

自衡和非自衡时滞对象 Smith 预估器解析设计¹⁾

张卫东 何 星 许晓鸣

(上海交通大学自动化系 上海 200030)

(E-mail: wdzhang@mail.sjtu.edu.cn)

摘 要 在频域最优控制理论的基础上针对具有时滞的自衡对象和非自衡对象讨论两个问题: 1. 在严格处理时滞的前提下如何通过解析的方法设计 Smith 预估器. 2. 如何衡量系统的鲁棒性程度和如何方便地整定系统的鲁棒性.

关键词 时滞系统, 自衡对象, 非自衡对象, 最优控制, 鲁棒控制, Smith 预估器.

SMITH PREDICTOR DESIGN FOR SELF-REGULATING AND NONSELF-REGULATING PLANTS

ZHANG Weidong HE Xing XU Xiaoming

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract This paper is devoted to the control of self-regulating processes and nonself-regulating processes with time delay. Two problems are solved based on frequency domain optimal control theory. One is how to design Smith predictor analytically when the time delay is treated strictly. The other is how to estimate the system robustness and how to tune it simply. Numerical examples are provided to illustrating the proposed method.

Key words Time delay, self-regulating plant, nonself-regulating plant, optimal control, robust control, Smith predictor.

1 引言

尽管控制理论在过去的几十年中发展很快,但是迄今为止,在时滞过程控制中应用较多的仍然是 Smith 预估器,这是因为它既简单,又能有效地解决过程控制中的问题.然而,即便是对这样简单的控制器,目前还有许多问题没有解决,譬如一直没有找到解析的设计

1) 国家自然科学基金资助项目 69804007,上海市科技启明星计划(99QD14012).

方法^[1~3].

文[4]和[5]基于一阶 Pade 近似,分别从 H_2 控制理论和 H_∞ 控制理论的角度讨论了自衡对象 Smith 预估器解析设计问题.但是严格地讲,这些设计方法并没解决这个问题,因为在这些方法中纯滞后是用低阶有理近似来代替的.

控制系统的品质取决于各个组成环节,其中控制对象是否易于控制,对整个系统运行有很大的影响.在过程控制中,典型的控制对象可分为两类:一类是自衡对象.另一类是非自衡对象.虽然 Smith 预估器能够非常有效地控制自衡对象,但是,它不能直接用于非自衡对象的控制.文[6,7]指出,Smith 预估器不能用于非自衡对象控制的根本原因在于,它在确定的外部干扰下会产生非零稳态误差.如何设计非自衡对象 Smith 预估器仍然是个未得到很好解决的问题.

本文在频域最优控制理论的基础上讨论自衡和非自衡对象的控制问题,在严格处理纯滞后的前提下解决了控制系统的解析设计问题.得到的控制器不但可以任意逼近最优性能,而且可以获得非常好的鲁棒性.文中给出了例子说明新的设计方法.

2 滞后的有理近似

Smith 预估器解析设计的困难在于纯滞后的传递函数是无穷维的^[8],而目前所发展的理论,如 H_2 控制理论和 H_∞ 控制理论,都是基于有理函数理论的,只能处理有限维的控制对象.所以,在设计控制器之前,讨论一个滞后的有理逼近是必要的,因为在后面的设计中,我们要借助于基于有理函数理论的方法.

文[8]讨论过,全通 Pade 近似具有很好的性质,它可以对滞后进行任意的逼近.用 n 阶全通 Pade 近似表示滞后,有

$$e^{-\theta s} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Q_n(-\theta s)}{Q_n(\theta s)}, \quad (1)$$

其中

$$Q_n(\theta s) = \sum_{j=0}^n \frac{(2n-j)!n!}{(2n)!j!(n-j)!} (\theta s)^j.$$

记

$$Q_n(\theta s) = 1 + a_1 s + a_2 s^2 + \cdots + a_n s^n.$$

因为 $a_j > 0, j=1, 2, \dots, n$, 根据 Pade 近似的性质可知,全通 Pade 近似的极点均在左半平面,零点均在右半平面.

3 自衡对象 Smith 预估器设计

分析图 1(a)所示的单位反馈控制回路.假定控制对象 $G(s)$ 的模型为 $G_m(s) = G_{mo}(s)e^{-\theta s}$.在标称情况下,控制对象的输出信号等于 $y = C(s)G_{mo}(s)e$.为了消除纯滞后的不良影响,要求测量信号反映的是现时的而不是延迟的信息,即 $y_o = C(s)G_{mo}(s)e$.为此,将控制器 $C(s)$ 修改为 $R(s)$,并在信号 y 上附加一个量 $y_s = R(s)G_{mo}(s)e - R(s)G_{mo}(s)e^{-\theta s}e$ 就能够实现(图 1(b)).

注意,本文中讨论的 Smith 预估器与传统过程控制理论中讨论的有所不同.在传统过程控制理论中 Smith 预估控制器与单位反馈控制回路控制器相同,均为 PID 控制器,因

此 Smith 预估控制结构与单位反馈控制回路是不等价的;这里给出的 Smith 预估控制器与单位反馈控制回路控制器不同,Smith 预估控制结构与单位反馈控制回路是等价的,定义如下传递函数

$$Q(s) = \frac{R(s)}{1 + G_{m0}(s)R(s)}. \tag{2}$$

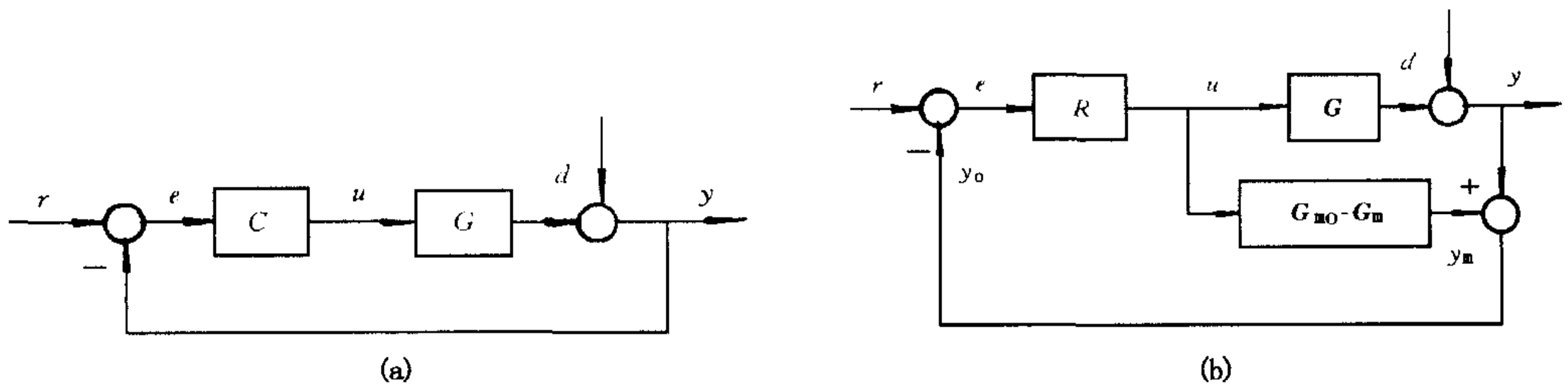


图 1 Smith 预估器的结构及其等价实现

在标称情况下($G(s) = G_m(s)$)从干扰 d 到输出 y 或者说从给定值 r 到误差 e 的传递函数是

$$S(s) = 1 - G(s)Q(s). \tag{3}$$

在传统的整定方法中,一般是先固定控制器的结构,然后凭经验调节参数.本文则提出一种简单并且更具有逻辑性的设计方法.首先确定一个最优性能指标,然后同时推导出控制器的结构和参数.假设自衡控制对象为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \cdots (\tau_m s + 1)}. \tag{4}$$

令

$$M(s) = (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \cdots (\tau_m s + 1) = 1 + b_1 s + b_2 s^2 + \cdots + b_m s^m.$$

因为 $G(s)$ 是稳定的,所以 $b_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$. 则

$$G(s) = K \frac{Q_m(-\theta s)}{M(s)Q_m(\theta s)}, \tag{5}$$

这里 n 是个足够大的整数.

在控制器设计之前必须先确定一个固定的输入.在过程控制中,一般假定输入是阶跃信号.事实上,对于大多数的情况而言,单位阶跃函数确实是一个方便而又足够苛刻的选择.设系统性能指标为 $\min \|W(s)S(s)\|_2^2$,根据鲁棒控制理论的要求,选择权函数为 $W = 1/s$,为了使系统稳态误差为零, $Q(s)$ 必须满足 $\lim_{s \rightarrow 0} 1 - G(s)Q(s) = 0$,那么满足要求的 $Q(s)$ 的集合是

$$Q(s) = \frac{1}{K} + sQ_1(s), Q_1(s) \text{ 稳定}. \tag{6}$$

为了推导出最优的控制器,首先放松正则性要求.那么有

$$\|W(s)S(s)\|_2^2 = \left\| W(s) \left[1 - G(s) \left(\frac{1}{K} + sQ_1(s) \right) \right] \right\|_2^2 =$$

$$\left\| \frac{Q_{nn}(\theta s) - Q_{nn}(-\theta s)}{sQ_{nn}(-\theta s)} + \frac{M(s) - 1}{sM(s)} - \frac{K}{M(s)}Q_1(s) \right\|_2^2.$$

下面的定理是关于复变函数的一个基本结论.

定理 1^[8]. 令 ψ 表示所有严格正则的稳定的传递函数。 ψ_0 是 ψ 的子集, 在 $\text{Res} > 0$ 解析; ψ_0^\perp 在 $\text{Res} \leq 0$ 解析, 且 $\psi_0 + \psi_0^\perp = \psi$. 则 ψ 里的每一个函数 $F(s)$ 都可以表示为 $F(s) = F_1(s) + F_2(s)$, $F_1(s) \in \psi_0$, $F_2(s) \in \psi_0^\perp$, 并且

$$\|F_1(s) + F_2(s)\|_2^2 = \|F_1(s)\|_2^2 + \|F_2(s)\|_2^2. \quad (7)$$

对等式右边进行正交展开

$$\|W(s)S(s)\|_2^2 = \left\| \frac{Q_{nn}(\theta s) - Q_{nn}(-\theta s)}{sQ_{nn}(-\theta s)} \right\|_2^2 + \left\| \frac{M(s) - 1}{sM(s)} - \frac{K}{M(s)}Q_1(s) \right\|_2^2. \quad (8)$$

对等式右边取极小, 由唯一最优的 $Q_{\text{lim}}(s)$ 求得唯一最优的 $Q_{\text{im}}(s)$ 为 $Q_{\text{im}}(s) = M(s)/K$, 显然 $Q_{\text{im}}(s)$ 非正则. 引入滤波器 $J(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^m}$, $\lambda > 0$, 得到正则的 $Q(s)$ 为

$$Q(s) = \frac{M(s)}{K(\lambda s + 1)^m}. \quad (9)$$

经过简单的计算得到 Smith 预估控制器为

$$R(s) = \frac{1}{K} \frac{M(s)}{(\lambda s + 1)^m - 1}. \quad (10)$$

这里的参数 λ 决定了系统的带宽, 它与系统的给定值响应、干扰响应和鲁棒性都有着直接的关系. 当 λ 减小时, 给定值响应加快, 干扰抑制能力增强, 系统带宽增大, 根据鲁棒控制理论的基本结论可知^[9], 系统的鲁棒性变差; 当 λ 增大时, 则情况相反. 所以我们称 λ 为“鲁棒度”. 就自衡对象而言, 推荐 λ 的取值在 $0 \sim 0.5\theta$ 之间, 视控制对象不确定性的选择.

特别需要指出的是上面的设计过程可以直接用于控制对象分子不为 1 的情况^[8].

4 非自衡对象 Smith 预估器设计

研究如下的控制对象

$$G(s) = \frac{1}{TsM(s)}e^{-\theta s}. \quad (11)$$

在标称情况下, $Q(s)$ 应满足如下两个条件才能保证闭环系统具有渐近跟踪特性

$$\lim_{s \rightarrow 0} 1 - G(s)Q(s) = 0, \\ \lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds} (1 - G(s)Q(s)) = 0.$$

同样地, 下面的设计过程并不局限于分子为 1 的情况. 容易求出满足前一约束的 $Q(s)$ 为

$$Q(s) = TsM(s)(1 + sQ_1(s)), Q_1(s) \text{ 稳定.}$$

结合后一条件, 有

$$Q(s) = TsM(s)(1 + \theta s + s^2Q_2(s)), Q_2(s) \text{ 稳定.} \quad (12)$$

用足够高阶次的 Pade 近似展开控制对象中的纯滞后

$$G(s) = \frac{1}{TsM(s)} \frac{Q_{nn}(-\theta s)}{Q_{nn}(Qs)}, \quad (13)$$

则

$$\|W(s)S(s)\|_2^2 = \left\| \frac{1}{s} \left[1 - \frac{Q_m(-\theta s)}{TsM(s)Q_m(\theta s)} TsM(s)(1 + \theta s + s^2 Q_2(s)) \right] \right\|_2^2 = \left\| \frac{Q_m(\theta s)}{sQ_m(-\theta s)} - \frac{1}{s} \right\|_2^2 + \|\theta + Q_2(s)\|_2^2.$$

显然,当 $Q_2(s) = -\theta$ 时上式取极小,这时最优的 $Q(s)$ 为

$$Q_{im}(s) = TsM(s). \quad (14)$$

引入低通滤波器 $J(s)$ 来衰减 $Q_{im}(s)$ 的高频响应. 满足约束的最简单 $J(s)$ 为

$$J(s) = \frac{(m+2)\lambda s + 1}{(\lambda s + 1)^{m+2}},$$

那么

$$Q(s) = Q_{im}(s)J(s) = \frac{TsM(s)((m+2)\lambda s + 1)}{(\lambda s + 1)^{m+2}}. \quad (15)$$

当 λ 趋向于零时系统趋向于最优. 可以求出非自衡对象 Smith 预估控制器为

$$R(s) = \frac{TsM(s)((m+2)\lambda s + 1)}{(\lambda s + 1)^{m+2} - (m+2)\lambda s - 1}. \quad (16)$$

在实际的控制系统中,一般推荐 λ 的取值在 $1.0\theta \sim 3.0\theta$ 之间. 因为 λ 与系统响应的关系是单调的,所以可以非常方便地找到合乎要求的鲁棒度.

5 仿真研究

例 1. 一个冷水加热温度调节系统. 用实验方法测得温度调节通道的传递函数为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(13.8s + 1)(6.1s + 1)(3.9s + 1)},$$

其中 $K=0.4, \theta=24$, 时间单位为秒. 控制器参数分别取为 $\lambda=3, \lambda=6$ 和 $\lambda=9$. 标称系统响应如图 2 所示. 实际上,随着 λ 的减小,系统可以具有任意好的性能,但是系统的鲁棒性也随之变差. 现在假定,控制对象的增益发生了 20% 的摄动,滞后发生了 40% 的摄动,系统的响应如图 3 所示,仿真结果与理论分析吻合得很好. 本文方法可任意逼近最优解,所以可以得到任意好的给定值响应和干扰响应.

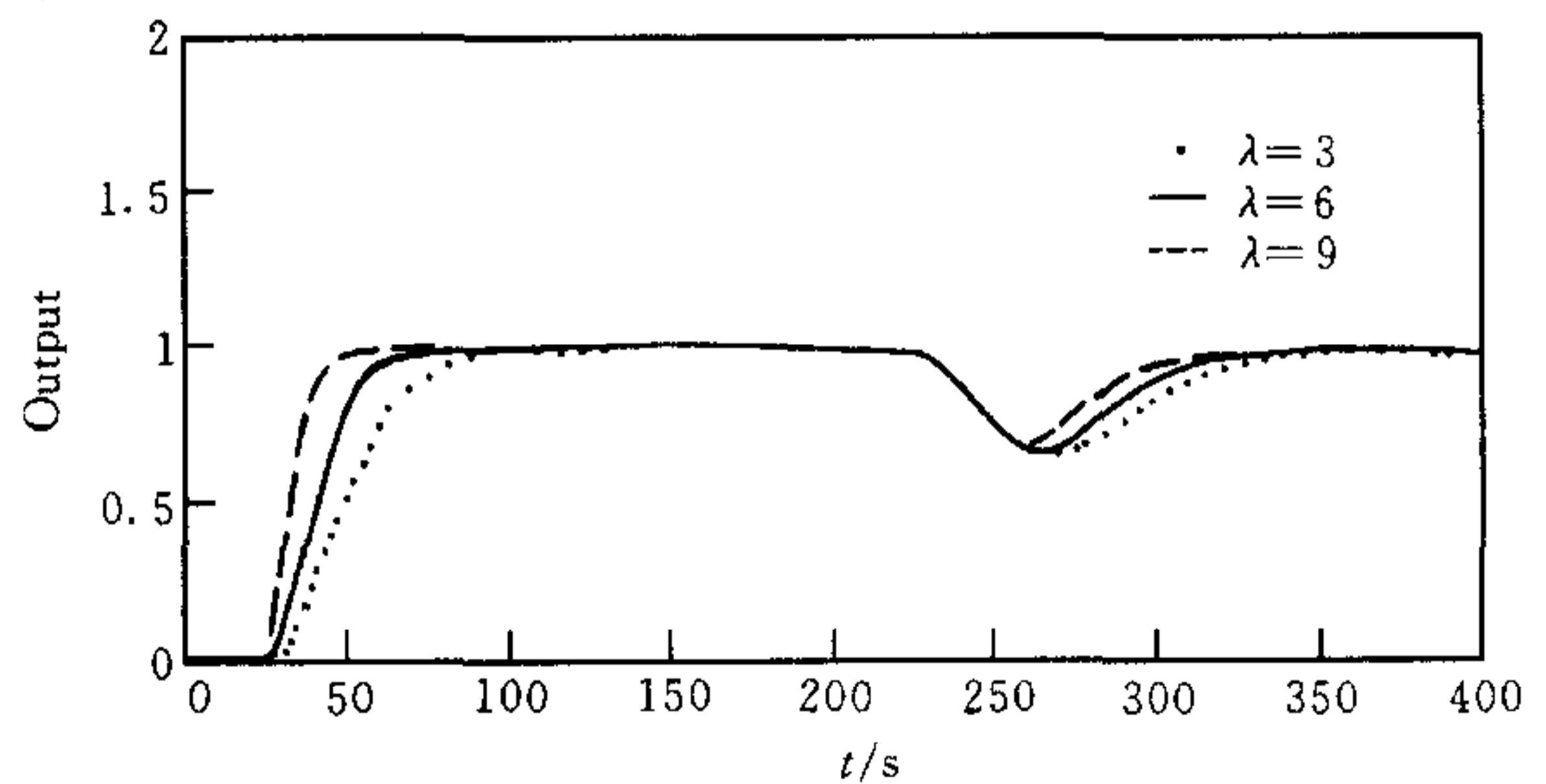


图 2 自衡控制系统的响应

例 2. 考虑一个高纯精馏塔中间温度控制系统. 精馏塔要分离的原料是三种异构体和少量的重组分. 为了提高产出率,塔的过度分离能力设计得很小,所以对控制系统的要求很高. 通过开环阶跃实验,测得过程的模型为

$$G(s) = \frac{1}{Ts} e^{-\theta s},$$

式中 $T=100, \theta=5.5$, 在 Smith 预估器中取不同的 λ 值. 系统的阶跃响应表示在图 4

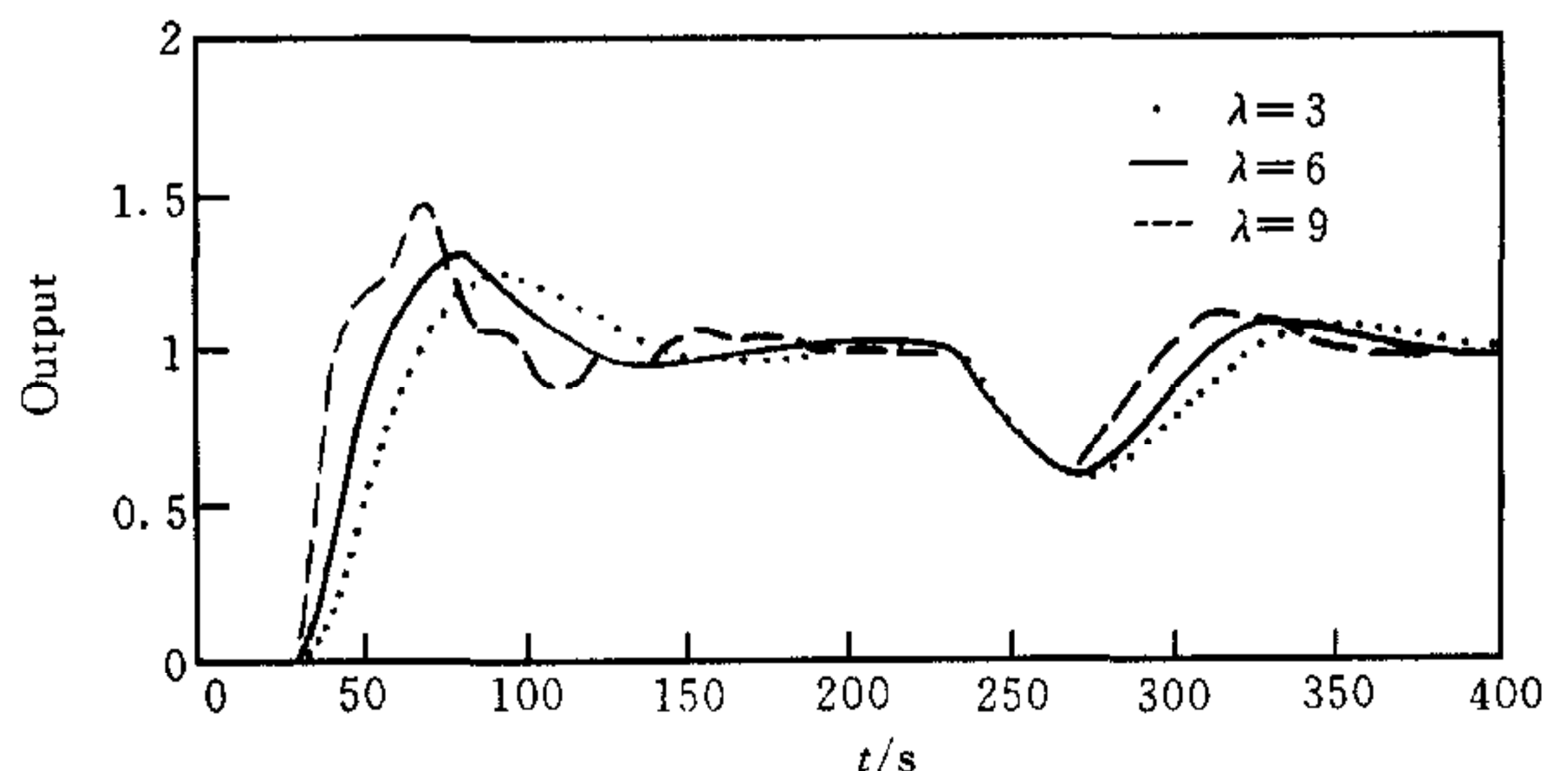


图 3 不确定自衡控制系统的响应

中. 控制器满足了渐近跟踪的要求.

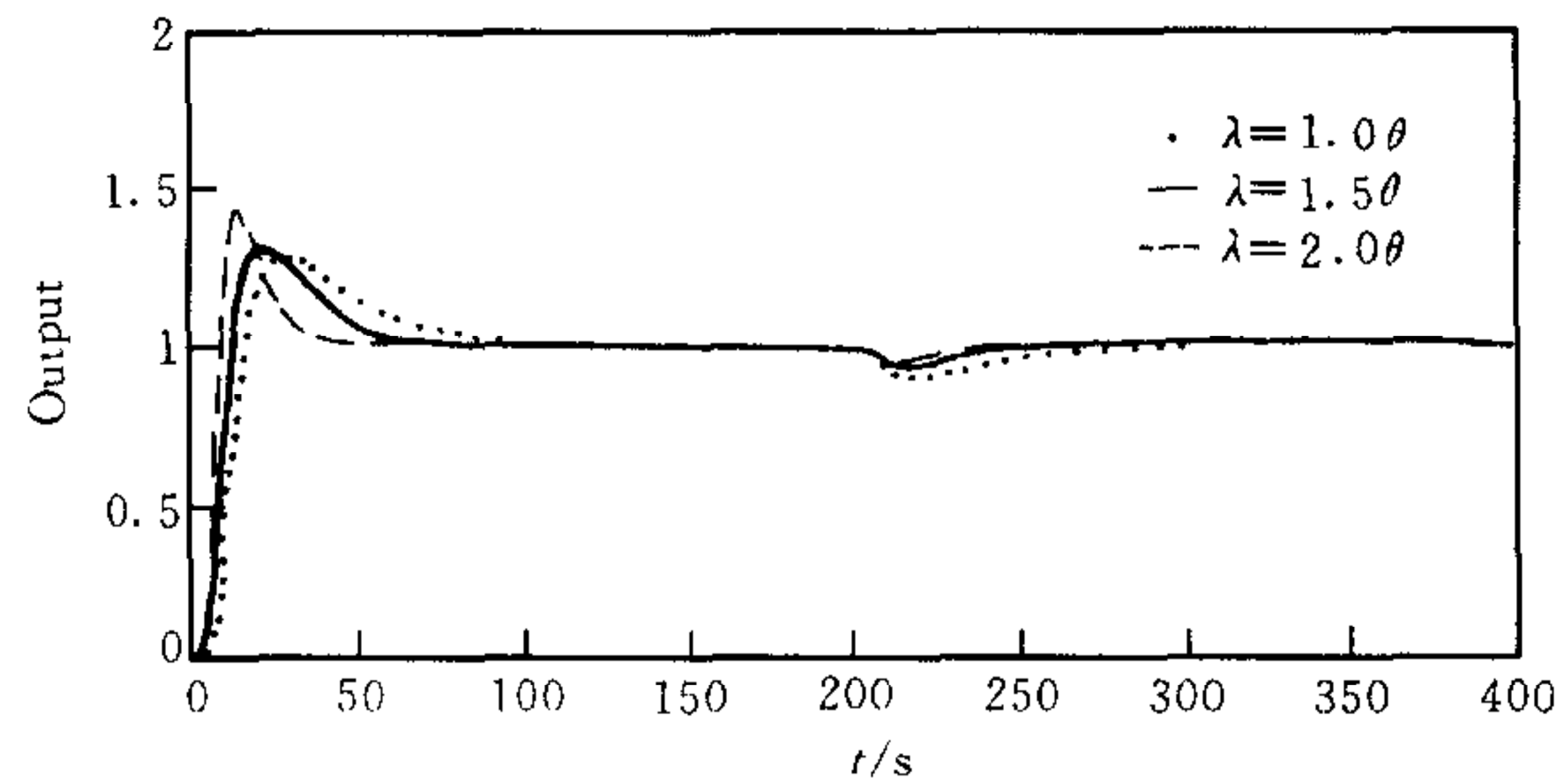


图 4 非自衡控制系统的响应

6 结论

作为一种基本的控制方法, Smith 预估器在过程控制理论中占有重要的地位,但是由于数学工具的缺乏,其解析设计问题一直没有得到解决. 本文在严格的理论基础上发展了自衡对象 Smith 预估器的解析设计方法.

非自衡对象是一类非常难控的对象,讨论这方面问题的文献不多. 应用 Smith 预估器控制非自衡对象的困难在于系统是 II 型的,对这种系统的设计,传统的过程控制理论没有提供有效的方法. 本文将自衡对象 Smith 预估器解析设计方法推广到非自衡对象的控制中,给出了这个问题的次最优解.

本文得到的控制器有几个优点. 一方面,控制器是通过最优设计方法解析得到的,不但能提供次最优的性能,应用时也非常方便. 另一方面,系统的鲁棒性可以方便地估计. 当系统中存在不确定性时,控制器的整定也非常方便.

参 考 文 献

- 1 Zhang W D, Sun Y X, Xu X M. Two degree-of-freedom Smith predictor for processes with time delay. *Automatica*, 1998, **34**: 1279~1282
- 2 Tan K K, Wang Q G, Lee T H, Bi Q. New approach to analysis and design of Smith predictor controllers. *AIChE J.*, 1996, **42**: 1793~1797
- 3 Santacesaria C, Scattolini R. Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty. *Automatica*, 1993, **29**: 1595~1597
- 4 张卫东, 孙优贤. 大纯滞后对象的 H_2 次最优控制. *控制理论及应用*, 1996, **13**: 496~499
- 5 张卫东, 孙优贤. 一类最优 Smith 预估器及其鲁棒整定. *自动化学报*, 1997, **23**: 660~663
- 6 Watanabe K, Ishiyama Y, Ito I. Modified Smith predictor control for multivariable systems with delays and unmeasurable step disturbances. *Int. J. Control*, 1983, **37**: 959~973
- 7 Zhang W D, Sun Y X. Modified Smith predictor design for integrator and time delay processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996, **35**: 2769~2772
- 8 张卫东. 过程控制解析设计方法研究[上海交通大学博士后研究报告]. 上海: 上海交通大学, 1998
- 9 Doyle J C, Francis B A, Tannenbaum A R. *Feedback Control Theory*. NY: Macmillan Publishing Company, 1992

张卫东 男, 1967 年生于黑龙江. 1990 年毕业于浙江大学科仪系, 1992 年在浙江大学电机系获硕士学位, 1996 年在浙江大学工业控制研究所获博士学位. 1996 年 5 月至 1998 年 5 月在上海交通大学从事

博士后研究工作. 目前是上海交通大学副教授. 作为第一作者发表论文 65 篇. 研究方向为过程控制理论、鲁棒控制理论及其应用和现场总线.

何 星 男, 副教授. 1987 年考入西北工业大学自动化系, 1990 年获学士学位. 1991 年开始在西北工业大学自动化系攻读硕士研究生, 1993 年 3 月获工学硕士学位. 1993 年至 1996 年在上海交通大学自动化系攻读博士学位. 毕业后留校任教至今. 主要研究兴趣包括离散控制、最优控制理论及其在工业生产过程中的应用.

许晓鸣 男, 教授, 博士生导师. 现任上海交通大学副校长. 德国洪堡奖学金获得者. 长期从事电气自动化、过程控制理论、鲁棒控制理论及应用和计算机网络研究, 承担过多项国家级基金和重点重大攻关项目, 发表学术论文 150 多篇, 获各类科技进步奖 3 项.

中国自动化学会 2000 年学术活动计划(续)

(上接第 3 期第 396 页)

序号	项目名称	主要内容	时间	人数	会期(天)	地点	联系人	备注
15	全国生物控制论与医学工程学术会议	生物控制论与医学工程专业委员会例行学术年会	3 季度	70	4	待定	陆惠民 北京朝阳区大屯路 15 号中科院生物物理所 邮编:100101 电话:62020077-531	由生物控制论与医学工程专业委员会和中国生物物理学会生物信息论与生物控制论专业委员会联合举办
16	发展智能机器人及其产业化大会	机器人专业委员会例行学术年会	3 季度	200	4	青岛	柳成林 沈阳市和平区三好街 90 号 邮编:110003 电话:(024)23910612	由机器人专业委员会主办
17	第 19 届中国控制会议	线性系统, 最优控制, 鲁棒控制, 预测控制, 随机控制, 适应控制, 模型降阶, 优化方法, 电力系统, 交通系统, 社会经济系统, 生物环境系统等	12 月 5 日	100	7	香港	刘智敏 北京中关村中科院系统科学所 邮编:100080 电话:62532161	由控制论专业委员会和香港工程师学会联合举办
18	当前自动化新技术发展信息交流会	专题研讨	4 季度	50	2	北京	同上	同上

(下转第 498 页)