

# 基于 PLC 数值处理模块的 PID 控制程序研究

邹丽梅

(武夷学院 机电工程学院, 福建 武夷山 354300)

**摘 要:** 为了方便测试先进 PID 控制算法, 依靠 PLC 数值处理模块, 设计完成增量 PID 控制器程序, 在 PLC 实验模拟对给定值的跟踪, 与仿真结果一致。分析程序实现过程, 证明浮点数值转换的重要性, 设计延时转换条件, 解决远程跳步影响数值处理的故障, 指出分析 PLC 程序扫描顺序是解决程序开发错误的有效方向。

**关键词:** PID; 数值处理算法; 浮点数赋值; PLC 程序; 远程跳步

**中图分类号:** TM332.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-2109(2014)05-0067-05

## 引言

PID 控制器是最早出现的反馈控制器类型, 因为其结构简单, 参数物理意义明确, 调整方便, 所以广泛应用于各种工业控制过程。据有关文献统计<sup>[1]</sup>, 工业控制器中的 PID 控制器占全部控制器用量的 90% 以上。随着控制理论技术的发展, 不断有文献提出基于标准 PID 算法的变型先进算法, 如积分分离算法、抗积分饱和算法、不完全微分算法等。多数文献仅进行仿真结果比较, 常忽略了算法在真实工业控制中的实践验证。

可编程控制器 PLC 是最具代表性的工业控制计算机, 其中三菱 PLC 较早进入我国国内市场, 常用型号 FX2N 机价格适中, 支持 16-256 个输入输出点, 拥有整数与浮点运算等全面的功能指令, 用户基础宽, 在工业控制领域有一定代表性。三菱 PLC 自带 PID 控制指令, 集成了前馈滤波与抗积分饱和算法, 运算过

程对用户封闭。针对特定浮点数输入输出控制对象, 或者必须对 PID 参数单独控制的过程, 自行编程实现 PLC 的 PID 控制器程序是唯一选择。

## 1 数字 PID 控制原理与算法<sup>[2]</sup>

PID 控制是基于比例(P)、积分(I)与微分(D)三个参数的负反馈控制, 将输出误差作为 PID 控制器输入, 经过控制器运算获得控制输出量。其控制器运算数学表达式为:

$$\text{error}(t) = \text{rin}(t) - \text{yout}(t) \quad (1)$$

$$u(t) = k_p \left[ \text{error}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \text{error}(t) dt + \frac{T_d d\text{error}(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

式 1、2 中,  $\text{error}(t)$  为控制偏差值,  $\text{rin}(t)$  为系统输出目标值,  $\text{yout}(t)$  为实际系统输出值,  $u(t)$  为 PID 控制输出值,  $k_p$  为比例参数,  $T_i$  为积分时间参数,  $T_d$  为微分时间参数。

PID 控制数学表达式用计算机实现需要离散化, 式 2 经过离散可获得离散 PID 表达式:

$$u(k) = k_p \left[ \text{error}(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k \text{error}(j) + \frac{T_d}{T} (\text{error}(k) - \text{error}(k-1)) \right] \quad (3)$$

式 3 中,  $T$  为采样周期,  $k$  为采样时间序号,  $k=1, 2, 3$

收稿日期: 2013-10-07

基金项目: 武夷学院青年教师专项科研基金(项目编号: XQ201017)。

作者简介: 邹丽梅(1982-), 女, 汉族, 讲师, 主要研究方向: 机械设计与制造。

...,  $error(k)$  与  $error(k-1)$  分别为第  $k$  时刻和第  $(k-1)$  时刻计算获得的控制偏差值。

离散 PID 表达式计算出的  $u(k)$  为  $k$  时刻 PID 输出的控制全值, 对应执行机构实际位置偏差, 因此该算法也称为全量 PID 控制算法。工业控制上更多采用增量式 PID 控制算法, 其实质是通过  $u(k)$  递推出  $u(k-1)$  求控制增量  $\Delta u(k)$ :

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= k_p(error(k) - error(k-1)) + k_i error(k) + \\ &= k_d(error(k) - 2error(k-1) + error(k-2))\end{aligned}\quad (4)$$

式中,  $k_i = \frac{k_p}{T_i}$ ,  $k_d = k_p T_d$ ,  $k$  为采样时间序号,  $k=1, 2, 3$

...,  $error(k)$ 、 $error(k-1)$  与  $error(k-2)$  分别为第  $k$  时刻、第  $(k-1)$  时刻与第  $(k-2)$  时刻计算获得的控制偏差值。

控制增量  $\Delta u(k)$  的计算仅需要  $k$  时刻及之前的两个时刻偏差, 易于实现计算机编程。且可直接用于增量控制的输出, 如步进电机位置控制。需要全量输出  $u(k)$  也可通过计算  $\Delta u(k) + u(k-1)$  获得, 相对全量控制有更多优势, 是本文控制程序要实现的算法目标。

## 2 PLC 数值处理模块结构程序

工业控制 PLC 程序的模块化优势明显, 模块程序基本不用修改就可以实现复用, 易于项目设计分工, 易于调试, 缩短项目周期, 是工业控制程序设计的趋势<sup>[9]</sup>。数值处理在 PLC 梯形图中以指令形式逐条实现, 如不能模块化, 梯形图数值处理程序没有复用的可能。PLC 数值处理模块程序的实现首先设计顺序功能图 SFC 模块化结构, 然后采用数值分析算法处理算式, 最终在子模块序列完成数值处理程序模块设计。

### 2.1 三菱 PLC 顺序功能图 SFC 模块结构

三菱 PLC 步进指令的作用是将顺序功能图分步转换成 PLC 可以直接执行的梯形图, 每一步的程序可自成体系, 除了并行序列, 不同步之间输入输出可以重复, 可利用步进指令建立模块化程序架构。三菱 FX2N-48MT PLC 在三菱 GX Developer Version 8.86Q 综合设计环境完成模块化程序顺序功能图 SFC 结构

设计如图 1 所示。

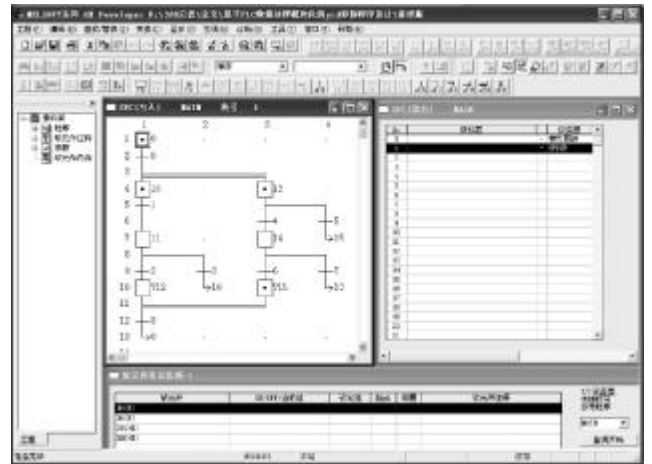


图 1 模块化程序 SFC 结构设计图

Fig.1 Modular program SFC structural design drawing

如图 1 可见程序完整结构分为梯形图块 0 与 SFC 块 1, 梯形图块 0 用于驱动 FSC 初始步 S0 线圈。SFC 图中, 初始步 0 设置初始化程序。并行序列下分为步 10-11-12 以及步 13-14-15 两类序列, 步 10-11-12 序列用于自动控制程序编写, 10 步为待命步, 11 步为工作动作步, 经过跳转条件 3 可返回自动程序待命步 10。13 步为子模块待命步, 跳转条件 4 为子模块启动条件, 14 步为子模块动作步, 跳转条件 7 为子模块动作完成条件, 动作完成后跳转回 13 步待命下次调用。数值处理模块可设置在 13 步初始化参数, 14 步执行数值处理。带问号的 12 步与 15 步为空步, 用于需要急停时返回停止。三菱 PLC 顺序功能图分支有 16 列的限制, 因此可配置 8 个序列, 适应更多工业控制需求程序块。

### 2.2 数值处理原理及流程

针对 PLC 每一个指令完成一步运算的原始处理形式, 模块化数值处理的关键在于“计算表达式”的输入以及分析。将“计算表达式”前缀化将简化表达式在计算机内存中的表示。前缀表达式仅有运算符和操作数, 可用 PLC 数据寄存器地址区别两者, 若预定义运算符和操作数的编码如表 1 所示, 式 4 就可转换为数值编码 999,999;997,044,026;997,046,020;997,048,028。从右至左每三个数(按分号隔离)存储在 PLC32 位数据寄存器中, 完成“计算表达式”输入。

表 1 运算符与操作数地址编码

Tab.1 The address code of operator and operand

运算符与操作数	地址编码	运算符与操作数	地址编码
加	D999	减	D998
乘	D997	$\Delta u(k)$	D8
$k_p$	D44	$error(k)-error(k-1)$	D26
$k_i$	D46	$error(k)$	D20
$k_d$	D48	$error(k)-2error(k-1)+error(k-2)$	D28

数值处理模块在步 14 设置如图 2 的分析计算流程,先通过求余运算逐个分离表达式中的运算符和操作数,判断是运算符则调用运算指令,判断为操作数地址则取地址中的数值进栈,循环运算直至算式数据寄存器最高为零结束,便可获得计算结果。

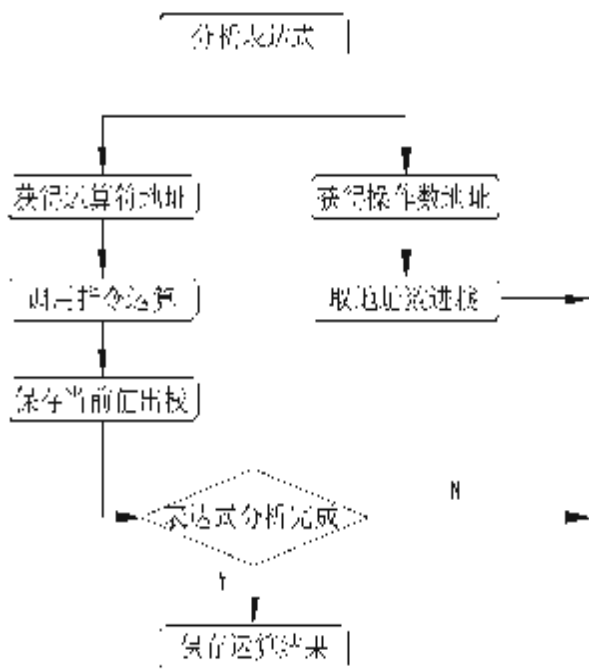


图 2 数值处理流程

Fig.2 Numerical processing

### 3 增量 PID 控制 PLC 编程实现

#### 3.1 增量 PID 控制程序流程

设计增量 PID 控制程序流程如图 3 所示,该流程在 SFC 图步 10-11-12 序列实现,步 10 赋初值,步 11

实现控制循环。

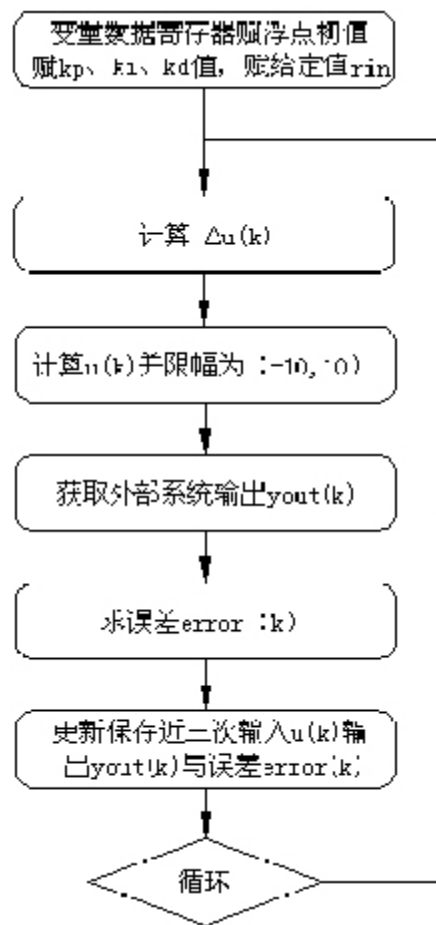


图 3 增量 PID 控制程序流程

Fig.3 The program flow of incremental PID control

#### 3.2 数值处理模块调用与编程难点的实现

PID 控制的增量  $\Delta u(k)$  的计算式较为复杂,根据式 4 求得的数值编码进行数值处理模块调用。PLC 的工作方式是逐行扫描程序,循环反复,简单的数值计算可作为控制过程的一部分,直接编写在程序中反复执行。当数值计算作为控制的主要过程,需分步骤完成时,与扫描工作方式就有冲突,实现此类控制程序的最优方式就是人为分步,按顺序控制的方式逐步执行。增量 PID 控制程序流程设计分为四步:1、M10 计算  $\Delta u(k)$ ;2、M11 计算  $u(k)$  并限幅为  $[-10, 10]$ ;3、M12 获取外部系统输出  $yout(k)$ ;4、M13 求误差  $error(k)$  与更新保存近三次输入输出和误差。M10-M13 为循环的顺序控制步号。

实际工业应用中,外部执行系统应响应 PID 控制输出值  $u(k)$ ,由 PLC 采集响应系统输出  $yout(k)$  进入

PID 控制循环。为了模拟验证控制过程的正确性,在第三步 M12 获取外部系统输出  $y_{out}(k)$  时,通过外部系统的差分方程近似模拟系统输出  $y_{out}(k)$ ,差分方程结果的计算也可应用数值处理模块调用。

因此该 PID 控制模拟程序的难点在于 SFC 图中步 11 每次增量 PID 控制程序循环需要执行两次步 13-14-15 序列的远程跳步。实验验证过程还发现,浮点数的赋值与转换运算将影响运算结果的正确性,也是影响 PLC 运算过程的关键。

### 3.2.1 浮点数的赋值与转换运算

三菱 PLC 数据采用二进制补码的形式存储和进行四则运算。数据支持二进制数、BCD 码、二进制浮点数、十进制浮点数;运算指令支持整数运算、二进制浮点数运算和十进制浮点数运算。三菱 PLC 没有浮点数的传送赋值指令,一般通过浮点数乘除法指令对数据寄存器赋浮点数初值。

三菱 PLC 提供了数据存储格式的转换指令,如 BCD 码转换指令 BCD、二进制码转换指令 BIN、求补码指令 NEG、二进制整数转二进制浮点指令 FLT、二进制浮点数转二进制整数 INT 以及基于浮点数的二进制与十进制互转指令。浮点数运算指令支持直接将整数化为浮点数处理,如指令表语句 EDIV K1234 K1000 D0 运算后 D0 可获得正确结果 1.234。但是未转换的数据寄存器直接进行浮点运算则会算出错误结果,如图 4 程序所示,输入 X0 接通时,D0 和 D2 的 32 位浮点数加法运算结果 D4 应为 10.0,但 PLC 执行运算后 D4 监视结果是 0,这个问题在大量数值处理过程很难发现。证明运算之前必须 FLT 转换用到的非零数据寄存器,才能保证运算结果正确性。

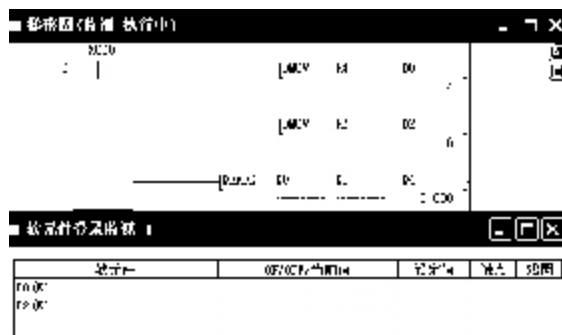


图 4 浮点数指令运算例程结果监视

Fig.4 The monitoring results of floating point instruction operation routine

### 3.2.2 顺序功能图远程跳步的实现

SFC 图中步 11 每次增量 PID 控制程序循环需要执行两次 SFC 图中步 13-14-15 序列,实质为顺序功能图 SFC 远程跳步。但是 PLC 内存编排图 1 中 SFC 图的梯形图程序,是按照从上至下由交替并行步的方式编排扫描顺序。这种顺序对于一般并行工作步的扫描有利,可是在数值运算过程中,仔细分析可发现 S14 步计算出结果后,要在第二个扫描周期才能完成 S11 步存储运算结果,然后在第三个扫描周期才能完成 S14 步到 S13 步的回跳。当 S11 步需要顺序执行两个以上的数值运算调用时,运算之间的扫描间隔与 3 个扫描周期数量级相差过大,将影响到 S14 步到 S13 步的复位回跳,使运算结果错误。

根据 PLC 扫描程序的原理与程序顺序,考虑设计改变编排扫描顺序或者增加 S11 步内两次数值运算的暂停时间两种方案应对。通过强制更改程序扫描顺序为,期望 S14 计算出结果后能在第二个扫描周期完成回跳,但实验证明该方法并不可行。最后通过在 S11 步流程中的 M11 与 M13 两个跳转条件增设定时输出 M8012 的上升沿检测触点,强制要求运算完成每 0.1 秒才能执行顺序跳转,这个时间约等于一个扫描周期,实验证明运算流程能正确执行,部分关键程序如图 5 所示,程序中为 M10 至 M13 的顺序控制跳转,M11 与 M13 前跳转条件增加 M8012 上升沿检测触点,强制暂停至下个扫描周期跳转。



图 5 使用 M8012 强制跳步暂停

Fig.5 Using M8012 to force jump pause



### 3.3 程序测试与分析

PLC 的浮点运算结果有 7 位有效数字,且采用二进制数的形式存储运算,因此运算结果会因为四舍五入的关系与 MATLAB 的 64 位仿真运算结果有精度的微小差异。运算数值结果通过 MATLAB 仿真输出图形如图 6 所示,实验及仿真证明程序可实现由 PLC 完成对给定值  $r_{in}$  为 1 的增量式 PID 控制跟踪响应。

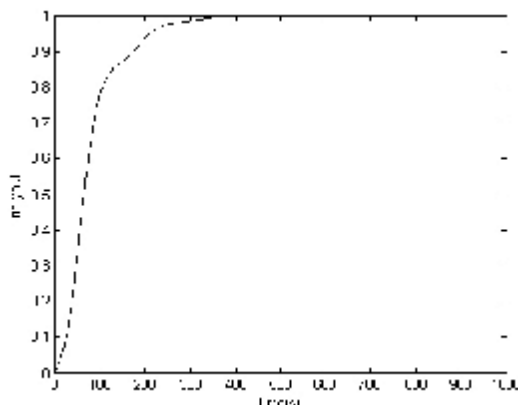


图 6 增量 PID 控制输出结果仿真

Fig.6 The output results of incremental PID control simulation

## 4 结论

增量 PID 控制程序在 PLC 的 SFC 模块化程序中

实现,使先进 PID 控制算法可以通过修改式 4,输入新的数值编码即可实现,研究本身就具有一定现实意义。文章还分析了顺序功能图 SFC 的扫描顺序,说明远程跳步引起的数值处理错误原因,实验证明设置延时转换条件是处理此类问题的较好方法。因此通过分析 PLC 扫描工作过程,可从根源上排除编程过程的一些错误,这个思路在 PLC 的程序开发是有效的。

### 参考文献:

- [1] Astrom K J, Haggund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning[M]. Instrument Society of America, 1995.
- [2] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 郭波, 邹丽梅. 基于步进指令的三菱 PLC 模块化程序设计[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2013(05): 26-30.
- [4] 三菱公司. FX1S, FX1N, FX2N, FX2NC 系列编程手册基本指令, 步进梯形图指令, 应用指令说明书[S].
- [5] 宋伯生. PLC 编程实用指南[M]. 北京: 机械工业出版社出版社, 2006.
- [6] 王京, 龚秋兰. PLC 的 PID 控制器在 MPS 自动化控制系统中的应用[J]. 液压与气动, 2012(12): 101-103.

## A Study of PID Control Program Based on PLC Numerical Processing Module

ZOU Limei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300)

**Abstract:** Incremental PID controller program based on PLC numerical value treatment module is designed for testing PID control algorithm, simulation results are consistent with the tracking simulating pair of given value in PLC experiment. Analysis program implementation process, demonstrate the importance of converting floating point value, delay the transition condition design is given to solve the remote jump influence on numerical processing, points out that the analysis of PLC program is an effective direction to solve the programming error in the scanning sequence.

**Key words:** PID; numerical processing algorithm; modularization programming; PLC Program; remote jump