

文章编号: 1001-0920(2004)01-0099-03

大滞后过程的 PI 控制器整定

徐江华, 孙 荣, 邵惠鹤

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘 要: 提出一种简单而有效的大滞后过程 PI 控制器整定方法。基于继电器反馈试验, 辨识出一阶加纯滞后模型, 其 Nyquist 曲线在一个大的频率范围内接近于大滞后过程。根据有效模型并基于一种新的鲁棒性能指标, 设计出 PI 控制器。仿真结果表明了 PI 控制器的有效性。

关键词: PI 控制; 模型辨识; 继电器反馈; 鲁棒性

中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A

PI controller tuning for large dead-time processes

XU Jiang-hua, SUN Rong, SHAO Hui-he

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: XU Jiang-hua, Email: elxjh@sjtu.edu.cn)

Abstract: A simple and efficient PI controller tuning method for large dead-time processes is presented. A first-order plus dead-time model is identified on the basis of relay feedback experiments. Nyquist curve is very close to that of large dead-time processes over a wide frequency range. With the available model, PI controller is designed based on a new robust specification. Simulation examples show the effectiveness of the presented PI controller tuning method.

Key words: PI control; model identification; relay feedback; robustness

1 引 言

PI 控制器以其结构简单、对模型误差鲁棒性强等优点而广泛应用于过程工业。在实际应用中, 经常会遇到大滞后过程, 如造纸生产过程、化学反应器以及精馏塔等。通常, 如果纯滞后 L 与过程惯性时间常数 T 之比大于 0.5, 则认为它是大纯滞后过程, 且较难控制。PI 控制器的参数整定通常采用 Ziegler-Nichols 整定规则^[1], 其优点是对过程对象的先验知识需要得很少; 缺点是控制效果较差, 尤其是对于大滞后过程。

Astrom 和 Hagglund^[2] 针对大滞后过程对象提出了改进的 PI 整定规则, 即 $K_p = 0.25/k_{-180}$, $T_i =$

$1.6/\omega_{180}$ 其中 k_{-180} 和 ω_{180} 分别为临界点的幅值和频率。Wang 和 Shao^[3] 提出一种新的鲁棒性能指标以及自衡过程的 PI 控制器整定方法, 但该方法较为复杂。

本文提出一种简单的适用于大滞后自衡过程的 PI 控制器整定方法。首先引入一阶加纯滞后模型, 它能反映大滞后自衡过程。尽管采用的是低阶模型, 但其 Nyquist 曲线在一个大的频率范围内接近于大滞后自衡过程的 Nyquist 曲线。然后根据有效模型并基于鲁棒性能指标^[3], 设计出 PI 控制器。这种方法保证了系统的鲁棒性能和控制性能。仿真结果表明, 对于大滞后过程对象, 本文方法能够获得满意的

收稿日期: 2002-07-12; 修回日期: 2002-10-18

基金项目: 国家“十五”863 重大项目基金资助课题(2001AA 413130)。

作者简介: 徐江华(1972—), 男, 浙江金华人, 博士生, 从事 PID 参数自整定、过程控制等研究; 邵惠鹤(1936—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 从事工业过程控制、智能控制等研究。

控制效果

2 模型辨识方法

实际工业过程非常复杂,要确定其精确模型既不现实也无必要。通常,低阶加滞后模型可以表示实际过程。使用如下—阶加滞后结构模型:

$$G_m(s) = \frac{e^{-sL}}{as + b} \tag{1}$$

其中 a, b 和 L 是要求解的未知数

为求解模型(1)的未知数,选择过程Nyquist 曲线上的两个点(见图 1),其中: $G_p(j\omega) = 0, G_p(j\omega_{180}) = -\pi$, 使得 $G_m(j\omega) = G_p(j\omega), G_m(j\omega_{180}) = G_p(j\omega_{180})$. 假设稳态增益为 k_0 , 临界点的幅值为 k_{-180} , 则有

$$a\omega_{180}j + b = \frac{\cos(\omega_{180}L) - \sin(\omega_{180}L)j}{-k_{-180}} \tag{2}$$

$$b = \frac{1}{k_0} \tag{3}$$

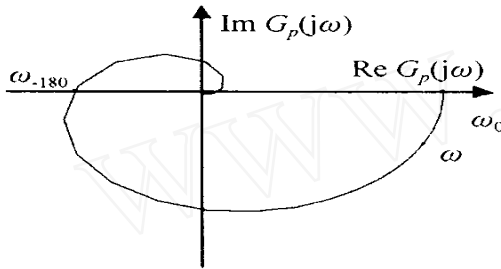


图 1 过程的 Nyquist 曲线

由式(2)和(3)可得

$$L = \frac{1}{\omega_{180}} \arccos\left(-\frac{k_{-180}}{k_0}\right) \tag{4}$$

$$a = \frac{\sin(\omega_{180}L)}{k_{-180}\omega_{180}} \tag{5}$$

临界点的频率特性可通过继电反馈试验得到,而稳态增益则需已知或通过工作点附近的阶跃响应得到。为给出纯滞后大小的尺度,引入相对增益 $k = k_0/k_{-180}$ 。尽管模型(1)的参数是通过使其两点的频率特性与实际对象相等来确定的,但当过程为单调响应且纯滞后较大时,即 $k < 1.5$, 相当于 $L/T > 1^{[4]}$, 模型的Nyquist 图可在 $\omega \sim \omega_{180}$ 频率范围内较好地接近大滞后过程

3 PI 整定方法

PI 控制器传递函数为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{6}$$

在分析和设计控制系统时,对于鲁棒性的考虑是非常重要的。因为控制器的设计所基于的模型—

般不是精确的,且一切物理系统的参数都将随工作环境及时间的变化而变化,所以控制器参数的选择应使闭环系统满足一定的鲁棒性能指标。本文介绍一种新的鲁棒性能指标 $\lambda^{[3]}$, 定义如下

$$\frac{1}{\lambda} = \max_{\omega} \left| \operatorname{Re}[G_c(j\omega)G_p(j\omega)] \right| \tag{7}$$

其中:开环传递函数 $G_l(s) = G_c(s)G_p(s)$, λ 的值即为 $G_l(j\omega)$ 实部最大绝对值的倒数,如图 2 所示 λ 的取值范围是 $1.5 \sim 2.5$

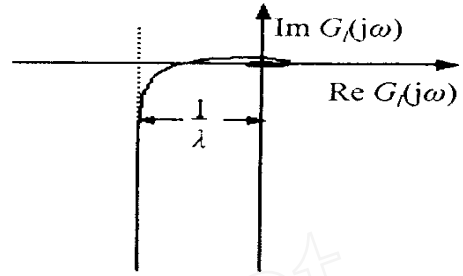


图 2 开环传递函数的 Nyquist 曲线

PI 控制器的传递函数(6)可写成如下形式:

$$G_c(s) = k \left(\frac{As + B}{s} \right) \tag{8}$$

其中: $A = K_p/k, B = K_i/k$. 选择控制器的零点,使其抵消模型 $G_m(s)$ 中的极点,即 $A = a, B = b$ 则有

$$G_c(s)G_m(s) = \frac{ke^{-sL}}{s} \tag{9}$$

其中 k 值取决于新的鲁棒性能指标

假设 $G_l(s) = G_c(s)G_m(s)$, 则

$$\left| \operatorname{Re} G_l(j\omega) \right| = \left| \frac{-k\sin(\omega L)}{\omega} \right| \tag{10}$$

为了找到最大值,由式(10)得

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \left| \frac{-k\sin(\omega L)}{\omega} \right| = kL \tag{11}$$

于是

$$k = 1/\lambda \tag{12}$$

由于模型 $G_m(s)$ 的Nyquist 图可在频率范围 $\omega \sim \omega_{180}$ 内非常接近实际过程对象 $G_p(s)$ (见仿真实例),基于模型 $G_m(s)$ 设计的PI 控制器能保证实际过程对象满足鲁棒性能指标。PI 控制器的参数为

$$\begin{bmatrix} K_p \\ K_i \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \tag{13}$$

4 仿真实例

将本文的PI 整定方法与 Astrom-Hagglund PI 整定规则进行比较,其中取 $\lambda = 2$

考虑一个大滞后过程

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)(s+3)} e^{-5s}$$

其中: $\omega_{180} = 0.4649, k_{-180} = 0.1455, k_0 = 1/6$ 则有

$$G_m(s) = \frac{1}{7.2102s+6} e^{-5.6617s}$$

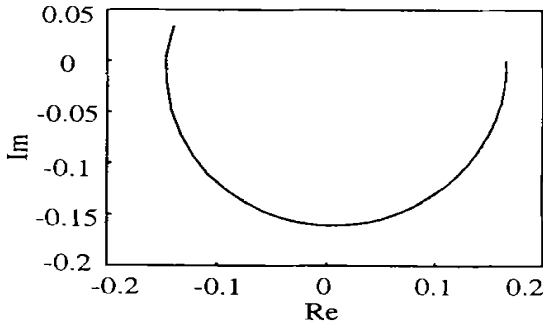


图 3 $G_p(s)$ 和 $G_m(s)$ 的 Nyquist 曲线

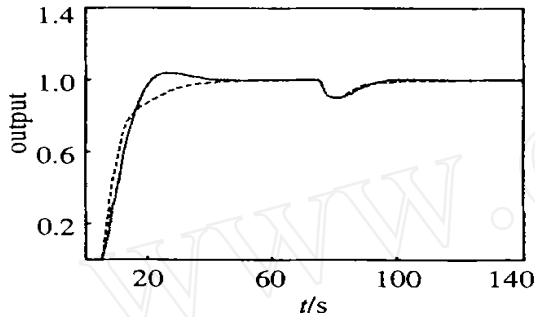


图 4 性能比较曲线

$G_p(s)$ 和 $G_m(s)$ 的 Nyquist 曲线如图 3 所示, 它们在频率 $\omega_b \sim \omega_{180}$ 范围内非常接近

PI 控制器为

$$G_c(s) = 0.637 + \frac{0.53}{s}$$

性能比较如图 4 所示(实线表示本文方法; 虚线表示 A-H 方法).

5 结 论

本文给出了简单而有效的 PI 控制器整定方法, 它对于大滞后过程能得到满意的控制效果. 该方法首先辨识出一个可反映大滞后过程的一阶加滞后模型; 然后基于鲁棒性能指标确定出 PI 控制器参数. 仿真实例表明了该方法的有效性和可行性.

参考文献 (References):

- [1] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *IEEE Trans on A S M E*, 1942, 65: 433-444
- [2] Astrom K J, Hagglund T. Industrial adaptive controllers based on frequency response technique [J]. *Automatica*, 1991, 27(4): 599-609
- [3] Wang Y G, Shao H H. Optimal tuning for PI controller [J]. *Automatica*, 2000, 36(1): 147-152
- [4] Hang C C, Astrom K J, Ho W K. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula [J]. *IEE Proc D*, 1991, 138(2): 111-118

(上接第 98 页)

参考文献 (References):

- [1] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280
- [2] Roy R, Kailath T. ESPR II — estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. *IEEE Trans on A S S P*, 1989, 37 (7): 984-995
- [3] Shan T J, Wax M, Kailath T. On spatial smoothing for direction-of-arrival estimation of coherent signals [J]. *IEEE Trans on A S S P*, 1985, 3(4): 806-811
- [4] William s R T, Prasad S, Mahalanabis A K, et al. An improved spatial smoothing technique for bearing estimation in a multipath environment [J]. *IEEE Trans on A S S P*, 1988, 36(4): 425-432
- [5] Wax M, Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria [J]. *IEEE Trans on A S S P*, 1985, 33 (2): 387-392
- [6] Godara L. Application of antenna arrays to mobile communications — Part II: Beam-forming and direction of arrival considerations [J]. *Proc IEEE*, 1997, 85(8): 1195-1245
- [7] 张贤达, 保铮. 通信信号处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 332-335