

一种新的实用PI控制闭环辨识方法

朱学峰, 肖术骏, 王 秀

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对于有PI控制器的闭环系统, 提出一种辨识方法, 可以在闭环系统运转下得到控制对象的开环传递函数. 首先, 根据闭环系统的衰减振荡曲线, 近似地求出闭环控制系统的二阶加时滞(SOPDT)闭环传递函数. 然后, 用方框图等效法, 在所得的闭环传递函数中将PI控制器分离出去; 再通过比较系数就得到对象的开环传递函数. 数字仿真和辨识实验表明此法有很好的辨识精度, 计算量小且非常易于在线实现, 具有比较重要的现实意义.

关键词: 闭环辨识; PI控制; 二阶加时滞; 比较系数法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A new practical method for closed-loop identification with PI control

ZHU Xue-feng, XIAO Shu-jun, WANG Xiu

(College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: For a closed-loop system with a PI controller, we propose a method to identify the transfer function of the controlled object. From the under-damped-response of the closed-loop system, we approximate the closed-loop system by a second-order-plus-dead-time(SOPDT) transfer function. The transfer function of the PI controller is then removed from the approximate closed-loop transfer function. From the remaining transfer function, the open-loop transfer function of the controlled object is determined through a coefficient-comparison process. Both the simulations and the control experiments on a pilot-equipment show advantages of the proposed method, such as the high identification-accuracy, the low computational complexity and the easy online implementation, thus demonstrating its application potential.

Key words: closed-loop identification; proportional-integral control; second-order-plus-dead-time; coefficient-comparison

1 引言(Introduction)

众所周知, 对象模型对于控制系统的设计和整定来说是非常重要的. 只要有一定精度的对象模型就可以方便地设计合适的控制器使得控制效果能够很好的满足性能指标. 目前已有许多种开环和闭环辨识过程的方法, 由于在实际中, 工业对象一般不允许做开环控制实验^[1]. 因此, 闭环辨识在某种意义上更具实用性.

国内外已有许多学者在闭环辨识方面做了深入的研究, R. Manat和P.J. Fleming^[2]先通过闭环控制曲线近似得到系统的闭环传递函数, 在假设对象为一阶加时滞(FOPDT)模型的基础上提出通过相位穿越频率处开环对象与闭环对象之间的幅值的关系来求得对象的近似FOPDT模型. 陈永云等^[3,4]在R. Manat和P.J. Fleming的基础上先后提出在PI和PID条件下用两个特殊频率点处开环系统与闭环系统之间的关系来求得对象的二阶加时滞(SOPDT)模型.

Wonhui Cho等^[5]在得到闭环PI控制系统传递函数后, 通过非线性最小二乘法求解目标函数来得到开环对象的FOPDT模型. 李超等^[6]通过系统闭环的阶跃响应采用 N 次拉盖尔(Laguerre)模型^[7,8]辨识得到系统的闭环传递函数, 然后根据等效原理来估计对象的开环阶跃响应, 再根据此估计得到的开环阶跃响应通过一系列复杂的变换最终求出对象模型的参数.

一般而言, 闭环辨识分为两步: 第1步是通过闭环响应曲线得到闭环传递函数, 第2步是将控制器从闭环传递函数中分离出来从而得到对象的传递函数. 本文第1步采用与文献[2~4, 9]相似的方法, 第2步采用等效法和比较系数法计算出对象模型的参数.

2 辨识原理(Identification principle)

先假设对象为二阶加时滞过程:

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-d_p s}}{T_p^2 s^2 + 2\zeta_p T_p s + 1}. \quad (1)$$

PI控制器传递函数为

$$G_c(s) = \frac{K_c(T_i s + 1)}{T_i s}, \quad (2)$$

则闭环传递函数为

$$M(s) = \frac{G_p(s)G_c(s)}{1 + G_p(s)G_c(s)}. \quad (3)$$

通过PI控制器的调节使得对象的输出呈欠阻尼, 如图1所示. 不妨设其闭环传递函数为

$$M(s) = \frac{K_{cl}e^{-d_{cl}s}}{T_{cl}^2 s^2 + 2\zeta_{cl}T_{cl}s + 1}. \quad (4)$$

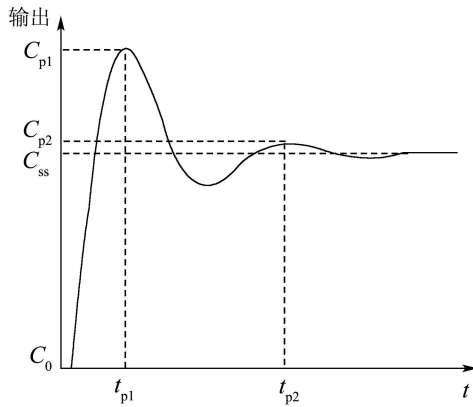


图1 闭环PI控制阶跃响应曲线

Fig. 1 Typical closed-loop step response under PI control

文献[10]说明了此种假设是合理的, 具有一定的精度. 通过时域分析可以得到闭环传递函数的参数为^[1,4,7]:

$$\begin{cases} K_{cl} = 1, \\ \zeta_{cl} = \sqrt{\rho/(1+\rho)}, \\ T_{cl} = \frac{t_{p1}\sqrt{1-\zeta_{cl}^2}}{\pi}, \\ d_{cl} = \frac{S_c}{C_{ss} - C_0} - 2\zeta_{cl}T_{cl}. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \rho = \left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{C_{p1} - C_{ss}}{C_{ss} - C_0}\right)^2, \\ S_c = \int_0^\infty (C_{ss} - C(t))dt. \end{cases} \quad (6)$$

文献[9]还给出了当所选的PI控制器使得闭环输出为过阻尼时式(4)中各参数的近似求解公式.

由图2中所示给出了被辨识对象的等效方框图^[6], 其闭环传递函数为

$$C(s) = \frac{M(s)}{(1 - M(s))G_c(s)}. \quad (7)$$

将式(3)代入式(7)有

$$C(s) = G_p(s). \quad (8)$$

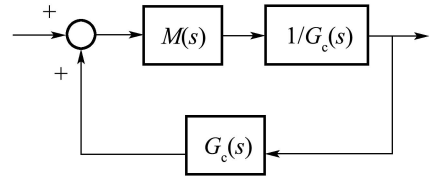


图2 被辨识对象的等效方框图

Fig. 2 Equivalent block diagram of the process

纯滞后环节用一阶Pade近似^[12]:

$$e^{-\theta s} = \frac{1 - \theta s/2}{1 + \theta s/2},$$

将式(2)(4)(8)代入式(7)展开, 可得如下形式:

$$G_p(s) = E \frac{s(s - 2/d_{cl})}{s^4 + Ds^3 + Cs^2 + Bs + A}, \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \frac{2(1 - K_{cl})}{T_i T_{cl}^2 d_{cl}} = 0, \\ B = \frac{1}{T_i} \left(\frac{2}{T_{cl}^2} + \frac{4\zeta_{cl}}{T_{cl} d_{cl}} \right), \\ C = \frac{2}{T_{cl}^2} + \frac{4\zeta_{cl}}{T_{cl} d_{cl}} + \frac{2}{T_i} \left(\frac{\zeta_{cl}}{T_{cl}} + \frac{1}{d_{cl}} \right), \\ D = \frac{1}{T_i} + \frac{2\zeta_{cl}}{T_{cl}} + \frac{2}{d_{cl}}, \\ E = -\frac{1}{K_c T_{cl}^2}. \end{cases} \quad (10)$$

为了使得式(1)和式(9)有相同的形式, 可对式(1)做适当的近似:

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-d_p s}}{(T_p^2 s^2 + 2\zeta_p T_p s + 1)} \approx \frac{K_p e^{-d_p s}}{(T_p^2 s^2 + 2\zeta_p T_p s + 1)} * \frac{s}{(s + \xi)}. \quad (11)$$

式(11)中 ξ 是个极小的正数, 根据零极点对消^[13]的原则式(11)成立, 并且 ξ 只是作为一个中间参数, 对最终辨识结果无影响.

同样对纯滞后环节用一阶Pade近似后将式(11)展开后可以得到与式(9)相同的形式, 通过比较系数法可以得到求取 K_p, T_p, ζ_p, d_p 的公式:

$$\begin{cases} d_p = d_{cl}, T_p = \sqrt{\frac{2}{d_p B}}, \\ K_p = -T_p^2 E, \zeta_p = \frac{1}{2} T_p (D - \frac{2}{d_p}). \end{cases} \quad (12)$$

仿真实验表明, 式(12)中求出的 ζ_p 偏小, 需乘以一个系数 λ (λ 取1.1至1.2之间)能得到比较理想的辨识效果, 本文下面所有的仿真中都取 $\lambda = 1.13$. 即修正后的求解阻尼比的公式为: $\zeta_p = \frac{1}{2} T_p (D - \frac{2}{d_p}) \lambda$.

3 仿真实验(Simulation experiments)

分别对一阶惯性加时滞对象和二阶惯性加时滞对象进行仿真实验,在辨识中,PI参数的选取对辨识结果是否产生影响?这是必须考虑的问题.本文对

同一对象采用不同的PI参数进行了仿真研究,发现闭环响应在不同的衰减比的情况下均可得到理想的辨识效果.实验结果如表1所示.单位阶跃响应曲线如图3和图4所示.

表1 仿真实例及辨识结果

Table 1 Simulation examples and the results of identification

传递函数 $G_p(s)$	PI控制器		衰减比	方法	辨识结果				辨识精度		曲线
	K_c	T_i			K_p	T_p	ζ_p	d_p	IAE	Rel.IAE	
$\frac{1.8e^{-100s}}{500s+1}$	0.8	100	2.9	文献[3]	—	211.72	1.29	26.24	53.48	0.0496	图3
				本文	1.798	212.95	1.37	26.43	28.36	0.0263	
	0.8	130	6.1	文献[3]	—	224.88	1.15	10.18	128.10	0.1188	
				本文	1.8	224.68	1.26	10.63	42.15	0.0391	
	0.6	130	7.7	文献[3]	—	229.52	1.17	4.67	107.55	0.0997	
				本文	1.8	229.25	1.30	5.05	25.53	0.0218	
	0.6	150	12.2	文献[3]	—	—	—	—	—	—	
				本文	1.8	238.15	1.26	0	27.42	0.0254	
	5.5	3	3.7	文献[3]	—	2.7296	1.00	0.40	0.18	0.0042	
				本文	0.5	2.76	0.91	0.40	0.12	0.0028	
$\frac{0.5e^{-0.5s}}{(2s+1)(3s+1)}$	5.5	4	5.6	文献[3]	—	2.6459	1.07	0.49	0.32	0.0076	图4
				本文	0.5	2.6999	0.93	0.50	0.11	0.0027	
	3.8	3	7.6	文献[3]	—	2.6722	1.0	0.38	0.11	0.0027	
				本文	0.5	2.6931	0.99	0.38	0.10	0.0024	
	4	3.5	9.2	文献[3]	—	2.6263	1.03	0.43	0.17	0.0041	
				本文	0.5	2.6556	0.99	0.43	0.10	0.0023	

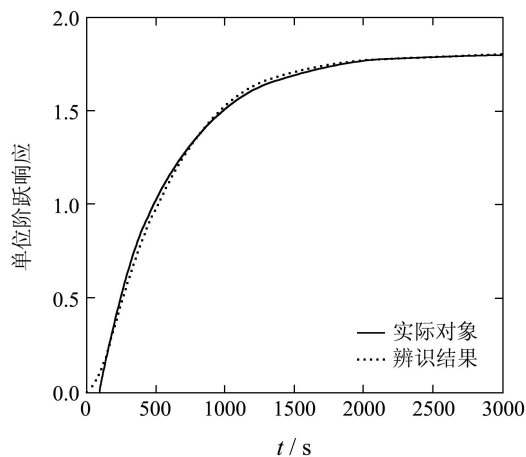


图3 一阶惯性加时滞对象与辨识结果的单位阶跃响应

Fig. 3 Unit step response of FOPDT process and the result of the identification

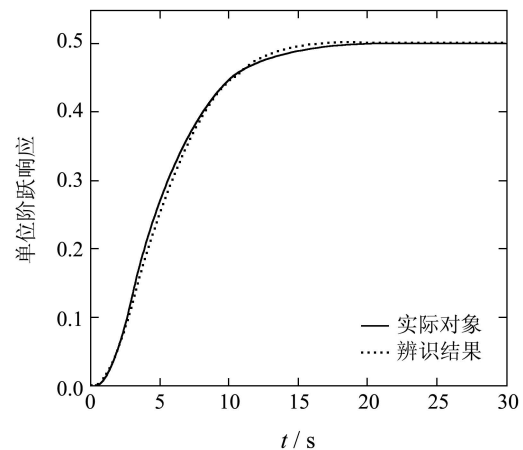


图4 二阶惯性加时滞对象与辨识结果的单位阶跃响应

Fig. 4 Unit step response of SOPDT process and the result of the identification

对仿真实验的几点说明:

1) 以上辨识通过两次近似,一次是通过闭环PI控制阶跃响应曲线近似确定闭环传递函数,一次是通过闭环传递函数来近似确定开环传递函数,后一次的近似精度是以第一次近似准确为前

提的.

2) 仿真中有可能会出现一种现象:第一次近似中的 d_{c1} 可能计算得到负数,但这并不影响最后的辨识精度,用此 d_{c1} 代入到式(12)(13)中计算得到 K_p, T_p, ζ_p, d_p 后将 d_p 取为零即可(如一阶时滞对

象取第4组PI参数时就出现这种情况, 实际计算得到的 d_{cl} 为-4.5484)。

3) 表1中的IAE定义为:

$$IAE = \int_0^{\infty} |\hat{y}(t) - y(t)| dt, \quad (13)$$

其中 $\hat{y}$, y 分别是辨识结果和实际对象的单位阶跃响应。文献中多用IAE来表征辨识的好坏, 然而单从IAE的数值上无法看出辨识的精度, 因为从IAE的定义中可以看出, 对于时间常数较大的对象, 由于其达到稳定所需要的时间较长, 在较长时间里的较小偏差的累积使得IAE值也会很大; 而对于小惯性环节, 由于它很快就可以达到稳定状态, 即使过渡过程中偏差较大, 计算出的IAE值也不会很大。故IAE值可以作为不同方法对同一对象辨识精度的指标。

不同对象的辨识精度本文采用相对IAE(Relative IAE, 记做RelIAE)来表征, 定义

$$RelIAE = \frac{IAE}{\int_0^{\infty} |y_{ss} - y(t)| dt}, \quad (14)$$

其中 y_{ss} 为实际对象的单位阶跃响应的稳态值。RelIAE的值越接近零表明辨识精度越高, 反之亦然。RelIAE能够克服上面提到的不同对象IAE值相差很大的问题, 对不同的对象之间也能相对准确的表征出辨识的精度。

4) 如表1所示, 每个对象取了4组不同的PI控制器参数, 并在相同的条件下与文献[3]的方法作了比较, 仿真结果表明两种方法均有较高的精度, 且本文辨识方法精度略高。

5) 文献[3]中认为开环放大倍数比较容易辨识, 仿真时不作辨识, 在此也认为开环放大倍数完全精确已知。文献[3]未对2)中所述情况进行讨论, 故一阶时滞对象取第4组PI参数时无法得出正确结果。

6) 本文辨识方法对于闭环稳定的对象均能有比较好的辨识精度, 在整定PI参数时, 闭环阶跃响应曲线的超调控制在50%以内比较合适, 振荡次数在2,3次为宜, 这样可以避免2)中所说的现象的出现。

4 热疗仪实验装置的辨识(Identification of the experimental hyperthermia instrument)

为了验证本文提出闭环辨识方法的有效性, 将上述辨识方法用在一原理性的热疗仪实验设备中, 得到了较好的辨识效果。

原理性热疗仪实验装置如图5所示, 该设备用

于治疗膀胱癌。液态药剂通过蠕动泵在硅胶管中循环, 被控对象为人造膀胱内的化疗液温度 T_3 , 为了有效地杀死癌细胞, T_3 要求控制得十分精确。控制器的输出控制固态继电器SSR的导通角从而控制加热元件的功率, 以保证 T_3 稳定在给定值。试验中通过无纸记录仪记录闭环和开环响应曲线。

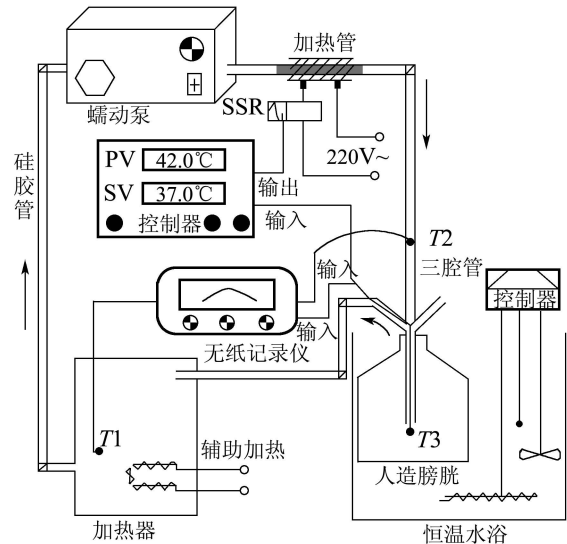


图5 热疗仪实验设备原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental hyperthermia instrument

通过本实验获取该被控对象的数学模型后, 就可以设计相应的控制器和整定相应参数, 为高度准确控制 T_3 的温度奠定了扎实的基础。

先选取PI控制器的参数为: $K_p = 2$, $T_i = 30$, 得到闭环PI控制曲线如图6所示。

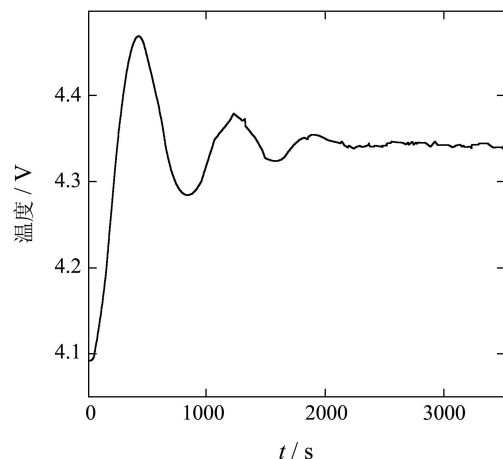


图6 热疗仪闭环阶跃响应

Fig. 6 Closed-loop response of heat treatment instrument

通过本文辨识方法的辨识结果为:

$$K_p = 0.2199, T_p = 87.5, \zeta_p = 1.8275, d_p = 12.6,$$

即,该被控对象的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{0.2199e^{-12.6s}}{7656.25s^2 + 319.8s + 1}.$$

此辨识结果与实际开环对象的飞升曲线的比较如图7所示.

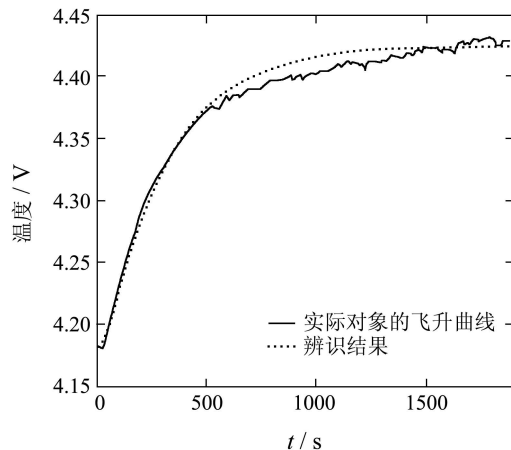


图7 辨识结果与热疗仪对象的飞升曲线比较

Fig. 7 Comparison of open-loop step response of the heat treatment instrument and the identification

由图7可以看出,采用本文提出的闭环辨识方法得到的数学模型,其开环输出与实际测取的开环响应是比较接近的.

5 结论 (Conclusion)

本文提出了一种新的闭环辨识方法,通过闭环PI控制阶跃响应曲线就可以方便的辨识出对象用二阶惯性加时滞模型表示的传递函数.此法简单易行,计算量小,具有较好的辨识精度.数字仿真实验和实际对象的控制实验都表明此法的可行性,其较高的辨识精度也完全能够满足工业应用的需求,具有潜在的实用价值.

本文辨识方法尚需解决的一个问题是要选择合适的PI控制器参数使得闭环系统呈较明显的欠阻尼响应.如果由于现场条件的限制,所选择的控制器参数实在无法使得闭环系统产生衰减振荡时,可以根据文献[9]的方法对本文的第一步进行改进即可,但这一点并不会影响本文方法的应用.一般情况下,在对象完全缺乏先验知识时,只要整定2到3次控制器参数一般都会使闭环对象呈欠阻尼,从而按照本方法完成闭环辨识.

下一步将对一个实际工业过程采用此法进行闭环辨识实验.

参考文献(References):

- [1] LANDAU I D. Identification in closed loop: a powerful design tool(better design models, simpler controllers)[J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(1): 51 – 65.
- [2] MANAT R, FLEMING P J. Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(15): 1297 – 1298.
- [3] 陈永云, 刘爱伦, 陈成良. 一种PI闭环辨识新方法[J]. *控制工程*, 2002, 9(6): 82 – 83, 96.
(CHEN Yongyun, LIU Ailun, CHEN Chengliang. A new closed-loop identification method of PI[J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(6): 82 – 83, 96.)
- [4] 陈永云, 刘爱伦. 一种PID条件下的闭环辨识方法[J]. *石油化工自动化*, 2004, (3): 31 – 32, 48.
(CHEN Yongyun, LIU Ailun. A closed-loop identification method under PID control[J]. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2004, (3): 21 – 32, 48.)
- [5] WONHUI CHO, THOMAS F EDGAR, JIETAE LEE. Closed-loop identification of wafer temperature dynamics in a rapid thermal process[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2006, 23(2): 171 – 175.
- [6] 李超, 黄德先, 金以慧. 有滞后环节的系统的闭环鲁棒辨识方法[J]. *化工自动化与仪表*, 2003, 30(6): 11 – 15.
(LI Chao, HUANG Dexian, JIN Yihui. Robust closed-loop identification of continuous system with dead-time from step response[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2003, 30(6): 11 – 15.)
- [7] 陈晓龙, 陈政石, 刘美. 基于Laguerre函数预测控制模型的仿真智能控制[J]. *茂名学院学报*, 2008, 18(6): 41 – 45.
(CHEN Xiaolong, CHEN Zhengshi, LIU Mei. HSIC based on the Laguerre function prediction control model[J]. *Journal of Maoming University*, 2008, 18(6): 41 – 45.)
- [8] 夏伯楷, 袁璞. 基于Laguerre函数模型的大纯滞后系统预测控制[J]. *石油大学学报*, 2002, 26(6): 100 – 112.
(XIA Bokai, YUAN Pu. Predictive control for large dead-time plants based on Laguerre function model[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 2002, 26(6): 100 – 112.)
- [9] SUGANDA P, KRISHNASWAMY P R, RANGAIAH G P. On-line process identification from closed-loop tests under PI control[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1998, 76(5): 451 – 457.
- [10] LEE J, CHO W, EDGAR T F. An improved technique for PID controller tuning from closed loop tests[J]. *AIChE Journal*, 1990, 36(12): 1891 – 1895.
- [11] 高国燊, 余文杰. 自动控制原理[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003: 75 – 84.
(GAO Guoshen, YU Wenxiao. *Principle of Automatic Control*[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2003: 75 – 84.)
- [12] 吕志民, 周茂林. 使用Pade近似式处理数字控制系统中的纯滞后[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(1): 114 – 115.
(Lü Zhimin, ZHOU Maolin. Manipulation of the pure timedelay in digital control system applying Pade approximation[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2001, 40(1): 114 – 115.)
- [13] TSAIA M C, GEDDES E J M, POSTLETHWAITE I. Pole-zero cancellations and closed-loop properties of an H_∞ mixed sensitivity design problem[J]. *Automatica*, 1992, 28(3): 519 – 530.

作者简介:

朱学峰 (1940—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能检测与智能控制、图像处理及应用, E-mail: xfzhu@scut.edu.cn;

肖术骏 (1985—), 男, 硕士研究生, 控制理论与控制工程专业, E-mail: xiaoshujun0111@163.com;

王秀 (1985—), 女, 硕士研究生, 模式识别与智能系统专业, E-mail: myxiaoxiuzi@163.com.