

# 基于输入整形的时滞系统最小拍控制\*

钟庆昌 谢剑英

(上海交通大学自动化系 200030)

**摘 要** 基于 Nyquist 准则, 按照给定的相位稳定裕度设计 PI 控制器使一阶时滞对象稳定, 然后引入输入整形控制器对输入进行整形, 实现了一阶时滞对象的最小拍控制。在确定采样周期后, 整个控制系统的设计只需按相位稳定裕度的要求解析算出 PI 控制器的比例增益即可, 设计简单, 性能良好。仿真结果表明, 该方法相当有效, 实现的最小拍控制无纹波。

**关键词** 输入整形, 时滞控制, 时滞对象, 最小拍控制

**分类号** TP 273

## Input Shaping Technique Based Dead-beat Control of Process with Dead Time

Zhong Qingchang, Xie Jianying

(Shanghai Jiaotong University)

**Abstract** Input shaping technique is introduced to attain dead-beat control of process with dead time. The stability of the closed-loop system is guaranteed by the PI controller which is designed with Nyquist criterion, and the input shaping controller is employed to shape the command input to get dead-beat control. With selecting the only two parameters, the sampling period and the proportional gain which can be analytically computed according to the phase margin, the closed-loop system is designed easily. The simulation results show that the system output has no ripple.

**Key words** input shaping, time delay control, process with dead time, dead-beat control

## 1 引 言

空间站、挠性机器人等具有挠性机械环节的系统, 其阻尼往往很小, 在阶跃作用下, 系统表现出长时间的振动, 称为“残留颤抖”(Residual Vibration)。如何消除这种由于小阻尼而引起的残留颤抖, 许多学者对此进行了研究<sup>[1]</sup>。Tallman 和 Smith 提出一种 Posicast 方法<sup>[2]</sup>, 利用时滞环节将阶跃输入分成几个片段实施控制, 在最后一个片段加入控制后, 使各个片段引起的动态响应分量之和为零, 从而消除了残留颤抖。Singer 和 Seering 改进了这种方法的鲁棒性<sup>[3]</sup>, 提出一种输入整形控制器 (Shaped Input Controller)。这是一种前馈型的开环控制方法, 不需要输出测量环节, 设计简单, 实现容易, 控制效果也很好。

在过程控制领域, 一阶时滞对象作为最难控制也是最典型的对象, 一直成为控制工作者研究的主要对象之一。本文将输入整形控制思想应用到过程控制领域, 首先按照 Nyquist 准则设计具有一定稳定裕度的 PI 控制器以保证系统闭环稳定, 然后设计输入整形控制器来对闭环系统的极点, 从而实现了一阶时滞对象的最小拍控制。

## 2 基于 Nyquist 准则设计 PI 控制器

考虑一阶时滞对象

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

其中,  $K$  为静态增益,  $T$  为时间常数,  $\tau$  为纯滞后时间。基于输入整形实现最小拍控制的系统结构如图 1 所示。图中 ZOH 是零阶保持器, 反馈控制器  $C(z)$  为 PI 控制器, 前馈控制器为输入整形控制器  $C_B(z)$ , 取采样周期  $T_s$  使  $d = \tau/T_s$  为整数。

\* 1999-01-03 收稿, 1999-05-26 修回

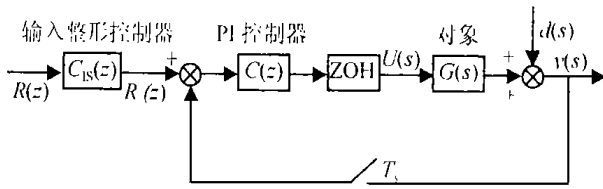


图 1 输入整形控制系统结构图

系统中插入零阶保持器 ZOH 以后, PI 控制器的对象为广义对象, 即

$$G(z) = Z \left[ \frac{1 - T_s s}{s} G(s) \right] = K \frac{1 - e^{-T_s/T}}{z - e^{-T_s/T} z^{-d}} \quad (2)$$

取 PI 控制器  $C(z)$  为

$$C(z) = K_P + \frac{\alpha K_P z}{z - 1} \quad (3)$$

为使其分子多项式  $K_P[(\alpha + 1)z - 1]$  对消掉广义对象  $G(z)$  的分母多项式, 要求

$$\alpha = e^{T_s/T} - 1 \quad (4)$$

这样, PI 控制器的待定参数只有一个, 即比例增益  $K_P$ 。

**定理 1**(闭环稳定条件) 由 PI 控制器(3) 和(4) 式以及对象(1) 组成的单位负反馈采样控制系统闭环稳定的充分条件是

$$0 < K_P < \frac{2}{K\alpha} \sin \frac{\pi}{4d + 2}$$

证明 PI 控制闭环系统的环路传递函数为

$$C(z)G(z) = \frac{\alpha K K_P}{z^d(z - 1)}$$

将  $z = e^{j\omega T_s} = e^{j\theta}$  代入, 有

$$C(j\theta)G(j\theta) = \frac{\alpha K K_P}{e^{jd\theta}(e^{j\theta} - 1)} = \frac{\alpha K K_P}{2\sin(\theta/2)} e^{-j(d\theta + \pi/2 + \theta/2)}$$

由此可知 Nyquist 曲线过点  $(-1, 0)$  的条件是

$$\begin{cases} d\theta + \pi/2 + \theta/2 = \pi \\ \frac{\alpha K K_P}{2\sin(\theta/2)} = 1 \end{cases}$$

这表明, 当  $K_P = \frac{2}{K\alpha} \sin \frac{\pi}{4d + 2}$  时, 闭环系统临界稳定。

当  $K_P > \frac{2}{K\alpha} \sin \frac{\pi}{4d + 2}$  时, 由于 Nyquist 曲线顺时针旋转包围原点, 必将使得 Nyquist 曲线包围点  $(-1, 0)$  的次数  $> 1$ , 根据 Nyquist 定理知, 闭环系统是不稳定的; 相反, 当  $0 < K_P < \frac{2}{K\alpha} \sin \frac{\pi}{4d + 2}$  时, Nyquist 曲线不会包围点  $(-1, 0)$ , 此时闭环系统稳定。(证毕)

为了获得合适的抗干扰能力及一定的稳定裕度, 可按相位稳定裕度  $\phi_m$  来选取增益  $K_P$ 。按照相位稳定裕度  $\phi_m$  的定义, 有

$$\begin{cases} d\theta + \pi/2 + \theta/2 = \pi - \phi_m \\ \frac{\alpha K K_P}{2\sin(\theta/2)} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

相位稳定裕度为  $\phi_m$  时, 可求出 PI 控制器的比例增益应为

$$K_P = \frac{2}{K\alpha} \sin \frac{\pi - 2\phi_m}{4d + 2} \quad (6)$$

工程中一般要求  $\phi_m = \pi/4$ , 若取  $\phi_m = \pi/3$ , 则

$$K_P = \frac{2}{K\alpha} \sin \frac{\pi}{12d + 6} = \frac{\pi}{K\alpha(6d + 3)}, \quad d = 1$$

这样, PI 控制系统的闭环传递函数为

$$G_{PI}(z) = \frac{C(z)G(z)}{1 + C(z)G(z)} = \frac{\alpha K K_P}{z^d(z - 1) + \alpha K K_P} = \frac{\alpha K K_P}{1 - z^{-1} + \alpha K K_P z^{-d-1} z^{-d-1}} \quad (7)$$

### 3 最小拍控制的输入整形实现

引入输入整形控制器<sup>[3-5]</sup>  $C_{IS}(z)$  为

$$C_{IS}(z) = \frac{1 - z^{-1} + \alpha K K_P z^{-d-1}}{\alpha K K_P} = \frac{1 - z^{-1}}{\alpha K K_P} + z^{-d-1} \quad (8)$$

它将阶跃输入  $r$  整形成  $d + 1$  个片段, 第一个片段的幅值为  $\frac{r}{\alpha K K_P}$ , 其后的  $d$  个片段均为 0,  $d + 1$  时刻以后保持原输入  $r$  不变, 如图 2 所示。最后一个片段作用以后, 系统输入  $r(t)$  与原输入  $r(t)$  完全一样, 充分体现了整形的含义。由于输入整形控制器的静态增益为 1, 因而不改变系统的无静差性。

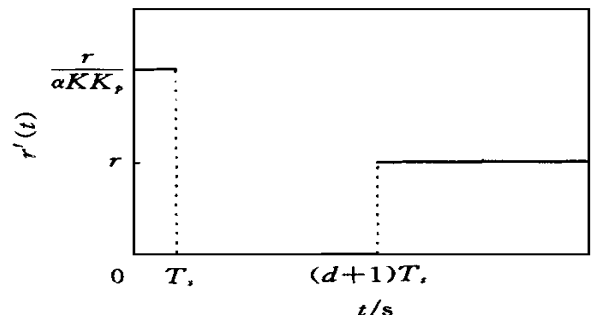


图 2 输入整形后的阶跃输入

为了获得合适的抗干扰能力及一定的稳定裕

整个系统的闭环传递函数为

$$G_B(z) = C_B(z)G_{PI}(z) = z^{-d-1} \quad (9)$$

显然,系统在经过  $d+1$  拍后输出完全跟随输入,实现了最小拍控制。

## 4 仿真结果

以大纯滞后对象  $G(s) = \frac{e^{-5s}}{s+1}$  为例,直接用 PD 控制难以得到较好的动态性能。采用本文方法,取采样周期  $T_s = 1s$ ,  $K_P = 0.07$ , 相位稳定裕度约为  $52^\circ$ 。闭环系统的单位阶跃响应曲线及对应的控制信号示于图 3。由图可见,输出在 6s 时达到稳态值,且没有出现纹波,控制信号  $u(t)$  的幅度也不大。

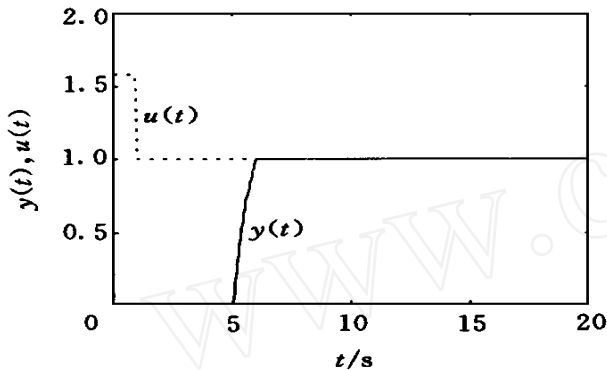


图3 控制信号及阶跃响应

## 5 结 语

本文首先基于 Nyquist 准则,按照给定的相位稳定裕度设计出 PI 控制器,使一阶时滞对象稳定;

然后引入输入整形控制器对输入进行整形,实现了一阶时滞对象的最小拍控制。在确定系统的采样周期后,该控制系统的设计只需确定一个可按相位稳定裕度解析计算的 PI 控制器比例增益,其它参数均可据此求出。该方法设计简单,并且十分有效。

## 参 考 文 献

- 1 Junkins J L, Turner J D. Optimal spacecraft rotational maneuvers Amsterdam: Elsevier, 1986
- 2 Tallan G H, Smith O J. Analog study of dead-beat posicast control IRE Trans on Automatic Control, 1958, March: 14- 21
- 3 Singer N C, Seering W P. Preshaping command inputs to reduce system vibrations ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1990, 112(1): 76- 82
- 4 Bodson M. Adaptive algorithm for the tuning of two input shaping methods Automatica, 1998, 34(6): 771- 776
- 5 Singhose W E, Crain E, Seering W P. Convolved and simultaneous two-mode input shapers IEE Proc Control Theory and Applications, 1997, 144(6): 515- 520

## 作 者 简 介

钟庆昌 男,1970年生。2000年在上海交通大学获博士学位,现为 Technion- Israel Institute of Technology 博士后研究人员。研究领域为计算机过程控制,运动控制,时滞控制,时滞系统等。

谢剑英 男,1940年生。1964年毕业于上海交通大学自动化系,现为该系教授,博士生导师。研究领域为复杂工业过程建模,控制与优化,网络工程与信息系统集成。

(上接第 229 页)

- 4 Willem s J C. Dissipative dynamical systems—Part I and II. Arch Rational Mechanics and Analysis, 1972, 45(27): 321- 393
- 5 Hill D J, Moylan P J. The stability of nonlinear dissipative Systems IEEE Trans on Autom Contr, 1976, 21(5): 708- 711
- 6 Lasalle J P. Stability theory for ordinary differential equations J Diff Equations, 1968, 4: 57- 65

## 作 者 简 介

张侃健 男,1972年生。1997年于东南大学获工学硕士学位,现为东南大学自动化研究所博士研究生。主要研究方

向为鲁棒控制,自适应控制和无源性分析。

冯纯伯 男,1928年生。1958年获苏联技术科学副博士学位,现为东南大学研究生院副院长,教授,中国自动化学会常务理事,俄罗斯联邦自然科学院外籍院士,中国科学院院士。目前主要从事系统建模,自适应,鲁棒及智能化控制理论及应用,机器人控制等方面的研究。

费树岷 男,1961年生。1995年于北京航空航天大学获工学博士学位,1995—1997年在东南大学自动化所从事博士后研究工作,现为东南大学自动化所教授。主要研究兴趣为非线性控制系统设计与综合,鲁棒控制,自适应控制,时滞系统的设计与综合等。