第27卷 第1期
2001年1月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 27, No. 1
Jan., 2001

短文

给定值和干扰响应解耦的新型控制器设计[1)]

张卫东 许晓鸣 何 星

(上海交通大学自动化系 上海 200030)

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

摘 要 基于输入输出方法讨论时滞对象控制问题. 在传统控制结构基础上讨论了一种新型的控制结构，它可以使系统的给定值响应和干扰响应解耦，分别通过一个参数优化. 通过期望闭环传递函数定义了最优性能指标，然后解析地推导出控制器，保证了系统具有好的干扰抑制能力. 为了说明新的设计方法，文中给出了设计例子.

关键词 过程控制，时滞系统，Smith 预估器，干扰解耦.

NOVEL CONTROLLER DESIGN FOR DECOUPLING DISTURBANCE RESPONSE FROM SETPOINT RESPONSE

ZHANG Wei-Dong XU Xiao-Ming HE Xing

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

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

Abstract In this paper, the control of systems with time delay is discussed based on input/output methods. A new predictive control structure is studied in the frequency domain. The main feature of the new scheme is that the disturbance is decoupled from the setpoint response and thus can be adjusted separately. Hence, the resulted controller improves performance of the disturbance rejection. An optimal performance index is defined by desired closed loop transfer function and systematic design procedure is developed to derive the controller analytically. Examples are given to illustrate the method.

Key words Process control, time delay system, Smith predictor, disturbance decoupling.

1 引言

给定线性时不变控制对象，一个基本的设计问题是如何找到一个线性时不变的控制

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

收稿日期 1999-09-03 收修改稿日期 2000-02-28

器，它不但能镇定这个对象，并且能满足各种相互约束的设计要求，譬如好的给定值响应和干扰抑制能力等. 在过程控制中，已经发展了许多方法来设计这样的控制器. PID 控制器是最常用的一种控制器，可以采用经验公式来整定它[1]，也可以采用解析方法设计它[2]. 另外一种常用的控制器是 Smith 预估器，有许多文献研究了 Smith 预估器的设计问题，从不同角度入手发展了不同的设计方法[3~5]. 然而，由于控制结构的限制，这些方法不能同时优化系统的给定值响应和干扰抑制能力，只能在二者之间进行折衷.

Astrom 等人[6]针对一类非自衡对象的控制提出了一种新型的控制结构，其优点是系统的给定值响应和干扰响应是解耦的，可以分别进行优化. 但是他们给出的控制器太复杂，并且没有提供相应的整定方法. 文[7]对这一方法进行了改进，简化了控制器结构，给出了有效的整定方法. 文[8]指出这实际上是个两自由度控制结构，并将其推广到了稳定对象控制中. 本文首先利用内模控制结构来解释这种方法的本质，然后通过期望闭环传递函数定义最优性能指标，解析地推导控制器.

2 控制器设计

本文研究的控制对象用如下模型表示：

$$G_m(s)=\frac{K}{\tau s+1}e^{-\theta s},\quad G_{mo}=\frac{K}{\tau s+1}. \tag{1}$$

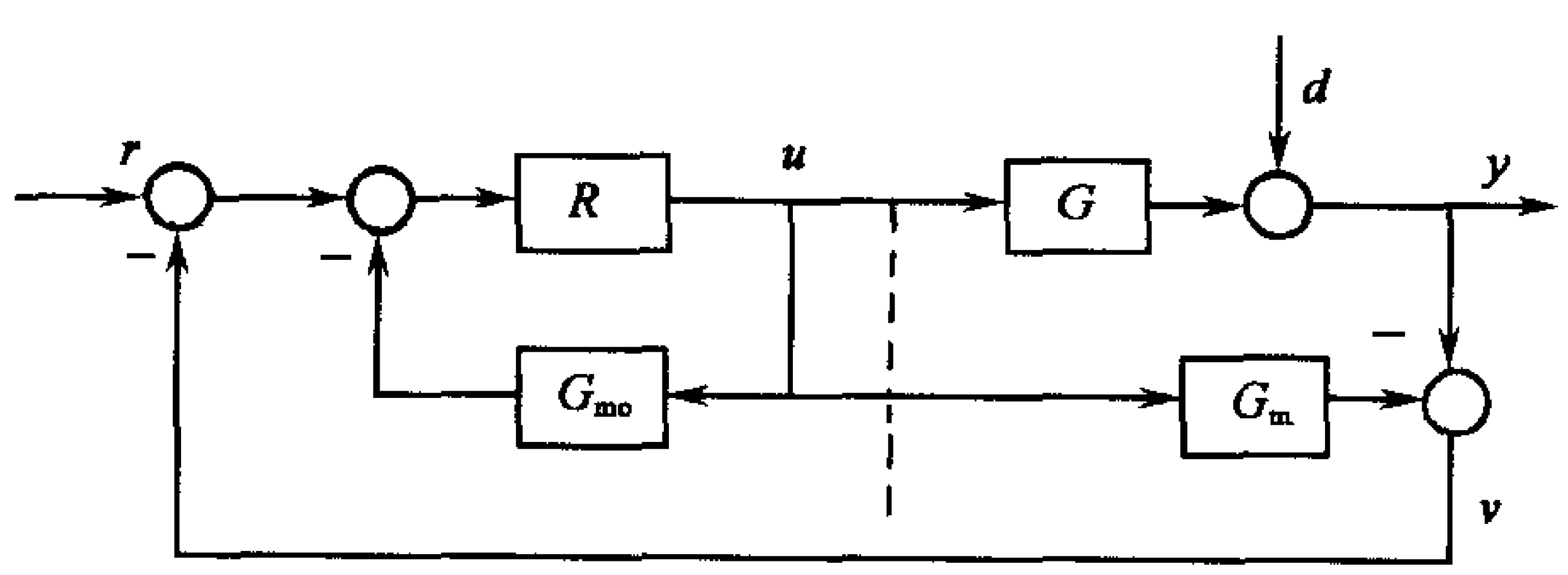

图1 Smith 预估器的结构

用于控制这个对象的传统 Smith 预估器如图1所示，其中 R 是控制器，G 是实际控制对象，反馈信号 v 加在参考输入端. 为了使干扰响应和参考输入响应解耦，现将反馈信号 v 加在控制变量上，如图中虚线所示. 因为模型精确时($G=G_m$)，反馈信号 v 为零，所以可以考虑将无滞后模型 G_{mo} 去掉，那么，从给定值 r 到输出 y 的传递函数为 $H_r=RG$. 在给定值响应中希望输出 y 尽量好地跟踪给定值 r，或者说 H_r 尽量逼近1，这可以表示为：$\min\|W(1-H_r)\|_2$. 式中 W 是权函数，因为在过程控制中给定值是阶跃函数，所以可将 W 取作 $1/s$[2]. 下标2表示2范数，传递函数 G 的2范数表示为

$$\|G\|_2=\left(\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|G(j\omega)|^2\mathrm{d}\omega\right)^{1/2}. \tag{2}$$

稳定传递函数的2范数是有限的，当且仅当 G 是严格正则的，且无极点在虚轴上. 利用著名的 Pade 近似展开纯滞后

$$e^{-\theta s}=\lim_{n\to\infty}\frac{Q_{nn}(-\theta s)}{Q_{nn}(\theta s)}, \tag{3}$$

其中

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

取 n 为足够大的整数，那么有

$$\|W(1-H_r)\|_2^2=\left\|\frac{1}{s}\left(1-\frac{RK}{\tau s+1}\frac{Q_{nn}(-\theta s)}{Q_{nn}(\theta s)}\right)\right\|_2^2=$$
$$\left\|\frac{Q_{nn}(\theta s)-Q_{nn}(-\theta s)}{sQ_{nn}(-\theta s)}\right\|_2^2+\left\|\frac{\tau s+1-RK}{s(\tau s+1)}\right\|_2^2.$$

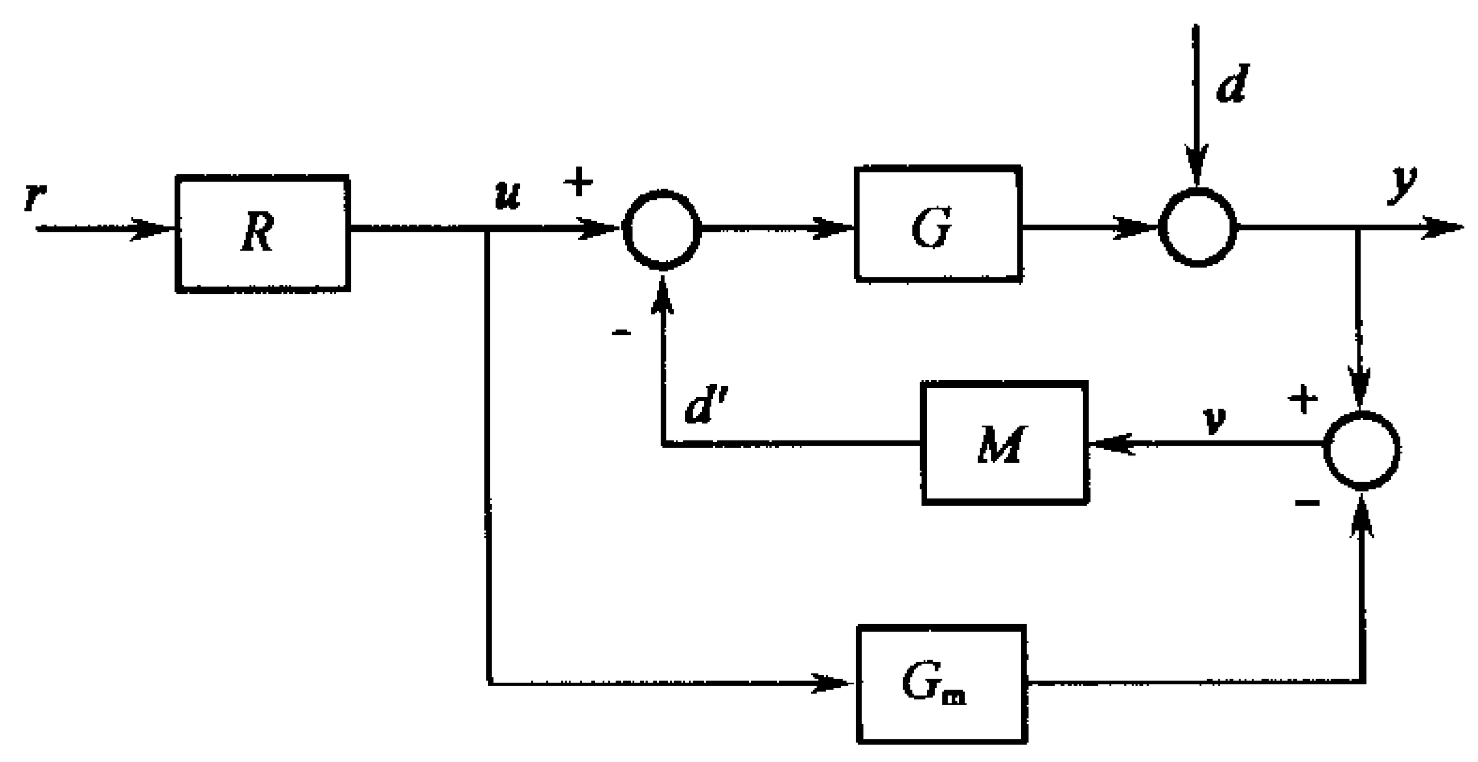

图2　修正的 Smith 预估控制器

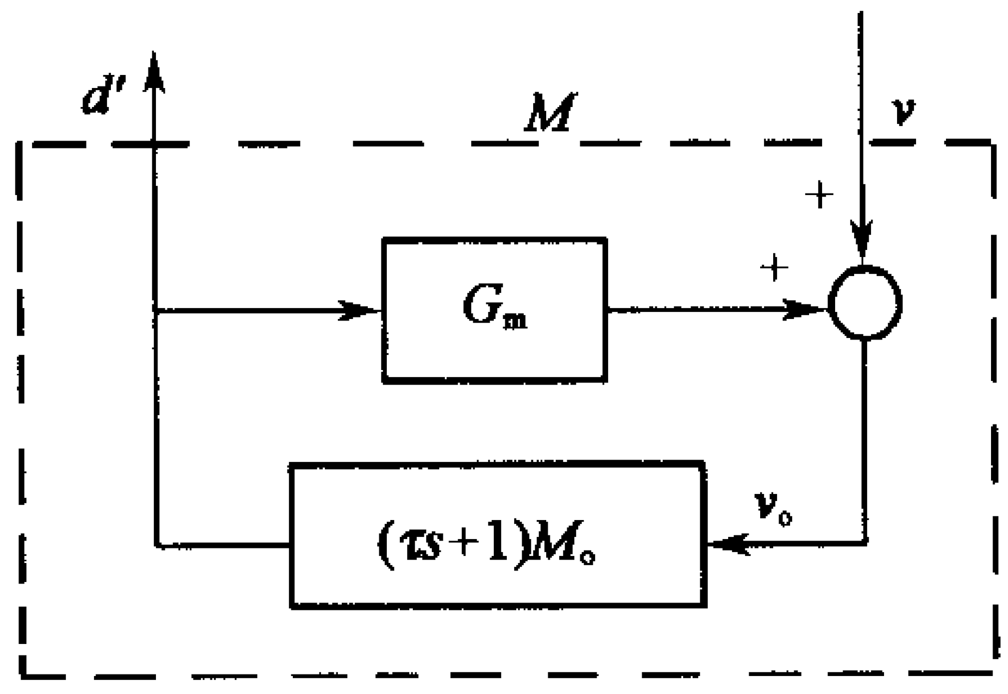

图3　补偿器 $M(s)$ 的结构

上面的最后一步利用了2范数的正交性质.使上式最小化,有

$$R=\frac{\tau s+1}{K}.$$

这是一个 PD 控制器.为了使控制器是物理可实现的并便于调节,引入低通滤波器,得到

$$R=(\frac{1}{K}+\frac{\tau}{K}s)\frac{1}{\lambda_1 s+1},\tag{4}$$

式中的 $\lambda_1>0$是可调的控制器参数.此时给定值响应为

$$H_r=RG=\frac{1}{\lambda_1 s+1}e^{-\theta s}.\tag{5}$$

闭环系统总是稳定的,响应速度由参数 λ_1单调地决定.当 λ_1趋向于零时,给定值响应趋向于最优.当模型失配时 λ 可以用来单调地调节系统的鲁棒性.当 λ 增大时,系统带宽减小,因而鲁棒性增强.

从干扰 d 到输出 y 的传递函数是

$$H_d=\frac{1}{1+G}=\frac{\tau s+1}{\tau s+1+Ke^{-\theta s}}.\tag{6}$$

虽然给定值响应和干扰响应解耦了,但是这个结构既不能抑制干扰导致的稳态误差,也不能对干扰响应进行优化.我们知道,Smith 预估器的基本思想是在经典反馈控制结构的基础上,引入一个预估补偿环节,使系统闭环特征方程不含纯滞后项,从而提高了控制质量.在传统的 Smith 预估控制结构中,H_r 和 H_d 的闭环特征方程相同,因此引入一个补偿环节就可以了.在本文的系统中 H_r 和 H_d 有着不同的闭环特征方程,为了使 H_d 的闭环特征方程不含纯滞后项,需要在由 v 到控制变量 u 反馈回路中再引入一个补偿环节 M(图2),M 应当具有这样的形式

$$M=\frac{(\tau s+1)M_o}{1-(\tau s+1)M_oG_m},\tag{7}$$

式中的 M_o 是个严格正则稳定的有理传递函数(图3).此时加在 u 上的反馈信号为$-d'$,那么干扰回路的传递函数变为

$$H_d = \frac{1}{1+MG} = 1 - KM_o e^{-\theta s}, \tag{8}$$

干扰响应已被解耦了.从内模控制的角度可以说明选择这样一个补偿环节的原因,并给出最优或次最优的设计结果.

当讨论干扰抑制问题时有 $u=0$,此时干扰回路可以等价为一个由 G 和 M 组成的单位反馈回路,M 相当于控制器,可以利用已有的单位反馈回路设计方法设计.但是由于纯滞后的存在,无法采用最优设计方法解析地设计单位反馈回路控制器.为此可在 M 中引入一个内部模型,即将 M 选为图3的形式,那么对应的内模控制器就是$(\tau s+1)M_o$. $(\tau s+1)M_o$ 应是个正则稳定的有理传递函数,它可以用解析方法进行设计[2].

定义控制系统性能指标为 $\min\|WH_d\|_2$,式中 W 是权函数。在过程控制中一般假定系统干扰是阶跃类型的,所以仍可将 W 取作$1/s$[2]. 利用全通 Pade 近似展开纯滞后,有

$$\|WH_d\|_2^2 = \left\| \frac{Q_{nn}(\theta s) - KM_o Q_{nn}(-\theta s)}{sQ_{nn}(\theta s)} \right\|_2^2.$$

由2范数的定义可得 $M_o(s)=1/K$,否则上面范数无界。上式已经是最小,所以

$$M_o = \frac{1}{K}. \tag{9}$$

根据前面的讨论 M_o 应是严格正则稳定的,所以可以将 M_o 取为

$$M_o = \frac{1}{K(\lambda_2 s+1)}, \quad \lambda_2 > 0, \tag{10}$$

式中的 $\lambda_2>0$是滤波常数,作为可调节的参数,用于优化干扰响应.它单调地表示了系统干扰抑制能力和鲁棒性之间的折衷:λ_2越小,干扰抑制能力越强,鲁棒性越差.把 M_o 代入到 H_d 中,得到最终的干扰回路的传递函数为

$$H_d = 1 - \frac{1}{\lambda_2 s+1} e^{-\theta s}. \tag{11}$$

在文[8]中给出了一种依赖于经验的设计方法,设计结果可能不是唯一的.本文控制器是通过最优设计方法得到的,结果是唯一的.通过引入适当的滤波器可以将本文结果与文[8]的最简结果等价起来.另外采用这种方法可以方便地将设计结果推广到高阶对象的控制中.

3 仿真结果及结论

考虑一个文[4]使用过的例子.控制对象是

$$G_m = \frac{1}{s+1} e^{-s}.$$

在时刻 $t=0$加入一个单位阶跃参考输入,在时刻 $t=30$加入一个干扰 $d=-1/s$. 文[4]给出的 Smith 预估器参数是 $P=2$, $I=1$. 采用 Ziegler-Nichols 方法整定 PID 控制器得到的参数是 $P=1.38$, $I=1.55$, $D=0.39$. 在本文方法中取 $\lambda_1=0.3$, $\lambda_2=0.2$. 当模型精确时,不同方法设计的系统的响应如图4所示.本文方法的给定值响应和干扰抑制能力都是最好的.

现在假设系统的纯滞后发生了10%的摄动,不改变几种方法的参数,它们的响应如图

5所示，可以看到本文方法的鲁棒性也很好．可调参数 λ_1和 λ_2可以用于优化系统响应，调节系统鲁棒性．小的 λ_1和 λ_2对应比较快速的响应，而大的 λ_1和 λ_2对应比较平缓的响应．

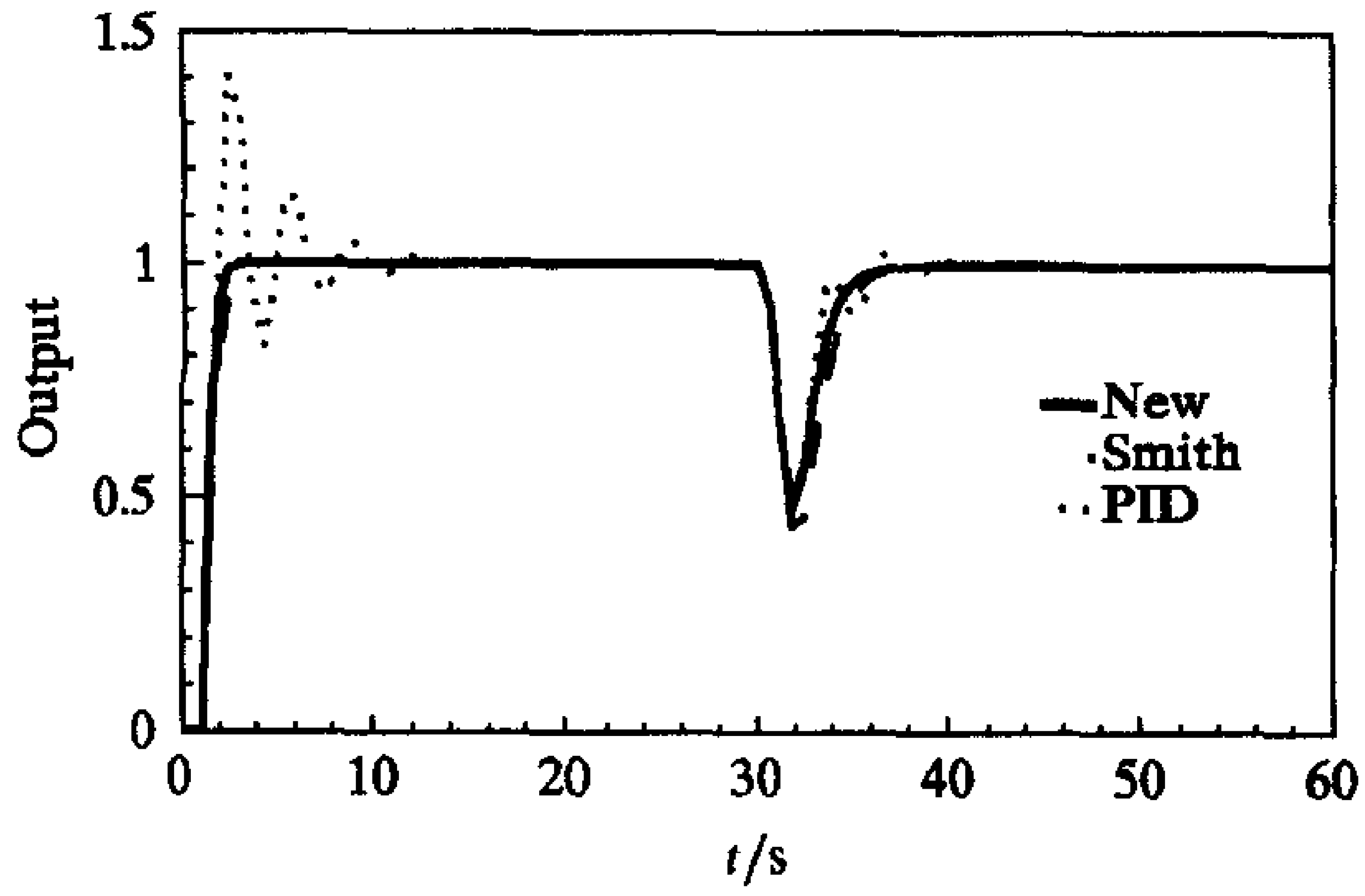

图4　标称系统的响应

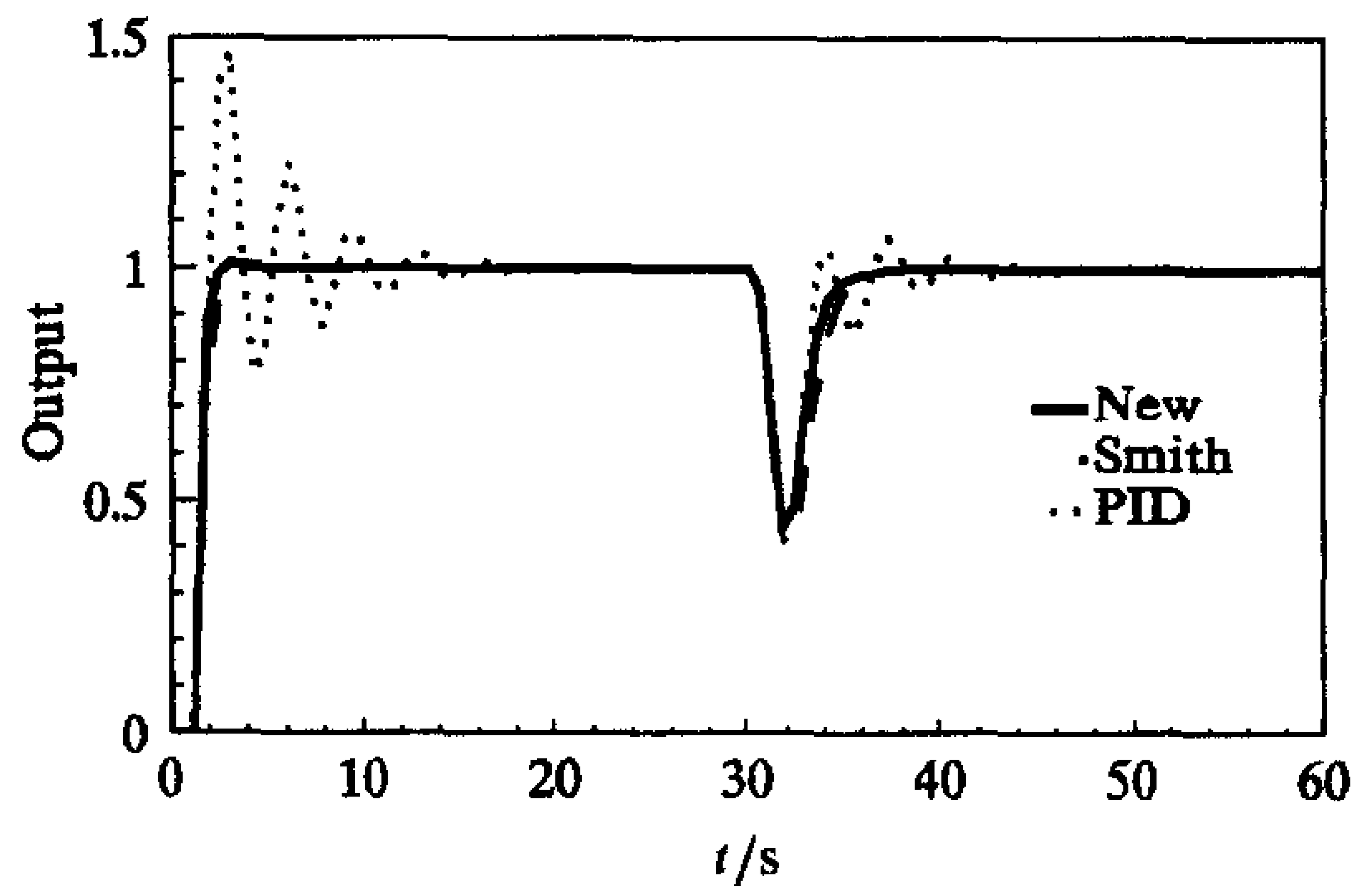

图5　摄动系统的响应

本文讨论了文[8]针对稳定控制对象发展的一种新型的控制结构，进行了两方面的深入探讨．一是在内模控制的基础上解释了新控制结构的本质，二是在最优控制理论的基础上发展了解析设计方法．证明文[8]的结果可以是最优的．仿真研究结果表明，本文提出的设计方法确实能得到满意的控制效果．

参 考 文 献

1 Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 1942, **64**: 759～768

2 张卫东，孙优贤．一类最优 Smith 预估器的设计及其鲁棒整定．自动化学报，1997，**23**(5)：660～663

3 Hung H P. A modified Smith predictor with an approximate inverse of dead time. *AIChE J.*, 1990, **36**: 1025～1031

4 Santacesaria C, Scattolini R. Easy tuning of Smith predictor in presence of delay uncertainty. *Automatica*, 1993, **29**: 1595～1597

5 Zhang W D, Sun Y X, Xu X M. Robust digital controller design: new results. *IEE Proc.*, *Part D*, 1998, **145**: 159～164

6 Astrom K J, Hang C C, Lim B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1994, **39**: 343～345

7 Zhang W D, Sun Y X. Modified Smith predictor for the integrator/dead time processes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996, **35**: 2796～2800

8 Zhang W D, Sun Y X. Two degree of freedom Smith predictor for processes with time delay. *Automatica*, 1998, **34**: 1279～1282

张卫东　上海交通大学教授．发表学术论文86篇，其中第一作者68篇．目前主持国家自然科学基金项目和上海市科技启明星项目各一项．研究方向为过程控制理论、鲁棒控制理论及其应用．

许晓鸣　教授，博士导师．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，承担过多项国家重点科研项目，发表学术论文300多篇，获各类科技进步奖3项．

何　星　副教授．1990年和1993年在西北工业大学获学士学位和工学硕士学位．1996年在上海交通大学获博士学位．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．