幸. 改性钨酸铋的制备及其光催化性能研究[D].南宁:广西大学,2015.

Preparation Characterization and Photocatalytic Activity of $Bi_2WO_6/La_2WO_6/TiO_2$

KANG Qiaomei, ZHENG Minfen

(School of Life Science and Chemistry, Minnan University of Science and Technology, Quanzhou, Fujian 362332)

Abstract: Bismuth tungstate catalyst was prepared by combining bismuth nitrate pentahydrate with sodium tungstate dihydrate by hydrothermal method, adding lanthanum nitrate and butyl titanate, and $Bi_2WO_6/La_2WO_6/TiO_2$ catalyst was prepared by hydrothermal method and gel-sol method. The catalyst was characterized by X-ray diffraction, infrared spectroscopy, and UV visible diffuse reflectance spectroscopy; Exploring the photocatalytic activity and optimal preparation conditions of rhodamine B as a pollutant under xenon lamp radiation. The catalyst characterization results showed that the crystallinity and peak strength of $Bi_2WO_6/La_2WO_6/TiO_2$ catalyst were good. The characteristic peaks of the infrared spectra of pure Bi_2WO_6 and $Bi_2WO_6/La_2WO_6/TiO_2$ were approximately similar. The band gap width of $Bi_2WO_6/La_2WO_6/TiO_2$ catalyst was 1.36 eV, less than the band gap of Bi_2WO_6 (1.64eV). The experimental results of photocatalytic activity showed that the optimal photocatalytic activity was achieved with the molar ratio of $Bi_2WO_6:La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ of 1:4.2, reaction time of 12 hours, and calcination temperature of 120 °C. When the catalyst dosage was 0.1 g and the initial concentration of Rhodamine B was 50 mg/L, the photocatalytic conditions were optimal. The photocatalytic degradation rate could reach 95% after 180 minutes.

Key words: $Bi_2WO_6/La_2WO_6/TiO_2$; degradation rate; rhodamine B; photocatalytic activity

(责任编辑:叶丽娜)

树莓果酒工艺优化及其蒸馏酒香气成分分析

廖婷^{1*}, 刘运伙², 傅锦凌³

(1.武夷学院 茶与食品学院, 福建 武夷山 354300; 2.福州元泰茶叶有限公司, 福建 福州 350000)

摘要:通过单因素、正交实验对树莓果发酵工艺条件进行优化,以酒精度、总酸、总糖和感官评分作为指标,得出树莓果酒发酵的最佳工艺条件为:发酵温度为26℃,发酵周期为5d,浆液比例为3:1,酵母添加量为0.05%;进一步对树莓发酵果酒蒸馏得到的树莓白兰地中的香气成分进行检测分析,共检测到24种香气成分,以醇类和脂类为主。

关键词:树莓酒;白兰地;发酵工艺;香气成分

中图分类号:TS262.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0029-06

树莓又称覆盆子、马林、托盘,属蔷薇科(Rosaceae)悬钩子属(*Rubus*)植物,是多年生落叶小灌木类^[1]。浆果呈圆球形,芳香味浓,品质优良。根据果实成熟时的颜色,栽培上将树莓分成黑树莓、红树莓、黄树莓、蓝树莓等。树莓果实营养丰富,所含的各种成分不仅易被人体所吸收,而且具有促进人体对其他营养物质的吸收、改善新陈代谢及增强抗病的作用。树莓鲜果中的果糖、有机酸、维生素C、叶酸会和造血物质协调结合,使树莓成为有利抗病、预防的保健果品之一^[2-4]。在西方国家,树莓酒一直深受喜爱,树莓酒不仅是高档果酒,更是果酒中的精品。

树莓酒因其原料树莓中含有丰富的生物活性物质,被称为新一代的功能性果酒,其以树莓和糯米作为发酵的主原料,成品酒具有自然清亮有光泽的酒红色,酸甜适宜,口感柔和,树莓酒果香酒香协调等特点。因其果实具有丰富的功能性成分,其有解酒醒酒、保护肝脏;预防癌症;延缓衰老,美容养颜;降低“三高”保健功效^[5]。

白兰地(Brandy)是世界上最著名的蒸馏酒之一,

它与金酒、威士忌、伏加特、朗姆酒和中国白酒并成为世界六大蒸馏酒^[6-7]。白兰地酒是一种由水果经过发酵,蒸馏,储存和陈化制成的烈性酒,一般来说,白兰地一般是指葡萄白兰地,以葡萄为原料,经发酵,蒸馏贮藏后酿制而成^[8-9],由其他水果制成的白兰地应加上原始水果的名称,例如樱桃白兰地,苹果白兰地,梨白兰地,红树莓白兰地等^[10]。

酯类和醇类对发酵酒的香气具有重大贡献,这些物质主要由酵母利用糖发酵产生^[11-12]。与树莓鲜汁相比,发酵后的果酒产生了更多的香气成分,赋予果酒愉快的花果香味。

目前对树莓酒的研究主要集中在红树莓发酵酒上,红树莓酒发酵过滤后产生的一系列副产物若能加以利用可减少浪费,本文通过研究树莓发酵酒加工工艺,进一步对发酵液进行蒸馏,得到具有红树莓独特香气的白兰地烈酒,也可以为调酒过程提供优质的酒精来源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

树莓:丹东君澳食品股份有限公司提供;糯米:购买于武夷山横街头双好华榕超市;白砂糖:购买于武夷山横街头双好华榕超市;果胶酶:烟台帝伯自酿机

收稿日期:2023-12-22

基金项目:武夷学院平台项目(XP201802);福建省中青年
教师教育科研项目(JT180540)。

作者简介:廖婷(1991-),女,汉族,讲师,主要从事发酵类
茶果酒、茶饮料的研究。

有限公司(酶活 22 000 U/g);糖化酶:河南食全食美商贸有限公司。

1.2 实验仪器

电子天平:AR522CN、奥豪斯仪器(上海)有限公司电磁炉;搅拌榨汁机: MJ-WBL2521H 型、广东美的生活电器制造有限公司;立式压力蒸汽灭菌锅: BL-50A 型、上海博讯实业有限公司医疗设备厂;光照培养箱: GXZ-280A 型、宁波江南仪器厂;生化培养箱: SHP-450E 型、上海培因实验仪器有限公司;恒温水浴锅: HH-S4 型、常州中捷实验仪器制造有限公司;循环水式多用真空泵: SHZ-D III 型、巩义市予华仪器有限责任公司;电子万用电炉: 220V-AC 型、天津市泰斯特仪器有限公司;可见分光光度计: 721N722S 型、青岛聚创环保设备有限公司;酒精计: JJJ-103 型、艾家仪表批发有限公司;糖度计: PAL-1 型、杭州微米派科技有限公司;旋转蒸发器: RE-52AA 型、上海亚东生化仪器厂;高效液相色谱仪: 1260 型、安捷伦有限公司,离心机: TG16K-II 型、湖南湘仪实验仪器开发有限公司。

1.3 实验方法

1.2.1 红树莓白兰地的酿造工艺流程

红树莓白兰地酿造工艺流程如图 1。

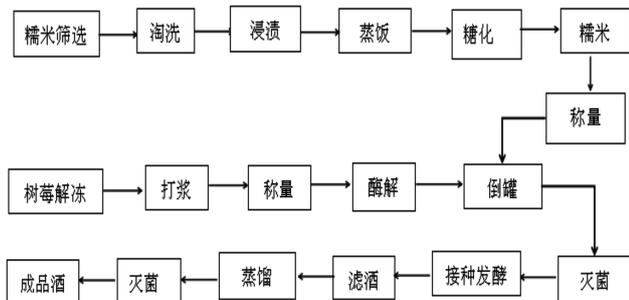


图 1 树莓白兰地的酿造工艺流程

Fig.1 Brewing process of raspberry brandy

1.2.2 树莓酒酿造操作要点

糖化:称取适量的糖化酶加入到 100 mL 无菌冷水中充分溶解,再倒入到糯米中搅拌均匀,料水比例为 1:2,糖化时间 6 h,糖化温度 55 ℃,糖化酶用量为 0.3%。

果胶液体酶制剂制备:称量(1.000±0.005) g 果胶酶放入 100 mL 蒸馏水中,制备 1 %的液体酶制剂。

酶解:制成液体酶制剂根据用量要求倒入到称重的树莓浆液中(果胶酶添加量 0.08 %,在 30 ℃下,

酶解 3 h,出汁率 83.2 %)。

发酵浆液总量设计在 300 mL,设置不同果浆液和糖化醪液含量比。

菌种活化及接种:配 0.05 g/mL 的糖水(5.0 g 糖,100 mL 水),通过灭菌锅灭菌冷却备用,预先将电子天平(用酒精棉球擦净),称量纸,酒精灯等放进超净工作台,开启紫外灯灭菌,按照无菌操作方法,菌粉按比例称量好倒入糖水中,然后放在水浴锅中活化 30 min(水温(36±1) ℃,接种时按接种量吸取定量菌悬液。

灭菌:采用巴氏灭菌。

滤酒:采用真空抽滤方法。

蒸馏:二次蒸馏法,取红树莓发酵原酒蒸馏,得到馏出液。

1.2.3 理化指标试验方法

总糖、总酸、酒精度采用 GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》^[12]。

总酚采用福林-酚试剂法测定;黄酮测定采用分光光度计法;清除自由基能力的测定采用 DPPH 法^[13]。

1.2.4 单因素试验设计

根据预试验和浏览相关文献可知树莓果酒酿造过程,酵母添加量、发酵温度、发酵时间、果浆液和糖化醪液比例是影响树莓原酒感官品质的主要因素,因此将以上四个要素作为考察因素,设计树莓果酒单因素试验。以感官评价、总糖、总酸、酒精度作为评价标准,对四个因素进行优化。

1.2.5 正交试验设计

在上述单因素试验的基础上设计正交试验,优化其 4 个因素为:酵母添加量、发酵温度、发酵时间、果浆液和糖化醪液比例,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,以确定树莓果酒的最佳工艺。

1.2.6 感官评分标准

参考葡萄酒的评分标准,给树莓果酒树立如下评分标准。选 10 名感官评价人员组成评审团,参照表 1 对正交试验的成品酒色泽、香味、滋味、典型风味四个方面进行评分(满分为 100 分)。对树莓果酒的品质进行品评后给出得分,把所得分数进行平均后,作为总感官得分。

表 1 树莓酒感官评价标准表

Tab.1 Criteria for sensory evaluation of raspberry wine		
感官指标	评分标准	分数/分
色泽 (20分)	清亮透明,有自然酒红色光泽	18~20
	清亮透明,光泽不明显,酒红色	13~17
	稍有浑浊,暗淡无光泽,浅红色	7~13
	浑浊,暗淡无光泽,颜色偏黄	0~6
香味 (30分)	树莓果香与醇香浓郁协调,无异味	26~30
	树莓果香与酒香协调,无异味	20~25
	果香味太淡,有米酒味,有异味 无酒香,异味浓重	13~19 0~12
滋味 (40分)	酒体丰满,醇厚协调,爽口	35~40
	酒体较丰满,酸甜适中,柔和	28~34
	酒体淡薄,略酸 无酒味,酸涩,口感粗糙	20~28 0~19
典型风味 (10分)	酒体协调完美,风味典型,风格独特优雅	8~10
	酒体较协调,风味典型,风格良好	5~7
	酒体尚协调,典型风味欠缺,风格一般 酒体不协调,无典型风味	2~4 0~1

1.2.7 树莓白兰地香气成分测定方法

树莓白兰地香气成分测定方法参照文献 [14-15] 的方法进行。

①样品酒预处理:取 10 mL 的白兰地进行恒重,然后在 25 ℃,3 000 r/min 的条件下,进行离心,离心时间为 30 min。

②GC-MS 条件:柱形 HP-5 型毛细管柱 (30 m×320 μm×0.25 μm)。程序初温 40 ℃,初温持续时间 12 min,第一次升温条件 3 ℃/min 的速度升至 108 ℃,第一次升温后温度持续时间 2 min,第二次升温条件 5 ℃/min 的速度升至 250 ℃,第二次升温后温度持续时间 5 min,注射量 1.0 μL,注射口温度 250 ℃;

③质谱条件:四级杆温度 150 ℃,离子源温度 230 ℃,离子化方式 EI,电子能量 70 eV,质量范围 45~550 AMU/s。

精确量取 10 mL 离心上清液 25 mL 于闭口顶空瓶中,添加 3.6 g NaCl,促进香气成分挥发。将 SPME 萃取头通过隔垫插入顶空瓶之中,再将其放置在磁力搅拌器上,于 40 ℃ 的温度条件下进行加热平衡,平衡时间为 15 min。引入纤维头,将其放置在密封瓶的顶部空间中,并将吸附时间设置为 40 min 吸附后,将萃取头插入气相色谱仪入口 2 cm,将纤维头推出,进行 5 min 分析,然后进行气相分析。

2 树莓酒单因素试验

2.1.1 发酵原料对树莓酒的影响分析

由图 2 得知,随着浆液比例的升高酒精度呈现下降趋势,相对应的总酸含量呈现上升趋势。浆液比例在 2:1 时,感官评分最高为 90 分,此时酒体丰满,有树莓酒特有的滋味,口感柔和,入口酸而后慢慢淡开略微回甘。浆液比例在 3:1 时,酒精度降低,可能原因树莓量升高造成发酵液酸度过高抑制了部分酵母菌的活性导致酒精度下降;当浆液比例到 4:1 时,发酵液酸度太高,一部分酵母提前自溶导致酒体外观带有一些浑浊并且酒体酸度过高不适合饮用;当浆液比例为 1:1 时,发酵液中碳源充足,树莓浆液含量较低,使得酒精度高,酸度低,但风味上米酒味覆盖了树莓酒特有的芳香。综上所述,确认浆液比例在 2:1 时最佳。

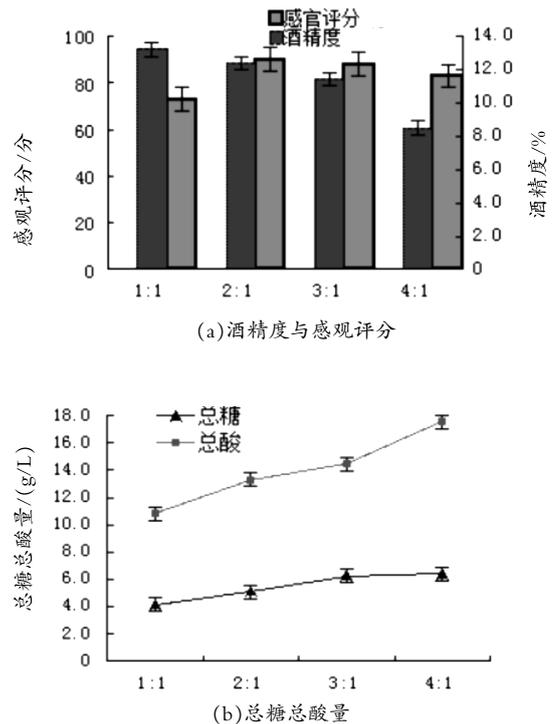


图 2 浆液比例对树莓酒品质的影响

Fig.2 Influence of slurry ratio on raspberry wine quality

2.1.2 酵母接种量对树莓酒的影响分析

由图 3 可知,随着接种量增大,酒精度也随之增大,感官评分也跟着提高,表现在酒香和果香不断融合,滋味独特、爽口。接种量在 0.02% 和 0.03% 时,酒精度明显不足,残糖量高,说明发酵不完全,导致缺乏酒

味。接种量在 0.05% 时, 酸度, 总糖较低, 酒精度高, 发酵出来的成品酒酒体丰满, 口感上富有树莓酒特有的滋味, 感官评分最佳 92 分。随着接种量继续增加总糖下降, 酸度略微提升, 给成品酒带来些许苦味, 总体感官评分有所下降。综上分析得出结论, 接种量在 0.05% 时, 成品酒的感官评分最高。

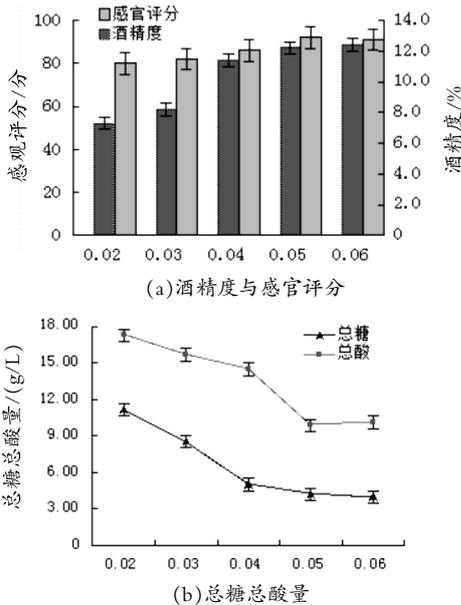


图3 接种量对树莓酒品质的影响

Fig.3 Effect of inoculation amount on quality of raspberry wine

2.1.3 发酵时间对树莓酒的影响分析

酵母菌利用发酵液里面的碳源产生酒精, 随着发酵周期的延长有助于降低酒体的酸度, 由图 4 可以看出, 发酵最初 5 d 随着发酵时间的延长, 酒精度和感官评分总体变化趋势增加, 总酸和总糖总体变化趋势减小, 在第 6 d 过后表现得并不明显, 到第 7 d 出现了下降趋势。随着发酵时间的延长发酵液里面的碳源含量逐渐减少, 不足以提供给酵母菌生长所需, 导致各个指标略微下降。综上分析, 发酵至第 6 天时, 感官评分最佳 93 分, 此时产品具有充足的树莓果香和酒香, 两者结合协调, 口感较佳。

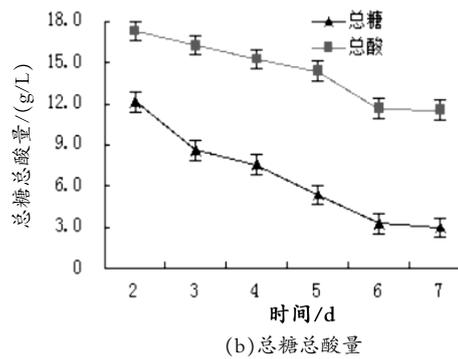
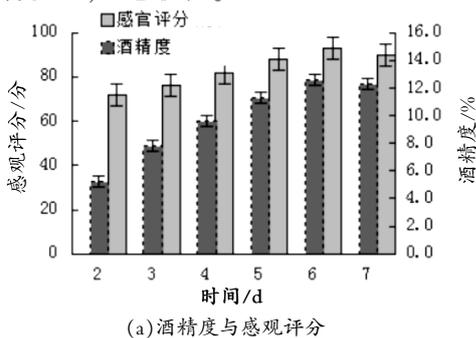


图4 发酵时间对树莓酒品质的影响

Fig.4 Effect of fermentation time on quality of raspberry wine

2.1.4 发酵温度对树莓酒影响分析

从图 5 中可以看出, 刚开始随着发酵温度的上升, 酒精度随着上升, 当温度上升到一定程度时, 酒精度开始略微下降。发酵温度过低酵母菌生命代谢活动受到抑制, 导致发酵产酒速度慢, 发酵不充分; 当发酵温度过高, 酵母菌生长旺盛, 提前进入衰亡期, 导致酒度下降, 残糖含量高, 副产物增多, 对树莓果酒的香气、风味有很大的影响^[16]。因此选择发酵温度 26 °C 最适宜, 感官评分 93 分, 此时酒香果香协调, 树莓酒口感纯正、酒质细腻。

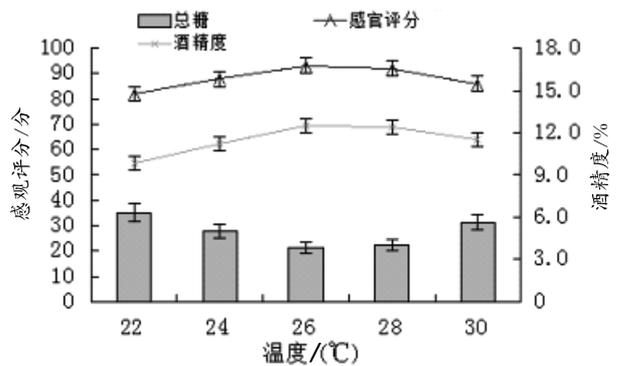


图5 发酵温度对树莓酒品质的影响

Fig.5 Effect of fermentation temperature on raspberry wine quality

3 树莓酒制作正交优化试验结果分析

在单因素试验的基础上, 以树莓酒的感官评分为衡量标准, 选择发酵温度 A, 酵母接种量 B, 浆液比例 C, 发酵时间 D 进行树莓果酒的 $L_9(3^4)$ 正交试验, 正交试验采用 4 因素 3 水平如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Tab.2 Level table of orthogonal test factors

水平	因素			
	温度/℃	接种量/%	浆液比例	发酵时间/d
1	24	0.04	1:1	5
2	26	0.05	2:1	6
3	28	0.06	3:1	7

$L_9(3^4)$ 正交试验结果如表 3 所示。

表 3 红树莓白兰地最佳工艺的 $L_9(3^4)$ 正交试验Tab.3 $L_9(3^4)$ orthogonal test of the optimum process

of red raspberry brandy					
序号	温度/℃	接种量/%	浆液比例	发酵时间/d	试验结果/分
1	1	1	1	1	70.0
2	1	2	2	2	85.6
3	1	3	3	3	84.2
4	2	1	2	3	91.0
5	2	2	3	1	91.4
6	2	3	1	2	79.0
7	3	1	3	2	89.5
8	3	2	1	3	82.0
9	3	3	2	1	83.0
K_1	79.933	83.500	77.000	81.467	
K_2	87.133	86.333	86.533	84.700	
K_3	84.833	82.067	88.367	85.733	
R	7.200	4.266	11.367	4.266	
最佳水平	A_2	B_2	C_3	D_3	

根据极差 R 值的大小,判断各因素对试验结果的影响程度,由表 3 可知,各因素对树莓酒品质及感官评价的影响大小排序为: C (浆液比例) $>A$ (温度) $>B$ (接种量) $=D$ (发酵时间)。由理论得出最佳工艺参数为 $A_2B_2C_3D_3$,即温度 26℃、接种量为 0.05%、浆液比例为 3:1、发酵周期为 7 d;但在试验结果以感官评分为标准得出最佳工艺参数为 $A_2B_2C_3D_1$;将两组参数进行验证,得出最佳工艺参数为 $A_2B_2C_3D_1$,即树莓酒发酵温度为 26℃、接种量为 0.05%、浆液比例为 3:1、发酵时间 5 d。

4 树莓白兰地香气成分分析

酯类物质构成果酒香气的头香成分,酯的种类和数量对酒的香味和风格具有重要影响^[17-18]。通过气相色谱仪检测出实验组红树莓白兰地中香气成分共有 26 种,详见表 4,其组成为 11 种醇类香气、4 种醛类香

气、9 种酯类香气、2 种酸类香气;对照组洛奇覆盆子白兰地中香气成分共有 18 种,其组成为 8 种醇类香气、3 种醛类香气、6 种酯类香气、1 种酸类香气;对照组洛奇樱桃白兰地中香气成分共有 22 种,其组成为 16 种醇类香气、3 种醛类香气、2 种酯类香气、1 种酸类;经对比得出本工艺下酿造白兰地脂类香气成分更丰富,赋予其更浓的果香风味及浓郁的酒香。

表 4 香气成分含量

Tab.4 Content of aroma components

组别	醛类香气 (4种)	酯类香气 (9种)	醇类香气 (11种)	酸类香气 (2种)
实验组 自酿红 树莓白 兰地	(E)-壬烯醛、4-壬醛、(1-甲基乙基)-1-环己烯-1-甲醛	(苯甲酸乙酯、辛酸乙酯、乙酸苯乙酯、丙位壬内酯、癸酸乙酯、肉桂酸乙酯、月桂酸乙酯、十四酸乙酯、棕榈酸乙酯)	(异戊醇、芳樟醇、苯乙醇、2,6-二甲基-5,7-辛二烯-2-醇、 α -松油醇、(R)-3,7-二甲基-6-辛烯醇、香叶醇、 α -紫罗兰醇、对甲氧基苯甲醇、橙花叔醇、 α -杜松醇)	(辛酸、正癸酸)

5 小结

通过对树莓酒的制作工艺及蒸馏酒的基本香气成分进行研究,以酒精度、总酸、总糖和感官评分作为指标,对酵母添加量、发酵温度、发酵时间、发酵原料四个因素进行单因素试验,获得的最佳工艺条件为:果浆液和糖化醪液比例 2:1、酵母菌接种量在 0.05%、发酵时间 6 d、发酵温度为 26℃;经正交试验优化获得的最佳工艺为发酵温度 26℃,发酵周期 5 d,果浆液和糖化醪液比例为 3:1,酵母添加量为 0.05%;采用 GC-MS 法对树莓白兰地中香气成分进行分析,结果表明该工艺酿制树莓白兰地中含有 26 种香气成分,其中包括 11 种醇类香气、4 种醛类香气、9 种酯类香气、2 种酸类香气。

参考文献:

- [1] 韩加,刘继文.树莓营养保健功效及开发前景[J].中国食物与营养,2008(8):54-56.
- [2] 饶炎炎,桑英,唐琳琳,等.红树莓果酒发酵过程中功效成分、香气物质及体外降血糖功效的动态变化[J].食品科学,

- 2020,41(6):222-230.
- [3] 张强,辛秀兰,杨富民,等.红树莓果醋酿造过程中抗氧化性能的变化[J].食品科学,2016,37(3):6-11.
- [4] 韩加,刘继文.树莓营养保健功效及开发前景[J].中国食物与营养,2008,107(8):54-56.
- [5] BURTON F B M , SANDHU A K , EDIRISINGHE I .Red raspberries and their bioactive polyphenols:Cardiometabolic and neuronal health links[J].Advances in Nutrition, 2016, 7(1): 44-65.
- [6] 贾仕杰,张海华,张焕,等.东北6种红树莓叶酚类化合物的鉴定及抗氧化活性分析[J].食品科学,2019,40(20):227-233.
- [7] 焦天慧,芦宇,叶琳琳,等.超声波辅助提取红树莓籽中原花青素及其抗紫外活性评价[J].中国食品学报,2019,19(6):98-105.
- [8] 姜忠军.白兰地酿造工艺及质量评价指标研究[D].无锡:江南大学,2007.
- [9] 王恭堂.白兰地及其发展概论[J].中外葡萄与葡萄酒,2000(3):54-57.
- [10] 徐雅琴,于泽源,任华锋.红树莓叶片中黄酮类物质提取及抗氧化性的研究[J].中国油脂,2003,28(5):69-71.
- [11] 王鹤.糯米酒异步发酵工艺的研究[D].长春:吉林农业大学,2014.
- [12] 全国食品工业标准化技术委员会.葡萄酒、果酒通用分析方法:GB/T 15038—2006[S].北京:中国标准出版,2006.
- [13] 刘亚娜.红树莓酒酿造工艺及其抗氧化活性的研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2016.
- [14] 武林芝,郝秀萍.红树莓果醋的制作工艺及香气成分分析[J].中国调味品,2021,46(10):129-132.
- [15] 王金玲,李亮亮,吕长山.反相高效液相色谱法测定东北地区6种红树莓果实中鞣花酸含量[J].食品科学,2015,36(12):93-96.
- [16] 李施瑶,代玲敏,范宜杰,等.化学法提取红树莓果渣可溶性膳食纤维的工艺优化[J].食品工业科技,2019,40(19):180-186,193.
- [17] 刘金敏,江汉美,田宇.HS-SPME-GC-MS 分析五种姜科香辛料的挥发性成分[J].中国调味品,2021,46(4):141-147.
- [18] 辛秀兰,张强,赵新颖,等.主成分分析法评价树莓中挥发性香气成分气味活度值[J].食品安全质量检测学报,2022,13(2):395-403.

Analysis of Production Technology and Aroma Components of Raspberry Wine

LIAO Ting^{1*}, LIU Yungang², FU Jinling

(1. School of Tea and Food Science, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300;

2. Fuzhou Yuantai Tea Co., LTD., Fuzhou, Fujian 350000)

Abstract: Single factor and orthogonal experiment were used to optimize the fermentation conditions of raspberry wine. With alcohol, total acid, total sugar and sensory score as indexes, the optimal fermentation conditions of raspberry wine were obtained as follows: fermentation temperature of 26 °C, fermentation cycle of 5 days, pulp ratio of 3:1, yeast supplemental level of 0.05 %. In addition, the aroma components of raspberry brandy distilled from raspberry fermented wine were detected and analyzed. A total of 24 aroma components were detected, mainly alcohols and lipids.

Key words: raspberry wine; brandy; fermentation; technology; aroma component

(责任编辑:叶丽娜)

永安贡川会清桥构造与功能解析

涂 焜

(福建省建筑科学研究院有限责任公司, 福建 福州 350000)

摘要:采用田野调查与理论分析相结合的方法,从永安贡川会清桥的桥梁构造与桥梁功能的角度出发,逐一分析桥梁构造的总体构成、结构布置、细部造型,以及桥梁功能的属性内容,并深入探究其中所蕴含的传统营造理念与地域民俗文化。研究表明:永安贡川会清桥不仅彰显出古代桥梁建造技术的精湛,而且反映出福建廊桥文化内涵的丰富,具有较高的历史、艺术和科研价值,因此建议在石拱廊桥的保护过程中应加强日常巡视检查与定期结构监测,形成以预防为主的保护管理模式,进而实现石拱廊桥价值的保存与延续。

关键词:石拱廊桥;桥梁构造;传统营造理念;地域民俗文化;永安贡川会清桥

中图分类号:U441;U448 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0035-05

福建石拱廊桥主要分布于闽东、闽西、闽北、闽中等地区,通常建造于河道较为窄小处。贡川,位于闽中山区,福建省三明地区永安市辖镇,古名贡堡^[1],素有福建省唯一的城堡式古镇之称,迄今已有1270多年的悠久历史,2019年1月被住房和城乡建设部、国家文物局公布为第七批中国历史文化名镇。该镇地处戴云山脉与武夷山脉之间的低洼盆谷,东、西、南三面由沙溪与胡贡溪环绕,沙溪呈西南至东北流向、河水较为清澈,胡贡溪呈西北至东南流向、河水较为浑浊,二者交汇于贡川南端且交汇处泾渭分明,因此,坐落于交汇处且横跨胡贡溪水尾的石拱廊桥被命名为“会清桥”。

1 桥梁概况

会清桥,明天启六年(1626年)建成^[2],石拱廊桥,呈西南至东北走向,横跨胡贡溪水尾,连接贡川堡与巫峡头。桥身长约56.0 m、面宽约7.0 m、净跨约41.3 m、跨顶高约7.1 m,两墩三孔,置廊屋十三间,每间用四柱,

抬梁穿斗混合式木构架,屋面建双坡顶、歇山顶,其整体风貌如图1所示。2001年1月,会清桥被福建省人民政府公布为第五批省级文物保护单位。



图1 会清桥整体风貌

Fig.1 Overall style of Huiqing bridge

2 桥梁构造及其传统营造理念分析

石拱廊桥是传统桥梁历经长期衍变发展的特殊桥梁形式,其本质是桥梁与房屋的有机结合^[3],即以石拱桥为基础,再叠加顶部的廊屋而成。会清桥作为福建典型的石拱廊桥之一,其在结构布置、细部造型等方面体现了传统营造理念,其构造总体由两个部分构成,分为下部、上部,下部为石砌拱券型桥身,上部为木构廊式桥屋。

收稿日期:2023-05-08

作者简介:涂焜(1987-),女,汉族,高级工程师,主要从事古建筑及近现代建筑修复与保护的研究。

2.1 桥身

桥身位于会清桥下部,采用丹霞石(主要成分为红色砂砾岩)砌筑而成,呈两墩三孔,主要是由桥拱、桥墩等部位组成。

2.1.1 桥拱

桥拱从内到外依次分为内券、券脸、撞券,其构造如图2所示。内券是由条石沿起拱方向砌筑而成,组砌方式为全顺铺错缝搭接式;券脸是由内券各皮沿水平方向延伸至桥拱迎水面、背水面形成;撞券是由块石、条石、石板沿竖直方向组合砌筑而成,组砌方式为全顺铺错缝搭接式。相较于半圆券,现场采用摄影测量的方法,测量结果表明桥拱发券过程中增加起拱高度致使顶部微尖,如图2所示形如桃尖状,该结构做法一方面有助于抵消拱券沉降作用,另一方面使桥拱造型更为美观。桥拱致使桥身通水孔道得以形成,当心间通水孔道为中孔,两端通水孔道为梢孔。



图2 桥拱

Fig.2 Bridge arch

2.1.2 桥墩

桥墩外部由分水尖、分水金刚墙围合而成^[4],其构

造如图3所示,内部采用碎石、灰土等材料进行填筑。

分水尖是由条石沿竖直方向砌筑而成,组砌方式为一皮顺铺再一皮丁铺错缝交替式。平面呈三角形,立面自下而上逐渐收分,整体造型如船头状,该结构做法一方面能够将水流进行分道以减弱激流对桥墩直接的冲刷作用,另一方面能够提供桥墩侧向的支撑作用。因此,分水尖通常设置在桥墩的迎水一面,又被称作“迎水尖找头”,顶部平台俗称“凤凰台”。

金刚墙是由条石沿竖直方向砌筑而成,组砌方式为一皮顺铺再一皮丁铺错缝交替式,该结构做法有利于桥墩外部与内部形成有效丁接从而提高整体的稳定性能。按照相对梢孔的位置关系进行划分,梢孔内侧金刚墙为分水金刚墙,梢孔外侧金刚墙为两边金刚墙。



图3 桥墩

Fig.3 Bridge pier

2.2 桥屋

桥屋位于会清桥上,采用杉木,置廊屋十三间,每间用四柱,抬梁穿斗混合式木构架,屋面建双坡顶、歇山顶,主要是由桥门、桥亭、桥廊等部位组成^[5],其平面图如图4所示。

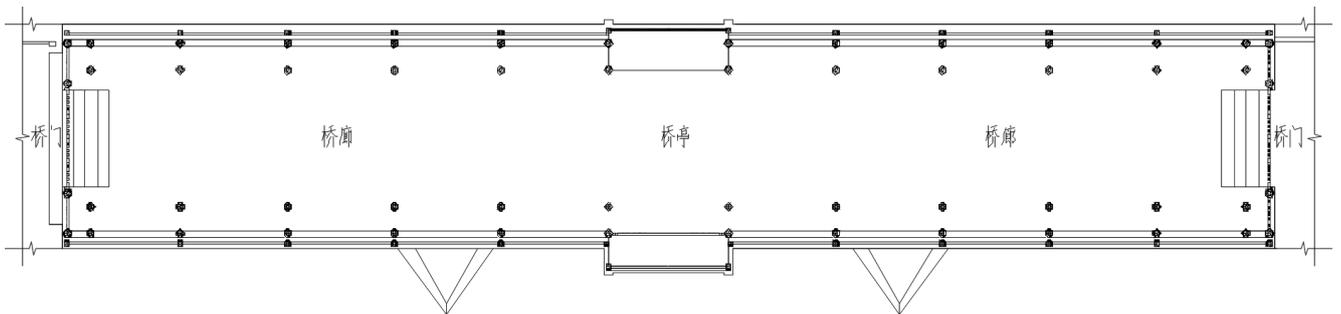


图4 桥屋平面图

Fig.4 Bridge building plan

2.2.1 桥门

桥门分列桥屋两端,形制为四柱三间三楼柱不出头牌楼式,其立面图如图5所示。入口为端部直入式,明间置石砌踏跺;梁架为三檩中柱式;斗拱为明间施四层出跳斗拱、设花卉雕饰枋木、底部坐斗置于大额枋上皮,次间施两层出跳斗拱;木装修为明间置直棂式木门,次间置直棂式木窗;木基层为底层施椽子、上层垂直铺设望板;屋面为明间采用歇山顶,铺设青瓦,瓦垄檐口处做扎口抹灰处理(即按瓦片弧度立面抹平收口),明间正脊两端置鳌鱼、正吻做雀尾样式、戗脊翘角下施角鱼,次间正脊施彩绘。明间正脊两端置鳌鱼,该造型做法称为“鱼形象上房”,因鳌鱼其形似龙,好吞火,故而早期作为厌胜之物,用来祈求木结构免于火患。

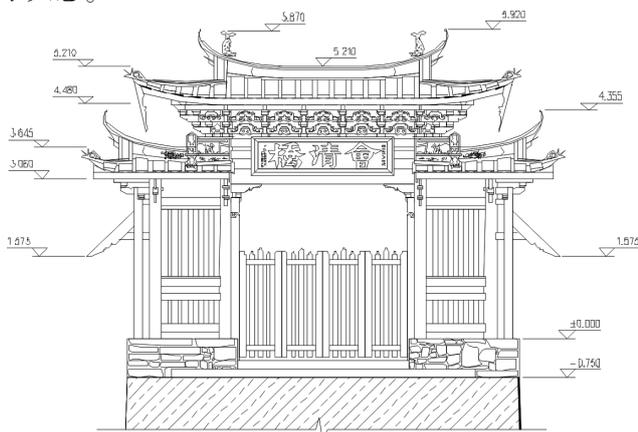


图5 桥门立面图

Fig.5 Bridge gate elevation

2.2.2 桥亭

桥亭居于桥屋当心间,形制为重檐式,其剖面图如图6所示。桥面为十一路块石海墁,正中一路块石粒径最大为桥心,左、右最外侧一路块石粒径次之为牙子,其余各路块石粒径由桥心向牙子依次递减,呈对称分布;梁架为十三檩(上七檩、下六檩)四柱抬梁穿斗混合式;斗拱为梁、枋和柱连接处置替木与丁头拱,挑檐檩下皮出二跳丁头拱,明间藻井四周单侧施两层出跳斗拱;木装修为明间设藻井呈方形、置海墁天花、绘双龙戏珠图案,背水面一侧次间安神龕,迎水面一侧梢间置人字轩、脊檩下设祥禽雕饰柁墩、柱间设雕饰月梁;木基层为迎水面一侧梢间底层施复水椽、上层顺铺望板,其余部位均为底层施椽子、上层垂直铺设望板;屋面为重檐歇山顶,铺设青瓦,瓦垄檐口

处做扎口抹灰处理,上檐正脊中央安宝塔、两端置鳌鱼、正吻做雀尾样式、垂脊下设山花、戗脊翘角下施角鱼,下檐砌围脊、迎水面一侧戗脊翘角下施角鱼。明间设藻井,该造型做法一方面具有装饰功能,能够体现空间的重要性,另一方面因藻属于水中生物、井具备取水功能,故而二者合并命名,用来祈求木结构免于火患。迎水面一侧梢间置人字轩,该造型做法遮挡了局部屋面草架结构,平添了屋面木基层的空间变化,形成了屋面假转水的空间意趣。

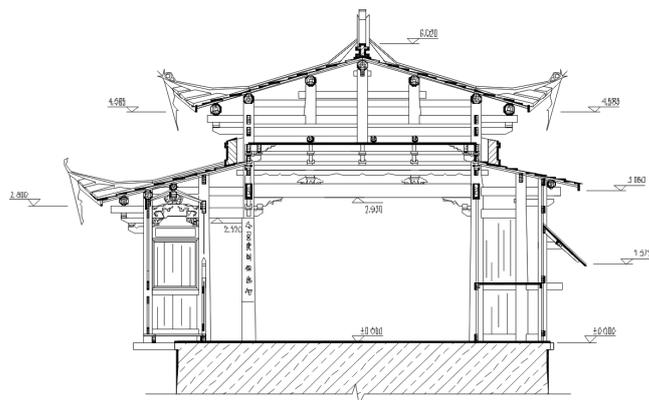


图6 桥亭剖面图

Fig.6 Bridge pavilion section

2.2.3 桥廊

桥廊分列桥亭两侧,形制为半封闭式,其剖面图如图7所示。桥面同桥亭,均为十一路块石海墁;梁架为九檩四柱抬梁穿斗混合式;斗拱为梁、枋和柱连接处置替木与丁头拱,挑檐檩下皮出二跳丁头拱,大额枋上皮施一斗三升、下皮做挖底处理;木装修为明间随上金檩下设花卉雕饰柁墩,次间外侧设栏杆、柱间坐凳,屋檐下制安雨搭;木基层为下金檩至檐口处底层施椽子、上层垂直铺设望板,其余部位均为底层施椽子、上层铺设望板;屋面为双坡顶,铺设青瓦,瓦垄檐口处做扎口抹灰处理,与桥门次间屋面、桥亭下檐屋面相连。次间外侧设栏杆、柱间坐凳,该结构做法一方面具有休闲功能,另一方面能够提供柱间的水平支撑从而提高整体的稳定性能。屋檐下制安雨搭,该结构做法一方面能够保护桥廊内侧木结构免受风力侵蚀、雨水侵蚀与日照直晒,另一方面能够提供梁架间的水平支撑从而提高整体的稳定性能。

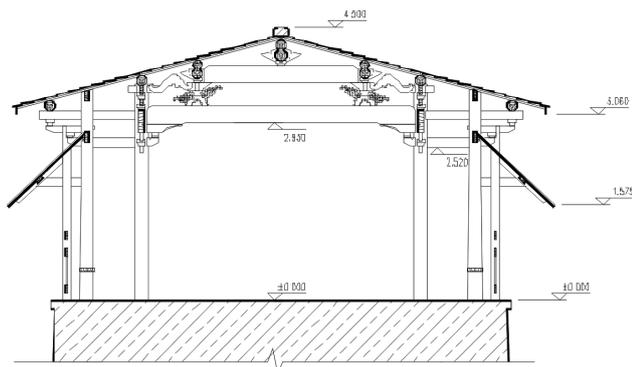


图7 桥廊剖面图

Fig.7 Bridge gallery section

3 桥梁功能及其地域民俗文化分析

石拱廊桥在福建地区由来已久^[6],随着地域民俗文化的反复交融,桥梁功能在属性内容上呈现出多样性。会清桥的桥梁功能多样性呈现为交通、防护、祭祀、休闲、记录、展示等方面。

3.1 交通

历史时期的闽中山区通行不便,沙溪是从延平通往永安的唯一水路,加之会清桥连接两岸陆路,贡川由此得名“水陆通衢”,所以会清桥具有交通功能,该功能分为陆路交通、水陆交通转换等两个方面。陆路交通主要体现在会清桥横跨胡贡溪,连接贡川堡与巫峡头,两岸居民经过此桥可通达对岸,为两岸之间的物质、经济、文化等往来提供了便利。水陆交通转换主要体现在会清桥坐落于胡贡溪与沙溪的交汇处(即胡贡溪水尾),一方面为两条河流之间的船只往来提供了便利,另一方面桥下码头的设置为往来船只停泊、物资装卸、旅客上下提供了便利。

3.2 防护

贡川属于气温高、雨水多、湿度大、台风影响大的中亚热带海洋性季风气候,加之地处戴云山脉与武夷山脉之间的低洼盆谷,区域性气候显著,所以会清桥具有防护功能,该功能与桥梁构造有关。桥梁上部桥屋的设置,能够保护下部桥身免受风力侵蚀、雨水侵蚀与日照直晒,有效提高丹霞石砌体结构的耐久性。桥门、桥亭、桥廊组合形成半封闭式空间,空间内部自然光照强度适宜、空气流通顺畅,采光、通风的良好环境便于调节温湿度,防止木结构受到潮湿气候与水流

潮气的影响。桥廊屋檐下雨搭的制安,能够保护内侧木结构免受风力侵蚀、雨水侵蚀与日照直晒。

3.3 祭祀

明代《八闽通志》有云:“闽俗好巫尚鬼,祠庙寄间阎山野。”^[7]福建廊桥由此未能免俗,所以会清桥具有祭祀功能,该功能与民间信仰有关。桥亭背水面一侧次间神龛的设置,一方面神灵面朝迎水面具有镇压桥梁的风水作用,另一方面能够为当地居民提供祭祀活动的场所。会清桥呈西南至东北走向,西南端桥门面对聂氏宗祠,东北端桥门面对临水宫,会清桥、聂氏宗祠、临水宫组合形成当地的祭祀空间。会清桥桥亭背水面一侧次间神龛供奉的神灵主位为玄武大帝,龟、蛇二将分列左、右两侧,用来祈求桥梁的安全,每年农历三月初三,当地居民汇聚于此祭祀水神,祈盼全年风调雨顺、五谷丰登;临水宫供奉的神灵主位为临水夫人陈靖姑,用来祈求产妇、胎儿的安全;聂氏宗祠供奉聂氏先祖,用来祈求祖先的护佑。

3.4 休闲

古时闽中山区居民通过桥梁交流文化,常以桥梁为载体组织民间艺术活动,所以会清桥具有休闲功能,该功能与桥梁构造有关。桥屋内部空间开敞,能够为表演者提供搭台唱戏的公共场所。桥廊次间外侧栏杆、柱间坐凳的设置,能够为观众提供驻足看戏的服务设施。

3.5 记录

受社会文化的影响,福建廊桥通常借由本体构件传递建造、维修、历史等信息,所以会清桥具有记录功能,该功能分为修建记录、历史记录两个方面。修建记录主要体现在桥门明间上方匾额留存建成时间、工程名称、工程性质等文字信息,桥廊檩底、梁底等留存维修时间、工程性质、工程内容、资金筹措情况等文字信息。历史记录主要体现在桥廊屋檐下雨搭内侧留存文化大革命时期宣传标语。

3.6 展示

受文人文化的影响,福建廊桥普遍留有墨客墨书、装饰彩画等,所以会清桥具有展示功能,该功能分为墨书展示、彩画展示两个方面。墨书展示主要体现在桥亭背水面一侧次间神龛木柱嵌明代进士罗明祖楹联“会极环瞻星北拱,清波永奠水东流”。彩画展

示主要体现在桥亭明间方形藻井置海幔天花绘双龙戏珠图案。

4 结束语

作为明天启年间建造的两墩三孔石拱廊桥,永安贡川会清桥的桥梁构造既在总体构成上遵循了桥屋结合的廊桥营建制度,又在结构布置、细部造型等方面体现了严谨讲究的传统营造理念,桥梁功能在属性内容上融合了闽中山区形态各异的地域民俗文化。有别于福建其他地区的石拱廊桥,永安贡川会清桥桥梁构造与桥梁功能的独特之处在于建造过程中桥拱运用了升拱做法,以及设置桥亭作为祭祀空间。综上所述,永安贡川会清桥不仅彰显出古代桥梁建造技术的精湛,而且反映出福建廊桥文化内涵的丰富,具有较高的历史、艺术、科学价值。因此,在石拱廊桥的保护

过程中,建议加强日常巡视检查与定期结构监测,形成以预防为主的保护管理模式,进而实现石拱廊桥价值的保存与延续。

参考文献:

- [1] 中共永安市贡川镇委员会,永安市贡川镇人民政府.贡川历史文化丛书[M].永安:内部资料,2012.
- [2] 永安市文学艺术界联合会.贡川古韵[M].永安:内部资料,2002.
- [3] 高明赞.浙东南沿海古代多功能石拱廊桥的研究[J].江苏建筑,2011(6):1-3,15.
- [4] 刘大可.中国古建筑瓦石营法[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [5] 戴志坚.福建廊桥的形态与文化研究[J].南方建筑,2012(6):6-18.
- [6] 陈旭辉.闽北廊桥的功能与特色[J].福建文博,2016(1):78-80.
- [7] 黄仲昭.八闽通志[M].福州:福建人民出版社,2017.

Analysis on the Structure and Function of Huiqing Bridge in Yong'an Gongchuan Town

TU Ye

(Fujian Academy of Building Research Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000)

Abstract: Using a combination of field investigation and theoretical analysis, starting from the perspective of the bridge structure and function of Yong'an Gongchuan Huiqing Bridge, this paper analyzes the overall composition, structural layout, detailed modeling, and attribute content of the bridge structure one by one, and deeply explores the traditional construction concepts and regional folk culture contained therein. Research has shown that the Yong'an Gongchuan Huiqing Bridge not only showcases the exquisite construction techniques of ancient bridges, but also reflects the rich cultural connotations of Fujian's corridor bridges, with high historical, artistic, and scientific research value. Therefore, it is recommended to strengthen daily inspections and regular structural monitoring in the protection process of stone arch bridges, form a prevention oriented protection and management mode, and thus achieve the preservation and continuation of the value of stone arch bridges.

Key words: stone arch corridor bridge; bridge construction; traditional construction concept; regional folk culture; Yong'an Gongchuan Huiqing Bridge

(责任编辑:叶丽娜)

博弈论及哈里斯鹰算法的桥梁安全模糊评估模型

杨悦¹, 李永超², 陈孝国², 裴世博³

(1.三明学院 建筑工程学院, 福建 三明 365004; 2.三明学院 信息工程学院, 福建 三明 365004;
3.东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了对桥梁的安全性能进行有效评估, 首先建立由4个一级指标和30个二级指标构成的评估指标体系, 利用数学转化公式消除监测数据不一致性对评估结果的影响。其次建立博弈论组合赋权模型, 优化FAHP法和熵权法。然后利用哈里斯鹰智能算法进行权重迭代, 得到全局最优解。最后通过贴进度排序对桥梁安全等级进行评估。案例分析表明, 所得结果与工程实际相符。

关键词: 博弈论组合赋权; 区间型模糊数; 哈里斯鹰智能算法; 桥梁安全评估

中图分类号: U455.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0040-06

随着中国经济飞速发展与现代化进程不断加速, 桥梁数量日益增加。据不完全统计, 截止2021年12月, 我国桥梁已经达到91.28万座, 其中特大桥6444座^[1]。由于车辆增加、工程养护不到位、分化腐蚀等, 导致桥梁损坏往往不能及时发现。桥梁工程作为交通的重要组成部分, 一旦发生安全事故, 便会带来不可估量的后果。如何进行安全性评价显得极其重要, 张鹏飞^[2]借助Matlab工具箱函数将遗传算法和神经网络融合建立钢管混凝土拱桥安全监测智能评估模型, 徐家云等^[3]提出一种超安全度的评估方法, 李清富等^[4]应用WBS与模糊理论对桥梁的安全进行评估, 但这些方法都没有考虑工程实际测量值的波动性及随机性。鲁承宏^[5]采用WBS与多层次模糊综合评价进行安全评估, 李华^[6]、王维康^[7]、吴继光^[8]采用层次分析法与模糊综合评价进行安全评估, 但上述模型的权重易受决

策者的偏好影响。为克服上述缺点, 吴晓笑等^[9]利用熵权法对桥梁的安全性能进行评估, 王斌等^[10]采用变权法对桥梁进行模糊综合评价, 但这两种权重方法对数据依赖程度高, 波动性大, 同时采用单值型模糊综合评价结果精度不高。

上述文献对桥梁安全评价工作进行大量的探讨, 成果丰富。但已有成果普遍存在监测数据模糊性与不确定性表述不周, 或者是指标权重的主观性与客观性的结合不强。针对上述问题, 采用区间型模糊综合评价, 引入博弈论将模糊层次分析法和熵权法进行组合, 根据哈里斯鹰智能优化算法寻找最佳组合确定权重, 该模型方法可为工程质检人员提供理论参考。

1 桥梁安全评估模型

1.1 桥梁安全评估指标体系的建立

在综合考虑现有的三种桥梁涵养规范基础上^[6-8], 建立以桥面系结构、上部结构、下部结构、附属结构为一级指标。以桥面系的裂缝情况、防水层、桥面平整度、排水系统、伸缩缝、人行道; 上部结构的桥龄、混凝土强度、主梁挠度、裂缝情况、钢筋锈蚀情况、混凝土碳化深度、混凝土剥落、承压破坏、支座; 下部结构的

收稿日期: 2023-08-14

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2020J01384; 2020J01391); 福建省中青年教师教育科研项目(JAT190688; B201901)。

作者简介: 杨悦(1979-), 女, 汉族, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究。

墩台高度、混凝土强度、裂缝情况、混凝土剥落、混凝土碳化深度、钢筋锈蚀情况、墩台稳定性、桥台稳定性、地基冲刷;附属结构的耳墙(翼墙)、灯具(标志)、锥坡(护坡)、排水设施、护栏完整性、行人台阶为二级指标,指标体系见表1。

表 1 桥梁安全评估指标体系

Tab.1 Index system of bridge safety evaluation

一级指标	二级指标	极不稳定	不稳定	基本稳定	较稳定	稳定
桥面系结构	裂缝情况/mm	7~10	5~7	3~5	1~3	0~1
	防水层	老化失效、普遍断裂漏水	断层、渗水	基本完好但有局部裂缝	基本完好或有局部裂缝	完好
	桥面平整度	有大量深坑	有大量浅坑	有少量凹槽	有少量浅坑	平整完好
	排水系统	泄水管破损,大多数栅盖缺失	泄水管破损,部分栅盖缺失	泄水管堵塞,部分栅盖缺失	泄水管堵塞,栅盖无缺失	泄水管完好,泄水孔栅盖无缺失
	伸缩缝	严重破损、失效	碎边严重且有跳车现象	铺装碎边,缝内堵塞卡死	螺帽松动,钢桥开焊	清洁、完好
	人行道	有大量深坑	有大量浅坑	有少量凹槽	有少量浅坑	平整完好
上部结构	桥龄	70~100 a	50~70 a	25~50 a	小于 25 a	新交付使用的桥梁
	混凝土强度	设计强度的 50%~70%	设计强度的 70%~80%	设计强度的 80%~90%	设计强度的 90%~100%	设计强度的 100%~150%
	主梁挠度/(f/L)	超过 1/4 000 的 30%~50%	超过 1/4 000 的 20%~30%	超过 1/4 000 的 10%~20%	超过 1/4 000 的 0~10%	小于 1/4 000
	裂缝情况/mm	0.1~0.2	0.07~0.1	0.04~0.07	0~0.04	无裂缝
	钢筋锈蚀情况	大面积严重锈蚀,混凝土膨胀剥落	大面积严重锈蚀	大面积轻微锈蚀	局部轻微锈蚀	基本不锈蚀
	混凝土碳化深度	保护层的 90%~100%	保护层的 60%~90%	保护层的 30%~60%	保护层的 5%~30%	保护层的 0%~5%
	混凝土剥落/mm	40~50	30~40	20~30	10~20	0~10
	承压破坏	严重破损、明显陷入	轻微破损,有不明显的陷入	有微小破损,有不明显的陷入	有微小破损、无陷入	无破损
支座	错位变形、破损严重	组件断裂,活动支座坏死	固定螺栓松动	轻微腐蚀	完好	
下部结构	墩台高度/m	20~30	15~20	10~15	5~10	0~ 5
	混凝土强度	设计强度的 50%~70%	设计强度的 70%~80%	设计强度的 80%~90%	设计强度的 90%~100%	设计强度的 100%~150%
	裂缝情况/mm	1~1.5	0.35~1	0.25~0.35	0.15~0.25	0~0.15
	混凝土剥落深度/mm	15~20	10~15	5~10	1~5	0~1
	混凝土碳化深度	主筋保护层厚度的 100%~90%	主筋保护层厚度的 60%~90%	主筋保护层厚度的 30%~60%	主筋保护层厚度的 5%~30%	主筋保护层厚度的 0~ 5%
	钢筋锈蚀情况	大面积严重锈蚀,主筋露出	大面积严重锈蚀	大面积轻微锈蚀	局部轻微锈蚀	基本无锈蚀
	墩台稳定性	墩台下沉倾斜滑动严重	墩台出现下沉、倾斜现象	墩台有轻微下沉	墩台有变差的趋向	墩台状况良好
	桥台稳定性	桥台下沉倾斜滑动严重	桥台出现下沉、倾斜现象	桥台有轻微下沉	桥台有变差的趋向	桥台状况良好
地基冲刷	冲刷严重	冲刷中度	冲刷明显	冲刷轻度	冲刷不明显	
附属结构	耳墙(翼墙)	翼墙断裂、下沉、外倾失稳	翼墙断裂,有明显倾斜	局部微裂缝,无明显倾斜	局部微裂缝	清洁完好
	灯具(标志)	照明线路老化,灯柱、标志严重缺失	照明线路老化、灯具损坏	灯柱歪斜、标志不全	灯柱腐蚀、标志不正	完好无缺
	锥坡(护坡)	坡脚冲蚀严重,出现滑坡	大面积塌陷	铺砌缺损,坡脚冲蚀	局部塌陷,杂草丛生	锥坡完好、无杂草
	排水设施	桥头排水沟全部损坏	桥头排水沟几乎全部损坏	桥头排水沟损坏	桥头排水不畅	完好
	护栏完整性	整体没有护栏	局部没有护栏	护栏质量一般	护栏质量良好	护栏质量坚固
	行人台阶	全部损坏	几乎全部损坏	少量损坏	局部塌陷	完好

在桥梁安全性评价中,各级指标的数据变化趋势不一致,因此需要利用成本型函数和效益型函数进行无量纲的数据转化。其中,裂缝情况、桥龄、主梁挠度、混凝土碳化深度、混凝土剥落、墩台高度利用成本型公式进行转化,其他指标通过效益型公式进行转化。语言型指标按照文献[11]中方法分为5级等区间值。即

$$\begin{aligned} \text{效益型: } \mu(x) &= \begin{cases} 1 & (x \geq x_{\max}) \\ \frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} & (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}) \\ 0 & (x \leq x_{\min}) \end{cases}; & (1) \\ \text{成本型: } \mu(x) &= \begin{cases} 1 & (x \leq x_{\min}) \\ \frac{x_{\max}-x}{x_{\max}-x_{\min}} & (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}) \\ 0 & (x \geq x_{\max}) \end{cases}. & (2) \end{aligned}$$

将表1中的数据通过式(1)、(2)进行计算,得到相应指标的取值范围。

1.2 权重的确定

1.2.1 模糊层次分析法

利用模糊层次分析法求取各个二级指标的权重。首先需要建立模糊一致矩阵,然后再通过模糊一致矩阵求相应的权重。模糊一致矩阵满足:

- 1) $0 \leq a_{ij} \leq 1 (i, j=1, 2, \dots, n)$;
- 2) $a_{ij} + a_{ji} = 1 (i, j, \dots, n)$;
- 3) $\forall i, j, a_{ij} = \omega_i - \omega_j + 0.5$ 。

权重 ω 采用式(3)求解,当 $\sum_{j=1}^n a_{ij} \leq \frac{n}{2} - 1$ 时,需要修改至 $\omega_i \geq 0$,

$$\omega_i = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} + 1 - \frac{n}{2} \right). \quad (3)$$

1.2.2 熵权法

令区间模糊集为 $A = \{x_i | x_i = [\mu(x_i), \nu(x_i)]\}$, 模糊熵为

$$E(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1 - (\mu_A(x_i) + \nu_A(x_i) - 1)^2 + 2(\nu_A(x_i) - \mu_A(x_i))^2}{2 - (\mu_A(x_i) - \nu_A(x_i))^2 + (\nu_A(x_i) - \mu_A(x_i))^2}, \quad (4)$$

将熵值带入公式(5)确定每个指标的权重。

$$\omega_j = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_{ij}}{\sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_{ij} \right)}, (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

1.2.3 基于博弈论的组合赋权

为使评价指标的权重更加科学,利用博弈集结模型将模糊层次分析法与熵权法进行组合赋权。这样既降低决策者偏好的影响,又考虑客观数据对决策的贡献,有效提高各个权重的科学性和可靠性。博弈集结模型的思想是在各个权重之间寻找一种权衡,得到一组与各组权重偏差最小的权重作为最终权重。

假设有 n 个指标,通过 s 种方法得到 s 组权重,记为

$$\omega_k = (\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}), k=1, 2, \dots, s. \quad (6)$$

假设 s 组权重的线性组合为

$$\omega = \sum_{k=1}^s a_k \omega_k^T, \quad (7)$$

其中: a_k 为线性组合系数, ω 的全体 $\left\{ \omega \mid \omega = \sum_{k=1}^s a_k \omega_k^T \right\}$ 表示所有可能的权重集。利用博弈论集结模型的思想,建立优化模型,找到组合系数 a_k , 使得 ω 与各个 ω_k 的离差极小化为

$$\min \left\| \sum_{k=1}^s a_k \omega_k^T - \omega^T \right\| (i=1, 2, \dots, s). \quad (8)$$

由于优化模型在实际计算量较大,因此本文通过群体智能优化算法寻找最优组合系数 a_k , 再对其进行归一化,进而得到最优化权重 ω^* 为

$$a_k^* = \frac{a_k}{\sum_{k=1}^s a_k}, \quad (9)$$

$$\omega^* = \sum_{k=1}^s a_k^* \omega_k^T. \quad (10)$$

1.3 哈里斯鹰优化算法

哈里斯鹰优化算法是一种模拟哈里斯鹰捕食行为的群智能优化算法,该算法模拟哈里斯鹰的捕食行为,其探索和开发阶段运用能量转换机制来实现转换^[12-14]。

能量转换公式为 $E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T} \right)$, 其中: E 表示猎物的逃逸能量, E_0 代表初始能量,在 $(-1, 1)$ 随机变化, t, T 代表当前的迭代次数和最大迭代次数。

哈里斯鹰的全局搜索阶段即搜索猎物的行为可表示为:

$$X(t+1)=\begin{cases} X_{\text{rand}}(t)-r_1|X_{\text{rand}}(t)-2r_2X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{\text{rabbit}}(t)-X_m(t))-r_3(LB+r_4(UB-LB)) & q < 0.5 \end{cases},$$

其中: $X(t+1)$ 是第 $t+1$ 次迭代的哈里斯鹰的位置, $X_{\text{rabbit}}(t)$ 是第 t 次迭代时的猎物, r_1, r_2, r_3, r_4, q 均为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, UB, LB 表示变量的上界和下界, $X_{\text{rand}}(t)$ 表示随机选择的一只鹰, $X_m(t)$ 是当前鹰种群的平均位置。

开发阶段即模拟哈里斯鹰和猎物的追逐过程,有相应的四种策略来模拟,分别是软围攻、硬围攻、渐进式快速俯冲的软包围和渐进式快速俯冲的硬包围。

1)软围攻:

$$\begin{cases} X(t+1)=\Delta X(t)-E|JX_{\text{rabbit}}(t)-X(t)|r \geq 0.5, |E| \geq 0.5 \\ \Delta X(t)=X_{\text{rabbit}}(t)-X(t) \end{cases};$$

2)硬围攻: $X(t+1)=X_{\text{rabbit}}(t)-X(t) r \geq 0.5, |E| \geq 0.5;$

3)渐进式快速俯冲的软包围:

$$X_{t+1}=\begin{cases} Y: X_{\text{rabbit}}(t)-E|JX_{\text{rabbit}}(t)-X(t)|, \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z: Y+S \times LF(D), & \text{if } F(Z) < F(X(t)); \end{cases} r < 0.5,$$

$|E| > 0.5;$

4)渐进式快速俯冲的硬包围:

$$X_{t+1}=\begin{cases} Y: X_{\text{rabbit}}(t)-E|JX_{\text{rabbit}}(t)-X_m(t)|, \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z: Y+S \times LF(D), & \text{if } F(Z) < F(X(t)); \end{cases} r < 0.5,$$

$|E| < 0.5;$

其中: r 为 $(0, 1)$ 随机之间的随机数, $J=2(1-r)$ 为兔子逃跑距离, LF 为飞行函数。根据式(8),利用哈里斯鹰优化算法得到最优权重。

1.4 区间模糊数的综合评价

设 $W=\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, ω_i 表示各个影响指标的权重,各个评价指标的评价值为

$$WR_A=([d_1^-, d_1^+], [d_2^-, d_2^+], [d_m^-, d_m^+],) \quad (11)$$

其中:

$$[d_j^-, d_j^+]=\sum_{i=1}^n \omega_i [r_{ij}^-, r_{ij}^+]=\sum_{i=1}^n [\omega_i r_{ij}^-, \omega_i r_{ij}^+]=[\sum_{i=1}^n \omega_i r_{ij}^-, \sum_{i=1}^n \omega_i r_{ij}^+].$$

1.5 区间模糊数的贴近度

将桥梁的稳定程度分成 5 个等级, $B_1=[0,0.2]$ 为极不稳定、 $B_2=[0.2,0.4]$ 为不稳定、 $B_3=[0.4,0.6]$ 为基本

稳定、 $B_4=[0.6,0.8]$ 为较稳定、 $B_5=[0.8,1]$ 为稳定。采用文献[15]中贴近度公式进行计算,即

$$S(A, B)=\frac{\sum_{i=1}^n 2-|A^-(x_i)-B^-(x_i)+A^+(x_i)-B^+(x_i)|}{\sum_{i=1}^n 2+|A^-(x_i)-B^-(x_i)+A^+(x_i)-B^+(x_i)|} \quad (12)$$

1.6 评价步骤

步骤一:建立判断矩阵,通过式(3)得到各个二级指标的权重和一级指标权重。

步骤二:通过式(4)计算评判矩阵,进而利用公式(5)得到各个二级指标和一级指标的权重。

步骤三:根据式(8)的优化模型,进行主客观融合,进而利用哈里斯鹰优化算法得到最优权重。

步骤四:将监测数据根据式(1)、(2)进行转化,得到监测数据的区间模糊数。

步骤五:通过式(11)对权重与监测值评分进行集成,得综合评分值。

步骤六:利用式(12)对综合评分值与 5 个等级进行贴近度计算,得到 5 个贴近度值,最后通过排序进行评价。

2 实例分析

以厦漳大桥为例,线路全长 9.333 km,桥梁总长 8.555 km,桥梁整幅宽 33.0 m,分幅宽 16.0 m,其中北汉主桥采用(95+230+780+230+95) m 跨径布置,索塔高 227 m,南汉主桥采用(135+300+135) m 跨径布置,塔高 137 m,全景如图 1 所示。测得桥面系结构中裂缝为 0.8~2.2 mm,防水层基本完好,桥面平整完好,排水管用完好,伸缩缝铺装碎边,人行道有少量浅坑。上部结构中,桥龄为 9~23 a,混凝土强度为设计强度的 73%~84%,主梁挠度为 1/4 000 的 11%~17%,裂缝为 0.03~0.06 mm,钢筋局部轻微锈蚀,混凝土碳化深度介于保护层的 3%~7%,混凝土剥落 3~8 mm,承压破坏有微小损伤,支座轻微腐蚀。下部结构中,墩台高度 4~6 m,混凝土强度为设计强度的 93%~106%,裂缝为 0.09~0.13 mm,混凝土剥落深度为 1~3 mm,混凝土碳化深度介于主筋保护层厚度的 4%~27%,钢筋局部轻微锈蚀,墩台有变差的倾向,桥台状况良好,地基冲刷

不明显。耳墙和翼墙有局部微裂缝,灯具和标志完好无缺,锥坡和护坡有局部塌陷,桥头排水不畅,行人台阶局部塌陷,护栏质量坚固,桥面如图2所示。大桥安全评估具体步骤如下。



图1 厦漳大桥全景图

Fig.1 Panorama view of Xiazhang Bridge



图2 厦漳大桥桥面图

Fig.2 Bridge deck map of Xiazhang Bridge

步骤一:建立模糊判断矩阵,通过式(3)求得各二级指标和一级指标的第一种权重,即

$$\begin{aligned} \omega_{11} &= (0.270 \ 0, 0.101 \ 1, 0.167 \ 8, 0.066 \ 7, 0.174 \ 4); \\ \omega_{12} &= (0.014 \ 1, 0.129 \ 6, 0.072 \ 6, 0.198 \ 5, 0.197 \ 8, 0.074 \ 1, 0.085 \ 9, \\ &\quad 0.217 \ 0, 0.010 \ 4); \\ \omega_{13} &= (0.124 \ 2, 0.071 \ 7, 0.195 \ 8, 0.200 \ 0, 0.086 \ 7, 0.080 \ 8, \\ &\quad 0.214 \ 2, 0.026 \ 7); \\ \omega_{14} &= (0.180 \ 0, 0.245 \ 3, 0.205 \ 3, 0.117 \ 3, 0.252 \ 0); \\ \omega_1 &= (0.131 \ 7, 0.256 \ 7, 0.203 \ 3, 0.408 \ 3)。 \end{aligned}$$

步骤二:通过式(4)计算评判矩阵,再利用式(5)求得各个二级指标和一级指标的第二种权重,即

$$\begin{aligned} \omega_{21} &= (0.169 \ 3, 0.166 \ 1, 0.166 \ 1, 0.166 \ 1, 0.166 \ 1); \\ \omega_{22} &= (0.117 \ 1, 0.098 \ 8, 0.116 \ 4, 0.113 \ 2, 0.108 \ 5, 0.120 \ 5, \\ &\quad 0.108 \ 5, 0.108 \ 5, 0.108 \ 5); \\ \omega_{23} &= (0.119 \ 9, 0.112 \ 2, 0.129 \ 8, 0.131 \ 6, 0.136 \ 9, 0.123 \ 2, \\ &\quad 0.123 \ 2, 0.1232); \\ \omega_{24} &= (0.200 \ 0, 0.200 \ 0, 0.200 \ 0, 0.200 \ 0, 0.200 \ 0); \\ \omega_2 &= (0.212 \ 3, 0.325 \ 1, 0.286 \ 3, 0.176 \ 3)。 \end{aligned}$$

步骤三:根据优化模型,利用哈里斯鹰智能优化算法求取各个二级指标和一级指标的组合权重,即

$$\begin{aligned} \omega_{31} &= (0.117 \ 1, 0.026 \ 4, 0.015 \ 0, 0.317 \ 0, 0.444 \ 6, 0.079 \ 9); \\ \omega_{32} &= (0.115 \ 0, 0.108 \ 0, 0.127 \ 8, 0.109 \ 8, 0.096 \ 5, 0.117 \ 8, \\ &\quad 0.114 \ 4, 0.100 \ 3, 0.110 \ 2); \\ \omega_{33} &= (0.124 \ 8, 0.125 \ 2, 0.125 \ 5, 0.124 \ 1, 0.125 \ 0, 0.125 \ 6, \\ &\quad 0.125 \ 2, 0.124 \ 6); \\ \omega_{34} &= (0.119 \ 6, 0.450 \ 5, 0.353 \ 5, 0.011 \ 4, 0.065 \ 0); \\ \omega_3 &= (0.141 \ 9, 0.295 \ 3, 0.340 \ 1, 0.222 \ 7)。 \end{aligned}$$

步骤四:将监测数据代入公式(1)、(2)进行转化,得到监测数据的区间模糊数,即

$$\begin{aligned} A_{11} &= ([0.78, 0.92], [0.6, 0.8], [0.8, 1], [0.8, 1], [0.4, 0.6], [0.8, 1]); \\ A_{12} &= ([0.77, 0.91], [0.23, 0.34], [0.66, 0.78], [0.7, 0.85], [0.4, 0.6], \\ &\quad [0.93, 0.97], [0.84, 0.94], [0.4, 0.8], [0.4, 0.6]); \\ A_{13} &= ([0.8, 0.87], [0.43, 0.56], [0.91, 0.94], [0.85, 0.95], [0.73, 0.94], \\ &\quad [0.4, 0.6], [0.4, 0.6], [0.8, 1], [0.8, 1]); \\ A_{14} &= ([0.4, 0.6], [0.8, 1], [0.4, 0.6], [0.4, 0.6], [0.8, 1], [0.4, 0.6])。 \end{aligned}$$

步骤五:通过公式(11)对权重与监测值评分进行集成,得到一级指标综合评分值,即

$$A_1 = ([0.614 \ 5, 0.807 \ 5], [0.603 \ 2, 0.760 \ 6], [0.664 \ 6, 0.807 \ 1], [0.580 \ 2, 0.780 \ 2])。$$

通过公式(11)计算,进一步得到最终的评分值 $A = [0.620 \ 6, 0.787 \ 4]$ 。

步骤六:通过公式(12)对综合评分值与5个等级进行贴近度计算,即

$$S(A, B_1) = 0.246 \ 9, S(A, B_2) = 0.424 \ 5, S(A, B_3) = 0.661 \ 1, S(A, B_4) = 0.992 \ 0, S(A, B_5) = 0.672 \ 2。$$

经比较排序得, $S(A, B_4) > S(A, B_3) > S(A, B_5) > S(A, B_2) > S(A, B_1)$,由此可见,厦漳大桥安全评估等级属于较稳定。

3 结语

考虑到桥梁安全监测数据的波动性,引入区间模糊理论建立评估模型符合工程实际需要。利用博弈论集结模型对权重进行组合,再借助哈里斯鹰智能优化算法求解,不仅提高模型可靠度,也降低运算量。通过对厦漳大桥的安全等级评估,结果为较稳定,与工程实际符合。研究不仅可以为相关部门提供决策参考,

还可进一步推广到隧道或边坡稳定性等评估领域。

参考文献:

- [1] 桂玉环,郑纯莱,刘杨,等.激光点云与 BIM 结合的古桥梁数字模型重构[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(1):9-12.
- [2] 张鹏飞. 基于遗传算法优化的 BP 神经网络在桥梁健康监测安全评估中的应用[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [3] 徐家云,刘敦朝,张俊,等.桥梁模糊评估与超安全度综合评价方法[J].武汉理工大学学报,2004(8):62-64.
- [4] 李清富,焦美菊,刘建华.基于 WBS 的桥梁结构损伤度模糊综合评估[J].郑州大学学报(工学版),2007,97(1):79-82.
- [5] 鲁承宏.采用 WBS 与多层次模糊综合评估吉首桥梁的研究[D].长沙:湖南大学,2009.
- [6] 李华.混凝土桥梁工作状态模糊综合评估研究[D].西安:长安大学,2009.
- [7] 王维康. 基于层次分析法和模糊理论的矮塔斜拉桥状态综合评价[D].西安:长安大学,2014.
- [8] 吴继光. 既有桥梁的模糊综合评估研究[D].包头:内蒙古科技大学,2013.
- [9] 吴晓笑,沈圣,麻胜兰,等.熵权法确定病害权重的桥梁水下桩基安全评估改进方法[J].福州大学学报(自然科学版),2022,50(1):111-119.
- [10] 王斌,陈双庆.模糊综合法桥梁评估方法研究[J].黑龙江交通科技,2021,44(9):111-112.
- [11] 陈孝国, 张晓光, 杨悦. 模糊可拓多属性决策理论与方法[M].哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2021.
- [12] 杨悦,肖修鸿,朱捷,等. 隧道围岩 Vague 集可拓安全评估模型[J].灾害学,2022,37(1):25-29.
- [13] 贾鹤鸣,刘庆鑫,刘宇翔,等.融合动态反向学习的阿奎拉鹰与哈里斯鹰混合优化算法[J].智能系统学报,2023,18(1):104-116.
- [14] 陈孝国,黄鸿辉,杨悦,等. 长斜井煤矿 TBM 施工灾害风险预警模型[J].灾害学,2019,34(3):146-149.
- [15] 邓冠男,宋莲莲,姜妍丽,等. 区间值模糊集贴近度的构造及应用研究[J].数学的实践与认识,2015,45(24):243-251.

A Bridge Safety Fuzzy Evaluation Model Based on Game Theory and Harris Hawk Optimization Algorithm

YANG Yue¹, LI Yongchao², CHEN Xiaoguo², PEI Shibo³

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Sanming University, Sanming, Fujian 365004;

2.School of Information Engineering, Sanming University, Sanming, Fujian 365004;

3.School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819)

Abstract: To effectively evaluate the safety performance of a bridge, a evaluation index system consisting of 4 primary indicators and 30 secondary indicators is first established. A mathematical transformation formula is used to eliminate the influence of inconsistent monitoring data on the evaluation results. Then, a game theory combination weighting model is established to optimize the FAHP method and the entropy weighting method. The Harris Hawk optimization algorithm is then used to optimize the weights and obtain the global optimal solution. Finally, the safety level of the bridge is evaluated by proximity degree ranking. A case analysis shows that the results obtained are consistent with the actual engineering situation.

Key words: game theory combination weighting; interval fuzzy numbers; harris Hawk optimization algorithm; bridge safety evaluation

(责任编辑:马阿曼)

海绵城市技术在节水型高校创建中的实践

——以福建林业职业技术学院为例

薛翔鸿

(福建林业职业技术学院, 福建 南平 353000)

摘要:提出将海绵校园建设与节水型高校建设相结合,形成“碳中和+碳达峰+唯一国家公园保护发展带+海绵示范城市+东南丘陵山地+节水型高校建设”多位一体的海绵校园设计理念与实施方案。结合地形形成“三个无处”的海绵节水校园建设思路,科学计算调蓄容积与渗透排空时间,通过工程施工建设校园非常规水源利用系统,从而实现非常规水源的收集与再利用。研究表明:案例学校项目地块每年节约绿化用水 1 379.25 t,绿化用水节水率达到 37.5%,实现有“弹性”会“呼吸”节水型绿色校园。

关键词:海绵校园;节水型高校;节水率;设计理念

中图分类号:TU96.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0046-05

为深入贯彻落实国家节水行动,实践“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路^[1],加快推进高校节约用水工作,福建省大力推进节水型高校建设工作,坚持“建设一批、申报一批、滚动推进”的原则,截止 2022 年底福建省节水型高校建成率达 34%,超过国家 30%的目标要求,同时明确 2023—2025 年每年递增 15%的目标。

福建林业职业技术学院按照《节水型高校评价标准》(T/CHES32—2019、T/JYHQ0004—2019)要求,精心组织节水型高校建设工作,创造性地将海绵校园建设与节水型高校建设相结合,提高非常规水利用率,积极建设雨水集蓄和再生水利用系统^[2],将非常规水源用至校园绿化和景观用水,让校园有“弹性”会“呼吸”,于 2021 年建成福建省第二批节水型高校。

1 海绵节水校园建设规划

海绵节水校园,是生态文明与节水校园背景下的

收稿日期:2023-05-19

基金项目:福建省教育科学“十四五”规划 2021 年度课题
(FJJKGZ21-108)。

作者简介:薛翔鸿(1988-),男,汉族,讲师、工程师,主要从事工程管理的研究。

创新型校园雨洪管理与利用模式,校园能够像海绵这种吸水材料一样,在下雨时吸附水、储存水、净化水,通过缓慢释放收集到的雨水进行环境调节。节水型高校可以积极从公共建筑、学生宿舍、校园道路、公园绿地、水生态修复等方面展开海绵建设工作,充分发挥教学楼、宿舍楼、校园道路和校园绿地等环境系统对雨水的吸附、储存和缓释作用,因地制宜地建设生态系统能自然净化且适合学校自身管控的海绵节水校园。海绵节水校园建设是一场创新性变革,它是一个漫长的过程,每一个环节都需要精雕细琢。

1.1 海绵节水校园的建设背景与依据

福建林业职业技术学院位于福建省南平市^[3],学校以南平市全国第一批海绵建设示范城市建设为契机大力开展福建省节水型高校建设工作,以校园二期建设 B 地块建设项目为抓手,在南平市城市总规、区域规划、海绵城市建设专项规划以及国家节水型高校标准的指导下,将《海绵城市建设技术指南》(文中简称为《指南》)与校园现状与《节水型高校评价标准》相结合,根据学校所在城市土地利用现状、降雨量、气候条件等历史资料,测算年径流量和入渗量,结合校园地形、降水等进行海绵设施的选址与设计,充分利用地形状况进行排水区域划分,组织区域排水、集蓄系统,通过积极引入海绵城市技术、优化结构、提高非常

规水再利用等措施减少常规水资源使用量。

1.2 海绵节水校园建设项目情况

福建林业职业技术学院江南校区二期建设 B 地块建设项目位于南平市延平区夏道镇小鸠村, 规划用地面积 103 874 m², 建筑面积 85 655 m², 容积率 0.82, 绿地面积 30 650 m², 绿地率约 30%, 总投资 3 亿元, 主要包括有实训楼、学生宿舍及附属用房及道路、广场、桥梁、给排水、供电、消防以及绿化等公建配套设施等。

1.3 海绵节水校园建设理念与思路

案例学校根据《南平市海绵城市建设方案设计技术导则》及《指南》要求, 充分利用学校处于“全国唯一一个位于国家公园保护发展带上的海绵示范城市”的独有优势, 形成“碳中和+碳达峰+唯一国家公园保护发展带+海绵示范城市+东南丘陵山地+节水型高校建设”多位一体的生态设计理念, 着力建设一个综合解决防洪、防汛、水土流失的“山地丘陵地区海绵校园+全生命周期实施节水措施”的节水型高校。

案例学校二期建设 B 地块项目结合地形形成具有自身特色的“三个无处”海绵节水校园建设思路, 即在道路及周边采用透水铺装、雨落管断接等措施, 使硬化地面的雨水不断接入海绵设施, 进而实现雨水无处不渗; 在建筑周边的下沉式绿地中采用水道连通与蓄滞空间建设, 做到水道无处不通; 构建“海绵骨架”串联地块内各建设项目, 以点、线、面相结合的方式实现暴雨洪峰水量无处不错。一是优化道路与绿化带及周边绿地关系^[4], 将地表雨水排放和雨水收集设施统筹考虑, 将传统排水系统转化为对雨水综合利用的可持续用水系统, 实现自然降雨通过路面雨水管网有组织的收集与流转, 经净化等预处理后流入绿地内具有存储功能的海绵设施。二是根据校园土地性质、使用要求、生态定位等实际情况合理设计海绵节水校园, 对排水管道、绿地系统、道路管网、建筑管网等系统功能的雨水及地表水进行有效收纳、储存、缓流, 以对水资源进行调蓄与利用, 实现海绵节水校园的建设目标。三是在优先考虑生态自然、美化校园环境等基本功能的前提下, 结合绿地海绵功能需求, 根据净水、环境保护等要求合理选用海绵设施周边的植物, 优先选用已经验证的适应当地气候且耐水、净化等能力较强的植物, 如图 1。

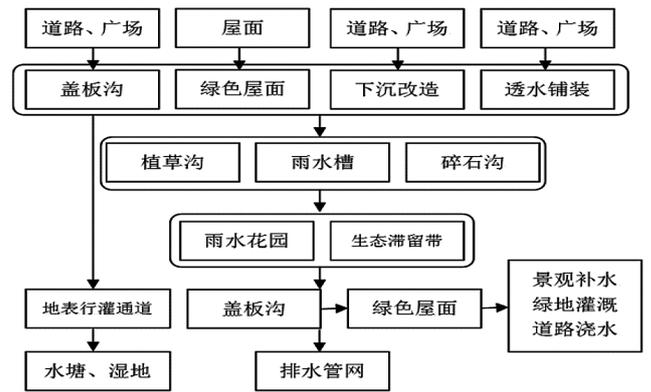


图 1 海绵节水校园方案技术路线图

Fig.1 Technical roadmap for sponge water-saving campus solution

1.4 海绵节水校园建设技术措施

案例学校海绵节水校园的建设结合“碳中和+碳达峰+唯一国家公园保护发展带+海绵示范城市+东南丘陵山地+节水型高校建设”多位一体的生态设计理念及“三个无处”的海绵节水校园建设思路, 合理考虑技术措施用于建设“山地丘陵地区海绵校园+全生命周期实施节水措施”的节水型高校。

一是合理收集建筑物、道路及周边非常规水源。建筑屋面采用种植屋面, 屋面多余雨水流入断接设计的排水立管, 下部排水立管出口结合景观美化及建筑散水等因素布设在鹅卵石下凹带, 在缓解雨水对绿地冲刷的同时, 科学地进行水质净化与海绵系统储水。在建筑及道路周边的绿地和低洼地带设计为具有雨水调节功能的下沉绿地, 力争将下沉绿地打造成雨水花园, 对收集储存的雨水进行过滤净化、调节储蓄、缓慢灌溉植物, 结合自然净化与现代雨水处置技术, 形成一种具有生物滞留与景观相结合的功能体。尽可能考虑道路两侧及广场利用植物形成排水槽等绿色生态的引流方式, 将雨水导流至地块地势较低的海绵体中, 超流雨水经海绵体流入地块雨水管线, 并在地块雨水管线接入市政雨水管网之前设置雨水调蓄池, 尽可能充分利用地块雨水^[5], 如图 2。

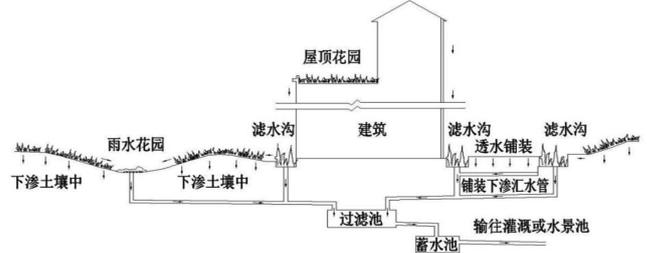


图 2 屋面雨水断接示意图

Fig.2 Schematic diagram of roof rainwater disconnection

二是通过雨水收集再利用系统加强雨水的间接利用和直接利用^[5],减少雨水溢流以及混合溢流排放,采用人工湿地等技术净化溢流污水,雨水经净化处理后,通过人工取水与水泵抽水等方式将海绵体与雨水模块内的非常规水输送至各用水点,将非常规水用于绿化浇灌及景观用水,起到节水、节能、环保的作用^[5]。雨水收集再利用系统的技术流程为屋面/道路雨水收集→水质净化系统→海绵体储水池→绿化浇灌及景观用水使用,如图3。

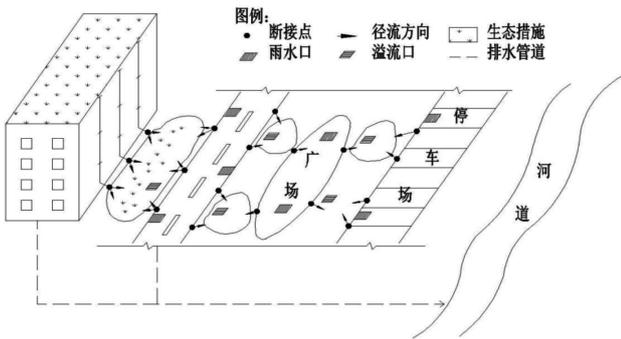


图3 雨水断接流向示意图

Fig.3 Schematic diagram of rainwater disconnection flow direction

三是下沉式绿地与雨水花园的植物以乡土植物为主,选用耐渍的须根、冠幅饱满的植物,植物群系配置采用乔木、灌木、地被植物等的有机层次搭配。种植屋面以草坪为主,套用的花卉、矮灌。植被缓冲带选择耐冲刷、耐浸渍的植被,以草本植物为主。根据地区的特定气候与土壤条件,下沉绿地植物选用南洋杉、广玉兰、香樟、扶桑、含笑、散尾葵、一叶兰、沿阶草、美人蕉、棕榈、苏铁、桂花、棕竹、紫薇、黄杨、百日草、矮牵牛、菊花等,如图4。

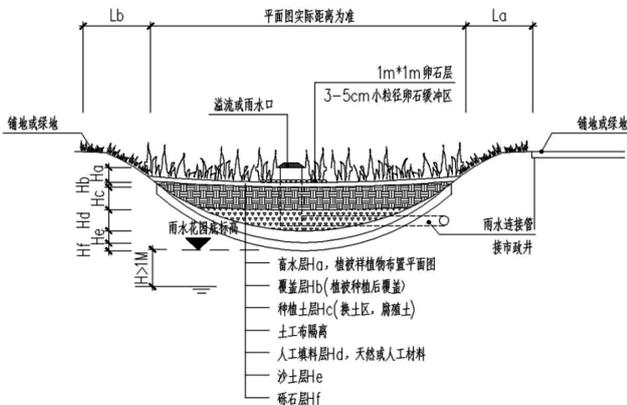


图4 雨水花园做法示意图

Fig.4 Schematic diagram of rainwater garden construction

2 海绵节水校园的实践

根据《福建省南平市海绵城市建设工程方案设计导则》(试行)及《指南》要求,南平市属于年径流总量控制率的Ⅲ区,年径流总量控制率取值不小于70%,因此确定案例学校海绵城市设计目标为年径流总量控制率不低于80%(对应设计降雨量为24.2 mm),年径流污染物去除率(SS)不低于50%。

案例学校为成功创建节水型高校,在新建地块中建立非常规水资源利用系统。首先,绿地浇灌主要采用收集处理后的雨水,而雨水储存于位于地块绿地中的海绵体中,浇洒绿地时采用人工浇洒、微喷和滴灌相结合的节水灌溉方式,利用设计的雨水回收系统及流经校内的“灶后垅河”进行补水^[5]。其次,设置雨季超量雨水收集系统,通过地下管网收集到一期地块人工湖与二期地块人工湖,作为人工湖补水,一期地块人工湖平面面积2 430 m²,水位调节高度1 m,调蓄容积2 430 m³,二期地块人工湖平面面积约4 000 m²,水位调节高度0.5 m,调蓄容积2 000 m³,一、二期地块人工湖调蓄容积4 430 m³。通过以上措施建设一个有“弹性”会“呼吸”的节水型绿色校园。

2.1 设计调蓄容积计算

根据设计调蓄容积公式 $V=10H\psi F$, 其中: V 为设计调蓄容积(m³)^[6], ψ 为综合雨量径流系数(硬质铺装0.9、建筑0.9、沥青路面0.9、透水铺装0.4、绿地0.15), H 为设计降雨量(mm), F 为汇水面积(hm²)。依据项目所在地形状情况和雨水汇水划分,通过综合雨量径流系数的方法科学计算每个汇水分区所需的调蓄容积^[8],得出表1。

表1 项目综合雨量径流系数及设计调蓄容积计算表

Tab.1 Calculation table for comprehensive rainfall runoff coefficient and design storage capacity of

项目	合计	硬质铺装	建筑屋面	沥青路面	透水铺装	绿地
汇水面积/m ²	103 874	7 990	21 425	14 896	28 913	30 650
径流系数	0.539 5	0.9	0.9	0.9	0.4	0.15
设计降雨量/mm				24.2		
设计调蓄容积/m ³	1 356.23	174.02	466.64	324.43	279.88	111.26

根据表 1 可知项目地块汇水分区设置不小于 1 356.23 m³ 的调蓄容积,其中硬质铺装需要控制 174.02 m³,建筑屋面需要控制 466.64 m³,沥青路面需要控制 324.43 m³,透水铺装需要控制 279.88 m³,绿地需要控制 111.26 m³。结合实际需要与《指南》要求,设计地块绿地中的海绵体蓄水区面积(下称雨水花园)占总绿地面积的 25%,雨水花园面积为 30 650 m²×25%=7 662.5 m²,蓄水深度 200 mm,同时考虑种植植物的体积、溢流设施、沿边放坡等因素,取调蓄容积折减系数为 0.9,则蓄水容积为 7 662.5 m²×0.2 m×0.9=1 379.25 m³ 大于所需调蓄容积 1 356.23 m³,形成下表所示的汇水分区调蓄容积。

表 2 汇水分区调蓄容积表

Tab.2 Table of storage capacity for water diversion zones

面积/m ²	综合径流系数	目标调蓄容积/m ³	雨水花园/实际调蓄容积/m ³	实际可控雨量/mm
103 874	0.539 5	1 356.23	7 662.5	1 379.25

通过计算和分析,实际可控雨量 24.61 mm,根据表 3 南平市年径流总量控制率与设计降雨量关系表,利用线性内插法计算项目对应的年径流总量控制率为 $80+(85-80)\times(24.61-24.2)\div(29.1-24.61)=80.26\%$,满足雨水年径流总量控制率不低于 80% 的要求。

表 3 南平市年径流总量控制率与设计降雨量关系表

Tab.3 Table of the relationship between annual runoff total control rate and design rainfall in Nanping city

年径流总量控制率/%	70	75	80	85	90	95
设计降雨量/mm	17.50	20.50	24.20	29.10	36.60	49.70

2.2 雨水花园渗透排空时间计算

根据雨水花园渗透排空时间计算公式 $t_s = \frac{V_{sj}}{3600 aKJA_s}$,其中: t_s 为渗透排空时间(h), V_{sj} 为设施的实际调蓄容积(m³), J 为坡降系数一般取 1, K 为水在土地中的渗透系数(m/s),按短期渗透系数大于 150 mm/h 折算, a 为模型安全系数取 0.5, A_s 为有效渗透面积(m²)。因此项目雨水花园渗透排空时间为 2.4 h,满足 24 h 内排干积水的要求。

2.3 年径流污染物控制率计算

根据《指南》年(SS)总量削减率=年径流总量控制

率×海绵设施对 SS 的平均去除率^[7],已知年径流总量控制率为 80.26%,雨水花园海绵设施对 SS 的平均去除率为 0.9,可得年径流污染物削减率为 72.23% 大于年径流污染物削减率(SS)控制目标 50%。

3 海绵节水校园的研究分析

3.1 海绵校园建设评价

经统筹计算得出案例学校项目海绵校园建设评价表 4,可知案例学校海绵校园建设目标达标。

表 4 海绵校园建设评价表

Tab.4 Sponge campus construction evaluation form

综合指标	目标值	完成值
年径流总量控制率	80%	80.26%
年径流污染削减率	50%	72.23%
雨污分流比例	≥100%	1
雨水管渠设计标准	重现期≥5 a	5 a
结论	海绵校园建设目标达标	

3.2 节水型校园建设评价

《节水型高校评价标准》(T/CHES 32—2019、T/JYHQ0004—2019)要求节水型高校应设置雨水收集、再生水利用等非常规水利用设施,并运行良好。

案例学校在新建地块中建立非常规水资源利用系统,地块绿地中的海绵体蓄水区面积占总绿地面积的 25%,储蓄水均用于绿化使用,地块绿化养护标准按二级养护标准实施,确定的绿化灌水定额为暖季型年均定额 0.12 m³/(m²·a),地块年绿化浇灌用水量为 30 650 m²×0.12 m³/(m²·a)=3 678 m³/a。通过海绵校园建设,项目地块每年节约绿化用水 1 379.25 t,绿化用水节水率达到 37.5%,这为案例学校成功获评 2021 年度福建省第二批节水型高校作出巨大贡献。

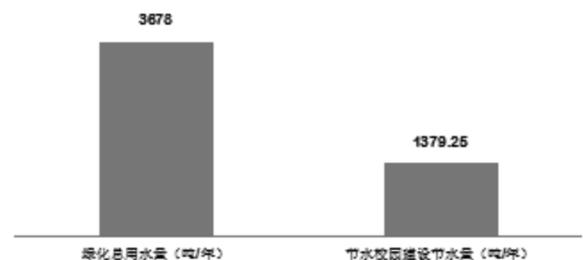


图 6 地块绿化节约用水量

Fig.6 Greening the plot to save water consumption

3.3 海绵节水校园应用展望

国家 2035 年远景目标要求推动“绿色发展,湿地

保护率提高到 55%”,海绵节水校园将是推动学校、社会发展绿色转型的一项技术手段,对提升校园生态系统质量与美丽校园建设具有重要作用。随着节水技术的发展与变革,海绵节水校园+BIM 技术、海绵节水校园+智能监测、海绵节水校园+碳排放控制、海绵节水校园+智能喷灌等方面都存在探索与实践的空间。

4 结论

(1)案例学校将海绵校园建设与节水型高校建设相结合,充分利用学校处于“全国唯一一个位于国家公园保护发展带上的海绵示范城市”的独有优势,形成“碳中和+碳达峰+唯一国家公园保护发展带+海绵示范城市+东南丘陵山地+节水型高校建设”的多位一体的海绵校园设计理念,不但实现校园有“弹性”会“呼吸”,还成功创建成为节水型高校。

(2)其余高校可以借鉴案例高校实践,按照《节水型高校评价标准》(T/CHES 32—2019、T/JYHQ0004—2019)要求,精心组织节水型高校建设工作,将海绵校园建设与节水型高校建设相结合,提高非常规水利用率,积极建设雨水集蓄和再生水利用系统^[2],积极将学校建成海绵节水型校园。

(3)海绵节水型校园建设项目应合理规划设计地

块绿地及其中的海绵体蓄水设施,在地块绿地率 $\geq 30\%$ 的前提下,绿地中海绵体蓄水区面积占比 $\geq 25\%$ 且蓄水深度 $\geq 200\text{ mm}$ 时,建设项目基本能够实现年径流总量控制率不低于 80%及年径流污染物去除率不低于 50%的海绵城市建设要求,并在充分将海绵体收集的雨水用于地块绿化浇灌的同时,项目地块按暖季型绿地二级养护标准的绿化用水节水率能够超过 30%。

参考文献:

- [1] 王东刚.坚守“三条红线”保障用水安全[J].河北水利,2016(6):14-15.
- [2] 吴莎莎.陕西省力争 35%以上普通高校建成节水型高校[N].陕西日报,2021-05-10(06).
- [3] 黄云玲.福建闽北森林校园基干树种评价与选择:以福建林业职业技术学院江南校区森林校园建设为例[J].四川林业科技,2015(2):55-59.
- [4] 冯磊.建筑小区海绵城市优化设计研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [5] 胡慧芬.基于海绵城市概念设计的高校绿色校园建设:以杨汛桥校区建设工程为例[J].科技通报,2020(8):62-64.
- [6] 金何鑫.生态修复背景下的南方城市水环境治理策略研究:以深圳市宝安区为例[D].荆州:长江大学,2020.
- [7] 伍祯.北京交通大学海绵校园景观规划设计研究[D].北京:北京交通大学,2018.

The Practice of Sponge City Technology in the Establishment of Water-Saving Universities ——Taking Fujian Forestry Vocational and Technical College as an Example

XUE Xianghong

(Fujian Forestry Vocational Technical College, Nanping, Fujian 353000)

Abstract: Propose to combine the construction of sponge campuses with the construction of water-saving universities, forming a sponge campus design concept and implementation plan that integrates "carbon neutrality+carbon peak+unique national park protection and development belt+sponge demonstration city+southeast hilly and mountainous areas+water-saving university construction". Combining the terrain to form a sponge water-saving campus construction concept of "three nowhere", scientifically calculating the storage capacity and infiltration emptying time, and constructing a campus unconventional water source utilization system through engineering construction, in order to achieve the collection and reuse of unconventional water sources. Research shows that the project site of the case school saves 1379.25 tons of green water annually, with a green water conservation rate of 37.5%, achieving a "flexible" and "breathing" water-saving green campus.

Key words: sponge campus; water-saving universities; water saving rate; design concept

(责任编辑:叶丽娜)

协同过滤算法在微信推荐小程序的应用

刘彦会

(闽北职业技术学院, 福建 南平 353000)

摘要:为了使客户能够方便、快速从大量数据中获取有效信息,本文对微信小程序采用 Mvc 的开发模式,并以 Node.js 技术进行设计,其总体架构主要包括交互层、数据访问层、控制层和数据库层。采用基于用户的协同过滤推荐算法和基于特征的协同过滤推荐算法结合的方式进行商品的推荐。对于基于用户的算法,采用 IC 特征选择算法进行商品特征的选取,再采用改进的 Pearson 相关系数进行相似性计算,获取推荐商品。对于基于特征的算法,采用改进的余弦相似性进行用户相似度的计算,根据相似性用户推荐商品。将推荐商品按照比例结合,最终进行商品的推荐。为了验证该微信小程序的性能,对其进行微信推荐小程序运行测试和商品推荐测试。试验结果表明微信小程序的各移动端均可正常运行,各项功能可进行操作,且向用户推荐的有效信息符合设计要求。

关键词:微信小程序;协同过滤算法;信息增益(IG)特征;商品特征;Pearson 相关系数

中图分类号:TP391.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0051-07

随着信息技术和互联网技术的迅猛发展,智能手机作为人们必备的通讯工具,已经深入应用到人们的生活和工作中,如商品的购买、信息的查询等。目前,对于信息的查询、餐厅点餐、商品的购买等应用,人们仍然以手机下载 APP 或者 iPad 进行相关功能的使用^[1],以获取有效信息。这种方式需要进行 APP 的下载、安装和更新,过程过于繁琐,且需要占据过多的手机内存,对手机内存的要求高。另一方面,老年人对于 APP 相关功能等的使用不够熟练,用户体验不好。若为餐厅点餐等,相关 iPad 设备的购买还会增加餐厅成本。因此亟需一种可以有效解决用户与应用对接问题的应用方式,以获取有效信息。

微信小程序是近年来由微信高层提出的以微信平台为基础的使用程序,人们不需要进行相关 APP 的下载,通过二维码或者相关关键词的搜索即可使用的小程序。这种方式传播快捷、不需要占用手机内存空

间,对于手机和移动宽带的要求低,使用成本低,可以有效提高用户体验。虽然,微信小程序可以为人们提供方便,但是海量的信息仍然无法使人们从中快速获取自己需要的信息。

协同过滤算法是目前应用较广且数据分析较为成功的推荐算法之一^[2-4],该算法通过对用户或者物品等的历史数据进行相似度的计算,并对不同的用户和物品进行评分和预测,挖掘用户的偏好,以根据近似用户的偏好进行相似物品的推荐。可以将其应用于微信小程序的数据推荐,以使用户快速获取有效信息。因此本文将协同过滤算法在微信推荐小程序的应用进行研究。

1 微信小程序的设计

1.1 总体设计

微信小程序采用 Mvc 的开发模式,并以 Node.js 技术进行设计。在微信小程序的设计时,其总体架构主要包括交互层、数据访问层、控制层和数据库层。该微信小程序的总体架构设计图如图 1 所示。

收稿日期:2023-04-13

作者简介:刘彦会(1981-),男,汉族,讲师,主要从事计算机科学与技术、计算机网络技术、互联网技术等研究。

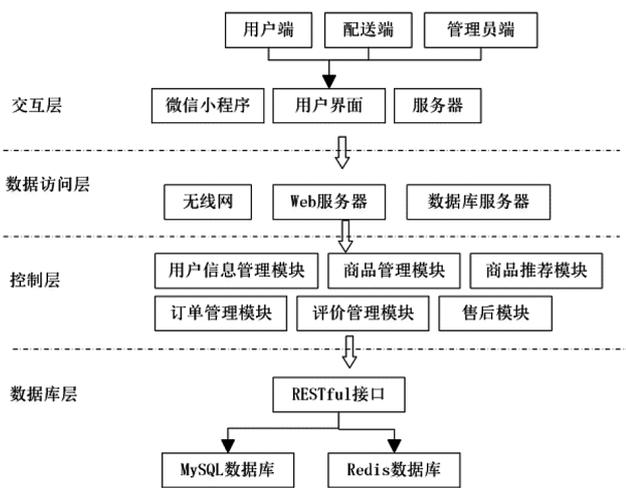


图1 微信小程序的总体结构设计图

Fig.1 Overall structure design of WeChat mini program

1.2 交互层

交互层主要用于为用户提供微信小程序的查看和使用功能,该层主要包括微信小程序端、用户界面和服务器。

微信小程序端是用户通过微信的手机移动端进行登录的入口。当用户通过二维码等方式获取微信小程序后,进行微信相关信息的授权即可进行登录,用户信息自动在程序的后台进行存储,即完成程序的登录。

用户界面是用户登录微信小程序后的界面,根据用户角色,一般可以设定用户端、配送端和管理员端,根据角色的不同其使用权限也不同。小程序中各类角色的权限设计如图2所示。

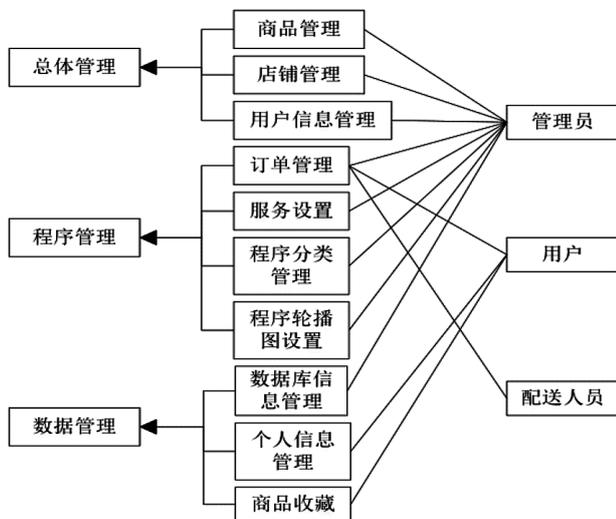


图2 微信小程序中各类角色的权限设置

Fig.2 Permission settings for various roles in WeChat mini programs

服务器则是为管理员便于进行后台相关数据的管理。

1.3 数据访问层

数据访问层主要为用户提供微信小程序进行信息访问的路径,该层包括无线网、Web服务器、数据库服务器。

无线网采用4G/5G网络,以提高系统数据传输的速率和稳定性。

Web服务器和数据库服务器分别为用户进入程序和数据库提供进入的窗口。

1.4 控制层

控制层是整个微信小程序的最核心层,通过相关技术和工具以模块的方式实现相关功能。根据用户的使用需求,一般设置用户信息管理模块、商品管理模块、商品推荐模块、订单管理模块、评价管理模块和售后模块。控制层中各模块可实现的功能如图3所示。

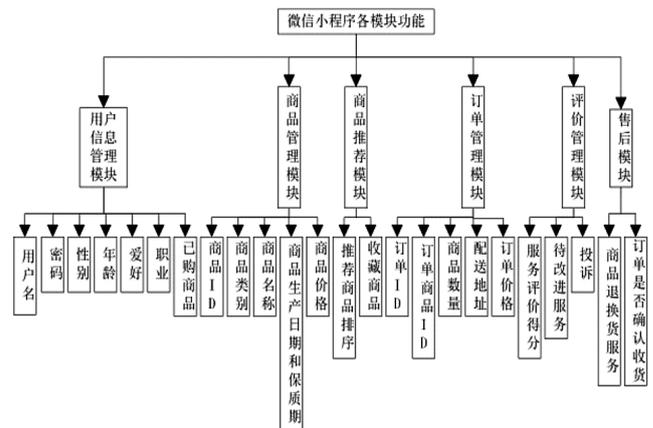


图3 控制层中各模块可实现的功能

Fig.3 The achievable functions of each module in the control layer

用户信息管理模块功能是对用户登录后的信息进行管理,通过设定用户名和密码可进行登录。根据用户的角色,管理员可在后台进行相关功能权限的设定,同时还可以进行用户相关信息的管理。

商品管理模块的功能是对商家销售的商品进行管理,一般由管理员对该模块进行管理,用户和配送员端进行查看。该模块一般是对销售商品的价格、图片、销售量、分类等进行管理。

商品推荐模块是通过协同过滤算法对用户购买商品和个人信息进行综合分析后,向用户推荐的可能感兴趣的商品。用户也可直接进行商品的浏览,自行选择感兴趣的商品。

订单管理模块功能是进行商品的下单、付款,并对下单后的商品进行跟踪管理,如物流信息、价格信息等进行管理。

评价管理模块的功能是在用户收到商品后,对商品确认收货并进行评价。

售后模块是对用户收到商品后进行跟踪服务,如商品质量问题的解决和退换货服务等。

1.5 数据库层

数据库层用于对相关数据进行存储,该层包括 RESTful 接口、MySQL 数据库和 Redis 数据库。

RESTful 接口是数据库与服务器之间数据交换的接口^[5],当微信小程序发出请求时,大部分的请求会自动转移到数据库服务器,并通过 RESTful 接口实现数据的读取^[6]。另一方面,当进行数据存储时,也通过该接口自动存储至相应数据库。

由于微信小程序可使用范围很广,存储的数据包括结构化和非结构化的繁杂数据,为了便于读取,采用 MySQL 和 Redis 共同对数据进行存储。对于用户信

息、相关店铺信息等不易频繁修改的数据,采用 MySQL 数据库进行保存。为了提高系统运行速率,采用读写分离技术进行数据的处理,即将数据库分为主和从数据库,主数据库进行数据的修改、录入和删除操作,从数据库进行数据的查询。数据库的读写分离原理如图 4 所示。

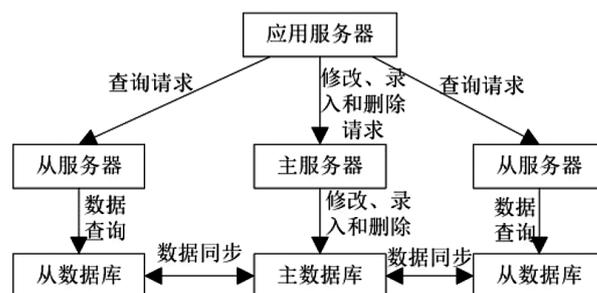


图 4 数据的读写分离原理图

Fig.4 Principle diagram of data read/write separation

在进行数据存储时,还需要确定系统中各类数据之间的实体关系和属性,可以通过图 5 中的 E-R 图确定微信小程序中各实体的关系。

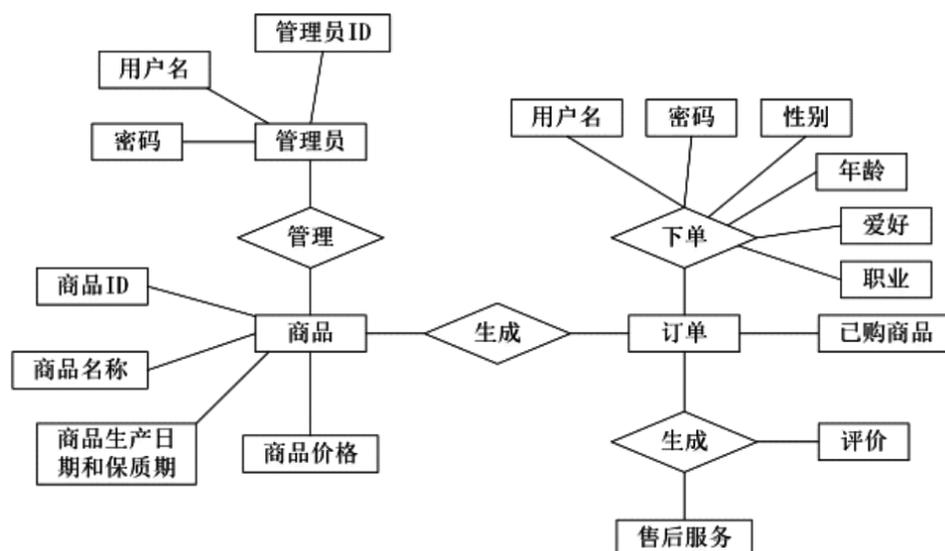


图 5 微信小程序中各实体的 E-R 关系

Fig.5 E-R relationships of entities in WeChat mini programs

对于人们采用微信小程序进行登录过程中产生的相关数据,数据多且需要频繁更新,这类数据采用 Redis 数据库进行存储。

2 协同过滤算法设计

随着经济全球化,用户在进行微信小程序的使用

时,在获得了各类商品信息资源共享的同时,也给用户带来了较大的信息负担。一方面,大量的商品信息可供用户选择和使用,用户无法快速获取所有信息;另一方面,用户无法迅速了解自己所需要的商品信息。为了使客户快速的获取适合自身的、尽可能多的商品信息,需要针对个体进行个性化的推荐。

目前,针对商品向用户推荐的算法主要包括基于

用户和基于特征的协同过滤推荐算法两种,但是这两个算法均存在一定适用范围的局限性。其中基于用户的算法存在冷启动和数据稀疏的问题,而基于特征的算法在相关性方面容易存在疏漏。为了保证推荐效果,可以采用将两个算法结合的方式进行商品推荐^[7]。对商品进行个性化推荐的算法流程图,如图6所示。

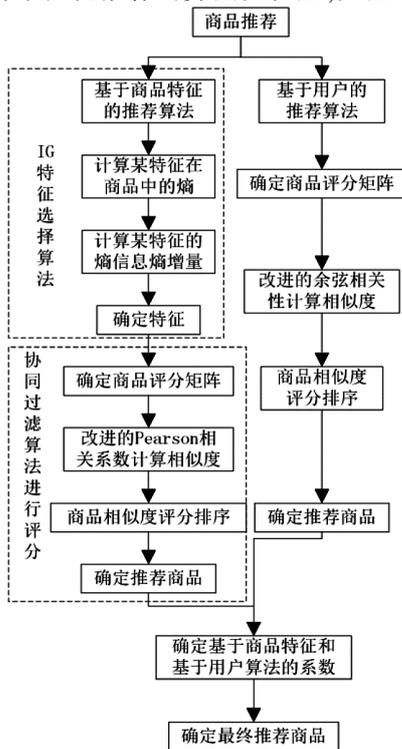


图6 对商品进行个性化推荐的算法流程图

Fig.6 Algorithm flowchart for personalized recommendation of products

2.1 基于商品特征的推荐算法设计

第一步是采用IG特征选择算法筛选出具有统计意义的特征。对于商品集合A、商品按照类别分类的集合B和商品特征集合D公式为

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, B = \{b_1, b_2, \dots, b_t\}, D = \{d_1, d_2, \dots, d_s\}.$$

对商品中某一特征c在商品集合A中的熵进行计算,如下式

$$\text{Info}(A) = - \sum_{i=1}^s P(d_i) \log_2 P(d_i),$$

式中: d_i 为c可能出现的特征; $P(d_i)$ 为特征c为特征 d_i 的概率。其后采用IG信息增益的方法计算某特征的信息熵增量为

$$\begin{aligned} \text{IG}(c) &= \text{Info}(A) - \text{Info}(A|c) \\ &= [- \sum_{i=1}^s P(d_i) \log_2 P(d_i)] - \end{aligned}$$

$$[-P(c) \sum_{i=1}^s P(d_i|c) \log_2 P(d_i|c) - P(\bar{c}) \sum_{i=1}^s P(d_i|\bar{c}) \log_2 P(d_i|\bar{c})],$$

式中: $P(c)$ 和 $P(\bar{c})$ 分别表示存在和不存在特征c的商品在商品A集合的占比; $P(d_i|c)$ 和 $P(d_i|\bar{c})$ 分别表示在类别 b_i 商品中含有特征c和不含有特征c的商品在类别 b_i 商品数量的占比。通过IG特征选择算法对特征进行计算,并对各特征的信息增益按照从大到小的顺序排序,根据系统需要可以筛选排序前6个作为确定的特征^[8]。

第二步是利用协同过滤算法根据特征对商品进行评分,确定向用户推荐的商品排序。在采用协同过滤算法进行评分时,需要确定用户对商品评分的评分矩阵P。对于现有的m个用户来说,其对已购买的n个商品进行评分,其中第i个用户对第k个商品的评分可以写为 $p_{i,k}$,则评分矩阵P为

$$P = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,m} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,m} \end{pmatrix}.$$

其后,对目标用户d采用Pearson相关系数对待评分商品和已评分商品的相似度进行计算,公式为

$$\text{Sim}(i,j) = \frac{\sum_{d \in G} (p_{d,c_i} - \bar{p}_{c_i})(p_{d,c_j} - \bar{p}_{c_j})}{\sqrt{\sum_{d \in G} (p_{d,c_i} - \bar{p}_{c_i})^2} \sqrt{\sum_{d \in G} (p_{d,c_j} - \bar{p}_{c_j})^2}}$$

式中: p_{d,c_i} 为目标用户d对已购商品 c_i 的评分; \bar{p}_{c_i} 为目标用户d对已购商品评分的平均值; p_{d,c_j} 为目标客户d对待评分某商品的预测评分; \bar{p}_{c_j} 为目标客户对待评分商品集合的预测评分平均值;目标用户属于现有的m个用户集合G。一般Pearson相关系数的值越低,则说明 c_i 和 c_j 用户越相似,但是这种计算方法仅仅考虑了用户的想法,而忽略了商品自身所具有的属性。

为了保证相似度的精确性,对Pearson相关系数进行改进,增加商品自身属性,并将其加入Pearson相关系数的计算中。对于第一步中确定的6个特征,分别赋予不同商品各特性值。对于m商品的x特性以 K_{mx} 表示,存在该特性则为1,不存在则特性为0。以不

同的商品为例,根据商品的特性赋予特性值,并以特性统计表的形式表示,如表 1 所示。

表 1 商品的特性统计表

Tab.1 Statistical table of product characteristics

特性	特性 1	特性 2	...	特性(z-1)	特性 z
商品 a	0	1	...	1	
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
商品 z	0	1	...	0	

则任意两个商品 m 和 n 之间的特性差异度 C_{mn} 为

$$C_{mn} = \sum_{i=1}^z |K_{m,i} - K_{n,i}|。$$

将商品自身属性加入 Pearson 相关系数的计算,可以得到更新后的 Pearson 相关系数 $\text{Sim}'(i,j)$ 为

$$\text{Sim}'(i,j) = \text{Sim}(i,j) \cdot e^{-C_{mn}}。$$

通过 Pearson 相关系数可以确定待评分商品的评分结果。将所有待评分商品的结果按照降序排列,对系统设置前 5 或者更多数量的商品推荐给目标用户即可。由此完成商品的推荐。

2.2 基于用户的推荐算法设计

在采用基于用户的推荐算法进行计算时^[9-10],第一步确定用户对商品的评分矩阵为

$$Q = \begin{pmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & q_{1,s} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & \cdots & q_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{r,1} & q_{r,2} & \cdots & q_{r,s} \end{pmatrix}。$$

在评分矩阵中,共包括 s 个用户对于 r 个商品的评分。其中,第 a 个用户对第 b 个商品的评分可以用 q_{ab} 表示。

第二步,采用余弦相似性方法确定目标用户近似的用户。对于任意两个用户,可以采用余弦相似性进行相似度的计算

$$\text{Sim}(u,v) = \cos(u,v) = \frac{\bar{u} \cdot \bar{v}}{\|\bar{u}\| \cdot \|\bar{v}\|}$$

$$= \frac{\sum_{h \in J_{uv}} q_{u,h} \cdot q_{v,h}}{\sqrt{\sum_{h \in J_{uv}} q_{u,h}^2} \sqrt{\sum_{h \in J_{uv}} q_{v,h}^2}},$$

式中: J_{uv} 为两个用户 u 和 v 均评分过的商品集合,商品 h 属于该集合; $q_{u,h}$ 和 $q_{v,h}$ 分别为 u 用户和 v 用户对

商品 h 的评分。但是,这种余弦相似度的计算方式缺少了不同用户之间在评分的差异性。为了减小差异性,对余弦相似性进行改进,可以通过在公式中增加用户平均分的方式,计算公式为

$$\text{Sim}(u,v) = \cos(u,v) = \frac{\bar{u} \cdot \bar{v}}{\|\bar{u}\| \cdot \|\bar{v}\|}$$

$$= \frac{\sum_{h \in J_{uv}} (q_{u,h} - \bar{q}_u) \cdot (q_{v,h} - \bar{q}_v)}{\sqrt{\sum_{h \in J_{uv}} (q_{u,h} - \bar{q}_u)^2} \sqrt{\sum_{h \in J_{uv}} (q_{v,h} - \bar{q}_v)^2}},$$

式中: \bar{q}_u 和 \bar{q}_v 分别表示用户 u 和 v 对各自所有评分商品的结果平均值。

其后,根据余弦相似性的结果按照降序的方式排序,并选择需要选择前 5 或者前 6 个用户作为相似用户。

第三步是产生推荐商品。对于用户 u 的待评分商品 h ,可通过下式计算:

$$q_{uh} = \bar{q}_u + \left[\sum_{v \in N_u} \text{Sim}(u,v) \cdot (q_{vh} - \bar{q}_v) \right] / \left[\sum_{v \in N_u} |\text{Sim}(u,v)| \right]$$

式中: N_u 为第二步中获取的相似用户集合。将待评分商品按照降序排列,并根据需求设置前 5 或 6 个商品作为推荐商品。

2.3 商品个性化推荐算法设计

为了能够同时结合基于商品特征的推荐算法和基于用户的推荐算法的优点,同时避免各算法的缺点,将两个算法的计算结果结合进行商品的推荐。两个算法的结果结合后的计算方式为

$$\begin{cases} N = \alpha S + \beta Y \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases},$$

式中: N 为需要推荐的商品个数; α 和 β 分别为基于商品特征和基于用户算法的系数; S 和 Y 分别为基于商品特征和基于用户算法的推荐商品个数。根据微信小程序中商品和用户数量以及其他影响因素,可以调整 α 和 β 值,以获取最佳的推荐效果。

该微信推荐小程序除了可以用于商品的推荐外,还可以应用于公交、新闻、地理和其他娱乐项目的推荐,适用范围较广。

3 试验结果

为了验证该微信小程序的性能,需要对其进行相关试验。考虑到本文主要针对微信小程序对商品的个性化推荐进行设计,因此在进行试验设计时,主要进行微信推荐小程序运行测试和商品推荐测试。

3.1 微信推荐小程序运行测试

一个微信推荐小程序在开发过程中需要经过多次的测试,才可以保证小程序在满足功能的同时,减少 Bug 出现,同时保证小程序运行的稳定性。

在进行微信小程序的运行测试时,主要针对其用户端、配送端和管理员端涉及到的使用功能进行测试。对于客户端的测试,需要用户打开微信小程序后,测试用户是否可以登录程序,查看相关功能,并在相关功能下进行操作。对于配送端的测试,需要配送员打开微信小程序后,测试配送员是否能够成功登录账号,查看待配送商品地图位置相关信息;对于管理员端的测试,需要管理员打开微信后,验证管理员是否能够成功登录账号,并在登录后是否可以对相关的信息和功能进行管理、增加、删除和更改等操作。测试结果如表 2 所示。

表 2 微信推荐小程序运行测试结果

Tab.2 WeChat recommended mini program running test results

序号	移动端	功能	是否可行
1	用户端	订单管理	是
		个人信息增加、删除、更改	是
		商品收藏	是
2	配送端	订单管理	是
		人员地址显示	是
3	管理员端	商品增加、删除、更改	是
		店铺信息管理	是
		用户信息管理	是
		订单管理	是
		程序管理	是
		数据库管理	是

由表可知,微信小程序的各移动端均可正常运行,且各项功能均可进行操作,能够符合初始设计要求。

3.2 商品推荐测试

微信小程序设计完成后,通过平稳运行 2 个月后,共上线 4 家店铺,累积上线 231 个商品,这些商品

包括食品、发饰、家居用品、文具用品和电子用品。用户在微信小程序使用过程中,共获得推荐结果约 1 000 余次,各店铺的商品推荐结果、有效反馈信息和用户评价数量如表 3 所示。

表 3 商品推荐测试结果

Tab.3 Product recommendation test results

店铺	推荐次数	有效反馈信息数	用户评价次数	好评次数	推荐结果满意度/%
A	261	256	244	224	91.8
B	221	214	208	199	95.7
C	297	288	279	257	92.1
D	243	239	223	210	94.2

由表可知,用户获得的有效反馈信息较多,且对推荐的商品基本满意,最终的商品有效推荐信息好评率占比均达到 90%以上,可以满足用户要求。

4 结论

传统的采用手机进行信息查询、餐厅点餐、商品的购买等,需要手机下载 APP 或者 iPad 进行相关功能的使用。这种使用方式过程过于繁琐,且需要占据过多的手机内存。为了使客户能够方便、快速从大量数据中获取有效信息,本文主要进行了以下 3 项工作:

(1) 对微信小程序采用 Mvc 的开发模式,并以 Node.js 技术进行设计。微信小程序的总体架构主要包括交互层、数据访问层、控制层和数据库层。

(2) 对商品进行个性化推荐的算法进行了设计,通过将基于用户的协同过滤推荐算法和基于特征的协同过滤推荐算法结合进行商品的推荐。对于基于用户的算法,采用 IG 特征选择算法进行商品特征的选取,再采用改进的 Pearson 相关系数进行相似性计算,获取推荐商品。对于基于特征的算法,采用改进的余弦相似性进行用户相似度的计算,根据相似性用户推荐商品。将推荐商品按照比例结合,最终进行商品的推荐。

(3) 为了验证该微信小程序的性能,对其进行微信推荐小程序运行测试和商品推荐测试。试验结果表明微信小程序的各移动端均可正常运行,且各项功能

均可进行操作。微信小程序向用户推荐的有效信息符合设计要求。

参考文献:

- [1] 王聪,刘启华,周瑜瑾,等.移动环境下用户情景和美食特征关联分析[J].现代商贸工业,2015,36(11):55-57.
- [2] 李瑞敏,林鸿飞,闫俊.基于用户-标签-项目语义挖掘的个性化音乐推荐[J].计算机研究与发展,2014,51(10):2270-2276.
- [3] 张燕,唐振民,李燕萍.面向推荐系统的音乐特征抽取[J].计算机工程与应用,2011,47(5):130-133.
- [4] 牛滨,孔令志,罗森林,等.基于 MFCC 和 GMM 的个性音乐推荐模型[J].北京理工大学学报,2009,29(4):351-355.
- [5] 闫俊,刘文飞,林鸿飞.基于标签混合语义空间的音乐推荐方法研究[J].中文信息学报,2014,28(4):117-122.
- [6] 周绍景,应杰,潘宏斌,等.RESTful 架构的应用研究[J].数字技术与应用,2018,36(5):59-60.
- [7] 侯翠琴,焦李成,张文革.一种压缩稀疏用户评分矩阵的协同过滤算法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2009,36(4):615-638.
- [8] 朱郁筱,吕琳娜.推荐系统评价指标综述[J].电子科技大学学报,2012,41(2):163-175.
- [9] 高滢,齐红,刘亚波,等.基于用户等级的协同过滤推荐算法[J].吉林大学学报(理学版),2008,46(3):489-493.
- [10] YU H, LI J H. Collaborative filtering recommendation algorithm using social and tag information [J].Journal of Chinese Computer Systems,2013,34(11):2467-2471.

Simulation Modeling and Analysis of Ocean Transportation System under Sea Ice Condition

LIU Yanhui

(Minbei Vocational and Technical College, Nanping, Fujian 353000)

Abstract: The traditional use of mobile phone for information query, restaurant ordering, commodity purchase need mobile phone download APP or iPad for the use of related functions, cumbersome process, occupy too much memory of the phone. In order to enable customers to easily and quickly obtain effective information from a large amount of data, the Mvc development mode and Node.js technology were adopted to design the wechat small program. The architecture of the wechat small program was mainly included interaction layer, data access layer, control layer and database layer. The product recommendation was carried out by combining user-based collaborative filtering recommendation algorithm and feature-based collaborative filtering recommendation algorithm. For the user-based algorithm, the IG feature selection algorithm was used to select the commodity features, and then the improved Pearson correlation coefficient was used for similarity calculation to obtain the recommended commodities. For the feature-based algorithm, the improved cosine similarity was used to calculate the user similarity, and products were recommended according to the similarity. Combine the recommended goods according the proportion, and finally carry out the product recommendation. In order to verify the performance of the wechat small program, the wechat recommendation small program operation test and commodity recommendation test were carried out. The test results show that all mobile terminals of wechat small program could operate normally, all function could be operated, and the effective information recommended to users meets the design requirements.

Key words: wechat small program; collaborative filtering algorithm; information gain characteristics; commodity characteristics; Pearson correlation

(责任编辑:马阿曼)

群体智能优化算法的区域景观规划方法

周芸

(安徽文达信息工程学院, 安徽 合肥 231201)

摘要:由于应用传统方法无法因地制宜地进行区域景观规划设计,导致规划后的区域景观适应度较低,因此提出基于群体智能优化算法的区域景观规划方法。采用倾斜摄影测量技术,构建区域景观三维场景,在此基础上,利用群体智能优化算法划分景观建设区域,最后从道路、建筑、水体、绿化设施等方面,得出区域景观的规划结果。将设计的规划方法应用到实际中可以发现,应用所提方法可进行区域景观优化设计,且规划后适宜度综合评分为90.47,优于对比方法,具有更好的规划效果。

关键词:区域景观;景观规划;群体智能优化算法;三维场景

中图分类号:TU985 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0058-05

区域景观是物质实体与城市空间结合的外在表现,是自然要素与人造景观的有机结合。地域景观具有改造、空间设计、规划等功能,在特定地点起着协调者与环境的关系,并使城市得以持续发展^[1]。地域景观营造出丰富的生活环境,每一个景观元素都蕴含着多少人的成长记忆和自身对历史文化的归属感。因此良好的地域性景观在满足人们基本生活需求的基础上,更能使人心旷神怡,独具魅力。具体而言,区域景观包含了所有的区域外观形态和局部空间,和各种结构构成的形态和要素。地区生态化是景观设计师对地区景观的最佳追求。

区域景观设计是在满足居民基本生活需求的基础上,合理关联各要素,协调与周边环境的关系。区域形态组织是区域空间功能结构的粘合剂^[2]。从区域景观规划的现状来看,存在认识偏差、规划成果控制不力等问题。因此,针对传统区域景观规划方法存在的

问题,提出一种群体智能优化算法。群体智能优化算法是一种较好的概率搜索算法,主要作用于分布式个体上,无直接中央控制,鲁棒性较强,且每个个体之间相互作用,执行能力较强,服从规则简单,因此其运行速度较快。以传统的区域景观为基础,本次利用群体智能优化算法进行优化规划,并从数学角度上实现对现有区域景观的优化设计。

1 区域景观规划方法设计

区域景观规划对象是整个区域景观系统,规划范围是以区域景观系统为重点,并涵盖与区域景观发展密切相关且影响较大的大范围区域整体。将结合研究区域生态、人文等实际情况,应用现代技术识别区域内的重点景观资源,结合层次分析法^[3]、城市灾害学及城市规划学等多个理论,对长沙市生态建设进行规划,并通过技术手段体现出部分生态分区和主要生态工程的建设效果。根据这一原则,制定区域景观规划的技术路线,具体见图1。

地区景观规划工作应遵循生态习性适应、观赏性与功能兼备、规划与搭配相适应等原则,即达到有效规划地区景观的目的。

收稿日期:2023-06-16

基金项目:安徽文达信息工程学院自然科学重点科研项目(XZR2023A03);安徽省省级质量工程项目(2022jyxm1674)。

作者简介:周芸(1986-),女,汉族,副教授,主要从事建筑与景观设计的研究。

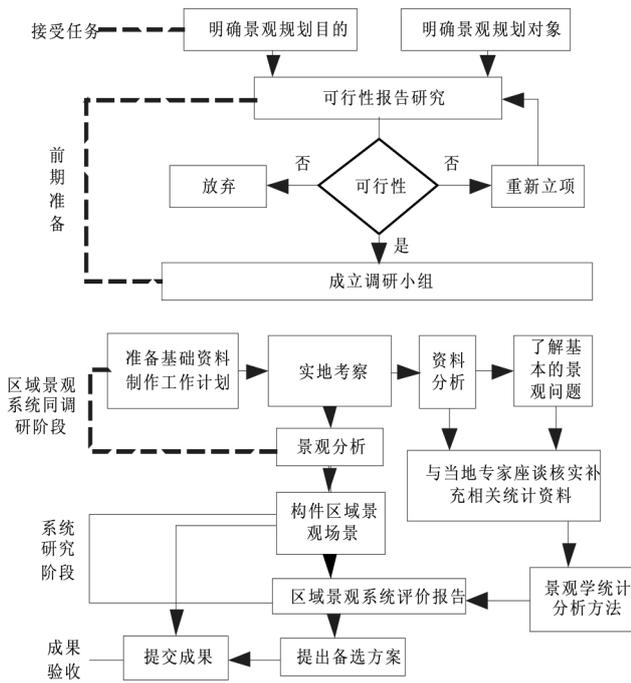


图 1 区域景观规划工作程序图

Fig.1 Working procedure diagram of regional landscape planning

1.1 构建区域三维场景

应用倾斜摄影测量技术通过携带不同角度的相机同时从不同角度获取地面图像数据^[4]。数码摄影测量系统中的共线方程是建立像方坐标系与物方坐标系关系的基础,根据共线方程可以导出摄影测量的数据求解结果,共线方程公式为

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X-X_s) + b_1(Y-Y_s) + c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \\ y = -f \frac{a_2(X-X_s) + b_2(Y-Y_s) + c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s) + b_3(Y-Y_s) + c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_i, b_i 和 c_i 分别为常数系数, 而 X, Y, Z, X_s, Y_s 和 Z_s 分别为实际区域坐标和影像区域坐标。其主要通过建立该区域的三维实体模型来完成其地区景观的规划设计。将其应用于实际时, 应该注意研究区域的地面起伏较大, 或存在其余特殊的地理因素, 则需要建立符合其实际的地面模型, 然后与三维模型相结合, 完成模型的搭建。在完成模型结合的同时, 应注意其点状要素、线状要素及面状要素的叠加。

设 m, n 分别表示 X 方向与 Y 方向的格网边长, 则 $i = \text{int}(X/n), j = \text{int}(Y/n)$, 式中 int 表示取整运算。设点 (X, Y) 落在点 (i, j) 、点 $(i+1, j)$ 、点 $(i+1, j+1)$ 及点 $(i, j+1)$ 四点格网中, 根据上述格网的高程值和点 $P(X, Y)$ 的位置, 可计算出点 $P(X, Y)$ 的高程值 Z 。如格网四点空间

坐标简记为 $d_1(X_i, Y_j, Z_{ij}), d_2(X_{i+1}, Y_j, Z_{i+1j}), d_3(X_i, Y_{j+1}, Z_{ij+1}), d_4(X_{i+1}, Y_{j+1}, Z_{i+1j+1})$, 则点 P_1 的高程为 $Z_1 = \lambda_1 Z_{ij} + (1 - \lambda_1) Z_{i+1j}$, 点 P_2 的高程为 $Z_2 = \lambda_1 Z_{ij+1} + (1 - \lambda_1) Z_{i+1j+1}$, 又由 $\lambda_2 = (Y - Y_j) / (Y_{j+1} - Y_j)$ 可知点 P 的高程为 $Z = \lambda_2 Z_1 + (1 - \lambda_2) Z_2$ 。基于以上三维场景的构建, 实现区域景观规划方法设计。先通过数字高程模型所需的高程数据, 得到区域划分的数学模型为

$$p(\omega_k) = p(u_k, \sum_k) y_o \quad (2)$$

式中: u_k 表示区域划分的参数节点, \sum_k 表示数据特征征集。

在规划区域景观时, 首先从现有的纸张资料和数字地形资料中提取关键的高程数据, 这些数据通常表现为等高线和高程点两种形式^[5]。为构建精确的地形模型, 利用 ArcGIS 三维空间分析模块中的先进工具, 这两种数据格式结合。通过这一过程, 生成不规则三角网(TIN), 这是构建数字高程模型(DEM)的基础。接下来, 对高程数据三角网进行转换, 首先设置合理的分辨率信息, 以确保 DEM 的精度和细节。通过这一步, 成功获取所需的 DEM 数据, 将预备数据与处理完成的 DEM 数据和测量的图像数据进行融合。得到了数字化的地形文件, 该文件详细记录区域内地形的起伏、变化以及特征。最后, 基于数字化的地形文件, 整合区域道路、水系、建筑、植被及其他附属要素的信息。这些要素在三维场景中得到生动的展现, 形成综合效果。通过这种多要素的综合应用, 成功地构建一个真实感强烈、细节丰富的区域三维场景, 以为后续的景观规划和设计提供直观且有力的支持。

1.2 利用群体智能优化算法划分景观建设区域

应用群体智能优化算法中的微粒群算法和克隆选择算法确定景观区域。在该算法中, 粒子的位置与所求问题的解相对应, 在空间中通过完成粒子的搜索以求解, 其最优解是通过粒子不断调整位置来实现搜索的, 即通过不断迭代获得最优解^[6]。设每个粒子搜索到的最优解为 P_i^k , 则整个粒子群搜索到的最优解为 P_g^k 。粒子的位置与搜索速度调整按照下式执行, 即

$$\begin{cases} V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k), \\ X_{p(\omega_k)i}^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: c_1 和 c_2 为常数, r_1 和 r_2 是 $(0, 1)$ 范围内均匀分布的随机数, P_i^k 代表个体极值点位置, P_g^k 表示全局极值点

位置。具体实现时,粒子群算法中的粒子和克隆选择算法中的抗体均在定义域内表示可行解。克隆算子意味着抗体完全复制,子代抗体和父代抗体完全一样。先对强化的算子按照群体亲和力以降序的形式排列,然后再复制抗体,复制抗体的数目为

$$nc_{V_i^{k+1}} = \sum_{i=1}^N \text{round}\left(\frac{\beta n}{i}\right) \quad (4)$$

式中:nc 为克隆后的抗体规模,β 为克隆系数,n 为常数,i 为个体排序后的序号,round(·)为取整函数。由式(3)可知,排序后第 i 个抗体将会克隆出 $\text{round}\left(\frac{\beta n}{i}\right)$

个相同的抗体^[7]。在群体智能优化算法中,引入区域三维场景数据作为输入项,得到相关的指标权重,然后用线性的方法得到景观建设规划中区域划分的分布集合为

$$Y_w = T_j \{X_n, Y_{n-\tau}, X_{n-2\tau}\} \quad (5)$$

式中: T_j 为区域划分的景观建设区域范围系数, $X_n, Y_{n-\tau}$ 和 $X_{n-2\tau}$ 分别表示标准化后的人口密度、标准化后的人均 GDP 以及交通通达度系数。由此可以确定景观建设的研究区域,通过相关系数,得到景观规划的识别精度。

1.3 确定区域景观格局

所谓区域的景观结构设计就是对区域功能规划的进一步落实,其景观结构的设计是实现其功能的基础,只有将景观生态系统建立在有序的空间结构中,才能通过不同的结构类型实现不同地区的不同功能,所以要想真正建立起合理的景观生态系统,还必须对区域景观空间结构进行合理的规划设计。景观结构的三要素是斑块、基质和廊道^[8]。通过对景观要素的合理配置,将三要素有机结合,使其可分别承担生态环境培育、生态平衡维护、生态信息存储、传递与聚散等功能,从而规划和设计景观空间结构。区域景观格局可通过基质、斑块、廊道等不同组合方式进行规划,进而形成均匀型、聚集型或其余特定组合的空间分布格局。根据地形类型选择适合规划区域的景观格局。

1.4 实现区域景观规划

在确定区域景观格局的基础上,结合区域景观的组成元素,得出区域景观的规划结果。图 2 表示的是区域景观的构成体系。

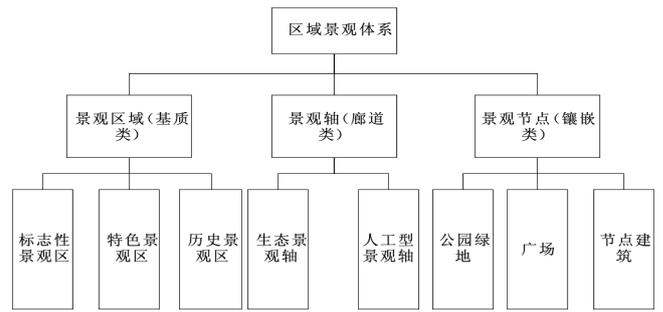


图 2 区域景观构成体系

Fig.2 Regional landscape composition system

1.4.1 道路景观规划

根据区域土地利用现状,完成区域道路等级的科学规划,即将现有道路分为交通干道、生活服务道路及支路三个等级;与此同时,从长远考虑城镇道路交通负荷和静态停车功能的扩展。二是合理控制区域道路红线宽度,注重道路线形功能与景观观感;一般情况下,主路断面约 30 m,设计速度 60~80 km/h,规划主路间距约 600~800 m;次路断面约 15~18 m,设计速度 35~40 km/h,次路间距约 250~400 m^[10]。选路方案时,要认真研究各路线方案的沿线地形地貌、风景特色,确定一定的风景控制目标,同时要确定应回避的特色目标,充分利用风景资源,使沿线视野景观多样化,与自然景观巧妙结合。

1.4.2 水体景观规划

水色、波纹等都是景观设计中的重要因素,水体景观包括堤岸、湿地、湖泊、集水区、植被、水生植物等。水景观规划设计应保护河流、水库及地下水源,防止水质恶化。与此同时,还应该发挥当地的水域特色,可为城市创造良好的水生态环境。对于城市附近乡村的建设中,也应对其废气的水塘、河道进行整治,按地点、规模、深度等情况,对水塘及河道进行充分保留和改造。

1.4.3 绿化设施规划

作为区域景观中生态与视觉两大重要功能载体的绿地,其控制也应从两个方面入手,主要关注生态网络和廊道的连续性和完整性。控制重点地段绿地宽度和连通度,保证廊道生态功能的发挥;与此同时,植物配置也是绿地控制的重点,要尽可能选择乡土树种,选择适宜的地域性树种,结合速生缓生树种,确保绿化效果。依据不同功能和形象要求的景观空间,结合土地利用状况和人群参与程度,对绿化植被进行分层控制。通常将其分为下层地被植物、下层花丛、中层小乔木、上层大乔木四层。对于区域功能活动较集中

的地区,可安排 2 层或 3 层植被,在底部空间规划活动场地,尽可能保持树冠的连续性,以实现整体生态廊道和网络的完整。区内重点建设的景观区,应考虑植物的花期衔接和叶色,根据季相变化,创造四季鲜明的特色景观。对于以居住为主的地区,则可考虑植物所营造的清新空气的作用,适当选择芳香植物和保健植物的树种。工业地区则应考虑营造有利于净化空气的植物,可选择用抗性、吸尘性较好的生态防护树种。

2 实例分析

为验证基于群体智能优化算法的区域景观规划方法的景观规划效果,进行实例分析。选取一定的研究区域,在规划前、规划后进行评价,对比结果显示了基于群体智能优化算法的应用优势。选取湖南省长沙市一区域作为研究对象进行算法验证。该研究区域位于湖南省东部偏北、湘江下游和长沙盆地西缘,气候适宜。在对该研究区域景观进行规划前,先对其初始景观进行适宜度评价。选取相关评价指标建立区域景观适宜性评价体系如表 1 所示。

表 1 区域景观适宜性评价体系

Tab.1 Regional landscape suitability evaluation system

指标类型	指标
自然因子	高程
	坡度
	坡向
	地势起伏度
	平均降水量
	平均气温
领域因子	土壤有机质含量
	到城市中心的距离
	到主要道路的距离
社会经济因子	到主要水域的距离
	人口密度
	人均地区生产总值

以该表为基础,运用 Logistic 回归模型进行分析,其适宜度评价函数可表示为

$$p_{Y_{m,k}} = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_\theta X_\theta)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_\theta X_\theta)} \quad (6)$$

式中: $p_{Y_{m,k}}$ 表示特定类别景观在区域中出现的概率,概率值越高表示该类景观布局更为合适,即景观空间分布的适宜程度较高; $X_i (i=1,2,\dots,\theta)$ 代表景观分布的

影响因子; α 为常数; $\beta_i (i=1,2,\dots,\theta)$ 为回归系数。基于该方法,先从图像中提取出水域、林地等景观并为其栅格赋值。接着,提取景观图像中各栅格的值以及评价指标的空间分布栅格值。随后,应用回归分析得到评价指标的回归系数。最后,根据式(5)计算出每个景观的适宜性评价结果。以此为基础,完成规划前区域景观评价,之后利用设计的基于群体智能优化算法的区域景观规划方法实现对研究区域的景观规划,得到其景观要素类型斑块平均规模变动结果如表 2 所示。

表 2 景观要素类型斑块平均规模变动分析结果

Tab.2 Analysis results of patch mean size change of

景观要素类型	landscape element types		
	斑块数/块	平均值/hm ²	变动系数
针叶林	5 762	317.0	35.98
阔叶林	1 714	195.0	46.29
针阔混交林	23	184.1	50.81
灌木林	3 177	302.9	31.47
疏林	386	173.0	87.62
更新林地	30	71.7	49.87
荒地	241	90.4	178.0
水域	1 078	66.2	31.75
居民区及其他	773	34.8	30.24

以具体规划数据为基础,结合当地地形,进行三维景观模型的构建,其模型俯视图如下图 1 所示。



图 1 研究区域景观规划结果

Fig.1 Study area landscape planning results

在完成区域景观规划后,以文献[4]方法和文献[5]方法为对比方法,以验证三种方法性能。对比结果如表 3 所示。

表3 适宜性评价对比

Tab.3 Comparison of suitability evaluation

景观要素	规划前适宜度评分	应用文献[4]方法适宜度评分	应用文献[5]方法适宜度评分	应用所提方法适宜度评分
针叶林	61.2	72.9	85.9	90.2
阔叶林	63.4	78.5	85.8	91.5
针阔混交林	59.8	79.1	82.1	89.2
灌木林	60.9	79.8	79.9	87.1
疏林	58.2	80.2	78.4	90.4
更新林地	56.7	81.9	78.9	90.1
荒地	58.1	80.7	81.6	90.5
水域	58.9	80.4	81.7	92.7
居民区及其他	60.5	80.1	80.3	92.6
总评分	59.7	79.3	81.6	90.5

依据表3可知,采用三种方法对其进行重新规划后,其适宜度评分均高于规划前适宜度评分。对其评分进一步分析可知,应用文献[4]方法规划得出的综合评分为79.3,应用文献[5]方法规划得出的综合评分为81.6,应用所提方法规划后得出的适宜度评分为90.5。由此可得文中所提方法进行规划的景观适宜性更高,规划效果更好。

3 结束语

针对传统规划方法规划后区域景观适宜度评价较低的问题,提出一种基于群体智能优化算法的区域景观规划方法。该方法先通过倾斜摄影测量技术构建区域景观的三维场景,然后采用群体智能优化算法,划分景观建设区域,并从斑块、基质和廊道等三个部分确定区域景观的布局,最后考虑道路、建筑、水体、

绿化设施等方面,以获得区域景观规划的最终结果。通过实验得出如下结论:

(1)应用所提方法进行规划,区域景观适宜度评分得到90.47,获得大幅提升;

(2)通过应用所提方法,可有效提升区域景观的生态功能,促进区域的可持续发展,具有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] 曹瑜. 贵州威宁万亩油用牡丹观光园景观优化研究 [J]. 遵义师范学院学报,2020,22(6):66-68.
- [2] 张敏,金花. 基于立体正射影像对的三维立体景观设计方法研究[J]. 遵义师范学院学报,2019,21(2):95-98.
- [3] 孟文凯,赵墨林,王鹏. 基于层次分析法与熵权法相结合的配电网节能改造技术经济评估 [J]. 内蒙古电力技术, 2021,39(3):47-52.
- [4] 邓敬,邱建,殷荭. 基于 Mapping 方法的京沪高速铁路区域景观规划分析[J]. 中国园林,2019,35(5):96-101.
- [5] 卢天喜. 乡村民居景观规划的基本原则及方法探索:以焦作地区为例[J]. 焦作大学学报,2019,33(2):109-112.
- [6] 宋安琪,季心蕙,赵兵. 基于生态修复理论的长江岸线林带景观营造:以扬州市江都经济开发区沿江区域林带景观规划设计为例[J]. 园林,2020(3):71-75.
- [7] 陈影,崔江慧,赵宁,等. 土地生态景观规划对景观格局和生态功能的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(13):65-68,117.
- [8] 张进. 基于地域特色的水环境景观规划设计探索:以临淮岗水利风景区为例[J]. 产业与科技论坛,2019,18(11):217-218.
- [9] 斯特芬·奈豪斯,熊亮,丹尼艾勒·坎纳特拉. 三角洲适应性转型:基于景观的区域设计方法[J]. 风景园林,2019,26(9):8-22.
- [10] 曹杨. 基于交旅融合背景下的美丽公路景观规划[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018,14(9):319-321.

A Regional Landscape Planning Method Based on Swarm Intelligence Optimization Algorithm

ZHOU Yun

(Anhui Wenda Institute of Information Engineering, Hefei, Anhui 231201)

Abstract: Due to the inability of traditional methods to tailor regional landscape planning and design to local conditions, the adaptability of the planned regional landscape is low. Therefore, a regional landscape planning method based on swarm intelligence optimization algorithm is proposed. Firstly, use oblique photogrammetry technology to construct a three-dimensional scene of the regional landscape. Then, based on this, a swarm intelligence optimization algorithm is used to divide the landscape construction area, and the regional landscape pattern is determined from three parts: patches, substrates, and corridors. Finally, the planning results of the regional landscape are obtained from the aspects of roads, buildings, water bodies, and green facilities. Applying the designed regional landscape planning method to practical planning work, it can be found that the proposed method can optimize the regional landscape design, and the comprehensive suitability score after planning is 90.47, which is better than the comparative method and has better planning effect.

Key words: regional landscape; landscape planning; swarm intelligence optimization algorithm; three-dimensional scene

(责任编辑:马阿曼)

RFS-RF 的局部非线性模型辨识新方法

姜洋¹, 马砚秋², 陈榕², 刘景良², 张羲岭³

(1.福建农业职业技术学院 园艺园林学院, 福建 福州 350303; 2.福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;
3.福建省国电调试院有限公司, 福建 福州 350025)

摘要: 鉴于恢复力曲面法(Restoring Force Surface, RFS)和随机森林(Random Forest, RF)模型在参数辨识领域的优越性, 结合上述两种方法提出一种新的基于 RFS-RF 的局部非线性模型辨识方法。首先, 针对局部非线性模型求解其动力响应。其次, 根据获得的动力响应计算恢复力曲面与边际谱, 然后再通过边际谱求解非线性指标。再次, 通过多次改变结构的刚度和阻尼参数生成若干组非线性指标并建立随机森林模型。然后, 将新的非线性指标作为预测集输入已经建立的随机森林模型并判断系统的非线性类型和非线性函数形式。最后, 采用最小二乘法对局部非线性系统的待求参数进行精确识别。通过一个四层剪切型框架结构模型对所提方法进行验证, 研究结果表明: 基于 RFS-RF 的多自由度局部非线性模型辨识方法能够准确识别结构系统的非线性类型、函数形式以及未知参数。

关键词: 恢复力曲面; 随机森林; 边际谱; 模型辨识; 局部非线性

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0063-07

非线性系统辨识研究通常可以分为非线性探测、非线性定位、非线性模型辨识以及非线性参数辨识四个阶段^[1]。其中, 非线性探测和非线性定位是局部非线性系统辨识的基础, 截至目前方法已经较为成熟。非线性模型辨识的主要目的是确定系统中非线性的具体形式^[2]。在非线形类型确定方面, 频响函数的畸变特征是一个简洁的判别指标。Simon 等^[3]通过对频响函数进行希尔伯特变换研究了基于特定畸变特征的非线性类型确定方法。Chatterjee 等^[4]利用高阶频响函数进行了多项式非线性和其他类型非线性的区分研究。Adams^[5]借鉴时间序列自回归模型进一步提取频响函数畸变特征。除了畸变特征, 基于时频分析和高阶谱的非线性类型确定方法也是目前较为常用的方法。其中, 时频分析方法主要通过提取非线性系统响应时频图中的骨架曲线等特征来识别非线性。Staszewski^[6]利用小波变换提取非线性系统的瞬时特性并据此分析

非线性特征。权双璐等^[7]针对含刚度非线性的连续体系统提出一种基于瞬时频率峰值检测的非线性类型确定方法。相对而言, 基于高阶谱的非线性类型确定方法主要通过分析响应信号的非高斯性来进一步提取系统的非线性特性。Hajj 等^[8]基于摄动法和双谱相位信息识别系统的非线性阻尼性质。Zhang 等^[9-10]基于逆路径法提出衡量非线性基函数合理性的系统完整性指标, 然后建立基于该指标的前向选择算法。前向选择算法非常适合非线性基函数集合较大时的非线性模型识别问题, 能够较为高效地获取局部非线性描述形式。总的来说, 上述非线性确定方法可分为基于模型和基于数据两大类。其中, 基于模型的方法侧重于运用理论分析和试验研究揭示各类复杂的非线性机理, 进而得到简洁而又精确的非线性描述函数。基于数据的方法则侧重于运用函数拟合等最优化方法对非线性进行逼近, 然后从一组函数中确定最合适的局部非线性描述函数。然而需要注意的是, 研究者通常缺乏对目标非线性的先验知识, 因此很难确定基于机理的非线性描述模型。相对而言, 基于数据的方法则因为拟合与回归等途径的便利和新颖性而获得更广泛的应用。

非线性系统参数辨识是根据非线性描述函数的

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51608122); 福建省自然科学基金项目(2020J01581); 中国博士后基金面上项目(2018M632561)。

作者简介: 姜洋(1988-), 女, 汉族, 讲师, 主要从事建筑结构防震减灾和健康监测的研究。

形式进一步确定系统的待定系数,这是非线性系统辨识研究工作的最后一步。Masri 等^[11]提出的恢复力曲面法(restoring force surface, RFS)属于最常见的一种模型辨识方法。它的基本思想是对动力学平衡方程进行移项。在移项后的方程中,先将外部激励力与线性项放置于方程的一边,然后将非线性项置于另一边并称其为系统恢复力。此时,系统恢复力可以通过特定的多项式模型来表示,如幂级数多项式和切比雪夫多项式等^[12-16]。在确定系统恢复力的基础上,可采用最小二乘法^[15]对非线性函数进行拟合,从而最终识别局部非线性系统的物理参数。吴枫^[18]将恢复力曲面法与支持向量机(support vector machine, SVM)相结合并提出了一种新的非线性模型辨识方法。该方法以非线性指标作为支持向量机的训练数据,最终成功识别了结构局部非线性的位置、类型以及物理参数。汪欣等^[19]也利用 RFS 与 SVM 相结合的方法对 Benchmark 模型进行非线性参数识别,从而进一步验证了其适用性。然而,采用 RFS 和 SVM 进行非线性模型和参数辨识的计算量较大,因此存在一定的局限性。随机森林(random forest, RF)模型是若干决策树学习器的集合,该集合中的每个决策树学习器均可估计一个分类。具体来说,RF 首先通过自采样法对样本进行采样以形成多个子样本集,随后针对每个子样本集构建决策树。其次,RF 对每个决策树进行并行训练且分别输出预测结果。最后,对所有决策树的结果进行均值运算并将均值作为随机森林的最终输出结果^[20]。RF 通过样本选择和特征选择提高了模型预测性能,因此特别适合与 RFS 模型相结合来辨识局部非线性模型^[21]。

基于此,将恢复力曲面法与随机森林算法(random forest, RF)相结合,提出一种新的基于 RFS-RF 的多自由度局部非线性模型辨识方法。通过一个四层剪切型框架结构模型对所提方法进行验证,结果表明:基于 RFS-RF 的多自由度局部非线性模型辨识方法能够准确识别非线性类型、函数形式以及未知参数。

1 基本理论

基于 RFS-RF 的多自由度局部非线性模型辨识方法的主要流程如图 1 所示。首先,采用数值解法求

解非线性结构系统的加速度、速度和位移等动力响应;其次,生成恢复力曲面与边际谱,然后通过边际谱计算非线性指标。再次,通过多次改变结构的刚度和阻尼参数生成若干组非线性指标并进一步建立随机森林模型。最后,将新生成的非线性指标作为预测集输入随机森林模型即可成功判别系统的非线性类型和非线性函数形式。在已知非线性函数形式的情况下,进一步采用最小二乘法识别非线性系统的待定参数。

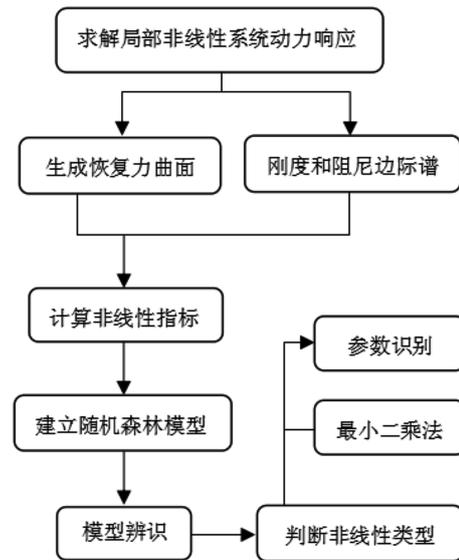


图 1 局部非线性结构系统模型辨识流程图

Fig.1 The flowchart of local nonlinear structural system model identification

1.1 非线性类型

在动力学试验中经常遇到的非线性类型包括多项式刚度和阻尼、间隙、碰撞、摩擦和浸润等物理效应。这些非线性现象与结构系统的振幅、速度、加速度和频率息息相关,一般通过简化或理想化的形式融入到动力学系统的分析、仿真和预估中^[16]。为此,模拟线性和五种简单非线性类型,其中非线性类型包括双线性刚度、分段线性刚度、三次刚度、二次阻尼和库伦摩擦。

通常来说,一个多自由度系统的振动微分方程可表示为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + F_{non} = F, \tag{1}$$

式中: M 为系统质量矩阵; C 和 K 为基本线性系统的阻尼与刚度; \ddot{x} 、 \dot{x} 和 x 分别为系统的加速度、速度和位移响应向量; F_{non} 表示系统内各局部非线性作用力向量; F 为外部激励。也可表示为公式

$$M\ddot{x} + f_n(x, \dot{x}) = F, \tag{2}$$

式中:系统恢复力 $f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 包含线性与非线性两部分且方向总指向平衡位置,可称作非线性函数。以单自由度系统为例,线性 and 五种简单非线性类型对应的函数形式分别如下

1)线性的函数形式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = k\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}} \quad (3)$$

式中: k 为刚度系数, c 为阻尼系数。

2)双线性刚度的函数形式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \begin{cases} k_{n1}\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}}, & \mathbf{x} > 0, \\ k_{n2}\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}}, & \mathbf{x} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

3)分段线性刚度的函数形式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \begin{cases} k_{n1}\mathbf{x} + (k_{n2} - k_{n1})d + c\dot{\mathbf{x}}, & \mathbf{x} > d, \\ k_{n2}\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}}, & |\mathbf{x}| < d, \\ k_{n1}\mathbf{x} + (k_{n2} - k_{n1})d + c\dot{\mathbf{x}}, & \mathbf{x} < -d. \end{cases} \quad (5)$$

4)三次刚度的函数形式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = k\mathbf{x} + k_3\mathbf{x}^3 + c\dot{\mathbf{x}}. \quad (6)$$

5)二次阻尼的函数形式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = k\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}} + a\dot{\mathbf{x}}^2. \quad (7)$$

6)库伦摩擦的函数形式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = k\mathbf{x} + c\dot{\mathbf{x}} + b \cdot \text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}). \quad (8)$$

1.2 恢复力曲面

如式(1)所示的振动微分方程可通过动力数值方法进行求解。在获得系统的加速度响应之后,对其进行一次和两次积分便可得到速度和位移响应信号。由于式(2)可改写为如式(9)所示的形式,在已知系统质量与外部激励的条件下,可以求解 $f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 。至此,任意采样时刻 t_i 的三维数值点 $\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, f_i$ 已经完全确定,通过插值便可绘制出非线性系统的三维恢复力曲面 $S(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, f)$,从恢复力曲面中提取二维的刚度边际谱与阻尼边际谱公式为

$$f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{F} - m\ddot{\mathbf{x}}. \quad (9)$$

假定非线性系统的恢复力矩阵 $f_n(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 是一个 $g \times h$ 矩阵,刚度边际谱可表示为

$$S_k = \frac{1}{g} \sum_i^g S(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, f). \quad (10)$$

相应地,阻尼边际谱公式为

$$S_k = \frac{1}{h} \sum_j^h S(\mathbf{x}_j, \dot{\mathbf{x}}_j, f_j). \quad (11)$$

图2、3和4分别给出一个单自由度系统模型的恢复力曲面、刚度边际谱和阻尼边际谱。根据刚度边际谱和阻尼边际谱,可以直观地观测到系统刚度和阻尼的变化情况。

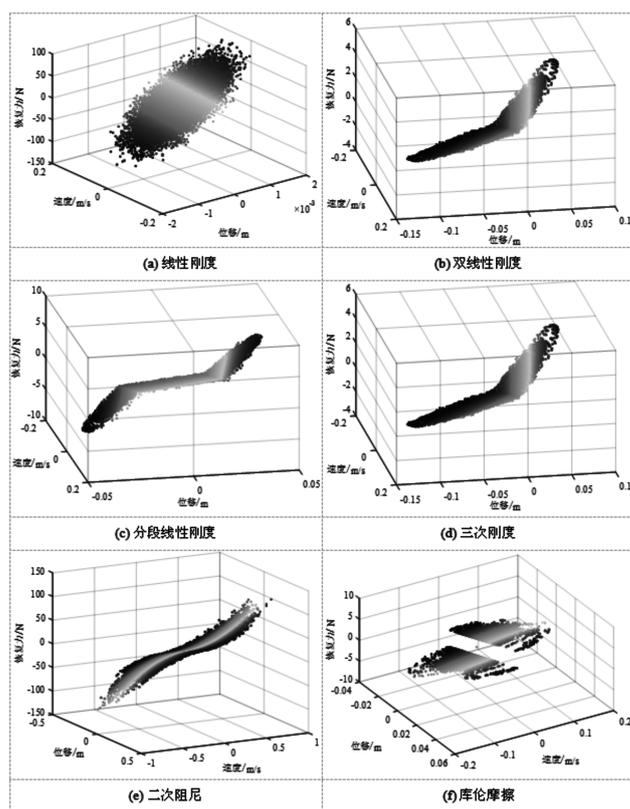


图2 恢复力曲面

Fig.2 Restoring force surface

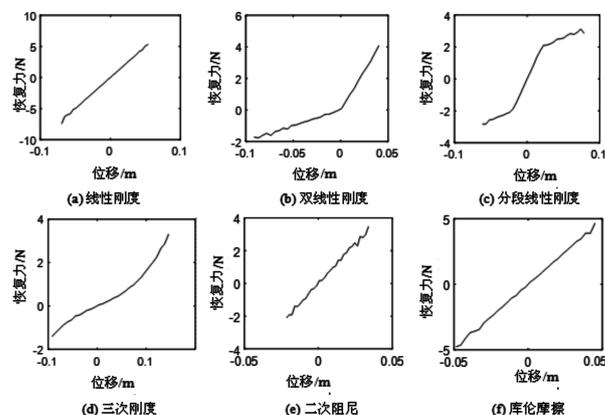


图3 刚度边际谱

Fig.3 Stiffness marginal spectrum

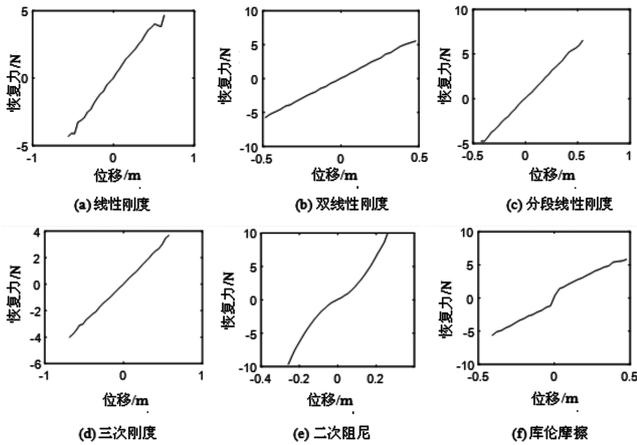


图 4 阻尼边际谱

Fig.4 Damping marginal spectrum

由图 2、3 和 4 可知各类非线性系统的恢复力曲面、刚度边际谱以及阻尼边际谱的特点。

(1) 线性系统。恢复力曲面为一个圆形平面,而刚度边际谱和阻尼边际谱均为一条直线。

(2) 双线性刚度系统。恢复力曲面的形状为两个平面在位移为零处相连;刚度边际谱为折线,拐点在位移为零处,而阻尼边际谱则为一条直线。

(3) 分段线性刚度系统。恢复力曲面由三个平面组成;刚度边际谱为含有两个拐点的折线,而阻尼边际谱则为一条直线。

(4) 三次刚度系统。恢复力曲面是一个曲面,其位移坐标沿坐标轴三次变化;刚度边际谱为一条三次函数单调递增形式的曲线,而阻尼边际谱仍是一条直线。

(5) 二次阻尼系统。恢复力曲面为一个沿速度坐标轴二次变化的曲面;刚度边际谱是一条直线,而阻尼边际谱则为一条二次曲线。

(6) 库伦摩擦系统。恢复力曲面由两个相互平行的平面组成且在速度为零处有跳跃;刚度边际谱为一条直线,而阻尼边际谱则是两段平行的直线且它们的端点均在速度为零处。

根据上述线性和非线性类型的恢复力曲面、刚度边际谱与阻尼边际谱的性质与作用,我们可归纳出如表 1 所示的 10 个非线性指标。

表 1 非线性指标

Tab.1 Nonlinear index

非线性指标	定义	作用
NI1	刚度边际谱与其两端点所连直线包围的封闭图形与以该直线为斜边的直角三角形的面积比	辨别系统的刚度是否为线性
NI2	阻尼边际谱与其两端点所连直线包围的封闭图形与以该直线为斜边的直角三角形的面积比	辨别系统的阻尼是否为线性
NI3	刚度边际谱上各点与其两端点所连直线差值的标准差	区分刚度非线性与其他系统
NI4	阻尼边际谱上各点与其两端点所连直线差值的标准差	区分阻尼非线性与其他系统
NI5	刚度边际谱曲线位移为零处左侧斜率	区分刚度非线性系统
NI6	刚度边际谱曲线位移为零处右侧斜率	区分刚度非线性系统
NI7	刚度边际谱曲线左端点斜率	区分刚度非线性系统
NI8	刚度边际谱曲线右端点斜率	区分刚度非线性系统
NI9	阻尼边际谱曲线位移为零处左侧斜率	区分阻尼非线性系统
NI10	阻尼边际谱曲线位移为零处右侧斜率	区分阻尼非线性系统

1.3 随机森林模型

随机森林模型目前已经广泛应用于各个领域^[22-23]。研究随机森林模型首先需要解决的一个问题就是决策树算法。决策树是一个典型的单分类器,首先利用 Bagging 思想从样本集中随机抽取约占样本总量 2/3 的样本(bootstrap 样本)进行训练,然后生成一个对应的决策树^[24]。单个决策树的训练过程如图 5 所示。当训练出一定数量的决策树后,便可将其组合在一起从而得到一个随机森林模型。其次,将需要进行辨识的新样本(预测集)输入至随机森林模型,该模型将会整合每一个决策树的输出结果从而得到最终的预测结果。鉴于随机森林算法良好的预测性能,将其与恢复力曲面模型相结合并用于非线性模型的辨识。

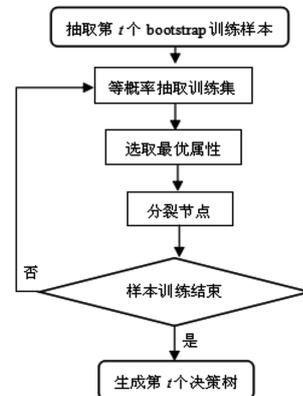


图 5 随机森林模型中单个决策树的训练过程

Fig.5 The training process of a single decision tree in random forest model

2 数值算例

以一个四层剪切型框架结构为研究对象,该结构可简化为一个四自由度的集中质量模型,如图 6 所示。

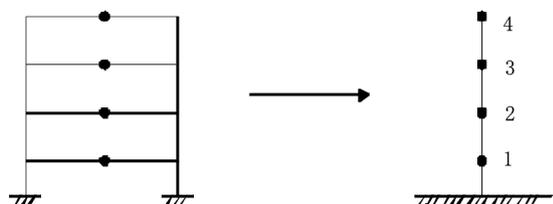


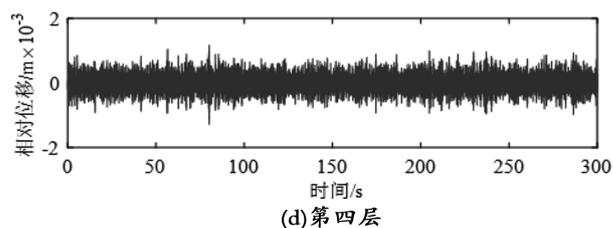
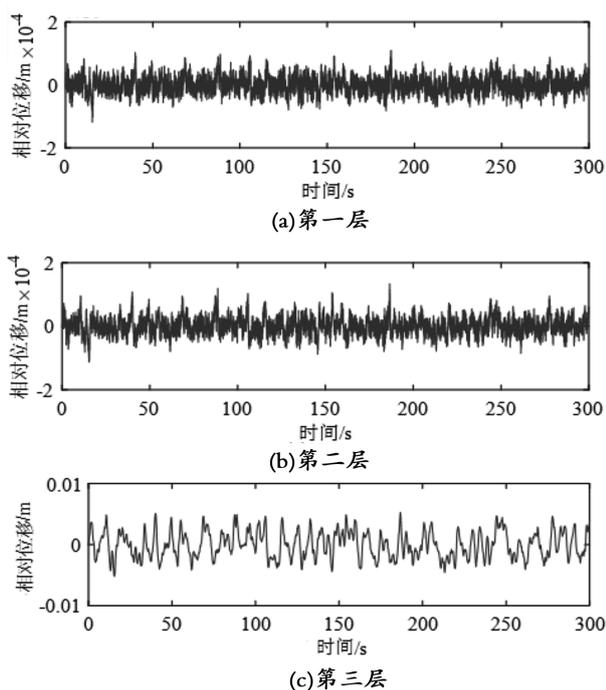
图 6 四层剪切型框架以及简化集中质量模型

Fig.6 The four-story shear-type frame and its simplified lumped mass model

设定外部激励信号为零均值高斯白噪声信号且作用于第四自由度,采样频率为 100 Hz,上述四自由度集中质量系统的质量、刚度和阻尼参数为

$$\begin{cases} m_1=m_2=m_3=m_4=0.1 \text{ kg} \\ k_1=k_3=600 \text{ N/m} \\ k_2=k_4=500 \text{ N/m} \\ c_1=c_2=c_3=c_4=400 \text{ N}\cdot\text{m/s} \end{cases} \quad (12)$$

假设结构模型第三层存在局部非线性且类型为三次刚度,其中非线性刚度参数 $k_n=4\ 000 \text{ N/m}$ 。采用 Runge-Kutta 法和积分算法求解结构模型的位移响应,结果如图 7 所示。

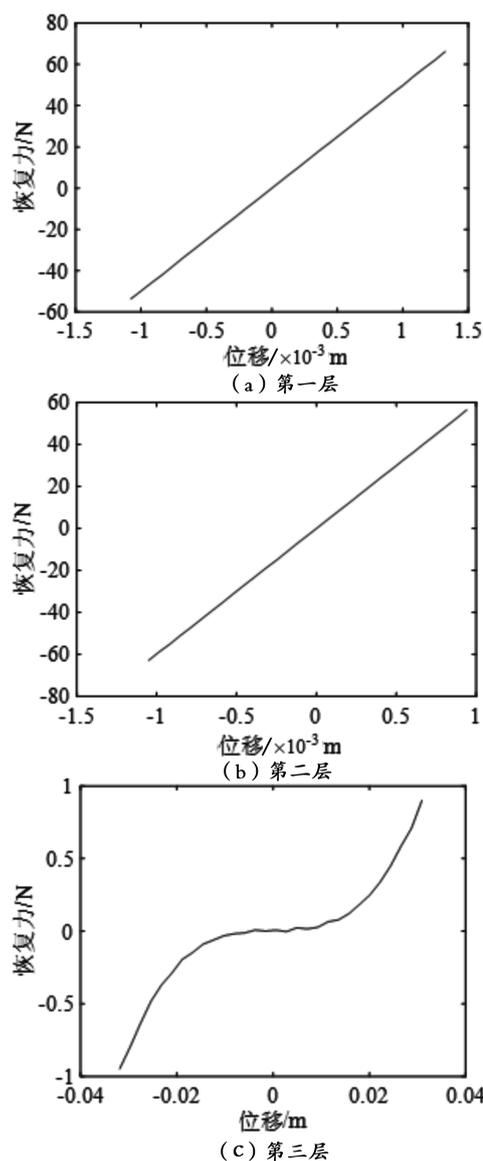


(d) 第四层

图 7 各层层间位移

Fig.7 The story displacements of all floors

首先,对每一层的相对位移和恢复力添加 5% 水平的高斯白噪声。其次,计算出每一层的刚度边际谱,结果如图 8 所示。再次,计算如表 1 所示的非线性指标并将每一层的非线性指标视为一组,总共提取四组非线性指标。最后,将提取的四组非线性指标作为预测集输入随机森林模型并进行非线性类型的辨识,结果如表 2 所示。



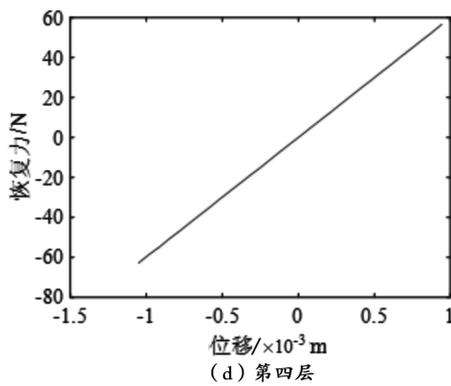


图 8 各层刚度边际谱

Fig.8 The stiffness marginal spectrums of all floors

表 2 随机森林模型预测结果

Tab.2 The prediction results via random forest model

层数	非线性类型	
	识别结果	真实结果
1	线性	线性
2	线性	线性
3	三次刚度	三次刚度
4	线性	线性

根据表 2 可知:非线性位于第三层且其非线性的函数形式为三次刚度。在确定每一层非线性类型之后,进一步采用最小二乘法^[29]对非线性参数进行识别,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出:该方法不仅能够有效识别四层剪切模型结构的未知刚度参数,而且识别的刚度误差最大值仅为 0.852%。

表 3 四层剪切型框架模型的非线性参数识别结果

Tab.3 The nonlinear parameter identification results of the four-story shear-type frame model

层数	非线性参数(N/m)		误差/%
	识别刚度	真实刚度	
1	$k_1=596.21$	$k_1=600$	0.632
2	$k_2=503.37$	$k_2=500$	0.674
3	$k_3=594.89$	$k_3=600$	0.852
	$k_n=3\ 971$	$k_n=4\ 000$	0.725
4	$k_4=497.65$	$k_4=500$	0.470

3 结论

针对多自由度局部非线性结构,结合恢复力曲面法与随机森林模型提出新的 RFS-RF 方法。通过一个四层剪切型框架结构模型数值算例对上述方法进行验证,研究结果表明:RFS-RF 方法不但可以准确识别

非线性类型,而且能够确定系统的非线性函数形式以及待求的未知刚度参数。

参考文献:

- [1] ZHANG M W , WEI S , PENG Z K , et al. A two-stage time-domain subspace method for the identification of nonlinear vibrating structures [J].International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 120: 81-90.
- [2] 张明威. 结构系统局部非线性定位、模型识别及参数辨识研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.
- [3] SIMON M , TOMLINSON G R . Use of the Hilbert transform in modal analysis of linear and non-linear structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96: 421-436.
- [4] CHATTERJEE A , VYAS N S . Stiffness nonlinearity classification through structured response component analysis using Volterra series[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15: 323-336.
- [5] ADAMS D E . Frequency domain ARX models and multi-harmonic FRFs for nonlinear dynamic systems [J].Journal of Sound and Vibration, 2002, 250: 935-950.
- [6] STASZEWSKI W J . Analysis of nonlinear systems using wavelets [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2000, 214: 1339-1353.
- [7] 权双璐,刘杰,韩罗峰,等. 一种机械系统非线性类别辨识方法[J]. 西安交通大学学报,2015,49(12): 104-111.
- [8] HAJJ M R , FLING J , NAYFEH A H , et al. Damping identification using perturbation techniques and higher-order spectra[J]. Nonlinear Dynamics, 2000, 23:189-203.
- [9] ZHANG M W , PENG Z K , DONG X J , et al. Location identification of nonlinearities in MDOF systems through order determination of state-space models[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(3): 1837-1852.
- [10] ZHANG M W , PENG Z K , DONG X J , et al. A forward selection reverse path method for spatial location identification of nonlinearities in MDOF systems [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 82(3): 1379-1391.
- [11] MASRI S F , CAUGHEY T K . A nonparametric identification technique for nonlinear dynamic problems[J]. Journal of Applied Mechanics, 1979, 46: 433-447.
- [12] 许斌,贺佳, MASRI S F. 动力系统非线性行为识别方法与验证[J]. 土木工程学报,2011,44(S1):24-30.

- [13] XU B, HE J, MASRI S F. Data-based identification of nonlinear restoring force under spatially incomplete excitations with power series polynomial model[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 67(3): 2063–2080.
- [14] 许斌,辛璐璐,贺佳. 基于切比雪夫多项式模型的多自由度结构非线性恢复力时域识别[J]. *工程力学*, 2014, 31(11):99–109.
- [15] 许斌,辛璐璐,贺佳. 基于二重切比雪夫多项式的多自由度系统 SMA 非线性恢复力识别[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(16):6–13.
- [16] XU B, HE J, DYKE S J. Model free nonlinear restoring force identification for SMA dampers with double Chebyshev polynomials: Approach and validation [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 82: 1507–1522.
- [17] 黄东梅,朱乐东,丁泉顺. 高层建筑气动参数识别的分段线性化-最小二乘法[J]. *振动工程学报*, 2017, 30(6):983–991.
- [18] 吴枫. 基于振动响应的桥梁结构非线性模型检验及参数确定[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [19] 汪欣,胡可,王佐才,等. 基于 SVM 的多自由度结构非线性模型检验及参数确定[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(2):215–222.
- [20] 伍圣超,王睿,张建民. 基于随机森林算法的 CPTu 土类识别模型研究及其在不同区域的应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(11):4391–4402.
- [21] WANG H, JIN Y. A random forest-assisted evolutionary algorithm for data-driven constrained multiobjective combinatorial optimization of trauma systems [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 50(2): 536–549.
- [22] 徐剑,金康康,李中政,等. 基于优化随机森林的海基站水下声学定位模型研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2023, 56(12):1235–1243.
- [23] 刘明阳,陶建峰,覃程锦,等. 基于随机森林与粒子群算法的隧道掘进机操作参数地质类型自适应决策[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4):1311–1324.
- [24] 曹正凤. 随机森林算法优化研究[D]. 北京:首都经济贸易大学, 2014.
- [25] 刘景良,郭建钢,郑文婷. 基于信号瞬时特征识别非线性结构系统物理参数[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2018, 47(1):123–128.

A New RFS–RF Method for Local Nonlinear Model Identification

JIANG Yang¹, MA Yanqiu², CHEN Rong², LIU Jingliang², ZHANG Xiling³

- (1. College of Horticulture and Landscape architecture, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350303;
2. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108;
3. Fujian Guodian Commissioning Institute Co., Ltd, Fuzhou 350025)

Abstract: In view of the superiority of the restoring force surface (RFS) method and random forest (RF) model, a new nonlinear model identification method called RFS–RF is proposed by combing the two methods mentioned above. In this method, the dynamic responses of local nonlinear model are solved at first. Second, the restoring force surfaces and marginal spectrums are calculated on a basis of the solved responses, and then the nonlinear indices are yielded by a use of marginal spectrums. Third, the RF model is established by changing the stiffness and damping parameters of the local nonlinear model gradually and hence several sets of nonlinear indices are generated as well. After that, the generated nonlinear indices are used as inputs of the established RF model to predict nonlinear types and functions. Finally, the least square algorithm is applied to accurately estimate the parameters of the local nonlinear model. A numerical example of a four-story shear frame model is investigated to demonstrate the effectiveness of the proposed method and the result shows that the RFS–RF approach is capable of identifying nonlinear types, functions and unknown parameters very well.

Key words: restoring force surface; random forest; marginal spectrum; model identification; local nonlinearity

(责任编辑:叶丽娜)

支持向量机的电子商务用户购买行为检测

周 宓

(泉州师范学院 数学与计算机科学学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 阐述数据挖掘中的支持向量机方法,介绍客户关系管理(RFM)模型,建立基于支持向量机的电子商务用户购买行为检测模型,并用该模型进行了电子商务用户购买行为检测实验。结果表明:基于支持向量机的电子商务用户购买行为检测方法可帮助商家进行用户购买行为检测,为电子商务企业提供决策依据。

关键词: 客户关系管理;电子商务用户;用户购买行为;支持向量机;巴氏距离

中图分类号: TP18;TP274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0070-05

随着互联网的普及和信息技术的飞速发展,新的商业模式应运而生。电子商务作为一种全新的商业模式进入人们的日常生活,冲击着传统企业。传统企业顺应发展趋势纷纷转型,开启电子商务这一全新的商务运营模式。

电子商务企业和实体企业一样,也需要进行客户管理,从而更好地服务客户,增加收益。因此,对用户行为的预测对于电子商务企业来说十分重要。

用户行为是指用户在产品上产生的行为,比如登陆、浏览商品、加购物车、收藏、点赞、分享、视频完播、划走视频等等。在产品运营中,如何及时准确的获得用户对产品的反馈十分重要,电商企业可以根据用户的反馈,及时改进产品,从而保持竞争优势。

通过对用户产生的真实购物行为数据进行预处理,而后统计分析用户行为数据,结合巴氏距离对用户行为相关的特征进行删选,删除无关属性,使得SVM方法根据抽取出的属性建立的模型更适用于检测问题。采用了支持向量机的检测模型方法进行用户

购买行为模型的建立,并对实验结果进行分析。

1 基本理论

1.1 支持向量机

支持向量机(support vector machine,SVM)是由瓦普尼克(V.N.Vapnik)领导的研究小组在1963年提出的一种新的非常有潜力的分类技术。它以结构风险最小化原则为理论基础,通过适当选择函数子集及该子集中的判别函数,使学习机器的学习风险达到最小,保证通过有限训练样本得到的小误差分类器,对独立测试集的测试误差仍然较小^[1-2]。它在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出许多特有的优势,并被推广应用到函数拟合等其他机器学习问题中^[3]。在生物信息学、文本和手写识别等诸多领域中都取得了成功的应用。

支持向量机的基本模型是定义在特征空间上的间隔最大的线性分类器。它使用决策边界一次将数据点分为两类,其主要目标是找到此最优超平面,使得两类数据的间隔最大。SVM分类函数形式上类似于一个神经网络,输入是 d 维特征向量,输出是中间节点的线性组合,每个中间节点对应一个支持向量,如图1所示。SVM的目标是在有限样本信息下寻求学习精度和学习能力的最优解,该问题最终转化为一个二次型

收稿日期:2023-08-17

基金项目:福建省中青年骨干教师教育科研项目(科技类)
(JAT210312)。

作者简介:周宓(1981-),女,汉族,讲师,硕士,主要从事程序设计、人工智能研究。

寻优问题,从理论上来看,将得到全局最优解,解决神经网络中无法避免的局部极值问题^[1]。

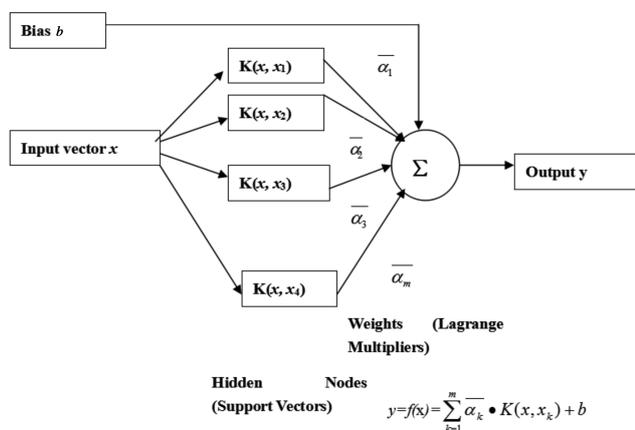


图1 支持向量机方法

Fig.1 The method of SVM

随着计算机技术的发展以及大数据时代的到来,样本数据的维数与数量也在不断增长,算法的计算的复杂度也随之增加,极大影响算法效率。而核函数巧妙地解决这个问题。因此,SVM 的关键在于核函数。

在实际的产生的电子商务用户行为数据中,数据通常是高维非线性且分布不平衡的。而支持向量机在解决非线性问题时,将非线性问题转换到线性空间,只需在这个线性空间中计算内积即可,可以很好地克服维度灾难。因此,采用支持向量机对电子商务用户购买行为的预测进行研究,将其看作一个分类问题,利用真实数据及其他信息来建立用户行为检测模型。

1.2 RFM 模型

RFM 模型是由 George Cullinan 于 1961 年提出。他发现数据分析中,最近一次消费(recency)、消费频率(frequency)、消费金额(monetary)是三项非常重要的指标,这三项指标的英文首字母为 R、F、M,所以就称为 RFM 模型。

RFM 模型是判定客户价值以及衡量客户创利能力的重要方法^[4],其评判依据主要是 R (recency), F (frequency), M (monetary) 这三个指标。最近一次消费(recency):指用户上次购买时刻到现在的时间差。 R 分值越低,说明越久没有来,流失可能性较高, R 分值高的,活跃度比较好。消费频率 F (frequency):指用户在一定时间内的消费次数。 F 分值越高的用户,其消费频率越高,忠诚度越高。消费金额(monetary):指消费者在一定时间内购买商品的总金额。 M 分值越高的消

费者,其消费金额越高,顾客价值也越高。

1.3 模型的评价指标

在构建模型后,为了评估模型的检测效果,需要对模型的检测结果进行评价。混淆矩阵是衡量分类模型准确度中最基本、最直观、计算最简单的方法。在二分类模型的预测结果中,模型最终需要判别样本类别为正例(positive)或负例(negative),由此可得四个基础指标,分别为

TP:真实值是 positive,模型判别为 positive 的数量;

FN:真实值是 positive,模型判别为 negative 的数量;

FP:真实值是 negative,模型判别为 positive 的数量;

FN:真实值是 negative,模型判别为 negative 的数量。

由以上四个指标可以得到混淆矩阵如表 1 所示。

表 1 混淆矩阵

Tab.1 Confusion Matrix

Confusion Matrix	预测值=1	预测值=0
真实值=1	TP	FN
真实值=0	FP	TN

从混淆矩阵可以衍生出二级、三级评价指标,分别为精确率、召回率、 $F1$ 值和准确率。

准确率(accuracy):判断正确的样本数占总样本数的比重,公式为

$$ACC=(TP+TN)/(TP+FP+TN+FN)。(1)$$

召回率(recall):真实值是 positive 的所有样本中,模型预测正确的比重,公式为

$$R=TP/(TP+FN)。(2)$$

精确率(precision):模型预测结果是 positive 的样本中,预测正确的比重,公式为

$$P=TP/(TP+FP)。(3)$$

$F1$ 值($F1$ score):综合 precision 与 recall 产生的结果。取值范围从 0 到 1,1 代表输出最好,0 代表输出最差,即

$$F1=(2PR)/(P+R)。(4)$$

2 数据预处理

2.1 数据来源与数据描述

对用户行为的预测需要依赖用户的行为数据,即用户在电商平台上所产生的数据。这些数据通常包括

以下内容:

(1)用户信息:包括用户 ID、性别、年龄、地域等基本信息。

(2)商品信息:包括商品 ID、商品类别、品牌等详细描述。

(3)购买行为信息:包括购买时间、购买数量、购买金额等相关统计数据。

(4)用户行为信息:包括浏览商品次数、加入购物车次数、收藏商品次数等。

通过分析这些数据,可以帮助企业了解消费者的购买偏好和行为模式,从而优化产品策略和市场营销活动。此外,还可以利用这些数据构建推荐系统,提供个性化推荐服务,提高用户满意度和销售额。

使用的数据为天猫数据,来源于阿里云天池大赛中给出的公开数据集。天猫用户行为数据集记录的部分内容见图 2。

Unnamed: 0	cust_id	prod_id	group_id	be_type	day_id	buy_time
0	0	101	1305157	2520872	pv	2019-11-09 07:32:10
1	1	101	1323287	3524611	pv	2019-11-12 01:30:35
2	2	101	1338623	149293	pv	2019-11-07 17:00:14
3	3	101	1341020	4690522	pv	2019-11-10 19:27:40
4	4	101	1531134	2920577	pv	2019-11-07 06:02:12

图 2 部分用户行为数据

Fig.2 Partial user behavior data

图中的数据类型为: ① cust_id: 用户 ID ② prod_id:商品 ID ③ group_id:分组类别 ID ④be_type: 用户行为类型(pv 表示浏览, cart 表示添加到购物车, fav 表示收藏, buy 表示购买) ⑤day_id: 时间 ⑥: buy_time:购物行为发生的日期(格式为 yymmdd)。

2.2 数据预处理

在进行支持向量机训练之前,我们需要对原始数据进行一些预处理操作。首先查询所使用数据的相关信息,使用 Python 软件中 pandas 库的 info()函数,如图 3。

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 10224104 entries, 0 to 10224103
Data columns (total 6 columns):
#   Column      Dtype
---  ---
0   cust_id     int64
1   prod_id     int64
2   group_id    int64
3   be_type     object
4   day_id      object
5   buy_time    object
dtypes: int64(3), object(3)
memory usage: 468.0+ MB
```

图 3 数据信息

Fig.3 Data information

由图 3 可以看出,该数据集共有 10 224 104 条数据,使用 isnull()函数判断是否存在缺失,结果如图 4 所示,数据中所有字段均不存在缺失值。

```
data.isnull().sum()
cust_id      0
prod_id      0
group_id     0
be_type      0
day_id       0
buy_time     0
dtype: int64
```

图 4 缺失值统计

Fig.4 Missing value statistics

由于购买行为只分为购买和未购买这两种情况,因此对数据集做一些处理,将 be_type 中的 4 种行为类型变为两种:0 表示未购买,1 表示购买。这样处理后的数据更加清晰,便于分类。

使用 data.buy_time.unique()查询数据集中所包含的日期,如图 5 所示。

```
array(['2019-11-09', '2019-11-12', '2019-11-07', '2019-11-10',
      '2019-11-13', '2019-11-06', '2019-11-05', '2019-11-08',
      '2019-11-11', '2019-10-26', '2019-11-04', '2019-11-03',
      '2019-08-22', '2019-11-01', '1993-07-27', '2019-10-31',
      '2019-10-30', '2019-11-02', '2019-11-14', '2027-10-04',
      '2027-10-13', '2019-10-28', '2019-10-29', '2019-10-15',
      '2018-09-15', '2018-09-20', '2018-09-19', '2018-09-14',
      '2019-10-14', '2019-10-18', '2019-10-21', '2019-10-25',
      '2019-10-27', '2019-10-24', '1973-10-23', '2019-10-16',
      '2019-10-22', '2019-10-13', '2016-12-15', '2019-10-01',
      '2019-08-31', '2019-10-07', '1972-01-04', '1972-01-11',
      '1972-01-08', '1972-01-02', '1972-01-07', '2019-07-03',
      '2019-10-23', '2019-06-30', '2019-10-04', '2019-10-02',
      '2027-09-29', '2019-10-17', '2019-10-11', '2019-10-12',
      '2019-09-17', '2019-03-01', '2020-08-07', '2020-04-06',
      '2019-04-22', '2019-08-27', '2019-07-17', '2019-05-05',
      '2020-11-05', '2018-11-04', '2019-09-15', '2019-10-09',
      '2019-08-05', '2019-06-13', '2019-03-16', '2019-09-02',
      '2019-04-25', '2017-01-16', '2022-10-12', '1971-12-12',
      '2019-09-25', '1992-08-12', '2019-10-20', '2018-10-09',
      '2019-09-26'], dtype=object)
```

图 5 数据集集中所含日期

Fig.5 Date contained in the dataset

使用 data.buy_time.value_counts()查询每个日期包含的数据量,结果如图 6 所示。

```
2019-11-12    1414947
2019-11-13    1402602
2019-11-11    1112806
2019-11-06    1086241
2019-11-05    1067589
...
2019-10-12         1
2019-09-17         1
2019-03-01         1
2019-04-22         1
2019-09-26         1
Name: buy_time, Length: 81, dtype: int64
```

图 6 每个日期包含数据量

Fig.6 the amount of each date

从上图看出,有些日期包含的数据量较小,故对数据进行筛选,只保留数据条目较多的日期。

2.3 根据 RFM 划分用户群体

根据 RFM 三个维度将用户划分成不同的群体:

R (recency):最近用户最后一次消费距今时间。最后一次消费距今 <7 d,等级为高,否则为低; F (frequency):在一段时间内用户消费的次数。最近半年消费次数 >25 次,等级为高,否则为低; M (monetary):在一段时间内用户消费的总金额。最近半年消费金额 >100 元,等级为高,否则为低。每一个维度都做高/低划分,最终可以将用户划分成8个不同的小组。

2.4 无关属性处理

特征作为数据集的代表性指标,也是分类算法所依据的重要指标。特征构建是指根据原始数据提取出具有代表性或有意义的特征,或对原始数据进行变换或处理构建新的数据特征。特征的选取从根本上影响分类预测模型的效率和准确率。若提取的特征维数过低,特征组可能并未包含全部的数据信息,将会导致分类结果出现较大误差;而如果提取的特征维数过高,将会增加模型的工作量,影响工作效率,也有可能出现过拟合现象;而预测模型的选取及参数的选择则直接决定预测结果的准确率以及该预测模型性能的优良,错误的模型不仅得不到较为准确的预测结果,也是对人力物力以及时间的浪费。因此,特征集的构建是整个模型的基础,好的特征集能够提取出数据中最相关、最有区分性的信息,从而提高模型的性能。

综合考虑实际可能影响用户购买行为的因素,抽取13个用户属性:日用户量 cust_num、商家点击量 sell_click、商家总购买数量 sell_buy、商家购买率 sell_ra、每个用户点击量 cust_click、每个用户购买数量 cust_buy、每个用户的商品购买率 cust_ra、每个商品点击数 prod_click、每个商品购买数量 prod_buy、每个商品的购买率 prod_ra、购买时间 buy_time、购买金额 buy_amount、每个品牌点击量 bra_click。

但每个属性对购买行为检测的影响并不一致,有的属性对分类结果没有影响,而有的属性可能会干扰检测效果,因此先采用巴氏(Bhattacharyya)距离法^[5]对多个属性进行处理,去除无关属性。巴氏距离用于衡量两个概率分布之间的相似度。巴氏距离的值越小,

表示两个概率分布越相似。当巴氏距离为0时,表示两个概率分布完全相同。巴氏距离法在衡量基因含有样本分类信息多少的度量问题上,Golub等^[6]采用“信噪比”(signal to noise ratio)指标,即

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (5)$$

其中: d 为基因的信噪比, μ_1 、 μ_2 分别为该属性在两种类别的均值, σ_1 、 σ_2 为其属性的标准差。依据式(5),若某一属性在两个类别中的分布均值相同,则其信噪比 $d=0$,该属性将被作为无关属性而被剔除。

从模型分类的角度看,属性的巴氏距离越大,利用该属性的信息,样本的可分性就越好。编写程序对用户行为数据进行巴氏距离的计算,得出各特征巴氏距离如表2。

表2 各特征的巴氏距离计算结果

Tab.2 Calculation results of Bhattacharyya distance for each feature

特征	巴氏距离	特征	巴氏距离
cust_num	26.31	prod_click	30.74
sell_click	15.10	prod_buy	40.00
sell_buy	9.81	prod_ra	57.32
sell_ra	8.44	buy_time	4.29
cust_click	17.91	buy_amount	5.33
cust_buy	45.05	bra_click	3.27
cust_ra	48.22		

将各特征的巴氏距离按从大到小排序,选择选取七个较大的特征:日用户量 cust_num、每个用户点击量 cust_click、每个用户购买数量 cust_buy、每个用户的商品购买率 cust_ra、每个商品点击数 prod_click、每个商品购买数量 prod_buy、每个商品的购买率 prod_ra。

3 建立模型

3.1 基于 SVM 模型的建立

采用支持向量机方法对用户购买行为检测进行模型的建立。支持向量机模型的输入为训练数据集,选择合适的核函数 K 和超参数 C ,输出为决策分类函数,则

$$f(x) = \text{sign}(wx + b). \quad (6)$$

通过数据预处理得到57 284项用于数据挖掘的有效数据,其中购买行为用户数据有5 203项,无购

买行为用户数据有 53 081 项。通过非对称信息处理,数据训练集包含 45 827 项数据,其中购买行为用户数据 20 622 项,无购买行为用户数据 25 205 项,数据测试集包含 11 457 项数据,其中购买行为用户数据 5 041 项,无购买行为用户数据 6 416 项。测试集数据通过用户购买行为检测模型后,输出结果被划分为两类,A(购买行为用户)和 B(无购买行为用户)。

3.2 结果统计

建立基于 SVM 用户购买行为检测模型,使用准确率和 F1 值对模型预测结果进行评价。为避免单次试验结果的偶然性,采取对数据进行多次随机分组,将每次分组得到的训练集和测试集作为多个检测模型建立方法的输入,得到多个检测模型的检测效果进行比较和评估。

其中 SVM 模型将数据预处理后得到的训练集中所有 7 个属性数据作为模型建立的输入,以 RBF 作为核函数,训练得到一个检测模型,以此来对测试集进行测试分类,得到的相关实验结果如表 2。

表 3 预测效果

Tab.3 Prediction results

实验	ACC	F1
实验一	0.87	0.76
实验二	0.88	0.79
实验三	0.85	0.80
实验四	0.89	0.79

从表中的 ACC 和 F1 值可以看出,该模型对样本具有较好的分类能力。

通过实验结果发现,在电子商务用户购买行为检

测任务中,基于支持向量机的方法具有较高的准确率和 F1 值。这意味着该模型对样本具有较好的分类能力,我们可以有效地利用该模型来预测用户是否有意购买某个产品或服务。

4 结论

对真实的天猫用户行为数据进行了分析和处理,详细介绍数据的预处理过程,对用户依据 RFM 值进行分类,以及特征的筛选。而后,利用预处理的行为数据基于支持向量机算法建立电子商务用户购买行为预测模型,并对模型进行评价。结果表明该检测模型对于本文数据具有较好的预测效果。

参考文献:

- [1] 丁世飞.人工智能[M].北京:清华大学出版社,2021:204-206.
- [2] 张玥,赵凯,黄全生.组合核支持向量机个人信用评估模型[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2019,36(5):37-43.
- [3] 邢开颜,李梅.数据挖掘分类算法在信号分类中的应用[J].软件,2016,37(6):6.
- [4] 陈倩舒,方晓平.基于 RFM 模型的物流客户价值研究[J].物流科技,2019,42(7):19-22.
- [5] 郑俊翔,郑俊翔.巴氏距离和 K-L 变换结合的特征选择[J].计算机工程与应用,2004(36):90-91.
- [6] GOLUB T R , SLONIM D K , TAMAY O P , et al.Molecular classification of cancer: Class discovery and class prediction by gene expression monitoring[J].Science,1999,286(5439):531-537.

Detection of E-commerce User Purchase Behavior Based on Support Vector Machine

ZHOU Mi

(Mathematics and Computer Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000)

Abstract: This article elaborates on the support vector machine method in data mining, introduces the customer relationship management (RFM) model, establishes a e-commerce user purchase behavior detection model based on SVM, and conducts e-commerce user purchase behavior detection experiments using this model. The results indicate that the e-commerce user purchase behavior detection method based on SVM can help merchants detect user purchase behavior and provide decision-making basis for e-commerce enterprises.

Key words: customer relation ship management; e-commerce users; user purchase behavior; support vector machine; bhattacharyya

(责任编辑:马阿曼)

大学生体质健康测试压力与锻炼拖延的关系： 自我控制的中介作用

王伟杰¹, 邵华², 郝思哲¹

(1.泉州师范学院 体育学院, 福建 泉州 362000; 2.泉州师范学院 教育科学学院, 福建 泉州 362000)

摘要:研究发现个体负性情绪对其拖延行为具有明显的消极影响,然而,对于个体负性情绪对其锻炼拖延影响的机制认识还不够深入。考察大学生体质健康测试压力对锻炼拖延的影响以及自我控制在两者之间的中介作用,采用锻炼拖延量表(PIES)、简版中文自我控制量表(BSCS)、压力分量表(DASS-21)对714名大学生进行问卷调查。结果表明:(1)体质健康测试压力与锻炼拖延及自我控制均呈两两相关;(2)体质健康测试压力显著正向预测锻炼拖延,自我控制在体质健康测试压力与锻炼拖延中起部分中介作用,中介效应占总效应百分比为27.50%。可以看出大学生体质健康测试压力越大,锻炼拖延越显著。缓和他们的体质健康测试压力,提高其自我控制水平,有助于促进大学生锻炼参与。

关键词:体质健康;测试压力;锻炼拖延;自我控制;负性情绪;大学生

中图分类号:G860 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0075-06

“拖延”是当下国内外大学生的日常行为特征之一,对大学生正常生活、学习及身心状态带来诸多困扰。国内外学者认为大学生群体中普遍存在着不同程度的拖延行为^[1-2],大学生拖延行为同样发生在日常体育锻炼中,研究表明大学生已普遍提高自身体育锻炼意识,但多数人经常推迟开始锻炼计划任务或中止已经在进行的锻炼,呈现出“知而不行”和“有空再动”的锻炼拖延特征。只有少部分学生能够坚持6个月以上的规律锻炼,对自己的锻炼状态满意^[3]。锻炼拖延是指个体经常有意地推迟按照自己意愿参与锻炼或者形成逃避锻炼的行为习惯。长期存在拖延行为的个体较

少体验到正性情绪体验,更容易感受到负性情绪如压力等^[4]。为了更好地促进大学生积极参与体育锻炼,自2002年以来,我国就开始全面开展学生体质健康监测评价工作。国家、高校对体质健康测试的政策扶持力度不断加大,体质健康测试成绩已成为大学生评优评先、毕业考核的重要依据。然而,不少大学生已对体质健康测试产生了压迫或恐惧等负性情绪,表现出明显体质健康测试压力^[5]。以往研究表明,拖延行为是压力增加的结果,个体不能有效应对压力而产生的焦虑,则是诱发大学生拖延行为的重要因素^[6-7]。为了降低应激事件带来的担忧、危险感的困扰,个体会采取各种回避行为来应对如逃避。因此,体质健康测试压力对大学生锻炼拖延的影响需要进一步关注。

体质健康测试压力是指大学生置身于体质健康测试情境的适应过程中,实际上或认知上测试要求与实际能力之间差异所引起来的身心紧张状态。环境中的生活事件是压力源的重要组成部分,个体会根据自身的能力、经验和特质去评价自己是否可以很好地应对刺激,因此面对同一刺激,不同个体间的压力反应也会不一样^[8-9]。第八次全国学生体质与健康调研结果

收稿日期:2022-11-08

基金项目:福建省以马克思主义为指导的哲学社会科学
学科基础理论研究重点项目(FJ2018MGCA048);
2020年度福建省中青年教师教育科研项目
(JAS20266)。

作者简介:王伟杰(1988-),男,汉族,讲师,主要从事学校
体育学研究。

通讯作者:郝思哲(1980-),男,汉族,副教授,主要从事体
育生态学、体育心理学的研究。

表明,大学生体育锻炼不足和体质健康水平下滑的现象依然突出。一方面,缺乏锻炼习惯的大学生单纯地把体质健康测试视作被迫完成的任务,对体育锻炼具有畏难情绪。另一方面,在体质健康测试的重压下,大学生激活与锻炼拖延有关的负性自动思维。实证研究表明个体压力与拖延倾向之间具有相关性^[10],如果大学生觉得完成引体向上是困难的,800 m/1 000 m 达到 4 min 30 s 的及格线并不是那么容易,那么面临体质健康测试时,他们会感到有压力。过度的压力感可能会导致大学生选择推迟实施锻炼计划作为应对方式。锻炼拖延并不能逃避体质健康测试以缓解当下测试带来的压力,相反随着越接近体质测试日期的临近,体质健康测试压力将会迅速增加。出现“压力产生拖延,拖延产生压力”的心理-行为的恶性循环。据此,本研究提出假设:

H1 体质健康测试压力显著正向预测大学生锻炼拖延。

高水平负性情绪会有较低自我控制水平,拖延往往被认为是个体缺乏自我控制能力,推迟或者中断预期计划进程,是一种失败的行为控制。可以认为,自我控制可能在两者之间发挥中介作用。自我控制是一种对自己心理状态和日常行为进行有效影响和管理的能力,旨在顺利实现预定计划和目标。拖延往往被认为是个体缺乏自我控制能力,推迟或者中断预期计划进程,是一种失败的行为控制^[11]。心理能量资源越高越可以支持高的自我控制水平,压力过高会消耗个体能量资源,降低自我控制水平,进而导致拖延某些预期的计划实施^[12]。自我控制程度是预测个体的拖延程度的有效指标,无论是哪类型的拖延,个体自我控制程度越高,其自身预期计划执行能力越强,拖延就越少发生,说明提高自我控制能力有助于减少拖延的行为的产生和发展^[13]。据此,本研究提出假设

H2 自我控制可能在体质健康测试压力与锻炼拖延之间发挥中介效应。

综上所述,通过建构一个中介作用模型来考察大学生体质健康测试压力对锻炼拖延的影响,以及自我控制的中介作用机制。

1 对象与方法

1.1 对象

采用方便抽样方法,抽取 4 所高校(北京工商大学、中北大学、泉州师范学院、莆田学院)在校大学生为调查对象,研究已获得调查对象的知情同意。共发放 967 份问卷,剔除无效问卷,共收集有效问卷有 714 份(男生 330 人,女生 384 人),平均年龄(19.92±1.2)岁。

1.2 调查工具

1.2.1 简版中文情绪自评量表(DASS-21)

该量表采取 Likert 5 级评分,从“0 不符合”到“3 最符合”,有助于临床诊断或者心理学研究快速筛查个体压力、焦虑和抑郁三类常见负性情绪水平。每类负性情绪的分量表测项保留 7 个题项,7 个题项得分总和乘以 2,为各分量表得分,得分越高说明个体所经历的该类负性情绪体验越严重。简化后的情绪自评量表(DASS-21),有效提高筛查个体负性情绪的效率和准确性,经国内外学者测试,该量表具有良好的信效度,包括其简体中文版对我国大学生的负性情绪的测量具有较好的信效度和敏感度,并且测量等值性具有时间稳定性^[14]。采用该量表中的压力情绪题项来测试大学生对即将到来或最近的体质健康测试压力期间的紧张、忧虑等压力感情况。Cronbach's α 系数为 0.89。

1.2.2 简版中文自我控制量表(brief self-control scale, BSCS)

该量表通过 7 个题项反映自律性和冲动控制两个维度。同样采用 Likert 5 级评分,从“1 完全不符合”到“5 完全符合”,得分越高说明个体克服外界诱惑,管理和调控自己行为能力越高。其中第 2 题、4 题、6 题和 7 题为反向计分题,作答耗时较短,减少应答疲劳,有助于甄别填写的有效性。量表经测试和检验,对国内大中小学生群体具有良好的信效度,也是可靠易行的测量工具^[15]。Cronbach's α 系数为 0.76。

1.2.3 简版锻炼拖延量表(procrastination in exercise scale, PIES)

该量表由 Kelly 等^[16]开发而成,旨在衡量个体自主推迟进行有计划锻炼的程度,有助于研究者评估个体身体活动自我调节失败的可能途径。量表更为简短,只有 6 个题项,采用 Likert 5 级评分,同样也是从

“1 完全不符合”到“5 完全符合”,得分越高表示个体锻炼拖延越明显。Cronbach's α 系数为 0.96。在相关专家(心理学教授和体育学博士)的帮助和指导下,对锻炼拖延量表进行翻译和信效度检测。

1.2.3.1 锻炼拖延量表结构效度分析

对该量表每测项数据进行探索性因子分析后,结果表明,探索性因子分析后各项数值均达到理想水平,其中 KMO 值为 0.93,只有 1 个因子特征根大于 1,各个题项在该因子的载荷均大于 0.6($P < 0.01$),该因子能够解释总体变异的 82.93%。进而对数据进行单因素验证性因子分析,模型运行结果拟合良好,各项拟合指数均符合统计学标准($\chi^2/df=1.564$, RMSEA=0.021, CFI=1.00, TLI=0.999)。

1.2.3.2 锻炼拖延量表校标效度分析

在量表编制过程中表明,锻炼拖延与一般拖延存在着正相关,能够预测个体较低的体力活动水平。此外,个体锻炼行为与一般拖延水平之间具有密切联系^[7],核心自我评价同样用于拖延行为的测量^[18],因此,选择这些变量作为外部效标。分别采用简版一般拖延量表^[19]和核心自我评价量表中文版^[20]对一般拖延和核心自我评价进行测量。锻炼拖延与一般拖延($r=0.57$, $P < 0.01$)存在着明显正相关,核心自我评价($r=-0.37$, $P < 0.01$)存在显著负相关。

1.3 质量控制

问卷由任课老师或调查员统一发送到调查对象填写。为提高调查对象的认真程度和填写内容的真实性,任课教师或调查员向调查对象简要介绍研究目的和研究意义,告知只有认真填写完成后,才可以抽取现金红包或礼品。其次在题目中设置合理甄别题,如本题只能选择第一选项。

1.4 统计分析

采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析,计量资料以($x \pm s$)进行描述,变量间相关性使用 Pearson 相关进行分析,采用 Amos 21.0 对锻炼拖延量表结构效度进行分析。另外采用及 Hayes 开发的 SPSS 宏程序 PROCESS 3.4 对数据进行分析处理,选取 Model 4 检验自我控制在体质健康测试压力与锻炼拖延之间的中介效应。

2 结果

2.1 共同方法偏差检验

采用的是自评问卷的形式收集研究数据,为评估可能存在的共同方法偏差状况,采用 Harman 单因素检验方法对全部量表题目测项进行统计分析。结果显示,第 1 公因子的解释率为 24.97%,远小于 40%。因此,可以判定本研究不存在严重的共同方法偏差。

2.2 描述统计和相关性分析

各变量描述统计和相关性结果如表 1 所示,体质健康测试压力与锻炼拖延显著正相关,表明大学生体质健康测试压力越高,锻炼拖延程度越明显。自我控制与体质健康测试压力和锻炼拖延呈现显著负相关。表明大学生体质健康测试压力越高,锻炼拖延程度越明显,个体自我控制水平越低。

表 1 各变量描述性统计结果和相关分析($N=714$)

Tab.1 Descriptive statistical results and correlation analysis of variables ($N=714$)

变量	M	SD	1	2	3	4
1.锻炼拖延	15.53	6.70				
2.体质健康测试压力	8.58	8.33	0.50***			
3.自我控制	22.73	4.57	-0.49***	-0.39***		

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。下同。

2.3 中介效应检验

使用 PROCESS 宏程序 Model 4 对自我控制在体质健康测试压力与锻炼拖延之间的中介效应进行检验,通过抽取 5 000 个样本来估计中介效应的 95%置信区间,结果如表 2 所示。结果表明:体质健康测试压力显著正向预测锻炼拖延($\beta=0.40$, $t=15.30$, $P < 0.001$),纳入自我控制为中介变量后,体质健康测试压力对锻炼拖延的预测作用有所降低,但仍保持显著($\beta=0.29$, $t=11.06$, $P < 0.001$),95%的置信区间为[0.24, 0.34];体质健康测试压力能够显著负向预测自我控制($\beta=-0.21$, $t=-11.13$, $P < 0.001$),95%的置信区间为[-0.25, -0.17];自我控制显著负向预测锻炼拖延($\beta=-0.52$, $t=-10.79$, $P < 0.001$),95%的置信区间为[-0.61, -0.42];偏差校正的 Bootstrap 检验表明,自我控制的中介效应显著,效应值为 0.11,95%置信区间为 [0.08, 0.14],中介效应

(0.11)占总效应(0.40)的比例为 27.50%。以上中介效应检验结果表明,自我控制在体质健康测试压力与锻炼拖延中起部分中介作用。据此,绘制三个变量之间

的中介效应模式图,见图 1。图中标志的数据分别为直接路径和前后中介路径系数。

表 2 基于 Bootstrap 法的中介效应检验

Tab.2 Intermediate effect test based on Bootstrap method

回归方程		整体拟合指数			回归系数显著性			
结果变量	预测变量	R	R ²	F	β	Bootstrap 下限	Bootstrap 上限	t
锻炼拖延		0.50	0.25	234.02***				
	体质健康测试压力				0.40	0.35	0.45	15.30***
自我控制		0.39	0.15	123.96***				
	体质健康测试压力				-0.21	-0.25	-0.17	-11.13***
锻炼拖延		0.59	0.35	194.22***				
	体质健康测试压力				0.29	0.24	0.34	11.06***
自我控制					-0.52	-0.61	-0.42	-10.79***

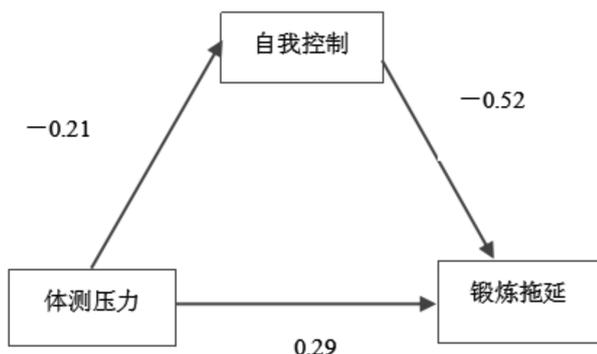


图 1 中介效应模式图

Fig.1 Mediation effect pattern plot

3 讨论

3.1 大学生体质健康测试压力对锻炼拖延有直接作用

目前,对大学生体质健康的了解与评价仍然遵循着应试教育机制,主要以一年一次的全校体质健康测试呈现出来。体质健康测试是一种应激场景,体质羸弱和缺乏锻炼的大学生在体质健康测试中面临很大的压力。结果发现,体质健康测试压力能显著地正向预测个体锻炼拖延行为。说明锻炼拖延与其他拖延类型一样,也是会受到个体负性情绪的影响,这与以往其他类型拖延与负性情绪的研究结果一致。大学生拖延参与锻炼,并不是为了达到更好的期望结果,而是为了逃避体质健康测试压力。说明锻炼拖延相当于学业拖延,普遍认知上一种非理性、消极的拖延。体质健

康测试以基本的跑跳投动作为主要测试内容,旨在检验大学生日常体育锻炼情况。大学生群体怠于健身,对基本运动技能掌握不乐观,长期应试教育让大学生很难在进入大学之后迅速达到体质健康测试要求^[21]。所以当个体在计划锻炼时,会对锻炼难度和要求进行评估。当个体觉得自己很难坚持长期锻炼应对任务,也恐惧体育健康测试不达标所带来的后果时,他们注意力过多集中在锻炼过程中不愉悦的身体反应,潜意识里认为自己身体机能提高很难。体质健康测试压力往往伴随着焦虑、抑郁等负性情绪,个体为了减少这些消极体验的影响一方面选择回避锻炼、拖延锻炼。另一方面,个体可能选择沉浸在短视频、手机游戏等即时享乐活动缓解当下体质健康测试压力。此外,个体过于反复思考、琢磨自我锻炼拖延行为产生及其不良后果,也会加剧锻炼拖延行为的维持^[22]。

3.2 大学生自我控制在体质健康测试压力-锻炼拖延间起到部分中介作用

结果发现,在体质健康测试压力对锻炼拖延作用的过程中,自我控制起到部分中介的作用。大学生若具备较高的自我控制水平,是能够减小体质健康测试压力感体验,改善锻炼拖延程度。体质健康测试压力一方面能够直接预测锻炼拖延,另一方面通过自我控制这一间接路径对锻炼拖延产生作用,也就是说,自我控制起到“纽带”的作用。情绪与自我控制之间存在着相互影响的关系,情绪低落经常伴随着自我调节失

败,已经被学者们的大量研究证实和说明。具有拖延行为的个体往往不善于缓解消极情绪,增加积极情绪体验^[23]。身体机能素质水平短时间内迅速提高不现实,个体难以通过“突击式”锻炼在体质健康测试中取得理想成绩。当大学生认为体质健康测试对于自身是具有挑战性,对其顺利完成学业是具有威胁性时,个人不具备应对的内部和外部资源时,就会体验到压力。压力负性情绪能够通过削弱自我控制能力,抑制将行为意识转变实际行动^[24]。同时,体质健康测试压力可能削弱体育锻炼效能感,对正常的运动生理反应做出消极评价。大学生规律锻炼行为主要受效果评估和自我控制影响,二者水平越高,其锻炼行为越趋稳定。

4 研究结论

从自我控制的视角研究大学生锻炼拖延这一亟待解决的关键议题。结果表明:体质健康测试压力与大学生锻炼拖延之间呈现正相关关系;自我控制中介了体质健康测试压力对大学生锻炼拖延的影响作用。这些发现为如何推动大学生体育锻炼习惯形成,提高体质健康水平提供了新的策略和工作重点。从实践角度来看,自我控制是体质健康测试压力影响锻炼拖延的重要中介过程。我国大学生群体面临着各种压力,体质健康测试压力是客观存在且不可忽视的个体心理体验,而大学时期是个人从青少年向成人过渡的重要阶段,是青年形成良好锻炼习惯的关键时期,因此需要更多地关注大学生的锻炼拖延行为,引导他们合理安排时间锻炼,正确认识锻炼拖延的成因和发展,积极应对体质健康测试压力。

5 研究局限及未来研究展望

大学生锻炼拖延不是一个突然产生的现象,拖延行为的改变是有其阶段性和过程性,它发生在大学生个体、周围环境以及个体社会关系的互动过程中,并受到个体情绪状态的影响。单次的横断面调查研究很难要求在个体、环境和时间上保持一定的稳定性,并且受试者在填写问卷过程中还会存在一定的回忆偏差。因此,基于单次的横断面调查研究,难以充分论证

体质健康测试压力和锻炼拖延之间的内部机制。为此,将来研究可以采用生态瞬时评估结合情境背景因素对大学生群体锻炼行为和情绪状态进行持续的准确测量和评估,利用手机应用程序收集不同年级、性别大学生某一段时间或者大学四年的锻炼拖延、锻炼意识、情绪状态及个体瞬时行为环境背景等信息,采用多层次线性模型对数据进行分析研究,以深入了解大学生自我控制在体质健康测试压力与锻炼拖延的关系。

参考文献:

- [1] 倪亚琨,郭腾飞,王明辉.大学生特质拖延、跨期选择和未来时间洞察力的关系[J].中国心理卫生杂志,2018,32(9):765-771.
- [2] CHRISTIAN A L, MATTHIAS B. Reducing procrastination using a smartphone-based treatment program: A randomized controlled pilot study. *Internet interventions*[J]. 2017,12:83-90.
- [3] 郑晓,张持晨,靳珍珍,等.基于跨理论模型的大学生体育锻炼行为阶段与变化程序研究[J].中华疾病控制杂志,2019,23(10):1186-1190,1223.
- [4] 程素萍,李敏,张皖.大学生拖延行为与元认知和情绪的关系[J].中国临床心理学杂志,2010,18(2):238-240.
- [5] 杨韵.大学生体质健康危机的现实困境与缓解之道:基于大学公共体育教学实践的反思[J].教育发展研究,2018,38(5):23-28.
- [6] 耿靖宇,侯晓,杨华勇,等.特质焦虑与大学生拖延行为的关系:有调节的中介模型[J].心理与行为研究,2019,17(3):402-407.
- [7] TICE D M, BRATSLAVSKY E, BAUMEISTER R F. Emotional distress regulation takes precedence over impulse control: If you feel bad, do it! [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*,2001;80(1):53-67.
- [8] 杨彩霞.大学生复原力与压力事件、心理健康的关系研究[D].石家庄:河北师范大学,2008.
- [9] M6NICA T G R, REN6 L H. Factor structure of the Perceived Stress Scale (PSS) in a sample from Mexico[J]. *The Spanish Journal of Psychology* Copyright 2007 by The Spanish Journal of Psychology, 2007, 10(1): 199-206.
- [10] FLETT G L, STANTON M, HEWITT P, et al. Procrastination automatic thoughts as a personality construct: An analysis of the procrastinatory cognitions inventory[J]. *Journal of Rational Emotive & Cognitive -Behavior Therapy*, 2012, 30: 223-236.

- [11] SIROIS F ,PYCHYL T. Procrastination and the priority of shortterm mood regulation: Consequences for future self[J]. *Social & Personality Psychology Compass*, 2013,7(2):115-127.
- [12] BAUMEISTER R F , VOHS K D , TICE D M . The strength model of self-control[J]. *Current Directions in Psychological Science*, 2007;16(6):351-355.
- [13] SJASTAD H , BAUMEISTER R F. The future and the will: Planning requires self-control, and ego depletion leads to planning aversion[J].*Journal of Experimental Social Psychology*, 2018;76:127-141.
- [14] 卢珊,段昕雨,邱明悦.抑郁-焦虑-压力量表简体中文版在大学生群体中的纵向等值性[J].*中国临床心理学杂志*, 2020,28(5):950-953.
- [15] 罗涛,程李梅,秦立霞,等.简式自我控制量表中文版的信效度检验[J].*中国临床心理学杂志*,2021,29(1):83-86.
- [16] KELLY S M , WALTON H R . “I’ll work out tomorrow”: The procrastination in Exercise Scale[J]. *Journal of Health Psychology*[J]. 2020(5):1359105320916541.
- [17] 朱秀清.拖延与大学生锻炼行为动机的中介效应[J].*广州体育学报*,2019,39(4):81-85,120.
- [18] CORREA M A , DIAS A C G . Core self-evaluations and sportive practice: Comparisons between practitioners and non-practitioners college students[J].*Psicologia:Teoria e Prática*,2020,22(2):444-457.
- [19] 张亚利,李森,俞国良.简版一般拖延量表在中国大学生群体中的信效度检验[J].*中国临床心理学杂志*,2020,28(3):483-486.
- [20] 杜建政,张翔,赵燕.核心自我评价的结构验证及其量表修订[J].*心理研究*,2012,5(3):54-60.
- [21] 王梦.我国大学生体质健康测试存在的问题及对策[J].*体育文化导刊*,2020(7):54-59.
- [22] STAINTON M , LAY C H , FLETT G L . Trait procrastinators and behavior/trait-specific cognitions[J]. *Journal of Social Behavior and Personality*, 2000, 15(5): 297-312.
- [23] 蒙茜,郑涌.拖延研究述评[J].*西南大学学报(人文社会科学版)*,2006(4):9-12.
- [24] 童媛添,连帅磊,孙晓军,等.无聊倾向对手机成瘾的影响:有调节的中介效应分析[J].*中国临床心理学杂志*,2019,27(6):1115-1120.

Relationship Between Stress and Exercise Procrastination in College Students’ Physical Fitness Test: Self-Control Mediating

WANG Weijie¹, SHAO Hua², HAO Sizhe¹

(1.School of Physical Education, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000;

2.School of Educational Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000)

Abstract: Relevant studies have found that individual negative emotions have obvious negative effects on their procrastination behavior, however, the understanding of the mechanism of the influence of individual negative emotions on their exercise procrastination is not deep enough. Objective: To investigate the effect of physical fitness test stress on exercise procrastination in college students and the mediating role of self-control between the two. Methods: A questionnaire was conducted on 714 college students using exercise procrastination scale (PIES), simplified version Chinese self-control scale (BSCS), and stress scale (DASS-21). Results: (1) Physical fitness test stress was correlated with exercise procrastination and self-control. (2) Physical fitness test stress significant positive prediction of exercise procrastination. Self-control plays a part of the mediating role in physical fitness test stress and exercise procrastination, with the mediating effect as a percentage of the total effect being 27.50%. Conclusion: The greater the stress of physical fitness tests in college students, the more pronounced the exercise delay. Alleviating their physical fitness test stress and improving their level of self-control can help promote college students’ exercise engagement.

Key words: physical fitness; test stress; exercise procrastination; self-control; negative emotions; college students

(责任编辑:白琳)

UC3842 的开关电源项目式教学方法应用

赵玉超, 江田辉

(厦门海洋职业技术学院 信息工程学院, 福建 厦门 361000)

摘要:基于 UC3842 的开关电源项目式教学方法应用实践,介绍开关电源的基本原理,分析基于 UC3842 的开关电源电路的教学内容、教学目标、学生的学情特点和重难点。采用将实训教学与项目式教学相结合的方法,将开关电源电路设计的具体应用场景融入到实际课程教学中。以“工作任务”为明线,以“思政融入”为暗线,运用混合式教学、任务驱动法、合作探究法等方法手段,以课前、课中和课后三段教学流程实施教学,取得良好的教学效果。

关键词:开关电源;电路设计; UC3842 ;项目式教学

中图分类号: TM46;G642.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0081-05

1 开关电源概述

与传统的线性稳压电源相比,开关电源具有体积小、重量轻(体积和重量只有线性电源的 20%~30%)、效率高(能达到 90%以上,而线性电源一般只有 30%~40%)、自身抗干扰性强、模块化、易调节输出电流、电压和频率的特点^[1-2],被广泛应用于计算机设备、自动化仪表、家用电器等领域。传统的线性电源将逐渐被开关电源所取代。因此,对电子信息类的学生而言,开关电源的学习就显得尤为重要。针对基于 UC3842 芯片的液晶显示器的开关电源电路,介绍一种项目式实训的教学方法,促进学生对开关电源电路设计的深入理解和实际操作能力的提高。

2 开关电源的原理和设计

2.1 开关电源的原理

开关电源的基本原理是在输入端直接将交流电整流变成直流电,再利用 MOSFET 或者晶体管的高速开启/关断即高频振荡电路形成高的频脉冲电流,把直流电流(DC)逆变成一定的交流(AC)方波。交流方波通过电感(高频变压器)进行能量传递和电压变换,再通过输出整流滤波来获得稳定的 DC 输出电压。基本原理如图 1。

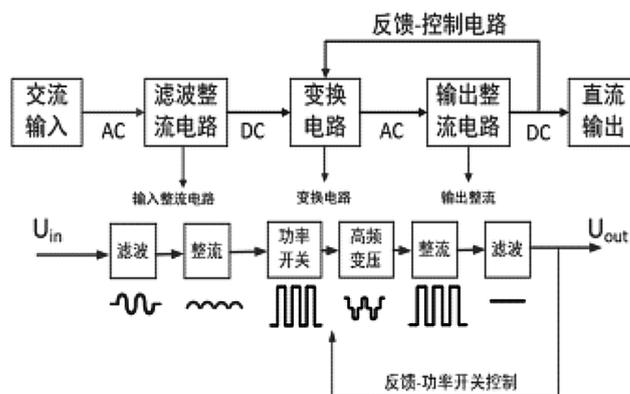


图 1 开关电源电路原理

Fig.1 Principle of switch mode power supply circuit

收稿日期:2023-12-06

基金项目:厦门海洋职业技术学院教育教学改革研究与
实践项目(JWJB202202)。

作者简介:赵玉超(1974-),男,汉族,高级实验师,主要从事
电子通信的研究。

通讯作者:江田辉(1992-),男,汉族,讲师,主要从事光电
技术的研究。

2.2 基于 UC3842 开关电源的设计步骤

UC3842 是一种常见的 PWM 控制器芯片,主要由振荡器、误差放大器、电流检测比较器、PWM 锁存器、基准电压等功能模块构成^[9],利用该芯片可以实现基于离散元件的开关电源设计,具有高效率、高稳定性和低成本等优点,如图 2。

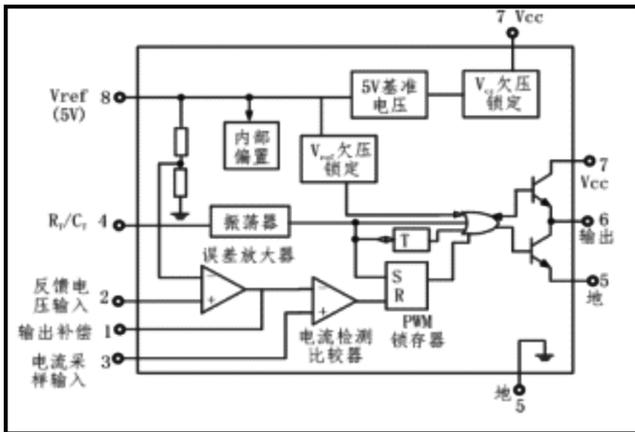


图 2 UC3842 电路结构图

Fig.2 Block diagram of UC3842

基于 UC3842 的开关电源设计步骤:(1)选择合适的输入电压范围和输出电压电平,并确定负载电流要求;(2)根据负载电流和输出电压计算输出功率,根据转换效率计算输入功率;(3)根据输入电压和功率计算输入电流;(4)选择合适的开关管和二极管,根据负载电流和最大开关频率计算出所需的开关管、二极管的额定电流和电压;(5)根据选择的开关管、二极管和变压器参数,计算 UC3842 的参考电压、电流传感器电阻、电感和电容;(6)设计反馈回路,根据输出电压和负载电流计算反馈电路的电阻和电容值。

综上所述,基于 UC3842 的开关电源设计需要综合考虑输入输出电压、负载电流、转换效率、开关频率、反馈回路、元器件参数等多种因素,经过计算、模拟和测试来获得满足需求的设计解决方案。

3 基于 UC3842 的开关电源项目式实训教学方法

基于 UC3842 的开关电源的设计与制作集综合性、设计性及研究性为一体,在教学实施过程中,要贯彻“学生主体”的宗旨,在教学过程中科学组织教学内容和确定清晰的教学目标,避免无意义的课程教学,

充分调动学生的主观能动性,发挥学生的主体作用^[4];教学内容既要全面涵盖开关电源的设计与制作的完整流程,又需同时突出开关电源设计的重点和难点,做到广度和深度并重。

3.1 教学分析

3.1.1 教学内容

图 3 为基于 UC3842 芯片的显示器开关电源电路,是典型的开关电源电路应用之一。

教学项目即从该电路原理图出发,完成显示器开关电源电路功能板的制作。整个实训内容基于上述开关电源原理的分析设计步骤流程。从图 3 可以看出,该开关电源电路由全桥整流供电、光耦反馈、稳压电路、变压器输出、基准等电路部分组成,涉及到的关键器件包括开关管 Q1、UC3842 主控芯片,变压器 T1、二极管、稳压管及光电耦合器等。

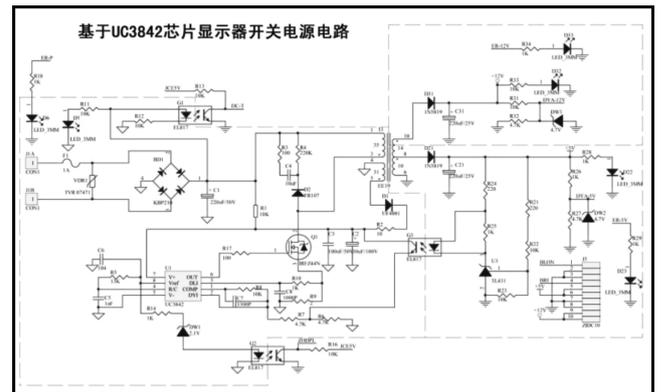


图 3 基于 UC3842 芯片的显示器开关电源电路

Fig.3 Circuit schematic diagram of display switch mode power supply based on UC3842

3.1.2 教学目标

经过多年的教学实践以及调研国内外相关课程,确立本实训的教学目标是以开关电源为载体,通过该课程对开关电源的理论学习和实践环节,加深学生理解和掌握电子元器件的特性、测试和应用、开关电源电路的原理、电子产品的调试、检测、维修等基本方法和技能,并能将所学知识技能其应用到其他电路中。同时,教学中以“立德树人,精益求精”为指导目标,将课程思政与教学融为一体。

3.1.2 学情和重难点分析

实训课的前置课程包括“模拟电子技术”“数字电子技术”“电路分析”等。根据学生前置课程的学习情

况、学生的学情特点和教学经验,了解到学生动手能力较强、学生对典型器件和基本电路的理解较好,但是对其如何应用在实际电子产品中并无清晰地认知、学生尚未有 UC3842 芯片及其应用的学习经历、学生对电路设计和调试的基本方法掌握较差。因此,教学关键在于让学生掌握电路设计和调试的基本方法、UC3842 芯片及其应用电路的原理以及如何将基本电路整合成具有特定功能的实际应用电路。

3.2 教学设计

3.2.1 教学策略

结合学生特点和教学内容,确定采用项目式实训

的教学模式。项目式教学模式通过将具体的应用场景融入到教学中,灵活运用多种教学法,建立对学生有吸引力的项目,促使学生更好地掌握相关知识和技能^[9]。项目式教学模式即是学生以完成典型的显示器开关电源电路的制作为工作项目来进行实施教学,将教学重构内容为三个子任务。学生只有依次完成各个任务才能完成整个项目教学。三个子任务依次包括开关电源设计、开关电源的模拟仿真、开关电源制作和调试,见表 1。

表 1 开关电源教学任务分解

Tab.1 Decomposition of teaching tasks for switch mode power supply

序号	名称	内容说明	教学仪器设备要求	标准		
				知识	技能	素质
1	开关电源设计	1.开关电源原理、元件和基本电路 2. 开关电源原理图 PCB 板的设计 3.检测模块设计	多媒体,基本电子元器件、万用表、示波器等	熟悉各种类型的电阻、电容、电感、二极管和三极管的特性以及 UC3842 芯片的工作原理;基本电路的工作原理;实验室安全用电规范	元器件的识别与测量;万用表的仪器的使用;PCB 板设计	安全教育 团队协作
2	开关电源的模拟仿真	在 Multisim 中搭建仿真电路模型	计算机、Multisim 仿真软件	Multisim 中搭建仿真电路的方法	Multisim 中搭建仿真电路	数字化素养教育
3	开关电源制作和调试	1.在 PCB 板上焊接元器件 2.开关电源电路的综合调试和常见故障的检修方法	电子元器件、开关电源电路板、实验工具箱	1.焊接技巧、焊接工艺 2. 开关电源电路综合调试方法; 3.常见故障原因分析	1.掌握电子元器件的焊接方法 2.能够调试开关电源电路 3.能够分析和排除开关电源电路;	安全教育、全局意识、劳动教育、团队协作

3.2.2 教学实施

教学以“立德树人”为根本宗旨,根据学生认知规律,基于实际显示器开关电源电路的制作工作项目,

以“工作任务”为明线,以“思政融入”为暗线,运用混合式教学、任务驱动法、合作探究法等方法手段,以课前、课中和课后三段导学流程实施教学,如图 4。

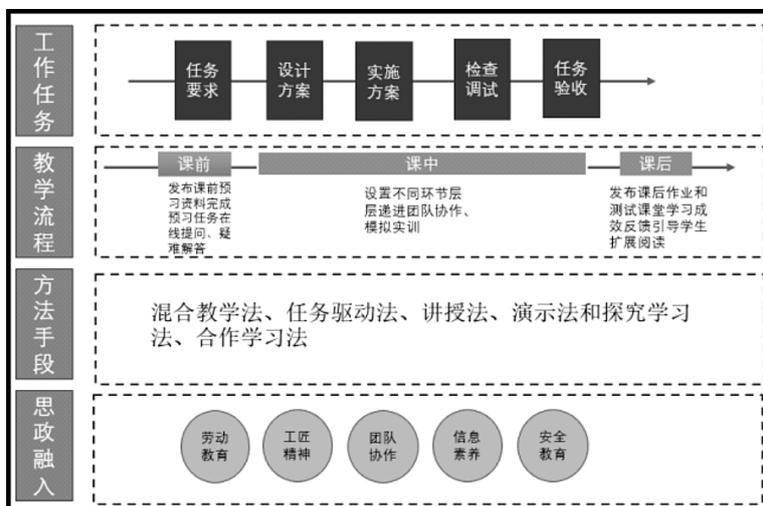


图 4 教学实施过程

Fig.4 Teaching implementation process

(1)课前自主学习、制订方案:通过学习平台发布课前任务和资料,引导学生理解本次课程内容和要求。学生自学知识点和完成预习任务,上传至平台。同时通过在线提问、测试习题等方式,分析学生自学效果,适时调整教学策略。以任务1“开关电源设计”为例:课前通过学习平台发布器件工艺文件和课前任务,引导学生进行自学,根据学生课前预习情况进行解答。特别是在第一次课前,要求学生以小组为单位准备一篇关于开关电源技术的发展历史、最新热点、研究趋势等综合性报告,消除学生在课程学习时的盲目性和畏难情绪,激发学生的学习兴趣。

(2)课中实施教学,完成项目:根据子任务特征选用不同信息化资源,设置层层递进的教学互动,深化知识和技能理解,利用各个手段突破重难点,达成教学目标。在教学过程中注重学生的实践,除电路原路讲解外,尽可能较少讲授时间,让学生遵循开关电源电路产品制作流程,一步步进行摸索直至完成任务。

任务1:“开关电源设计”可分为三部分:a.开关电源原理、元器件和基本电路;b.开关电源原理图PCB板的设计;c.检测模块设计。学生首先需要通过元器件型号,查阅资料,找出元器件说明书中的应用典型电路,以及器件的重要参数值,如导通电阻、耐压、耐电流等相关参数。教学过程中,所有元器件皆放在盒子里,学生需要根据电路图通过选用元器件构建符合要求的单一功能电路。在这个过程中,学生学会元器件的识别与检测,熟练掌握万用表、示波器等仪器仪表的使用方法,并将说明书里器件典型特性的实验波形和学到的知识相对照,形成完整的测试报告。针对重难点,如基于UC3842芯片的控制电路的学习,可以通过视频动画和案例讲解,让学生更好地掌握知识技能点。学生将构建好的各个单一功能电路进行整合,即形成开关电源的实际应用电路的原理图,由原理图即可设计出相应的开关电源电路的PCB图和检测模块设计。另外,元器件的测试过程以及检测模块设计中可融入安全用电的思政教育内容。通过从元器件选用到整个功能电路的构建,学生能基本掌握开关电源电路甚至一般电子电路的构建方法和技能。

任务2:“开关电源的模拟仿真”,要求学生使用Multisim仿真软件中搭建仿真电路模型,用示波器观

察,反馈电压的改变引起的输出波形、占空比变化;以及输入电流的改变造成的输出波形占空比的改变情况。即按照“实际产品”的开发顺序流程进行仿真实验,进一步理解主控芯片UC3842的脉冲宽度调制(PWM)电路的作用。在前置课程中的学习中,要求学生掌握Multisim仿真软件的下载安装到熟练使用。结合往年教学经验,仍然有相当一部分学生无法熟练使用掌握该软件,造成课堂教学时间的极大浪费及学生不能同步任务。为保证教学的顺利进行,针对不能熟练掌握该软件使用的学生,通过学习平台发布微课资源,要求学生在线下进行观看微课自主学习。同时,利用学习平台的监控功能,督促学生完成学习任务。

任务3:“开关电源制作与调试”,要求学生在任务2仿真无误的前提下进行显示器开关电源电路板的制作,掌握电子元器件的焊接顺序、焊接方法、焊接工艺,如图5。在制作过程中培养学生的安全理念、全局意识等。电路板制作完成后,要求学生对其进行调试,分析故障原因并予以解决。针对学生故障分析能力弱的问题,在课程教学中积极引导采用试错、推理、归纳等方式进行故障分析排查;在教学过程中设定一段“思考时间”,要求学生在这段时间内独立进行分析问题,并将分析过程记录下来。教师通过学生笔记分析学生的思维方式和存在问题,从而引导学生解决问题。

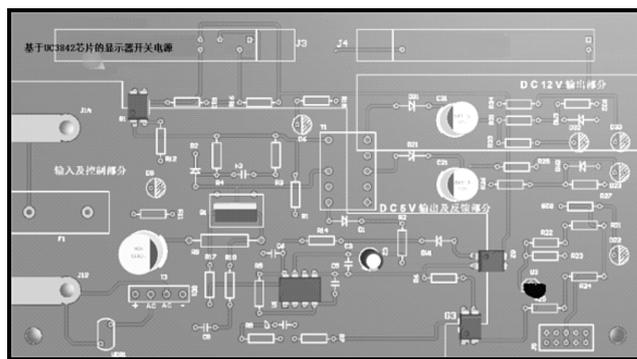


图5 开关电源PCB板制作

Fig.5 Manufacturing of switch mode power supply PCB board

(3)课后,发布课后作业,了解学生知识技能掌握情况;同时,可以设置电动车开关电源电路、直流电机、变频器开关电源电路等扩展任务,引导学生以小组为单位分工完成任务。

教学考核贯穿于整个项目过程,采用多维度的考

核方式,包括考勤、实验操作、实验报告撰写、学习情况、课堂参与等方面的表现,通过及时反馈并调整教学策略。

3.2.3 教学效果评价和反思

基于 UC3842 的开关电源实训教学,通过对实验操作、实验观察和实验报告的综合评价,以及学生的反馈调查结果,教学效果良好,大部分学生对开关电源的工作原理、设计思路和故障分析等方面均有了全面深入的理解和突破。同时,项目式教学模式也增强了学生的实验操作能力和问题解决能力。

在实际实施项目教学法时,也遇到一些问题和挑战。教学过程考验学生的综合素质能力和教师的教學能力。教学过程中学生按照开关电源电路设计流程完成任务,要求学生积极主动参与,需要具备一定的电子电路知识和技能,部分学生可能对项目不感兴趣或基础知识技能薄弱,主动参与程度低,导致任务进行缓慢,影响正常的教学进度,因而需要教师具备较高的专业素养和教学能力,能够引导学生进行项目实践,解决学生在实践中遇到的问题,把握各个学生或学习小组的任务推进方向,合理安排任务完成点^[6]。另一个值得注意的是在项目教学过程中,学生活动范围较大,遇到问题惰于思考,倾向于直接去请教其他同学,从而出现学生扎堆聚集现象,课堂容易出现混乱,课堂教学效率降低。针对此问题,在未来的课程教学中可以考虑制定一些具体的课堂纪律守则,同时强调

独立思考解决问题的重要性。

4 结语

基于 UC3842 的开关电源项目式教学方法,可以提高学生的知识理解和实验操作能力,同时更好地将开关电源的设计应用场景融入到教学中去,提高学生的兴趣和参与度,取得良好的教学成效。未来,可以通过加强实验器材的更新维护以及加入更多微课、线上线下混合等教学方式,进一步提高项目式教学的教学效果和实用性,争取把开关电源电路建设成特色专业课程。

参考文献:

- [1] 侯清江,张黎强,许栋刚.开关电源的基本原理及发展趋势探析[J].制造业自动化,2010,32(9):160-162,169.
- [2] 李民.车载开关电源电磁干扰分析[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [3] 朱彩莲,熊丽萍,魏海红.基于 UC3842 反激式 AC-DC 开关电源设计[J].电子设计工程,2017,25(24):148-151,156.
- [4] 诸葛坚.线上线下混合式教学在“开关电源设计”课程中的探索与实践[J].南方农机,2019,50(19):219,234.
- [5] 王磊.谈项目教学法在“开关电源技术”教学中的运用[J].长春教育学院学报,2013,29(9):108,112.
- [6] 张锋.“任务驱动”教学法在高职“开关电源原理分析与调试”课程中的应用研究[J].教育现代化,2018,5(32):267-270.

Application of Project-Based Teaching Method of Switching Power Supply Based on UC3842

ZHAO Yuchao, JIANG Tianhui

(School of Information Engineering,Xiamen Marine Vocational and Technical College, Xiamen, Fujian 361000)

Abstract: Switching mode power supply have a wide range of applications in various fields.This article is an application practice of project-based teaching method for UC3842 switching power supply. This article first introduces the basic principle of switch mode power supply, and then analyzes the teaching content, teaching objectives, student learning characteristics, and key and difficult points of switch mode power supply circuits based on UC3842. By combining practical training with project-based teaching, the specific application scenarios of switching power supply circuit design are integrated into actual course teaching. With "work tasks" as the clear line and "ideological and political integration" as the dark line, blended teaching, task driven method, cooperative exploration method and other methods were used to implement teaching through a three-stage teaching process of pre class, in class, and post class, achieving good teaching results.

Key words: switching power supply; circuit design; UC3842; project-based teaching

(责任编辑:叶丽娜)

工程教育认证视域下“新能源发电技术” 课程教学改革与实践

张春

(安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:“新能源发电技术”课程是支撑电气工程及其自动化专业工程教育认证的主要课程之一,针对传统新能源发电技术课程教学存在的问题,提出了基于工程教育认证理念进行课程教学改革的途径,重塑基于产出导向的课程目标,重构面向能力培养需求的课程内容,构建以学生为中心的多元融合教学模式,推进面向持续改进的课程评价改革。通过对课程目标达成情况的定量与定性评价表明,课程教学改革与实践取得了明显成效。

关键词:工程教育认证;“新能源发电技术”;教学改革;教学模式

中图分类号:G642 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0086-07

工程教育认证是国际通行的工程教育质量保障制度^[1],是面向本科高校工科类专业开展的一种合格性评价^[2],也是本科高校工程教育的质量保障和检验标尺,其核心理念是“学生中心、产出导向、持续改进”^[3-5]。工程教育认证强调以工程人才培养目标为导向^[2],要求专业教学设计和教学实施以培养目标和毕业要求为出发点,设计科学合理的培养方案和课程大纲,采取配套的教学内容和教学方法^[6]。由此可见,课程是实现毕业要求的基本单元,推进符合工程教育认证要求的课程改革,对更新教育教学理念、优化课程设计、改革教学模式、持续改进课程教学质量、培养适应社会经济发展需要的高等工程技术人才具有重要意义。

随着能源革命战略需求的转变和碳达峰碳中和目标的提出,新能源发电技术及新型电力系统得到快速发展,作为培养新能源发电领域人才的主要课程,“新能源发电技术”课程越来越受到关注,课程目标是通过光伏、风力、核能和生物质能等新能源发电形式的发电原理、系统组成、运行控制技术及工程应用等内容教学使学生具备解决新能源发电领域复杂工程问题的能力。课程内容涉及电力电子技术、自动控制原理、电机学及电力系统分析等多门先修课程,知识面广、工程应用性强,是支撑电气工程及其自动化专业认证的主要课程,但该课程在教学中往往存在课程目标针对性不强、内容相对滞后、教学模式单一以及考核评价不合理等问题,学生的学习效果不好,专业认证对课程改革提出了迫切要求,急需围绕学生中心对新能源发电技术课程教学进行改革,基于产出导向提高课程教学的针对性和实效性。为此,笔者针对当前新能源发电技术课程教学现状,从专业认证核心理念出发,坚持问题导向,对课程目标、内容体系、教学模式、考核评价等环节进行改革,并结合实际工程案例开展教学,提升学生工程实践能力及解决复杂工程问题的能力,使课程目标能有效支撑毕业要求。

收稿日期:2022-10-28

基金项目:安徽省高等学校重大教育教学改革研究项目(2020jyxm0147,2023jxgl030);安徽工程大学本科教学质量提升计划项目(2023xmskk03,2023jyxm01)。

作者简介:张春(1972-),男,汉族,教授,主要从事“新能源发电技术”教学科研工作及高等教育教学研究与管理。

1 传统新能源发电技术课程教学存在的问题

1.1 课程目标不清晰

传统课程目标描述的是需要学生了解、理解、掌握或熟练掌握关于新能源发电的基本原理、系统构成或运行控制技术等内容,而对学生需要达成的知识、能力、素质目标描述不清晰,教师难以能够选择恰当的教学模式引导学生面向能力和素质目标开展自主学习,亦无法科学地评价学生的学习成果,学生也只是为通过期末考试拿到课程学分而被动学习,学习效果差。

1.2 教材内容相对滞后

新能源发电种类繁多,应用新能源发电的规模越来越大,技术不断创新,但教材内容多年不变,相对滞后,不能反映新能源发电技术发展前沿和当前的研究重点、热点问题,无法激发学生的创新意识,培养学生的创新能力。

1.3 教学模式单一

传统课程教学以课堂讲授为主,侧重基本原理讲解,大多采取的是“照本宣科”或“照屏宣科”模式,缺少实践环节或工程案例,不能体现课程的高阶性、创新型和挑战度,无法激发学生的学习兴趣,调动学生自主学习动力,很多学生在课堂上只能被动接受,无法感受到新能源发电技术在现实生产、生活中的重要性。

1.4 评价不合理

传统的课程评价采用的是终结性考试或考查,主要围绕教师课堂上讲授的知识点进行,考核结果仅能体现出学生低层次的简单记忆和理解能力,无法考查学生分析问题及解决复杂工程问题等高层次的综合运用能力和工程实践能力,未从根本上突破以能力和素质为核心的评价模式,不能全面、深入评估学生学习效果,更不能针对存在的问题持续改进。

2 基于产出导向的课程目标重塑

课程目标要有鲜明的产出导向,能支持相关毕业要求,就新能源发电技术而言,要求学生能够阐明新

能源发电的基本原理和方法,能够运用深入的工程原理解决新能源发电控制技术、并网技术、组网技术以及综合利用技术等方面的复杂工程问题。笔者根据培养方案中相关毕业要求指标点反向设计得到该课程的4个目标,涵盖了知识、能力与素质等方面,既体现以能力为核心的产出导向,又作为建构课程内容、选择教学模式、开展课程评价的逻辑链条,能够有效驱动面向产出目标开展教学和学习。

目标1:能阐明光伏发电、风力发电、核能发电以及生物质能、海洋能、地热能发电的基本原理,建立相关数学模型和仿真模型;能运用现代化仿真工具对新能源发电系统进行建模、原理验证及分析。

目标2:能结合具体工程问题 and 应用需求,制定具体的新能源发电系统解决方案,进行系统的整体设计和相关参数计算;能运用所学知识在光伏发电、风力发电等发电系统设计中运用先进的运行控制技术、并网技术、组网技术;能基于源-网-荷-储一体化解决能源互联网运行控制与优化调度问题。

目标3:结合各类新能源的开发与应用,能熟悉能源与环境可持续发展等方面的方针、政策、法律和法规,并将其合理应用于工程实践。

目标4:结合我国能源开发的现状、大力发展新能源发电的环境和经济意义,引导学生树立正确的世界观、价值观、人生观,在新能源开发、设计和运用实践中理解并遵守工程职业道德和规范,履行社会责任。

课程目标与毕业要求指标点的支撑关系如表1所示。

表1 课程目标与毕业要求指标点的支撑关系

Tab.1 Supporting relationship between curriculum objectives and graduation requirements

毕业要求 ^[6]	毕业要求指标点	课程目标	权重
1.知识运用	1-3 能运用数学、自然科学以及工程基础、专业知识解决电气工程领域复杂工程问题。	1	0.3
3.设计/开发/解决方案	3-1 能够设计针对电气工程领域复杂工程问题的解决方案,并能够在设计环节中体现创新意识。	2	0.3
7.环境和可持续发展	7-2 能够理解、评价与电气工程领域复杂工程问题相关的专业实践对环境、社会可持续发展的影响。	3	0.2
8.职业规范	8-1 具有正确的世界观、价值观、人生观以及人文社会科学素养、社会责任感,在电气工程实践中理解并遵守工程职业道德和规范,并履行责任。	4	0.2

3 面向能力培养需求的课程内容重构

培养学生解决复杂工程问题的能力既是工程教育认证的基本要求,也是“双高”(高比例新能源并网、高比例电力电子装置接入)电力系统迅速发展形势下新能源发电技术课程面临的挑战。笔者认为,课程教学要立足体现学生终身发展需要,从传统的单纯按照章节内容分工方式转向按照能力培养重组,致力于培养学生高阶思维能力,使学生具备解决新型电力系统复杂工程问题能力;同时,要将课程内容置于全球视野、国家需求、产业行业发展视域下,实现专业教学与思政教育同向同行。

3.1 建构模块化知识体系

新能源发电技术是一门工程性很强的课程,而工程性的问题大都是由若干个复杂的系统组成,学生由于不具备工程经验,很难将课堂学习的理论知识与工程实际相互联系,需要教师根据课程特点和工程应用需要对内容进行重构。为此,一方面,笔者基于产出导向,紧扣课程目标对课程知识体系进行重构,以新能源发电系统的各种技术为牵引,将分散在光伏发电、风力发电等各种新能源发电技术中的控制技术、并网技术、组网技术、综合利用技术等知识点进行“模块化”搭建,将教学内容划分为五个模块。模块一,概述;模块二,新能源发电技术与控制技术;模块三,新能源发电的并网技术;模块四,微电网组网技术;模块五,新能源的综合利用技术。各模块之间既关联又独立,在内容上呈现承前启后的关系,通过层层递进、环环相扣的教学,最终使学生有效掌握由单一新能源发电技术到并网、再到微电网组网技术等内容,不断拓展学生的综合性、创新性思维。另一方面,在进行各模块内容教学时,笔者结合工程实际案例进行内容设计,以设置实际典型应用问题为主线,提出解决问题思路,通过建立数学模型、进行仿真实验验证等环节引导学生探索新知识,达到应用基本工程原理并进行创新设计的教学目的,突出学生解决复杂工程问题能力和创新能力培养。同时,由于新能源发电技术本身具有前沿性和鲜明的时代特征,课程内容设置要充分反映学科前沿,应结合新能源发展趋势讲授风-光-储互

补发电、风-光-柴-储-电动汽车互补发电,以及微电网、能源互联网运行控制与优化调度等内容,注重学科交叉,引导学生探索学科前沿。模块化知识体系如表2所示。

表2 模块化知识体系

Tab.2 Modular knowledge system

模块	知识内容	课程思政主题	课程目标
模块一:概述	能源储备与可持续发展战略(含能源的发展历史、生态环境) 新型电力系统	弘扬爱国主义精神,加强学生的专业认知感,坚定学生的专业信心。	3,4
模块二:新能源发电技术与控制技术	风力发电及其工作原理、风力发电机组的控制 光伏发电原理、光伏发电系统的MPPT控制技术 沼气发电技术与控制策略、生物质燃料电池发电技术 核反应原理、核能发电技术	培养精益求精的“工匠精神”。	1,4
模块三:新能源发电的并网技术	水力发电及其控制技术、海洋能发电原理与应用、地热能发电原理与应用 风力发电机组的并网技术(直接并网、准同期并网、降压并网、软并网等)及并网安全与防护 独立式光伏发电系统的结构、储能与充放电控制技术 并网式光伏发电系统的结构及并网安全与防护 并网光伏逆变器	培养学生严谨的科学态度,树立法治意识。	1,2,4
模块四:微电网组网技术	分布式供电与混合储能技术 基于直流母线并网的微电网技术、基于交流与直流混合组网的微电网技术	培养学生严谨的科学态度,树立法治意识。	2,4
模块五:新能源的综合利用技术	多能互补发电 能源互联网运行控制与优化调度 风力发电、光伏发电、核能发电等的发展前景与综合评价	激发追求卓越的创新精神和担当意识。 树立环保意识和低碳绿色环保理念,增强学生的职业使命感。	1,3,4

3.2 课程思政元素挖掘

深入挖掘专业课程的思政教育资源,以专业知识为载体加强学生的思想政治教育,让课堂主渠道功能实现最大化,形成专业课程与思政课程同向同行、专业教育和思政教育有机融合的协同育人格局,是高等教育提高立德树人成效和人才培养质量的有效途径。作为对接碳达峰碳中和国家重大战略部署,面向世界能源领域未来科技发展前沿的一门工程技术类课程,在强调专业知识教育的同时应体现“课程思政”主题,主动承担起专业课程育人功能和主渠道作用。为此,笔者通过模块一讲解能源储备与可持续发展战略、新型电力系统等,使学生了解未来能源发展趋势和能源转型的迫切性,突出培育爱国主义精神。在模块二通过新能源发电技术与控制技术特别是光伏电池、蓄电池等基础知识以及系统设计等内容教学,着重培养学生精益求精的“工匠精神”。在模块三和模块四通过新能源发电的并网技术、组网技术特别是相关并网条件和并网过程等内容教学,着重培养学生严谨的科学态度,树立法治意识。在模块五通过新能源的综合利用技术讲解分布式综合能源系统的前景及应用,突出培养学生追求卓越的创新精神、担当意识,树立环保意识和低碳绿色环保理念,增强学生的职业使命感。当然,虽然各模块之间的课程思政主题根据课程内容有所侧重,但教学中应做到交叉融合。各模块主要课程思政主题如表2所示。总体上,该课程的课程思政育人目的在于使学生在新能源发电工程领域中理解安全、可靠、优质、经济的基本要求,恪守标准和规程,激发学生担当意识,履行社会责任,引导学生“诚实做人、踏实做事、扎实做学问”,达到“融盐入水”的思政育人效果。

4 以学生为中心的多元教学模式构建

为更好地达成课程目标,课程教学模式改革至关重要,要从“以教为中心”的教学模式向“以学为中心”的教学模式转变^[9],实施课内课外、线上线下、理论与实践等多元融合模式,充分调动学生学习积极性和主观能动性。

4.1 课内课外融合

目前,新能源发电技术课程内容较多而学时有限,为了达成知识、能力和素质等多方面的课程目标,应注重课程内容的科普性与专业性相结合,合理设计学生的课内与课外学习内容,要求学生在课外通过线上线下调研、查找相关资料、编制可研报告等方式进行一些科普性、知识性内容和课内未重点讲解的新能源发电技术的学习,提高自主学习能力。比如,在课程目标1的教学中,笔者结合新能源发电领域的实际情况,在课内主要选取风力发电、光伏发电和核能发电等技术发展比较成熟的新能源发电技术进行详细讲解,而对生物质能发电、海洋能发电、地热能发电等新能源发电形式在课内仅进行简单介绍,以学生课外自主学习为主。基于课程目标的课内与课外教学内容分配见表3。

表3 基于课程目标的课内课外教学内容分配

Tab.3 Distribution of the curricular and extracurricular teaching content based on curriculum objectives

课程目标	课内教学	课外学生自主学习
课程目标1	光伏发电、风力发电和核能发电的基本原理,分析光电、风电并网系统的工作原理和控制方法	通过中国大学慕课平台、自制课件等自学生物质能发电、海洋能发电、地热能发电等相关内容
课程目标2	结合光伏发电、风力发电等实际工程案例进行控制系统分析、设计和并网技术、组网技术研究等,着重解决复杂工程问题能力的培养	查找相关案例,编制工程项目可研报告
课程目标3	结合光伏发电、风力发电等实际工程案例进行经济技术方案比较	进行经济技术方面的社会实践调研
课程目标4	就光伏发电、风力发电等实际工程案例进行系统方案及相关技术规范方面的分析	通过线上线下调研、查找资料等学习新能源的发展现状与趋势、新能源发电系统设计的标准与规范等

通过系统化设计,将不同课程目标的内容分别落实到课内的教学和课外的学生自主学习中。一方面,便于教师把主要精力投入到主流新能源发电技术的教学上,抽出更多时间讲解工程案例,把相关方法论以及关键技术讲深讲透;另一方面,能促使学生在课外自主探索、自主学习,培养学生主体意识,提升自主学习能力。

4.2 线上线下融合

线下教学在学情的实时反馈、良好学习氛围营造、师生互动等方面是线上教学所不具备的,但线上教学在破除时空局限、整合教学资源、把握学习节奏等多方面具有优势,在教学中应合理使用,使线上线下相融合提高教学效果。

新能源发电技术线上教学主要借助相关教学平台,结合笔者自制课件和慕课资源进行。课前按照授课计划准时发布学生需要学习的线上教学资源以及需要完成的作业、章节测试等相关学习任务;学生明确自身的学习目的后,在课前自学完成相关内容,提出相关问题并通过必要的在线讨论、作业、章节测试等检验自身线上学习效果。笔者利用教学平台具备的便捷互动功能,及时为学生的线上自学答疑解惑。同时,通过平台还能做到线上学习记录可追溯、线上学习评价多元化、线上学习反馈即时化,为管理学生课外学习活动及后期过程性评价提供有力的工具和保障,课后可针对线上教学的各类学习数据统计反馈,衔接后续教学内容,优化教学流程。

线下教学以翻转课堂为主,设置课堂引入、专题研讨等环节。其中,课堂引入部分主要由学生对线上学习的知识进行讨论并讲解,教师及时了解学生自学效果,解决学生提出的问题。专题研讨环节根据课内教学内容以及部分线上自学内容,选取新能源发电工程案例中某些具体问题作为研讨主题,将学生分成若干小组,小组研讨后轮流选派代表上台汇报,教师进行适当补充和答疑解惑。通过翻转课堂环节,将学习的决定权从教师转移给学生,学生在与同学和老师的交流中能进一步增强对所学知识的理解,教师亦能通过学生的交流不断提升自己,这既调动了学生学习的主动性、积极性,增强了学生自信心和辩证能力,加强师生之间的互动交流,又提高了线下教学效率,达到了教学相长的目的。

4.3 理论与实践融合

针对新能源发电技术工程性强的课程特点,教学内容应尽可能选取实际的工程案例,实现理论与实践相融合。其中,在理论部分,笔者尽可能摒弃教材中繁琐的公式推导,而采取仿真形式构建清晰、直观模型或通过相关的实验,帮助学生理解基本工程原理。

而对于系统设计、控制技术、并网技术、组网技术、综合利用技术等则结合工程案例进行。比如,在光伏发电技术教学中,笔者选取实际工程案例为:

某 90 MW 光伏项目利用水库、坑塘水面进行建设,总占地面积约 1.31 km²。工程设计安装 231 252 块 535 W 单晶硅半片双面双玻光伏组件,装机容量为 123.719 82 MW。电站采用分块发电、集中并网方案,将系统分成 33 个分布在各个水库的光伏发电单元。

预计电站首年上网电量为 14 001 万 kW·h,首年等效满负荷利用小时数为 1 132 h,25 a 运营期内平均年上网电量为 13 058 万 kW·h,年等效满负荷利用小时 1 055 h,容量系数为 0.12。

根据本光伏发电项目的建设规模和场址位置、电网现状及规划,初步拟建 1 座 110 kV 升压站,升压站以 1 回 110 kV 线路接入 ** 变 110 kV 侧。

通过本工程案例教学,使学生具备项目可研报告编制、分析和解决光伏发电系统设计中相关问题的能力,从而提高学生的工程意识、协作精神和综合应用所学知识解决实际问题的能力。

5 面向持续改进的课程评价改革

对课程目标进行达成评价是开展毕业要求达成评价的基础,也是教师实施教学改进的基础性工作。为了合理评价课程目标达成情况,保证课程教学质量,促进课程教学持续改进,课程评价的设计与实施要坚持目标导向,采取分阶段、多视角的形成性评价和终结性评价相结合模式,客观地评价学生学习状态和产出效果。

5.1 课程教学评价

课程教学评价改革不仅要注重考核评价的内容和方式创新,而且要有利于持续改进。笔者结合线上线下、课内课外多元教学模式采取面向持续改进的形成性评价与终结性评价相结合的课程教学评价模式。

其中,线上教学部分占总分值的 30%,主要包括线上资源学习(课外)与研讨(课内)、章节测试(课内)和作业(课外)等几个部分。因为线上教学重在引导学生自主学习、检验自主学习效果,因此加大章节测试方面考核激励比值,设置分数占线上分值 60%,而线

上资源学习与研讨、作业分别占 10%、30%。例如,在光伏发电系统的 MPPT 控制技术教学环节,笔者课前布置光伏电池的最大功率点及环境影响因素、光伏电池的最大功率点跟踪方法、各种 MPPT 跟踪方法的优缺点等自学内容,要求学生自主开展线上教学资源的学习,回答预设的问题,从而考查学生的学习理解能力、批判思维能力和归纳总结能力等学习效果。

线下教学部分占总分值的 70%, 主要包括翻转课堂(课内,占线下分值 10%)、分组研讨(课内,占线下分值 10%)、项目案例设计(课外,占线下分值 30%)、课程终结性评价(课内,占线下分值 50%)等几个部分。比如,在项目案例设计环节,通过设置若干新能源发电项目,提出相关设计需求,将学生分成不同小组,由各小组共同探究项目设计方案和设计内容,完成设计、仿真、实验、结果分析等任务,笔者对每项任务依次评价。线下终结性评价题目主要来自于新能源发电技术及贯穿项目案例设计中的工程原理、方法和技术等内容。比如,笔者将期末原来侧重考核学生知识掌握程度的有关 MPPT 控制技术概念题,改为在给定环境和条件下设计实现光伏发电系统 MPPT 的方案,考查学生运用 MPPT 基本原理分析问题、选择恰当方法解决特定光伏发电环境下的系统设计能力。

通过多元化教学过程和相应的形成性评价以及期末终结性评价,为每个教学环节设计明确的评价方式,构成覆盖各类教学环节的评价体系。当然,线上、线下评价过程必须做到有理有据、有据可查。

5.2 改革成效与持续改进

经过近几年课程达成情况的定量、定性评价分析,发现课程教学取得了如下成效:

(1)定量评价结果表明,近几年各课程目标的达成度均在 0.7 左右,课程综合达成度均达到 0.689,符合预期目标。

(2)通过问卷调查、学生座谈、课程及大纲分析等具体方法开展的定性评价结果表明,学生的学习目标更加明确,对能力的提升更加迫切,学生的学习主动性、积极性得到极大提高,切实实现了由“以教师为主”向“以学生为中心”转变;学生认为课程改革能较好地提高自身分析问题、解决复杂工程问题能力,新能源发电工程项目设计的基本能力得到提高。

但定量评价结果表明,课程目标 2 即学生的设计/开发解决方案能力达成度每年均在 0.65 左右,未达到 0.7 的课程目标达成情况,这说明学生在新能源发电领域的工程实践和设计能力尚不足,后期课程教学应进一步强化相关工程案例的学习研讨和工程设计的模拟训练,着重培养学生综合具体工程问题和应用需求、制定具体解决方案、进行系统整体设计和分析的能力,并在评价过程中重点关注对新能源发电系统建模、控制系统设计以及分析等方面能力的培养,从而形成课程质量提升的持续改进机制,促使课程目标达成。

6 结语

从工程教育认证实践来看,承载着毕业要求的课程体系只有通过其中每一门课程的有效实施才能最终达到毕业要求,而每一门课程的有效实施至少需要做到两点,即采用与课程内容相适应的教学组织形式和教学方法及有与教学内容和教学方式相应的评价方式^[4]。为此,本文探讨了工程教育认证理念下新能源发电技术课程改革与实践途径,以课程目标达成为主线,将“学生中心、产出导向、持续改进”理念融入课程目标重塑、教学内容重构、多元融合学习模式构建以及多元化评价和持续改进各环节,旨在使课程目标能有效支撑毕业要求。教学实践表明课程教学改革取得了较好的成效,为进一步开展专业课程改革提供了参考。

参考文献:

- [1] 谷陈,陈鹤鸣.工程教育专业认证中的教师职责探究[J].高等教育研究,2020(3):104-108.
- [2] 林健.工程教育认证与工程教育改革和发展[J].高等工程教育研究,2015(2):10-19.
- [3] 蒙跃平,徐桂枝,于艳东,等.基于在线平台的混合式课程的教学建设与探索:以现代教育技术课程为例[J].中国现代教育装备,2022(3):68-70,73.
- [4] 李志义,赵卫兵.我国工程教育认证的最新进展[J].高等教育研究,2021(5):39-43.
- [5] 施晓秋,徐赢颖.工程教育认证与产教融合共同驱动的人才培养体系建设[J].高等工程教育研究,2019(2):33-39,56.
- [6] 中国工程教育专业认证协会.工程教育认证标准解读及使

- 用指南[S/OL].<https://www.ceeaa.org.cn/>
- [7] 李志义.《华盛顿协议》毕业要求框架变化及其启示[J].高等工程教育研究,2022(3):6-14.
- [8] 李志义.中国工程教育专业认证的“最后一公里”[J].高教发展与评估,2020,36(3):1-13,109.

Teaching Reform and Practice of “New Energy Power Generation Technology” Course in the Field of Engineering Education Accreditation

ZHANG Chun

(College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000)

Abstract: The course of new energy power generation technology is one of the main courses supporting the engineering education accreditation of electrical engineering and automation specialty. Aiming at the problems existing in the teaching of traditional new energy power generation technology courses, the paper proposes the way to carry out curriculum teaching reform based on the concept of engineering education accreditation, reshape the curriculum objectives based on production-oriented, reconstruct the curriculum content oriented to the needs of ability training, and build a diversified and integrated teaching mode centered on students, promote the reform of curriculum evaluation for continuous improvement. The quantitative and qualitative evaluation of the achievement of the curriculum objectives shows that the curriculum teaching reform and practice have achieved remarkable results.

Key words: engineering education accreditation; “New energy power generation technology”; teaching reform; teaching mode

(责任编辑:叶丽娜)

机器人应用基础实践教学

阚保强

(福建师范大学 协和学院 信息技术系, 福建 福州 350003)

摘要: 主要介绍面向机器人技术的设计、编程和竞赛的综合实践课程开设情况。在实践教学中,围绕机器人技术关键的感知、规划和控制等环节,让学生体验无人系统的动态、传感、决策等知识,从而更好的起到学以致用效果。

关键词: 机器人; 教学实践; 机器人操作系统

中图分类号: TP242-4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2109(2024)06-0093-05

机器人技术正在成为当前我国经济转型的重要支撑力量。机器人技术的成功应用有可能从根本上提高工业制造、物流的效率和安全性。因此,如何培养适配机器人技术快速发展的人才,是摆在各类高校机器人教学中的迫切问题。反观当前很多高校的机器人技术教学,仍是孤立地强调系统设计中的机械、电气和计算等各个方面。近几年来,随着新工科教育范式的推广,机器人应用教学方式发生一些改变。如张辉等^[1]针对智能机器人技术课程提出“认知型教学”到应用型教学的转变;吉鸿海等^[2]围绕智能机器人解决复杂工程问题,从宏观上对综合实践教学体系进行改革和探索;贾子熙等^[3]基于 MR 技术开展了机器人工程课程的虚拟实验系统,通过网络实现沉浸感和交互性;Funes-Lora 等^[4]针对机器人工程课程从工学和社会学融合的方式进行实践探讨,提出翻转课堂实现机器人绘画并通过社会学角度阐述机器人绘画对社会的影响,从而提高对智能制造的认知。但以上研究只是宏观上进行实践体系的构建,或者仍侧重传统独立模块基础知识的教学或实践,缺乏针对机器人教学实践可操作性强的课程设计^[5-7]。

然而随着以软件为主体的自主智能系统,尤其基于 ROS 的机器人系统的广泛使用^[8],机器人应用技术

实践教学中“重复造轮子”的问题得到很好的解决,因此更应该把机器人应用实践教学的重点转移到系统层面的决策和行为验证方面,也就是要强化对机器人的决策和部署相关业务逻辑上。为此,针对机器人应用基础实践教学,结合应用型高校实际,开展一些探索和实践。

1 实践课程设计概要

在课程设计上,通过以下 2 个方面来体现:

(1)强化实际产品完整性和可操作性。为突出实物感知性,基于 ROS 系统完成无人车的设计,这样可以尽量在造轮子上减少时间开销,同时通过实际操作来强化感知、规划、控制等基础理论。这一部分学生完成的主要工作包括机器人本体(车体)的设计实现以及相关算法代码的实现。学生在实验室提供的移动车基础部件基础上进行加装后的实物图,如图 1。

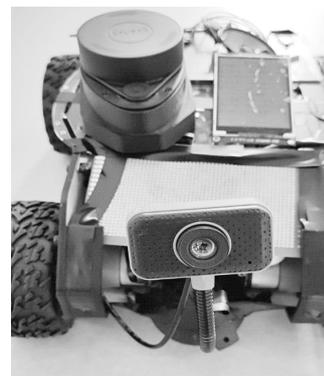


图 1 实验室自主开发的无人车平台

Fig.1 Our autonomous vehicle platform

收稿日期:2023-04-08

基金项目:福建省教师教育科研项目(JAT191117);泉州市科技计划项目(2017T009)。

作者简介:阚保强(1980-),男,汉族,副教授,博士,主要从事智能体及无线抗干扰等方面的研究。

(2)改进传统考核方式,融入比赛和创意作品的形式,在完成考核的同时,培养学生必要的技术技能。

在课程实践平台选择上,由于差速控制是比较简单的机器人系统,所以选择差速控制的无人小车作为实践开发平台。在课程设计中,突出以下几点:

(1) 持续兴趣引导

机器人实践课程非常复杂,挫折很容易影响到学生的学习情绪,所以课程设计中要为学生提供一个基本底盘的小车,而不是全部让学生去设计完成。这样可以让他们一开始就产生兴趣并持续下去。

(2) 强化分工合作

在课程实践中鼓励学生组队联合进行小车的设计,这不仅可以培养团队合作,对于熟悉协作工具的使用也是很有好处的。

(3) 课程讲授有的放矢

遇到一些比较初级的问题,如通信格式、运动控制、计算内存溢出、传感器参数的飘移等。但这只是系统集成学习一部分,但讲授必须侧重于上层决策和算法,算法则需要深入的去进行介绍,这也是学生自身无法容易理解的知识。

(4) 突出仿真的作用

无休止的参数调整,是很多实践课程的典型现象,往往是设计中的理论推导不够,所以前期的理论设计必须要在仿真器中来实现,再移植到实际小车上。

(5) 以就业导向开展课程设计

课程的设计必须要结合就业方向,如当前热门的ROS系统的开发,这既能跟踪企业需求,也能激发学生学习的动力。

2 硬件平台

课程硬件平台如图2所示。该智能车包含传感器套件(激光雷达、立体摄像头、惯性测量单元)、执行器(含驱动)、计算平台和板载电源管理系统,该车辆采用广泛可用的基于四轮驱动底盘无线电遥控车上。且该平台很小足以在室内运行,其高性能也使得复杂算法流畅运行。

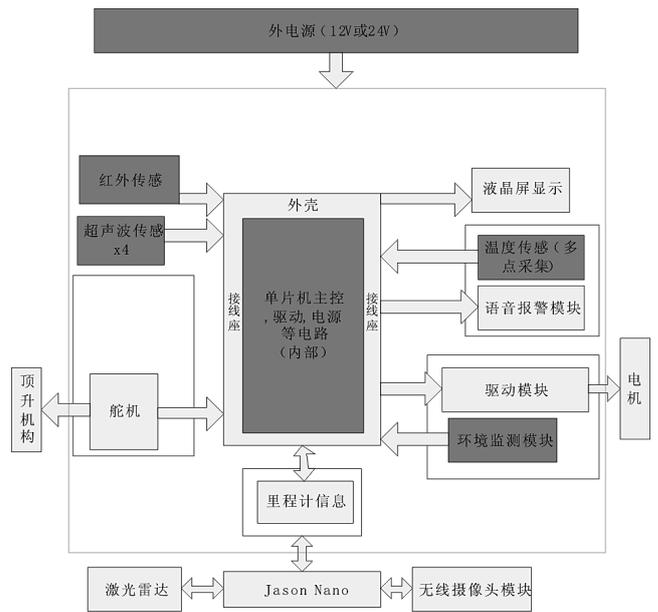


图2 自主移动车的硬件结构图

Fig.2 Hardware Framework of the Rover

为使基础车适合课程,进行一些修改。首先,将现有的电子速度控制器替换为开源设备,该设备可以进行调整以提供电机 RPM 的闭环控制并启动转向伺服系统。其次,车辆使用有刷直流电机。最后,提供配电板(用于为板载计算和传感器供电)以及安装板设计;这些附加部件的所有方面都是开源的,可以制造或从供应商处购买。课程硬件使用一款嵌入式开发系统来实现,主要采用拥有多核 ARM CPU 和强大的 GPU 的 Nvidia Jetson Nano。类似的硬件在无人驾驶领域被广泛使用,这样可以让学生能够更真实的接触到当前无人驾驶的最前沿技术和生态。Jetson Nano 可以流畅运行 GUI 和 GPU 支持的定制 Linux 内核操作系统,从而可以减轻学生从传统开发工具链的到 GCC 编译工具链的过渡。在网上有公开的课程手册,提供了配置操作系统、硬件接口和软件包的详细说明,可以方便的进行系统安装和配置。

另外,无人车必须有传感器来感知其周围环境。采用的主要传感器是一个单线激光扫描仪(即激光雷达),可以实现一定角度范围的距离测量。激光雷达使车辆实施能够实现避障策略以及估计里程计、创建地图和定位。由于实验室测试环境通常是特征很少的走廊,所以还需要编码器提供里程计进行配合。为实现计算机视觉的实验练习,还需单独配置一个摄像头。同时在底盘中还配备红外传感模块、超声传感器模

块、液晶显示模块、环境采集传感器模块、语音模块,以及用于执行器的舵机和电机模块。这些模块可以根据最终作品进行优化选择。

3 软件栈

在软件部分,课程可以分成两大块:一是硬件驱动部分,二是基于 ROS(Robot operation System)框架的节点代码。驱动部分主要包括各个硬件的驱动,如电机控制器的驱动、激光雷达的驱动、摄像头的驱动等等。基于 ROS 框架的代码主要包括传感器节点主题包处理程序、底层运动控制节点信息交互程序、决策算法节点程序。基于 ROS 框架的开发,可以极大减少学生对各类传感器及底层处理的精力,能最大化的让学生专注于上层的决策信息处理及规划和控制算法。

为强化仿真的作用,基于 Gazebo 仿真环境进行前期验证和实践。这样可以快速将合适的导航算法或速度控制等,直接在仿真环境下进行验证。同时,多传感器的融合也可以快速进行验证。同时基于 Rviz 可视化工具进行查看。为便于学生基于仿真环境进行开发,最大限度降低仿真环境配置花费的时间和精力,本实践课程,基于 Docker 容器进行部署,一些附带的开发环境也可以一起进行部署,并且可以跨平台运作,比如 Linux、MacOS 和基于 Windows 的计算机,都可以直接使用。如下图所示,基于该仿真平台学生只需在本地基于浏览器即可实现机器人仿真,可以极大降低学生环境搭建的时间开销。

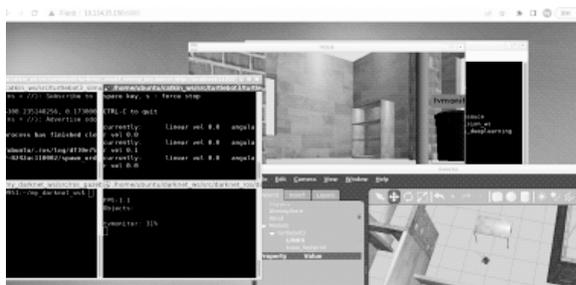


图3 基于 Docker 和 VNC 的仿真平台

Fig.3 Simulator based on Docker and VNC

4 课程教学内容安排及实施

在实际教学中,课程安排 64 个学时,其中理论讲

授和实践分别为 32 学时。整个学期的课程内容安排,以及相应的实验见表 1。总的可分为机器人基础、感知、规划和控制及视觉应用等几部分,基本涵盖机器人开发所涉及的主要方面。

表 1 课程内容安排

Tab.1 Course modules

类别	理论讲授	实验安排
机器人基础	概论及课程简介	环境搭建
机器人基础	ROS 基础	ROS 节点、主题包练习
机器人感知	激光雷达原理	激光点云生成
机器人感知	激光辅助定位技术	激光扫描匹配实验
机器人感知	里程计基础	里程计实验
机器人感知	SLAM 基础	SLAM 建图实验
机器人规划	导航基础	Move_base 模块的使用
机器人规划	避障规划算法	A* 算法和 DWA 的应用
机器人控制	PID 基础	速度控制与 Wall-following
机器人视觉	机器视觉基础	Openvc 与 ROS 的图像数据交互
机器人专题	机器学习应用基础	darknetROS 实验

整个课程的教学思想围绕着最终的机器人专题来开展,即最后的作品来进行学习和实践。初始的教学基于 ROS 框架从头开始实施,也就是从下载安装 ROS 包开始,主要教学思想是从根上让学生学会应用,避免只会用实验室的环境。接下来是 ROS 基础知识的学习和练习,同时为了增强感性认识,相应的实验安排也主要以小车的组装和相关驱动安装为主,主要教学思想是强化动手带来的成就感,激发学生兴趣。在感知部分,主要是强化激光雷达、里程计等传感器的理论基础,以及 SLAM 技术的基础知识,相应的实验也以雷达点云实现、匹配扫描以及定位建图等为主,主要教学思想是让复杂的传感器理论在实践中让学生感受得到具体的效果。控制部分,则进一步要求学生熟悉 PID 控制理论,相应的实验主要以结合激光雷达的移动控制为主,主要教学思想是让学生在实践中学会 PID 调参,避免 PID 的空中楼阁。结合中期考核,进行基于激光雷达的沿墙行走比赛。后续的控制将进一步结合模型预测的来实现决策级控制实现,这一部分可以通过仿真的形式完成,主要教学思想是让学生通过仿真的应用进一步提升理论知识。规划部分,主要是进行导航算法的教学和相关实验练习,在实验设计上强化学生在航点设置和相关导航算法优

化选择上,主要教学思想是让学生把复杂的算法应用在实际场景中,更加加深对算法的理解程度。视觉应用部分将结合机器学习算法进行物体识别或分类的教学和实验,主要教学思想是让学生能从系统的视角围绕自己的作品开展针对性的实践。首先是在仿真环境结合 yolo 模型,基于 darknetROS 来实现物体的识别,接着在实际机器人实验中,则结合导航算法,自定义航点控制机器人自主导航到指定位置并基于 opencv 等开源工具实现颜色识别。在最后的特定主题设计中,则是综合运用目标识别技术、自主导航技术、远程航点发布技术实现特定场景下的机器人应用,相关应用场景包括防疫巡逻机器人、校园禁烟卫士、宠物保姆机器人等等,这一部分的讲授也将作为学生最后考核完成大作业的重要支撑。

整个考核形式,采取比赛的方式,也就是在第6周和第16周分别通过比赛来确定成绩。在第6周比赛测试中,考察学生基于激光雷达的被动式沿墙避障算法设计实现能力。对于最后的考核,则考察学生基于构建的地图,通过 SLAM 和自主导航实现定点巡航,同时考察学生利用机器学习、机器视觉等综合应用能力。在具体实施形式上,本课程特别强调了合作分工。也就是在最后的实际应用考核,要求学生自主组队,一般3人左右,然后做好具体分工,完成最后的实验。

5 教学效果

目前,本课程已经在两个专业完成两届学生的教学实践,90%学生都顺利完成该课程最终考核,如图4所示。从实践教学中学生们的反馈来看,大部分学生反映实际机器人操作中花去大量时间的是在性能改进上。这也基本上符合预期,因为变化的环境、光滑的地面以及复杂的实验室信号干扰,都会造成各种性能的改变,所以在前期的算法实验中,更应该强化仿真的作用,尽量减少这方面学生的时间花费。75%的学生反映合作分工在最后的大作业考核中至关重要,如图5所示,这也是符合实际情况的,因为针对实际的应用型大作业,要求学生不仅要熟悉 ROS 系统,还需要对于机器学习和视觉处理有比较好的应用,如果单独一

个人去完成,是很困难的,也会出现完成质量低的问题。

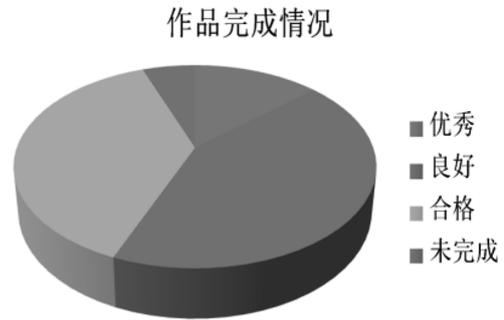


图4 作品完成情况统计

Fig.4 Result of the Homework

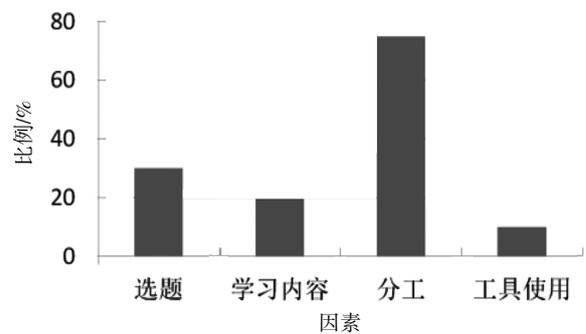


图5 作品完成因素占比情况

Fig.5 Factors of finishing the Homework

在实际课程实践中,78%的时间完成仿真器相关的算法验证,15%的时间用在实际平台上,如图6所示,从最后的考核效果来看,这一点是非常重要的,通过仿真可以极大节约实际平台调试的时间,这也是我们后续进一步要加强的地方。下面给出学生实际的应用场景作品完成情况,如图7和图8,可以看出,通过本课程学生已基本可以完成一定实际功能的机器人系统。

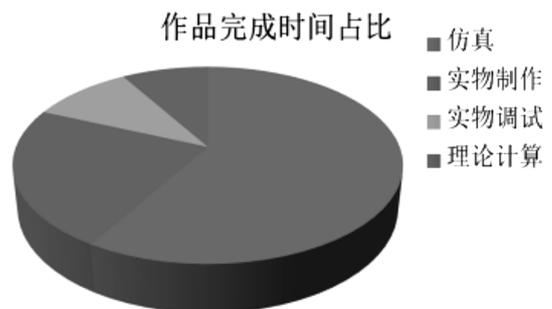


图6 作品完成时间花费占比情况

Fig.6 Time spented on finishing the Homework



图7 学生创意作品:防疫巡逻机器人

Fig.7 Student innovation work:Anti-epidemic patrol robot



图8 学生创意作品:控烟机器人

Fig.8 Student innovation work: No smoking robot

6 结论

针对机器人应基础实践课程,结合应用型高校实际,提出结合 ROS 框架的智能车系统的机器人实践课程,给出课程理论讲授及实验的具体内容和实施方法,在课程内容设计上围绕最终学生作品为核心要素,通过半成品实作强化兴趣引导,通过搭建环境进行零起步,通过理论讲授和仿真或实作的形式强化 PID 理论、激光测距理论、导航算法的理解,通过综合应用仿真、实物可以让学生以较少的基础和精力,快速搭建出面向实际应用的机器人系统,对于学生知识水平、实践技能和创新能力的培养有非常大的促进作用。实践教学

效果表明本文提出的实践教学课程,对于机器人应用基础课程的实践教学有较好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张辉,李智勇,钟杭,等.“智能机器人技术”课程教学改革实践[J].电气电子教学学报,2023,45(1):4-6.
- [2] 吉鸿海,毕松,李志军,等.智能机器人方向的实践教学体系改革探讨[J].科学咨询(教育科研),2021,736(4):27-28.
- [3] 贾子熙,王帅,郝一达,等.MR 技术在机器人工程专业实践教学中的应用[J].实验技术与管理,2020,37(9):139-142.
- [4] FUNES L , MIGUEL A .A common first-year undergraduate engineering course in manufacturing based on industrial robots and flipped classroom [C]. In 50th SME North American Manufacturing Research Conference NAMRC 50,2022: 970-981.
- [5] 林泓延,姚屏,王晓军,等.基于混合式教学的工业机器人课程教学实践研究[J].广东技术师范大学学报,2021,42(6):78-82,109.
- [6] 张伟民,杨宇航,靳家豪,等.机器人实践教学体系综合探索与实践[J].中国电化教育,2022(7):115-119.
- [7] QUIGLEY M , GERkey B P , CONLEY K ,et al.ROS: An open-source robot operating system[C]. In ICRA workshop on open source software,20093: 5.
- [8] 徐明,卢惠民,徐晓红,等.面向全流程工程训练的“无人”专业综合实践教学体系[J].高等教育研究学报,2022,45(1):98-101.
- [9] 刘超,温宏愿,杨蕾,等.“1+X”证书制度下机器人工程专业实践教学探索[J].电气电子教学学报,2021,43(6):151-154,161.
- [10] 左文娟,宁萌.以赛促学、以赛促教,培养机电卓越工程师[J].实验科学与技术,2021,19(6):103-107.

Teaching Practice on Robot Application Basics

KAN Baoqiang

(Department of Information Technology, Concord College, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350003)

Abstract: For robotics, the practical and experimental course is very challenging, because this is a fast-growing and interdisciplinary course, especially with the rapid development of driverless technology in recent years, it increases the difficulty and risk of the experiment to verify some new theories on the hardware platform. This paper mainly introduces the establishment of comprehensive practical courses for robotics-oriented design, programming and competition. In practical teaching, students can experience the dynamic sensing, decision-making and other knowledge of unmanned systems around the perception, planning and control of robotics, by applying what they have learned.

Key words: robotics; practical teaching; ROS(Robot operation system)

(责任编辑:马阿曼)

体验式教学在应用型本科高校 “食品化学”教学中的应用

于立志^{1,2}, 范俐¹, 徐新丽¹

(1.武夷学院 茶与食品学院, 福建 武夷山 3543002; 2.上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要:应用型本科高校食品类专业教学的目的是为食品产业培养应用型人才,不断促进产业发展与创新,服务健康中国战略,保障食品安全。针对目前我国应用型本科高校食品类专业“食品化学”课程的教学现状,引入体验式教学理念,结合体验式教学的内涵与特征,强调以学生为中心,通过“教与学”的良性互动,增加学生的感官体验、操作体验、互动过程、实践经历等促使其主动探索发现。通过“情境设置-主体体验-评价体验-体验迁移”的模式,改变传统教学模式单向灌输的弊端,激发学生对食品化学的学习兴趣和主动性,启发学生自主进行知识体系的构建,达到应用型人才的培养目标。

关键词:“食品化学”;体验式教学;应用型本科高校;教学改革

中图分类号:G642 **献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0098-06

“食品化学”是我国食品科学与工程类专业的核心基础课程,在人才培养方案的课程中占据中心位置,是学生在完成通识课程特别是化学相关课程的学习后进入专业课程学习的基础课,是其他食品专业课程知识点学习、理解和掌握的基础,在食品相关学科中处于关键的基础地位^[1]。它是利用化学的理论和研究方法研究食品本质的一门科学,即从化学角度和分子水平上研究食品的化学组成、结构、理化性质、营养和安全性及在生产、加工、储藏和运销过程中的变化及对食品品质和安全性的影响的一门新兴、综合、交叉性学科^[2]。食品是多组分构成的复杂体系,在食品加工与贮运过程中,食品组分自身结构与性质可能发生复杂变化,食品组分之间也可能发生复杂的化学反应,进而对食品的品质和安全性产生影响^[3]。因此,需要利

用食品化学的知识从化学角度明晰食品体系各组分的变化,并对各类加工后食品的安全性及营养性进行评估。

应用型本科高校是我国当前众多地方高校转型发展的重要形式^[4],也是高等教育由精英化向大众化转型过程中的内在要求^[5]。它以培养面向社会生产、管理、服务一线的高级应用型人才为导向,知识、能力和素质全面协调发展为目标定位的高等教育。应用型本科高校作为应用型技术人才的培养基地,承担着企业对应用型人才的需求和国家经济发展变革的重任。

食品工业作为国民经济的支柱产业之一,承担着服务健康中国战略、保障食品安全的重任^[6]。应用型本科高校中食品类专业的目标是培养食品工业中高级应用型人才,为食品产业健康、稳定、可持续发展提供重要的智力支持。因此作为食品类专业核心基础课程的食品化学的教学改革在食品行业应用型人才的培养中具有重要的关键基础作用,如何通过该课程的改革提升应用型人才的培养质量成为食品化学教学改革的重要课题。体验式教学作为一种先进的教学方法,契合了当前应用型人才的培养需求。在食品化学的教学中运用体验式教学,可以突出学生的主体作用,激发他们的学习积极性和主动性,形成师生和谐

收稿日期:2023-10-10

基金项目:武夷学院2024年校级综合教育教学改革项目(PX-824554);福建省自然科学基金资助项目(2022J011199)。

作者简介:于立志(1986-),男,汉族,讲师,主要从事食品风味化学、农产品精深加工研究。

互动的教学氛围,以期达到更好的教学效果。

将体验式教学模式运用在武夷学院茶与食品学院 2021 级食品科学与工程 2 个班级的“食品化学”课程的教学实践过程中,对照应用型人才培养目标和方案,进行了较有成效的教学实践和探索。

1 “食品化学”的教学现状

“食品化学”具有基础性强、理论性高、课程知识点多及学科交叉性等特点,使其学习具有一定的难度^[7]。目前大多数应用型本科高校仍以传统的教学模式进行“食品化学”的课程教学,存在的突出问题主要是在教学过程中过分强调教师的知识传授,而学生则只是被动和消极地接受,忽略了他们的主人翁地位。这样的教学模式容易使学生产生逆反情绪,降低他们的学习热情和兴趣,最后的结果往往是学生课堂上随便听听,考试前临时突击,考试后全然不知,与应用型人才培养目标所要求的教学效果相差甚远。这种传统教学模式束缚了学生学习的自主性,不能充分发挥他们学习的积极性和创新性,达不到应用型本科高校食品类专业人才培养目标对“食品化学”的教学要求。

许多高校教师针对传统教学模式存在的诸多问题,尝试做出了许多改革。谢晶等^[8]结合应用型地方本科高校的特点,在“食品化学”的课程教学中采用案例式教学法突破“食品化学”理论知识晦涩难懂的特点增加了对学生的吸引力;杨华等^[9]从教学内容调整、课堂讨论和教学方法与手段改革等方面对地方本科高校如何开展“食品化学”合作讨论式教学进行了初步探讨;伊莉等^[10]在当前信息化背景下通过对 MOOC, SPOC 及翻转课堂优势的有效结合,在“食品化学”课程教学中建立“基于 MOOC(SPOC)+翻转课堂”的混合式教学方法,建立了线上线下混合式教学模式,取得了较好的教学效果;蔡杰等^[11]针对“食品化学”的学科特点,将其与 PBL 模式进行有机结合,构建了基于 PBL 教学法的“食品化学”课程教学新体系,提高了“食品化学”课堂教学质量;刘日斌等^[12]首次采用对分课堂教学模式对“食品化学”实验教学进行探索,结果表明对分课堂能够比较好地提高学生的学习主动性和积极性,对“食品化学”实验教学效果的提高有很大

作用。

2 体验式教学内涵与特征

体验是教学活动中教与学、人与我、人与人之间关系的纽带。1971 年美国心理学家戴维·库伯首次提出体验式学习理论,并对其内涵进行了充分的阐释^[13]。该理论认为体验学习是一个学习过程,而不是结果,它是在辩证对立中解决冲突,以体验为基础的持续过程;它也是个体与环境在不断交互中创造知识、适应世界的完整过程^[14]。体验式教学理论在具体的教学实践中不断得到检验和发展,其内涵也在创新和变化。当前,教育界普遍认为体验式教学是指在教学过程中教师基于设定的教学目标和课程的知识体系,根据学生的认知特点和规律,通过创造的实际情境来呈现教学内容,使学生在亲身经历中做到对知识的理解和掌握,培养学生自主学习的积极性,达到认知与体验有机结合的一种教学方法^[15]。

由此可见,体验式教学强调以学生为中心,教师在教学活动中扮演组织者和协助者的角色,运用多种资源创设与教学内容相关的情境或机会,支持学生在亲历中建构知识、发展能力。图 1 所示是 Dale 的一项研究^[16]表明,不同的学习方法学习的记忆率有很大差异,可见体验式教学模式是一种符合学生认知规律、学习效果更好的教学模式。



图 1 不同学习方法的学习效果

Fig.1 The learning effects of different learning methods

与传统的“刺激-响应”的教学模式相比,体验式教学的理论把学习者看作是信息加工的主体,强调学习认知主体的内部心理过程。前者强调以教师为中心,强调的是教,后者则以学生为主体,强调的是学。

两种不同的教学思想和教学模式的差异见表1所示。

表1 体验式教学与传统教学的区别^[5]

Tab.1 The difference between experiential teaching and

比较项目	traditional teaching	
	传统教学	体验式教学
理论基础	行为主义	建构主义
教学目的	传授知识	启迪智慧
教学模式	个体学习	团队学习
教学手段	单向灌输—被动接受	互动体验—自主建构
学生角色	听众/配角	中心/主角
师角色	中心/主角	指导/配角
教学环境	封闭/枯燥	开放/灵活
教学评价	单一主观/结果导向	多元透明/过程导向

3 体验式教学在食品化学教学中的应用探索

在体验式教学模式中通过任课教师的积极引导,创设一定的现实或虚拟现实情境,主张因材施教,形成以学生为主体,强调学生在“做”中学,师生良性互动的教学形式。这里,我们将体验式教学的理念运用于食品化学教学的具体实践中,通过“情境设置—主体体验—评价体验—迁移体验”模式^[7],提升学生学习食品化学的兴趣和主动性,从而保持更高的热情去学习食品化学知识。

本次的教学实践对象为武夷学院茶与食品学院2021级食品科学与工程2个班级的学生,共计97人,理论课平均每周4课时,采取集体授课模式,每节课45 min,共48学时;实验课程共设置8个实验项目,每周1个实验项目,每次4学时,共计32学时。

3.1 情境设置

在体验式教学过程中,首先需要由教师和学生共同营造现实或虚拟现实在情境。好奇心是学习的动力源泉之一,也是青年学生的特征之一。学起于思,思缘于疑,教师通过情境设疑,引起学生的好奇心,进而产生探索、释疑的需要,激发学习的热情。在食品污染物与有害成分章节的教学中,引入日常生活中由于食品中污染物或有害成分引起食物中毒的案例,引导学生关注生活中存在的食品非法添加现象,植入他们的认知和情感,启迪他们思考,并认识到学习食品化学知识的重要性。首先设疑,哪些食物中毒现象是由于食

品非法添加造成的,具体添加了哪种有害物质,食用后会产生何种中毒症状,并鼓励学生结合自身的生活经验进行交流讨论产生疑惑和探索的欲望,关注食品非法添加现象。此时,教师给出专业知识层面的理论指导和释疑,告知学生经历过的哪些食物中毒现象可能是由于食品非法添加或污染造成的,并归纳总结出非法添加物或污染物质与具体的中毒症状和缓解措施的一一对应关系。这样,通过教师设疑,学生反思,师生互动,最后教师释疑的方式,让学生认识由于食品非法添加或污染引起食物中毒的发生条件及判断依据。这样本章节所要讲述的理论知识将通过学生在自身生活阅历中的体验与验证,内化为学生的心理认识并形成牢固知识点。这种学习模式生动有趣,活泼而不枯燥,能达到举一反三、融会贯通的效果。

学生在课堂上掌握了理论知识后,普遍具有学以致用用的情感需求,希望能利用所学知识解决实际问题,进一步巩固知识。本部分实验课程设置了一个实验项目,通过实验操作,深入对理论知识的理解,使学生认识到知识的价值,提升学习的成就感和积极性。例如在凯氏定氮法测蛋白质含量与乳制品中三聚氰胺检测方法的实验操作中,设置食品非法添加物三聚氰胺对人体健康造成危害的情境,让学生带着目的去学习,理解两个实验原理的差异,进而理解这些非法添加物在食品质量检测中是如何蒙混过关的,在以后的乳品蛋白含量的检测中如何避免这种情况的发生,从而保证乳品的质量。GB/T 22388—2008《原料乳与乳制品中三聚氰胺检测方法》和GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中分别规定了三聚氰胺和蛋白质的检测原理和方法,那么如何在乳制品质量检验中我们该如何设置试验方案,保证乳制品的非法添加物被检测出来呢?学生都有喝酸奶、乳粉及其他乳制品的体验,那么如何保证自己食用的乳制品安全健康而不含三聚氰胺呢?通过这些学生自己亲身遇到的日常问题的提出,使学生产生解决问题的积极性,主动探索的欲望和学习的成就感,改变传统教学模式的单一被动接受情况。教师在创设的实验操作情景中引出具体的实验内容,并根据学生的实验技能水平作出具体的指导。在带领学生分析问题、解决问题的过程中教给学生不同检测方法原理的差异

以及具体的实验操作和实验操作中的关键点,这与传输式教学相比更能激发学生的学习成就感。整个课堂在师生良性互动、协作促进中使学生深化理论知识的掌握和技能操作。

3.2 主体体验

3.2.1 结合生活体验启发学生完成知识构建

在食品化学的第一课,教师可以根据日常生活中由食品化学所以产生的现象提问设疑。例如,烤面包诱人的色泽和香气是怎么形成的?油脂氧化变质形成的哈喇味是怎么形成的?膳食中缺乏某种微量元素和维生素会对健康造成什么影响?哪些食物中这些微量元素和维生素含量较高。通过引入日常生活中的常见现象,激发学生的学习兴趣和启发学生进行对食品化学知识的思考。同时,引导学生通过文献数据库、图书资料的查阅,针对课堂上的理论知识和操作步骤进行归纳整理,构建自己系统的知识体系。学生接受讲授的知识者,然后进行知识的再加工和再验证,通过生活体验的植入有利于学生对理论知识和实践操作的内化和融会贯通。

3.2.2 通过角色互换增加学生的参与度

师生角色互换在食品化学理论课和实验课的教学过程中均可以采用,在教学过程中教师是主角,学生是配角。在教学过程中,教师只是学生学习的指导者,辅助学生在设置的体验情景中完成知识的学习。角色互换,可以使学生课前做好预习,课堂上认真参与,课后主动查阅资料。知识的“输入-输出”循环使学生对知识点的掌握得更为牢固。在食品化学的教学过程中,我们实施了师与生角色互换进行课堂回顾和总结的尝试。

武夷学院茶与食品学院 2021 级食品科学与工程 2 个班级的学生,共计 97 人,每 4~5 人一组分成 20 个小组,随机抽取一个小组在每次课预留的 15~20 min 内讲述自己上节课所学知识的系统归纳和学习心得,以及本节课内遇到的问题,并在组内讨论尝试对遇到的问题进行回答。然后教师点评每个小组的归纳总结,以形成系统的知识体系和清晰的逻辑关系。例如在学习完食品的风味物质章节内容后,提示学生可以按照风味物质的分类、前体物质、形成机制采用逻辑关系图的方式进行总结,并进行讨论交流。教师对在

讨论交流过程中学生的表现予以评判赋分。我们特别选择了课前随机抽取的办法,保证每位学生公平参与的机会。

在传统教学模式中,结束课程的讲授后,学生常常希望教师能够根据试卷题目划出课本上的重点,以便突击复习来应付考试。针对这一情况,我们也进行了角色互换来满足学生的这一要求。具体操作如下:教师先把课堂讲授内容划为几大模块,再将学生对应的分为几组,让各组学生总结各模块的重点知识并进行讲解,教师及其他组同学点评该组同学对重点知识的梳理。通过这样的方式教师和全班同学都参与了活动,相当于全面复习了所学知识,通过讨论和点评让学生对知识有了不同角度的认识,这完全不同于之前的教学模式。通过各组同学制作的知识体系卡片强化了重点知识的记忆和知识网络的构建,一方面使食品化学细小繁多、逻辑性差的知识点由点到线,形成网络;另一方面督促学生主动思考,积极参与,对课堂上的收获及时做出反馈,养成良好的学习习惯。

另外,我们在食品化学的实验课上也进行了新的尝试,根据实验项目的个数对全班同学进行分组,让各组同学参与到实验之前的各项准备工作中,比如试剂的配置、仪器的校准等,以便更全面地了解实验操作的具体过程;鼓励学生通过查阅资料以及自己对知识点的理解参与到期末考试题库各类题型的编写中,并经过教师和同学的讨论形成标准答案,让学生参与教学考核过程。学生积极参与了这些创新的教学改革措施,取得了良好的教学效果。

3.2.3 感官的多维体验强化学生的整体认知

随着现代信息化技术的发展,使视、听等多维度感知体验的多元化教学手段成为现实,MOOC、海量多媒体教学资源等网络课程以及虚拟仿真课堂、食品行业见习等实践教学对提升食品化学的教学效果都是重要的补充^[18]。在教学过程中我们经常让学生观看“舌尖上的中国”“每周质量报告”等经典栏目,以及江南大学“食品化学”、华中农业大学“食品化学实验”的网络教学资源,访问浏览化学数字化教学资源库等。根据当地的产业特色设置食品行业见习等实践教学环节,让学生感受理论知识在实践中的具体应用。同时安排大四上学期同学进入当地白羽肉鸡加工厂、茶

叶加工厂以及焙烤作坊进行顶岗实习,全面体验各类食品的生产工艺,深度感知食品化学知识在各类食品生产工艺中的应用。掌握理论知识的学生走进生产一线,亲身体验知识的具体应用,在体验过程中总结生产中遇到的实际问题,然后回归理论教学,在师生互动中寻找答案。学生通过多种途径参与理论教学,多维感官接受知识,有利于唤醒自身的生活背景并在生产实习中融会贯通,使理论知识在具体实践中得到检验。为了使理论知识得到再次强化,教师还可以引导学生组成的学习兴趣小组增加讨论和总结环节,达到在理解、感悟、体验上的主客体融合。

3.3 评价体验

评价是教学的重要环节,是对教与学效果的检验,具有导向功能。教师的授课效果和学生的学习情况需要评价体验来体现,评价体验的过程是学生对知识的情感内省和认知的同伴交流,教师在调动学生评价体验的积极性、解决学生的认知冲突中起着关键作用。评价体验的三个有机组成部分分别是学生之间的互评、教师对学生的评价以及学生对教师所提出的教学建议与意见,通过评价体验达到教与学的双向提升。例如在学习了食品中美拉德反应的反应原理、反应阶段、影响因素以及反应程度的测定后,鼓励学生根据自己的理解阐述自己的学习心得、学习效果,并在实验课结束后阐述不同的美拉德反应模式产生的气味、色泽以及棕变程度有何差异?结合自己的生活经验思考焙烤食品中美拉德反应对最终产品的色泽、风味有何影响?焙烤前面包外表皮涂抹蛋液的作用以及焙烤温度对终产品的影响等,在体验教学过程中有何得失等。评价体验就是将知识、情感内化体验内容的过程。在本课程第一节开始,我们就告知学生食品化学课程的评价考核办法由理论考核和实验操作两部分构成,每部分又分别由平时成绩和期末考核构成,分别占比40%和60%。其中,理论课平时成绩由出勤率、课堂表现、随堂练习等体现,期末考核为闭卷考试的卷面分数;实验课程的平时成绩为出勤率、实验操作水平,期末成绩为各个实验项目的实验报告的平均分数。由任课教师和学生代表组成的评价考核小组还接受学生对平时成绩的质疑,鼓励交流学习过程中的所思、所想、所感,加深学生对食品化学知识的掌

握。通过“教”与“学”的互评,实现教学相长的良性互动局面。

3.4 体验迁移

课堂上学习的知识与经验归根结底要应用于具体的应用实践中,并在实践中进行检验,特别是对于应用型本科高校。体验迁移就是这个阶段的最终归宿,也是目前高校人才培养中与社会接轨的环节。体验式教学中学生掌握的知识是在教师创设的体验环境中获得的,与真实的、工业规模的生产环境还有一定差距,正是这一差距激发同学们对新情境、新领域的向往和探索。任课教师设计了20个创新性实验题目,在食品化学理论和实验课程结束时,让20个学习小组分别独立完成。从焙烤食品中美拉德反应、果蔬汁VC护色作用、油脂氧化的监测与评价等实验项目,从方案设计、材料准备、组内分工合作到最后数据的处理、实验报告的撰写都由组内成员分工协作完成。然后各组同学在老师的辅助下,各自汇报,相互学习,通过交流开阔了眼界,增长了见识,实现了对所学知识的应用。学生将自己的知识、情感、实践在体验迁移中得到了融合与提升,使自身的认知更加深刻、鲜活,达到了应用型本科高校人才培养的目标。

4 结语

以学生为中心的体验式教学,强调学生参与教学过程的主动性、积极性,启发学生探索的好奇心,契合了当下应用性本科高校食品类专业的培养要求。教师在讲授过程中注重“教与学”的良性互动,突破传统的教学组织形式,教学效果得到大大提升。通过体验式教学模式的应用,让学生积极参与教学过程,获得了极大的参与感、体验感,教师们在教学中也得心应手、事半功倍。当然,体验式教学模式在实施过程中需要教师有较高的专业素养、职业操守,也需要教师掌握青年学生的心理特征及变化趋势,善于激发学生的探索欲,还需要具有良好的组织能力和语言表达能力,善于发现生活中食品化学的应用案例并及时融入到教学中。体验式教学模式对应用型人才的培养具有积极的效果,契合当下应用型本科高校食品类专业对人才培养的要求,但要将其大范围推广到应用型本科

高校的教学中,还需要进一步论证、实践与评价。

参考文献:

- [1] 李玉婷.食品化学课程的教学设计研究[J].中国食品,2022(24):28-30.
- [2] 阚健全.食品化学[M].北京:中国农业大学出版社,2016.
- [3] 胡燕,王钊.“食品化学”课程线上线下混合式教学改革的探索[J].山东化工,2021,50(15):208-209,211.
- [4] 王春华,李娟.应用型本科高校三元一体人才培养模式[J].高教发展与评估,2023,39(02):94-100,123.
- [5] 黄小芳.省域应用型本科教育质量监测评价研究[D].厦门:厦门大学,2020.
- [6] 任田,胡新中,王晓龙,等.食品科学与工程硕士研究生培养质量影响因素分析[J].包装工程,2022,43(S2):126-130.
- [7] 张余,贾小丽,蔡华珍,等.应用型本科高校食品化学课程多元化教学探讨[J].宿州学院学报,2012,27(8):116-118.
- [8] 谢晶,金晨钟,肖荣,等.食品化学课程案例式教学法的实践与探讨:以应用型地方本科高校食品科学与工程专业为例[J].现代农业科技,2017(11):263-264.
- [9] 杨华,戚向阳.地方本科高校食品化学课程合作讨论式教学探讨[J].浙江万里学院学报,2008,84(5):114-116.
- [10] 伊莉,吴锁柱,冯翠萍,等.基于 MOOC+翻转课堂的“食品化学”混合式教学模式探索[J].农产品加工,2021,538(20):105-106,109.
- [11] 蔡杰,王海滨,秦新光.基于 PBL 教学法的“食品化学”课程新教学体系的构建与实践[J].农产品加工,2021,526(8):106-108,113.
- [12] 刘日斌,朱建华,邹秀容,等.“对分课堂”在食品化学实验教学中的应用探索[J].轻工科技,2021,37(9):164-166.
- [13] 刘书艳.体验式教学模式研究[J].教育理论与实践,2015,35(34):57-60.
- [14] 大卫·库伯.体验学习:让体验成为学习和发展的源泉[M].王灿明,译.上海:华东师范大学出版社,2008.
- [15] 高洁,李佳乐,桑亚新.体验式教学在食品微生物学教学中的应用探索[J].微生物学通报,2020,47(4):1302-1307.
- [16] 江晓东.“体验式教学”在营销创新人才培养中的应用探索[J].现代营销(学苑版),2011(4):141-142.
- [17] 张蓉.体验式教学模式浅析[J].四川教育学院学报,2006,22(6):63-64.
- [18] 张园园.英文电影在“文化体验式”英语教学中的应用:以《律政俏佳人》为例[J].赤峰学院学报(汉文哲学社会科学版),2011,32(6):230-231.

Application of Experiential Teaching in “Food Chemistry” Courses in Application-Oriented Undergraduate University

YU Lizhi^{1,2}, FAN Li¹, XU Xinli¹

(1.School of Tea and Food,Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300; 2.Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

Abstract: The purpose of food majors teaching in application-oriented undergraduate university is to cultivate applied talents for the food industry, continuously promote industrial development and innovation, serve the Healthy China strategy, and ensure food safety. In response to the current teaching situation of food chemistry courses in application-oriented undergraduate university in China, the concept of experiential teaching is introduced. Combining the connotation and characteristics of experiential teaching, it emphasizes student-centered approach. and students are encouraged to explore and explore actively through the positive interaction between teaching and learning, students' sensory experience, operational experience, interactive process, and practical experience. By adopting the model of "context setting-subject experience-evaluation experience-experience transfer", we aim to change the drawbacks of traditional teaching methods that are one-way instilled, stimulate students' interest and initiative in learning food chemistry, inspire them to independently construct their knowledge system, and achieve the goal of cultivating applied talents.

Key words: “food chemistry”; experiential teaching; application-oriented undergraduate university; teaching reform

(责任编辑:白琳)

应用型高校“光纤通信技术”课程 混合式教学创新实践

谢 晖

(福州理工学院, 福建 福州 350506)

摘要:基于学习产出的教育模式是“光纤通信技术”课程教学过程中最核心的理念,从企业技术骨干培养视角,注重学生就业所需技能培养,以学习产出驱动整个课程活动。为应对教学过程中遇到的学生缺乏专业认同感、学习动力不足、难以分析和解决应用问题等挑战,并利用学生对知识的实践、工程案例兴趣较高的优势,提出了坚持以学生为中心,以培养“高素质应用型人才”为目标,通过精选教学内容、自编教材、思政融入、信息技术、项目化教学、多维评价等进行课程教学创新与实践。从学生成绩、能力提升、同行评价、督导评价、院内推广等情况来看,教学改革成效显著,达到课程教学目标和应用型人才培养目标要求,具有在同类高校进一步推广的价值。

关键词:光纤通信;学习产出;混合式;教学创新

中图分类号:G642.0 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-2109(2024)06-0104-06

“光纤通信技术”课程是信息与通信工程专业的一门非常重要的专业课,光纤通信、移动通信、卫星通信被称为现代通信的三大支柱。光纤通信是各种通信网的主要传输承载平台,在信息高速公路的建设中发挥着至关重要的作用。该课程涵盖了光纤通信的基础知识、系统构成、系统设计、设备配置以及性能指标分析,同时还探讨了光纤通信的各种传输机制、新技术以及未来发展趋势^[1]。是学生深入理解信息技术本质和整个通信网络的重要经典课程。在民办高校应用型人才培养过程中,该课程的教学遇到了新的挑战:

(1)学生普遍对专业课程认知不足,缺乏专业认同感,从而影响了学习积极性;

(2)传统课程教材内容仍然理论居多,与现实生活或实际工程的联系不够紧密,对偏好“应用”的学生吸

引力不够;

(3)目前大学教育已经从精英化进入到普及化阶段,并非每个学生的能力都能和课程的难度相匹配,学生分析问题和解决问题的能力有待提高,且学时逐渐缩短,课程教学无法完成经典教材所涵盖的所有教学内容;

(4)以教师为中心的教学模式,难以帮助学生增强学习的主观能动性。

(5)现有的实验设备只能进行部分验证性/操作性实验,理论与实践的结合无法深入开展。

为解决上述问题,并利用学生对知识的应用、工程案例兴趣较高的优势,自2017学年开始为大三年级的本科生讲授“光纤通信技术”课程以来,课程教学改革一直致力于创新教学方式,秉持以学生为中心的教学理念,以培养“高素质应用型人才”为目标,通过精选教学内容、自编教材、思政融入、信息技术、项目化教学、多元化考核评价等进行课程教学创新与改革。

1 明确课程的教学目标

课程的教学目标包括对学生知识、能力、素养的

收稿日期:2023-09-23

基金项目:2022年福州理工学院教育教学改革研究项目(LGJG2022032);2021年福州理工学院一流本科课程(线上线下混合课程)(LGJG2021061)。

作者简介:谢晖(1982-),女,汉族,副教授,高级工程师,主要从事通信网络规划与设计的教学与研究。

培养,主要如下:

(1)知识目标

- ①掌握光纤通信的基本原理,光纤通信系统的组成;
- ②掌握光纤通信系统设计及相关性能指标分析;
- ③熟悉光纤通信各种传输体制;
- ④了解光纤通信新技术以及未来的发展方向。

(2)能力目标

- ①训练分析问题、归纳问题的能力;
- ②掌握光纤通信系统设计的基本方法;
- ③熟练使用测试仪器和网络仿真平台来完成工程实践操作;

④把握最根本的工程设计的规律与方法,提高创新能力。

(3)素养目标

- ①理解通信工程中应承担的责任;
- ②培养自主学习、判断与决策、团队协作、沟通、竞争意识、客观评价、可持续发展能力等有关职业道德素养和创新创业的综合素质^[4]。

2 引入创新理念和创新教学方法适应学情现状

应对教学过程中遇到的学生对课程缺乏专业认同感、学习动力不足、难以解决分析和应用,但是对知识的实践、工程案例兴趣较高的学情现状,采用 OBE: 基于学习产出的教育模式,从企业技术骨干培养视角,注重学生就业所需技能培养,重点关注学生学到了什么和是否会应用,以学习产出驱动整个课程活动和考核评价。

以培养“高素质应用型人才”为目标,以学生的全面发展为核心,注重应用能力、创新能力和综合素质的培养,运用现代技术手段,努力推行课程改革,创新教学方法^[4]。

2.1 教学方法创新

“光纤通信技术”课程的教学设计包括理论环节和实践环节两个部分。

理论环节:

①精选课程内容,“线上线下混合式教学”,深入浅出。

②注重思政融入,帮助学生树立正确三观。

③引入实际工程案例,激发学生学习兴趣。

④深化考核方式改革,教学评价多元化^[2]。

通过使用超星学习平台,教师可以选择主题讨论、随堂练习和在线抢答等多种形式,配合线下的课后习题、实验过程随机提问和阶段性考试,来检测学生对章节知识点的掌握程度。期末考评时,综合考虑课堂表现、抢答/答题情况、实验操作、作业、试卷等。

实践环节:

①通过视频演示、案例展示、真实环境参观等帮助学生熟悉现网工程应用,让学生能够更多的将专业基础知识与实际应用相联系;

②采用项目教学法,结合仿真平台,进行设计性/综合性实验,鼓励学生多利用实验设备完成理论验证和创新实践,提高实践、创新能力;

③采用多维评价机制。注重过程考核,并结合项目作业评价等,综合评估学生的创造力和职业能力等。

2.1.1 理论环节

(1)精选课程内容(图 1),注重理论教学紧密联系实践,例如在讲授理论教学内容的光纤通信系统组成章节时,就应该与光纤熔接、光纤通信系统设计实验相对应,提醒学生掌握在实践应用中的知识要点;自编教材(图 2),引入工程项目案例,增加新技术的应用,并结合仿真平台进行实践教学,服务专业知识体系。

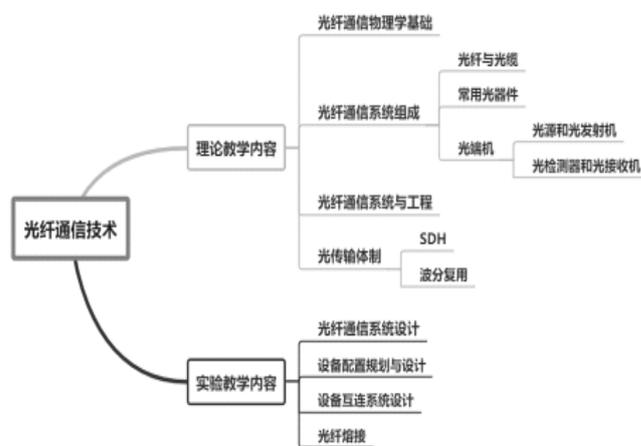


图 1 精选课程内容

Fig.1 Selected course content

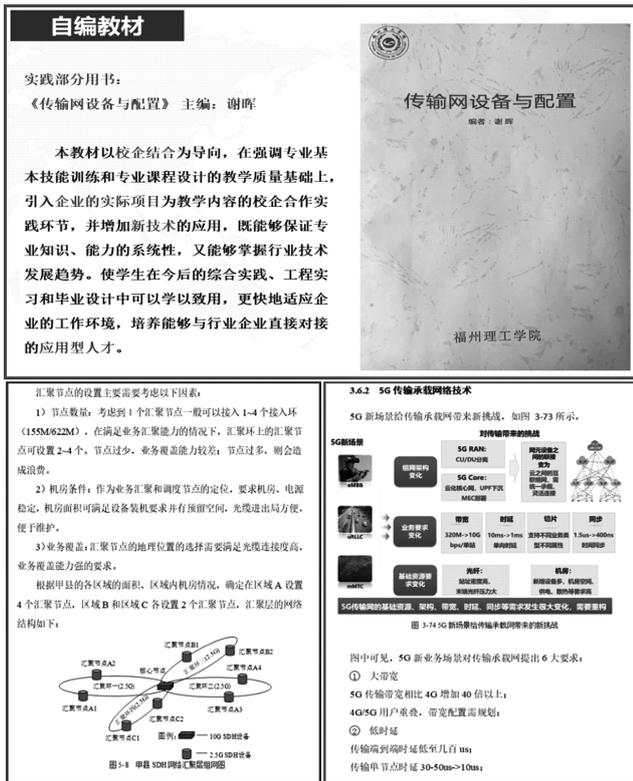


图 2 自编教材示意图

Fig.2 Schematic diagram of self-compiled teaching material

(2)结合超星平台,进行线上线下混合式教学(图 3)。



图 3 线上线下混合式教学:超星平台教学片段

Fig.3 Online and offline mixed teaching:

Teaching clip of Super Star platform

教师在超星平台中建设课程,教学活动包括:课前发布任务引导学生自主预习,课中通过随堂活动进行交互式研讨,课后发布习题作业帮助学生巩固提高等。

①课前线上发布分组任务(图 4),指导学生自主预习,激励学生自己提出问题,解决问题。教师通过线上数据了解学生学习中的疑难点。

②课中的线下课堂上,翻转课堂,学生演示预习

任务成果(图 5);教师通过随堂练习,分组任务等进行交互式讨论,并讲授课程前后内容的联系,承上启下;同时,教师通过线上平台的数据统计,针对学习中的疑难点进行讲解,注重理论和工程实践对应,最后归纳总结知识点。

③课后结合线上平台对分组任务的完成情况进行考核评价,采用教师评价(50%)+组内评价(30%)+组间评价(20%),注重过程考核。



图 4 课前线上发布分组预习任务示意图

Fig.4 Class front-line release group preview task schematic



图 5 课中-翻转课堂

Fig.5 Lesson-flip the classroom

(3)思政融入,帮助学生树立正确的三观。

世界观:通过介绍我国在光纤通信的研发历史和现状:从几十年前技术落后的进口国到目前世界产量第一、敷设里程第一的光纤通信大国的发展历程,华为等民族企业的崛起,增强学生将来投身国家光电信息产业建设的信心,培养学生的民族自豪感和

专业认同感^[3]。

职业观:通过影响传输稳定性的因素分析,说明光纤等有线介质的质量与制作工艺对传输的影响,引导学生在工作中要注意细节,树立规范操作意识,培养精益求精的工匠精神。

价值观:通过引入光纤通信发展史上的著名人物:“光纤之父”高锟、中国工程院院士赵梓森等科学家们,一生都在为光纤通信事业的发展做贡献的介绍,引导学生应以全心全意为人民为国家服务为价值取向。

(4)项目教学法

引入企业工程案例进行项目教学,利用思维导图进行课前教学设计,布置项目设计任务,指导学生自主学习。下图 6 以“光纤通信系统设计”项目为例。

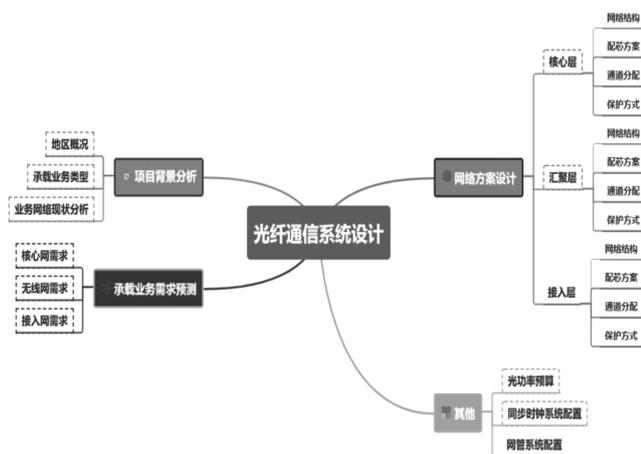


图 6 项目教学法思维导图

Fig.6 Project teaching method mind map

光纤通信系统设计的关键流程包含:项目背景分析、承载业务需求预测、网络方案设计和和其他因素考虑。引导学生分组讨论,分任务实施,让学生自主自发的完成每个步骤的具体任务,注重培养学生自主学习、判断与决策、团队协作、沟通、竞争意识、客观评价、可持续发展等综合素养。

2.1.2 实践环节

(1)校内实验环境:采用通信网络技术实验室真实设备(图 7)+上机设计+仿真平台(图 8)相结合。



图 7 通信网络技术实验室

Fig.7 Communication network technology laboratory

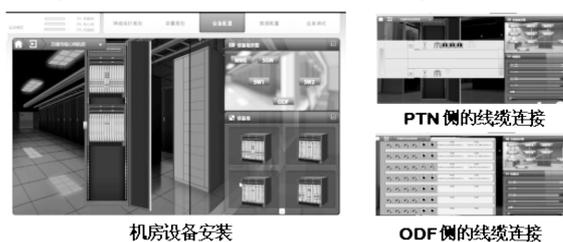


图 8 仿真平台

Fig.8 Simulation platform

学校对实验室建设的大力支持,打造了贴近工程实践环境的通信网络技术实验室,而仿真平台通过 VR 技术,构建出虚拟环境,实现了学生与可交互式的虚拟实验设备进行直观、真实的互动,帮助学生更好体验真实工作中的工程设计、工程建设、测试和维护等环境。

(2)校外实践环境:国脉科技实践教学基地(图 9),成立于 2016 年,配有培训教室、实验室、学生宿舍、室内活动室等设施。可以帮助学生更好地开展后续实践课程,或者进行毕业实习、毕业设计等,有效推进深度产教融合地开展。



图 9 校外实践教学基地

Fig.9 Practice teaching base outside the school

2.2 课程与科研结合

将学术研究、科技发展前沿成果引入课堂,鼓励学生积极参与。图 10 为学生参与科研情况(部分)。



说明: 红框中为参与科研项目的学生

图 10 学生参与科研情况

Fig.10 Students' participation in scientific research

2.3 教学研讨

(1)采用“线上线下”教学研讨机制,线下聘请企业工程师到学校,对教师进行新技术、新技能、新经验培训指导和现场课题研究指导,同时结合线上交流的方式,克服工程师不方便经常到校等情况,促进深度产教融合;

(2)定期开展教改研讨交流会,进行教学教改经验交流。教研室集体备课,从生活中、工程中挖掘与理论对应的实际案例。

3 创新成效

(1)校内督导评价

校内督导组对课程教学改革实践效果评价普遍较高,认为授课教师具有较高的教学水平,教学态度端正,备课充分,讲课熟练,课堂效果好。

(2)同行评价

其他专业课程教师反馈:学生学习完光纤通信技术这门课程,能够了解专业课程之间的联系,并通过对这门课程中学习方式的改变,带动了对其他专业课程的学习热情,积极促进了其他课程教学的开展。

实习单位好评:光传输岗位实习生实践能力较强,职业素养优秀。

(3)学生反馈

经过光纤通信技术课程的学习,能够将所学专业知知识应用到实践中。

在传统课程的“平时+期末”单一的考核方式下,只有少数学生能够脱颖而出。本课程采用多元化的考核方式,能够更加全面地反映出学习过程中的知识获取和能力提升情况,展现出综合素质。

通过经过一系列教学改革创新,本课程教学质量显著提升,如图 11 所示学习光纤通信技术课程的学生从 2017 级开始,四个年级的成绩优良率逐年增加、不及格率逐年递减,至刚结束授课的 2020 级,优良率超过了一半,不及格率仅有 3%左右。

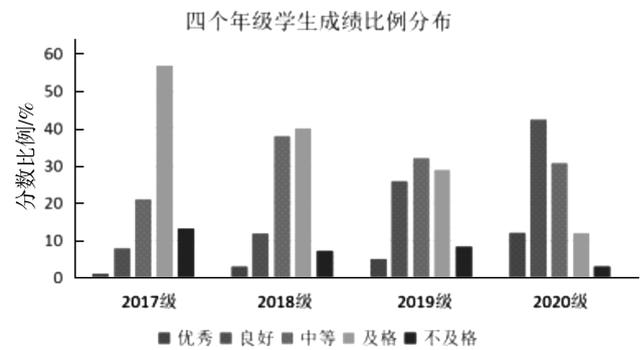


图 11 四个年级学生成绩分布对比图

Fig.11 Comparison of the distribution of students' scores in four grades

另外,在项目化教学的引领和教师的鼓励下,学生参加学科竞赛和社会实践已成常态化(图 12)。



图 12 学生参加社会实践和学科竞赛情况

Fig.12 Students' participation in social practice and subject competition

学生踊跃参加全国大学生新一代信息通信技术大赛、全国大学生现代通信网络部署与优化设计大赛、创新创业大赛等学科竞赛,获奖情况:获得国家二级奖 2 项、国家三级奖 4 项、省级一等奖 5 项、省级二等奖 5 项、省级三等奖 6 项等。

学生参加社会实践情况:近三年累计已有 199 名学生在国脉科技集团完成了生产实践,113 名同学完成了企业项目毕业设计,45 名同学在国脉科技、慧翰微电子就业,形成并实现了“从学校到企业无缝对接”的深度产教融合。

在院系领导的重视和学院组织下,本课程通过开设公开课、课程组集体备课以及主讲教师参加教学竞赛等形式进行推广,目前推广范围定位在我校各工科专业,获得了同行的一致认可。

4 教学改革创新总结

“光纤通信技术”课程的混合式教学创新与改革主要表现在以下五个方面:

(1)教学理念改革:以学生为中心,采用 OBE,以学习产出驱动整个课程活动。从双师视角考虑如何培养学生的职业能力。从企业技术骨干培养视角,注重学生就业所需技能培养。

(2)课程内容创新:精选课程内容,自编教材,服务专业知识体系;注重思政融入,树立正确三观。

(3)教学方法改革:线上线下混合式教学,启发引导,翻转课程,激发学生对知识的兴趣和探索;课程与

科研结合,鼓励学生参与,提升创新的能力。

(4)实践环节创新:项目化教学,以任务驱动式为主,真实设备环境+上机设计+仿真平台相结合,推进校企合作。

(5)考核方式创新:采用多维评价机制。注重过程考核,并结合项目作业评价等,综合评估学生的创造力和职业能力等。

参考文献:

- [1] 王超,林凯,曹苏群.高速光通信背景下光纤通信教学改革探索[J].光源与照明,2022(7):64-66.
- [2] 肖华,肖秀春,任肖丽,等.“光纤通信”课程中课堂教学评价指标改革研究[J].工业和信息化教育,2023(8):64-68,81.
- [3] 赵利国,吕治国,魏玉贤,等.高校思政课程实践模式改革研究:以光纤通信教学为例[J].科学咨询(教育科研),2022(6):39-42.
- [4] 杨彦甫,张霆廷,李苑青.面向课程群建设的“光纤通信”教学方法探索[J].电气电子教学学报,2022,44(5):72-74.
- [5] 张守叶.现代产业学院模式下“光纤通信”课程教学改革与探索[J].中国新通信,2022,24(16):27-29.
- [6] 刘原华.“光纤通信技术”课程思政建设研究[J].电脑知识与技术,2022,18(11):154-155.

Innovative Practice of Hybrid Teaching of "Optical Fiber Communication Technology" Courses in Application-Oriented Universities

XIE Hui

(Fuzhou Institute of Technology, Fuzhou, Fujian 350506)

Abstract: "Education Model Based on Learning Output" is the core concept in the teaching process of "Optical Fiber Communication Technology", which focuses on the cultivation of skills required for students' employment from the perspective of enterprise technical backbone training, and drives the entire curriculum activities with learning output. In order to cope with the challenges encountered in the teaching process, such as students' lack of professional identity, insufficient learning motivation, and difficulty in analyzing and solving application problems, and taking advantage of students' high interest in knowledge practice and engineering cases, it is proposed to adhere to the student-centered and cultivate "high-quality application-oriented talents" as the goal, through the selection of teaching content, self-compiled teaching materials, ideological and political integration, information technology, project-based teaching, multi-dimensional evaluation, etc. for course teaching innovation and practice. From the perspective of students' achievements, ability improvement, peer evaluation, supervision evaluation, and in-hospital promotion, the teaching reform has achieved remarkable results, which has reached the requirements of curriculum teaching goals and application-oriented talent training goals, and has the value of further promotion in similar universities.

Key words: optical fiber communication; learning outputs; hybrid; pedagogical innovation

(责任编辑:叶丽娜)

JOURNAL OF WUYI UNIVERSITY

No.6 Vol.43, Jun. 2024

- Approximation Properties of Schurer Type q -Phillips Operators REN Meiyong(1)
- The Hom-Lie Superalgebra Structure on the Super Heisenberg-Virasoro Algebra
..... HUANG Zhongxian(7)
- Some Applications of Fourier Series YE Lixia, WANG Chuang(12)
- Correlation Analysis Between Leaf Traits and Crown Factors of *Osmanthus fragrans*, 'Pucheng Dan' Based on
Stepwise Regression DU Yunshuang, HU Jintao, CHEN Jia, WU Chengzhen, LI Jian(15)
- Preparation Characterization and Photocatalytic Activity of $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{La}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$
..... KANG Qiaomei, ZHENG Minfen(22)
- Analysis of Production Technology and Aroma Components of Raspberry Wine
..... LIAO Ting, LIU Yungang, FU Jinling(29)
- Analysis on the Structure and Function of Huiqing Bridge in Yong'an Gongchuan Town TU Ye(35)
- A Bridge Safety Fuzzy Evaluation Model Based on Game Theory and Harris Hawk Optimization Algorithm
..... YANG Yue, LI Yongchao, CHEN Xiaoguo, PEI Shibo(40)
- The Practice of Sponge City Technology in the Establishment of Water-Saving Universities
——Taking Fujian Forestry Vocational and Technical College as an Example XUE Xianghong(46)
- Simulation Modeling and Analysis of Ocean Transportation System under Sea Ice Condition
..... LIU Yanhui(51)
- A Regional Landscape Planning Method Based on Swarm Intelligence Optimization Algorithm
..... ZHOU Yun(58)
- A New RFS-RF Method for Local Nonlinear Model Identification
..... JIANG Yang, MA Yanqiu, CHEN Rong, LIU Jingliang, ZHANG Xiling(63)
- Detection of E-Commerce User Purchase Behavior Based on Support Vector Machine ZHOU Mi(70)
- Relationship Between Stress and Exercise Procrastination in College Students' Physical Fitness Test:
Self-Control Mediating WANG Weijie, SHAO Hua, HAO Sizhe(75)
- Application of Project-Based Teaching Method of Switching Power Supply Based on UC3842
..... ZHAO Yuchao, JIANG Tianhui(81)
- Teaching Reform and Practice of "New Energy Power Generation Technology" Course in the Field of
Engineering Education Accreditation ZHANG Chun(86)
- Teaching Practice on Robot Application Basics KAN Baoqiang(93)
- Application of Experiential Teaching in Food Chemistry Courses in Application-Oriented Undergraduate University
..... YU Lizhi, FAN Li, XU Xinli(98)
- Innovative Practice of Hybrid Teaching of "Optical Fiber Communication Technology" Courses in
Application-Oriented Universities XIE Hui(104)