

# 数字 PD 控制算法的研究

历风满\*

(辽宁大学 信息学院, 辽宁 沈阳 110036)

**摘 要:**在阐述数字 PD 控制原理的基础上,对数字 PD 控制算法进行了详尽地分析和研究,得出了位置式 PD 和增量式 PD 两种控制算法的优缺点.

**关键词:**PD 控制算法; 控制系统; 偏差; 调节器.

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5846(2005)04-0367-04

数字 PD 调节是连续系统控制中广泛应用的一种控制方法. 由于它结构改变灵活, 所以, 可根据系统的要求, 在常规 PD 调节的基础上进行多种 PD 变型控制, 如 PI PD 控制, 比例 PD 控制, 不完全微分控制, 带死区的 PD 控制等等. 特别是 PD 控制不需控制对象的精确的数学模型, 这对大多数很难得到或根本得不到精确的数学模型的工业控制对象来说, 无疑更适合应用 PD 控制. 因此, PD 控制技术在工业过程控制中应用的非常广泛.

数字 PD 控制系统是时间的离散系统, 计算机对生产过程的控制是断续的过程. 即在每一个采样周期内, 传感器将所测数据转换成统一的标准信号后输入给调节器, 在调节器中与设定值进行比较得出偏差值, 经 PD 运算得出本次的控制量, 输出到执行器后才完成了本次的调节任务. 在 PD 调节中, 由于 PD 算式选择的不同会得到不同的控制效果, 特别是当算法中某些参数选择的不妥时, 会引起控制系统的超调或振荡, 这对某些生产过程是十分有害的. 为了避免这种有害现象的发生, 分析和研究 PD 算法, 确定合理的 PD 参数是必要的, 同时对 PD 控制技术的广泛应用具有重要的意义.

## 1 数字 PD 控制原理

PD 调节器由比例调节器 (P), 积分调节器 (I) 和微分调节器 (D) 构成, 它通过对偏差值的比例、积分和微分运算后, 用计算所得的控制量来控制被控对象<sup>[1,2]</sup>. 图 1 所示为 PD 控制系统框图.

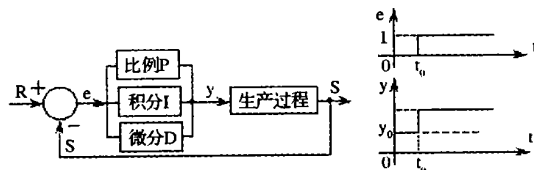


图 1 PID 控制系统框图

图 2 比例调节器输入与输出的关系

图中: R—设定的期望值, y—控制变量

S—实际输出值, e—控制偏差 ( $e = R - S$ )

PD 调节器按其调节规律可分为比例调节、比例积分调节和比例积分微分调节等. 下面分别来阐述它们的各自的调节作用.

### 1.1 比例调节 (P)

比例调节是数字控制中最简单的一种调节方法. 其特点是调节器的输出与控制偏差 e 成线性比例关系, 控制规律为:

$$y = K_p * e + y_0 \quad (1)$$

\* 作者简介: 历风满 (1960-), 男, 辽宁新民市人, 辽宁大学副教授, 从事电子科学研究.

收稿日期: 2004-12-15

式中:  $K_p$ —比例系数,  $y_0$ —偏差  $e$  为零时调节器的输出值. 图 2 为比例调节器输入与输出的关系图.

当输出值  $S$  与设定的期望值  $R$  间产生偏差时, 比例调节器会自动调节控制变量  $y$  (如为控制阀门的开度) 的大小. 控制变量  $y$  的大小会朝着减小偏差  $e$  的方向变化. 比例系数  $K_p$  的大小决定了比例调节器调节的快慢程度,  $K_p$  大调节器调节的速度快, 但  $K_p$  过大会使控制系统出现超调或振荡现象.  $K_p$  小调节器调节的速度慢, 但  $K_p$  过小又起不到调节作用. 另外, 虽然比例调节器控制规律简单, 控制参数易于整定, 但缺点是它只能在一种负载情况下实现无静差值的调节, 当负载变化时, 除非重新调整相应的  $y_0$  值的大小, 否则控制系统将会产生无法消除的静差值.

### 1.2 比例积分调节

比例调节器的主要缺点是存在无法消除的静差值, 影响了调节精度. 为了消除静差值, 在比例调节器的基础上并入一个积分调节器构成比例积分调节器, 其调节规律可用下列 (2) 式表示.

$$y = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt \right) + y_0 \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为积分常数, 它的物理意义是当调节器积分调节作用与比例调节作用的输出相等时所需的调节时间称为积分常数. 积分常数  $T_i$  的大小决定了积分作用强弱程度,  $T_i$  选择的越小, 积分的调节作用越强, 但系统振荡的衰减速度越慢. 当  $T_i$  过小时, 甚至会造成系统的持续振荡, 使调节器的输出波动不定, 给生产过程带来严重的危害. 相反地当  $T_i$  选择的越大, 积分的调节作用越弱, 虽然过渡过程中不容易出现振荡现象, 但消除偏差  $e$  的时间却很长. 因此, 积分常数  $T_i$  大小的选择要得当, 根据一般的经验,  $T_i$  值的优选范围是: 对于压力调节  $T_i$  为 0.8 ~ 2.2 min, 对于温度调节  $T_i$  为 4.0 ~ 8.0 min. 由于积分调节对偏差有累积作用, 所以, 只要有偏差  $e$  存在积分的调节作用就会不断地增强, 直至消除比例调节器无法消除的静差值. 图 3 为 PI 调节器输入与输出的关系图.

### 1.3 比例积分微分调节

加入积分调节后, 虽可消除静差, 使控制系统静态特性得以改善, 但由于积分调节器输出值的大小是与偏差值  $e$  的持续时间成正比的, 这样就

会使系统消除静差的调节过程变慢, 由此带来的是系统的动态性能变差. 尤其是当积分常数  $T_i$  很大时, 情况更为严重. 另外, 当系统受到冲激式偏差冲击时, 由于偏差的变化率很大, 而 PI 调节器的调节速度又很慢, 这样势必会造成系统的振荡, 给生产过程带来很大的危害. 改善的方法是在比例积分调节的基础上再加入微分调节, 构成比例积分微分调节器 (PD). 其调节规律可用 (3) 式表示.

$$y = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + y_0 \quad (3)$$

式中:  $T_d$  为微分常数, 它的物理意义是当调节器微分调节作用与比例调节作用的输出相等时所需的调节时间称为微分常数.

图 4 为比例微分调节器 PD 的输入与输出的关系图. 加入微分调节后, 当偏差  $e$  瞬间波动过快时, 微分调节器会立即产生冲激式响应, 来抑制偏差的变化. 而且偏差变化越快, 微分调节的作用越大. 从而使系统更趋于稳定, 避免振荡现象的发生, 改善了系统的动态性能.

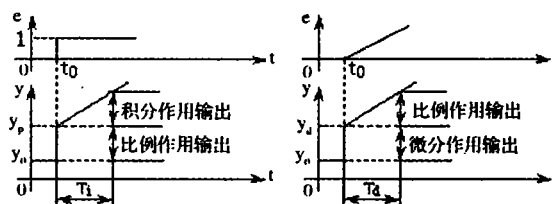


图 3 PI 调节器输入与输出的关系

图 4 PD 调节器的输入与输出的关系

## 2 PD 控制算法

单片机控制系统通过 A/D 电路检测输出值  $S$ , 并计算偏差  $e$  和控制变量  $y$ , 再经 D/A 转换后输出给执行机构, 从而实现缩小或消除输出偏差的目的, 使系统输出值  $S$  稳定在给定值区域内. 在计算机控制过程中, 整个计算过程采用的是数值计算方法, 当采样周期足够小时, 这种数值近似计算相当准确, 使离散的被控过程与连续过程相当接近. 图 5 为单片机闭环控制系统框图<sup>[3]</sup>.

PD 算法是将描述连续过程的微分方程转化为差分方程, 然后, 根据差分方程编制计算程序来进行控制计算的. 另外在 PD 控制中, 由于 PD 算

式选择的不同,最终所得到的控制效果是不同的。

下面进行PD控制算法的研究。

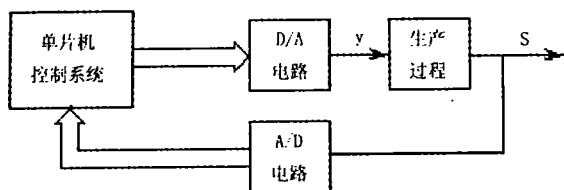


图5 单片机闭环控制系统框图

## 2.1 位置式PD的控制算法

如前所述PD调节的微分方程为:

$$y = K_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + y_0$$

将此微分方程写成对应的差分方程形式。

$$y_n = K_p \left( e_n + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^n e_k * T + T_d \left( \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \right) \right) + y_0 \quad (4)$$

$y_0$

式中:  $e_n$ —第  $n$  次采样周期内所获得的偏差信号

$e_{n-1}$ —第  $n-1$  次采样周期内所获得的偏差信号

$T$ —采样周期

$y_n$ —调节器第  $n$  次控制变量的输出

由于该PD算式直接计算出的是调节器的输出变量  $y_n$  而控制变量  $y_n$  所对应的又是阀门的控制位置,所以,将此算式称为位置式PD算式。

为了编写计算机程序的方便,现将算式(4)写成下列形式。

$$y_n = K_p e_n + K_a \sum_{k=0}^n e_k + K_b (e_n - e_{n-1}) + y_0 \quad (5)$$

$$\text{式中: } K_a = \frac{K_p * T}{T_i}, K_b = \frac{K_p * T_d}{T}$$

因为采样周期  $T$ 、积分常数  $T_i$  和微分常数  $T_d$  选定后皆为常数,因此  $K_a$  及  $K_b$  必为常数。当调整参数改善控制性能时,也只须调整  $K_p$ 、 $K_a$  和  $K_b$  的大小即可。图6为位置式PD控制算法的程序流程图。

## 2.2 增量式PD的控制算法

在位置式PD控制算法中,每次的输出与控制偏差  $e$  过去整个变化过程相关,这样由于偏差

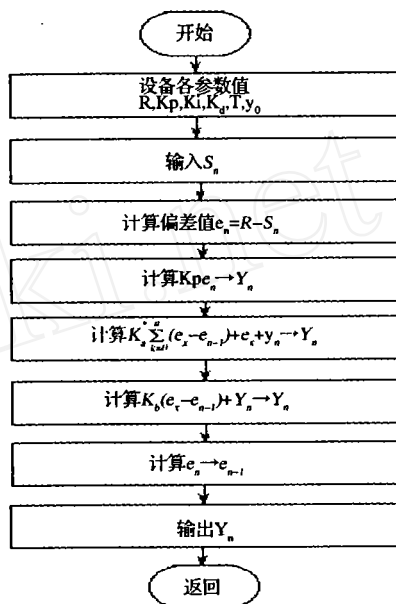


图6 位置式PD控制算法的程序流程图

的累加作用很容易产生较大的累积偏差,使控制系统出现不良的超调现象。下面来研究增量式PD的控制算法。由算式(4)可得:

$$y_{n-1} = K_p \left( e_{n-1} + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^{n-1} e_k * T + T_d \left( \frac{e_{n-1} - e_{n-2}}{T} \right) \right) + y_0 \quad (6)$$

用(4)式减去(6)式,可得增量式PD的算式。

$$y_n = K_p \left( (e_n - e_{n-1}) + \frac{T}{T_i} * e_n + \frac{T_d}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \right) \quad (7)$$

$$\text{其中: } y_n = y_n - y_{n-1} \quad (8)$$

为了编写程序方便,将(7)式改写成下列形式:

$$y_n = A * e_n + B * e_{n-1} + C * e_{n-2} \quad (9)$$

$$\text{式中: } A = K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$$

$$B = -K_p \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right)$$

$$C = K_p * \frac{T_d}{T}$$

从增量式PD的算式中可知,只要知道了现时以前的三次采样周期内的偏差信号  $e_n, e_{n-1}, e_{n-2}$  即可计算出本次采样周期内的控制变量  $y$  的增量

$y_n$

有些执行机构需要的不是控制变量的绝对值而是增量,这样增量式PD的算式恰好满足要求.即使执行机构需要的是控制变量的绝对值而不是增量,仍然可采用增量式PD算式进行计算,输出则采用位置式PD的输出形式,这样也使计算变得简单多了.其计算公式为:  $y_n = y_{n-1} + \Delta y_n$

可根据算式(9)画出增量式PD控制算法的程序流程图,如图7所示.

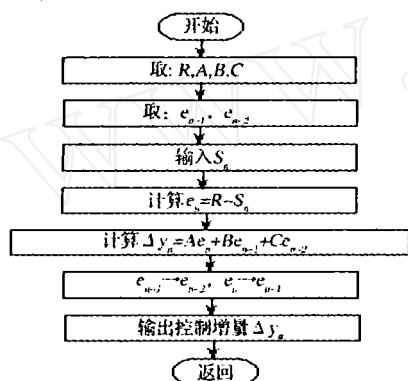


图7 增量式PD控制算法的程序流程图

### 3 结束语

通过以上对数字PD控制算法的分析与研究,可得出位置式PD算法和增量式PD算法的优缺点<sup>[4]</sup>如下:

1) 位置式PD算法每次输出都与控制偏差  $e$  过去整个变化过程相关,这样容易产生较大的累积偏差,特别是当计算机发生故障时,由于调节器是全量输出,控制变量  $y$  可能会发生大幅振荡,给生产带来严重危害.而在增量式PD算法中,由于计算机只输出控制变量的增量  $\Delta y_n$ ,发生故障时

只影响本次增量的大小,故影响较小.

2) 系统从手动切换到自动时,位置式PD算法需将调节器的输出置为  $Y_0$ ,这样才可能实现无冲击切换.而增量式PD算法中,由于公式中没有  $Y_0$  项,所以易于实现手动到自动的无冲击切换.

3) 位置式PD算法要求计算累加和  $(\sum e_k)$ ,故运算量大.而增量式PD算法不需计算累加和  $(\sum e_k)$ ,故运算量小.

4) 位置式PD算法中,由于差分公式中有对偏差的累加计算,所以,容易产生积分饱和现象,造成系统失控.而在增量式PD算法中,由于差分公式中不存在有对偏差的累加计算,所以,不会产生积分失控现象,避免了系统的超调和振荡现象的发生.但增量式PD算法有产生比例和微分失控现象的可能,使系统的动态性能变坏.

本文在详尽阐述数字PD控制原理的基础上,对数字PD的控制算法进行了详尽地分析和研究,为数字PD在实际控制工程中的广泛应用提供了有效的计算分析方法.

### 参考文献:

- [1] 金以慧,方崇智.过程控制[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [2] 何克忠,李伟.计算机控制系统[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 陈汝全,林水生.实用微机与单片机控制技术[M].成都:电子科技大学出版社,1993.
- [4] 焦尚仁.微机控制技术[M].北京:轻工业出版社,1988.

## The Research of Controlling Arithmetic for Figure PD

LI Fengman

(The College of Information Science and Technology, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** Based on the expatiation on control principle of the arithmetic figure PD, It analyzes and studies the PD control calculate way in detail, getting a merits and shortcomings of two kinds of controls calculate way that position type PD and increasing deal type PD.

**Key words:** the PD control calculate way; the controlling system; deviation; modulator

(责任编辑 郑绥乾)