

非线性先进控制软件 SMART-NLS 及其应用

王京春 赵众 顾键 李延亭

(清华大学自动化系 北京 100084)

(兰炼自动化研究院 兰州 730000)

摘要 本文介绍了由清华大学自动化系开发的非线性先进控制软件的原理和功能,并给出了其一个仿真应用.仿真说明该先进控制器完全实现了非线性先进控制技术,对非线性系统有很好控制效果,可以预计在现代流程工业中必将有着广泛的应用前景和可观的效益.

关键词 非线性, 先进控制

1 前言

90年代以来,为适应流程工业装置的大型化和复杂化,以及工艺和市场要求的不断提高,先进控制技术已经广泛地应用于流程工业的装置控制和优化中.先进控制是建立在常规控制基础之上的一种优化控制算法.一般是针对多变量系统内各参数之间相互关联、相互约束等问题,通过多变量控制算法,在保证过程约束的前提下,使生产操作平稳,并充分发挥装置潜力、优化生产,最终达到所要求的经济目标.

目前,国际上多家著名控制系统公司先后开发了基于预测控制理论的先进控制软件(控制器),例如 Honeywell 公司开发的 RMPCT 先进控制器, Setpoint 公司开发的 DMCPlus 先进控制器等,这些控制器已经成功地应用于上千个装置,取得了上亿美元的效益^[1-2].我国也先后有多所大学开始了先进控制算法及产品的研制与开发^[3-4].在九五期间,清华大学自动化系开发了商品化的先进控制器——可扩充多变量先进鲁棒控制器(Scalable Multivariable Advanced Robust Technologies,简称 SMART),并成功地在兰炼第二套常减压装置上运行,取得年经济效益六百万元^[3].先进控制器已经成为现代流程工业中必不可少的控制工具.

但是目前大部分的先进控制器均为线性控制器,对于非线性系统的控制就不是十分有效.例如,制药业中的 PH 值控制,其模型增益在不同的 PH 值下有几十倍的差异.开发适合工业控制的非线性先进控制器成为日益紧迫的要求.国际上有少数公司已经开发了非线性控制器,但实际应用于装置控制的相对于线性先进控制器还为数很少^[5].我们开发的非线性控制器 SMART-NLS 在原有的多变量先进控制器 SMART 的基础上,增加了非线性控制部分,从而实现了多变量非线性先进控制.该控制器除了具备原有先进控制器的所有特性,还实现了非线性控制,因而可以适应更为广泛的系统.为增加控制器的灵活性,我们还针对单回路非线性控制系统,简化了 SMART-NLS,形成了单变量非线性预测控制器 SMART-SINGLE.

2 基于操作区域多模型的非线性预测控制

考虑非线性动态系统 Σ

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{w}(k)) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{v}(k)) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}(k) \in R^n, \mathbf{u}(k) \in R^r, \mathbf{y}(k) \in R^m$ 分别为非线性动态系统的状态、输入及输出向量, $\mathbf{w}(k) \in R^s, \mathbf{v} \in R^l$ 分别为过程及输出扰动, f, g 为非线性函数. 假定系统 Σ 的状态、输入及输出可测, 扰动离线可测, 但是 f, g 的函数形式未知, 则 Σ 可用下述的广义输入-输出辨识模型来描述,

$$\eta(k+1) = \mathbf{h}(\xi(k)) + \mathbf{e}(k) \quad (2)$$

其中 $\eta(k) \in R^m$ 为广义输出向量, $\xi(k) \in R^r$ 为广义输入向量, $\mathbf{e}(k) \in R^m$ 为辨识偏差向量. 定义 Σ 在采样时间 k 的工况特征向量为

$$\mathbf{z}(k) = (z_1(k), z_2(k), \dots, z_d(k))^T = \mathbf{H}(\xi(k)) \in \mathbf{Z} = R^d, d \leq \bar{r} \quad (3)$$

其中 \mathbf{H} 为有界的工况特征映射算子, \mathbf{Z} 为 Σ 的操作空间. 根据工况特征的变化, 可以将整个操作空间划分为 I_N 个不相交的操作区域 $\mathbf{Z} = \bigcup_{i \in I_N} \mathbf{Z}_i$, 其中每个操作区域 \mathbf{Z}_i 可以用线性模型来近似 Σ 的局部特性变化, 则 Σ 可以用多个操作区域模型描述为

$$\hat{\mathbf{h}}(\xi) = \sum_{i \in I_N} \hat{\mathbf{h}}_i(\xi, \theta_i) w_i(\mathbf{z}) \quad (4)$$

$$w_i(\mathbf{z}) = \begin{cases} 0, \mathbf{z} \notin \mathbf{Z}_i \\ 1, \mathbf{z} \in \mathbf{Z}_i \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\hat{\mathbf{h}}_i(\xi, \theta_i)$ 为操作区域 \mathbf{Z}_i 的线性模型描述, θ_i 为模型参数向量, $w_i(\mathbf{z})$ 为操作区域相关函数. 具有 I_N 个操作区域的 Σ 的多区域模型结构可以表示为

$$\mu_{I_N} = \{(\mathbf{Z}_i, \hat{\mathbf{h}}_i, w_i), i \in I_N\} \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 构造非线性动态系统的操作区域多模型描述包含以下相关的两个子问题:

(1) 非线性动态系统的操作区域识别(模型结构辨识)即

$$J_{I_n}^{**} = \min_{\mu_{I_n}} J_{I_n}^*(\theta_{i_1}^*, \dots, \theta_{i_n}^*, \mu_{I_n}) \quad (7)$$

其中 $I_n = \{i_1, \dots, i_n\}$, $\theta_{i_1}^*, \dots, \theta_{i_n}^*$ 为各操作区域的最优模型参数向量。

(2)操作区域线性子模型的辨识(模型参数辨识)即

$$\theta_{i_1}^*, \dots, \theta_{i_n}^* = \arg \min_{\theta_{i_1}, \dots, \theta_{i_n}} J_{I_n}(\theta_{i_1}, \dots, \theta_{i_n}, \mu_{I_n}) \quad (8)$$

引理 1^[6]: 适当选择操作区域特征向量及操作区域相关函数, 采用多区域分段线性模型结构如式(6)所示, 可以稳定且完备地描述任意连续的非线性动态系统 Σ 。

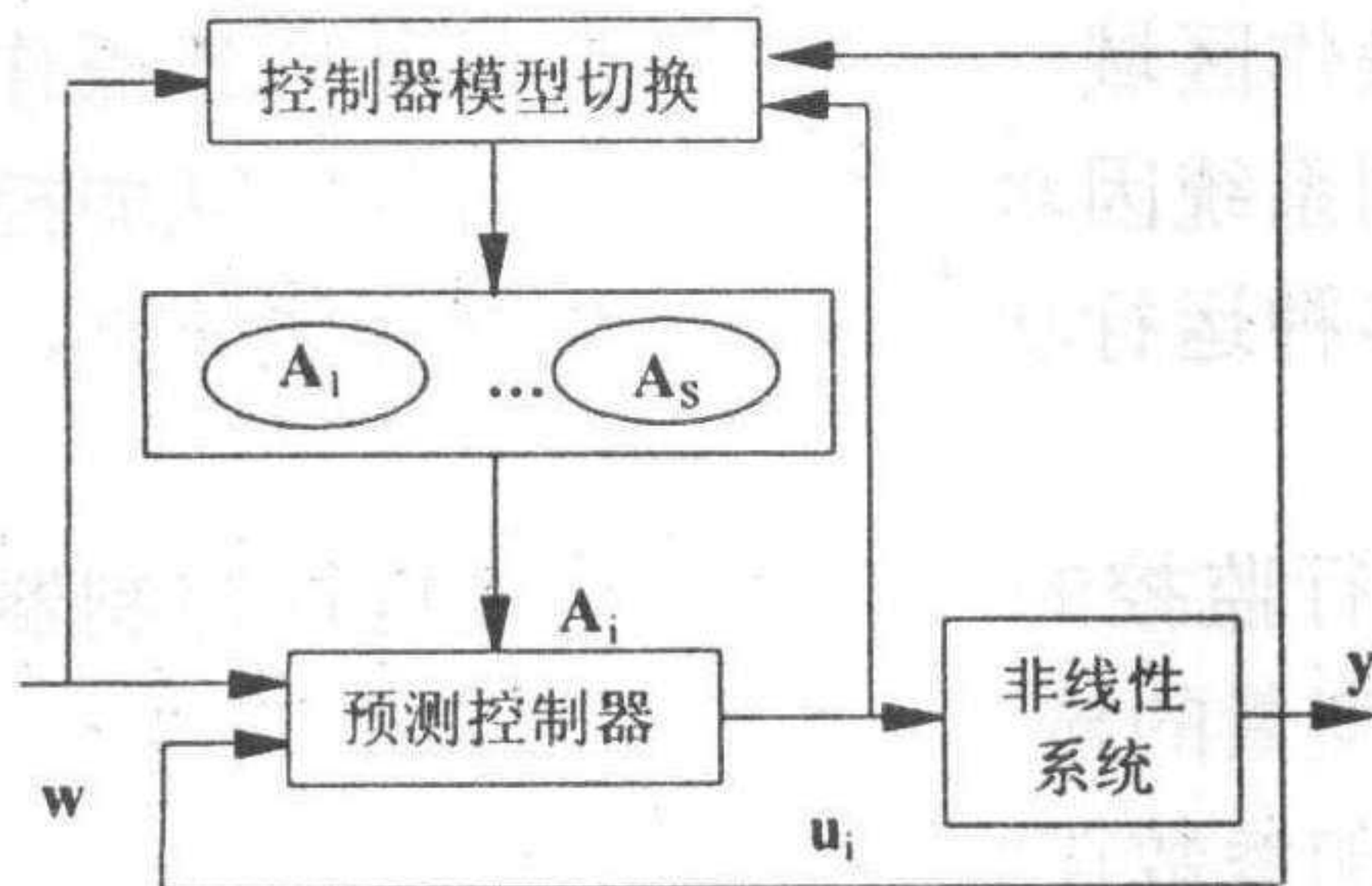


图1 基于操作区域多模型的非线性预测控制结构

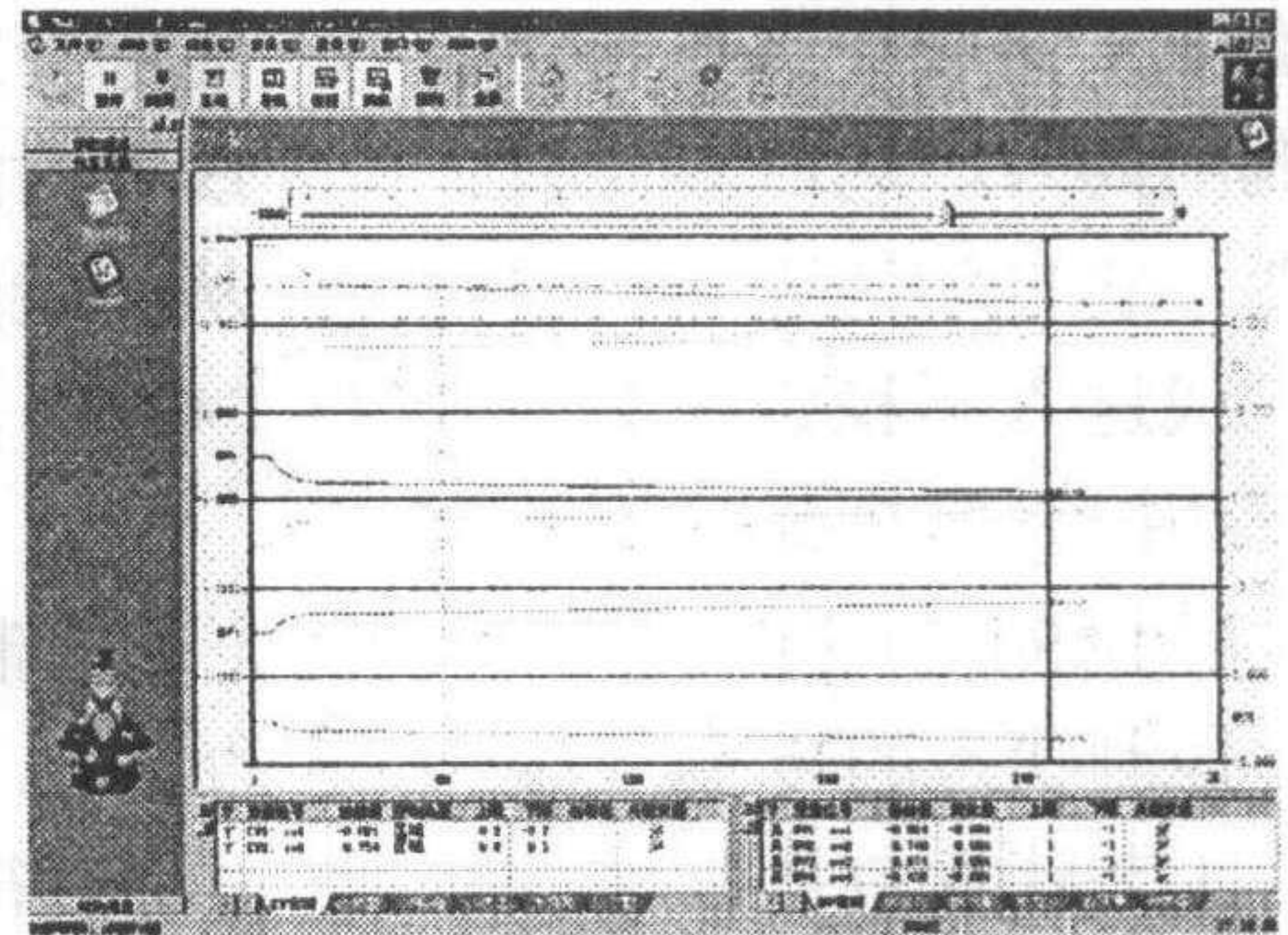


图2 SMART-C&S 离线仿真界面

根据引理 1, 非线性动态系统可由一组不同操作区域内的线性模型稳定且完备地描述, 则相应可以构造不同区域内的预测控制器模型 A_i , 根据预测控制算法可以计算出不同操作区域内的控制增量 Δu_i 。当生产过程处于不同操作区域时, 可以通过切换预测控制器模型 A_i , 使得非线性动态系统始终处于良好的受控状态。基于操作区域多模型的非线性预测控制结构如图 1 所示。

3 以 SMART-NLS 控制器为核心的非线性先进控制系统

基于上述算法, 我们开发了非线性多变量先进控制器 SMART-NLS, 它具备了原有多变量先进控制器 SMART 的全部特点: (1)实现了多变量约束协调控制及卡边操作。(2)能够处理非常规系统。(3)控制算法具有很强的鲁棒性。(4)能适应各种生产过程特性, 实现各种操作状况下的控制方案。(5)具有一定程度的经济目标优化功能。(6)人机界面友好。(7)具有故障处理和恢复能力。SMART-NLS 还能够通过实时辨识系统所处区域解决非线性系统控制问题, 实现非线性多变量先进控制。

SMART-NLS 主要包括: 模型辨识器(MID), 离线非线性鲁棒先进多变量预估控制器设计和仿真工具软件(SMART-C&S), 非线性鲁棒先进多变量预估控制器(SMART-CTR), 控制器监控器(SMART-SUPR), 工艺计算包五部分。各部分功能如下:

MID 根据被控对象的实验数据采用多种方法进行模型辨识, 获得实际对象的各个区域的控制模型, 供 SMART-NLS 使用。

SMART-C&S 是非线性先进控制器的设计和仿真工具, 其实现的主要功能包括控制器的设计: 控制器结构设定, 变量种类和参数设定, 模型导入和模型输入; 控制器仿真: 根据所设定的控制器结构和变量参数, 以及控制器所要运行的实际环境, 进行控制仿真运行, 观察控制器控制效果, 调整控制器参数, 以获得更为理想的控制器结构和参数; 生成实际控制器组态参数: 将经过仿真验证的控制器结构和参数输出为一个组态文件, 作为 SMART-NLS 的参数, 供实际控制使用. 图 2 所示为控制器仿真时的曲线显示界面.

SMART-CTR 是非线性先进控制器的核心部分. 它根据 SMART-C&S 生成的控制器组态文件, 对被控过程进行实际控制. 它在常规控制过程中实现多变量动态矩阵控制算法, 完成先进控制功能, 并能够针对经济目标进行简单的经济目标优化. 在常规控制的同时, 它时刻监视被控非线性对象的操作区域, 一旦检测到其非线性操作区域改变, 它自动地进行模型切换, 从而避免控制系统因对象的非线性特性而减弱控制效果, 或进入不稳定区域. SMART-CTR 具有多种运行状态, 可以实现在线仿真, 离线仿真和控制器热备以及在线控制.

SMART-SUPR 是对非线性先进控制器进行监控的. 实现的功能包括控制器的起停, 控制状态的转换, 控制参数的显示, 控制变量的显示和实时历史趋势的显示等.

工艺计算包是针对不同工艺过程进行不可测参数在线计算的软件包.

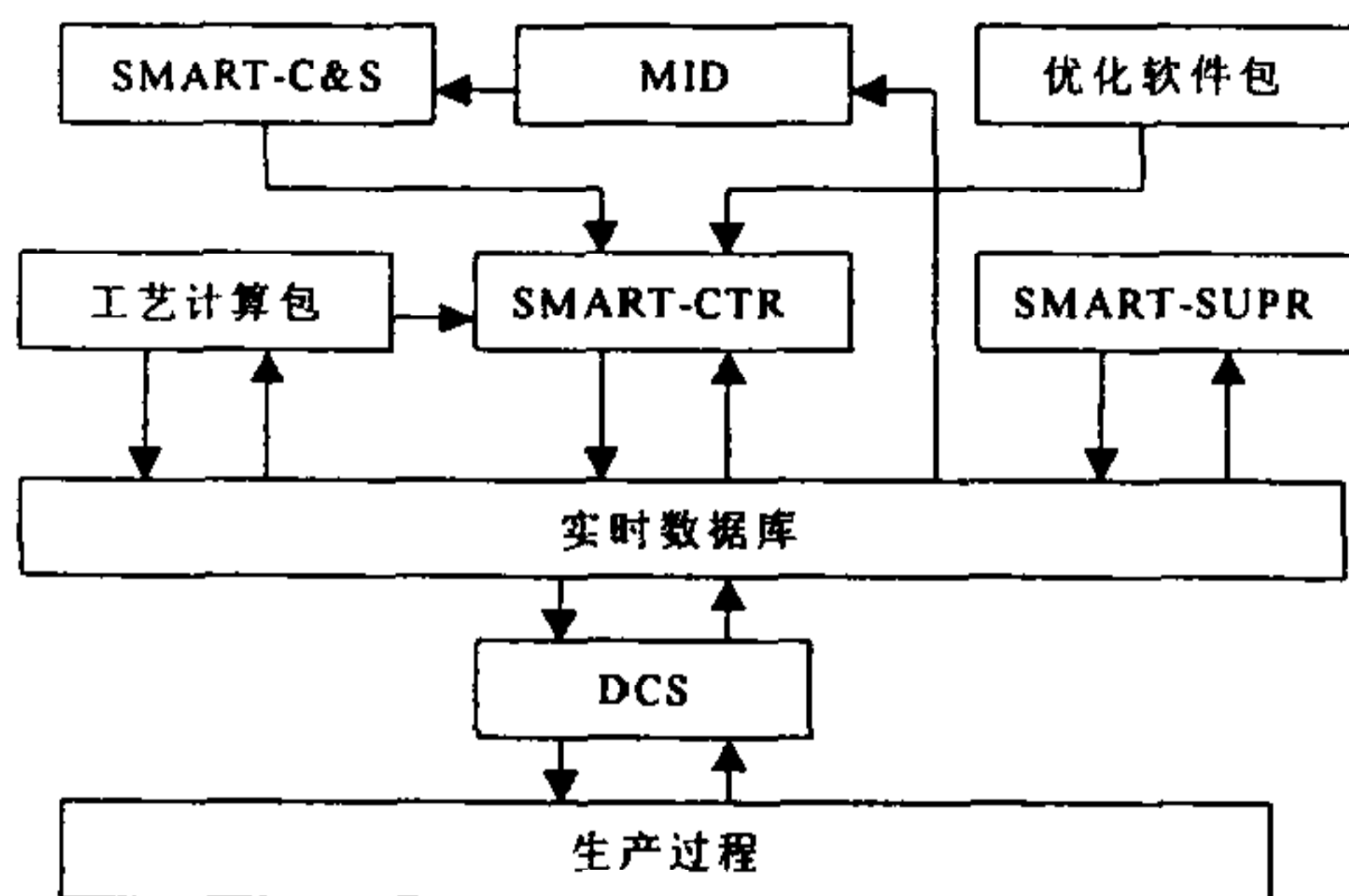


图 3 SMART 非线性先进控制系统

以 SMART-NLS 为核心的先进控制系统的基础是实时数据库环境, 上层可以接受优化软件提供的优化结果, 从而构成一个装置级优化控制系统. 其框图如图 3 所示.

4 SMART-NLS 的仿真应用

针对 PH 反应和苯乙烯聚合反应两个控制系统我们应用 SMART-NLS 进行了仿真实验. 对于 PH 值控制, 由于其在不同 PH 值条件下系统的增益会有较大变化, 因此, 我们选择了设定值扰动仿真实验用以说明控制器的控制效果. 图 4 是采用线性先进控制器控制 PH 值分别从 4 到 6、6 到 8 和 8 到 10 进行变化时的情况. 可以明显看出在 PH 值从 6 变化到 8 时的控制效果很好, 而在其它情况控制效果就比较差. 图 5 是采用非线性控制器控制的结果, 在 PH 值在几种阶跃变化的情况下均控制得比较好. 表 1 给出了仿真过程中所使用的各个区域的仿真模型.

表 1 PH 控制模型汇总

	碱流量	适用区间
P	0.2	4.52-5.77
	$\frac{s^2 + 6s + 1}{20}$	
H	0.3	5.77-6.93
	$\frac{s^2 + 10s + 1}{20}$	
值	0.3	6.93-9.42
	$\frac{s^2 + 8s + 1}{20}$	
	0.3	9.42-14
	$\frac{s^2 + 12s + 1}{20}$	

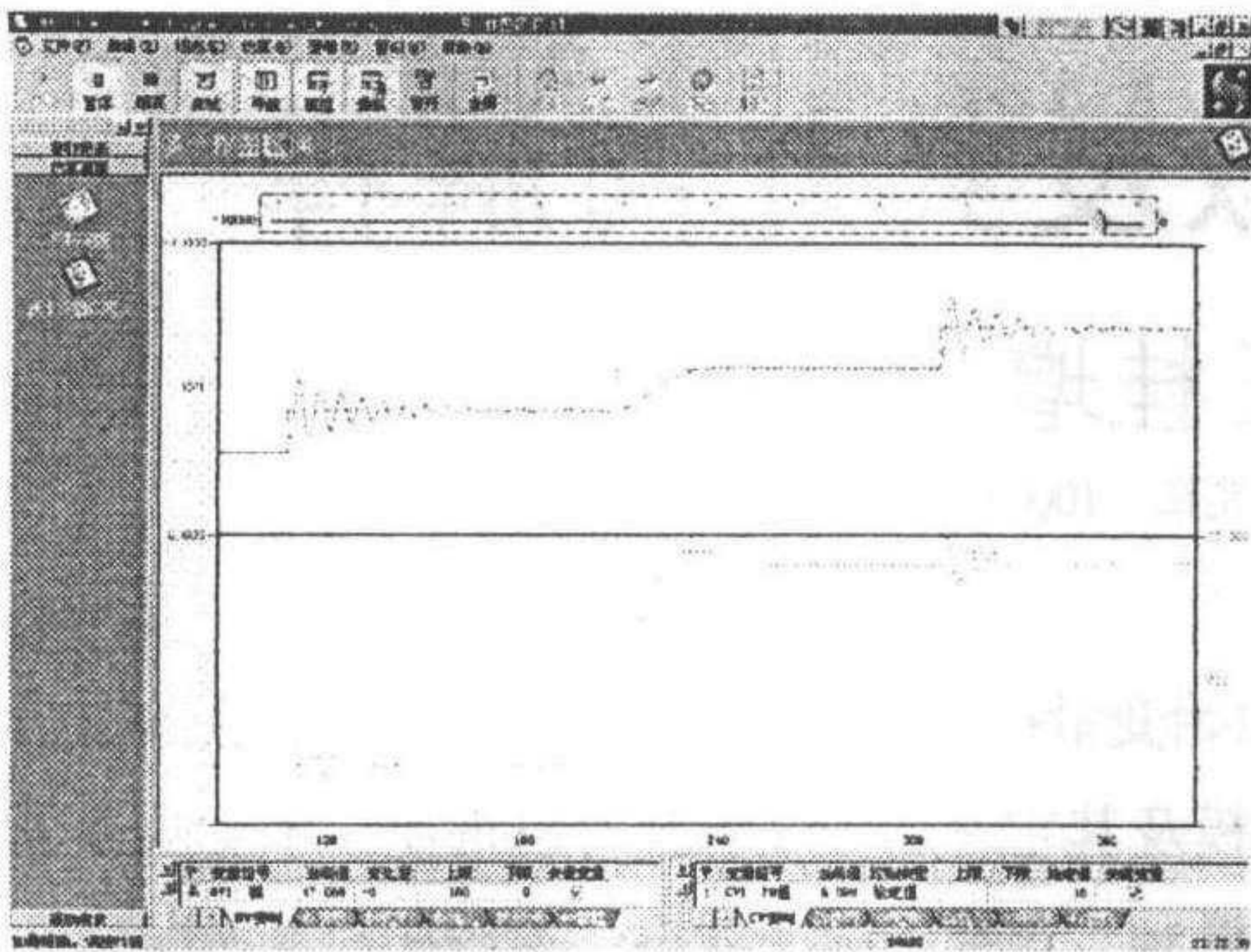


图4 线性预测控制器对设定值扰动的控制效果

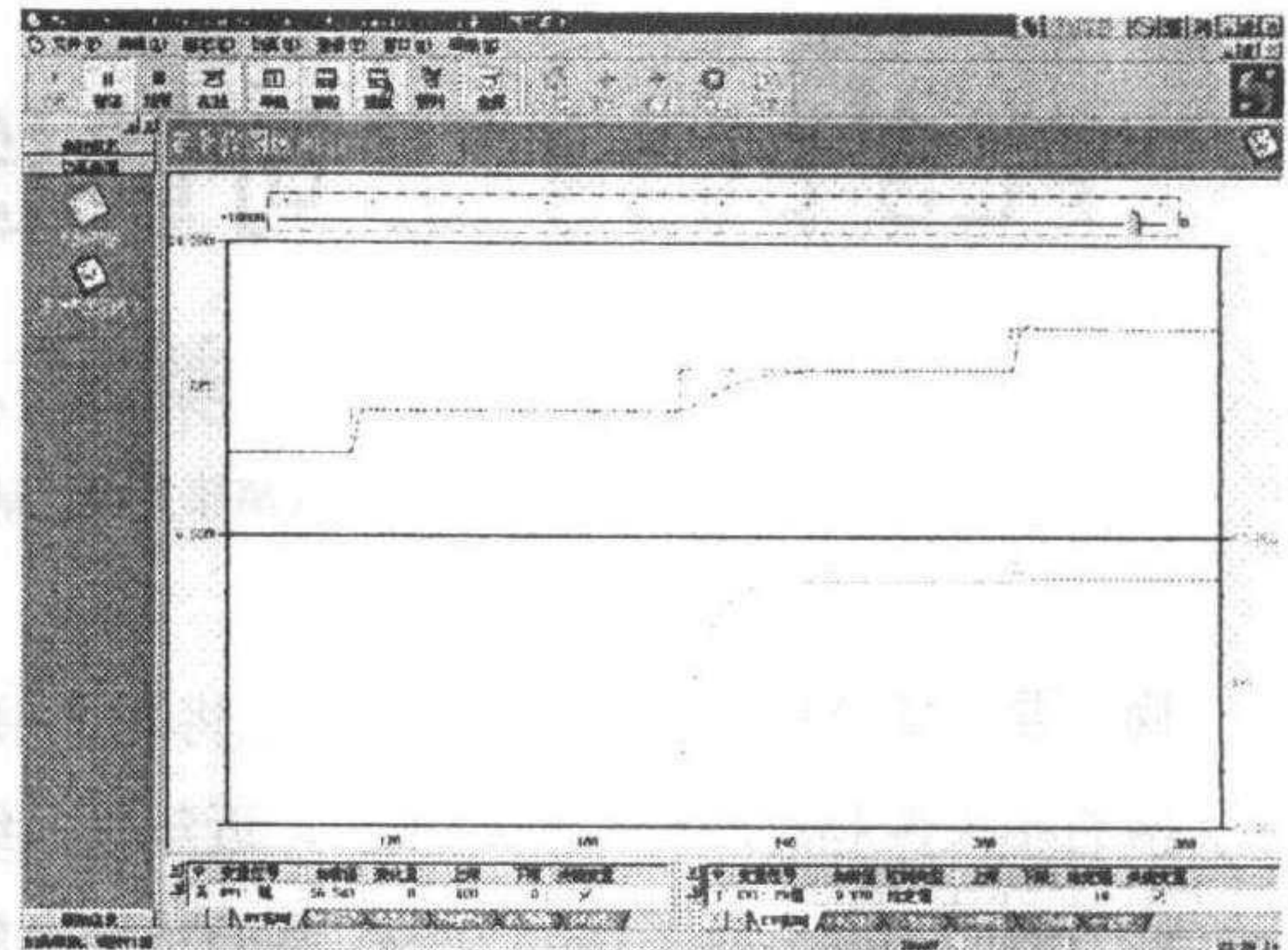


图5 SMART-NLS 对设定值扰动的控制效果

通过仿真实验表明, SMART-NLS 能够针对非线性对象实施非线性先进控制, 克服各类扰动对于控制系统的影响, 实现控制目标.

5 结束语

国内外经过多年的实践证明先进控制是解决现代流程工业所面临问题的一种有效的技术手段, 而非线性对象是现代流程工业中普遍存在的现象, 开发非线性先进控制器是更好地应用先进控制手段解决流程工业所面临问题的必由之路. 我们所开发的非线性先进控制器 SMART-NLS 是针对流程工业中较为普遍的一类对象, 具有较为普遍的适用性, 随着我国流程工业控制水平的不断提高 SMART-NLS 会逐步得到更为广泛的应用.

参 考 文 献

1. Qin, S.J. and Badgwell, T.J., An overview of industrial model predictive control technology, *AIChE Symposium Series* 316, vol. 93, pp232-256.
2. 冯保罗, 张书松, 先进控制在石化生产中的应用与效益, 齐鲁石油化工, 1995年, 第三期, 220-225
3. 国家科技攻关计划专题验收资料
4. 金以慧, 生产过程的先进控制, 化工自动化及仪表, 1997, 24(4), 59-66
5. Qin, S.J. and Badgwell, T.J., An overview of nonlinear model predictive control applications, *technical report*.
6. Johansen T.A., Foss B.A. Identification of nonlinear system structure and parameter using regime decomposition, *Automatica*, 1995, 31(2): 321-326

王京春 男, 1968年生, 1992年毕业于清华大学自动化系, 1997年获得清华大学自动控制理论及应用专业硕士和博士学位. 主要研究方向为先进控制理论与应用, 过程数据处理及模型辨识等.

赵众 男, 1970年生, 1992年毕业于浙江大学化工系, 1998年获得华东理工大学自动控制理论及应用专业硕士和博士学位. 主要研究方向为区域优化控制等.

李延亭 男, 1965年生, 1996年毕业于西北工业大学计算机应用专业, 现为中国石油天然气总公司兰州炼化公司自动化研究院工程师. 主要研究方向为生产过程控制及计算机应用等.