

# 红外成像目标模拟器方位系统的 对偶自校正 PID 控制

郑言海 庄显义 王昕宇

(哈尔滨工业大学仿真中心 哈尔滨 150001)

(E-mail: yanhai@zheng.com.cn)

**摘 要** 红外成像目标模拟器方位系统是一参数快时变系统,针对该系统的具体情况,提出了一种对偶自校正 PID 控制器.在每一自适应步,通过谱分解得到最优 PID 参数,然后基于双重指标进行对偶校正,得到一种既保持对偶效应,又十分简单易行的对偶自校正 PID 控制器,成功地消除了传统自适应控制系统的“关断”、“终止”和“猝发”等现象,收到了良好的控制效果.该控制器适于参数随机变化或快时变系统.

**关键词** 模拟器,对偶自校正 PID 控制器,快时变.

## DUAL SELF-TUNING PID CONTROL TO AZIMUTH SYSTEM OF INFRARED PHOTOGENIC OBJECTIVE SIMULATOR

ZHENG Yanhai ZHUANG Xianyi WANG Xinyu

(The Center of Simulation of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Azimuth system of infrared photogenic objective simulator is a system of fast time-varying parameters. A dual self-tuning PID controller is presented with respect to the special case of the system. At each adaptive step, the optimal parameters of PID controller are derived through online spectral factorization, then the controller is modified based on bicriteria. And a dual self-tuning PID controller that has dual effectiveness is derived and it is very simple for implementation. It successfully eliminates “turn off”, “windup” and “bursting” phenomena of conventional adaptive control systems. This controller is suitable for stochastic parameters or fast time-varying systems.

**Key words** Simulator, dual self-tuning PID controller, fast time-varying.

### 1 问题的阐述

红外成像目标模拟器是半实物仿真系统的关键部件,目标模拟器的精度决定着目标

位置和运动状态的仿真逼真度. 为了模拟目标在空中的位置和运动状态, 要求红外成像和投影装置能够实现在球面上的任意运动状态和轨迹. 运动机构如图 1 所示. 红外装置(小车)纬向运动由一绕中心旋转的大型弧形电机(俯仰电机)驱动, 经向运动由水平放置的弧形电机(方位电机)驱动俯仰框架来实现, 这样两个运动合形成小车的球面运动. 在这里我们称经向运动系统为方位系统, 其被控对象是俯仰框架(包括电机及其驱动的小车). 小车的工作状态是沿俯仰框架上下运动.

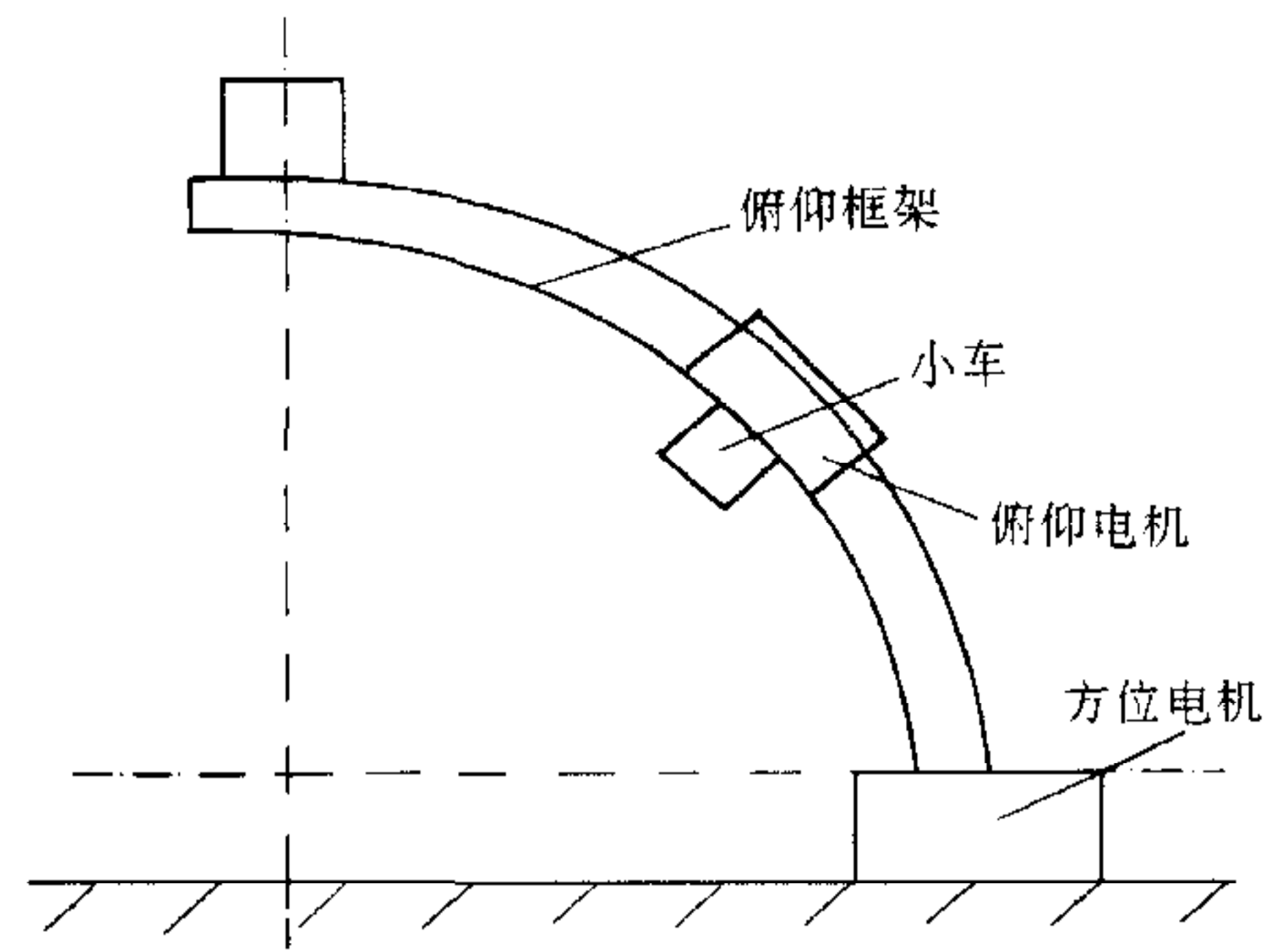


图 1 运动机构

由于小车较重且其绕中轴回转半径在很大范围内变化(0~2m), 这就使得方位系统在控制过程中转动惯量发生较大变化, 方位系统实际上是一参数快时变系统. 此时基于定常参数和一般反馈原理设计的控制器难以收到预期的控制效果. 自适应控制系统能够在线辨识对象参数, 因此采用自适应控制器是一自然的选择. 自校正 PID 是自校正思想和常规 PID 控制器相结合的产物, 它吸收了两者的优点, 设计参数少, 能够在线整定和校正 PID 控制器参数, 具有较强的适应能力; 但是自校正 PID 控制器和一般自适应控制器一样, 只能适用于未知定常参数或参数慢时变的系统, 不能用于参数具有随机扰动或快时变的系统, 且控制过程中易发生“终止(windup)”、“关断(turn off)”和“猝发(bursting)”等现象, 工程实现时会遇到诸多困难<sup>[1,2]</sup>.

80 年代 Feldbaum 在文献[3]中提出的随机最优控制策略具有双重功能, 因此又称对偶控制(dual control): 一方面, 施加到系统上的控制把过程状态纳入到预定轨迹; 另一方面, 又具有学习作用, 减小系统参数的不确定性, 提高估计精度. 为了分析和求解具有对偶作用的最优控制策略, 通常在假设最优解存在的前提下, 运用动态规划原理导出含有容许控制策略的目标泛函方程——Bellman 方程. 然而, 即使在十分简单的情况下 Bellman 方程也很难求出解析解, 数值求解又存在“维数灾”和多局部极小问题, 因此该最优控制策略仅具有理论意义. 多年来, 研究者们转而研究能够在线实现且保持对偶性能的次优控制策略, 并取得了一些成果. 具有代表性的有: Bar-Shalom 等在文献[4,5]中提出了一类具有普遍意义的称为“广义自适应对偶控制”的隐式方法. 它首先假设参数不确定性的学习由一个扩展的 Kalman 滤波器来完成, 然后根据控制问题的具体情况在状态空间中选择一条标称目标运动轨迹, 并通过 Taylor 级数在目标轨迹上将目标泛函展开至有限阶, 此时目标泛函分解为表达控制要求和表达估计要求的两部分, 最后利用搜索方法得到次优解. Moreno 等在文献[6]中引入块脉冲函数(BPF)将状态变量和控制变量在状态空间中多项式展开, 并按最优轨迹的具体分布进行状态空间的非均匀离散化, 在最优轨迹附近增加离散点, 以便精确描述该区域的动态行为. 须说明的是, 以上两种隐式算法仍较复杂, 而且必须满足过程动态在标称轨迹附近变化的假设, 因此难以在实时控制问题中广泛应用. Milito 等提出的 IDC 算法是显式算法中颇具代表性的一个<sup>[7]</sup>. 它是以信息序列的方差作为不确定性学习的精确度量, 计算量较小, 但是 IDC 不能用于具有任意时滞或非最小相位系统, 并且 IDC 只能处理定常的未知参数或参数慢时变系统, 不能用于参数随机变化

或快时变的系统. 针对 IDC 的前种缺陷, Chan 和 Qarrop 对性能指标进行了修正, 并和最小方差思想相结合, 得出了一种适用性更强的算法<sup>[8]</sup>; 1996 年, Filatov 等将 IDC 指标泛函分解为分别表达控制和学习要求的两个指标泛函, 即双重准则 (bicriteria), 进一步简化了算法<sup>[9]</sup>.

本文根据红外成像目标模拟器的实际情况, 首先给出确定性等价自校正 PID 控制器, 然后又基于 Filatov 双重准则进行对偶校正, 得出一种既保持对偶效应, 又非常简单易行的对偶自校正 PID 控制器: 该控制器能够适用于参数具有随机扰动或快时变的系统, 成功地防止了传统自适应控制系统的“终止”、“关断”和“猝发”等现象的发生, 收到了良好的控制效果.

## 2 控制对象参数化

对象模型可简化表示为

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{K_v/R}{s(\tau_m s + 1)}. \quad (1)$$

这里  $\theta(s)$  为输出角度拉氏变换;  $U(s)$  为输入电压拉氏变换;  $R$  为回转半径;  $K_v$  为电机增益系数;  $\tau_m = R_a J / (R_a K_D + K_T K_e)$ , 其数量级为  $10^{-1}(s)$ ;  $R_a$  为电枢电阻;  $J$  为转动惯量, 随着小车位置不同  $J$  的变化幅度约为 15%;  $K_D$  为转动部分的阻尼系数;  $K_T$  为电磁转矩常数;  $K_e$  为反电动势常数.

对式(1)离散化得离散时间模型

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}. \quad (2)$$

考虑系统噪声, 对象模型可进一步表示为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + \xi(k), \quad (3)$$

其中  $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$ ,  $B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}$ ,  $\xi(k)$  为白噪声.

## 3 最小二乘两级参数估计器<sup>[2]</sup>

过程  $A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + \xi(k)$  可表示为

$$y(k) = \phi^T(k)\theta + \xi(k), \quad (4)$$

其中

$$\theta^T = [b_1, b_2, \dots, b_{n_b}, a_1, a_2, \dots, a_{n_a}] = [b_1 : \theta_0^T]. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \phi^T(k) = & [u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_b+1), -y(k), \\ & -y(k-1), \dots, -y(k-n_a+1)] = [u(k) : \phi_0^T(k)]. \end{aligned} \quad (6)$$

最小二乘两级参数估计算法

$$P^{-1}(k+1)\hat{\theta}(k+1) = f(k+1), \quad (7)$$

$$P^{-1}(k+1) = \alpha(k+1)P^{-1}(k) + \phi(k+1)\phi^T(k+1), \quad (8)$$

$$f(k+1) = f(k) + \phi(k+1)y(k+1). \quad (9)$$

这里  $\alpha(k+1)$  为遗忘因子,  $\alpha(k+1)$  在 0.9—1 之间选择;  $P^{-1}(k+1)$  为协方差矩阵的逆矩

阵、控制实践证明最小二乘两级参数估计器具有很好的数值特性。

## 4 自校正 PID 控制器参数的优选

### 4.1 自校正 PID 控制器的表示

模拟 PID 的理想算式

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (10)$$

$$e(t) = y_r(t) - y(t). \quad (11)$$

这里  $K_p$  为比例系数;  $T_I$  为积分时间;  $T_D$  为微分时间; 采用反向差分近似上式中的微分项和差分, 得

$$u(k) = u(k-1) + p_0 e(k) + p_1 e(k-1) + p_2 e(k-2), \quad (12)$$

式中

$$\begin{cases} p_0 = K_p + K_I + p_2, \\ p_1 = -K_p - 2p_2, \\ p_2 = K_D = \frac{K_p T_D}{T_s}, \\ K_I = \frac{K_p T_s}{T_I}, \end{cases} \quad (13)$$

$T_s$  为采样周期,  $K_I$  为积分系数,  $K_D$  为微分系数。

由算式(12)可导出

$$F(z^{-1})u(k) = H(z^{-1})y_r(k) - G(z^{-1})y(k). \quad (14)$$

式(14)可代表一大类 PID 控制器, 这样 PID 控制器参数就可根据一定指标进行优选. 将式(14)代入式(3)得闭环系统方程

$$(AF + BG)y(k) = HB y_r(k) + F\xi(k), \quad (15)$$

取

$$F(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1 + f_2 z^{-1}), \quad -1 < f_2 < 0, \quad (16)$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad (17)$$

$$H(z^{-1}) = G(1) = g_0 + g_1 + g_2. \quad (18)$$

此时, 相应的 PID 控制策略可表示为

$$u_{ce}(k) = \left[ -K_p - \frac{K_D(1 - z^{-1})}{1 + f_2 z^{-1}} \right] y(k) + \frac{K_I}{(1 - z^{-1})(1 + f_2 z^{-1})} [y_r(k) - y(k)]. \quad (19)$$

式(16~19)各系数满足下列关系

$$\begin{cases} g_0 = K_p + K_I + K_D, \\ g_1 = K_p(f_2 - 1) - 2K_D, \\ g_2 = K_D - f_2 K_p. \end{cases} \quad (20)$$

这里  $u_{ce}(k)$  下标 'ce' 表示是依确定性等价假设 (certainty equivalence assumption) 方法而设计的控制器;  $u_{ce}(k)$  用来设计后面的对偶控制器。

## 4.2 自校正 PID 控制器参数的优选

为了优化 PID 控制器参数  $g = [g_0, g_1, g_2]^T$ , 可极小化如下指标泛函

$$J_{yu} = E\{(y(k) - y_r(k))^2 + ru^2(k) | \Psi(k)\}, \quad 0 < r \leq 1; \quad (21)$$

$$\Psi_k = \{u(0), \dots, u(k-1); y(0), \dots, y(k)\}, \Psi_0 = \{y(0)\}. \quad (22)$$

**定理<sup>[1]</sup>1.** 使式(21)取极小值的闭环系统特征多项式  $A_m(z^{-1})$  满足

$$A_m(z^{-1})A_m(z) = rA(z^{-1})A(z) + B(z^{-1})B(z). \quad (23)$$

式(21), (23)中  $r$  为控制信号幅值加权, 取小值时控制动作较大, 取大值时控制动作较小. 这样, 在每一自适应步使系统闭环特征多项式等于  $A_m(z^{-1})$ , 即

$$A(z^{-1})F(z^{-1}) + B(z^{-1})G(z^{-1}) = A_m(z^{-1}). \quad (24)$$

求解(24)式即可得到优化的 PID 参数.

## 5 对偶自校正 PID 控制器设计

取如下双重指标<sup>[9]</sup>

$$J_k^c = E\{(y_n(k+1) - y(k+1))^2 | \Psi_k\}, \quad (25)$$

$$J_k^d = -E\{(y(k+1) - \hat{\theta}^T(k)\phi(k))^2 | \Psi_k\}, \quad (26)$$

$y_n$  为系统在理想控制律下的理想输出, 即无偏估计时的输出. 对偶控制律

$$u(k) = \arg \min_{u(k) \in U_k} J_k^d, \quad (27)$$

其中

$$U_k = \{u_c(k) - \mu(k); u_c(k) + \mu(k)\}, \quad (28)$$

$$\mu(k) = f(P(k)), \quad (29)$$

$$u_c(k) = \arg \min_{u(k)} J_k^c, \quad (30)$$

$u_c(k)$  为使指标式(25)极小化的谨慎控制律, 使指标式(26)极小的对偶控制律在以  $u_c(k)$  为中心的  $U_k$  内取值. 取

$$f(P(k)) = \eta(\text{tr}\{P(k)\})^k, \quad 0 < \eta < 3 \times 10^{-9}, 1 \leq k \leq 4. \quad (31)$$

为进一步简化控制器计算, 令

$$y_n(k+1) = \hat{y}_n(k+1) = \hat{b}_1(k)u_{ce} + \hat{\theta}_0^T(k)\phi_0(k), \quad (32)$$

此时定义

$$\bar{P}(k) = E\{(\theta - \hat{\theta}(k))(\theta - \hat{\theta}(k))^T | \Psi_k\} = \sigma_\xi^2 P(k) = \begin{bmatrix} \bar{p}_{b_1}(k) & \bar{p}_{b_1\theta_0}^T(k) \\ \bar{p}_{b_1\theta_0}(k) & \bar{P}_{\theta_0}(k) \end{bmatrix}, \quad (33)$$

则

$$\begin{aligned} J_k^c &= E\{(\hat{y}_n(k+1) - y(k+1))^2 | \Psi_k\} = \\ & \phi_0^T(k) \bar{P}_{\theta_0} \phi_0(k) + \hat{b}_1^2(k) u_{ce}^2(k) + (\hat{b}_1^2(k) + \bar{p}_{b_1}(k)) u^2(k) \\ & + (2\bar{p}_{b_1\theta_0}^T(k) \phi_0(k) - 2\hat{b}_1^2(k) u_{ce}(k)) u(k) + \sigma_\xi^2. \end{aligned} \quad (34)$$

令  $\frac{\partial J_k^c}{\partial u} = 0$ , 则得谨慎控制器

$$u_c(k) = \frac{\hat{b}_1^2(k)u_{ce} - \bar{\mathbf{p}}_{b1\theta_0}^T(k)\phi_0(k)}{\hat{b}_1^2(k) + \bar{p}_{b1}(k)}. \quad (35)$$

在域  $U_k$  内极小化(26)式得对偶控制器

$$u(k) = u_c(k) + \mu(k)\text{sign}\{\bar{p}_{b1}(k)u_c(k) + \bar{\mathbf{p}}_{b1\theta_0}^T(k)\phi_0(k)\}. \quad (36)$$

控制系统结构如图 2 所示.

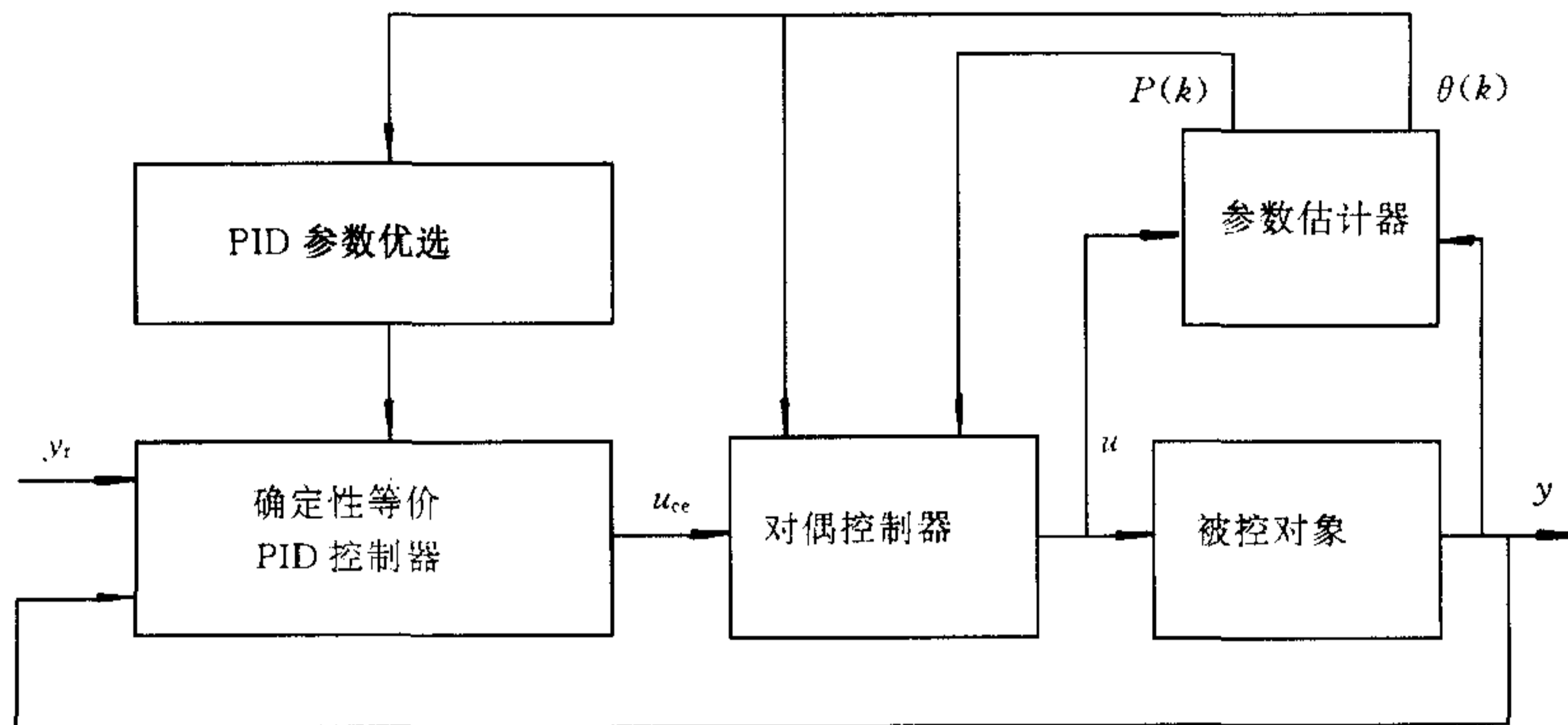


图 2 对偶自校正 PID 控制系统结构

## 6 仿真实验

采样周期  $T_s = 0.025\text{s}$ ; 转动惯量  $J$  在  $[J_n, J_n + 15J_n\%]$  内随机变化,  $J_n$  为标称转动惯量; 参考输入  $y_r$  为周期等于  $0.8\text{s}$  的方波信号; 仿真时考虑系统饱和特性. 常规自校正 PID 控制器和对偶自校正 PID 控制器控制效果分别如图 3~图 6 所示. 为清楚起见, 图中只表示出了第一周期的控制结果.

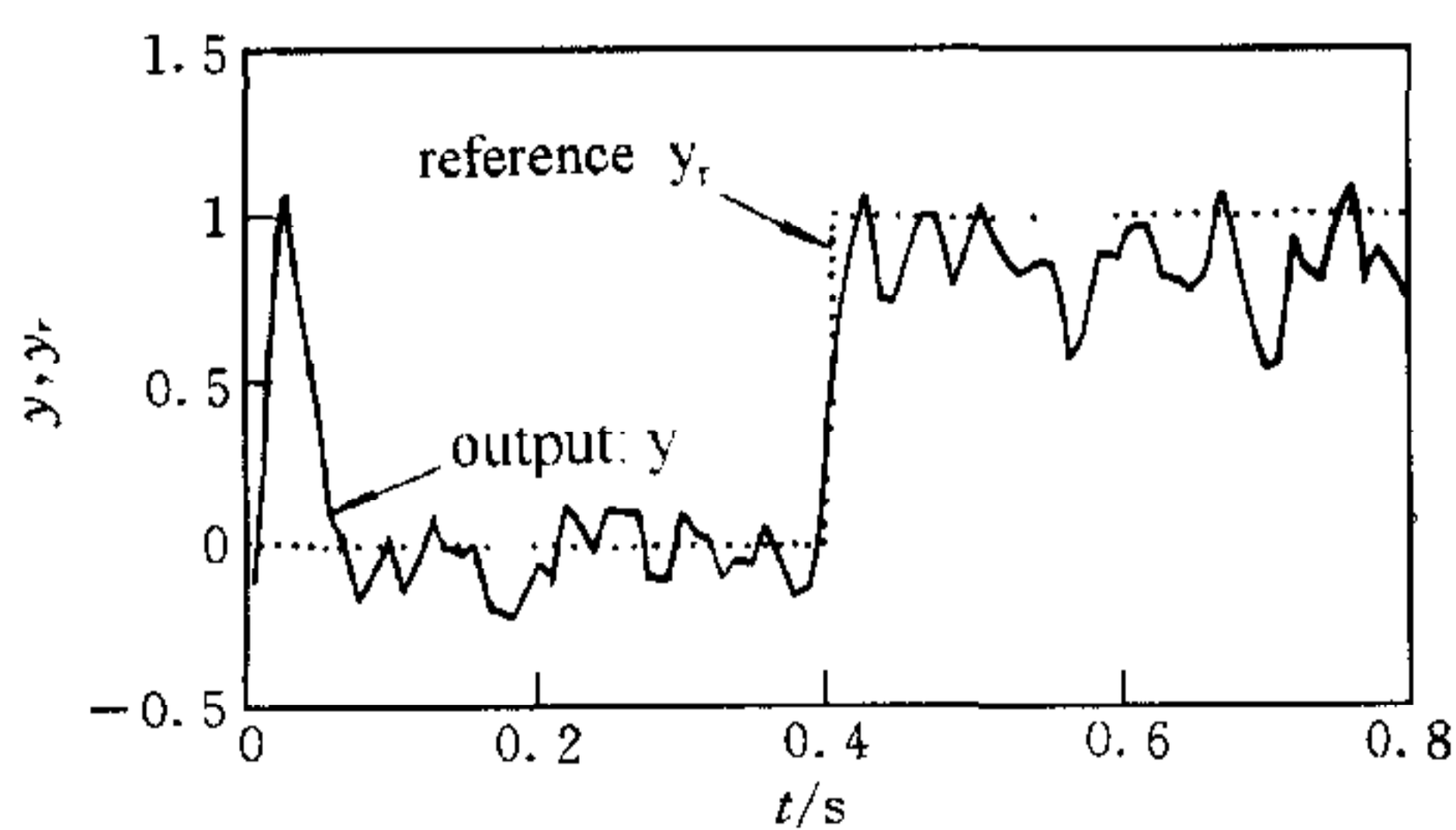


图 3 常规自校正 PID 控制系统输出

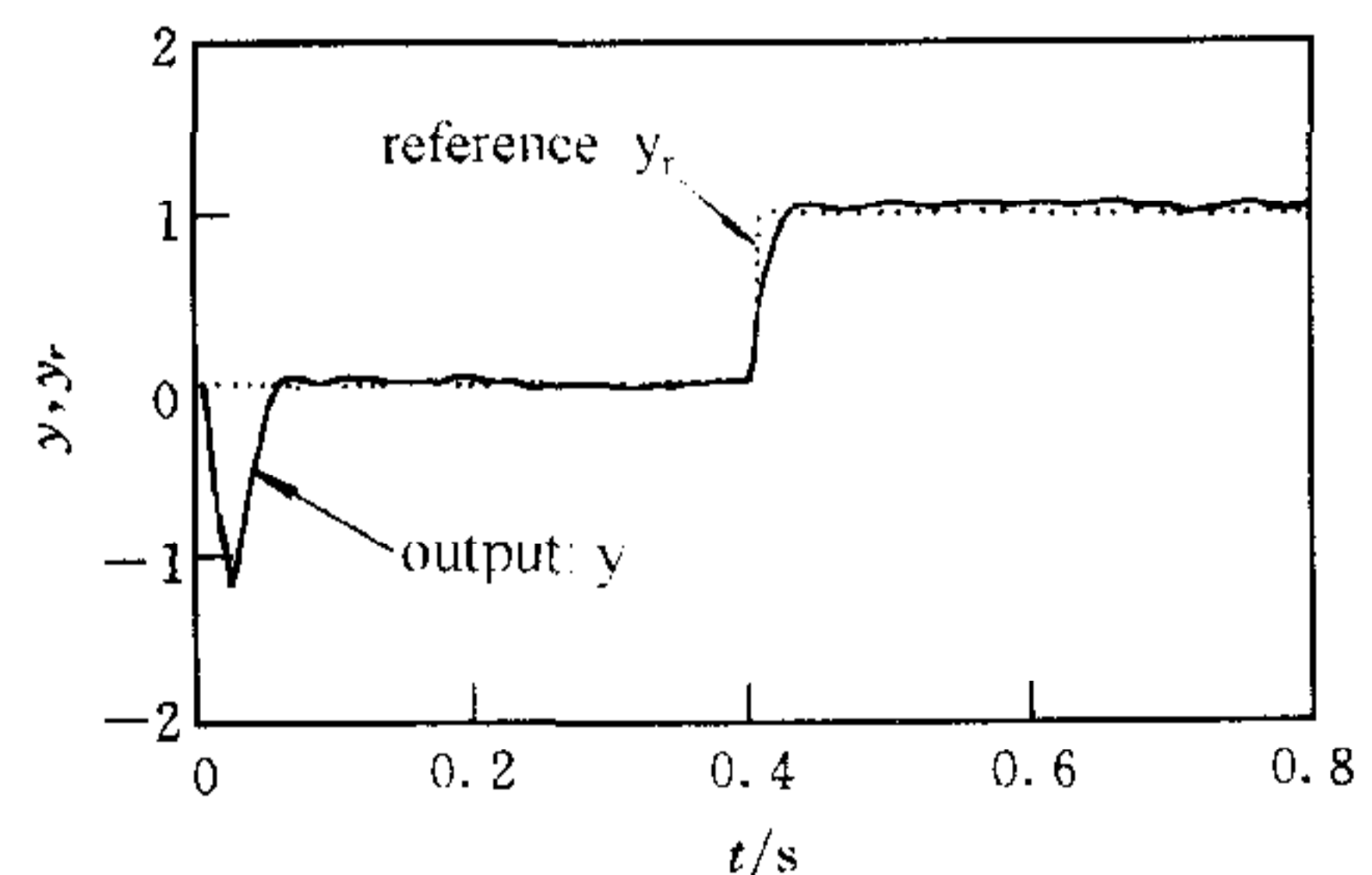


图 4 对偶自校正 PID 控制系统输出

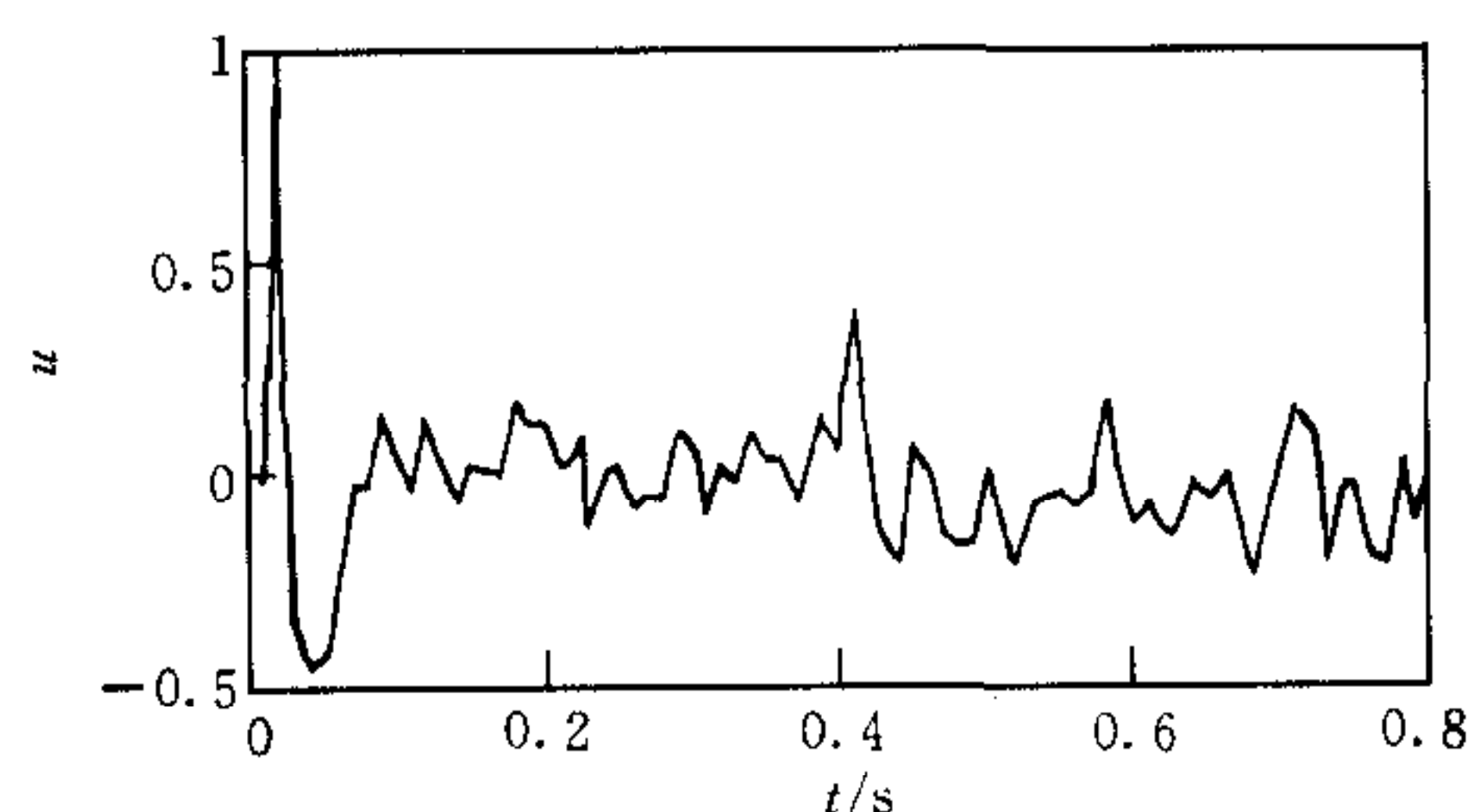


图 5 常规自校正 PID 控制信号

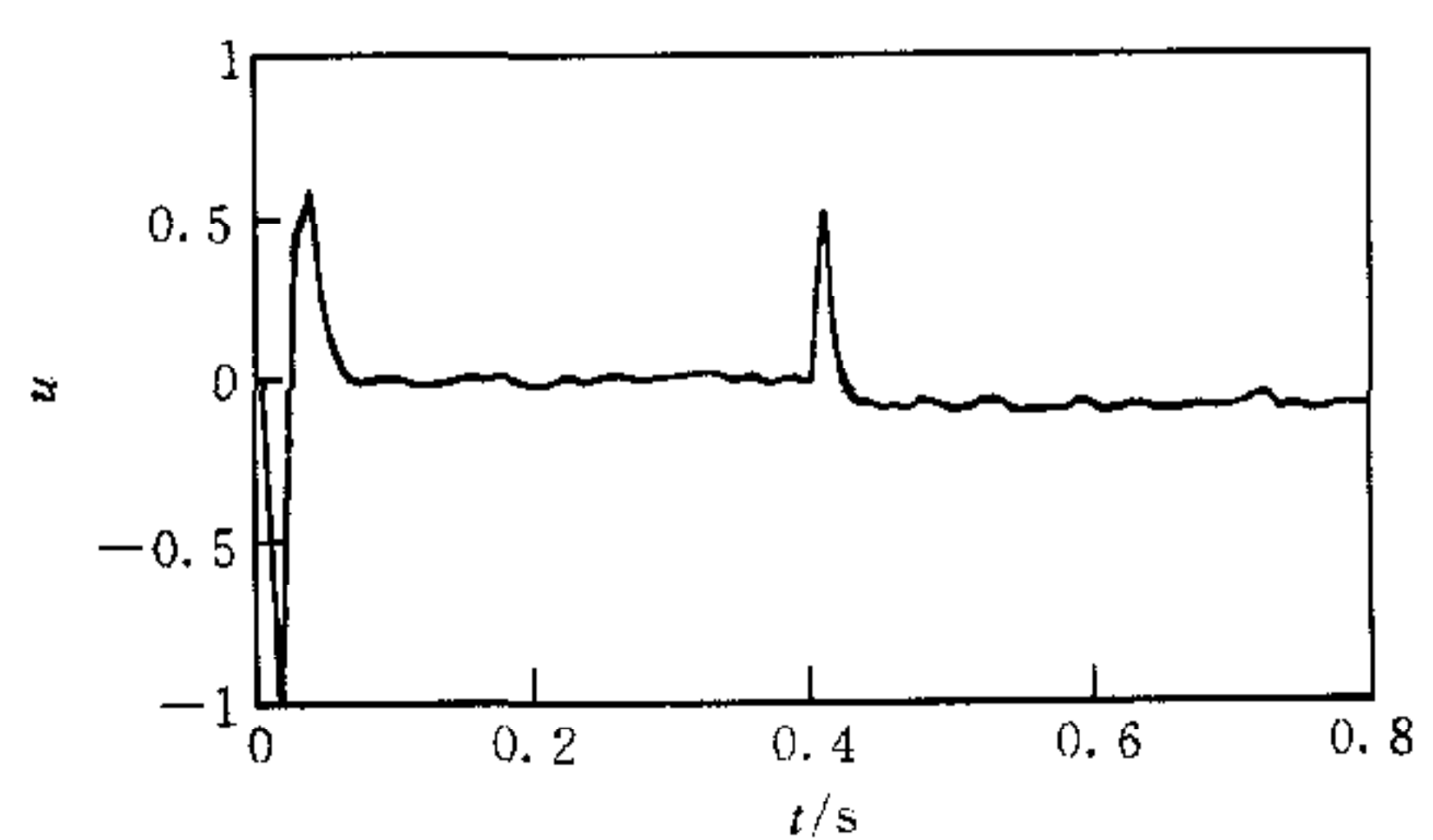


图 6 对偶自校正 PID 控制信号

从以上仿真结果可以看出,在被控对象参数随机变化时常规自校正 PID 控制器消耗控制能量较大,控制效果很差,以致在工程中无法应用.而对偶自校正 PID 控制器,由于其对偶效应,能很好地适应系统参数的快时变,消耗控制能量较小,输出平稳,误差很小,收到了很好的控制效果.另外,对偶效应还会大大改善被控对象的低速特性.为了验证算法的有效性,仿真时选取的被控对象的初始参数值离其真值较远,因而,在起始时刻无论常规自校正 PID 控制器还是对偶自校正 PID 控制器都有较大的脉动.由于对偶自校正 PID 控制器和被控对象参数协方差矩阵  $P$  密切相关,在启动时,根据本文所选初始值,被控对象参数存在较大的不确定性,控制器较为谨慎,学习信号较大,致使系统产生如图 4、图 6 所示的脉动.结合离线辨识,选择合适的初始参数值,可使启动时的超调量降至合适的范围.

## 7 结束语

本文把对系统参数不确定性的精确度量和学习作用融入到自校正 PID 控制器的设计之中,得到一种具有很好鲁棒性的对偶自校正 PID 控制器,成功地克服了传统自适应控制系统的一些缺点,使控制品质有很大提高.该控制器算法简单,实时性好,具有广泛的工程适用性.

## 参 考 文 献

- 1 李清泉. 自适应控制理论、设计与应用. 北京:科学出版社,1990
- 2 Radke F, Isermann R. A parameter-adaptive PID-controller with stepwise parameter optimization. *Automatica*, 1987, **23**(4):449~457
- 3 Feldbaum A A. Dual control theory: I - IV. *Automat. Remote Control*, 1960, **21**:874~880, 1033~1039; 1961, **22**:1~12, 109~121
- 4 Bar-shalom Y, Wall K D. Dual control and uncertainty effects in macroeconomic systems optimization. *Automatica*, 1980, **16**(2):147~156
- 5 Bar-shalom Y. Stochastic dynamic programming: cautions and probing. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1981, **AC-26**(5):1184~1195
- 6 Moreno L, Acosta L, Sanchez J L. Dynamic programming approach for nonlinear systems. In: IEE Proc. D. Control Theory Application, 1994, **141**(6):409~417
- 7 Milito R, Padilla C S, Padilla R A. *et al.* An innovations approach to dual control. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1982, **AC-27**(1):132~137
- 8 Chan S S, Zarrop M B. A suboptimal dual controller for stochastic systems with unknown parameters. *Int. J. Control*, 1985, **41**(2):507~524
- 9 Filatov N M, Keuchel U, Unbehauen H. Dual control for unstable mechanical plant. *IEEE Control Systems* 1996, **16**(4): 31~37

**郑言海** 1970年生,博士生,研究领域为自适应控制,智能控制,最优控制,鲁棒控制.

**庄显义** 1935年生,1961年毕业于哈尔滨工业大学自动控制系,长期从事控制理论和伺服技术的教学与科研工作,现为哈工大控制工程系教授,博士生导师.

**杨昕宇** 1974年生,哈尔滨工业大学硕士研究生,研究方向为:最优控制,鲁棒控制.