

自抗扰控制器在过热汽温控制中应用的仿真研究

刘翔 姜学智 李东海 李立勤 胡雪蛟 黎浩荣

(清华大学热能系 北京 100084)

摘要 对控制领域的新成果——ADRC 应用于热工过程控制进行了仿真研究。首先将 ADRC 中跟踪微分器的设计结合工程实际进行简化, 然后将其用于四阶非线性对象和锅炉过热汽温的控制。仿真结果表明, ADRC 对模型的不确定因素和外扰有较强的适应能力, 对过热汽温这种存在大干扰、大延迟、不确定性的复杂非线性对象, 其控制品质要远优于常规的 PID 控制, 显示出 ADRC 在热工过程控制中良好的应用前景。

关键词 自抗扰控制, 不确定系统, 过热汽温

1 引言

火电厂锅炉的过热器在高温、高压条件下工作, 过热蒸汽温度的控制对于电厂的安全经济运行有着重要的影响。过热汽温一般可视为多容分布参数受控对象, 用多容惯性环节来表示^[1]。该对象对喷水扰动的阶跃响应具有明显的滞后特性。实际生产过程中, 主蒸汽流量和压力、烟气温度和流速等外扰以及减温水内扰对过热汽温扰动频繁且扰动量较大。对象模型参数随工况参数(主蒸汽压力、温度和流量)的变化而变化, 难以建立精确的数学模型。因此, 过热蒸汽温度是一个存在大干扰、大延迟、时变性、不确定性和非线性的复杂热工对象。目前电厂中广泛使用的常规 PID 控制器由于其参数必须根据被控对象整定, 难以适应不同工况下被控对象动态特性的改变, 过热汽温对象的控制品质欠佳。Smith 预估控制算法虽然能有效克服大延迟、大惯性, 但依赖于对象精确的数学模型, 抗内、外干扰能力差, 在对象模型失配时控制品质恶化。

中科院韩京清研究员近年提出一种非线性鲁棒控制技术——自抗扰控制^[2], 具有良好的鲁棒性和抗干扰性, 而且根据该原理设计自抗扰控制器(ADRC)不需要对象的数学模型。文献[2]给出了二阶 ADRC 的仿真例子, 但无实际物理背景, 对于较高阶数 ADRC 的控制性能以及对实际物理对象的控制效果还有待验证。

本文首先对 ADRC 中跟踪微分器的设计结合工程实际进行合理修改和简化, 并将其应用于四阶非线性对象的自抗扰控制, 验证了其有效性; 然后将 ADRC 用于过热汽温串级控制系统。仿真结果表明, ADRC 对模型的不确定性和外扰具有较强的适应能力, 对过热汽温这种复杂的非线性控制对象有良好的控制性能, 其应用范围还有待进一步开发。

2 自抗扰控制器

2.1 自抗扰控制器简介

设有受未知外扰 $w(t)$ 作用的非线性不确定对象

$$y^{(n)} = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, w(t)) + b(t)u(t). \tag{1}$$

其中, f 、 w 、 b 均为不确定函数. 针对该对象的 ADRC 结构如图 1 所示.

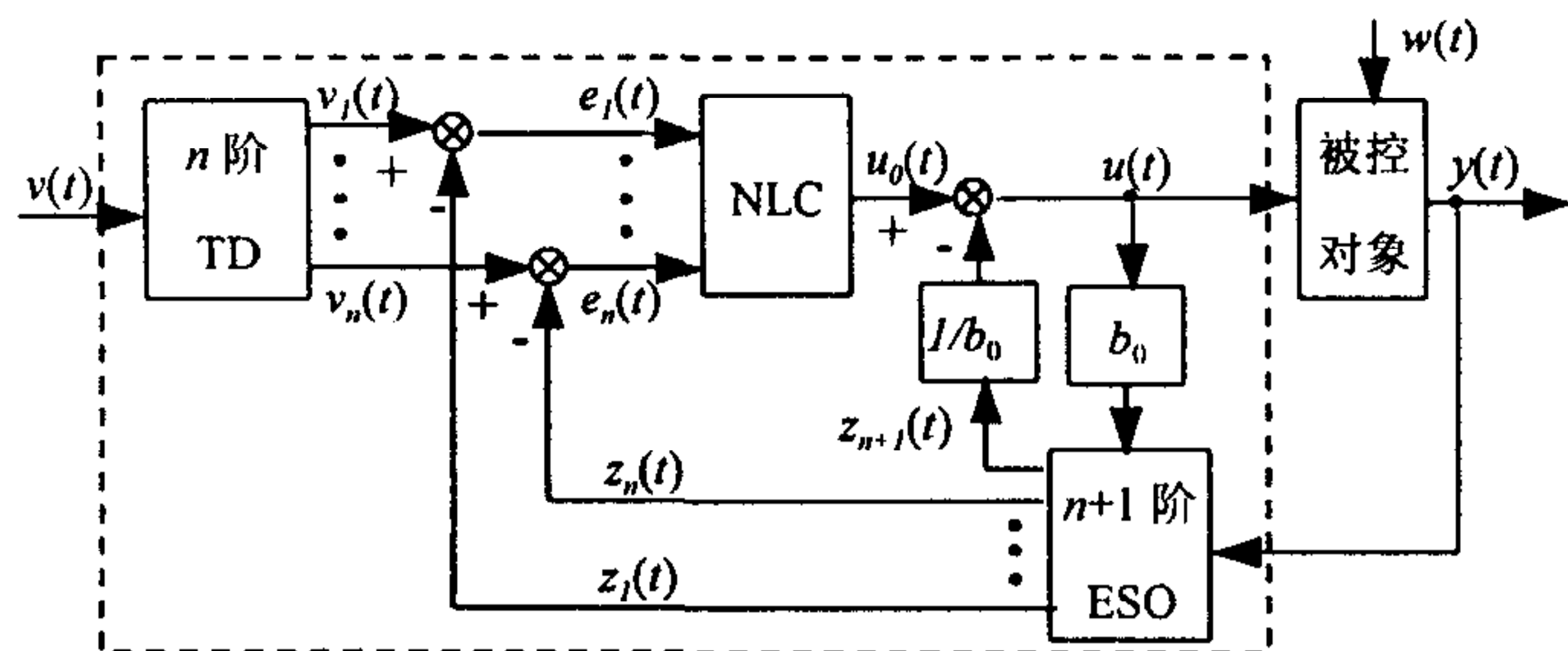


图 1 自抗扰控制器结构

图中 TD 为跟踪微分器, 其作用是安排过渡过程并给出其各阶导数. 文献[3]由最速开关系统导出了二阶和三阶跟踪微分器的具体形式, 三阶 TD 的形式较之二阶 TD 要繁杂的多. 显然, 在高阶情况下根据最优控制思想来设计 TD 将十分困难和烦琐. 在工程上, 往往只需要构造满意的过渡过程,

勿需最优. 因此, 可根据实际情况来构造 TD, 尽量使其形式简单, 易于实现. 本文借鉴非线性控制逆系统方法中预期动力学方程的选取, 采用文献[4]推荐的方法, 将 ADRC 的过渡过程安排为

$$\Phi(s) = \left(\frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \right) \left[\frac{a\omega(n-2)}{s + a\omega(n-2)} \right]^{n-2}, \quad n \geq 2. \tag{2}$$

其中, n 为对象阶数; 若取 $a \geq 5$, 式 (2) 的阶跃响应与其第一因子二阶环节的阶跃响应接近; ζ 取值在 0 到 1 之间; ω 可根据期望的动态特性适当选取. 式 (2) 与工程控制系统性能指标之间存在直接而简明的关系, 且求解过程比较简洁.

图中 ESO 是扩张状态观测器, 作用是使其各输出分别跟踪对象 (1) 的各状态变量. 而 $z_{n+1} \rightarrow a(t) = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, w(t)) + (b(t) - b_0)u(t)$, 它包含了对对象的不确定因素和外扰的信息, 可由此进行补偿, 即

$$u(t) = u_0(t) - z_{n+1}(t) / b_0. \tag{3}$$

则由 $u_0(t)$ 到 $y(t)$ 的开环传递关系将是 n 个积分器串联型, 从而实现了非线性不确定系统的反馈线性化. ESO 在观测器形式的跟踪微分器^[5]基础上构造而成

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g_1(z_1 - y(t)), \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - \beta_n g_n(z_1 - y(t)) + b_0 u(t), \\ \dot{z}_{n+1} = -\beta_{n+1} g_{n+1}(z_1 - y(t)). \end{cases} \tag{4}$$

其中, b_0 为 $b(t)$ 变化范围内的某一中间值, 非线性函数 $g_1(z), \dots, g_2(z)$ 和 $g_{n+1}(z)$ 可适当选取, 文献[5]给出 $g_i(z)$ 的一种具体形式

$$g_i(z) = fal(z, a_i, \delta) = \begin{cases} |z|^{a_i} \text{sign}(z), & \text{当 } |z| > \delta, \\ \frac{z}{\delta^{1-a_i}}, & \text{其它,} \end{cases} \quad \delta > 0. \tag{5}$$

图中 NLC 实现安排的过渡过程与对象状态变量之间误差的非线性组合, 从而实现非线性状态误差反馈, 并给出控制 n 阶积分器串联型对象所需的控制量

$$u_0 = \gamma_1 g_1(e_1) + \dots + \gamma_n g_n(e_n). \tag{6}$$

其中 $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ 为可调参数, $g_i(\varepsilon)$ 可取式 (5) 的形式.

2.2 仿真例子

设有如下四阶非线性系统

$$y^{(4)} = -4\ddot{y} - 6\dot{y} - 4y - 0.1(\ddot{y}\ddot{y} + \ddot{y}\dot{y} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{y}\dot{y} + \dot{y}y + \dot{y}y) + u. \quad (7)$$

根据对象的开环阶跃响应, 过渡过程安排为

$$\Phi(s) = \frac{1}{(s+1)^4}, \quad (8)$$

并据此构造 TD, ESO 及 NLC 中的非线性函数均取式 (5) 的形式. NLC 参数整定为:

$$\delta = 0.01; \quad a_1 = a_2 = 1.4, \quad a_3 = 1.1,$$

$$a_4 = 1.64; \quad \gamma_1 = 80, \quad \gamma_2 = 400, \quad \gamma_3 = 300,$$

$$\gamma_4 = 200. \quad \text{ESO 参数整定为:}$$

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = 0.8; \quad \beta_1 = 20,$$

$$\beta_2 = 400, \quad \beta_3 = 3000, \quad \beta_4 = 4000, \quad \beta_5 = 8000; \quad \delta = 0.01; \quad b_0 = 1. \quad \text{系统阶跃响应仿真结果如图 2 所示, 其中虚线 } v_1(t) \text{ 为安排的过渡过程, 实线 } y(t) \text{ 为系统的阶跃响应. 可见其性能是比较满意的.}$$

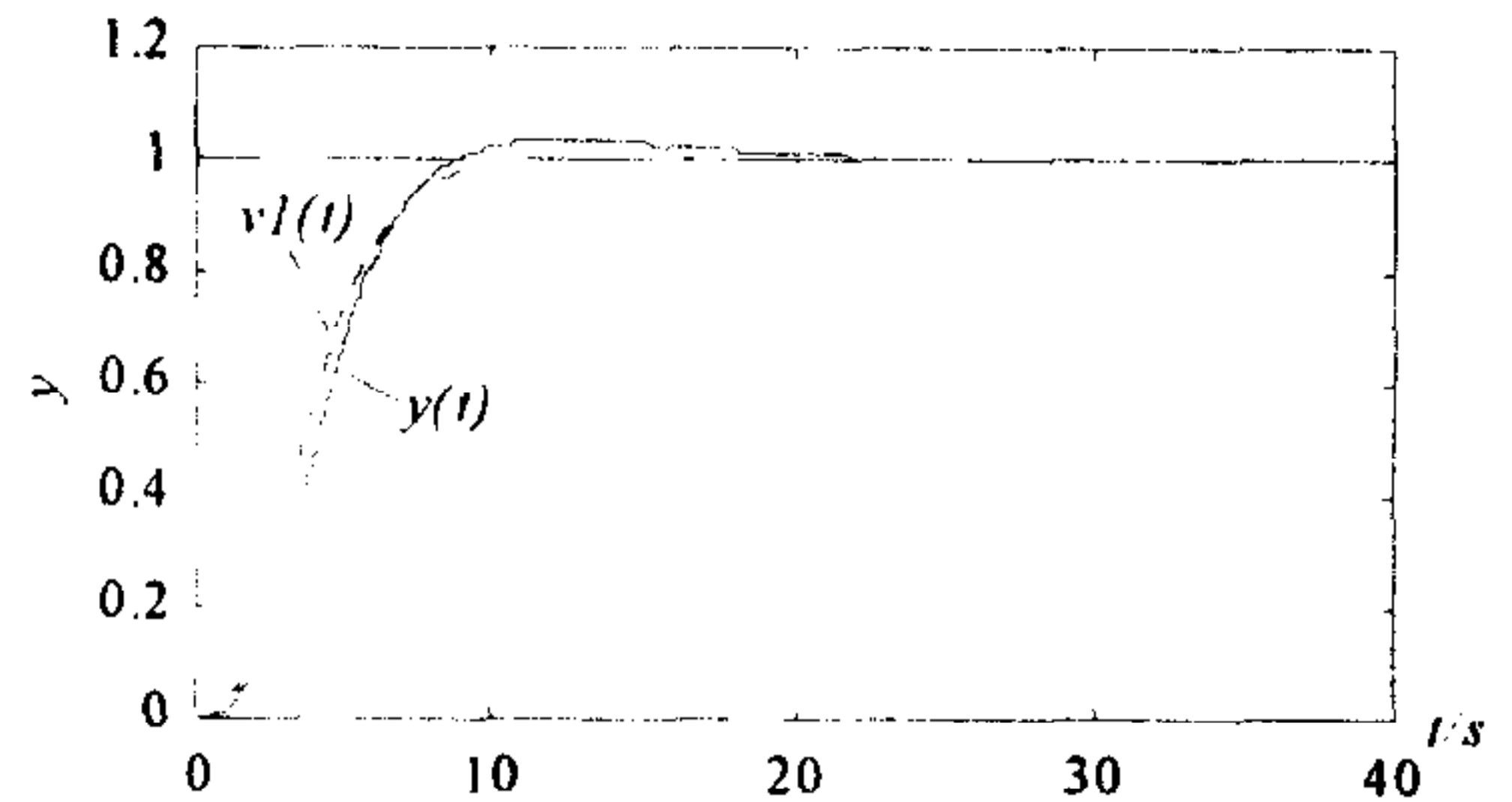


图 2 对象 (7) 仿真结果

为检验 ADRC 对模型不确定因素的适应能力, 现将对象非线性项扩大 100 倍, 即

$$y^{(4)} = -4\ddot{y} - 6\dot{y} - 4y - 10(\ddot{y}\ddot{y} + \ddot{y}\dot{y} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{y}\dot{y} + \dot{y}y + \dot{y}y) + u, \quad (9)$$

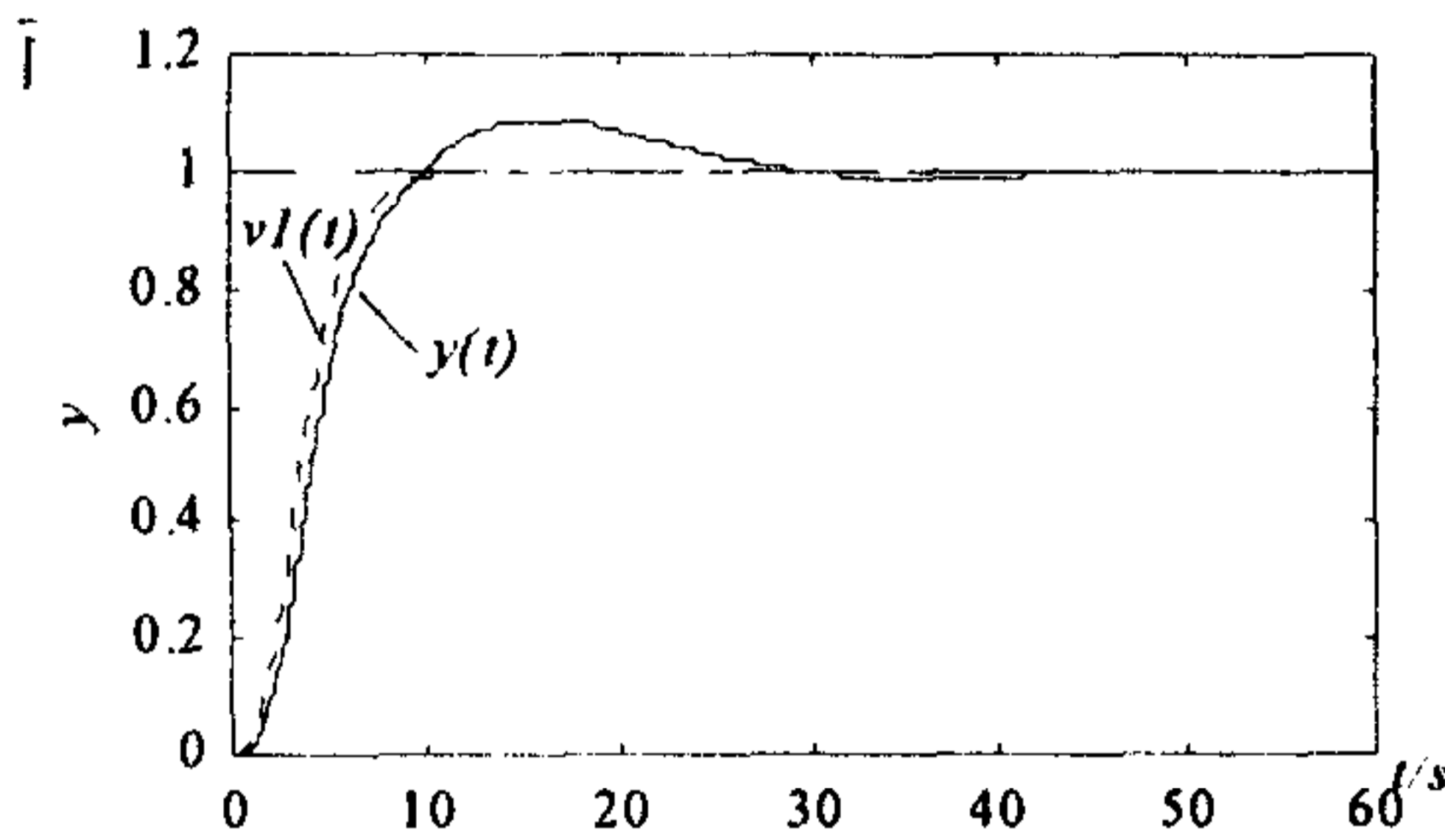


图 3 对象 (9) 仿真结果

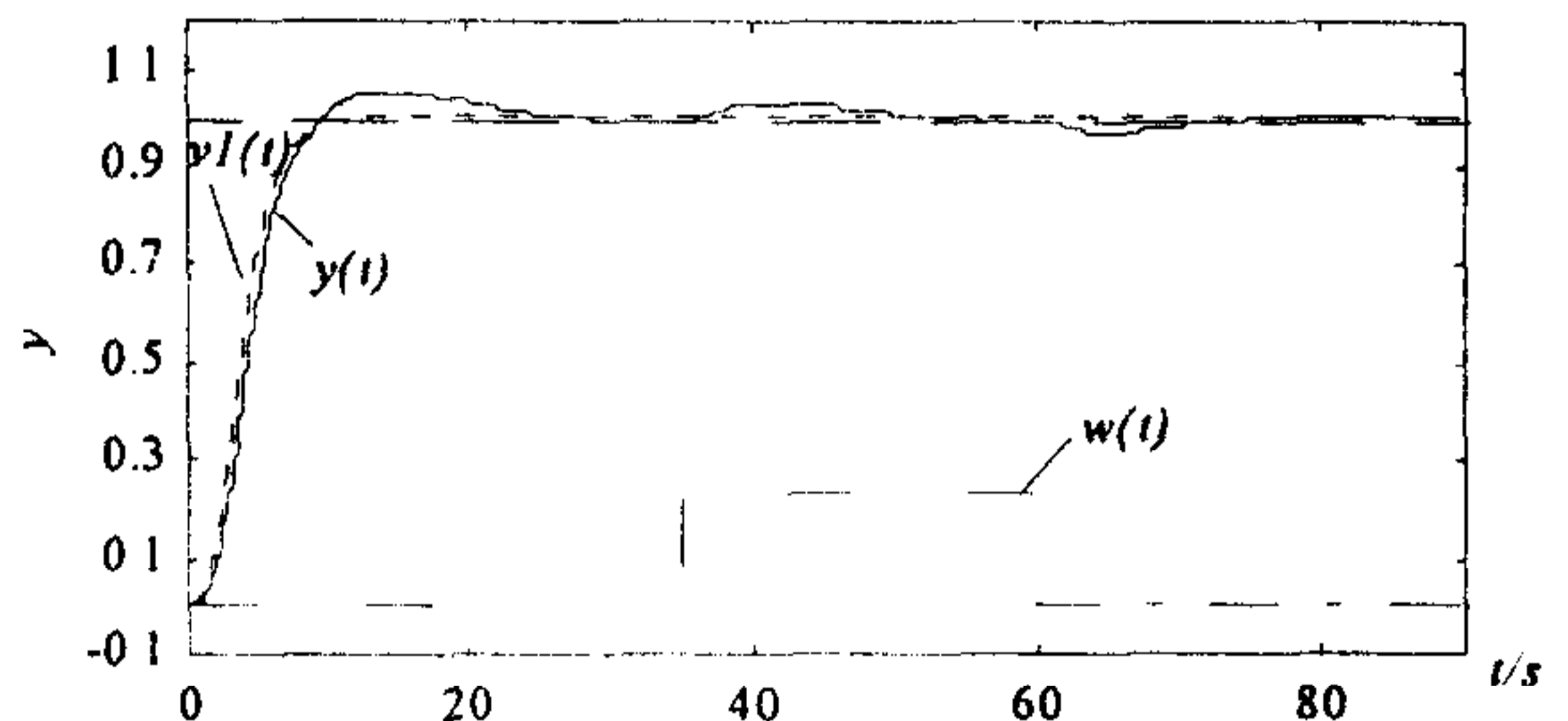


图 4 对象 (10) 仿真结果

棒性.

另给对象加入外扰 $w(t)$, 幅值为 0.23, 宽度 25 秒, 并将非线性项扩大 50 倍, 即

$$y^{(4)} = -4\ddot{y} - 6\dot{y} - 4y - 5(\ddot{y}\ddot{y} + \ddot{y}\dot{y} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{y}\dot{y} + \dot{y}y + \dot{y}y) + w(t) + u, \quad (10)$$

而 ADRC 的结构和参数仍保持不变. 仿真结果如图 4 所示. 可见, ADRC 对模型的不确定因素和外扰均有很强的适应能力.

3 基于自抗扰控制器的过热汽温调节系统

以下将 ADRC 用于锅炉过热汽温控制仿真, 并与 PID 控制的仿真结果相比较. 过热汽温控制的仿真试验方案采用常用的串级控制结构, 仅主调节

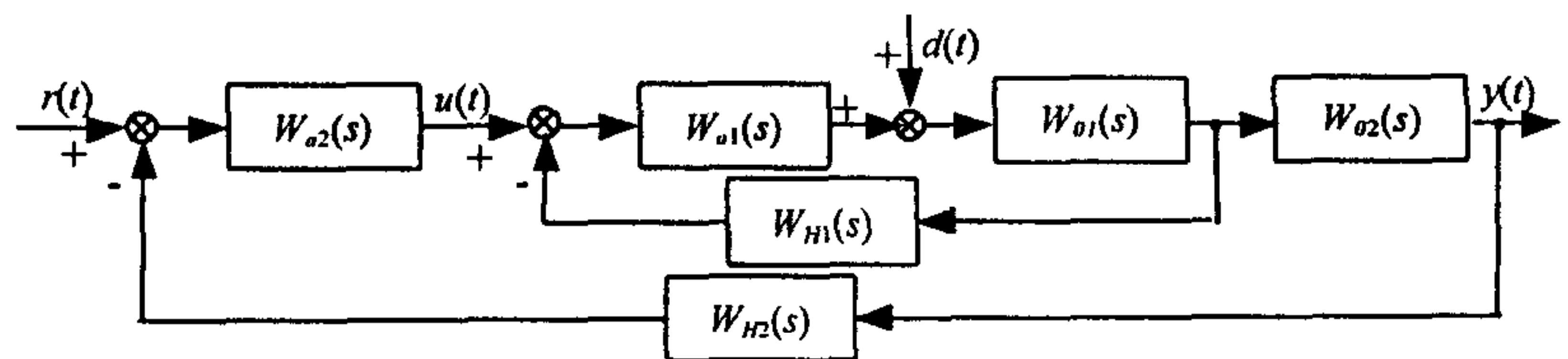


图 5 过热汽温控制系统框

器采用 ADRC, 其它环节不变. 控制系统结构如图 5 所示. 图中, $W_{a1}(s)$ 、 $W_{a2}(s)$ 分别为副、主调节器; $W_{o1}(s)$ 、 $W_{o2}(s)$ 分别为过热器导前区和惰性区传递函数; $W_{H1}(s)$ 、 $W_{H2}(s)$ 为汽温测量单元. 仿真中被控对象取文献[6]中给出的传递函数:

$$W_{o1}(s) = \frac{8}{(1+15s)^2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mA},$$

$$W_{o2}(s) = \frac{1.125}{(1+25s)^3} \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C},$$

$$W_{H1}(s) = W_{H2}(s) = 0.1 \text{ mA}/^\circ\text{C}.$$

PID 串级控制系统仿真中采用文献[6]整定的参数:

$$W_{a1}(s) = 25,$$

$$W_{a2}(s) = \frac{1}{0.5} \left(1 + \frac{1}{74s}\right), \varphi = 75\%,$$

$$W_{a2}(s) = \frac{1}{0.8} \left(1 + \frac{1}{59s}\right), \varphi = 90\%.$$

ADRC 的设计中, 参照式 (2) 安排过渡过程, 将参数选取为: $n=3$, $a=10$, $\zeta=0.9$, $\omega=2$, 则过渡过程的时域表达式为

$$y^{(3)} + 80y^{(2)} + 76y^{(1)} + 23.6y = 80r. \quad (11)$$

ESO 及 NLC 中非线性函数均取式 (5). 当设定信号 $r(t)$ 作 $+1\text{mA}$ 的阶跃变化时, 将 ESO 参数整定为: $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0.8$; $\delta = 0.01$; $b_0 = 1.12$; $\beta_1 = 20$, $\beta_2 = 400$, $\beta_3 = 10000$, $\beta_4 = 10000$. NLC 参数整定为: $a_1 = a_2 = 0.95$, $a_3 = 0.9$; $\delta = 0.01$; $\gamma_1 = 0.02$, $\gamma_2 = 0.8$, $\gamma_3 = 1.2$. 系统响应曲线如图 6 所示, 其中 PID1 为衰减率为 75% 的响应曲线, PID2 为衰减率为 90% 的响应曲线. 可见, 采用 ADRC 后, 系统输出几乎没有超调, 过渡时间显著缩短, 整个过渡过程变得更加平稳.

考虑到过热汽温的模型参数会随工况而变化, 生产过程中还受到各种干扰的较大影响, 现将对象模型进行如下变化:

(a) 增加外扰: d 作 $+10\text{mA}$ 的阶跃变化,

(b) 惯性增大: $W_{o2}(s) = \frac{1.125}{(1+35s)^3}$,

(c) 增益增大: $W_{o2}(s) = \frac{1.875}{(1+25s)^3}$.

而 ADRC 的结构和参数始终保持不变, 当设定信号 $r(t)$ 作 $+1\text{mA}$ 的阶跃变化时, 上述三种情况的仿真结果分别如图 7、8、9 所示. ADRC 与 PID 控制性能的比较见表 1.

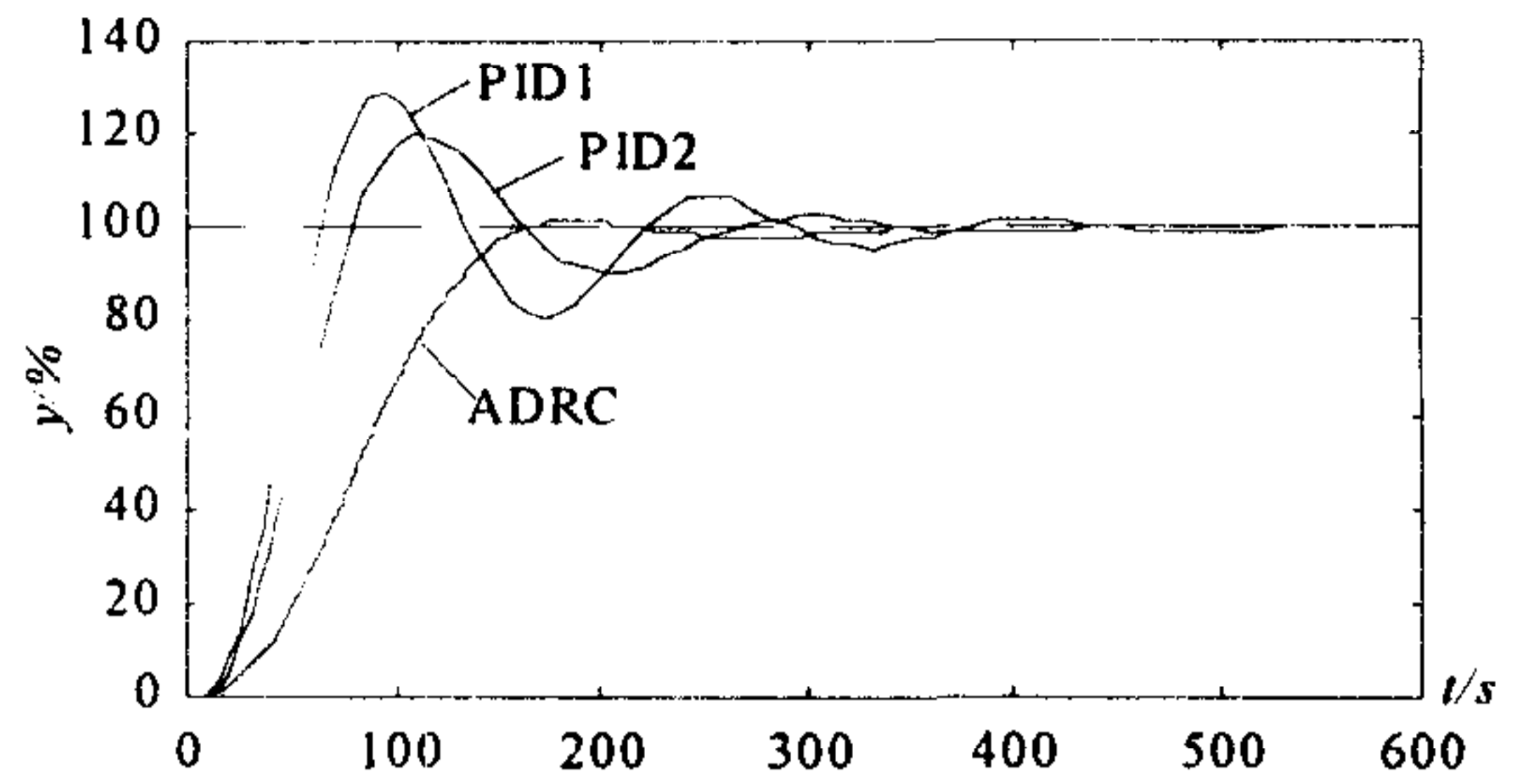


图 6 无外扰 $r(t)$ 作 $+1\text{mA}$ 阶跃变化的仿真结果

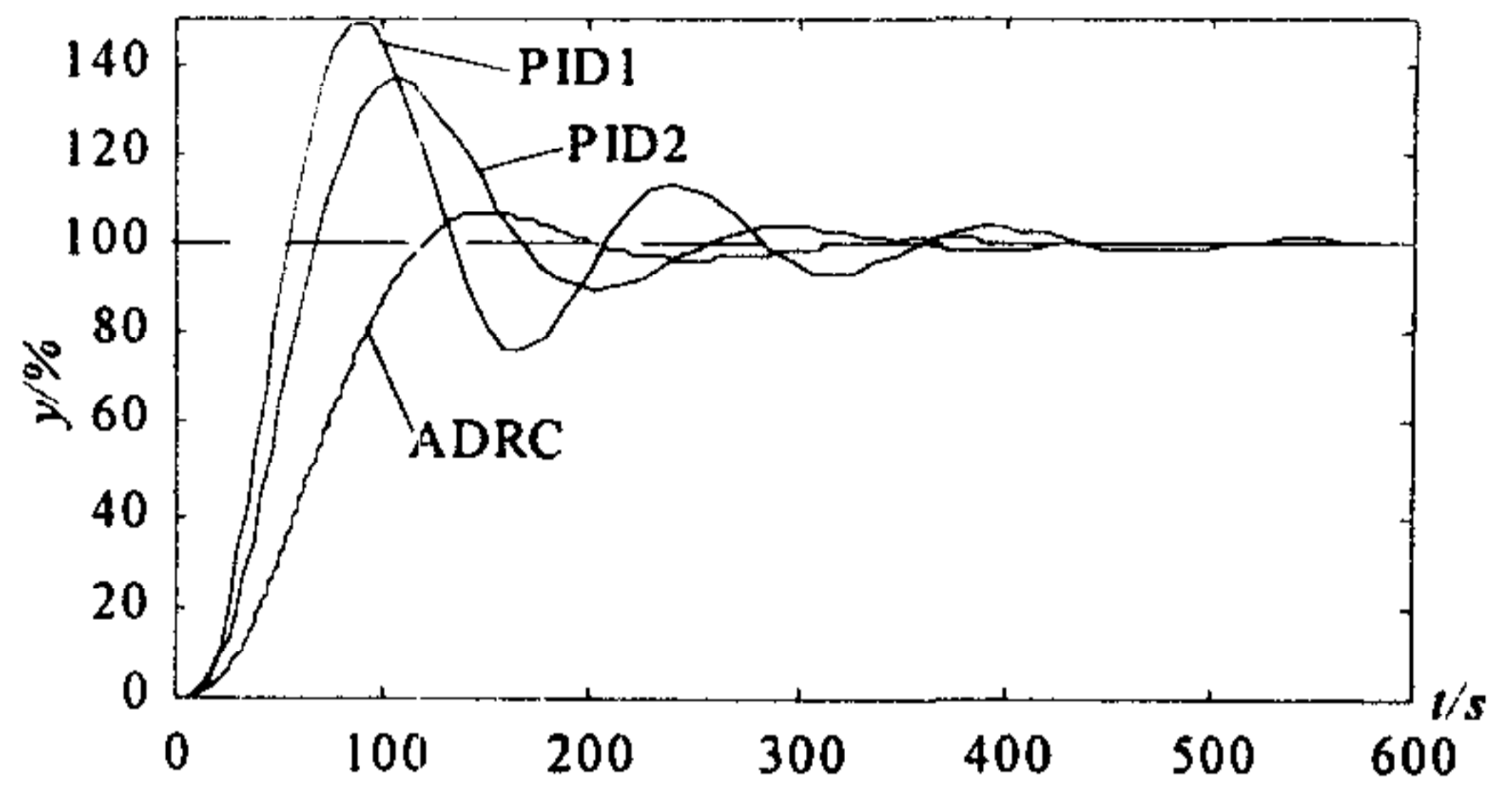


图 7 对象在情况(a)下的仿真结果

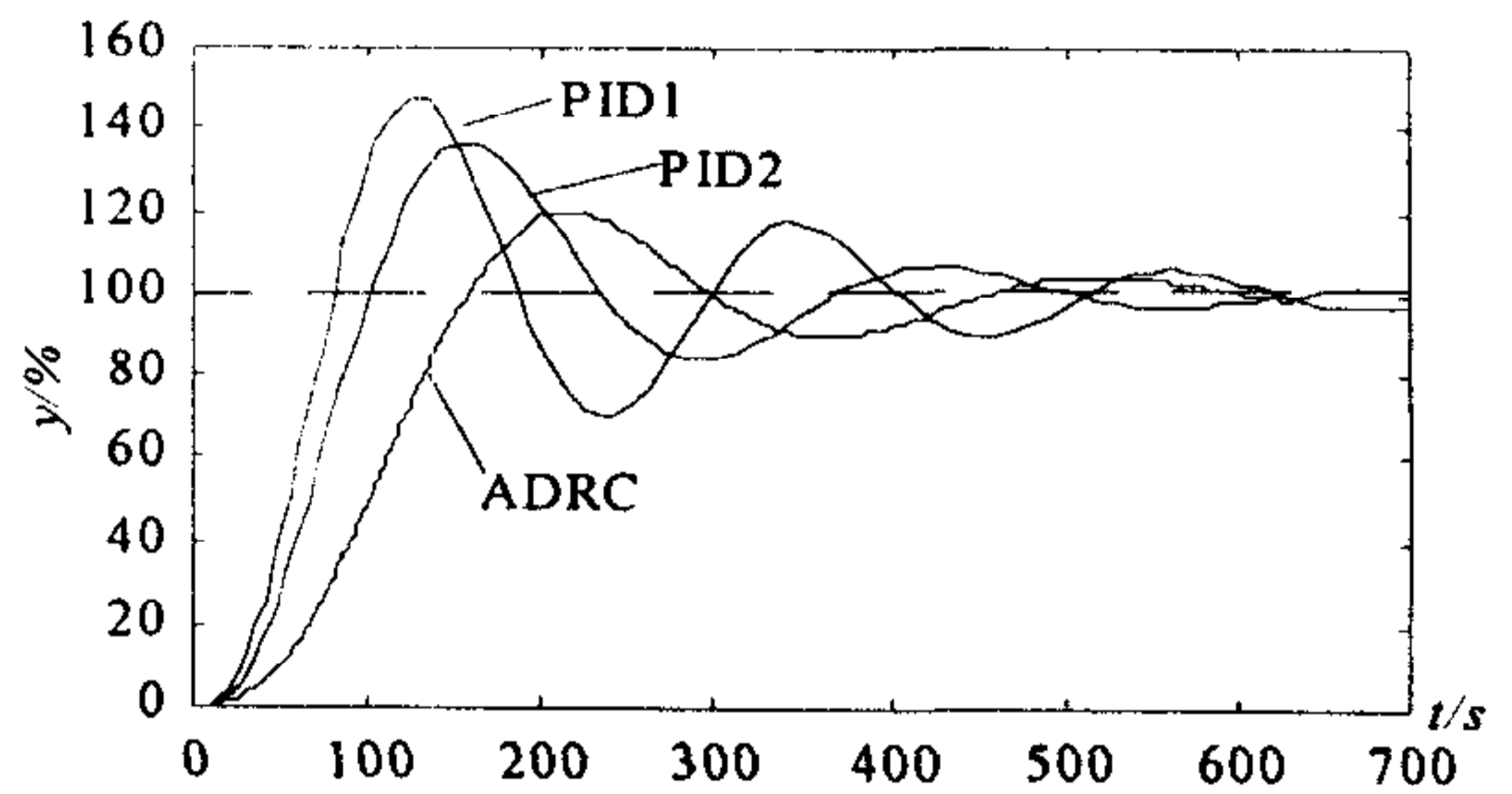


图 8 对象在情况(b)下的仿真结果

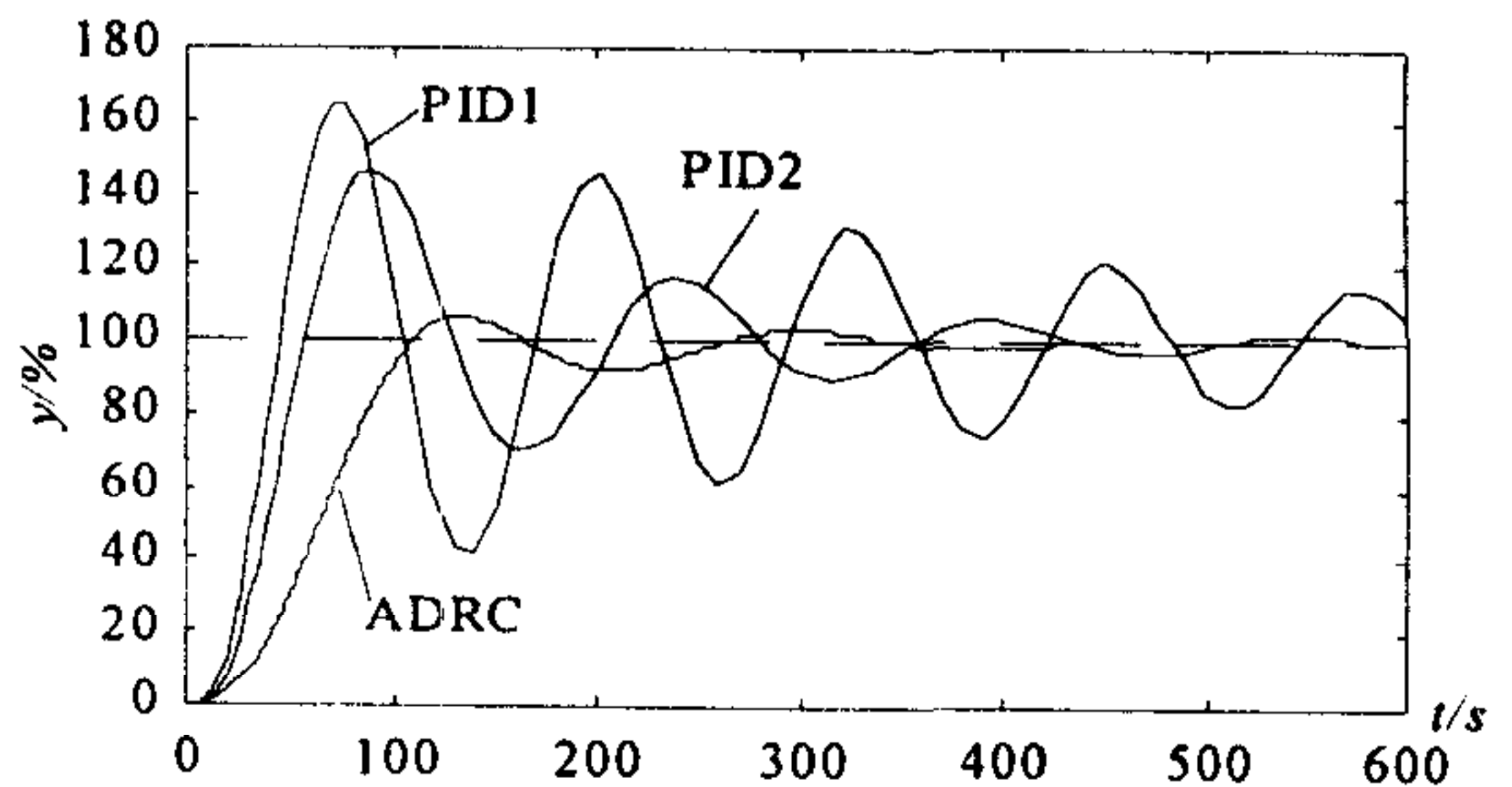


图 9 对象在情况(c)下的仿真结果

表 1 ADRC 与 PID 控制性能比较

阶跃响应 $r(t)=+1mA$	无外扰			$d(t)$ 作+100mA 的阶跃变化			惯性增大 $W_{02}(s)=1.125/(1+35s)^3$			增益增大 $W_{02}(s)=1.875/(1+25s)^3$		
	PID1	PID2	ADRC	PID1	PID2	ADRC	PID1	PID2	ADRC	PID1	PID2	ADRC
超调 $\delta(\%)$	34	20	2	50	37	7	48	37	20	65	47	6
上升时间 $t_r(s)$	60	80	160	55	68	120	80	100	155	48	58	110
调节时间 $t_s(s)$ ($\Delta=2\%$)	410	310	160	420	330	275	800	600	575	1220	560	315

可见, 当外扰较大时, 或者对象的惯性和增益同设计模型差别较大时, ADRC 的控制性能仍然较好, 远优于 PID 控制. 如果在以上情况下略微调整参数, 其控制品质还会进一步改善. 所以总的来说, ADRC 对模型的不确定因素和外扰均有很好的适应能力, 其控制品质要远优于常规 PID 控制.

4 结论

本文将 ADRC 用于四阶非线性对象的自抗扰控制和锅炉过热汽温的串级控制. 仿真结果表明, ADRC 具有较好的鲁棒性和抗干扰性, 适用于过热汽温这个存在大干扰、大延迟、时变性、不确定性和非线性的复杂热工对象. ADRC 的结构设计和参数整定并不依赖于对象的数学模型, 而且对于参数整定, 一旦进入使闭环稳定的参数范围, 调整起来还是比较容易的.

热工过程控制中的对象一般具有高阶数、大延迟、不确定和非线性特性, 用常规的 PID 控制不易取得优良的控制品质. ADRC 是否适用于阶数更高, 或者多变量耦合的热工过程控制对象, 这是尚待研究的问题.

参 考 文 献

1. 范永胜, 徐治皋等. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23-27
2. 韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23
3. 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183
4. 李东海, 姜学智等. 一类不可逆系统的非线性控制及预期动力学方程的选取. 控制与决策, 1998, 13(6): 686-689
5. 韩京清, 王伟. 非线性跟踪微分器的另一种形式. 1993 年全球华人智能控制大会论文集. 北京: 科学出版社, 1993: 2355-2362
6. 陈来九. 热工过程自动调节原理和应用. 北京: 水利电力出版社, 1982: 311-327

刘翔 女, 1975 年生. 硕士研究生. 主要研究方向: 热工过程控制与仿真.

姜学智 男, 1946 年生. 教授. 主要研究领域: 热工测量、控制与仿真.

李东海 男, 1963 年生. 副教授. 主要研究领域: 大型工业系统仿真及非线性控制.