

非线性 PID 控制器¹⁾

韩京清

(中国科学院系统科学研究所)

摘 要

本文利用非线性跟踪-微分器和非线性组合方式来改进经典 PID 调节器以提高其适应性和鲁棒性。

关键词: 非线性控制, 跟踪-微分器, 非线性 PID 控制器。

1 前言

PID 调节器大量应用于工业过程控制,但在不同场合,它还不能完全适应工况要求,因此几十年来,许多学者在自校正控制,广义预测控制、模糊控制、专家系统、智能化等途径做了不少提高 PID 效率的工作。

本文则探讨利用一些非线性特性来改进经典 PID 调节器以提高其适应性和鲁棒性的新方法。

2 经典 PID 调节器结构的分析

简单地说,经典 PID 调节器原理为:用参考输入和被调量的误差及其微分、积分的线性组合来产生控制信号。在经典 PID 调节器内部有两层内容: 1. 产生控制量 u 所依据的基本要素: 输入-输出误差 ε 、其积分 $\int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$ 和微分 $\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon}$; 2. 由 ε 、 $\int \varepsilon$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 产生控制量 u 的组合形式——线性组合。

理论分析和大量的实践表明,“线性组合”常引起快速性和超调量之间的矛盾。然而,当我们跳出“线性组合”框架时,就能找到又快,又无超调的“非线性组合”形式。其次,参考输入 $v(t)$ 常常不可微,甚至不连续,而输出 $y(t)$ 的量测又常被噪声污染,因此 $\varepsilon(t) = v(t) - y(t)$ 按经典意义通常不可微,其微分信号不好利用,这就限制了经典 PID 调节器的使用范围。

本文将利用一种新的非线性结构“跟踪-微分器”^[2]来产生控制器的新的基本要素,并用这些新要素的“非线性组合”方式来改进经典 PID 调节器,以提高其适应性和鲁棒性。

1) 本文属国家自然科学基金资助项目。
本文于 1992 年 3 月 11 日收到

3 非线性 PID 控制器

把参考输入 $v(t)$ 送入跟踪-微分器 (I), 提取两个信号 $z_{11}(t)$ 和 $z_{12}(t)$, $z_{11}(t)$ 跟踪 $v(t)$, $z_{12}(t) = \dot{z}_{11}(t)$; 把被调量 $y(t)$ 送入跟踪-微分器 (II), 提取两个信号 $z_{21}(t)$, $z_{22}(t)$, $z_{21}(t)$ 跟踪 $y(t)$, $z_{22}(t) = \dot{z}_{21}(t)$. 今用如下三个量

$$\varepsilon_1(t) = z_{11}(t) - z_{21}(t),$$

$$\varepsilon_2(t) = z_{21}(t) - z_{22}(t),$$

$$\varepsilon_0(t) = \int_0^t \varepsilon_1(\tau) d\tau$$

来代替经典 PID 调节器中的基本要素

$$\varepsilon(t) = v(t) - y(t), \quad \dot{\varepsilon}(t),$$

$$\int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

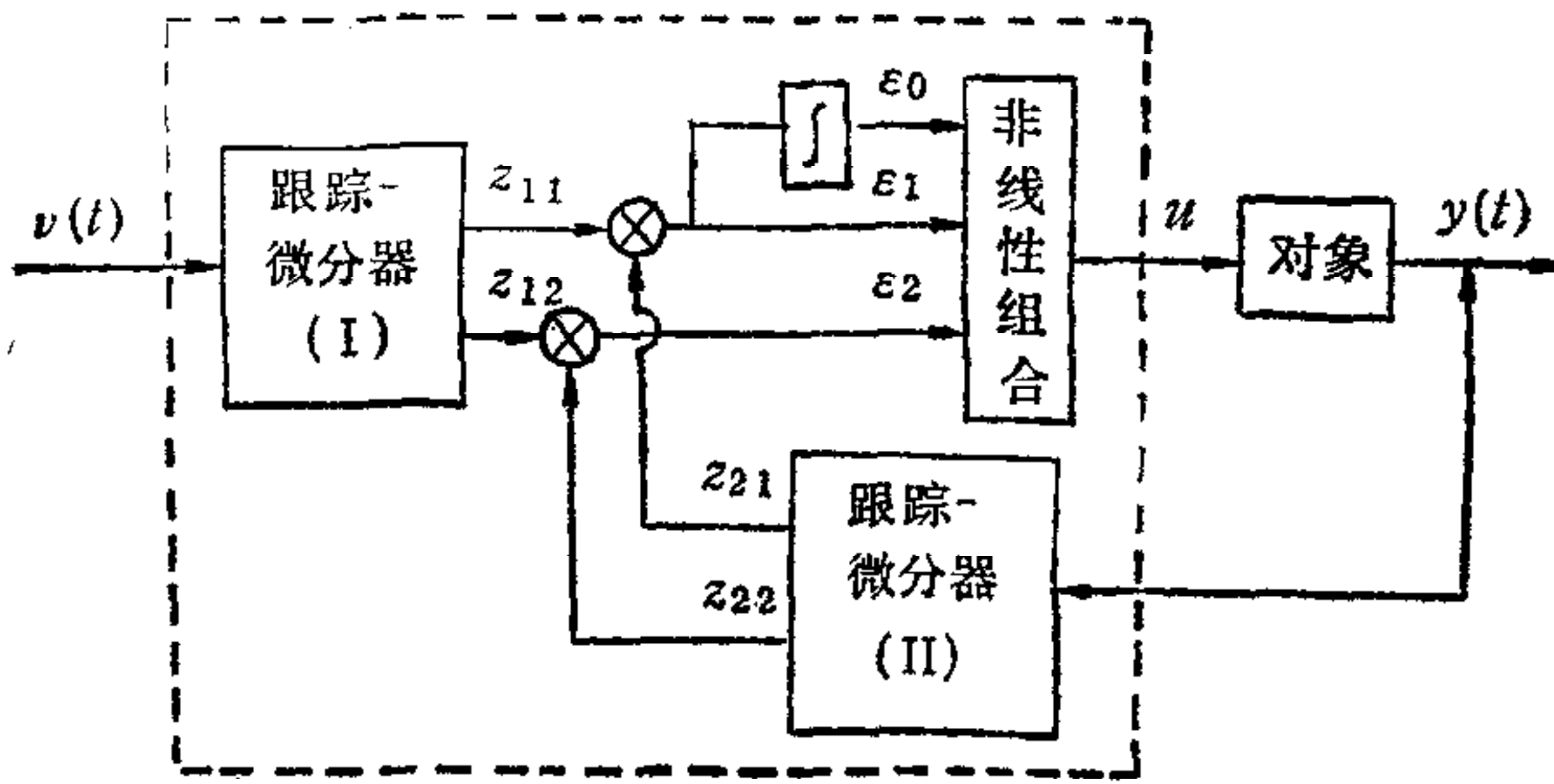


图 1

然后用 $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$, $\varepsilon_0(t)$ 的适当“非线性组合”来产生控制量 $u(t)$. 于是得到如图 1 所示新的控制器结构. 在此, 点线所框部分为新型控制器. 其中, 跟踪-微分器 (I) 主要安排理想的过渡过程 $z_{11}(t)$, 并给出其微分信号 $z_{12}(t)$, 而跟踪-微分器 (II) 主要尽快复原 $y(t)$ 并给出其微分信号. 这里, 控制器的基本要素不是直接取自输入-输出误差, 而是输入和输出信号经非线性处理所得的新的误差及其微分、积分, 因此仍可借用“PID” (最好用“EID”) 一词, 把这个新型控制器称作“非线性 PID 控制器”.

下面给出这种“非线性 PID 控制器”的一种具体形式. 令

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x), & |x| \geq \delta, \\ x/\delta, & |x| < \delta, \end{cases}$$

$$\text{fal}(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\alpha \text{sign}(x), & |x| \geq \delta \\ x/\delta^{1-\alpha}, & |x| < \delta \end{cases}$$

利用上述非线性特性, 可构造如下具体控制器:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ A_1 &= z_1 - v(t) + \frac{z_2 |z_2|}{2R_1} \end{aligned} \right\} \text{跟踪-微分器 (I)}$$

$$\dot{z}_2 = -R_1 \text{sat}(A_1, \delta_1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_3 &= z_4 \\ A_2 &= z_3 - y(t) + \frac{z_4 |z_4|}{2R_2} \end{aligned} \right\} \text{跟踪-微分器 (II),}$$

$$\dot{z}_4 = -R_2 \text{sat}(A_2, \delta_2)$$

$$\dot{z}_5 = z_1 - z_3 \quad \text{误差积分}$$

$$\varepsilon_0 = z_5, \quad \varepsilon_1 = z_1 - z_3, \quad \varepsilon_2 = z_2 - z_4$$

$$\begin{cases} u_1 = \beta_0 \text{fal}(\varepsilon_0, \alpha, \delta) + \beta_1 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha, \delta) + \beta_2 \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha, \delta) \\ \dot{z}_6 = -\rho_0(z_6 - u_1) \quad \text{线性滤波器} \\ u = z_6 \end{cases}$$

这个控制器以 $v(t)$ (参考输入)和 $y(t)$ (被调量)为输入,给出控制量 $u(t)$ 。它含有

$$R_1, \delta_1, R_2, \delta_2, \alpha, \delta, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \rho_0$$

10 个参数。其中, R_1 是依过渡过程要求确定; δ_1 是与积分步长和 R_1 有关参数,依跟踪-微分器的单独仿真来确定; R_2 通常取较大; $\delta_2 = \frac{R_2}{R_1} \delta_1$; α 可取 0.5~1.0 之间数; δ 适当小; ρ_0 可用比较 $u = u_1$ 和 $u = z_6$ 的效果来确定。剩余的就是 P.I.D. 的增益系数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 的调整问题了。调整这三个参数尚无确定的方法,只能通过仿真来确定。

4 数值仿真

在以下三个例中所用控制器都是同一“型号”,即控制器的结构与参数均相同。数值仿真采用四阶龙格-库塔法,步长均为 $h = 0.01$ 。

例 1:

$$\dot{x} = F(t) + u, \quad y = x$$

$F(t)$ 为随机开关函数 $|F(t)| \leq 1$, 参考输入为单位阶跃函数(见图 3)。

例 2:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -0.2x_1^2 - \gamma_0(t)x_1x_2 + x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{\gamma_1(t)}{(1 + |x_1|)^2} + \gamma_2(t)x_2 \exp\left(1 + \frac{|x_1|}{10}\right) + u \\ y = x_1 \end{cases}$$

其中 $|\gamma_0(t)| \leq 0.5, |\gamma_1(t)| \leq 1, |\gamma_2(t)| \leq 1$, 参考输入 $v(t) = \text{sign}(T_0 - t), T_0 = 10$, (见图 4)。

例 3:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{\gamma_{11}(t)}{(1 + |x_1|)^2} + \gamma_{12}(t)|\dot{x}_1| \exp\left(1 + \frac{|x_1|}{10}\right) + \gamma_{01}(t)x_2\dot{x}_2 + \dot{x}_2 + u_1 \\ \dot{x}_2 = -0.2x_1^2 - \gamma_{02}x_1\dot{x}_1 + \dot{x}_1 + \gamma_{21}(t)\log(1 + |x_2|) + \gamma_{22}(t)\log(1 + |\dot{x}_2|) + u_2 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases}$$

其中 $|\gamma_{0i}(t)| \leq 0.5, |\gamma_{ij}(t)| \leq 1, i, j = 1, 2$ 。对此对象控制器联接方式如图 2 所示,即并联了同样的控制器,不用采取解耦措施。参考输入 $v_1(t)$ 为三角波, $v_2(t)$ 为正弦波(见图 5、图 6)。

图中也显示了被“安排”的过渡过程,但实际响应与它几乎分辨不出来。

数值仿真表明,这个控制器对不同对象有很强的“适应性”,而且控制器参数 $\alpha, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \rho_0$ 在较大范围内的变化并不影响其适应性,说明控制器也具有很强的“鲁棒性”。

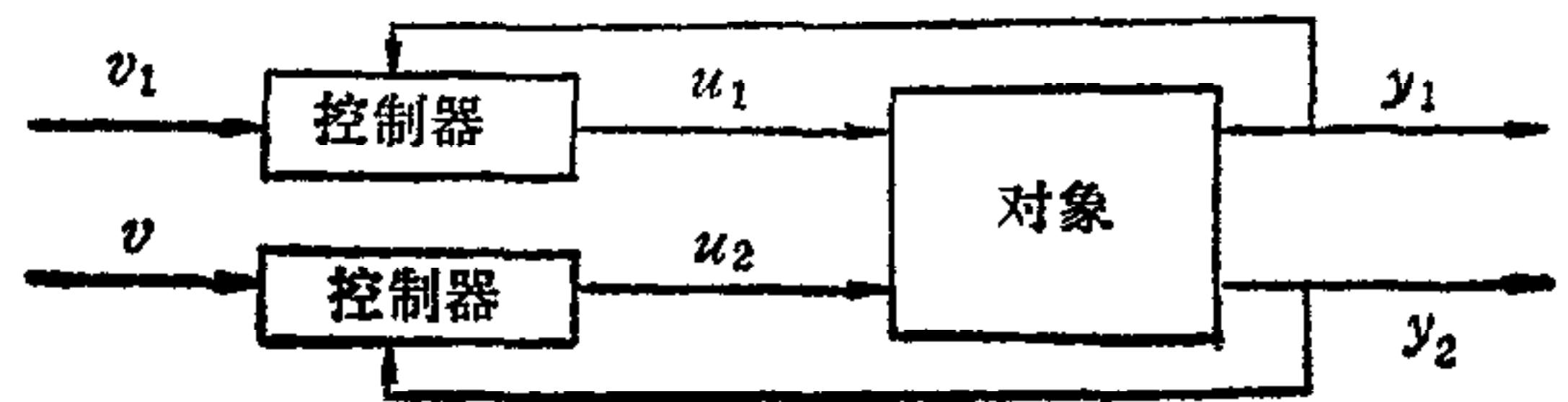


图 2

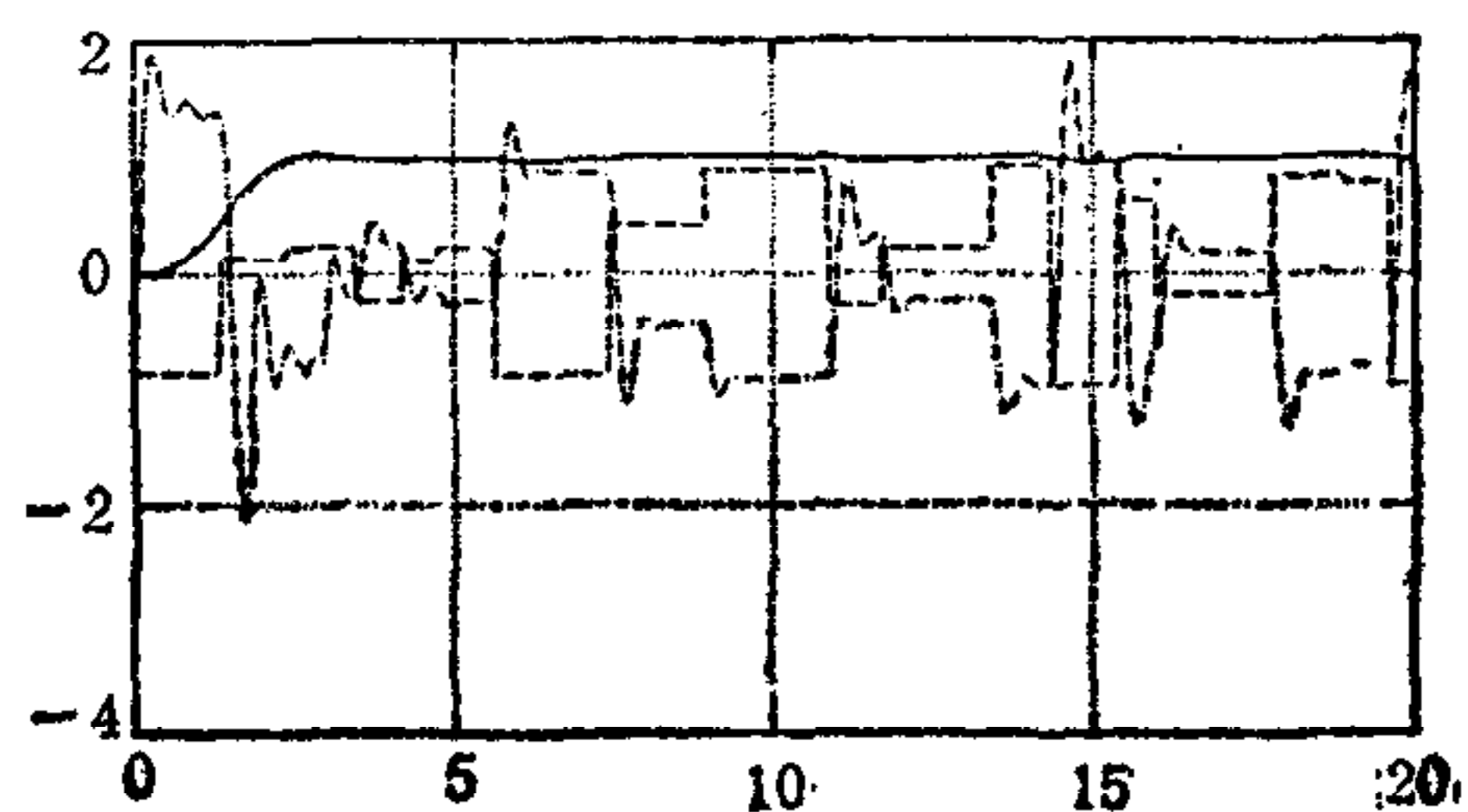


图 3

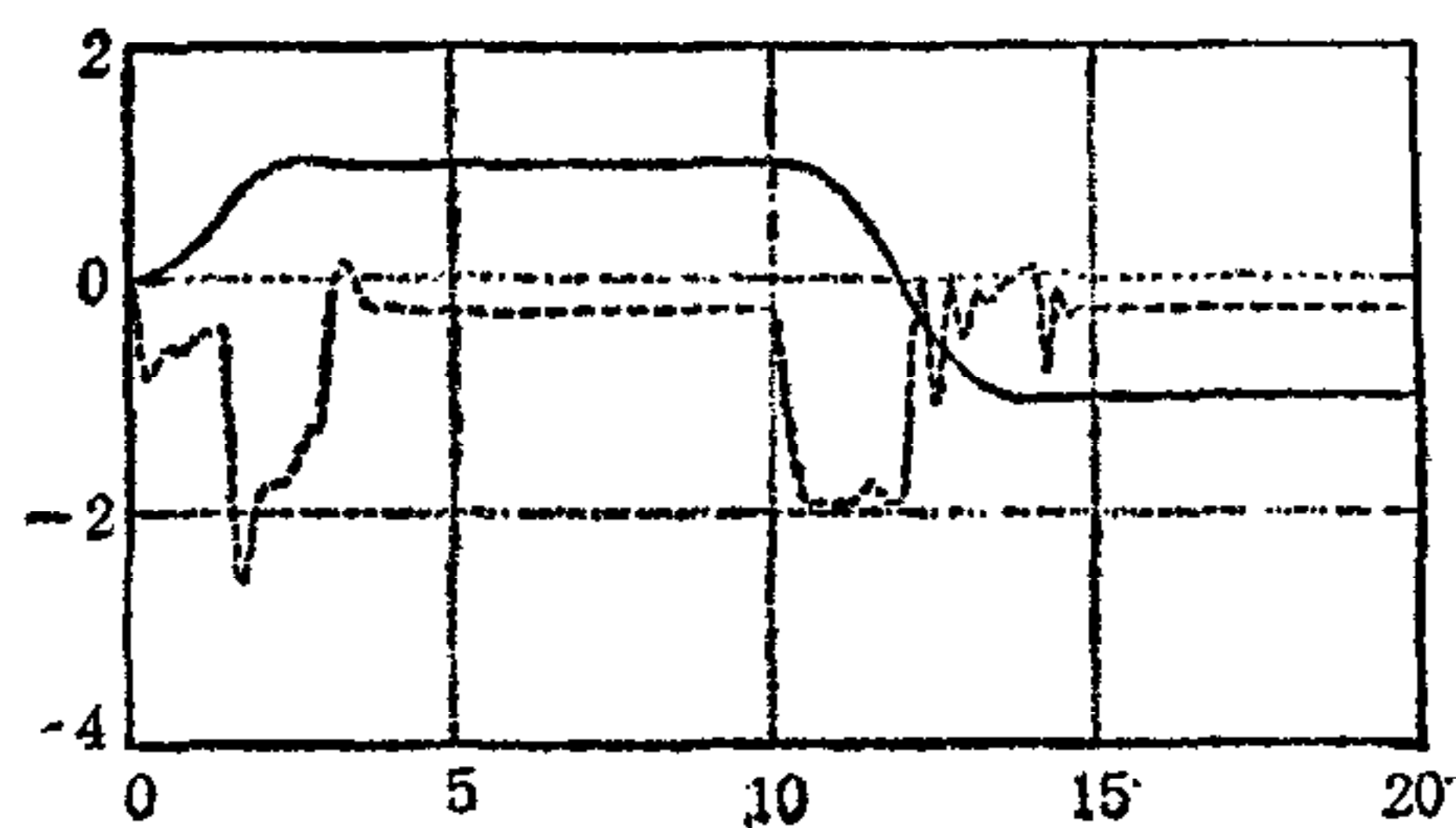


图 4

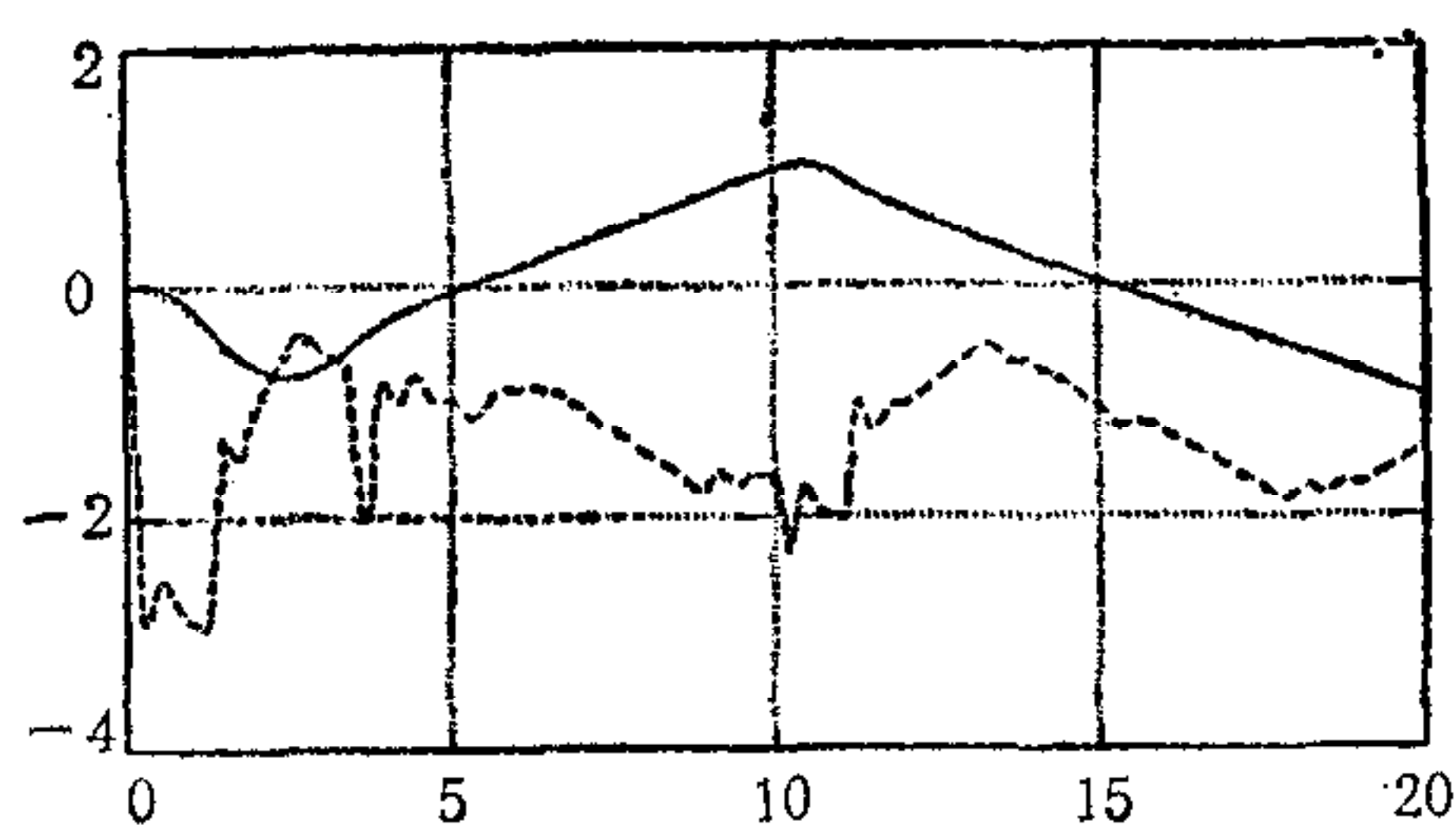


图 5

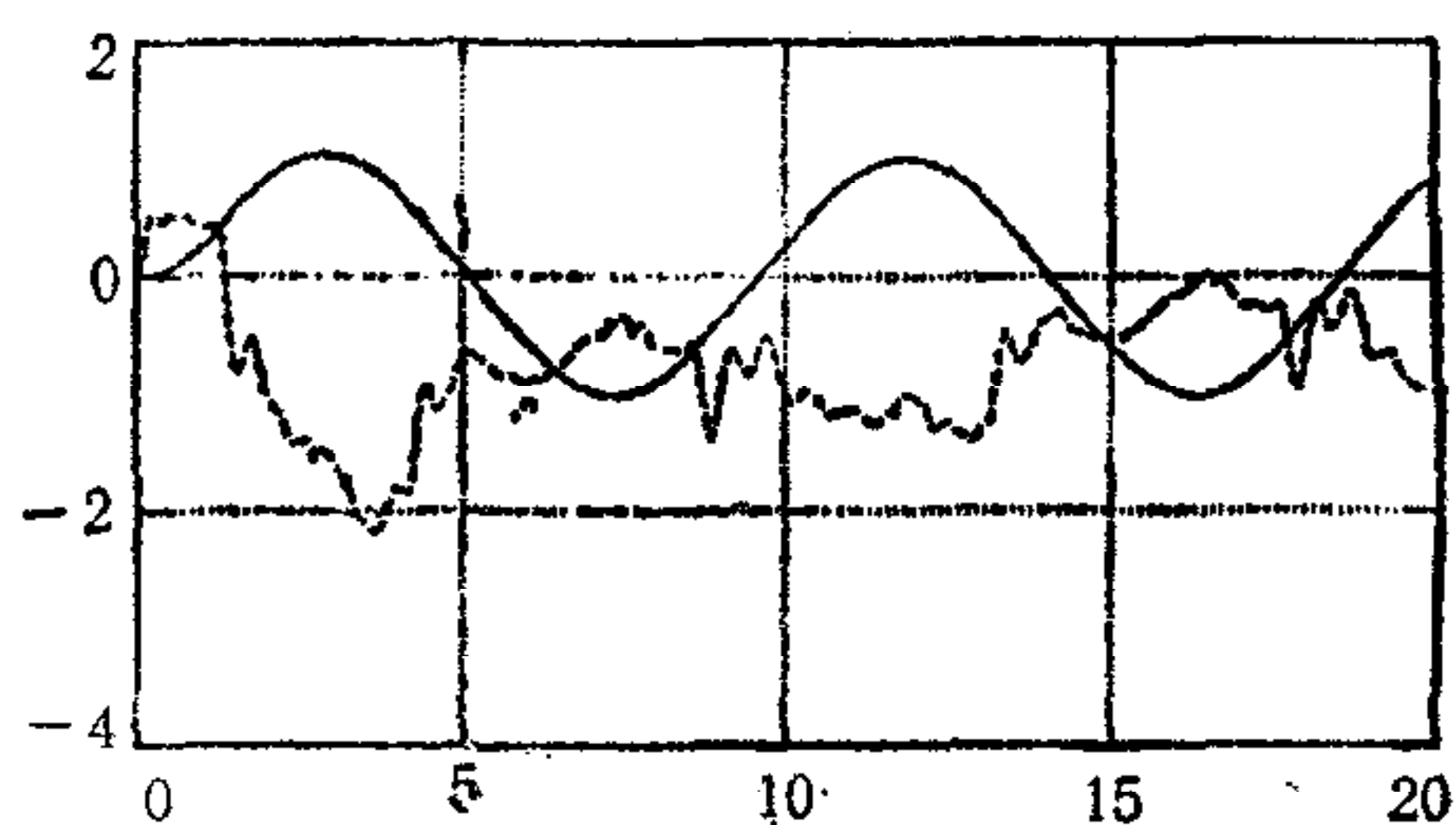


图 6

6 结束语

本文的研究表明,“开发利用非线性特性”来设计控制器是很有实用前景的。本文所采用的“非线性特性”只是非线性沧海中的一粟。我们相信,人们会找出更好的非线性特性,设计出效率更高的控制器来的。

参 考 文 献

- [1] 韩京清. 控制理论——模型论还是控制论. 系统科学与数学, 1989, (4).
 [2] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器, 系统科学与数学, 1994, (2).

NONLINEAR PID CONTROLLER

HAN JINGQING

(Institute of Systems Science, Academia Sinica)

ABSTRACT

In the paper, by using the nonlinear Tracking-Differentiator and nonlinear combination, we improve the classical PID regulator in order to enhance its adaptability and robustness.

Key words: nonlinear control, Tracking-Differentiator, nonlinear PID controller.