

文章编号:1000-582X(2003)06-0125-04

纯滞后控制系统采样周期的选择

冯国良¹, 李太福², 钟秉翔¹, 刘玉成¹, 李膺¹

(1. 重庆工业高等专科学校 自动化系, 重庆 400050; 2. 重庆工学院 电子工程系, 重庆 400050)

摘要:工业控制中许多对象都具有纯滞后特征,对纯滞后系统的控制问题进行研究,具有理论意义和实际应用参考价值。在纯滞后系统中,由于对象存在纯滞后时间 τ ,因此常使人觉得,对这类系统的控制,采样周期选择为 τ 控制效果比较好,而一些文献也执此观点。为探讨纯滞后控制系统中采样周期的选择问题,用数字仿真方法,对选择不同采样周期的控制效果进行了计算,对采样周期的合理选择问题进行分析。数字仿真结果表明,对纯滞后控制系统,有关文献给出的采样周期 T 选择为纯滞后时间 τ 的结论是不合适的,其控制效果并不好。

关键词:复杂系统; 纯滞后; 控制; 采样周期
中图分类号:TP391

文献标识码:A

作为一类典型的复杂系统,纯滞后对象的控制问题历来受到关注,特别是在计算机用于采样控制系统之后。

计算机控制系统中,采样周期 T 是一个重要参数,它的选择将直接影响到系统的控制效果。当被控对象不存在纯滞后或纯滞后时间比较小时,在计算机字长足够的情况下,为取得好的控制效果采样周期应选得适当小些。对此,有文献把这种采样周期 T 取得足够小、离散控制与连续控制十分接近的情况称之为“准连续控制”。

然而,当对象存在比较明显的纯滞后时间 τ 时,由于控制作用不及时(控制量施加到被控对象后,被控参数的变化要经过一段时间 τ 才开始显现),将会给控制带来困难。对这种大纯滞后系统,采样周期 T 如何选择比较好?在发表的文献或出版的教材中,有人认为 T 应接近或等于 τ ^[1-3],一些工程技术人员也常有这样的看法,认为这时控制效果较好。总之,似乎纯滞后时间 τ 的出现改变了对 T 的选择原则。为检验选择 T 接近 τ 是否合理,笔者用自动控制系统的数字仿真方法,对纯滞后控制系统选择不同采样周期的控制效果进行了计算分析。

1 计算方法

纯滞后对象通常可描述为

$$W(S) = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_1 S + 1} \quad (1)$$

当 τ 与 T_1 相比,比较接近(例如 $\tau/T_1 \geq 0.5$)时,即可认为对象存在明显的纯滞后^[4]。

对纯滞后对象,采用PID调节(带纯滞后补偿)的控制系统框图如图1所示^[5]。当用计算机实现调节器(或同时实现补偿器)作用时,即组成计算机控制系统。

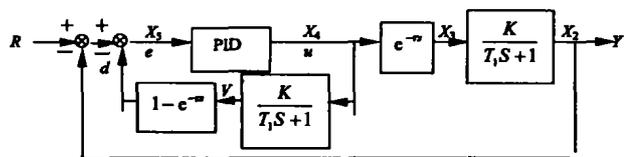


图1 纯滞后补偿控制原理图

对于存在明显纯滞后的对象,仅用单一的PID控制算法是难以取得满意效果的,数字仿真表明,这时比例系数、积分时间、微分时间无论怎么选,控制效果都不太理想;若再加上纯滞后补偿环节(由计算机另外再实施纯滞后补偿算法),控制性能即能得到明显改善。然而,无论是采用一般的PID控制算法或是纯滞后

• 收稿日期:2003-01-10

基金项目:重庆市教委科学技术研究资助项目(011002)

作者简介:冯国良(1947-),男,重庆人,重庆工业高等专科学校教授,硕士,主要从事计算机控制系统及技术方向的教学与科研工作。

补偿控制算法,其控制效果均与采样周期 T 有直接的关系。

对图中各项环节的计算或处理方法如下:

1) PID 环节

采用增量式 PID 控制算式

$$\Delta u(n) = K_p \{ [e(n) - e(n-1)] + \frac{T}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \} \quad (2)$$

2) 纯滞后对象的模拟

将纯滞后对象 $\frac{Ke^{-\tau s}}{T_1 S + 1}$ 分解为纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 和

一阶惯性环节 $\frac{K}{T_1 S + 1}$ 相串,分别用计算机进行模拟。

对纯滞后环节 $e^{-\tau s}$ 的模拟方法为:先取整 $D = \text{INT}(\tau/T)$,然后利用内存单元 $X(D+1)$ 到 $X(1)$ 的逐次移位来实现其延迟作用^[6]。

对一阶惯性环节 $\frac{K}{T_1 S + 1}$ 的模拟算式为(为计算方便,取 $K = 1$)

$$X_2(n) = \phi(L_1)X_2(n-1) + \phi_m(L_1)X_3(n-1) \quad (3)$$

其中 $\phi(L_1) = e^{-\frac{L_1}{T_1}}$, $\phi_m(L_1) = 1 - e^{-\frac{L_1}{T_1}}$
 式中 L_1 为对惯性环节的计算步距,为采样周期 T 的 $1/L_2$, L_2 越大,模拟效果越接近连续系统。

3) 纯滞后补偿环节

将补偿环节分解为 $\frac{K}{T_1 S + 1}$ 环节和 $1 - e^{-\tau s}$ 环节相串,它们的输出分别为 V 、 d ,分别用下面的补偿算式实现:

$$V(n) = (1 - \sigma)n(n-1) + \sigma V(n-1) \quad (4)$$

$$d(n) = V(n) - V(n-l) \quad (5)$$

其中 $\sigma = e^{-\frac{\tau}{T}}$,为计算引入的中间变量; $l = \text{INT}(\frac{\tau}{T})$,为纯滞后时间相对于采样周期 T 的整数倍数。

4) 偏差 e

采用纯滞后补偿算法时,偏差 e 为

$$X_5(n) = R - X_2(n) - d(n) \quad (6)$$

若仅用 PID 算法时,偏差 e 为

$$X_5(n) = R - X_2(n) \quad (7)$$

5) 目标函数

选取不同的采样周期 T 时,控制效果优劣的评判标准,是按照时间乘绝对误差 (ITAE) 准则

$$S = \int_0^t |e| dt \quad (8)$$

S 越小,则控制效果越好。

2 数字仿真程序框图

对纯滞后控制系统,当采用纯滞后补偿控制算法时,其数字仿真程序框图如图 2 所示。

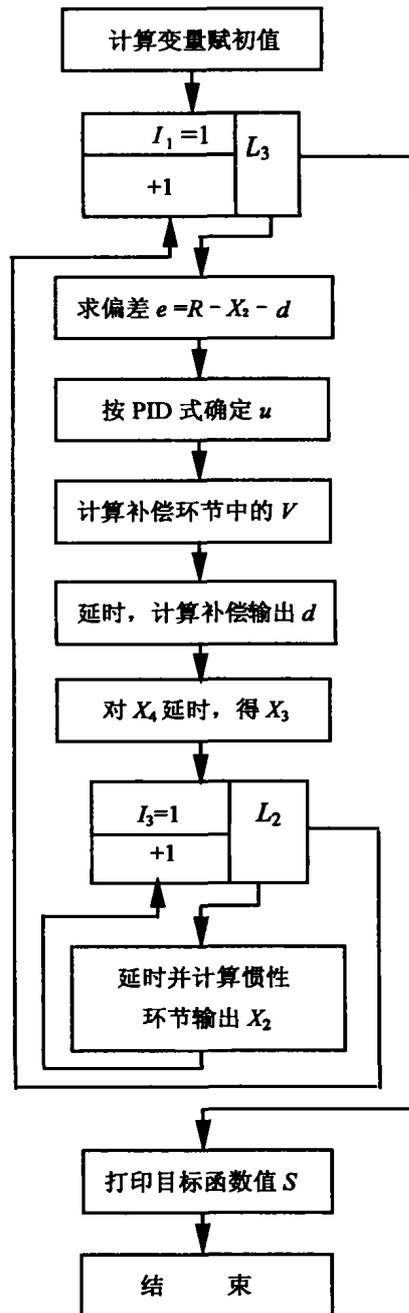


图 2 数字仿真程序框图

若仅用 PID 控制算法,则去掉“计算补偿环节中的 V ”及“延时,计算补偿输出 d ”两个处理框,并将求偏差 e 的式子改为式(7) 即可。

图 2, L_2 为采样周期 T 相对于惯性环节计算步距 L_1

的整倍数, L_3 倍的 T 即为对整个控制系统输出的考查时间, L_3 为对系统输出计算的迭代次数(以采样周期 T 为一个基本时间单位)。

3 仿真结果

下面按照图 2 拟制的数字仿真程序, 分别对 3 类纯滞后模型, 选择不同的采样周期, 用 PID 控制算法或纯滞后补偿控制算法进行控制, 并对控制效果进行计算分析。

计算中:

- 1) 系统输入给定 $R = 10$;
- 2) 仿真计算步距 $L_1 = 0.01 \text{ min}$, PID 控制参数为 $K_p = 1.5$, $T_i = 0.88 \text{ min}$, $T_d = 0.11 \text{ min}$;

表 1 模型 I 的目标函数值

控制方式	S								
	1.00 τ	0.75 τ	0.50 τ	0.25 τ	0.20 τ	0.10 τ	0.05 τ	0.02 τ	0.01 τ
PID 算法	20 753.68 (发散)	12 110.28 (发散)	10 457.68 (发散)	4 155.31 (发散)	2 861.368 (发散)	1 366.31 (发散)	901.14 (发散)	686.05 (收敛)	624.333 7 (收敛)
补偿算法	754 453.10 (发散)	383 027.20 (发散)	39 990.62 (发散)	10.15 (收敛)	4.23 (收敛)	3.17 (收敛)	3.65 (收敛)	3.96 (收敛)	3.63 (收敛)

$$\text{模型 II: } W(S) = \frac{e^{-1.0S}}{0.75S + 1}$$

$$\tau = 1.0 \text{ min}, T_1 = 0.75 \text{ min}$$

对控制系统的输出考察时间为 15 min。当采用不

3) 每个模型的纯滞后时间 τ 是固定的, 而采样周期 T 的选取考虑了 9 种情况 (T 分别取 $0.01\tau, 0.02\tau, \dots, 1.00\tau$)。

$$\text{模型 I } W(S) = \frac{e^{-1.0S}}{S + 1}$$

$$\tau = 1.0 \text{ min}, T_1 = 1 \text{ min}$$

对控制系统的输出考察时间为 15 min。当用 PID 控制算法或纯滞后补偿控制算法, 采用不同的采样周期 T 进行控制时, 所得的目标函数值 S (经在微机上进行计算的结果) 如表 1 所示。

表中的“发散”、“收敛”, 是指采用某一采样周期进行控制后系统的阶跃响应趋势。

同的采样周期 T 进行控制时, 所得的目标函数值 S 如表 2 所示。

表 2 模型 II 的目标函数值

控制方式	S								
	1.00 τ	0.75 τ	0.50 τ	0.25 τ	0.20 τ	0.10 τ	0.05 τ	0.02 τ	0.01 τ
PID 算法	38 481.63 (发散)	26 162.39 (发散)	24 744.07 (发散)	9 098.102 (发散)	6 863.785 (发散)	2 782.834 (发散)	1 730.084 (发散)	1 269.037 (发散)	1 136.929 (发散)
补偿算法	2 537 910 (发散)	2 901 183 (发散)	407 060.4 (发散)	28.101 68 (收敛)	11.813 26 (收敛)	3.342 604 (收敛)	3.087 161 (收敛)	3.137 562 (收敛)	3.168 728 (收敛)

$$\text{模型 III: } W(S) = \frac{e^{-2.0S}}{10S + 1}$$

$$\tau = 2.0 \text{ min}, T_1 = 10 \text{ min}$$

对控制系统的输出考察时间为 30 min。当采用不同

的采样周期 T 进行控制时, 所得的目标函数值经在微机上进行计算如表 3 所示。

表 3 模型 III 的目标函数值

控制方式	S								
	1.00 τ	0.75 τ	0.50 τ	0.25 τ	0.20 τ	0.10 τ	0.05 τ	0.02 τ	0.01 τ
PID 算法	40 708.67 (发散)	17 071.93 (发散)	20 181.97 (发散)	13 478.46 (发散)	12 415.65 (发散)	10 469.85 (发散)	9 878.809 (发散)	9 069.54 (发散)	8 904.03 (发散)
补偿算法	23 529.63 (发散)	3 022.22 (收敛)	948.16 (收敛)	443.12 (收敛)	417.07 (收敛)	381.05 (收敛)	368.95 (收敛)	363.08 (收敛)	361.51 (收敛)

4 结 论

由计算结果可看出:随着采样周期 T 的减少,目标函数 S 的值基本呈现逐渐减小的趋势。以目标函数值 S 的大小作为评判控制结果的基本依据,笔者认为:对纯滞后控制系统,无论是仅用 PID 算法,还是采用纯滞后补偿算法,采样周期取为等于或接近 τ 是不合适的,其效果并不令人满意(对 3 类模型所计算的 6 种情况,系统的输出无一收敛);从保证系统稳定性和取得较好的控制效果考虑,采样周期 T 的选择应如同系统不存在纯滞后或纯滞后比较小的情形一样,遵循宜小不宜大的原则;至于 T 小到何种程度为宜,要结合具体过程通道的执行速度、单个调节回路的成本、计算机的字长与精度等因素进行考虑。

参考文献:

- [1] 何克忠,李伟. 计算机控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [2] 李明学,周广兴,于海英,等. 计算机控制技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
- [3] 威雅各. 关于数字控制系统采样周期的分析和选择[J]. 电气传动,1987,(5):41-43.
- [4] 涂植英. 过程控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
- [5] 谢剑英. 微型计算机控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
- [6] 范鸣玉,张莹. 最优化技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,1982.

Sample Period's Choice Problem of Control System with Pure Delay

FENG Guo-liang¹, LI Tai-fu², ZHONG Bing-xiang¹, LIU Yu-cheng¹, LI Ying¹

(1. Chongqing Polytechnic College, Chongqing 400050, China;

2. Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: For the vast objects in industry control, the specific delay feature exists. It is valuable to study the control problem of the system with pure delay for control theory and control engineering. Because there is pure delay time τ in the object, so it is taken to be better choice that the sample period T is equal to pure delay time τ , and some literature persists in this opinion also. In order to study sample period's influence on the system, the author carried on calculation for this problem, using digital simulation method. The system's control effect caused by the choice of different sample period is calculated and analyzed, and the reasonable choice problem of sample period is discussed. The research result shows it is not suitable that the sample period T is chosen to be the system's pure delay time τ for the control system with pure delay.

Key words: complex system; pure delay; control; sample period

(编辑 张 苹)