

## 自适应鲁棒最优 PI 控制器

王亚刚<sup>1</sup> 许晓鸣<sup>1</sup>

**摘要** 提出一种具有鲁棒性能的自适应最优 PI 控制器, 它首先基于控制回路在正常运行操作中产生的过程输入和输出信号, 通过信号分解和频域分析在线辨识出过程对象在重要频率点的频率特性, 然后计算出可同时满足鲁棒性能指标  $\lambda$  和最小负载扰动特性的最优 PI 控制器参数, 同时控制性能可以很方便地根据实际需要通过改变鲁棒性能指标  $\lambda$  来调节. PI 控制器的自适应过程不需要过程对象和控制器的任何先验知识, 也不需要中断控制回路的正常运行, 仿真实验表明了自适应控制器的有效性和可行性.

**关键词** 自适应控制, 频率特性, 鲁棒性, PI 控制器  
**中图分类号** TP273

### Adaptive and Optimal PI Controller with Robustness

WANG Ya-Gang<sup>1</sup> XU Xiao-Ming<sup>1</sup>

**Abstract** This paper presents a new technique of adaptive and optimal PI controller with robustness. On the basis of process input and output data of normal operation in the control loop, important frequency responses of process are estimated by signal decomposition and analysis in frequency domain. Then, PI control parameters are calculated to satisfy both the robustness specification  $\lambda$  and optimization of load disturbance rejection. The control performance can be easily regulated to meet the practical requirements by changing robustness specification  $\lambda$ . The adaptive procedure of PI controller does not need any prior knowledge of the process and previous controller while the control loop is still in the normal operation. Simulation example is given to show both effectiveness and feasibility of the adaptive PI controller.

**Key words** Adaptive control, frequency response, robustness, PI controller

比例-积分-微分 (PID) 控制器是工业过程中最常见的一种控制调节器, 它广泛应用于化工、造纸、冶金、机械、热工和轻工等工业过程控制系统中. 在工业过程控制中, 95% 以上的控制回路具有 PID 结构, 而大多数回路实际上都是 PI 控制<sup>[1]</sup>. PID 控制器被广泛应用主要是因为其结构简单、在实际中容易被理解和实现. 各种先进过程控制和优化都是以 PID 控制回路为基础的, 所以 PID 控制回路运行的好坏直接影响到工业过程设备的运行效率以及企业的经济效益. 然而 PID 控制器参数的整定一般需要经验丰富的工程技术人员凭经验手动来完成, 既耗时又耗力, 加之实际系统千差万别, 又有滞后、非线性等因素, 使 PID 控制器参数的整定有一定的难度, 导致许多 PID 控制回路不能运行在令人满意的状态, 有些甚至不得不切换到开环手动状态. 为此人们开

始研究 PID 控制器的自整定技术和方法. 自整定的含义是控制器的参数可以根据操作员的需要或一个外部信号的要求自动进行参数整定. Astrom 等于 1984 年首先提出了基于继电反馈控制的自整定方法<sup>[2]</sup>, 突破了经典的 Ziegler-Nichols 人工整定方法, 将 PID 控制器的参数整定技术由传统的人工整定发展到自动整定, 开创了自整定方法和技术研究的先河. 随后 20 多年来, PID 控制器的自整定技术得到了长足的发展<sup>[3-8]</sup>, 一些著名的自动化公司也纷纷推出自己的产品. 然而, 国外的权威报告指出, 实际工业中仅仅有 20% 的 PID 控制回路工作比较满意, 80% 的 PID 控制器的整定仍然较差. 一个主要原因是 PID 自整定功能一般都需要先在线通过某种外加的试验来得到过程对象模型, 如阶跃响应试验或继电反馈试验等, 然后通过某种算法确定 PID 参数, 所以一般只适用于控制回路的初次运行和调试阶段. 如果系统已投入运行, 如工业企业中无数正在运行中的 PID 控制回路, 由于各种原因导致控制性能变差, 若要重新对控制器进行自整定, 就需要中断现有的正常运行、切换到试验状态去辨识过程对象模型, 从而确定新的 PID 参数值. 这往往很不方便, 而且在大多数情况下, 现场也是不允许的. 另外, 实际的过程对象和运行条件都会随时间变化, 原先整定好的控制回路的性能也会变差, 所以 PID 控制器参数需要不断调整才能更好地满足生产要求. 而这些都是 PID 自整定功能难以满足的, 因此人们开始进一步关注 PID 控制器的自适应功能, 它是基于 PID 自整定功能之上的更先进的功能. 目前, 自动化领域的一些跨国公司已经开始研究开发新型的自适应 PID 控制系统, 积极形成自己的知识产权.

自适应 PID 控制不同于 PID 控制器的自整定功能, 自适应控制过程是在控制回路正常运行中进行的, 不需要中断现有的正常运行而切换到试验状态, 所以可以很好地弥补自整定功能的不足, 进而解决目前工业过程 PID 控制回路存在的问题. 本文研究的自适应最优鲁棒 PI 控制器就是要解决这个领域的关键技术和方法问题, 通过对控制回路正常运行过程中产生的输入输出信号进行频域分析, 在过程对象任何先验知识未知的情况下, 在线确定出过程对象重要的频率响应特性, 然后在线计算和更新能保证控制回路运行特性达到某种最优的鲁棒性能指标的 PI 控制器参数, 使控制回路在运行过程中始终保持在最佳运行状态, 提高了工业过程设备的运行效率, 最终对工业企业降低成本、节能减排具有重要意义.

### 1 在线模型辨识方法

在工业过程系统中, 由于工艺和过程优化的要求, 闭环控制回路的设定值会经常被操作工或上层优化系统改变. 随后, 过程对象的输入和输出信号都会从一个稳态点到另一个稳态点变化, 如图 1 所示. 两个稳定状态之间的变化信号包含了重要的频域动态特性, 然而这些信号通常都不是绝对可积的, 所以不能直接通过傅里叶分析来处理它们.

为了解决这个难题, 先考虑 Laplace 变换

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1)$$

其中  $f(t)$  满足条件:

- 1)  $f(t)$  在  $t \geq 0$  时是分段连续函数, 在  $t < 0$  时是零;
- 2) 式 (1) 的积分是一个有限值.

将  $f(t)$  分解为瞬态部分  $\Delta f(t)$  和稳态部分  $f_s(t)$

$$\Delta f(t) = f(t) - f(\infty) \quad (2)$$

收稿日期 2008-10-06 收修改稿日期 2009-02-16  
Received October 6, 2008; in revised form February 16, 2009  
上海市自然科学基金 (08ZR1415500), 上海市科委重点攻关计划 (072305126), 上海市教委科研创新项目 (09YZ213) 资助  
Supported by Shanghai Natural Science Foundation (08ZR1415500), Shanghai Key Scientific and Technological Program (072305126), and Shanghai Scientific Innovation Project (09YZ213)  
1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093  
1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.01352

$$f_s(t) = f(\infty) \cdot 1(t) \quad (3)$$

其中  $1(t)$  是单位阶跃函数. 因此, 函数  $f(t)$  可以表示为

$$f(t) = \Delta f(t) + f_s(t) \quad (4)$$

稳态部分  $f_s(t)$  是阶跃函数, 它的 Laplace 变换  $F_s(s)$  为

$$F_s(s) = \int_0^\infty f_s(t)e^{-st} dt = \frac{f(\infty)}{s} \quad (5)$$

因为瞬态部分  $\Delta f(t)$  将在一定时间后衰减到零, 则  $f(t)$  的 Laplace 变换  $F(s)$  可表示为

$$F(s) = \Delta F(s) + F_s(s) = \int_0^\infty \Delta f(t)e^{-st} dt + \frac{f(\infty)}{s} \quad (6)$$

其中  $\Delta F(s)$  是瞬态部分  $\Delta f(t)$  的 Laplace 变换.

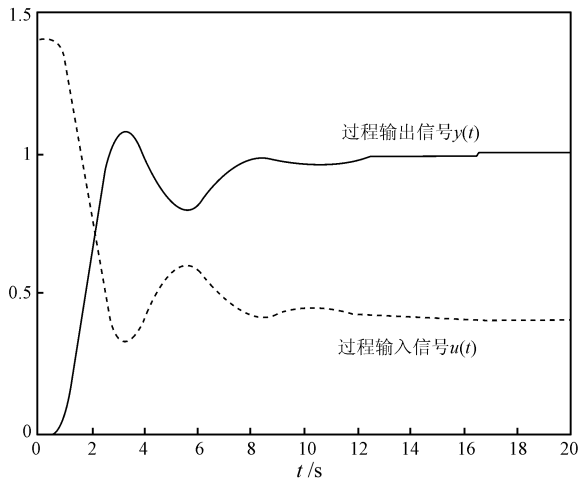


图 1 给定值变化时过程对象的输入和输出信号  
Fig. 1 Set-point change response in control loop

设在时刻  $t = T_f$ ,  $f(t)$  达到稳态值,  $\Delta f(t)$  在  $t = T_f$  之后近似为零, 则式 (6) 变为

$$F(s) \approx \int_0^{T_f} \Delta f(t)e^{-st} dt + \frac{f(\infty)}{s} \quad (7)$$

过程的输入信号  $u(t)$  和输出信号  $y(t)$  的 Laplace 变换  $U(s)$  和  $Y(s)$  可分别表示为

$$U(s) \approx \int_0^{T_u} \Delta u(t)e^{-st} dt + \frac{u(\infty)}{s} \quad (8)$$

$$Y(s) \approx \int_0^{T_y} \Delta y(t)e^{-st} dt + \frac{y(\infty)}{s} \quad (9)$$

则过程对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \approx \frac{\int_0^{T_y} \Delta y(t)e^{-st} dt + \frac{y(\infty)}{s}}{\int_0^{T_u} \Delta u(t)e^{-st} dt + \frac{u(\infty)}{s}} = \frac{s \int_0^{T_y} \Delta y(t)e^{-st} dt + y(\infty)}{s \int_0^{T_u} \Delta u(t)e^{-st} dt + u(\infty)} \quad (10)$$

将  $s = j\omega$  带入式 (10), 得到

$$G(j\omega) = \frac{j\omega \int_0^{T_y} \Delta y(t)e^{-j\omega t} dt + y(\infty)}{j\omega \int_0^{T_u} \Delta u(t)e^{-j\omega t} dt + u(\infty)} \quad (11)$$

这样, 给定一个频率  $\omega$ , 通过式 (11) 可以很方便地计算出过程对象在该频率点上的频率响应特性.

## 2 自适应最优鲁棒 PI 控制器

### 2.1 最优鲁棒 PI 控制器

设 PI 控制器的结构为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (12)$$

则有

$$G_c(j\omega) = K_p - j\frac{K_i}{\omega} \quad (13)$$

采用 PI 控制, 可以使过程对象  $G_p(s)$  的 Nyquist 图上的任意一点  $A$  朝两个方向移动, 改变  $P$  的系数可以使点  $A$  径向移动, 改变  $I$  的系数可以使点  $A$  垂直于径向移动, 最大可使  $A$  点移动的角度范围为  $(0^\circ, 90^\circ)$ , 如图 2 所示.

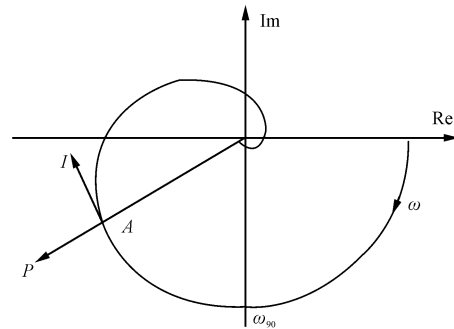


图 2 被控对象的 Nyquist 图  
Fig. 2 Nyquist curve of process transfer function

在分析和设计控制系统时, 鲁棒性的考虑常常是一个重要的方面. 因为控制器的设计所基于的模型一般都不是精确的; 另外, 一切物理系统的参数都会随工作环境和时间的变化而变化, 而这些因素往往会使系统性能偏离人们所设计的要求, 甚至使系统变得不稳定而不能正常工作. 因此, 我们在设计一个系统时, 总希望模型的不精确性和参数变化对闭环系统的性能影响越小越好. 鲁棒性能的指标一般有幅值裕度、相位裕度和灵敏度.

本文采用一种新的鲁棒性能指标  $\lambda$ , 设  $G_l(s) = G_c(s) \times G_p(s)$ , 则它的定义如下

$$\frac{1}{\lambda} = \max_{0 \leq \omega < \infty} |\operatorname{Re}[G_c(j\omega)G_p(j\omega)]| \quad (14)$$

$\lambda$  的值即为  $G_l(j\omega)$  实部的最大绝对值的倒数, 如图 3 所示. 它与稳定性指标增益裕度和相位裕度有某些相似之处, 它们之间的关系如下

$$\begin{aligned} A_m &> \lambda \\ \varphi_m &> \arccos\left(\frac{1}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

所以, 从某种程度上说, 满足了鲁棒性能指标  $\lambda$  相当于同时满足了增益裕度和相位裕度的要求.  $\lambda$  的取值一般为  $1.5 \sim 2.5$ ,

它的约束条件的几何表示是  $G_l(j\omega)$  的 Nyquist 图在复平面左半边与平行于虚轴且间距为  $1/\lambda$  的直线相切。

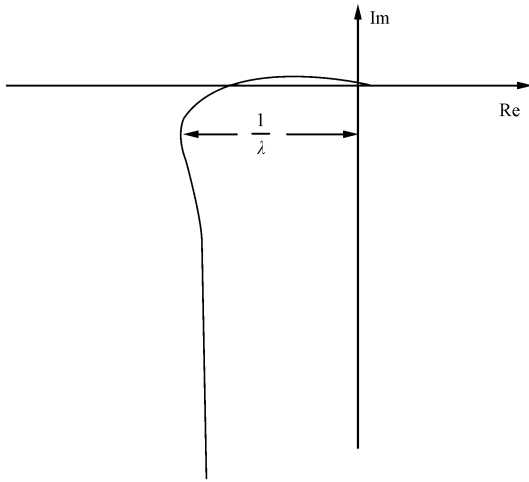


图 3 鲁棒性能指标  $\lambda$  的约束条件

Fig. 3 Geometrical illustration of the constraint  $\lambda$

设过程对象的传递函数为

$$G_p(j\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (16)$$

其中  $\alpha(\omega)$  和  $\beta(\omega)$  分别是过程对象传递函数的实部和虚部. 这样,  $G_l(j\omega)$  可表示为

$$G_l(j\omega) = \left(k_p - j\frac{k_i}{\omega}\right) (\alpha(\omega) + j\beta(\omega)) \quad (17)$$

引入一个函数

$$f(k_p, k_i, \omega) = \text{Re}(G_l(j\omega)) = \alpha(\omega)k_p + \frac{\beta(\omega)}{\omega}k_i \quad (18)$$

因为  $G_l(j\omega)$  的 Nyquist 图在复平面左半边与平行于虚轴且间距为  $1/\lambda$  的直线相切, 则在切点处有下列等式成立

$$f(k_p, k_i, \omega) = -\frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \omega}(k_p, k_i, \omega) = 0 \quad (20)$$

将式 (18) 代入式 (19) 和 (20), 得

$$\alpha(\omega)k_p + \frac{\beta(\omega)}{\omega}k_i = -\frac{1}{\lambda} \quad (21)$$

$$\alpha'(\omega)k_p + \left(\frac{\beta'(\omega)}{\omega} - \frac{\beta(\omega)}{\omega^2}\right)k_i = 0 \quad (22)$$

对于固定的  $\omega$ , 从式 (21) 和 (22) 可得出一组  $k_p$  和  $k_i$  值, 它在  $k_p - k_i$  平面上表示为一点. 当  $0 < \omega < \infty$  时, 这些点就形成一条曲线, 如图 4 所示, 曲线上任意一点的  $k_p$  和  $k_i$  值都可使  $G_l(j\omega)$  的 Nyquist 图在复平面左半边与平行于虚轴且间距为  $1/\lambda$  的直线相切。

在实际工业过程控制中, 系统的抗负载扰动能力往往比系统的阶跃响应更重要. 负载扰动响应可用误差积分性能指标, 如积分绝对误差 (Integrated absolute error, IAE) 来描述, 即

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|dt \quad (23)$$

这个性能指标分析起来往往比较困难, 因此可采用另外一个简单的误差积分性能指标, 即积分误差 (Integrated error, IE) 来描述, 其表达式为

$$IE = \int_0^{\infty} e(t)dt \quad (24)$$

可以看出当误差为正时,  $IE = IAE$ . 而且, 如果系统的负载扰动响应是明显衰减的, 则  $IE$  与  $IAE$  接近. 当负载扰动为单位阶跃时, 则有  $IE = 1/k_i$ , 即 PI 控制器的积分系数  $k_i$  越大, 系统的抗负载扰动的性能越好. 这样, 我们的问题将归结为寻找  $k_p - k_i$  平面上的曲线的极大值, 即图 4 中的 A 点.

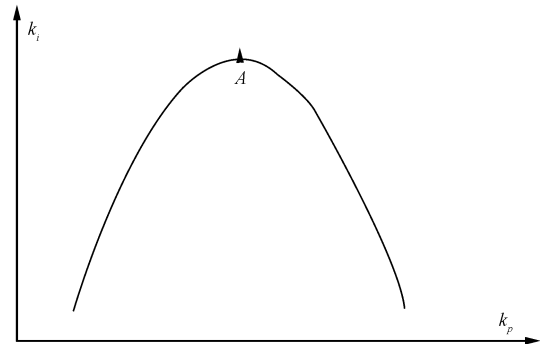


图 4 满足约束条件的  $k_i$  与  $k_p$  关系曲线

Fig. 4 Geometrical illustration of relation between  $k_i$  and  $k_p$

式 (21) 和 (22) 隐含地定义了  $k_i$  是  $k_p$  的函数, 为了寻找这个函数的极大值, 我们首先对式 (19) 两边进行微分, 得

$$df = \frac{\partial f}{\partial k_p}dk_p + \frac{\partial f}{\partial k_i}dk_i + \frac{\partial f}{\partial \omega}d\omega = 0 \quad (25)$$

在极值点 A 处有  $dk_i = 0$ , 再结合式 (20), 则对于任意的  $dk_p$ , 有下式成立

$$\frac{\partial f}{\partial k_p}(k_p, k_i, \omega) = 0 \quad (26)$$

将式 (18) 代入式 (26), 得

$$\alpha(\omega) = 0 \quad (27)$$

这表明, 在极值点处  $\omega = \omega_{90}$ , 如图 2 所示的点. 将式 (27) 代入式 (21) 和 (22), 整理可得  $k_p$  和  $k_i$  的值分别为

$$k_p = \frac{1}{\alpha'(\omega_{90})} \left( \frac{\lambda\beta'(\omega_{90})}{\beta(\omega_{90})} - \frac{\lambda}{\omega_{90}} \right) \quad (28)$$

$$k_i = -\frac{\lambda\omega_{90}}{\beta(\omega_{90})} \quad (29)$$

$\lambda$  作为一种鲁棒性能指标, 一般取值为 1.5~2.5.  $\lambda$  为 2.5 时的响应特性没有超调或超调很小, 这通常是过程控制中所要求的. 而当  $\lambda$  为 1.5 时, 系统可以给出较快的响应特性, 负载扰动响应的恢复时间缩短且积分误差减小, 但另一方面, 它具有较大的超调和振荡特性。

## 2.2 自适应控制器的实现

当正在运行的控制回路设定值发生改变时, 系统会记录和存储这段过渡时间的过程输入和输出信号, 如图 1 所示的

信号, 然后自动计算过程对象的 Nyquist 图在相位滞后  $\pi/2$  的频率点  $\omega_{90}$ , 计算采用下面的迭代公式

$$\omega_{n+1} = \omega_n - \left(\frac{\pi}{2} + \phi_n\right) \frac{\omega_n - \omega_{n-1}}{\phi_n - \phi_{n-1}} \quad (30)$$

$$\phi_n = \arg(G(j\omega_n)) \quad (31)$$

其中, 频率响应  $G(j\omega_n)$  可以通过式 (11) 计算获得,  $\omega_{n-1}$  和  $\phi_{n-1}$  的初始值设为零, 而  $\omega_n$  的初始值设置为很小的数, 如  $10^{-3}$ . 迭代公式具有二次收敛速率, 仿真结果表明, 在几个迭代运算后,  $\omega_{90}$  就可获得 99% 的准确度.

同时, PI 控制器参数计算所需要的频率特性  $\alpha(\omega_{90})$ ,  $\beta(\omega_{90})$ ,  $\alpha'(\omega_{90})$  和  $\beta'(\omega_{90})$  可通过下面的公式计算获得

$$\alpha(\omega_{90}) = \alpha(\omega_{n+1}) = \text{Re}[G(j\omega_{n+1})] \quad (32)$$

$$\beta(\omega_{90}) = \beta(\omega_{n+1}) = \text{Im}[G(j\omega_{n+1})] \quad (33)$$

$$\alpha'(\omega_{90}) = \frac{\alpha(\omega_{n+1}) - \alpha(\omega_n)}{\omega_{n+1} - \omega_n} \quad (34)$$

$$\beta'(\omega_{90}) = \frac{\beta(\omega_{n+1}) - \beta(\omega_n)}{\omega_{n+1} - \omega_n} \quad (35)$$

最后, 根据期望的控制效果选择合适的鲁棒性能指标  $\lambda$ , 通过式 (28) 和 (29) 计算出最优的鲁棒 PI 控制器参数  $k_p$  和  $k_i$ , 完成整个自适应过程.

### 3 仿真实验

为了展示本方法在噪声环境下的准确性, 我们在仿真实验中引入信噪比率 (Signal to noise, SNR), 它的定义如下:

$$NSR = \frac{\text{mean}(\text{abs}(\text{noise}))}{\text{mean}(\text{abs}(\text{signal}))}$$

考虑被控对象

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)(s+3)} e^{-0.5s}$$

首先采用经典的 Ziegler-Nichols 方法整定的 PI 控制器同这个过程对象构成一个稳定的闭环控制系统. 然后, 改变系统的设定值, 系统自动记录过程对象的输入输出信号, 计算获得  $\omega_{90} = 0.723$  以及相应的频率特性  $\alpha(\omega_{90})$ ,  $\beta(\omega_{90})$ ,  $\alpha'(\omega_{90})$  和  $\beta'(\omega_{90})$ , 最后计算出满足鲁棒性能指标  $\lambda$  的 PI 控制器参数. 为了比较不同鲁棒性能指标  $\lambda$  的效果, 下面是计算出的  $\lambda$  分别为 1.5、2、2.5 时的 PI 控制器:

$$G_c(s) = 5.7413 + \frac{3.9005}{s}$$

$$G_c(s) = 4.306 + \frac{2.9254}{s}$$

$$G_c(s) = 3.4448 + \frac{2.3403}{s}$$

则以上最优鲁棒 PI 控制器作用下的闭环传递函数  $G_l(j\omega)$  的 Nyquist 图如图 5 所示, 而它们相应的阶跃响应和负载扰动响应如图 6 所示, 在时间  $t = 0\text{s}$  处给定值发生变化, 即为阶跃响应, 而在时间  $t = 20\text{s}$  秒处加入扰动, 随后的响应则为负载扰动响应.

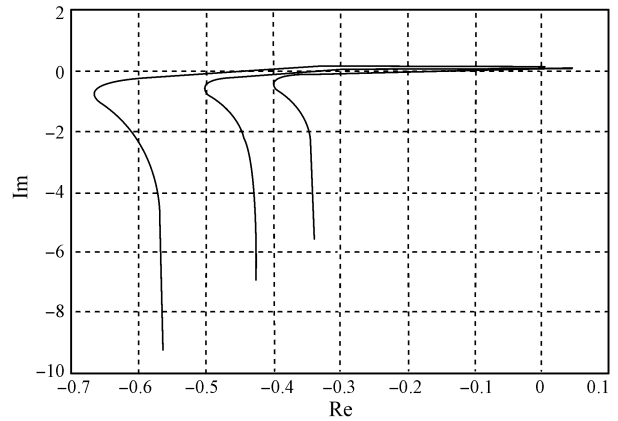


图 5  $\lambda$  为 1.5、2 和 2.5 时的  $G_l(j\omega)$  的 Nyquist 图  
Fig. 5 Nyquist curves of  $G_l(j\omega)$  for  $\lambda = 1.5, 2,$  and  $2.5$

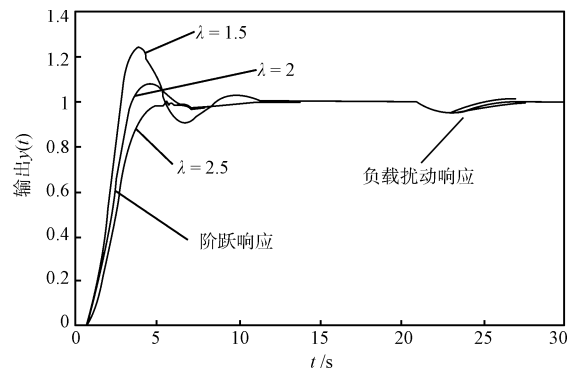


图 6 不同  $\lambda$  的系统阶跃响应和负载扰动响应  
Fig. 6 Process responses for different  $\lambda$ 's

本方法在各种动态特性的稳定对象上进行了大量的仿真实验, 由于篇幅所限不能一一列举. 仿真实验表明, 尽管过程对象的动态特性相差很大, 但它们对同样  $\lambda$  值的闭环响应特性却十分相似. 这在控制器的设计中是非常重要的, 因为这意味着本文提出的方法可以给闭环系统提供期望的且预知的响应特性. 另外系统对于不同  $\lambda$  值的响应特性也比较相似, 这说明  $\lambda$  值是一个合适的调节参数. 当  $\lambda$  取为 2.5 时, 响应特性没有超调或超调很小, 而当  $\lambda$  取为 1.5 时, 系统则给出了较快的响应特性且负载扰动响应的恢复时间缩短, 但却具有较大的超调和振荡特性.  $\lambda$  的取值需要根据工业过程实际所要求的性能指标来决定.

本文提出的自适应鲁棒 PI 控制器适用于工业过程中广泛存在的稳定的自衡对象, 其中包括低阶的和高阶的、小时滞的和小时滞的、单调阶跃响应的和振荡阶跃响应的过程对象. 但本方法不适用于不稳定的被控对象, 其中包括带有积分环节的非自衡对象和带有不稳定极点的不稳定对象.

### 4 结论

本文提出一种适用于工业过程中广泛存在的稳定对象的自适应最优鲁棒 PI 控制器. 自适应过程不需要过程对象的任何先验知识, 基于控制回路正常运行的输入输出数据自动辨识出重要频率点  $\omega_{90}$  的频率特性及相应导数, 进而计算出同时满足鲁棒性能指标  $\lambda$  和最小负载扰动特性的最优 PI 控制器参数. 仿真实验表明了本方法的有效性和可行性.

## References

- 1 Astrom K J, Hagglund T. *Advanced PID Control*. New York: Instrument Society of America, 2005
- 2 Astrom K J, Hagglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Automatica*, 1984, **20**(5): 645–651
- 3 Tan W, Liu J Z, Chen T W, Marquez H J. Comparison of some well-known PID tuning formulas. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, **30**(9): 1416–1423
- 4 Oviedo J J, Boelen T, van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, **26**(1): 15–19
- 5 Wang Ya-Gang, Shao Hui-He. Automatic tuning of optimal controllers based on sensitivity specification. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(1): 140–143  
(王亚刚, 邵惠鹤. 一种基于灵敏度的自整定最优 PI 控制器. 自动化学报, 2001, **27**(1): 140–143)
- 6 Ou Lin-Lin, Gu Dan-Ying, Zhang Wei-Dong. Optimal tuning method of PID controller based on gain margin and phase margin. *Control Theory and Applications*, 2007, **24**(5): 837–840  
(欧林林, 顾诞英, 张卫东. 基于幅值裕度和相位裕度的 PID 参数最优整定方法. 控制理论与应用, 2007, **24**(5): 837–840)
- 7 Jin Xin, Tan Wen, Li Zhi-Jun, Liu Ji-Zhen. Tuning of robust PID controllers for typical industrial processes. *Control Theory and Applications*, 2005, **22**(6): 947–953  
(金鑫, 谭文, 李志军, 刘吉臻. 典型工业过程鲁棒 PID 控制器的整定. 控制理论与应用, 2005, **22**(6): 947–953)
- 8 Liao Fang-Fang, Xiao Jian. Research on self-tuning of PID parameters based on BP neural networks. *Journal of System Simulation*, 2005, **17**(7): 1711–1713  
(廖芳芳, 肖建. 基于 BP 神经网络 PID 参数自整定的研究. 系统仿真学报, 2005, **17**(7): 1711–1713)

王亚刚 上海理工大学光电信息与计算机工程学院教授. 主要研究方向为系统辨识与自适应控制. 本文通信作者.

E-mail: ygwang@usst.edu.cn

(WANG Ya-Gang Professor at University of Shanghai for Science and Technology. His research interest covers system identification and adaptive control. Corresponding author of this paper.)

许晓鸣 上海理工大学光电信息与计算机工程学院教授. 主要研究方向为复杂系统与智能控制. E-mail: xmxu@usst.edu.cn

(XU Xiao-Ming Professor at University of Shanghai for Science and Technology. His research interest covers complex system and intelligent control.)