

典型工业过程鲁棒 PID 控制器的整定

金鑫¹, 谭文¹, 李志军², 刘吉臻¹

(1. 华北电力大学 自动化系, 北京 102206; 2. 北方工业大学 机电工程学院 自动化系, 北京 100041)

摘要: 提出一阶延迟过程、积分延迟过程、不稳定延迟过程和二阶延迟过程等典型工业过程的鲁棒 PID 整定公式. 本文从抗干扰性能和鲁棒性能两方面综合考虑, 把鲁棒 PID 控制器的设计问题转化为求解一个带鲁棒性能约束的绝对误差积分指标 (IAE) 优化问题. 鉴于该问题是非凸的, 本文采用遗传算法来求解, 并通过曲线拟合得到典型工业过程的 PID 控制器的整定公式. 仿真结果表明本文的 PID 整定公式有效, 且控制器具有良好的抗干扰能力和频域鲁棒性.

关键词: 鲁棒性; PID 控制; 整定; 遗传算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Tuning of robust PID controllers for typical industrial processes

JIN Xin¹, TAN Wen¹, LI Zhi-jun², LIU Ji-zhen¹

(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Department of Automation, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: Robust PID tuning formulae are derived for typical industrial processes such as first-order plus dead-time processes, integrating processes, first-order delayed unstable processes and second-order plus dead-time processes. A robust PID controller design method that incorporates disturbance attenuation and robustness is proposed. The problem is the same as the optimization problem with a non-convex constraint. Genetic algorithm is used to solve the problem due to its global search ability, and curve fitting is used to derive the tuning formulae. Simulation results show that these formulae are effective and the resulting PID settings have good compromise between disturbance attenuation and robustness.

Key words: robustness; PID controller; tuning; genetic algorithm

1 引言 (Introduction)

在生产过程自动控制的发展过程中, PID 控制是历史最久、生命力最强的基本控制方式. 它简单实用, 易于实现, 适用范围广, 鲁棒性好, 在现今的工业过程中获得了广泛的应用. 据统计, 目前工业控制器中约有 90% 仍是 PID 控制器^[1]. PID 控制器的设计及其参数整定一直是控制领域所关注的问题. 其设计和整定方法得到国内外广泛研究, 著名的如 Ziegler-Nichols 法^[2]、基于内模控制的方法^[3]及基于误差的积分的优化方法^[4~6]. 基于误差的积分准则由于能较好地反映闭环系统的性能以及易于计算的原因, 在 PID 优化设计中被广泛采用. 然而实际工业生产往往具有非线性、时变不确定性, 难以建立精确的数学模型. 实际生产现场中, 常规 PID 控制器参数往往整定不良、性能欠佳, 对运行工况的适应性

很差. 特别地, 对于积分和不稳定这种常见的工业过程, 许多整定方法都不能适用. 为适应复杂对象的工况和高指标的控制要求, 有必要设计一种鲁棒 PID 控制器, 使得当一定范围的参数不确定性及一定程度的未建模动态存在时, 闭环系统仍能保持稳定 (稳定鲁棒性), 并保证一定的动态性能品质 (性能鲁棒性), 同时得到简单的整定公式以满足各种典型的工业过程要求.

本文作者在文献[7]中提出一种鲁棒 PID 控制器的设计方法, 把 PID 控制器的设计问题转化为求解一个带鲁棒性能约束的积分增益的优化问题. 文章表明该方法可以较好地兼顾闭环系统的时域及频域性能. 可惜的是, 该鲁棒性能约束是非凸的, 无法采用常用的优化方法. 事实上, 文献[7]也只是求解了一个次优问题. 鉴于遗传算法的全局搜索能力, 本

文采用遗传算法来求解该鲁棒 PID 控制器设计问题,并通过对典型的工业对象的求解,曲线拟合,得出 PID 控制器的整定公式.仿真结果表明所得到的 PID 控制器具有较好的抗干扰能力和频域鲁棒性.

2 鲁棒 PID 控制器设计 (Design of robust PID controllers)

文献[7]提出采用如下不确定结构来进行鲁棒 PID 控制器设计:

$$G_{\Delta} = \{(I - \Delta_1)^{-1} G (I + \Delta_2) : \Delta_1, \Delta_2 \in H_{\infty}, \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_1 & 0 \\ 0 & \Delta_2 \end{bmatrix}\}. \quad (1)$$

该结构如图 1 所示,表示输入端和输出端分别存在乘性及逆乘性不确定性.如果将外部扰动视为模型不确定性,则该结构可表示输入端和输出端同时受外部干扰.

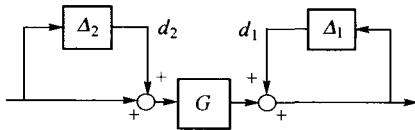


图 1 模型的不确定性描述

Fig. 1 Uncertainty structure of the model

文献[7]证明,对具有该不确定结构且不确定大小满足 $\|\Delta\|_{\infty} \leq 1/\gamma$ 的单位反馈系统,闭环系统鲁棒稳定的充分必要条件为

$$\epsilon := \mu_{\Delta} \left(\begin{bmatrix} (I + GK)^{-1} & (I + GK)^{-1}G \\ -K(I + GK)^{-1} & -K(I + GK)^{-1}G \end{bmatrix} \right) < \gamma. \quad (2)$$

因此 ϵ 可作为系统鲁棒性的度量.对于单变量过程,可以证明

$$\mu_{\Delta} \left(\frac{1}{1 + GK} \begin{bmatrix} 1 \\ -K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & G \end{bmatrix} \right) = \sup_{\omega} \frac{1 + |GK|}{|1 + GK|} = \sup_{\omega} (|S| + |T|). \quad (3)$$

此处 S 是闭环系统的灵敏度函数, T 是其补偿灵敏度函数.与传统的性能指标 M_s ($= \sup_{\omega} |S|$) 和 M_p ($= \sup_{\omega} |T|$) 相比,此度量同时对 M_s 和 M_p 的大小进行限制,因此更适合作为鲁棒控制器设计的指标.

除了鲁棒性能外,控制系统设计还应包括其他性能指标.误差的积分常常被采用为表征系统时域性能的综合指标.鉴于工业过程中,抗干扰性能要求要比设定跟踪更重要,所以本文主要考虑系统的抗干扰性能,而设定跟踪性能总是可以采用前置

滤波器或设定点加权来改善.为避免欠阻尼情况下的正负抵消,本文采用扰动侧的绝对误差积分指标 (IAE-load) 作为系统抗干扰的性能指标.

综合上述,鲁棒 PID 控制器设计可归纳为如下问题:

$$\min_k J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad (4)$$

满足

$$\mu_{\Delta} \left(\begin{bmatrix} (I + GK)^{-1} & (I + GK)^{-1}G \\ -K(I + GK)^{-1} & -K(I + GK)^{-1}G \end{bmatrix} \right) < \gamma_m. \quad (5)$$

其中 γ_m 为给定鲁棒裕度.仿真结果表明,当 γ_m 取值在 3~5 之间时,控制系统可以取得较好的鲁棒性能和抗干扰性能.由于约束(5)是非凸的,上述优化问题无法采用常规的优化方法求解.本文将采用遗传算法 (genetic algorithm) 来求解.

3 基于遗传算法的求解 (Solution via genetic algorithm)

遗传算法^[8]是一种成熟的具有极高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法.由于它不受问题性质(如连续性、可微性)限制,能够处理传统优化算法难以解决的复杂问题,因此它在控制系统优化方面具有巨大潜力.本文利用 MATLAB 的遗传算法工具箱 GAOT^[9]来设计鲁棒 PID 控制器.

应用遗传算法工具箱优化系统的主要步骤如下:

1) 制定优化指标.对单变量过程,优化指标为

$$\max G = -J = - \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad (6)$$

满足

$$\sup_{\omega} (|S| + |T|) < \gamma_m. \quad (7)$$

根据不同工业过程, γ_m 取 3~5 之间,通过仿真,得到表 1.

表 1 不同工业过程的鲁棒性能约束

Table 1 Robustness requirements for typical industrial processes

	一阶 迟延过程	积分 迟延过程	不稳定 迟延过程	二阶 迟延过程
γ_m	3	4	5	3

2) 染色体编码.在遗传算法工具箱中,可以选择二进制编码或浮点数编码.同样的问题可以使用不同的编码,但是不同的编码对程序的方便性和程序运行效率的影响是不同的.这里对 K_p, K_i, K_d 选择二进制编码.

3) 适应度函数的编程实现. 遗传算法在搜索进化过程中一般不需要其它外部信息, 仅用适应度来评价个体的优劣, 并以此作为遗传操作的依据. 在利用遗传算法工具箱进行控制系统设计时, 适应度函数用来定义要解决的优化问题, 因而说适应度函数的实现是整个优化过程最重要的一步. 在仿真过程中, 对于不满足约束条件的个体, 赋予其充分小的适应度数值, 使其具有较大的淘汰概率.

4) 优化过程. 遗传算法的优化过程基本思想是把待优化问题的参数编码成二进制位串或实数形式, 然后由若干个位串或实数形成一个初始种群作为待求问题的候选解, 使用选择、交叉和变异 3 种算子进行操作, 不断迭代优化, 直到找到最优解. 具体过程略.

4 典型工业过程的鲁棒 PID 整定公式 (Tuning formulae for typical industrial processes)

以上两节给出了系统的鲁棒 PID 控制器设计方法及求解. 考虑到工业过程中用于整定的模型常常具有简单的结构, 因此可以对一些典型的工业过程模型应用上述方法进行鲁棒 PID 设计, 找到 PID 参数与模型参数之间的关系, 从而得到整定公式. 由于工业中 PID 形式众多, 本文仅考虑理想 PID 控制器结构

$$G_c(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s. \quad (8)$$

其中: K_p, K_i, K_d 分别为比例、积分和微分系数, 其他结构可以在此基础上进行相应调整.

4.1 一阶延迟过程 (First-order plus dead-time processes)

一阶延迟过程模型如下:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls}. \quad (9)$$

令正则化延迟时间 L/T 从 0.1 变化到 1, 取 $\gamma_m = 3$, 运用本文的鲁棒 PID 控制器设计思路, 整定 PID 控制器参数, 参数与延迟时间之间的关系如图 2 所示.

4.2 积分延迟过程 (Integrating processes)

积分延迟过程模型如下:

$$G(s) = \frac{K}{s(T_s + 1)} e^{-Ls}. \quad (10)$$

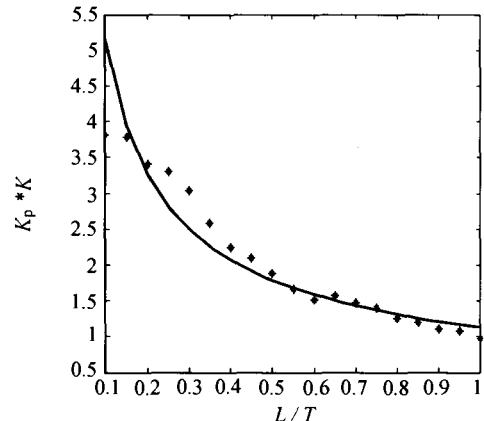
运用同样的思路 ($L/T = 0.1 \sim 1.0, \gamma_m = 4$) 得到的 PID 参数与延迟时间之间的关系如图 3 所示.

4.3 一阶不稳定延迟过程 (First-order delayed unstable processes)

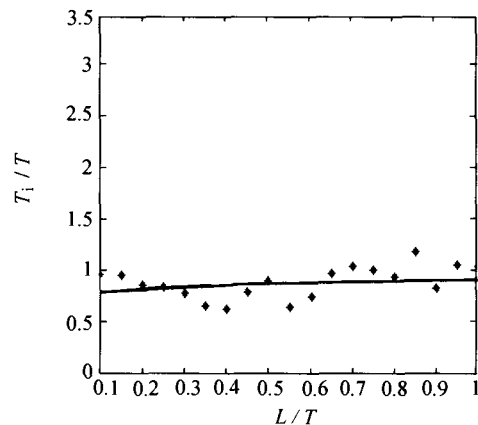
一阶不稳定延迟过程模型如下:

$$G(s) = \frac{K}{T_s - 1} e^{-Ls}. \quad (11)$$

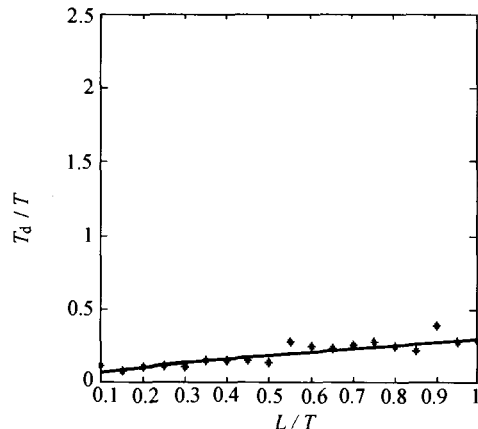
选取正则化延迟时间 L/T 从 0.1 变化到 0.5, $\gamma_m = 5$, 因为当不稳定对象延迟时间过大时 ($L/T > 0.5$), PID 控制器很难取得良好的控制效果, 可以采用其他的控制器设计策略. 运用同样的思路得到的 PID 参数与延迟时间之间的关系如图 4 所示.



(a) L/T 与 $K_p * K$ 的关系

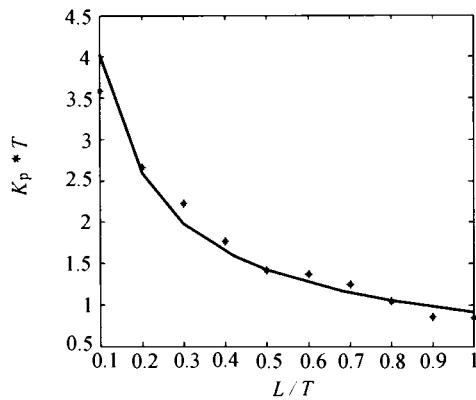


(b) L/T 与 T_i/T 的关系

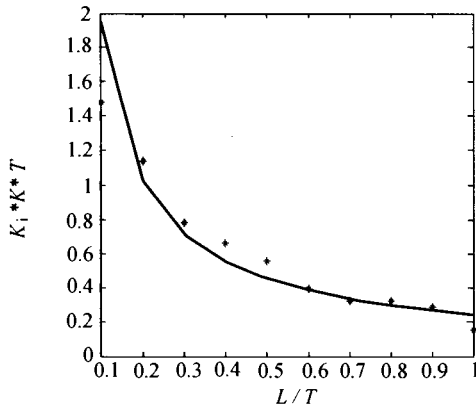


(c) L/T 与 T_d/T 的关系

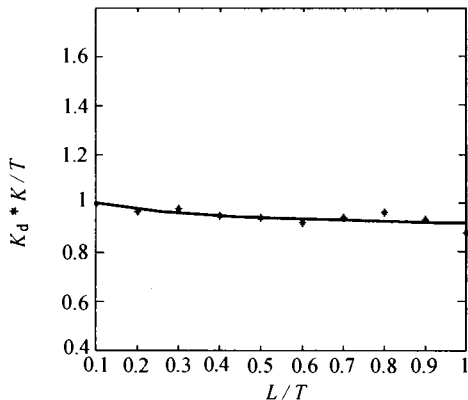
图 2 一阶延迟过程的 PID 参数与延迟时间之间的关系
Fig. 2 Curve fitting results of FOPDT



(a) L/T 与 $K_p * K$ 的关系



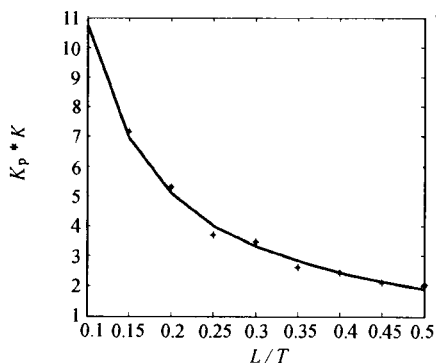
(b) L/T 与 $K_i * K * T$ 的关系



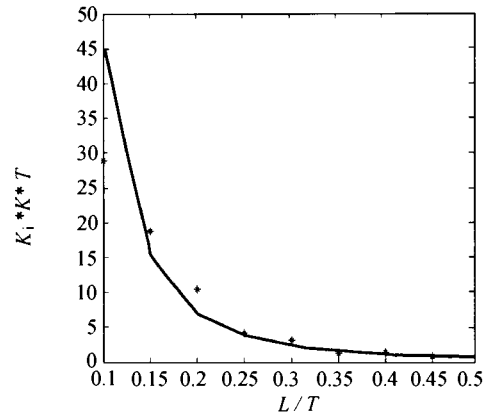
(c) L/T 与 $K_d * K / T$ 的关系

图3 积分延迟过程的PID参数与延迟时间之间的关系

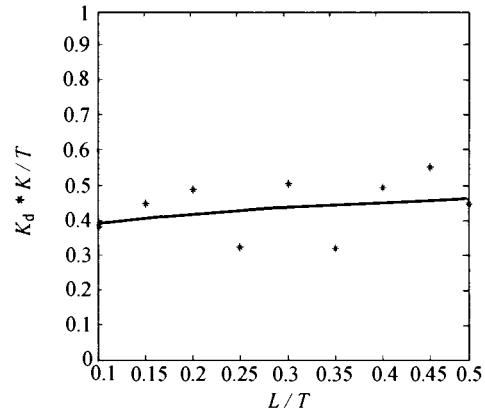
Fig. 3 Curve fitting results of integrating processes



(a) L/T 与 $K_p * K$ 的关系



(b) L/T 与 $K_i * K * T$ 的关系



(c) L/T 与 $K_d * K / T$ 的关系

图4 不稳定延迟过程的PID参数与延迟时间之间的关系

Fig. 4 Curve fitting results of FODUP

4.4 二阶延迟过程(Second-order plus dead-time processes)

二阶延迟过程模型如下:

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls}. \quad (12)$$

选取正则延迟时间 L/T 从0.1变化到1.0, 阻尼系数 ζ 从0.1变化到1.0, $\gamma_m = 3$. 由于模型有两个参数, 所得PID参数与这些参数的关系不便于图形描述, 此处略去.

4.5 整定公式(Tuning formulae)

将上述结果利用曲线拟和, 得到典型工业过程鲁棒PID控制器参数整定公式, 见表2与表3.

5 仿真算例(Simulation examples)

为验证本文整定方法, 本节通过几个仿真算例给出本文方法与现有方法的比较.

例1 考虑一阶延迟过程

$$G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-0.5s}. \quad (13)$$

表4列出了该对象几种典型的整定方法的结果, 和本文的方法作了比较. 各种方法的设定点和负荷的阶跃响应如图5(a)所示(图中 $y(t)$ 为系统输

出),从图中可以看出,对于标称模型,Z-N 和 IAE-load 具有良好的抗干扰性能,但它们的时域跟踪性能表现得比较振荡;IMC 和 IAE-setpoint 方法和本文方法相比,抗干扰上没有本文的方法表现得更好;本文方法表现了优良的频域抗干扰性能,在时域和频域

性能之间取得了很好的折衷.为验证鲁棒性,假设模型中纯延迟增大 20%,响应如图 5(b)所示(图中 $y(t)$ 为系统输出).除了 IAE-setpoint 和本文方法,其他整定方法都出现了较强的振荡,表明本文方法具有较好的鲁棒性.

表 2 鲁棒 PID 整定公式(1)

Table 2 Robust PID tuning formulae (1)

	K_p	K_i	K_d
一阶延迟过程: $\frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls}$	$\frac{1.1482}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.5834}$	$\frac{1.2613}{KT} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.6522}$	$\frac{0.3806 T}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^{0.2022}$
积分延迟过程: $\frac{K}{s(T_s + 1)} e^{-Ls}$	$\frac{0.9154}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.6459}$	$\frac{0.2451}{KT} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.8914}$	$\frac{0.9202 T}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.0376}$
不稳定延迟过程: $\frac{K}{T_s - 1} e^{-Ls}$	$\frac{0.9142}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^{-1.0706}$	$\frac{0.0985}{KT} \left(\frac{L}{T}\right)^{-2.6597}$	$\frac{0.4937 T}{K} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.1012}$

表 3 鲁棒 PID 整定公式(2)

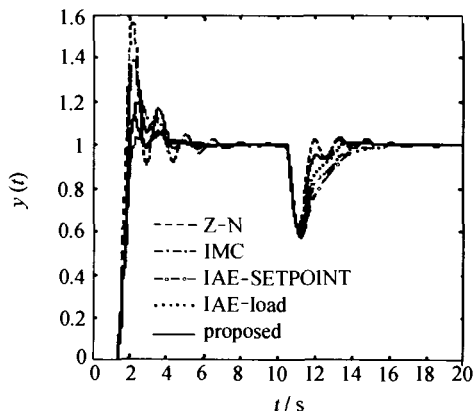
Table 3 Robust PID tuning formulae (2)

二阶延迟过程: $G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls}$	
K_p	$\frac{(1.3146\zeta - 0.0497)\omega_n^2}{K} (L\omega_n)^{-0.0677\zeta - 0.9303}$
K_i	$\frac{(0.4953\zeta + 0.2626)\omega_n^3}{K} (L\omega_n)^{1.5337\zeta - 2.0386}$
K_d	$\frac{(0.2660\zeta + 0.6227)\omega_n}{K} (L\omega_n)^{4.6454\zeta - 5.4385}$

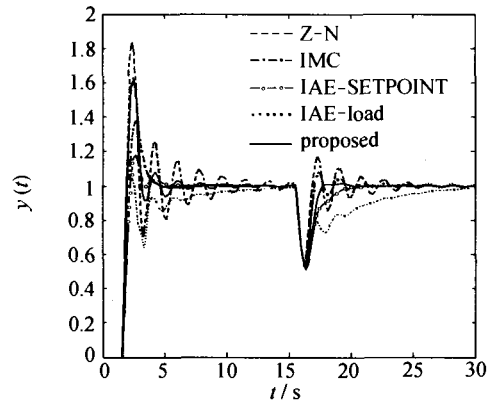
表 4 一阶延迟过程的参数整定比较

Table 4 Comparison of performance and robustness of different PID settings of FOPDT

	K_p	K_i	K_d	IAE-load	ϵ
Z-N ^[2]	2.285	2.673	0.488	0.406	3.912
IMC ^[3]	2.000	1.600	0.400	0.626	3.193
IAE-setpoint ^[4]	1.674	1.390	0.321	0.720	2.544
IAE-load ^[4]	2.673	3.137	0.535	0.374	5.188
本文	1.720	1.982	0.331	0.541	2.585



(a) 标称情形



(b) 扰动情形

图 5 例 1 仿真结果比较

Fig. 5 Responses for Example 1

例 2 考虑积分过程

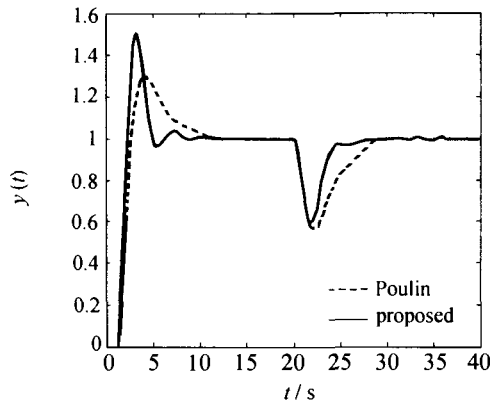
$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} e^{-0.2s} \quad (14)$$

表 5 列出了该对象典型的整定方法的结果,并和本文的方法作了比较.各种方法的设定点和负荷的阶跃响应如图 6(a)所示(图中 $y(t)$ 为系统输出),从图中可以看出,本文方法具有更快的响应速度和更好的抗干扰能力.为验证鲁棒性,假设模型中纯延迟增大 10%,响应如图 6(b)所示(图中 $y(t)$ 为系统输出).本文方法具有较好的鲁棒性.

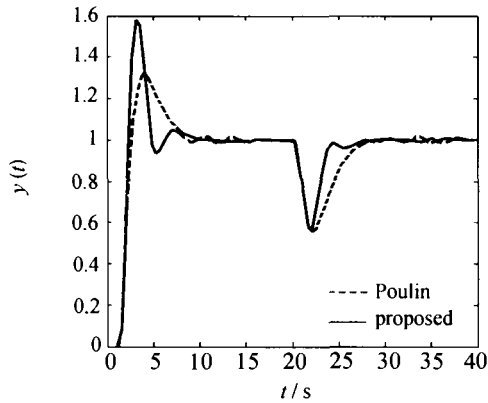
表 5 积分延迟对象的参数整定比较

Table 5 Comparison of performance and robustness of different PID settings of integrating processes

	K_p	K_i	K_d	IAE-load	ϵ
Poulin ^[9]	2.000	0.660	1.340	1.548	2.181
(Mr = 4dB)					
本文	2.589	1.029	0.978	1.000	3.490



(a) 标称情形



(b) 摄动情形

图6 例2仿真结果比较

Fig. 6 Responses for Example 2

例3 考虑不稳定过程

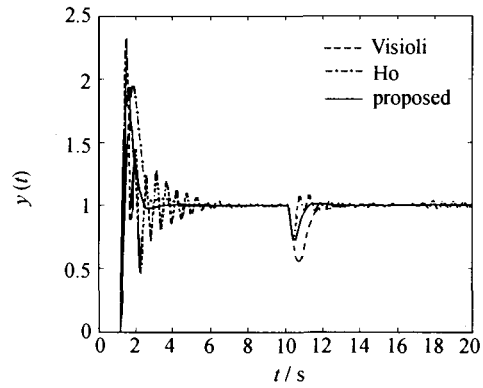
$$G(s) = \frac{1}{s-1} e^{-0.2s} \quad (15)$$

表6列出了该对象典型的整定方法的结果,并和本文的方法作了比较.各种方法的设定点和负荷的阶跃响应如图7(a)所示(图中 $y(t)$ 为系统输出),从图中可以看出,Visioli的结果过于振荡,和Ho的方法相比,本文的结果表现出更好的跟踪和抗干扰性能;为验证鲁棒性,假设模型中纯迟延增大10%,响应如图7(b)所示(图中 $y(t)$ 为系统输出).可见Visioli的结果已经发散,而本文整定的PID控制器比Ho的性能上要优良.

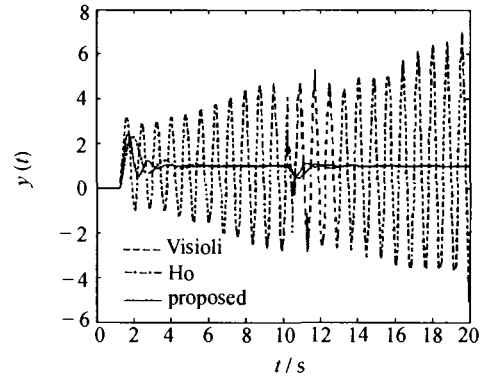
表6 不稳定迟延对象的参数整定比较

Table 6 Comparison of performance and robustness of different PID settings of FODUP

	K_p	K_i	K_d	IAE-load	ϵ
Visioli (ISE-load) ^[10]	6.850	19.028	0.822	0.083	18.116
Ho(load) ^[11]	3.460	2.354	—	0.427	5.140
本文	5.121	7.120	0.420	0.156	4.432



(a) 标称情形



(b) 摄动情形

图7 例3仿真结果比较

Fig. 7 Responses for Example 3

例4 考虑二阶迟延对象

$$G(s) = \frac{1}{(s^2 + s + 1)(s + 2)^2} e^{-0.1s} \quad (16)$$

利用阶跃响应拟合,可将其简化为标准的二阶迟延对象

$$G(s) = \frac{0.25}{1.036s^2 + 1.21s + 1} e^{-1.01s} \quad (17)$$

表7列出了该对象文献中典型的整定方法的结果,并和本文的方法作了比较.从表中可以看出,3种整定方法的鲁棒裕度指标都非常小,鲁棒性能良好,对象的迟延时间也不大,因此,本文只做了标称对象的仿真,仿真结果如图8所示(图中 $y(t)$ 为系统输出).从图中可以看出,本文的方法表现出了良好的性能,特别是在抗干扰性能上略胜一筹.

表7 二阶迟延对象的参数整定比较

Table 7 Comparison of performance and robustness of different PID settings of SOPDT

	K_p	K_i	K_d	IAE-load	ϵ
Wang ^[12]	1.503	1.366	1.715	0.748	1.771
Ho ^[13]	2.147	1.484	0.777	0.806	2.712
本文	2.950	2.204	3.188	0.514	2.316

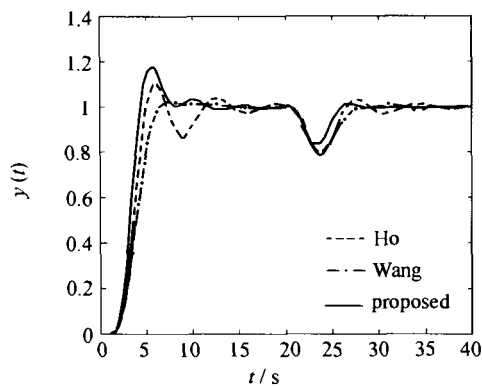


图8 例4仿真结果比较
Fig. 8 Responses for Example 4

6 结论(Conclusion)

针对一阶延迟过程、积分延迟过程、不稳定延迟过程和二阶延迟过程等典型工业过程,本文利用遗传算法的全局搜索能力求解一鲁棒PID控制问题,并通过曲线拟合得到这些典型工业过程的鲁棒PID控制器的整定公式.仿真结果表明本文的PID控制器整定公式简单而且有效,且具有良好的抗干扰能力和频域鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] ASTROM K J, HAGGLUND H. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning* [M]. 2nd ed. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [2] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *Trans on American Society of Mechanical Engineering*, 1942, 62(8): 759 - 768.
- [3] MORARI M, ZAFIRIOU E. *Robust Process Control* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.
- [4] ZHUANG M, ATHERTON D P. Automatic tuning of optimum PID controllers [J]. *IEE Proc D: Control and Applications*, 1993, 140(3): 216 - 224.
- [5] SMITH C A, CORRIPIO A B. *Principles and Practice of Automatic Process Control* [M]. New York: Wiley, 1985.
- [6] SHINSKEY F G. *Process Control System: Application, Design and*

Tuning [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

- [7] TAN W, CHEN T, MARQUEZ H J. Robust Controller design and PID tuning for multivariable process [J]. *Asian J of Control*, 2002, 4(4): 439 - 451.
- [8] DAVIS L. *The Handbook of Genetic Algorithm* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [9] HOUCK C R, JOINES J A, KAY M G. *A Genetic Algorithm for Function Optimization: A MATLAB Implementation* [M]. Carolina: North Carolina State University, NCSU-IE TR 95 - 09, 1995.
- [10] POULIN E, POMERLEAU A, DESBIENS A and HODOUIN D. Development and evaluation of an autotuning and adaptive PID controller [J]. *Automatica*, 1996, 32(1): 71 - 82.
- [11] VISIOLI A. Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes [J]. *IEE Proc D: Control and Applications*, 2001, 148(2): 180 - 184.
- [12] HO W K, XU W. PID tuning for unstable processes based on gain and phase-margin specifications [J]. *IEE Proc D: Control and Applications*, 1998, 145(5): 392 - 396.
- [13] WANG Q G, LEE T H, FUNG H W. PID tuning for improved performance [J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1999, 7(4): 457 - 765.
- [14] HO W K, HANG C C, CAO L S. Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications [J]. *Automatica*, 1995, 31(3): 497 - 502.

作者简介:

金鑫 (1979—),男,2004年于华北电力大学自动化系研究生毕业,主要研究方向为鲁棒控制、过程控制等, E-mail: jinxin_ah@163.com;

谭文 (1969—),男,教授,1996年于华南理工大学自动化系获博士学位,1994年10月至1996年2月分别在香港理工大学机械工程系和电子工程系作研究助理,2000年1月至2001年12月在加拿大阿尔伯塔大学电气与计算机工程系作博士后研究工作,主要研究方向为鲁棒控制、 H_∞ 控制及其在工业过程控制中的应用, E-mail: wtan@iecc.org;

李志军 (1978—),男,2005年于华北电力大学自动化系获得博士学位,现在北方工业大学自动化系任教,主要研究方向为预测控制、鲁棒控制等;

刘吉臻 (1951—),男,校长,教授,博士生导师,1989年,1994年两次在加拿大女王大学进修,主要研究方向包括计算机控制、非线性系统控制、自适应控制、智能控制等.