

研究简报

非线性系统的一种直接控制方法

钟延炯 廖福成

(北京科技大学自动化系 100083)

杨遇术

(兵总北方车辆研究所)

关键词: 非线性控制系统, 最优控制, PID 调节器.

1 引言

对于非线性系统的研究,人们提出了许多方法,例如线性化方法、谐波线性化方法、描述函数法,近年来又提出了几何方法等等^[1,2]. 上述种种方法不是限制条件苛刻,应用范围有限,就是数学理论艰深不便工程应用. 韩京清根据最佳控制理论中的 bang-bang 控制能把一个状态快速转移到“零”状态的特点,设计了一个非线性“观测器”,称之为“跟踪-微分器”. 本文通过数字-模拟混合仿真证实了这一方法在实际应用中的有效性.

2 非线性状态观测器——跟踪-微分器

首先考察系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = u, \end{cases} \quad |u| \leq R. \quad (1)$$

这里 R 是一个正常量, u 是控制量,系统初始状态为 (x_{10}, x_{20}) . 若取 u 如下:

$$u = -R \operatorname{sign} \left(x_1 + \frac{|x_2| x_2}{2R} \right), \quad (2)$$

则系统(1)成为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -R \operatorname{sign} \left(x_1 + \frac{|x_2| x_2}{2R} \right), \end{cases} \quad (3)$$

称系统(3)为快速系统^[3,4].

现将系统(3)改为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -R \operatorname{sign} \left[x_1 - v(t) + \frac{|x_2| x_2}{2R} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

对系统(4)可以证明^[5]: 若初值给定, $v(t)$ 为 $[0, +\infty]$ 上有界, 局部可积, 那么任给 $\varepsilon > 0$, $T > 0$, 存在 $R > 0$, 使得当 $R > R_0$ 时, 有

$$\int_0^T |x_1(t) - v(t)| dt < \varepsilon.$$

这说明在系统(4)中只要适当的选择, 那么系统(4)中的 x_1 可以看成 $v(t)$, 又因为 $\dot{x}_1 = x_2$, 那么 x_2 又可以看成 $\dot{v}(t)$, 所以系统(4)中的 x_1, x_2 即是 $v(t), \dot{v}(t)$, 构成了 $v(t)$ 的“观测器”, 称系统(4)为跟踪-微分器。

在实际应用中为了减少符号函数在“零”点切换处的“振荡”, 将系统(4)修改为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -R \operatorname{sat} \left(x_1 - v(t) + \frac{|x_2| x_2}{2R}, \delta \right). \end{cases} \quad (5)$$

3 非线性控制系统的结构

假设非线性对象的模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (6)$$

其中 u 为控制, y 为输出。现构造一以 PID 调节器为控制器的控制系统, 但利用跟踪-微分器对古典的 PID 控制系统进行一点改造, 如图 1 所示。

该系统可用下式描述:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + u, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -R_0 \operatorname{sat} \left(x_3 - v(t) + \frac{|x_4| x_4}{2R_0}, \delta_0 \right), \\ \dot{x}_5 = x_6, \\ \dot{x}_6 = -R_1 \operatorname{sat} \left(x_5 - x_1 + \frac{|x_6| x_6}{2R_1}, \delta_1 \right), \\ u = P_1(x_3 - x_5) + P_2 \int_0^t [x_3(s) - x_5(s)] ds + P_3(x_4 - x_6), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (7)$$

其中跟踪-微分器 I(T-DI) 的输出 x_3, x_4 分别是 $v(t)$ 及 $\dot{v}(t)$ 的“观测值”, 跟踪-微分器 II(T-DII) 的输出 x_5, x_6 是状态 x_1 及 \dot{x}_1 的“观测值”。

对系统中非线性对象选取了许多类型进行了数字仿真, 有些还进行了数字-模拟混合仿真, 都取得了满意效果。这里举出四种类型的数字-模拟仿真结果, 四种对象如式(8),

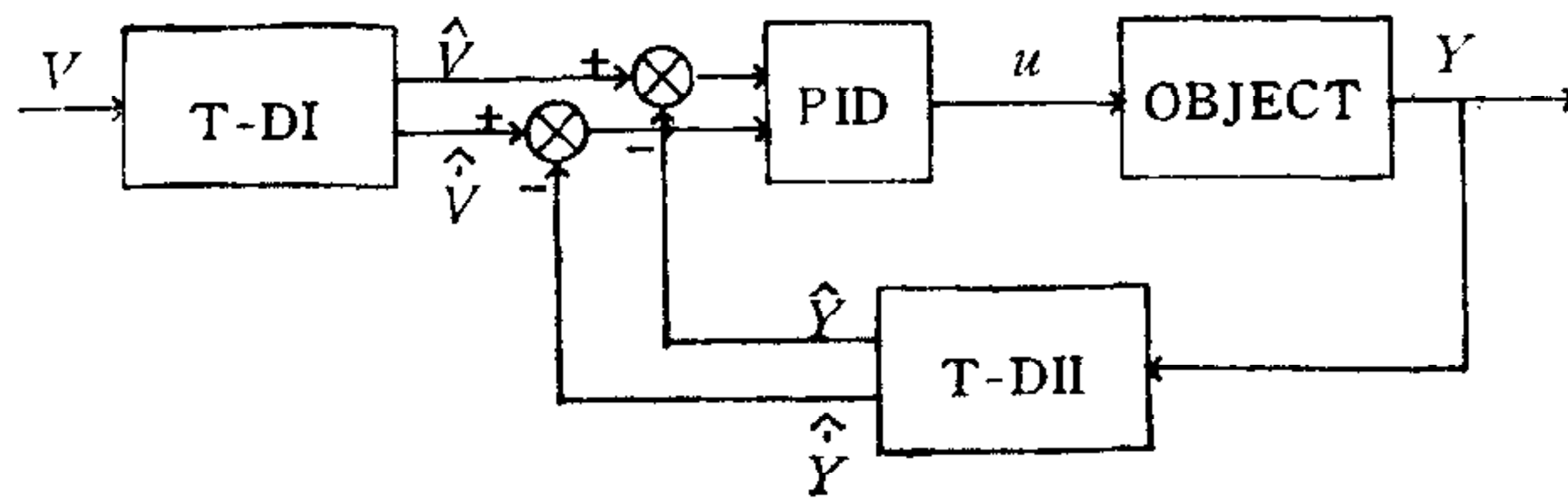


图 1

(9),(10),(11)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0.01x_1, \\ \dot{x}_2 = 0.01x_1^2 + 0.01x_2^2 + 0.01u, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0.01x_1, \\ \dot{x}_2 = 0.01x_1 + 0.01(1 - x_2^2)x_2 + 0.01u. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0.01x_2, \\ \dot{x}_2 = 0.01x_1x_2 + 0.01x_2 + 0.01u, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0.01x_2, \\ \dot{x}_2 = 0.01x_1^3 - 0.01x_1 + 0.01x_2 + 0.01u. \end{cases} \quad (11)$$

选单位阶跃为系统输入，两个跟踪-微分器的参数相同， $R_0 = 0.5$ ， $R_1 = 45$ ， $\delta_0 =$

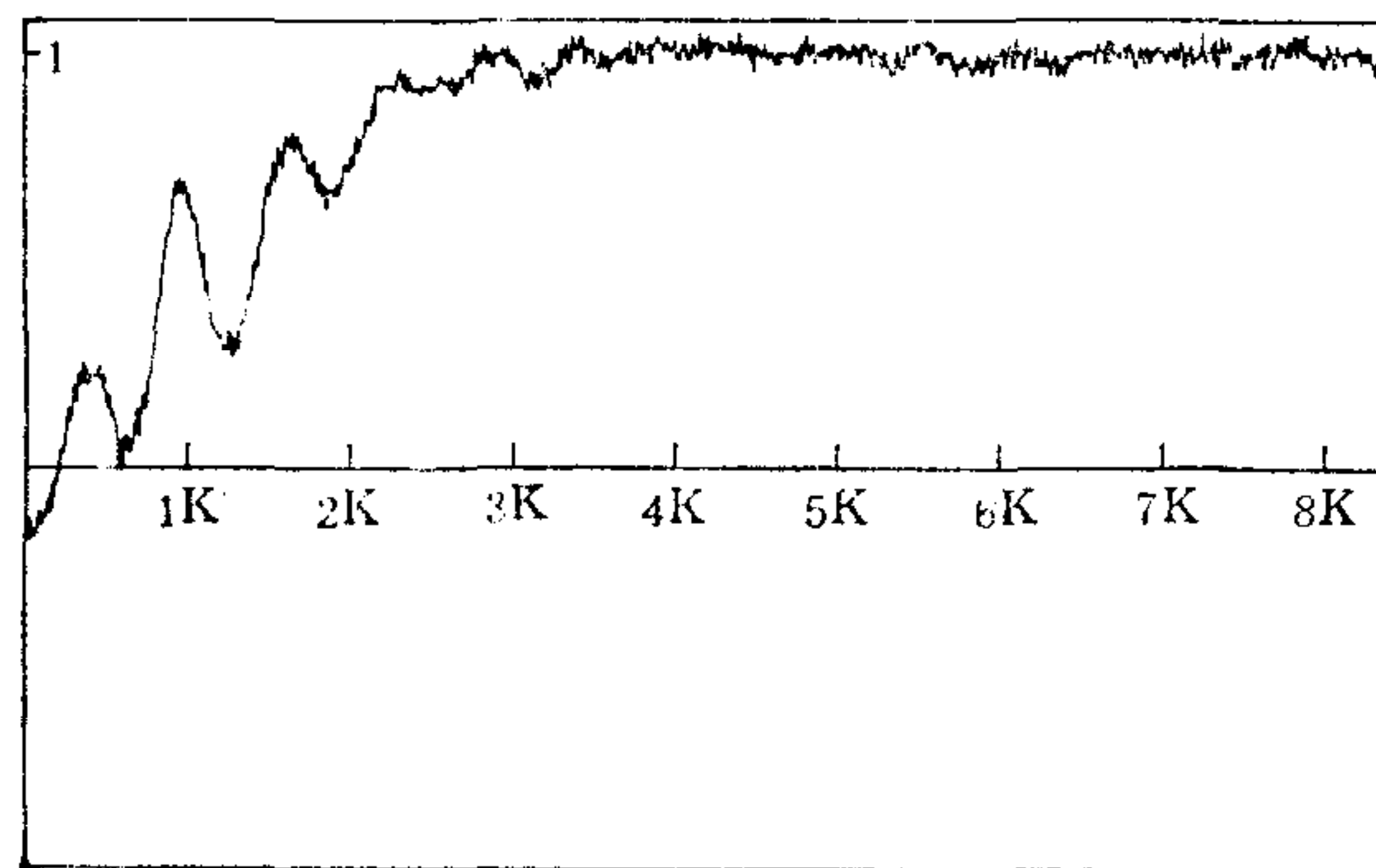


图 2

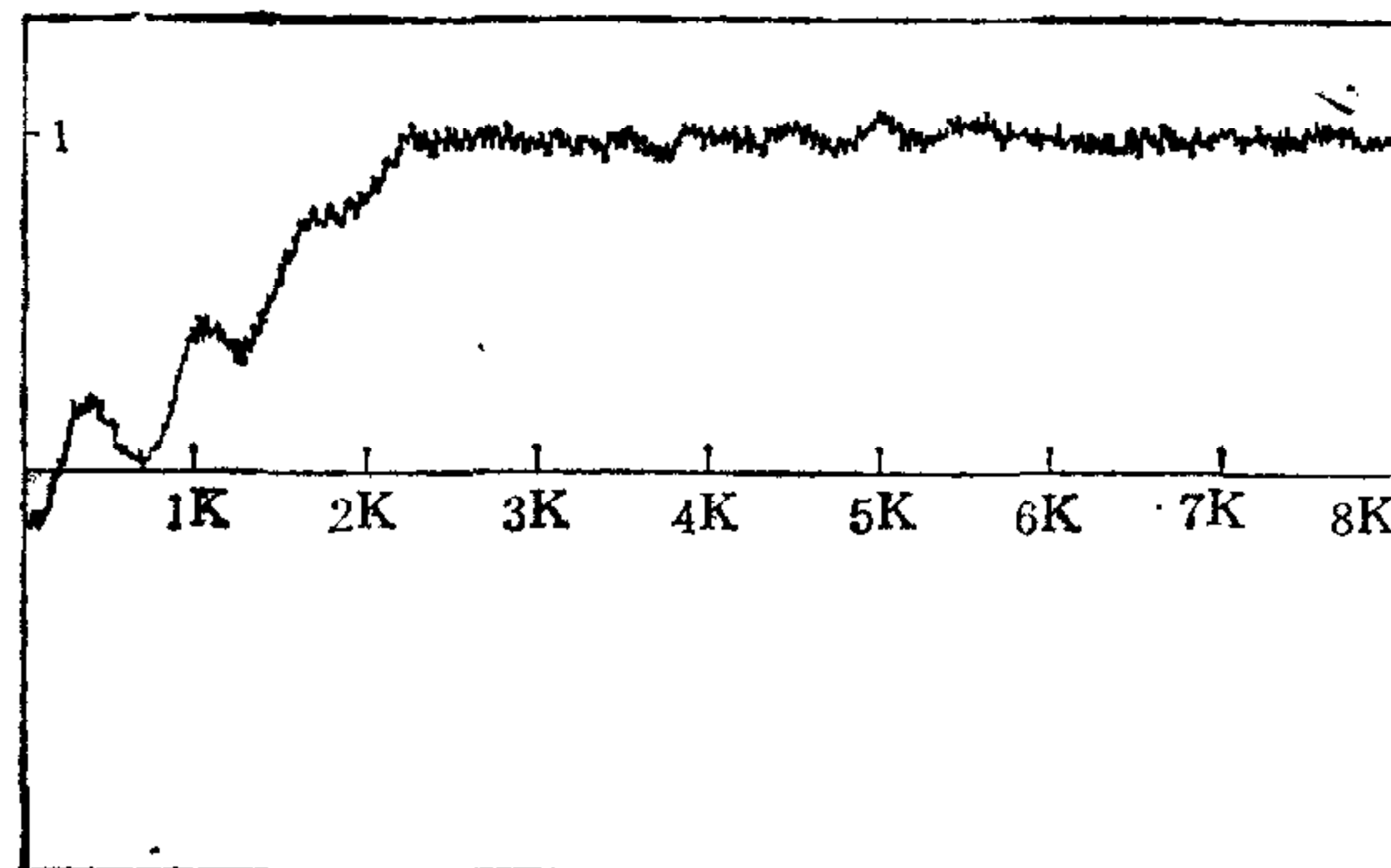


图 3

$\delta_1 = 0.005$, PID 调节器的参数整定为: 当对象为(8),(9),(10)时, 取 $P_1=20$, $P_2=35$, $P_3=10$; 当对象为(11)式时, 取 $P_1=18$, $P_2=35$, $P_3=8$. 图 2—图 5 分别为四个对象的响应曲线.

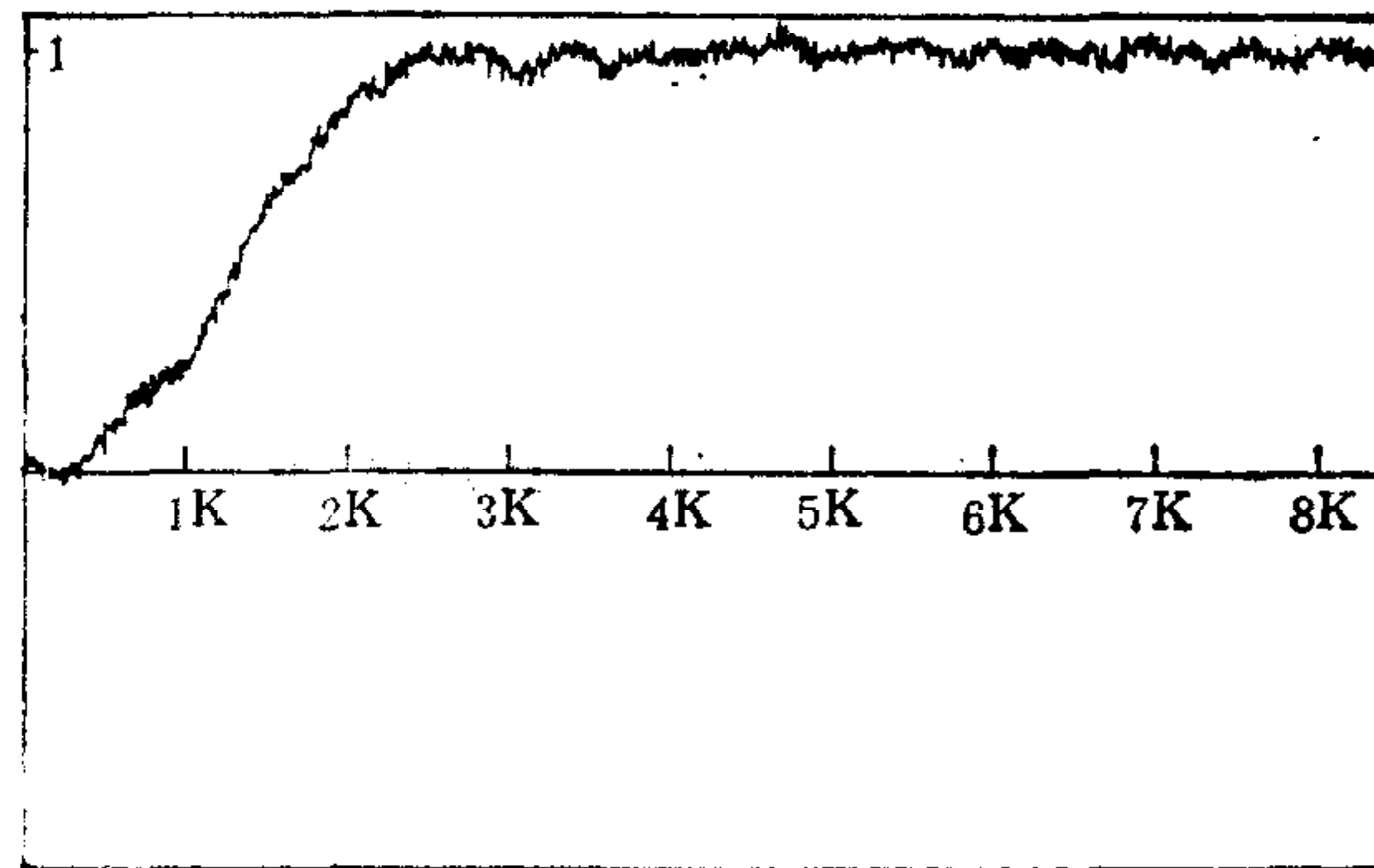


图 4

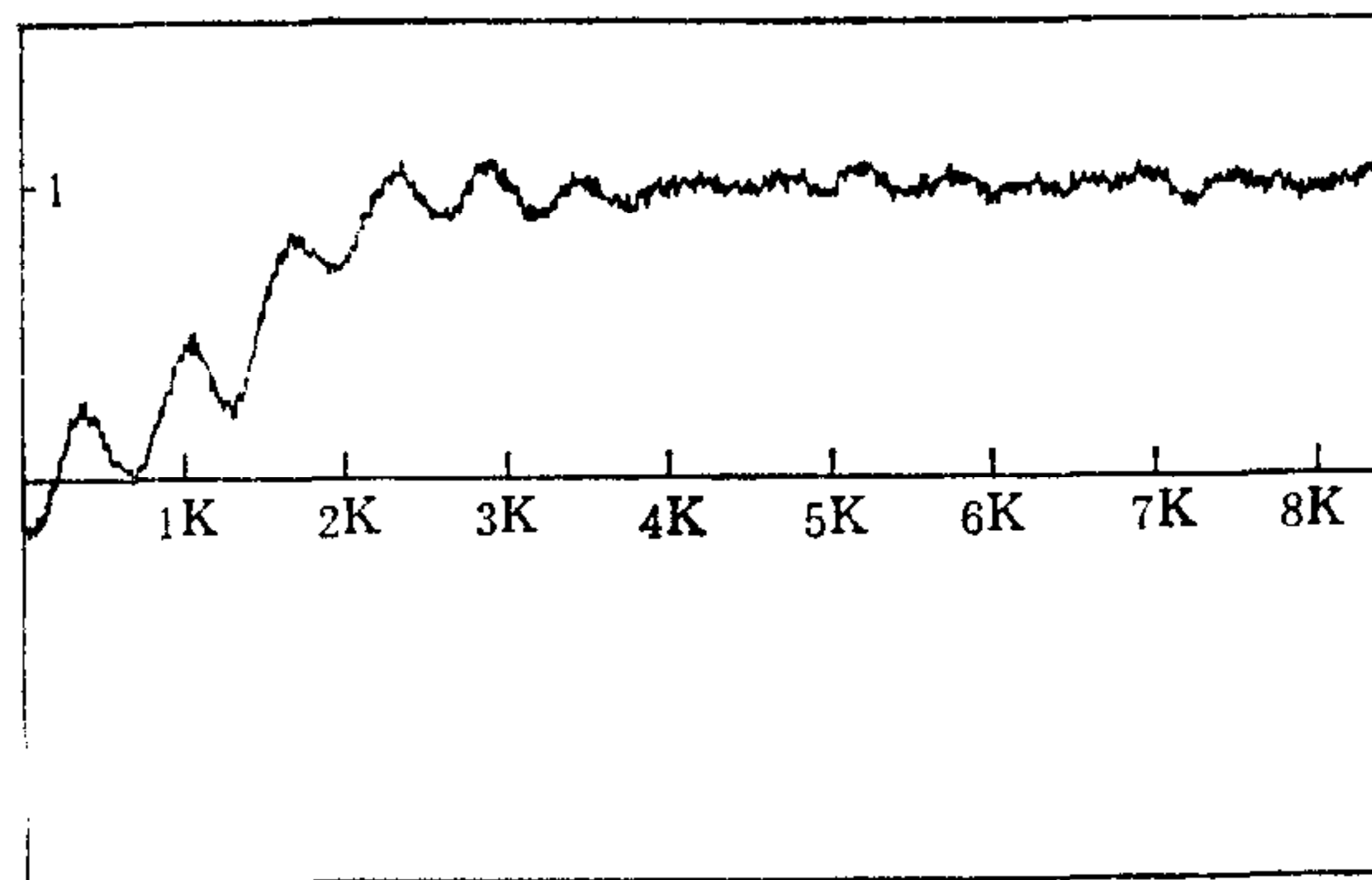


图 5

注: 1) $K = 100s$, 2) 图 2 中曲线末端下跳为模拟机复位所致.

4 结论

从数字-模拟混合仿真结果中可得出如下结论:

1) 利用跟踪-微分器改造过的 PID 控制系统具有较好的参数鲁棒性和结构鲁棒性. 同一控制器可适用于多结构和参数的二阶非线性对象. 因此这种新系统对对象的知识要求不多.

2) 算法简单. 控制系统中使用的 PID 算法和龙格-库塔法极易掌握并且简捷, 适于低档微机上使用.

3) 新系统对数学理论要求不高, 一般工程技术人员都能掌握.

事实上, 跟踪-微分器还有许多其它优点, 如对噪声的滤波作用等, 这些都使这种新方法更适用于工程应用.

参 考 文 献

- [1] 高为炳. 非线性控制系统导论. 科学出版社, 1988.
- [2] 程代展. 非线性控制系统几何理论. 科学出版社, 1988.
- [3] 庞特里雅金等. 最佳过程的数学理论. 陈祖浩等译. 上海科学技术出版社, 1965.
- [4] 张学铭等. 最优控制的微分方程理论. 高等教育出版社, 1989.
- [5] 韩京清. 非线性 PID 控制器. 自动化学报, 1994, 20(4).

A NEW METHOD FOR NONLINEAR SYSTEM CONTROL

ZHONG YANJONG LIAO FUCHENG
(*Beijing Univ. of Sci. & Tech, 100083*)

YANG YUSHU
(*North Vehicle Research Institute*)

Key words: Nonlinear system; optimal control; PID regulator.