

位置伺服系统的学习控制研究

夏承光

(哈尔滨工业大学电气工程系 500061)

肖锦

(北京卫星环境试验工程研究所 100029)

王晓冬

(哈尔滨工业大学电气工程系 150006)

摘 要

本文通过对位置伺服系统的学习控制的实验研究,提出系统滞后是学习控制过程发散的主要原因。针对这一问题,文中提出了三种解决办法,即给定超前法、给定滤波法和给定超前滤波法,并在实验中取得了满意的效果。

关键词: 学习控制、位置伺服系统,给定超前滤波。

一、引 言

学习控制的提出,可以追溯到60年代,但直到80年代才得以迅速发展。随着计算机、机器人、数控等技术的发展,日本学者 Sr.Arimoto (有本卓) 等人根据某些工业机器人的自身运动特点,即重复运动的特点,发展了学习控制,提出了P型、PD型、PI型、D型等学习控制律,从理论上证明了它们的收敛性,并在机器人上做了实验,取得了不少成果^[1-6]。

所谓学习控制,简言之,就是寻找一个理想的输入特性曲线,使被控对象产生一个期望的运动,即对有限时间域定义的期望响应 $y_d(t)$, $t \in [0, T]$, 寻找某种给定 $u_k(t)$, $t \in [0, T]$, k 为寻找次数,使系统响应 $y_k(t)$, $t \in [0, T]$ 在某种意义上比 $y_0(t)$ 有所改善。称这一寻找过程为学习控制过程,当 $k \rightarrow \infty$ 时,有 $y_k(t) \rightarrow y_d(t)$, 则称学习控制过程收敛。

图 1(a) 是一级递推形式的学习控制框图,其学习控制规律为

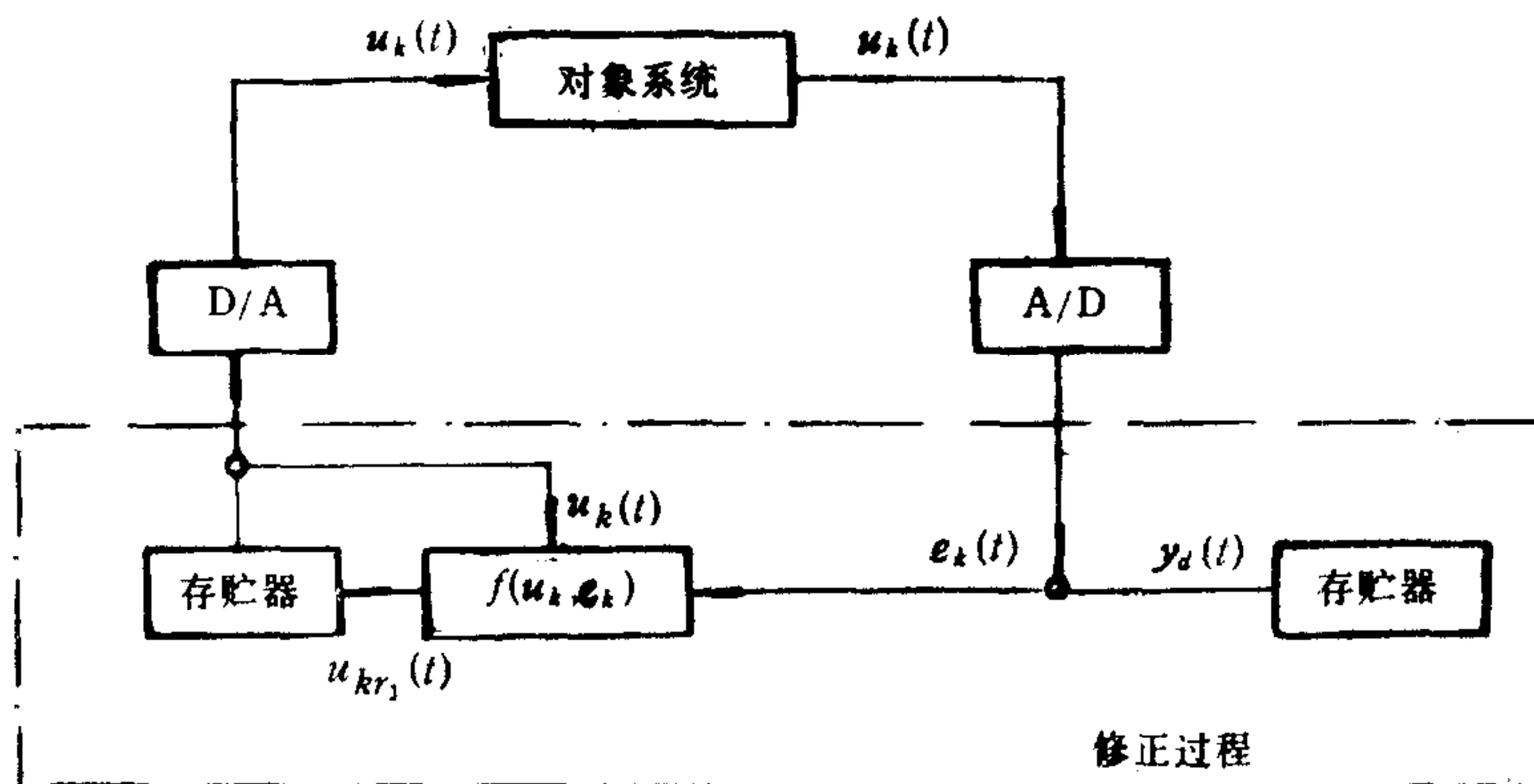
$$u_{k+1}(t) = f(u_k, e_k),$$

其中, $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$ 。

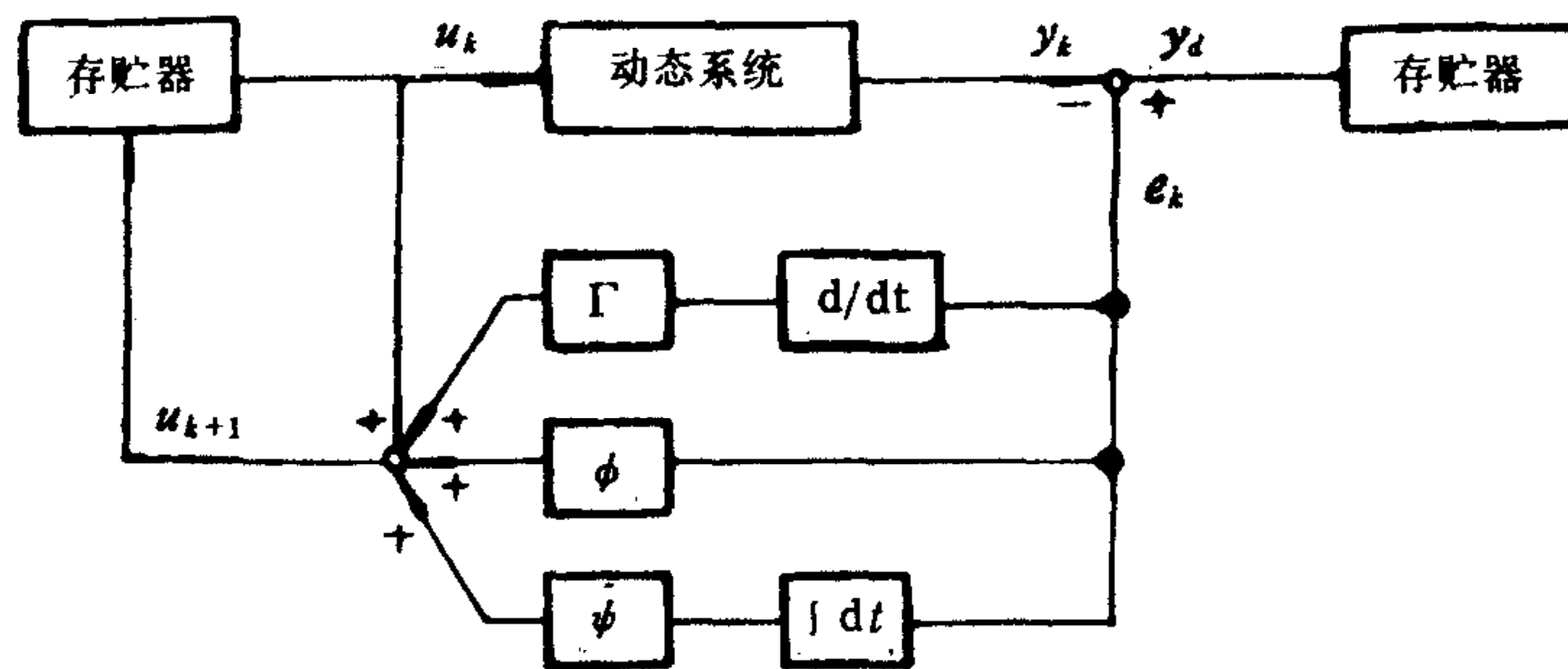
由图 1(b) 的 PID 型学习控制框图,可将学习控制律写成

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \phi e_k(t) + \psi \int e_k(t) dt + \Gamma \frac{de_k(t)}{dt}, \quad (1)$$

此式包含了 P,PI,PD,D 等型的学习控制律,只须分别令 ϕ, ψ, Γ 或其各种组合为零,即可得见。



(a) 一级递推形式的学习控制框图



(b) PID 型学习控制框图

图 1 学习控制结构框图

这种控制方案的突出优点是：

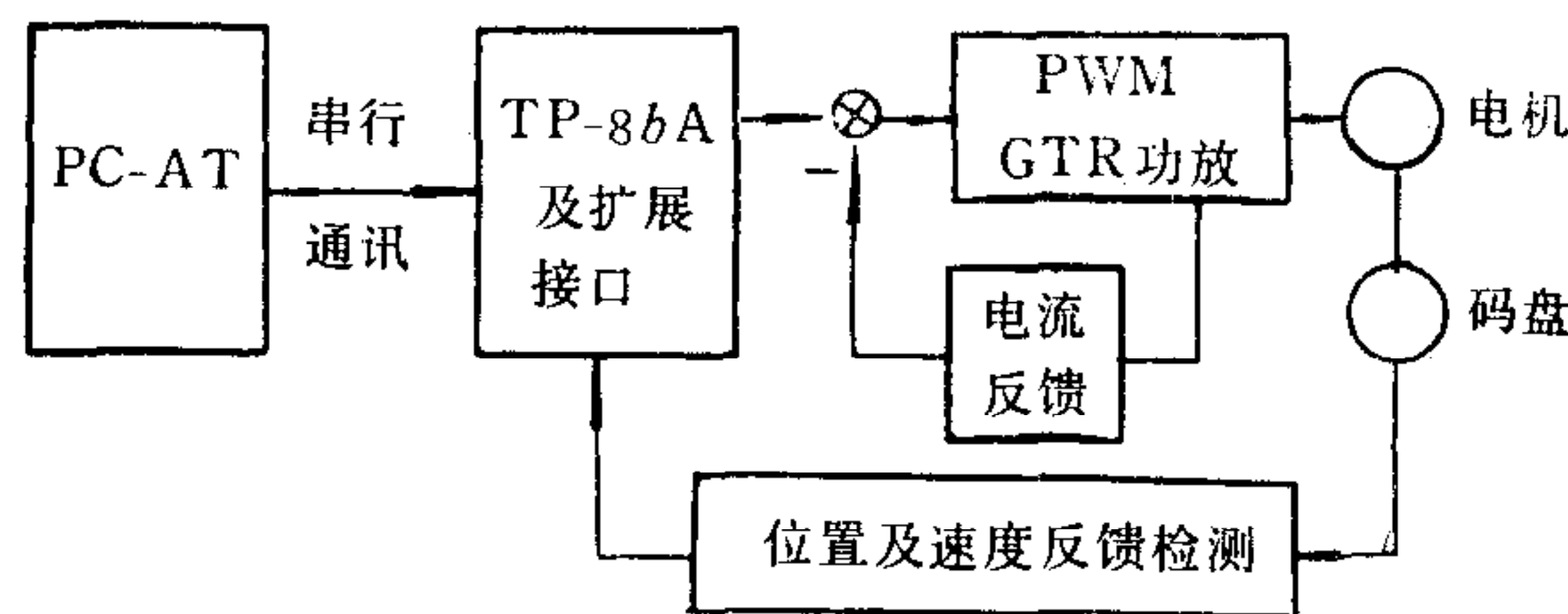
- 1) 学习过程中仅需测量系统响应与期望值的误差,按学习控制律对给定系统作简单的递推计算,控制律简单,计算量小,便于实现;
- 2) 只要系统承受的未知干扰在每一次试验中都以同样规律和方式出现,则学习控制可以有效地削弱以至消除其影响。

任何具有重复运动性质的系统,均可以采用学习控制提高它的轨迹跟踪精度。因此学习控制特别适合在工业机器人、数控机床等控制系统中应用。

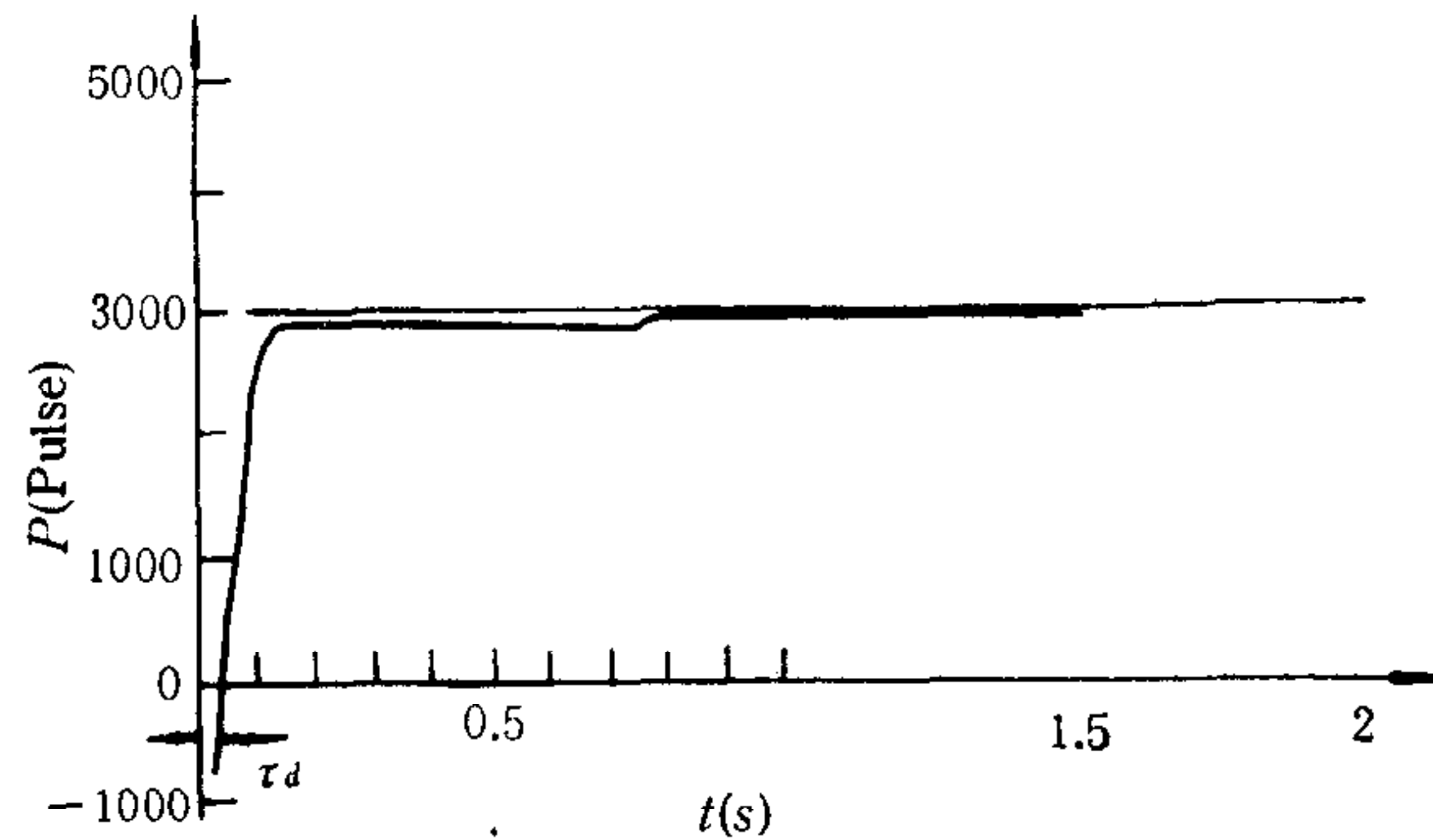
位置伺服系统是具有一定的动、稳态性能的闭环系统,是工业机器人、数控机床中的典型环节。本文试图在一套位置伺服系统上进行 PID 型学习控制律的研究,以期创造工程应用的前景。

二、实验系统的构成及算法实现

图 2(a) 是研制的学习控制系统的构成框图。系统采用上级机 (PC-AT) 与下级机 (8086CPU 单板机) 两级计算机控制。上级机完成学习控制算法, 并给定、响应、误差曲线的显示和菜单管理, 软件用 C 语言编写。下级机作为直接数字控制, 完成位置环的实时控制 (PID 加前馈)、速度反馈计算和位置测量。位置伺服系统是具有位置环、速度环和电流环的三环结构, 由 PWM 的 GTR 功率放大器驱动直流电机。检测元件是增量光电码盘。上、下级机之间采用半双 2 串行通讯。实验系统既充分利用了上级机的内存资源, 也充分发挥了下级机快速实时控制的特点。



(a) 学习控制系统构成框图



(b) 位置伺服系统的阶跃响应

图 2 学习控制实验系统

由图 2(b) 位置伺服系统的阶跃响应曲线得知, 系统大约存在 $\tau_d = 30\text{ms}$ 的滞后, 这是由单板机 10ms 的采样延时和控制系统的结构引起的。

下级机的给定和伺服系统的测量都是增量式的, 必须将(1)式改写为增量表达式¹⁾。在采样时刻 $t = iT_s$, (T_s 为采样周期)有

$$U_{k+1}(i) = U_k(i) + \Phi e_k(i) + \Phi T_s \sum_{j=0}^i e_k(j) + \frac{\Gamma}{T_s} [e_k(i) - e_k(i-1)],$$

令

1) 实验系统是单输入、单输出系统, 故下文公式中的变量不再写成向量形式。

$$U[k][i] = U_k(i) - U_k(i-1), \quad (2)$$

$$E[k][i] = e_k(i) - e_k(i-1), \quad (3)$$

则有

$$U[k+1][i] = U[k][i] + pE[k][i] + qe_k(i) + r(E[k][i] - E[k][i-1]), \quad (4)$$

其中 $p = \Phi$, $q = \Psi T_s$, $r = \Gamma/T_s$.

令 $U_0(t) = y_d(t)$, 将输入、输出化为增量形式

$$U[0][i] = y_d(i) - y_d(i-1), \quad (5)$$

$$Y[0][i] = y_k(i) - y_k(i-1), \quad (6)$$

则

$$E[k][i] = U[0][i] - Y[k][i]. \quad (7)$$

初始条件为

$$U[k][0] = 0, \quad (8)$$

$$E[k][0] = 0. \quad (9)$$

根据上述公式, 可以编写增量式 PID 型学习控制律的软件.

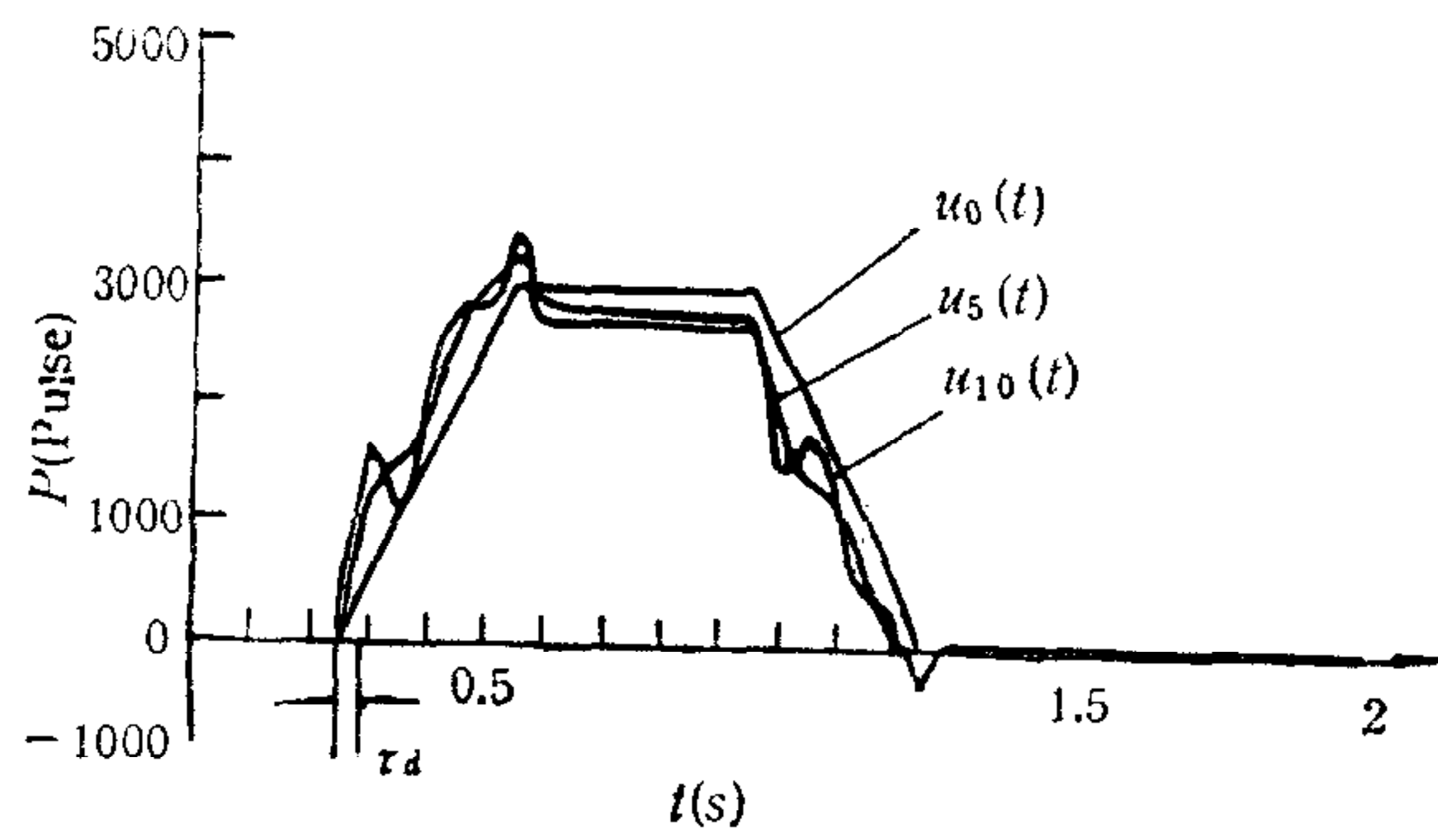
三、滞后的影响

按照上节的算法编程, P 型学习控制的实验曲线如图 3 所示. 图 3(a) 是第 0 次(未学习时), 第 5 次、第 10 次、第 15 次的给定曲线. 图 3(b) 和 3(c) 则分别是第 0, 5, 10 次的响应曲线和误差曲线, 其中 $p = 0.25$. 图 4 中曲线 1 为 15 次学习过程中误差评价指标 $J(\text{IAE}) = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$ 值的变化规律.

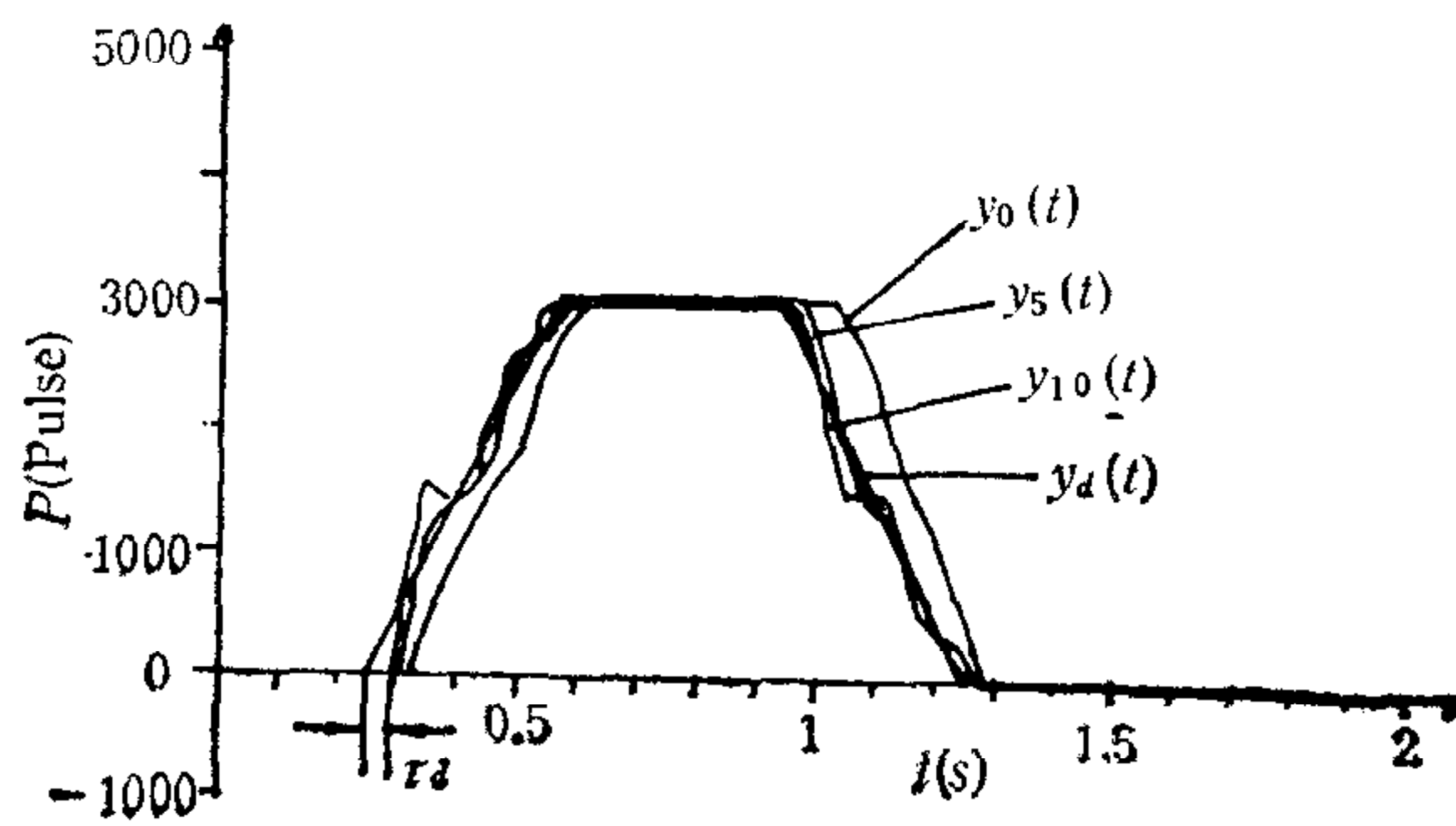
由图 3 及图 4 中的曲线 1 可知, P 型学习控制的引入, 虽可改善系统的响应, 使响应曲线与期望曲线的误差减小, 但当学习次数 k 增大到一定程度时, $J(\text{IAE})$ 的值开始发散, 也就是说学习控制发散. 参数 p 的数值大小, 并不改变 P 型学习控制的发散性, 只是 p 较小时, 发散的到来越晚一些而已.

对 PD, PI, D, PID 等型的学习控制的实验研究, 表现为相似的结果, 即均不收敛. 这一结果与理论证明^[1-4]是矛盾的.

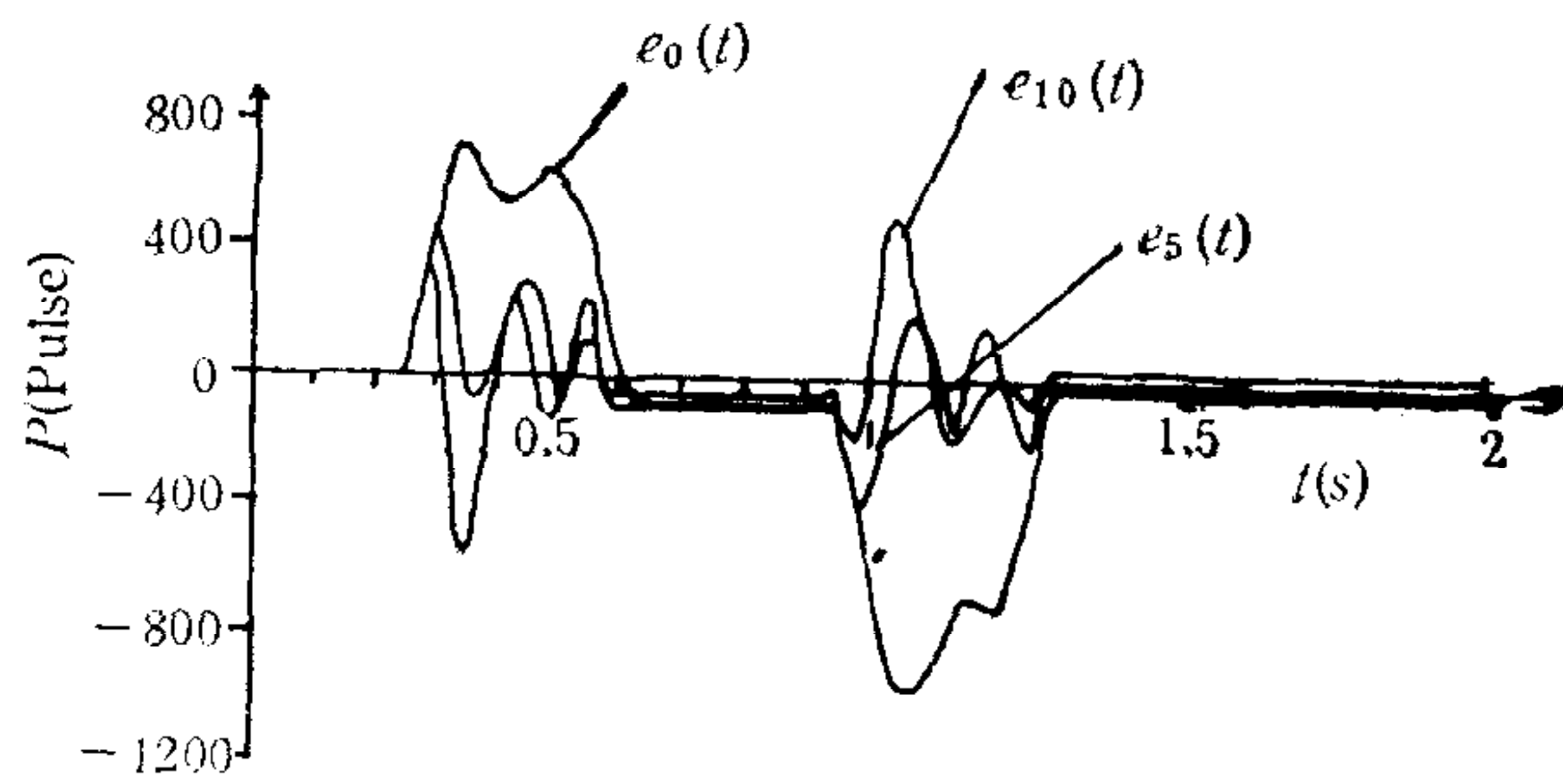
导致学习控制发散的的根本原因是控制系统的滞后破坏了学习控制的收敛条件. 对图 3 的分析表明, 系统滞后的存在, 使在滞后时间 τ_d 内始终存在误差. 第 k 次学习后的误差经过比例 p 值的运算将迭加在第 $(k+1)$ 次的给定之中, 致使 τ_d 时间里的给定斜率和给定峰值均不断加大, 从而导致邻近 τ_d 时间区域的响应斜率和峰值也不断加大, 直至发生超调, 误差 $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$ 由正变负. 这一误差经过学习控制后将反映在下一次的给定之中, 使给定向减小的方向发展. 随着学习次数的增加, 给定将急剧变化, 响应也随之急剧波动, 误差也就越来越大. 图 3(a) 中 $u_{15}(t)$ 是第 14 次学习后的给定波形(即第 15 次学习过程的给定波形), 可见, 如此剧烈波动的给定, 势必会使响应也波动剧烈.



(a)



(b)



(c)

图 3 P型学习控制实验曲线

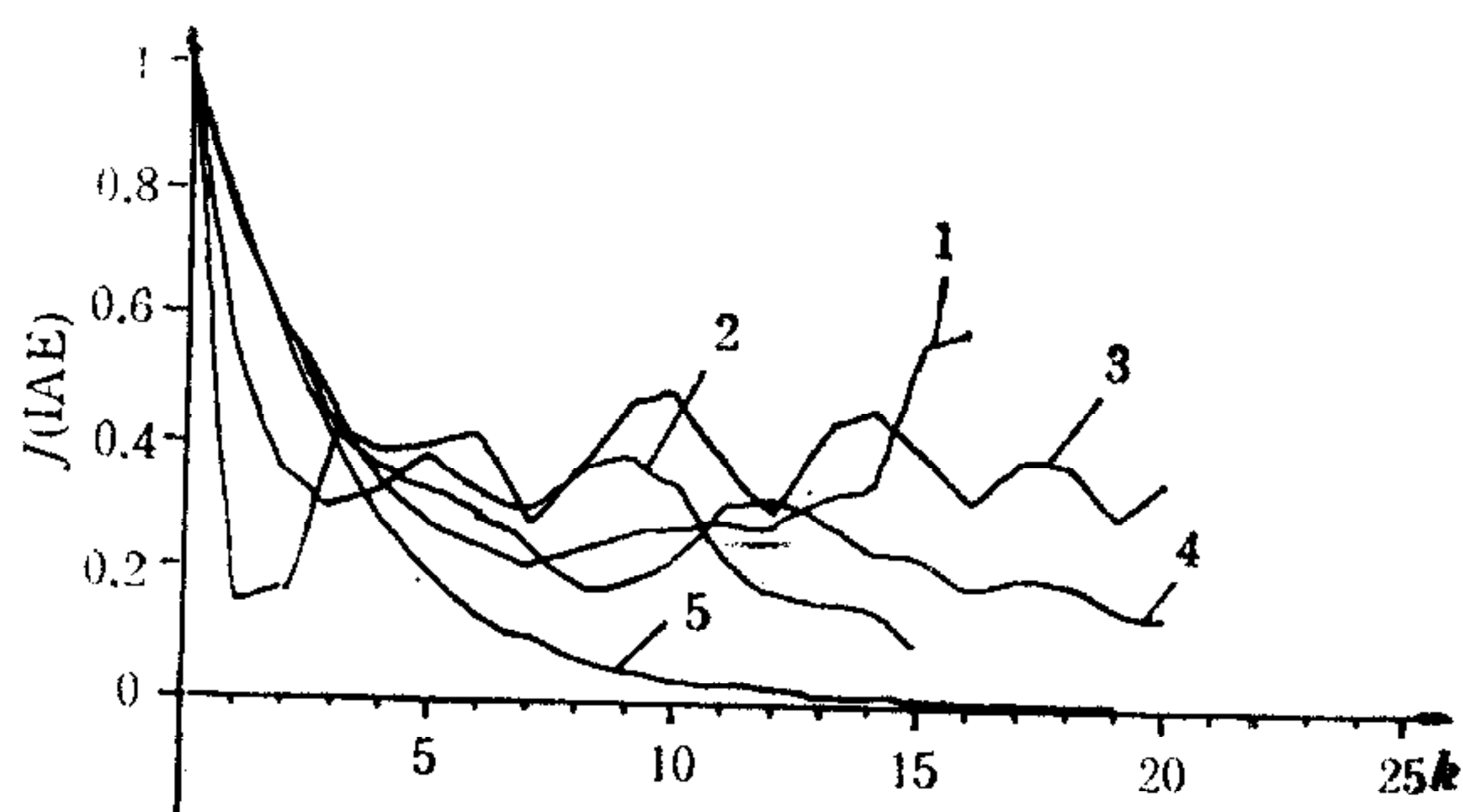
四、消除滞后影响的方法

1. 给定超前法

为了克服滞后的影响,提出一种新的学习控制方法——给定超前法。为此,修改前述的算法如下:

(5) 式改为

$$U[0][i-d] = y_d(i) - y_d(i-1), \quad (10)$$

图 4 学习控制的 $J(\text{IAE})$ 曲线

(4) 式改为

$$U[k+1][i-d] = U[k][i-d] + pE[k][i] + qe_k(i) + r(E[k][i] + E[k][i-1]), \quad (11)$$

则有

$$E[k][i] = U[0][i-d] - Y[k][i]. \quad (12)$$

(10)–(12)式中 d 为超前的采样周期数。依(2),(8),(9),(10),(11),(12)各式可以编写给定超前法的 PID 型学习控制算法。

仍取 $p = 0.25$, 取超前时间 $d = 4$ (即为 40ms)。图 5 为期望曲线及第 15 次学习的给定、响应曲线,图 4 曲线 2 为此学习过程的 $J(\text{IAE})$ 值的变化曲线。显见,取得了较好的效果。

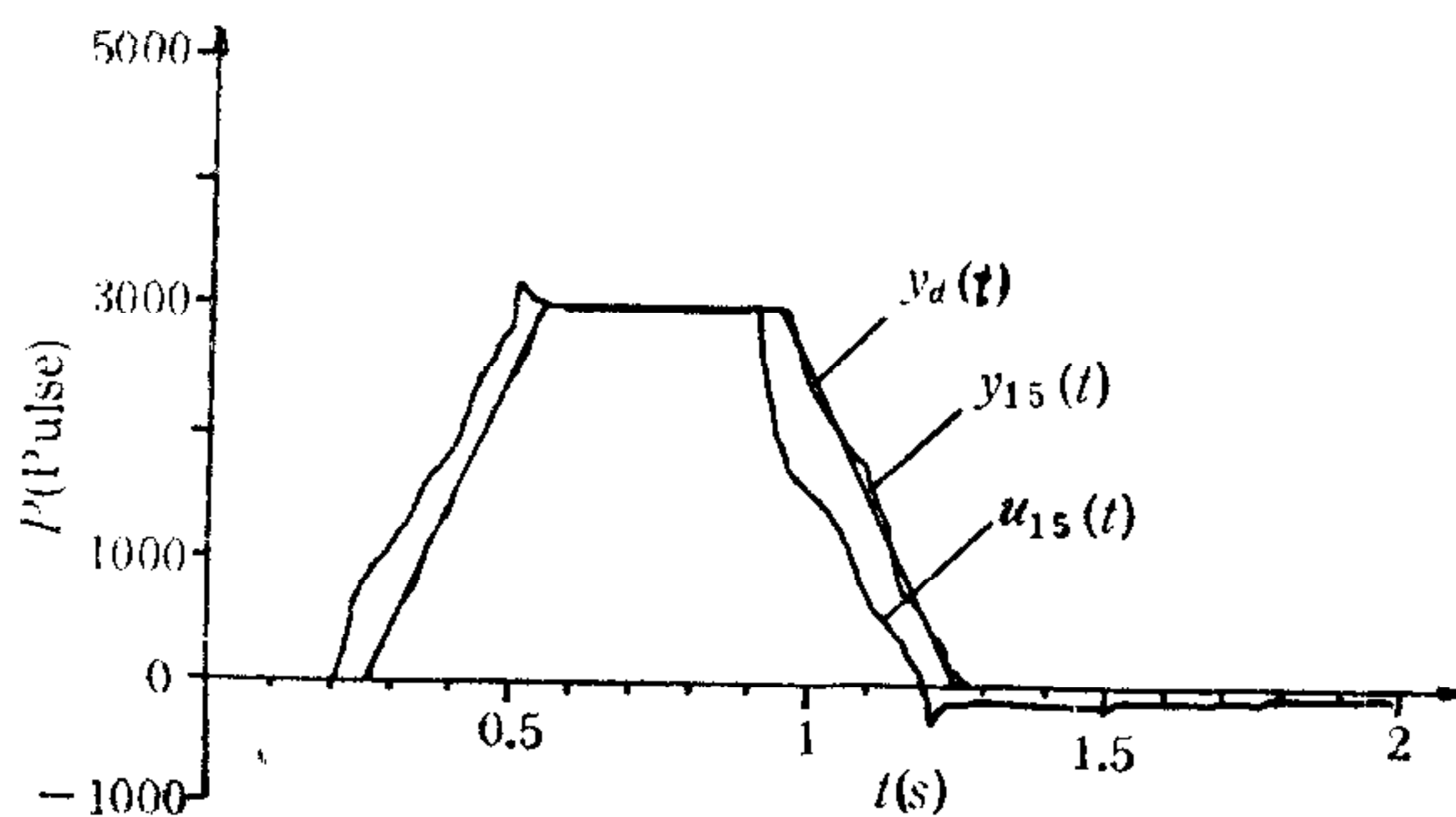


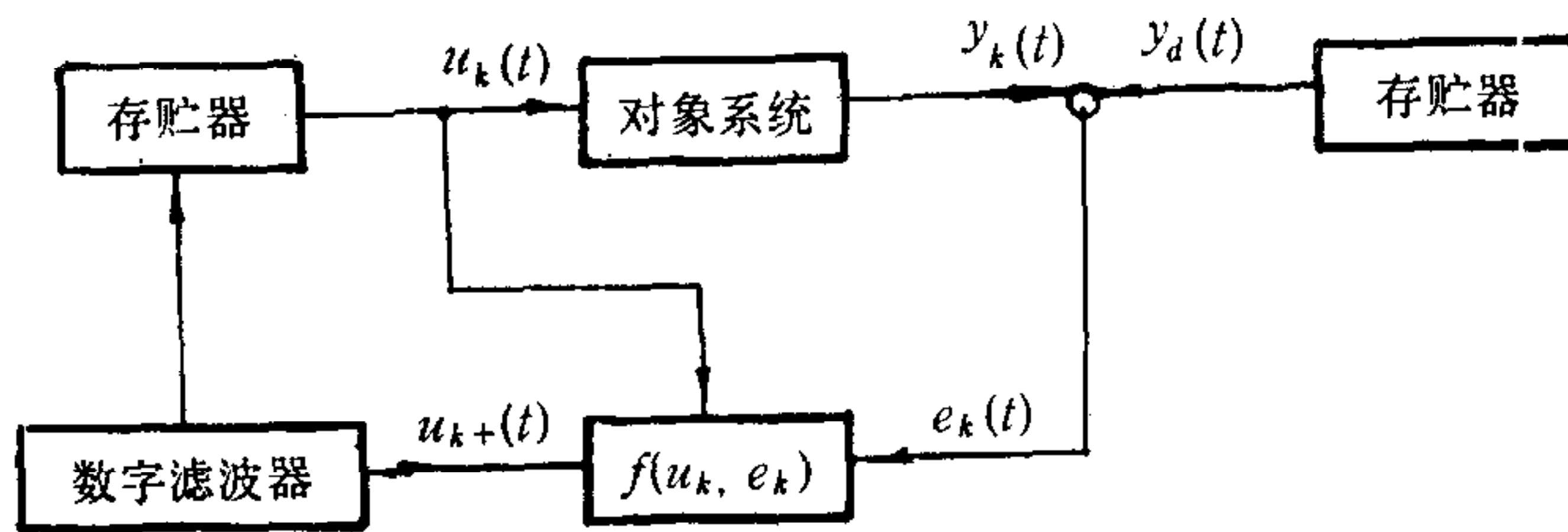
图 5 给定超前法学习控制实验曲线

图 4 中的曲线 2 表明,在学习控制的收敛过程中,可能出现 J 值的波动。原因可归纳为: 1) 学习控制参数 p 值选得较大,从而引起过调节。实验中曾使 p 增大到 0.8, $J(\text{IAE})$ 的曲线波动更为剧烈,如图 4 中的曲线 3 所示。2) 随机干扰的影响。学习控制对每一次学习过程中以同样方式和规律出现的干扰是可以克服的,但对随机干扰却无能为力。因此,学习控制的一致收敛,一方面取决于学习控制参数选择的合理性,另一方面则取决于系统抑制随机干扰的能力,即系统的可重复性。

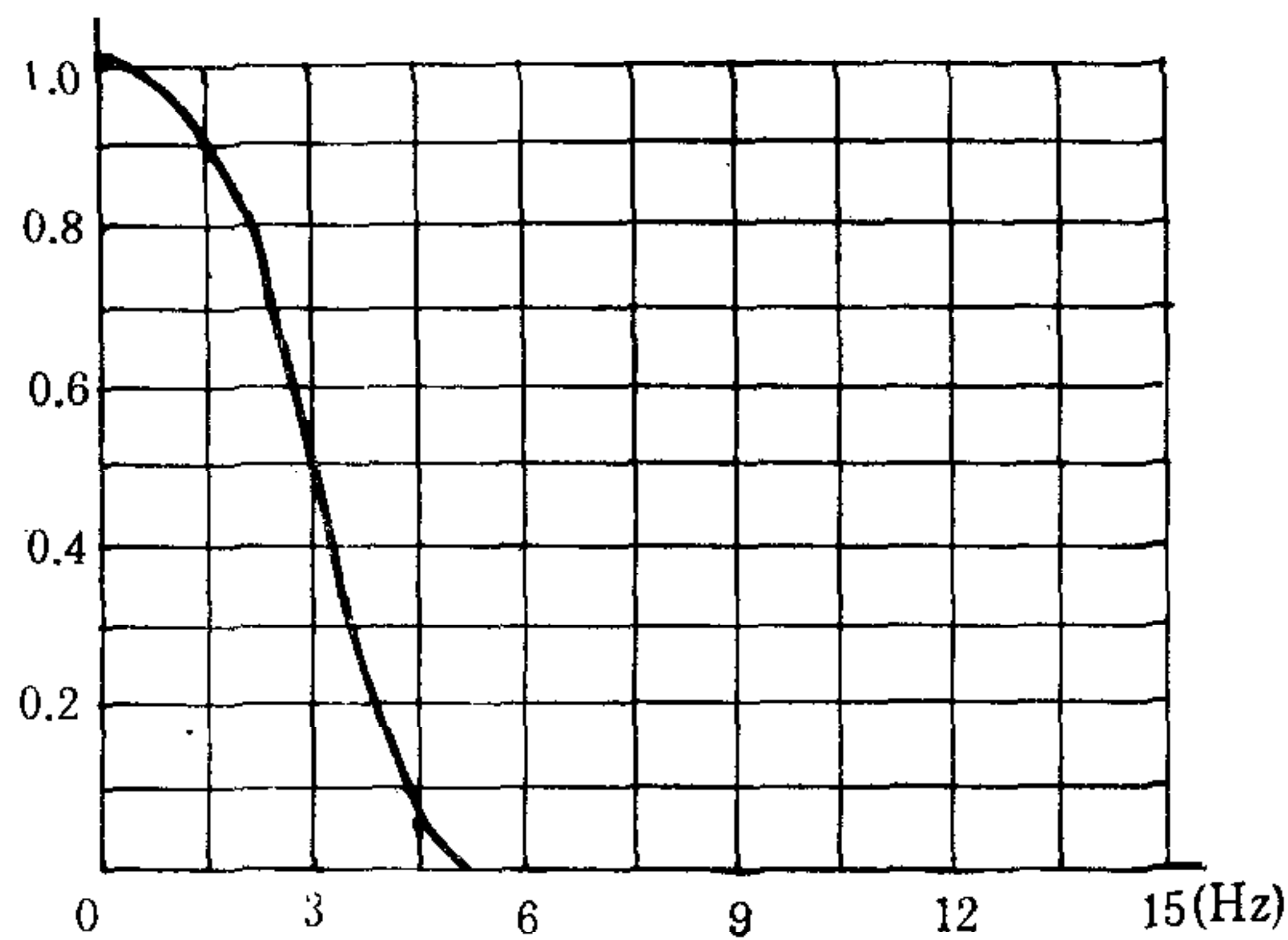
给定超前法的算法简单、效果显著,但很难使 d 与 τ_d 精确匹配,滞后不能根本克服,学习控制仍会发散。为此,提出下述的给定滤波法。

2. 给定滤波法

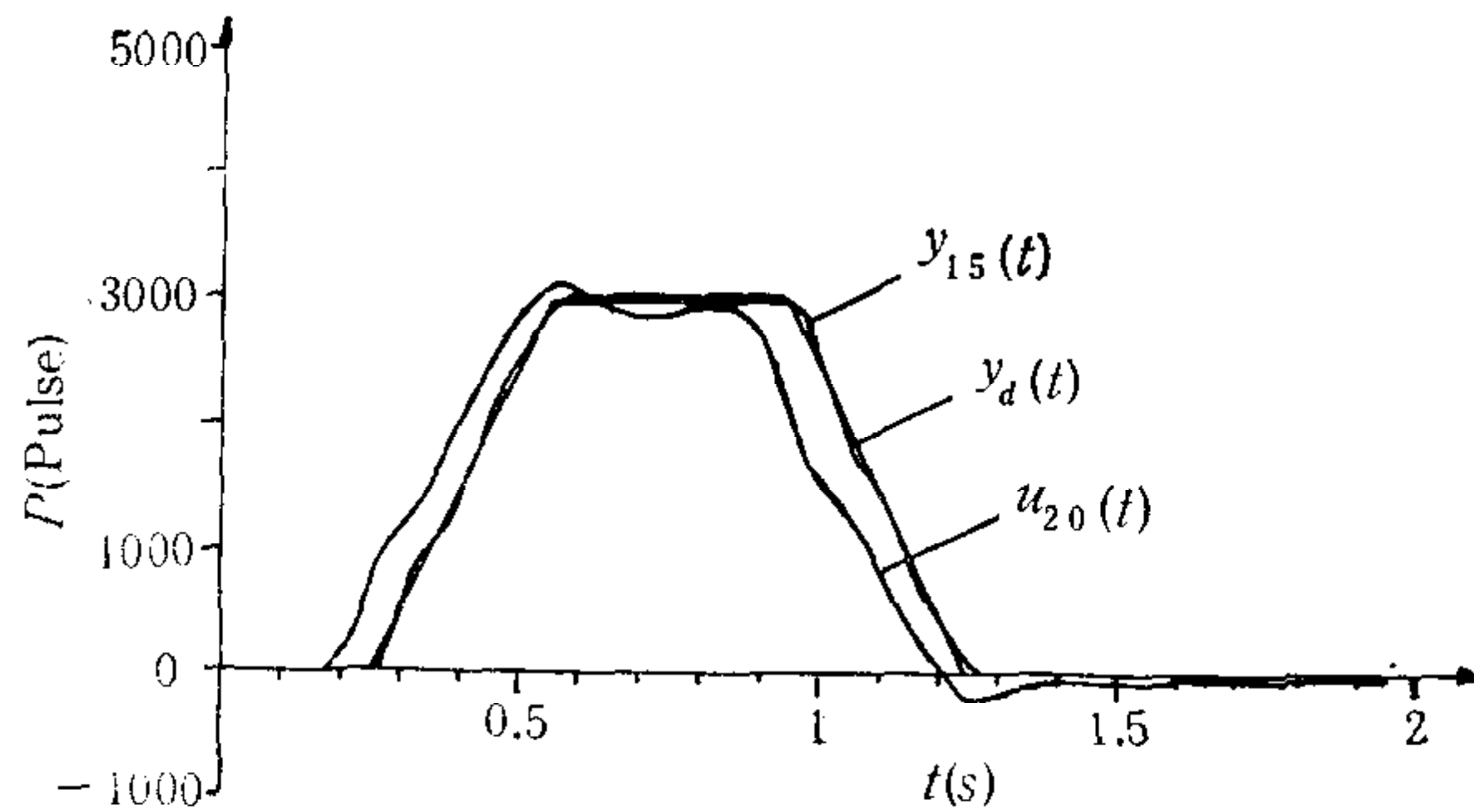
如前所述,滞后的影响,将使多次学习之后的给定波形发生急剧波动,其斜率和斜率的变化率都可能超过位置伺服系统对最大速度给定和最大加速度给定的限制,因而系统不能在要求的精度范围内跟踪^[7]. 可以对每次学习后的给定值加数字滤波器以限制给定的斜率和斜率的变化率,如图 6(a) 所示. 称这种方法为给定滤波法.



(a)



(b)



(c)

图 6 给定滤波法学习控制实验图

数字滤波器的设计主要是考虑其通频带应大于期望响应曲线的频谱宽度,小于位置伺服系统的通频带,否则,数字滤波器的设置将失去意义. 本文所选滤波器的通频带为 2Hz, 采用下式所示的数字滤波器:

$$W_k(i) = \sum_{m=-10}^{10} h(10+m)U_k(i+m), \quad (13)$$

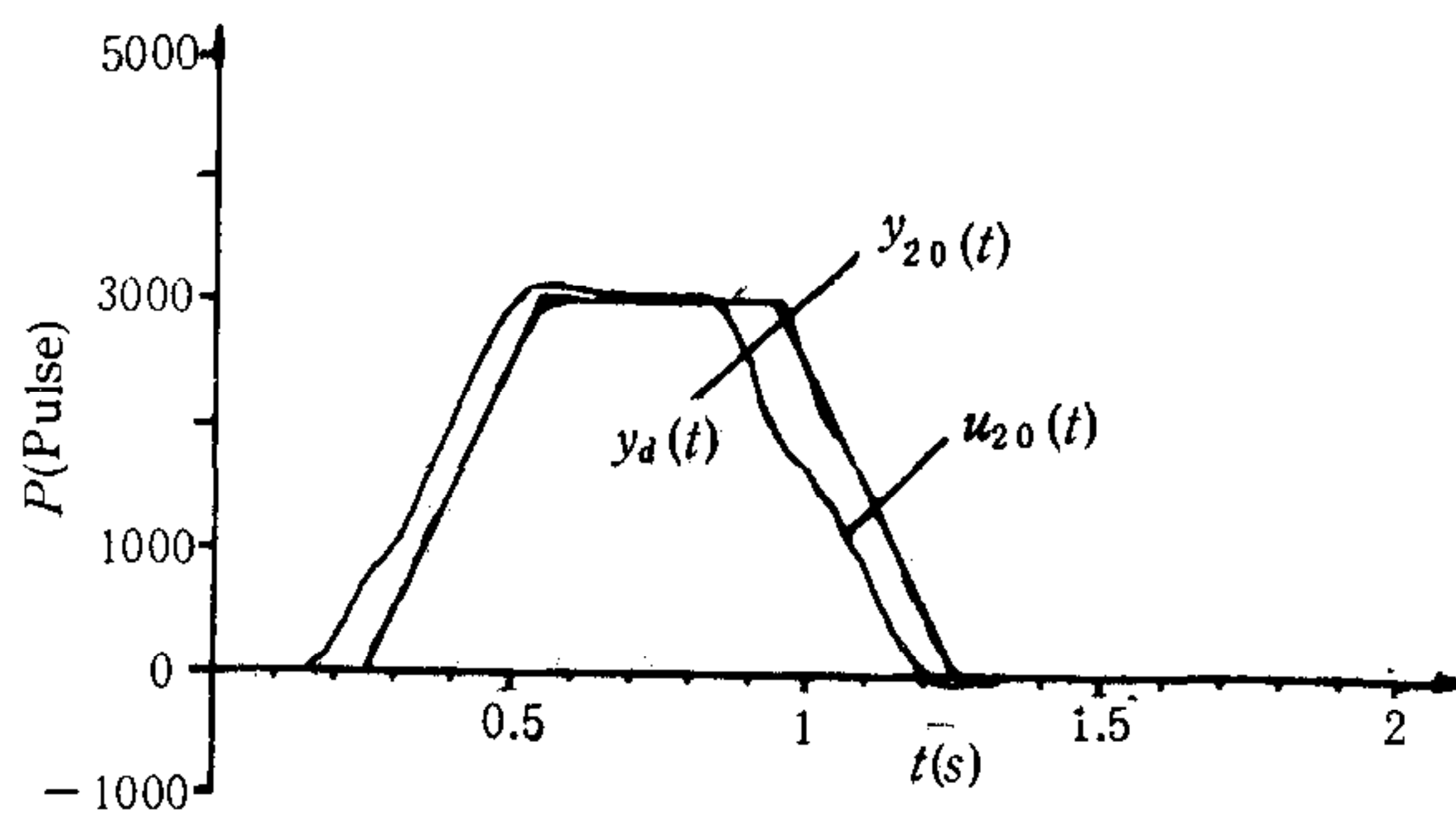
式中

$$\begin{aligned} h(0) &= h(20) = 0.705 \times 10^{-9}, & h(1) &= h(19) = -0.213 \times 10^{-2}, \\ h(2) &= h(18) = -0.635 \times 10^{-2}, & h(3) &= h(17) = -0.116 \times 10^{-1}, \\ h(4) &= h(16) = -0.124 \times 10^{-1}, & h(5) &= h(15) = -0.476 \times 10^{-8}, \\ h(6) &= h(14) = 0.319 \times 10^{-1}, & h(7) &= h(13) = 0.817 \times 10^{-1}, \\ h(8) &= h(12) = 0.138, & h(9) &= h(11) = 0.183, \\ h(10) &= 0.200. \end{aligned}$$

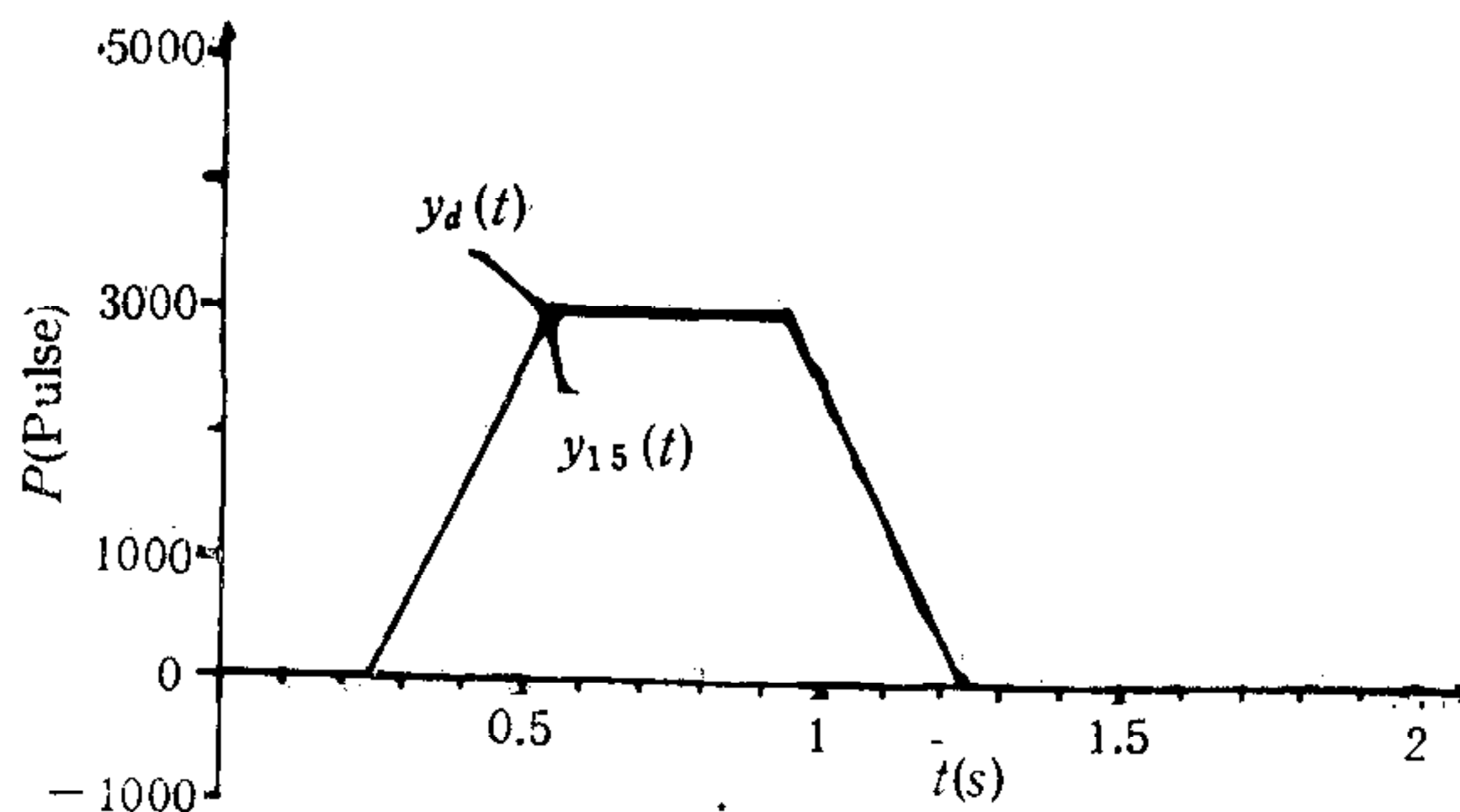
$W_k(i)$ 为第 k 次实验中数字滤波器的输出, $U_k(i)$ 为第 k 次学习律运算后的给定。数字滤波器的特性曲线如图 6(b) 所示。

多次实验表明,引入数字滤波器后效果很好。图 6(c) 是期望曲线及第 20 次学习的给定和响应曲线,此时 $p = 0.25, q = r = 0$ 。由此图可见,经多次学习后,滤波器的平滑作用,使给定自动超前,从而消除了系统滞后的影响。图 4 中曲线 4 是 20 次学习过程中 $J(\text{IAE})$ 值的变化曲线, $J(\text{IAE})$ 值的波动表明,数字滤波器的引入也不能消除随机干扰的影响,因为它只能在随机干扰影响了系统的响应之后,在下一次学习中才起作用。

需指出的是,本文采用的数字滤波器计算量大,若采用递归算法将有利于工程应用。



(a) 给定超前滤波法 P 型学习控制实验图



(b) 给定超前滤波法 PD 型学习控制实验图

图 7 给定超前滤波法学习控制实验图

3. 给定超前滤波法

将给定超前法与给定滤波法同时使用的方法称为给定超前滤波法。使用这种方法,可以加快收敛速度,效果也优于任何一种方法单独使用的效果。图 7(a) 中曲线是期望曲线及第 20 次学习的给定、响应曲线,其中 $p = 0.25, d = 3$ (超前时间为 30ms)。显然,此图效果优于图 5(a) 及图 6(c)。这种方法对超前时间不要求很准,因为滤波器可以对滞后时间起到自动补偿作用。

在 P 型学习控制基础上引入微分后的 PD 型学习控制可以取得更好的效果。图 7(b) 是选择 $p = 0.25, q = 0, r = 0.8, d = 3$ (超前时间为 30ms) 时,第 15 次学习的响应曲线。显然,此图的效果优于前面几个实验图的效果。图 4 中曲线 5 为上述参数下 PD 型学习控制的 $J(\text{IAE})$ 曲线,这是一次没有随机干扰的学习过程,因而做到了一致收敛。

大量的实验表明,给定超前法、给定滤波法或给定超前滤波法都能做出 D 型、PI 型、PID 型学习控制的收敛结果,但 I 型学习控制却是发散的,限于篇幅不再详述。

五、结 论

通过大量的实验研究与分析,得出以下结论:

- 1) 在位置伺服系统中,滞后将使学习控制发散。给定超前法、给定滤波法和给定超前滤波法是使学习控制收敛的有效方法;
- 2) 给定超前法人为地将给定提前、可能不完全与滞后时间相匹配,学习控制仍有发散的可能。而给定滤波法可使给定自动超前期望响应,从而消除了系统滞后的影响,使学习控制收敛。给定超前滤波法可使学习控制获得比较理想的效果,这种方法对超前时间不要求很准,因为滤波器可以自动补偿;
- 3) 在学习控制收敛过程中, $J(\text{IAE})$ 值可能产生的波动取决于参数的选择和随机干扰的影响。要提高学习控制系统的跟踪精度,一方面需改善系统的工作环境、减小随机干扰;另一方面需提高系统的抗干扰能力,即提高系统的可重复性。可以说,学习控制系统的学习精度取决于系统的可重复能力。

参 考 文 献

- [1] Arimoto Sugurn, *Mathematical Theory of Learning with Applications to Robot Control*, from ADAPTIVE AND LEARNING SYSTEMS, Edited by Kumpati S. Narendra (Pienum Publishing Corporation, 1986).
- [2] Arimoto S., Kawamura, S., Miyazaki, F. and Tomaki, S., *Learning Control Theory for Danamical Systems*, Proc. of the 24th Conference on Decision and Control, Ft. Lauderdale, FL, December 1985.
- [3] Arimoto, S., Kawamura, S., Miyazaki, F., *Bettering Operation of Robots by Learning*, J. of Robotic Systems, (1984), 1—2.
- [4] Oh Sang-Rok, Bein Zevngnan and Suh Il Hong, *An Iterative Learning Control Method with Application for the Robot Manipulator*, IEEE J. of Robotics and Automation, 4(1988), No. 5.
- [5] Konishi Yasou, Aoyama Tojiro, Inasaki. Ichiro, *Learning Control of a Parallel-link Direct-drive Robot Manipulator*, Robotics and Autonomous Systems, 5(1989), 127—134.
- [6] Kawamura S., Yoshimi, T., Miyazaki, F., Arimoto, S., *Technical Issues in Learning Control for Robot Motions*, to be Published in Proc. of the 87 ICAR, October 13—15.
- [7] 别塞克尔斯基, B. A., *数字自动控制系统*, 科学出版社, 1984.

A STUDY OF THE LEARNING CONTROL OF THE POSITION SERVO SYSTEM

XIA CHENGGUANG

(Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

XIAO JIN

(Beijing Institute of Satellite Environment Test Engineering 100029)

WANG XIAODONG

(Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

ABSTRACT

Through the experimental research of the learning control on the position servo system, this paper presents the idea that the response delay is a main cause of divergence in learning control process. To solve this problem, three methods are proposed, namely, the input lead method, input filtering method and input lead filtering method. Some satisfactory results are obtained in experiments.

Key words: Learning control; position servo system; input lead filtering.



夏承光 1944 年生于南京。1967 年毕业于哈尔滨工业大学工业电气自动化专业。现为该教研室副主任、副教授。主要从事自动控制理论的教学和数字控制技术的研究。



肖锦 1963 年生于郑州。1984 年毕业于华中工学院无线电技术专业，获工学学士。1984 年至 1987 年在北京卫星环境试验工程研究所工作，1990 年毕业于哈尔滨工业大学工业自动化专业，获工学硕士。导师：夏承光副教授。感兴趣的研究领域为学习控制、多变量控制。



王晓冬 1963 年生于天津。1985 年、1988 年在哈尔滨工业大学分别获得工业自动化专业工学学士、工学硕士学位，并留校担任计算机控制技术的教学工作。研究领域为机器人控制技术，数字控制技术，自学习控制技术。曾获黑龙江省科技进步二等奖。