

非线性 PID 算法及其在电加热炉 集散控制系统中的应用

王顺晃 李晓天 郑秋宝 郑保元 邓芮岚 轩一顺

(北京科技大学自动化系 北京 100083)

摘 要

本文介绍非线性 PID 算法及其在电加热炉集散控制系统中的应用。实时控制结果表明,该算法具有控制精度高、调节时间短和抗干扰能力强的优点。

关键词: 非线性 PID, 电加热炉, 集散控制系统。

1 前言

随着生产的发展,被控对象越来越复杂,且一般都具有非线性特性。在这类对象建模中,往往假设它在工作点附近为线性来逼近实际系统。最优控制和自适应控制就是以此为基础来设计控制器实现闭环控制的,而直接对非线性系统进行控制,国内目前还停留在仿真研究中。本文则利用非线性 PID 控制算法直接对非线性系统进行实时控制。

2 非线性 PID 算法^[1]

在工业过程控制中大量使用 PID 调节器,但是对复杂的非线性系统往往不能满足要求,因而许多学者采用如自校正 PID 控制、模糊 PID 控制、智能 PID 控制等以提高系统的性能。

这里介绍新型的非线性 PID 调节器,是利用非线性一些特性来改善传统 PID 调节器的性能,达到对非线性系统的有效控制。

2.1 一般 PID 调节器的分析

一般 PID 调节器的控制量 $u(t)$ 输出取决于系统参考输入 $y_r(t)$ 和输出 $y(t)$ 的偏差 $e(t)$ 、偏差积分 $\int_0^t e(t)dt$ 和偏差微分 $de(t)/dt$, 这三个基本要素是一线性组合,即

$$u(t) = K_p \left[e(t) + 1/T_i \int_0^t e(t)dt + T_d de(t)/dt \right].$$

这种调节器的线性组合有以下两个问题:

- (1) 快速性和超调量之间的矛盾;

(2) 参考信号 $y_r(t)$ 经常不可微,甚至不连续,输出 $y(t)$ 又常被噪声污染,因而偏差 $e(t)$ 按经典意义通常不可微,其微分信号不能利用. 所以,设想用 $y_r(t)$ 和 $y(t)$ 来产生其他量代替经典 PID 调节器中的三个要素,建立新的非线性组合框架,以克服上述的缺点.

2.2 非线性跟踪微分器^[2]

所谓跟踪微分器,是对参考输入信号 $y_r(t)$ 分别输出两个信号 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$, 其中 $z_1(t)$ 较好地跟踪 $y_r(t)$. 而 $z_2(t) = \dot{z}_1(t)$, 即把 $z_2(t)$ 当作 $y_r(t)$ 的近似微分, 则跟踪微分器的输入/输出关系可以用一个非线性方程组来描述:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= g(z_1, z_2). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若 $y_r(t)$ 是一个任意给定的有界可积函数,则有

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2. \\ \dot{z}_2 &= R^2 g(z_1 - y_r(t), z_2/R). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

它的解 $z_1(t)$ 满足

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |z_1(t) - y_r(t)| dt = 0.$$

上式中 $T > 0$, 当 R 充分大时, $z_1(t)$ 充分跟踪信号 $y_r(t)$, 而 $z_2(t) = \dot{z}_1(t)$, 可把 $z_2(t)$ 看成信号 $y_r(t)$ 的近似微分. 式(2)称为信号 $y_r(t)$ 跟踪微分器. 在理论上, 使式(1)的零解渐近稳定函数 $g(z_1, z_2)[g(0, 0) = 0]$ 均可成为信号 $y_r(t)$ 的跟踪微分器, 函数 $g(z_1, z_2)$ 可根据具体要求适当构造.

2.3 非线性 PID 调节器^[3]

把参考输入 $y_r(t)$ 送入跟踪微分器 (I), 在它的两个输出信号中 $z_1(t)$ 跟踪 $y_r(t)$, $z_2(t) = \dot{z}_1(t)$. 把被调量 $y(t)$ 送入跟踪微分器 (II), 其输出信号 $z_3(t)$ 跟踪 $y(t)$, $z_4(t) = \dot{z}_3(t)$. 现在用三个量 $e_1(t) = z_1(t) - z_3(t)$, $e_2(t) = z_2(t) - z_4(t)$, $e_0(t) = \int_0^t e_1(t) dt$ 来代替传统 PID 中

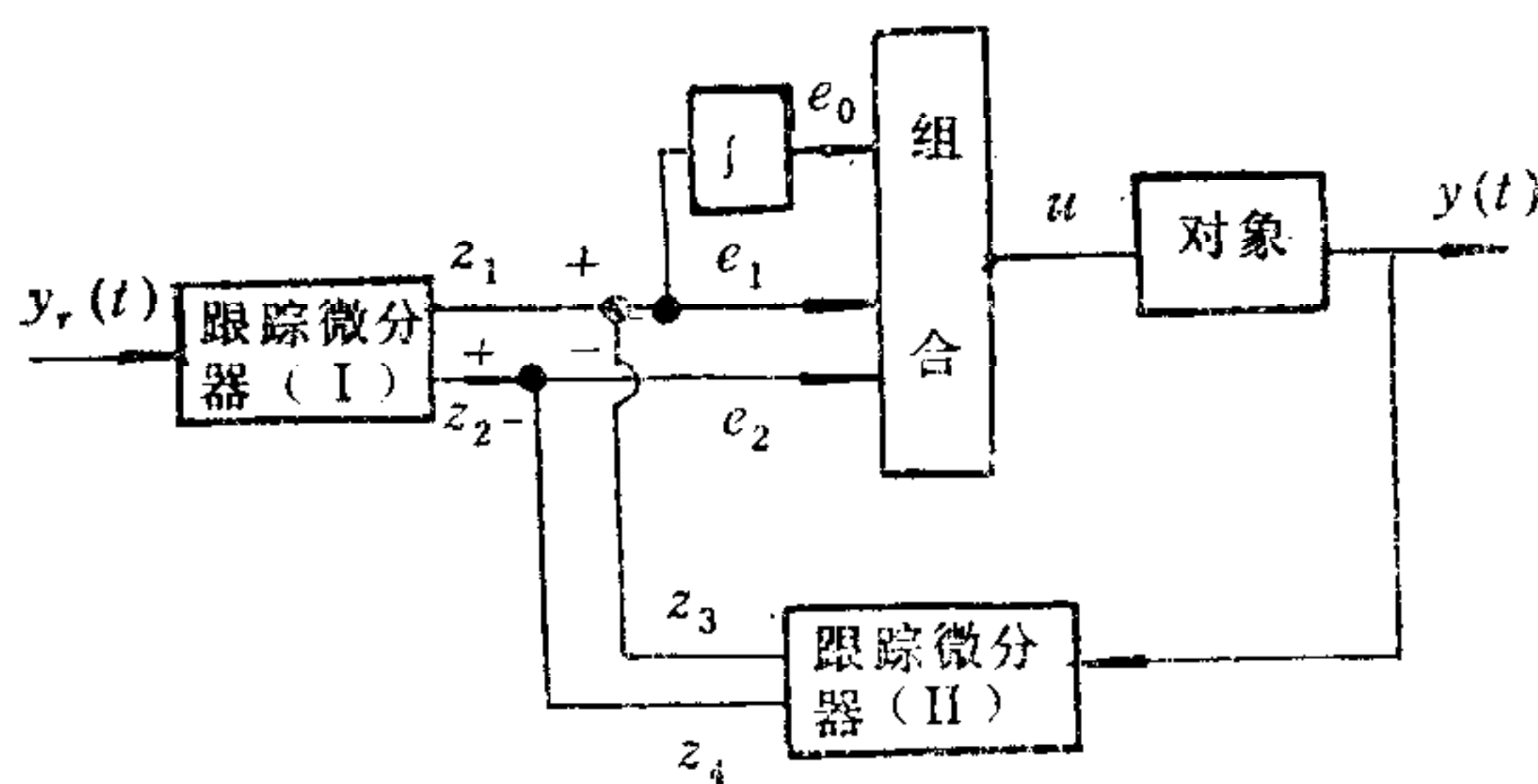


图1 非线性 PID 调节器

三个基本要素, 然后用非线性组合构成新的控制器, 如图 1 所示.

这个控制器表明其基本要素不是简单取自输入输出偏差, 而是取自输入输出

经过非线性处理所得到新变量的偏差和它的积分、微分信号. 这个控制器就称为非线性 PID 控制器.

2.4 非线性 PID 调节器的实现

设计非线性 PID 调节器必须设置两个函数: 一个是跟踪微分器中的 $g(z_1, z_2)$; 另一个是 $e_0(t), e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 的组合形式. 能实现这两个非线性函数的方法很多, 这里只给出其中之一:

$$g(z_1, z_2) = -\text{sat}\left(z_1 + \frac{z_2|z_2|}{2}, \delta\right), \quad (3)$$

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x), & |x| \geq \delta, \\ \frac{x}{\delta}, & |x| < \delta. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)是由二阶最速开关函数得来的。而 $e_0(t)$, $e_1(t)$ 和 $e_2(t)$ 的非线性组合形式取为

$$u_1 = \beta_0 \text{fal}(e_0, \alpha, \delta) + \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2, \alpha, \delta), \quad (5)$$

$$\text{fal}(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x)|x|^\alpha, & |x| \geq \delta, \\ \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, & |x| < \delta. \end{cases} \quad (6)$$

当 $\alpha = 1$ 时, $\text{fal}(x, 1, \delta) = x$, 所以 fal 是接近线性函数的非线性函数。由于 $\text{sat}(x, \delta)$, $\text{fal}(x, \alpha, \delta)$ 的非线性特性, 非线性组合产生的控制量 u_1 常含有高频振荡分量, 这就需要设计一个线性或非线性滤波器, 则非线性 PID 控制方程组可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= -R_1 \text{sat}\left(z_1 - y_r(t) + \frac{z_2|z_2|}{2R_1}, \delta_1\right), \\ \dot{z}_3 &= z_4, \\ \dot{z}_4 &= -R_2 \text{sat}\left(z_3 - y(t) + \frac{z_4|z_4|}{2R_2}, \delta_2\right), \\ e_0 &= \int_0^t (z_1 - z_3) dt, \\ e_1 &= z_1 - z_3, \\ e_2 &= z_2 - z_4, \\ u_1 &= \beta_0 \text{fal}(e_0, \alpha, \delta) + \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2, \alpha, \delta), \\ \dot{z}_5 &= -\rho_0(z_5 - u_1), \\ u &= z_5. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在式(7)非线性 PID 控制方程中有 10 个可调参数, 即 $R_1, R_2, \delta_1, \delta_2, \alpha, \delta, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ 和 ρ_0 。其中 R_1 与过渡过程快慢有关, R_2 比 R_1 选大些, 调试中选 $R_1 = 1, R_2 = 20$; δ_1 与积分步长和 R_1 有关, 由跟踪微分器仿真确定; $\delta_2 = R_2/R_1 \cdot \delta_1$; $\alpha = 0.85$; $\beta_0 = 0.98$; $\beta_1 = -0.90$; $\beta_2 = 0.4$; ρ_0 一般小于 1, 具体由仿真确定。

3 非线性 PID 算法在电加热炉集散系统中应用

3.1 系统硬件构成原理

根据用户要求, 本系统需要控制 16 台电加热炉。上位机选用工业控制机 PC-286, 下位机选用 STD8098 单片机作为现场控制器, 它控制两台电加热炉。上下位机通过 1 转 8 通讯分配器(它相当于一个电子开关)联系, 组成主从星形网络, 其结构如图 2 所示。

其中上位机负责数据管理、屏幕显示、打印报表、超限报警、加载提示及与下位机通讯，即将设定值、控制数据送往下位机或接收下位机采集来的数据；下位机进行数据采集和通讯等功能。通讯是通过上下位机 RS-232C 实现主从异步全双工通讯。

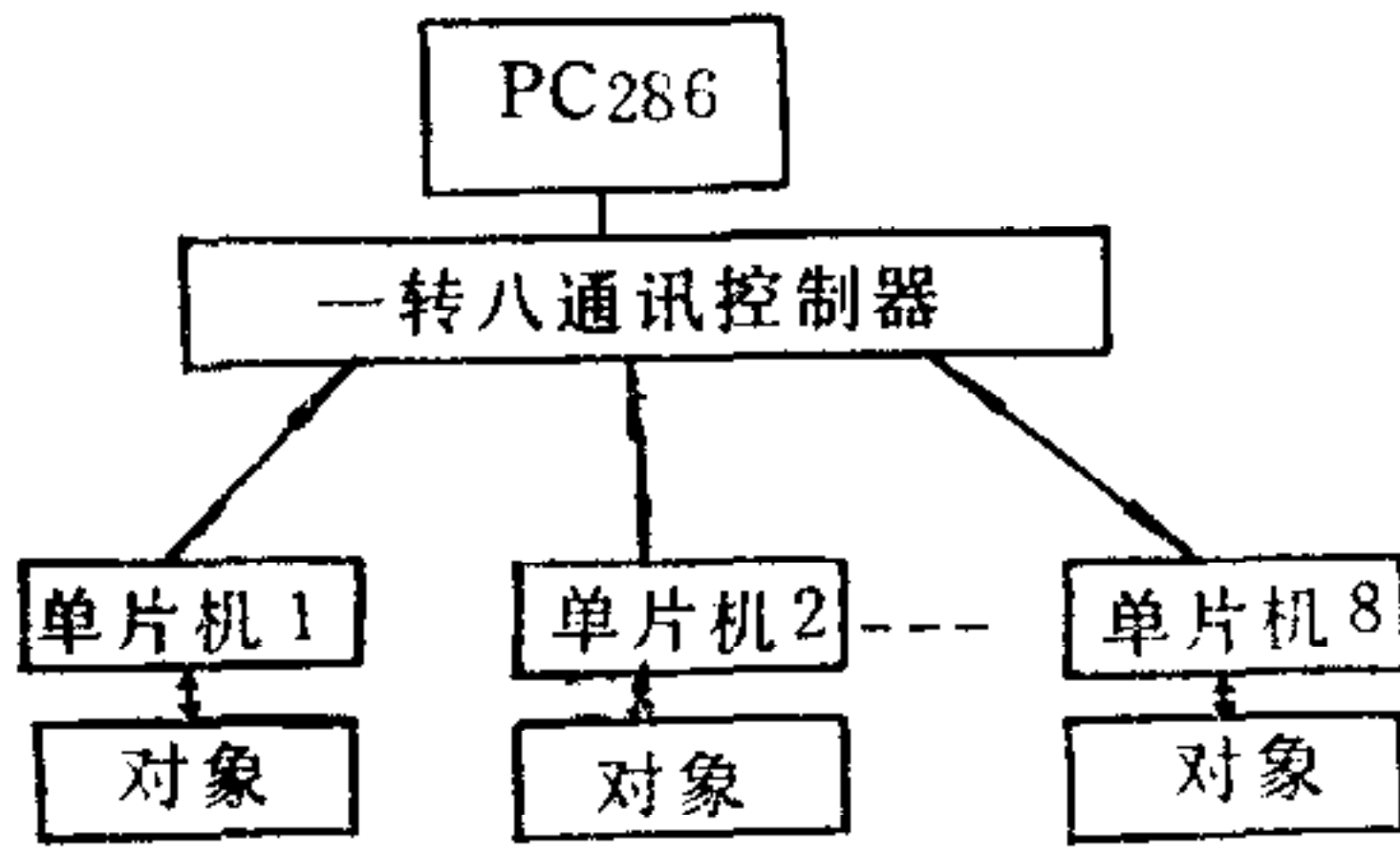


图 2 集散系统结构框图

本文采用 STD8098 单片机和 10 位 A/D 转换器进行数据采集，由 RS-232C 送到工业控制机 PC-286，在工业控制机中进行非线性 PID 计算，然后把计算结果 u 再通过 RS-232C 送往下位机，经八位 D/A 转换器直接控制电加热炉。

3.2 非线性 PID 算法在电加热炉中的实施

针对电加热炉具体对象求解下列微分方程组：

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \\ \dot{z}_2 &= -R_1 \text{sat} \left(z_1 - y_r(t) + \frac{z_2 |z_2|}{2R_1}, \delta_1 \right); \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_3 &= z_4, \\ \dot{z}_4 &= -R_2 \text{sat} \left(z_3 - y(t) + \frac{z_4 |z_4|}{2R_2}, \delta_2 \right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这里采用一阶微分方程组积分一步的四阶庞格-库塔法。例如，对下式一阶微分方程组求解：

$$\left. \begin{aligned} \dot{y} &= f(t, y, z), \quad y(t_0) = y_0, \\ \dot{z} &= g(t, y, z), \quad z(t_0) = z_0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

假设 y_i 和 z_i 均已知，需要求 y_{i+1} 和 z_{i+1} ，则有

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= f(t_i, y_i, z_i), \\ K_2 &= f \left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}K_1, z_i + \frac{h}{2}L_1 \right), \\ K_3 &= f \left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}K_2, z_i + \frac{h}{2}L_2 \right), \\ K_4 &= f(t_i + h, y_i + hK_3, z_i + hL_3), \\ y_{i+1} &= y_i + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4), \\ L_1 &= g(t_i, y_i, z_i), \\ L_2 &= g \left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}K_1, z_i + \frac{h}{2}L_1 \right), \\ L_3 &= g \left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2}K_2, z_i + \frac{h}{2}L_2 \right), \\ L_4 &= g(t_i + h, y_i + hK_3, z_i + hL_3), \\ z_{i+1} &= z_i + \frac{h}{6}(L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

上例可以方便地用于求解式(8)和式(9)。

3.3 系统软件设计

本系统软件分三部分:

(1) 数据采集和控制量输出软件,对 MCS-98 单片机采用汇编语言编程,在下位机 STD8098 多回路控制器中运行;

(2) 非线性 PID 控制算法软件,它依据式(4),(6),(7)和(11)利用 C 语言编程,在上位机 PC286 中运行;

(3) 系统通讯软件,采用 C 语言和汇编语言分别在上位机和下位机中运行。

在上位机中非线性 PID 运算结果得到控制量送往下位机多回路控制器,以控制电加热炉的功率,实现电加热炉升温和恒温过程的实时控制。

3.4 实时控制结果

图 3 所示为电加热炉温度实时控制曲线。由图可见,升温过程无超调很快进入稳态,其中有两个尖峰干扰是本系统通讯误码引起,但是很快又自动恢复,说明系统有很强的抗干扰能力。表 1 是稳态后的采样值,数据用 16 进制表示,例如前八个数据为 193, 194, 194, 193, 193, 194, 195, 194。对应的十进制数据为 403, 404, 404, 403, 403, 404, 405, 404, 上下偏差一个代码。由于本系统采用十位 A/D 和八位 D/A 板,所以一个代码相当于 1.27°C 。设定温度 403 相当于 510°C 。因而系统控温精度在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内,而传统 PID 控温精度都在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以上。

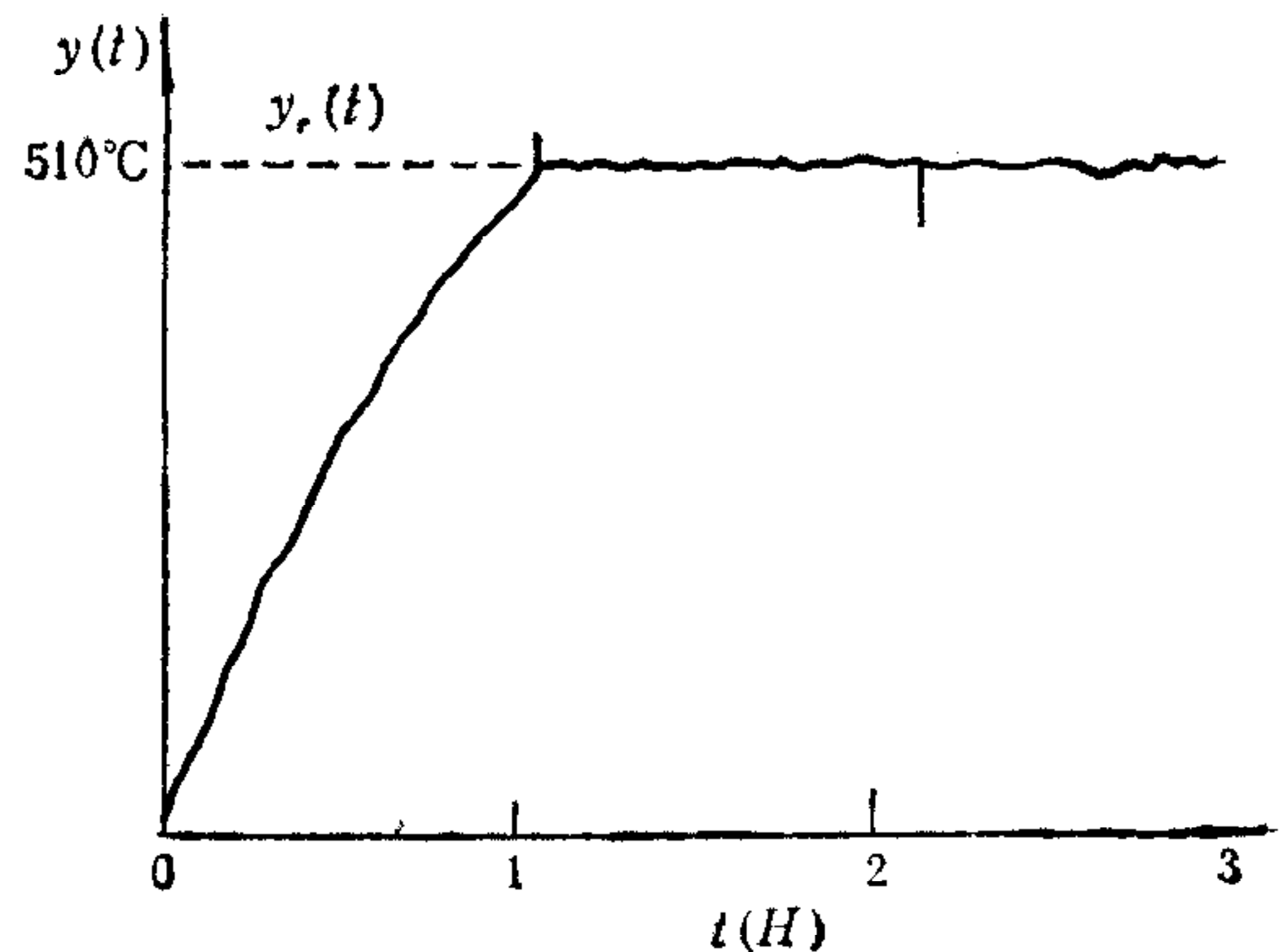


图 3 炉温设定在 510°C 时的控温曲线

从系统调试实践还可看出,非线性 PID 算法比传统 PID 算法有以下特点:

(1) 传统 PID 算法过渡过程时间与超调量之间矛盾大,无论怎样调节 PID 的三个参数也不能解决。若要求超调量小,过渡过程时间必须加长;如要求过渡过程快,则必出现超调;二者难以求全。而非线性 PID 算法很好地解决了这对矛盾,过渡过程的快慢几乎与超调量无关。因而可以方便、灵活地改变参数,以最快速度无超调地进入稳态。

(2) 传统 PID 算法中三个参数的较小变化即可能引起系统超调量和精度较大的波动。而非线性 PID 算法中十个参数一旦选定,即使在大范围内变化时系统超调量和稳态精度变化也很小。因而非线性 PID 算法比传统 PID 算法有更强的鲁棒性。

4 结论

本文首次成功地在电加热炉集散控制系统中引入非线性 PID 控制,获得良好的静态和动态特性,为进一步研究过程非线性控制提供一个很好的范例。

表 1 稳态时炉温数据表

-D BE00																	
ADDR:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	ASCII
BE00:	93	01	94	01	94	01	93	01	93	01	94	01	95	01	94	01	.....
BE10:	94	01	93	01	94	01	93	01	93	01	93	01	93	01	92	01	.....
BE20:	94	01	93	01	94	01	93	01	93	01	93	01	93	01	94	01	.....
BE30:	94	01	93	01	93	01	94	01	94	01	94	01	94	01	92	01	.....
BE40:	93	01	94	01	94	01	93	01	91	01	94	01	93	01	94	01	.....
BE50:	92	01	91	01	93	01	93	01	92	01	93	01	94	01	94	01	.....
BE60:	91	01	94	01	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	94	01	.....
BE70:	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	.....
-D																	
ADDR:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	ASCII
BE80:	94	01	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	95	01	93	01	.....
BE90:	93	01	93	01	93	01	93	01	94	01	93	01	94	01	93	01	.....
BEA0:	93	01	94	01	94	01	91	01	93	01	93	01	94	01	92	01	.....
BEB0:	91	01	93	01	93	01	94	01	92	01	93	01	94	01	94	01	.....
BEC0:	94	01	93	01	93	01	93	01	92	01	92	01	93	01	92	01	.....
BED0:	93	01	92	01	93	01	93	01	93	01	93	01	93	01	91	01	.....
BEE0:	92	01	92	01	93	01	92	01	94	01	94	01	93	01	92	01	.....
BEF0:	94	01	94	01	91	01	93	01	94	01	93	01	94	01	92	01	.....
-D																	
ADDR:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	ASCII
BF00:	93	01	94	01	93	01	93	01	94	01	94	01	94	01	93	01	.....
BF10:	93	01	93	01	94	01	91	01	94	01	94	01	92	01	93	01	.....
BF20:	94	01	94	01	94	01	91	01	93	01	93	01	94	01	94	01	.....
BF30:	94	01	93	01	94	01	92	01	94	01	94	01	94	01	94	01	.....
BF40:	93	01	93	01	94	01	94	01	92	01	92	01	92	01	93	01	.....
BF50:	92	01	92	01	92	01	91	01	92	01	94	01	93	01	93	01	.....
BF60:	92	01	92	01	93	01	92	01	91	01	93	01	94	01	94	01	.....
BF70:	94	01	94	01	93	01	91	01	92	01	92	01	94	01	92	01	.....
-D																	
ADDR:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F	ASCII
BF80:	94	01	92	01	92	01	94	01	91	01	94	01	94	01	92	01	.....
BF90:	93	01	93	01	94	01	93	01	94	01	93	01	91	01	94	01	.....
BFA0:	94	01	92	01	93	01	94	01	92	01	93	01	94	01	94	01	.....
BFB0:	93	01	94	01	93	01	93	01	94	01	92	01	94	01	93	01	.....
BFC0:	93	01	94	01	94	01	92	01	93	01	94	01	92	01	93	01	.....
BFD0:	94	01	94	01	93	01	91	01	94	01	94	01	94	01	93	01	.....
BFE0:	92	01	92	01	92	01	92	01	92	01	94	01	94	01	93	01	.....
BFF0:	92	01	91	01	94	01	94	01	92	01	93	01	92	01	94	01	.....

致谢: 本文的研究得到中国科学院系统所韩京清研究员的热情帮助, 深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Holtzman JM. Nonlinear System Theory. Pentice Hall. 1970.
- [2] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪微分器. 系统科学与数学, 待发表.
- [3] 韩京清, 王伟. 非线性 PID 控制. 自动化学报, 待发表.

NONLINEAR PID ALGORITHM AND ITS APPLICATION IN DISTRIBUTED SYSTEM OF THE ELECTRONIC HEATING FURNACE

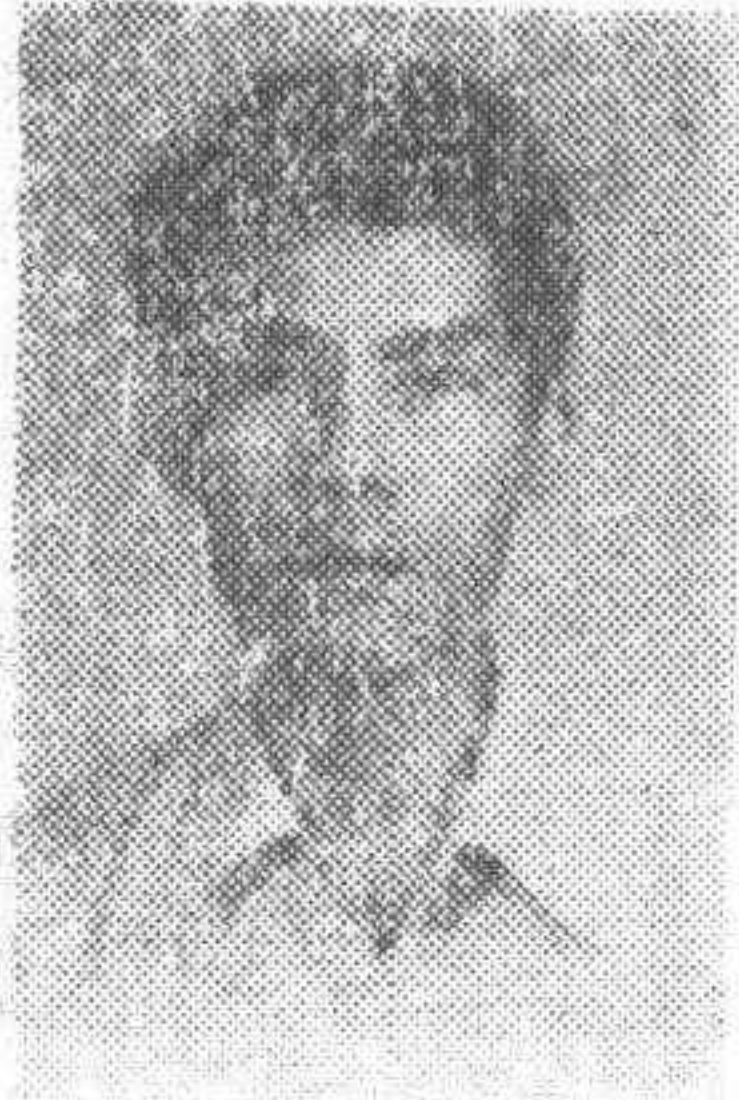
WANG SHUNHUANG LI XIAOTIAN ZHENG QIUBAO ZHENG BAOYUAN
DENG RUILAN HU YISHUN

(Dept. of Automation, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)

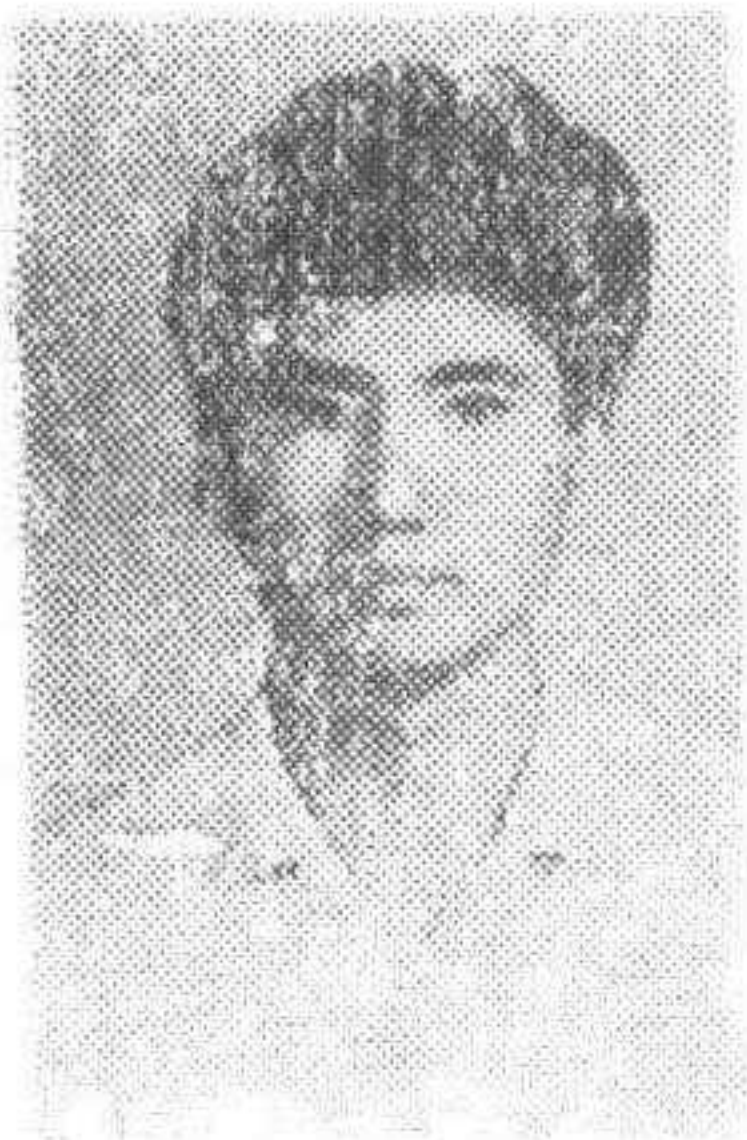
ABSTRACT

In the paper, nonlinear PID algorithm and its application in distributed system of the electronic heating furnace are introduced, Real-time control results shows that it has the advantages of high control precision, short adjust time strong robust and against disturbance.

Key words: Nonlinear PID, electronic heating furnace, distributed control system.



王顺晃 1938年4月生于福建省, 1962年毕业于北京钢铁学院。现任北京科技大学自动化信息工程学院教授。长期从事工业自动化、自动控制理论及计算机控制方面的教学和科研工作。目前的研究方向为生产过程建模、智能控制、预测控制、自适应控制及非线性控制。



李晓天 1960年11月生, 1983年毕业于北京理工大学, 获工学学士学位。1993年获北京科技大学自动控制理论专业工学硕士。曾获大庆油田现代化管理三等奖。现任沈阳工业学院教师, 从事教学与科研工作, 感兴趣研究领域为非线性控制、大系统和现代管理工程。