



# 模块多变量自校正调节器<sup>1)</sup>

吴 刚 陆旭东 应爱国 薛美盛 张志刚 孙德敏

(中国科学技术大学自动化系 合肥 230026)

(E-mail: sundm@ustc.edu.cn)

**摘 要** 从约束控制的角度出发,将模块多变量控制与自校正调节器相结合,构造出一种新的多变量自校正调节器,并对此进行了仿真研究.

**关键词** 约束控制,模块多变量控制,阶梯式控制,多变量自校正调节器.

## MODULAR MULTIVARIABLE SELF-TUNING REGULATOR

WU Gang LU Xudong YING Aiguo XUE Meisheng

ZHANG Zhigang SUN Demin

(Dept. of Automation, USTC, Hefei 230026)

**Abstract** From the point of constraint control, this paper constructs a new multivariable self-tuning regulator combining modular multivariable control technique and self-tuning regulator. The accomplished simulation results are offered.

**Key words** Constraint control, modular multivariable control, stair-like control, multivariable self-tuning regulator.

## 1 引言

针对多变量控制系统中复杂的约束控制问题,文献[1]提出了静态模块多变量控制,将目标或约束按优先级排序,形成模块化的分层控制器,依次满足各个目标或约束.本文将模块多变量控制与自校正调节器相结合,并引入阶梯式控制策略<sup>[2,3]</sup>,提出了模块多变量自校正调节器的概念,试图用新的方法设计多变量自校正调节器<sup>[3,4]</sup>.

## 2 模块多变量自校正调节器

### 2.1 系统描述

将一个  $n$  输入  $m$  输出的多变量控制系统分解为  $m$  个  $n$  输入单输出的子系统,再进一

1)国家自然科学基金(69774006)和中国科学技术大学校内青年基金资助项目.

步用  $n$  个子系统来表达每个子系统<sup>[3]</sup>. 具体来说, 将每个输出通道描述为

$$y_i(k) = \sum_{j=1}^n \frac{B_{ij}(q^{-1})}{A_{ij}(q^{-1})} q^{-d_{ij}} u_j(k) + C_i(q^{-1}) \zeta_i(k) \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (1)$$

上式中  $u_j(k)$ ,  $y_i(k)$  分别为  $k$  时刻系统第  $j$  个输入量和第  $i$  个输出量;  $\{\zeta_i(k)\}$  为零均值不相关随机噪声序列;  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$  和  $C_i$  分别为向后一步平移算子  $q^{-1}$  的  $n_{ij}$ ,  $m_{ij}$  和  $l_i$  阶多项式;  $d_{ij}$  为第  $j$  个输入到第  $i$  个输出的纯滞后步数. 在考虑每个具体的输入输出对时, 用如下的子系统模型

$$A_{ih}(q^{-1})y_i(k) = B_{ih}(q^{-1})q^{-d_{ih}}u_h(k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq h}}^n \frac{A_{ih}(q^{-1})B_{ij}(q^{-1})}{A_{ij}(q^{-1})} q^{-d_{ij}}u_j(k) + A_{ih}(q^{-1})C_i(q^{-1})\zeta_i(k), \quad (2)$$

其中  $i=1, 2, \dots, m, h=1, 2, \dots, n$ .

令  $C_{ih}(q^{-1}) = A_{ih}(q^{-1})C_i(q^{-1})$ ,  $dd_{ih} = \min(d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{i(h-1)}, d_{i(h+1)}, \dots, d_{in})$ , 则有

$$A_{ih}(q^{-1})y_i(k) = B_{ih}(q^{-1})q^{-d_{ih}}u_h(k) + D_{ih}(k - dd_{ih}) + C_{ih}(q^{-1})\zeta_i(k), \quad (3)$$

$$D_{ih}(k - dd_{ih}) = \sum_{j=1, j \neq h}^n \frac{A_{ih}(q^{-1})B_{ij}(q^{-1})}{A_{ij}(q^{-1})} q^{-d_{ij}}u_j(k). \quad (4)$$

## 2.2 子系统的自校正调节器

对于式(3)所描述的子系统, 如果模型结构已知, 参数未知或随时间缓慢变化, 可以采用递推增广最小二乘法进行参数辨识, 关键是多出了一项  $D_{ih}(k)$  的辨识.

根据式(3), 可以求得输出最优预测

$$C_{ih}(q^{-1})y_i^*(k + d_{ih} | k) = G_{ih}(q^{-1})y_i(k) + F_{ih}(q^{-1})u_h(k) + F'_{ih}(q^{-1})D_{ih}(k + d_{ih} - dd_{ih}), \quad (5)$$

其中  $F_{ih}(q^{-1}) = F'_{ih}(q^{-1})B_{ih}(q^{-1})$ ,  $C_{ih}(q^{-1}) = A_{ih}(q^{-1})F'_{ih}(q^{-1}) + q^{-d_{ih}}G_{ih}(q^{-1})$ ,  $F'_{ih}(q^{-1}) = 1 + f'_{ih1}q^{-1} + \dots + f'_{ihn_f}q^{-n_f}$ ,  $G_{ih}(q^{-1}) = g_{ih0} + g_{ih1}q^{-1} + \dots + g_{ihn_g}q^{-n_g}$ ,  $F_{ih}(q^{-1}) = f_{ih0} + f_{ih1}q^{-1} + \dots + f_{ihn_f}q^{-n_f}$ ,  $f_{ih0} = b_{ih0}$ ,  $\deg F'_{ih} = n_f = \max(d_{ih} - 1, l_i)$ ,  $\deg F_{ih} = n_f = m_{ih} + n_f$ ,  $\deg G = n_g = n_{ih} + n_f - d_{ih}$ .

这里假设  $C_{ih}(z^{-1})$  和  $B_{ih}(z^{-1})$  都是 Hurwitz 多项式. 因此可得自校正调节律

$$F_{ih}(q^{-1})u_h(k) = -G_{ih}(q^{-1})y_i(k) - F'_{ih}(q^{-1})D_{ih}(k + d_{ih} - dd_{ih}), \quad (6)$$

$$u_h(k) = -\frac{1}{f_{ih0}} \left[ \sum_{j=0}^{n_g} g_{ihj}y_i(k-j) + \sum_{j=1}^{n_f} f_{ihj}u_h(k-j) + \sum_{j=0}^{n_f} f'_{ihj}D_{ih}(k + d_{ih} - dd_{ih} - j) \right]. \quad (7)$$

## 2.3 模块多变量自校正调节器

将多变量自校正调节器转化为若干个子系统的自校正调节器, 每个子系统的控制目标加上相应的控制量约束构成一个控制模块, 按字典顺序式优化方法求解动态多目标优化问题<sup>[3,4]</sup>.

### 2.3.1 被控量目标

被控量约束分为设定值控制和上下限约束两类, 为统一起见, 将设定值控制也转化为上下限约束, 其上下限等值. 设对输出  $y_i(k)$  有上下限约束, 则构成控制目标

$$g_i: y_{i,low} \leq y_i(k) \leq y_{i,up} \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (8)$$

对应于设定值控制,有  $y_{i,low} = y_{i,up} = y_{i,sp}$ .

假设对应于  $y_i (i=1, 2, \dots, m)$  的主控量恰为  $u_i$ , 并且有下式成立

$$d_{ii} \leq dd_{ii} = \min(d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{i(i-1)}, d_{i(i+1)}, \dots, d_{in}), \quad (9)$$

这样就可以对此子系统

$$A_{ii}(q^{-1})y_i(k) = B_{ii}(q^{-1})q^{-d_{ii}}u_i(k) + D_{ii}(k - dd_{ii}) + C_{ii}(q^{-1})\zeta_i(k) \quad (10)$$

求解对应于限幅  $y_{i,low}$  和  $y_{i,up}$  的自校正调节律  $u_{i,low}$  和  $u_{i,up}$ , 相当于求解出该级被控量目标的控制量允许范围(或定值), 再辅以控制量约束, 就可以求解出对应于该模块目标的控制量或其范围约束, 并将之传送到下一个重要性较次的控制目标.

### 2.3.2 控制量约束

对每一个  $u_j(k)$  最终可以计算出三组对应的上下限约束, 分别为

1) 生产工艺和设备所决定的上/下限约束  $u'_{j,low} \leq u_j(k) \leq u'_{j,up}$ ;

2) 控制量增量和阶梯式控制约束<sup>[2,3]</sup>  $u''_{j,low} \leq u_j(k) \leq u''_{j,up}$ , 其中  $u''_{j,low} = u_j(k-1) - r\Delta u_j$ ,  $u''_{j,up} = u_j(k-1) + r\Delta u_j$ ,  $\Delta u_j$  为控制量增量限幅,  $r$  为阶梯因子;

3) 为达到控制目标所需控制量约束  $u'''_{j,low} \leq u_j(k) \leq u'''_{j,up}$ , 若控制目标是设定值, 则  $u'''_{j,low} = u'''_{j,up}$ .

求解三个约束的交集, 获得符合所有约束的  $u_j(k)$  的上下限  $u_{j,low}$  与  $u_{j,up}$ , 或某定值(设定值控制), 并将其传送到下层模块; 如果交集为单元集,  $u_j(k)$  即已确定; 如果交集为空集, 则  $u_j(k)$  选定为对实现目标最有利的限幅值, 并调用第二主控量实现该控制模块的目标; 如果在最次要模块某控制量交集集中的元素至少为两个, 则选取与  $u_j(k-1)$  增量最小的元素为  $u_j(k)$  的值; 如果在某个模块中, 所有控制量取值集合皆为单元集, 则放弃所有次要的控制目标.

## 3 仿真研究

仿真实例是二输入三输出的多变量系统, 各通道模型如下:

$$G_{ij}(s) = \frac{K_{ij}}{T_{ij}s + 1} e^{-\tau_{ij}s} \quad (i = 1, 2, 3; j = 1, 2), \quad (11)$$

模型参数如表1所示.

表1 仿真实例的模型参数(表中参数  $T, \tau$  均以分钟为单位)

	$y_1$	$y_2$	$y_3$
$u_1(K/T/\tau)$	4.05/50/3	5.39/50/2	4.38/33/3
$u_2(K/T/\tau)$	5.88/50/4	6.90/40/1	7.20/19/1

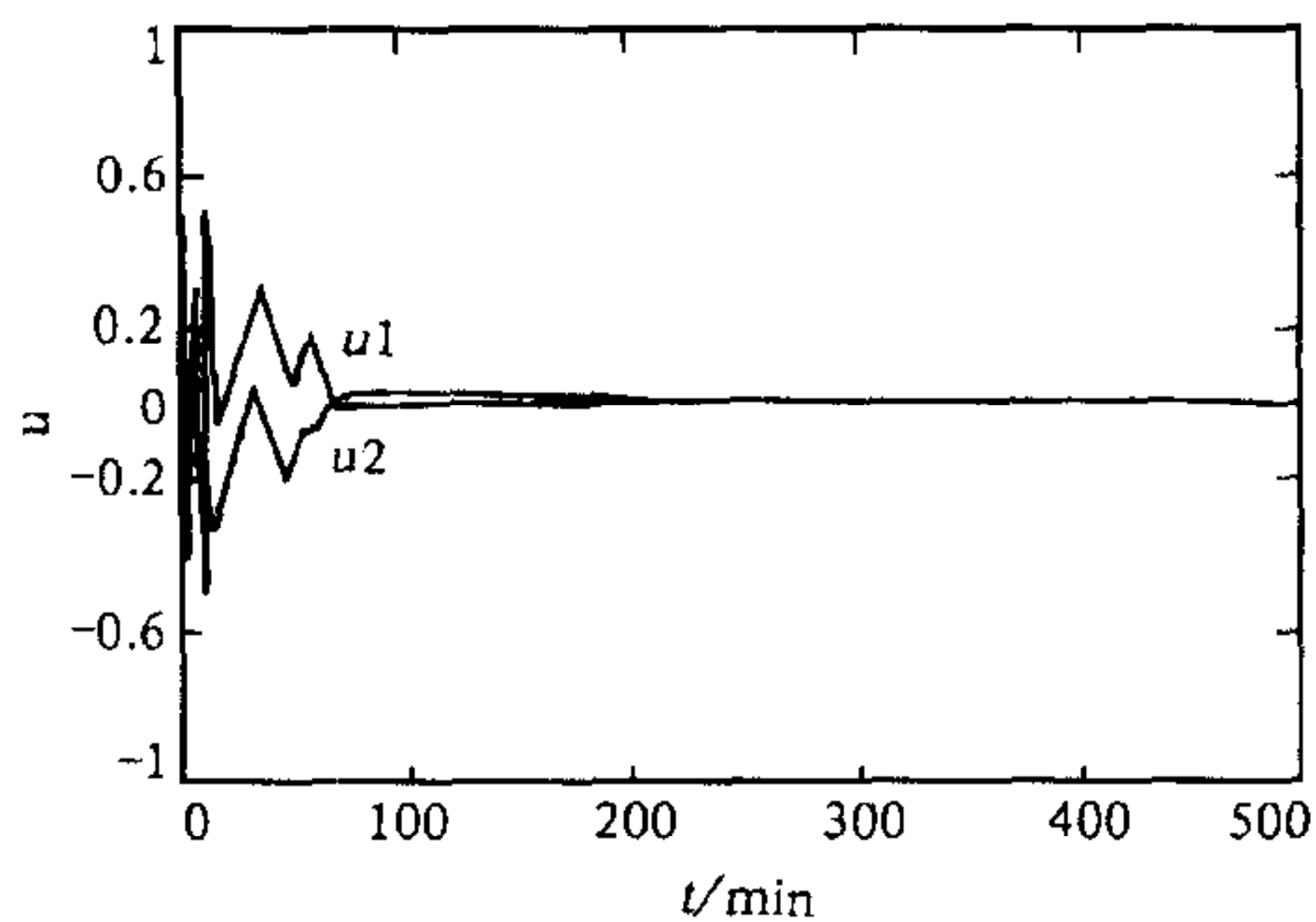
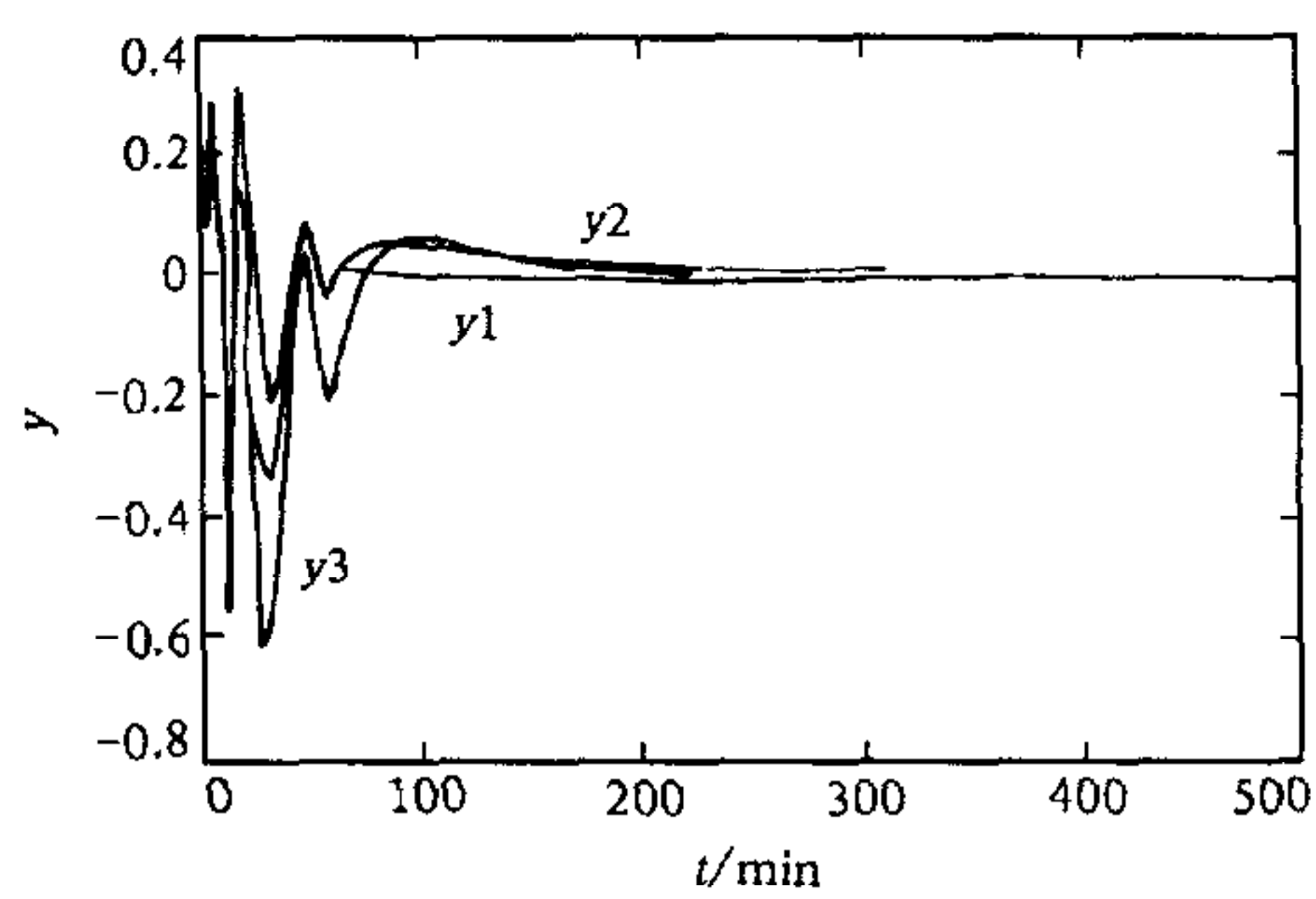
对这样一个多变量控制系统, 要求实现以下控制目标, 并满足相应的控制约束条件.

目标:  $g_1: y_{1,sp} = 0.0; g_2: y_{2,sp} = 0.0; g_3: -0.5 \leq y_1 \leq 0.5; g_4: -0.5 \leq y_3 \leq 0.5$ .

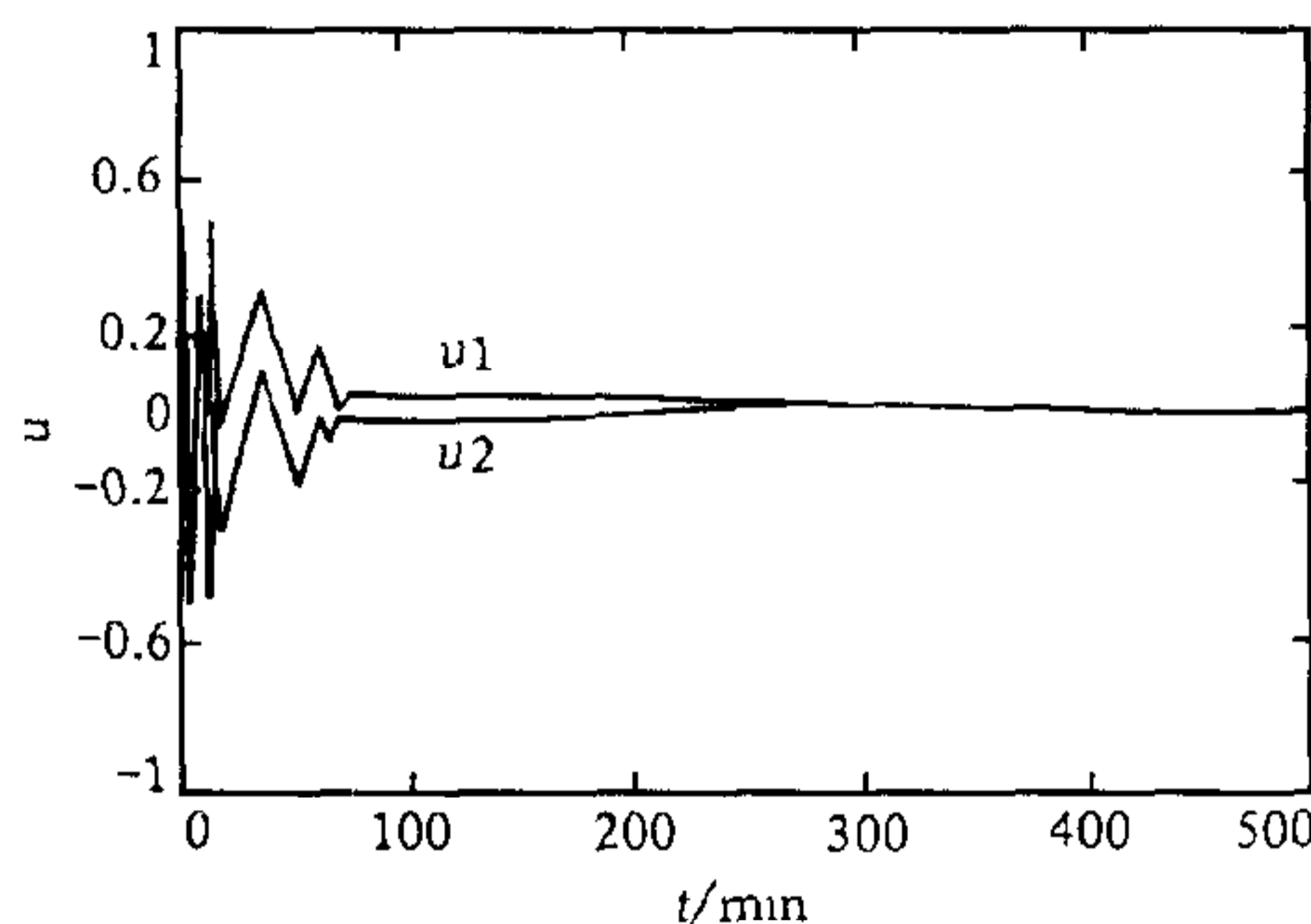
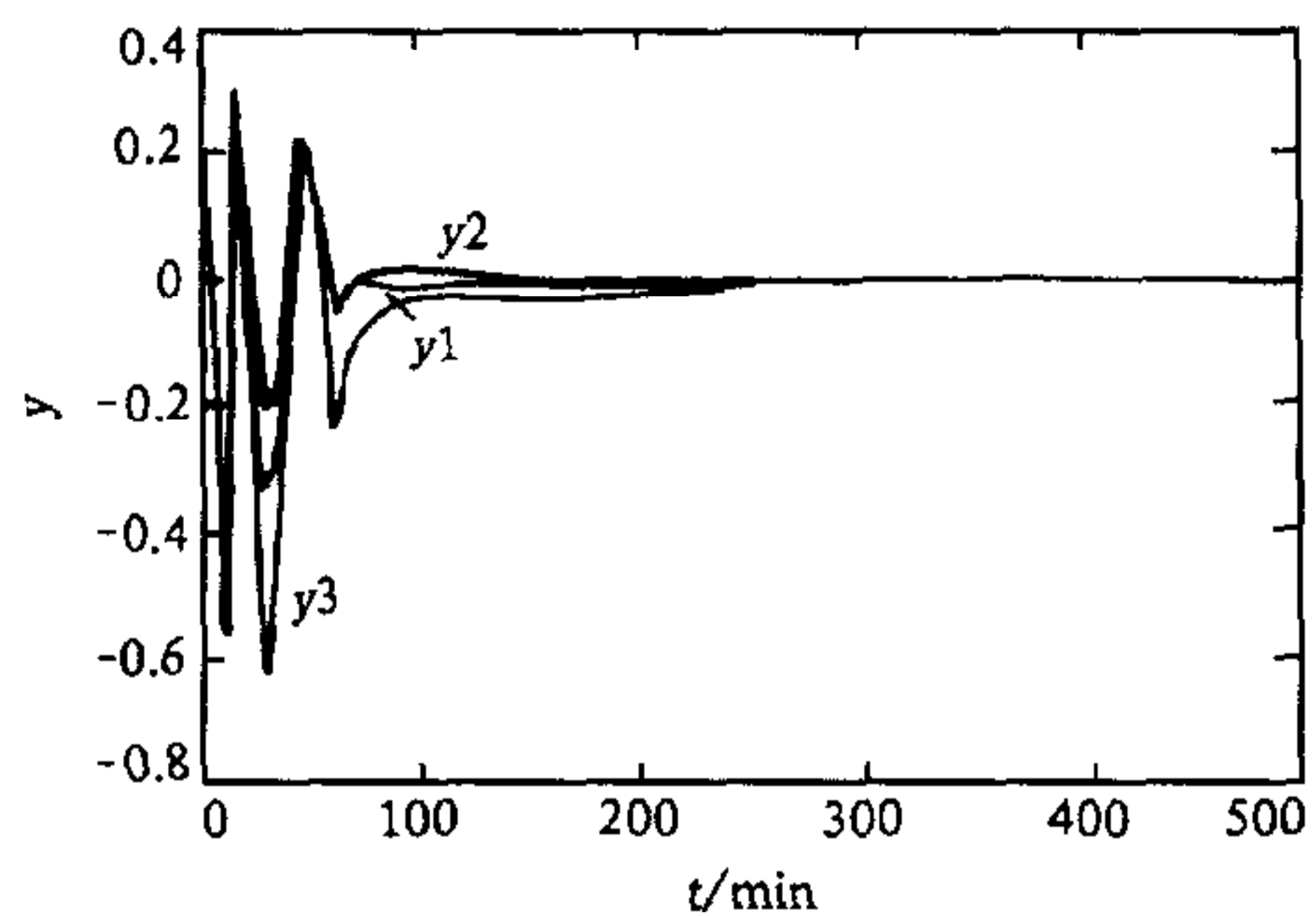
约束:  $B_1: -0.5 \leq u_j(k) \leq 0.5; B_2: \Delta u_j = 0.05 \quad (j=1, 2)$ .

采样周期为1分钟. 目标有四种优先级排序: 1)  $g_3 > g_1 > g_2 > g_4$ , 2)  $g_3 > g_2 > g_1 > g_4$ , 3)  $g_4 > g_3 > g_1 > g_2$ , 4)  $g_4 > g_3 > g_2 > g_1$ .

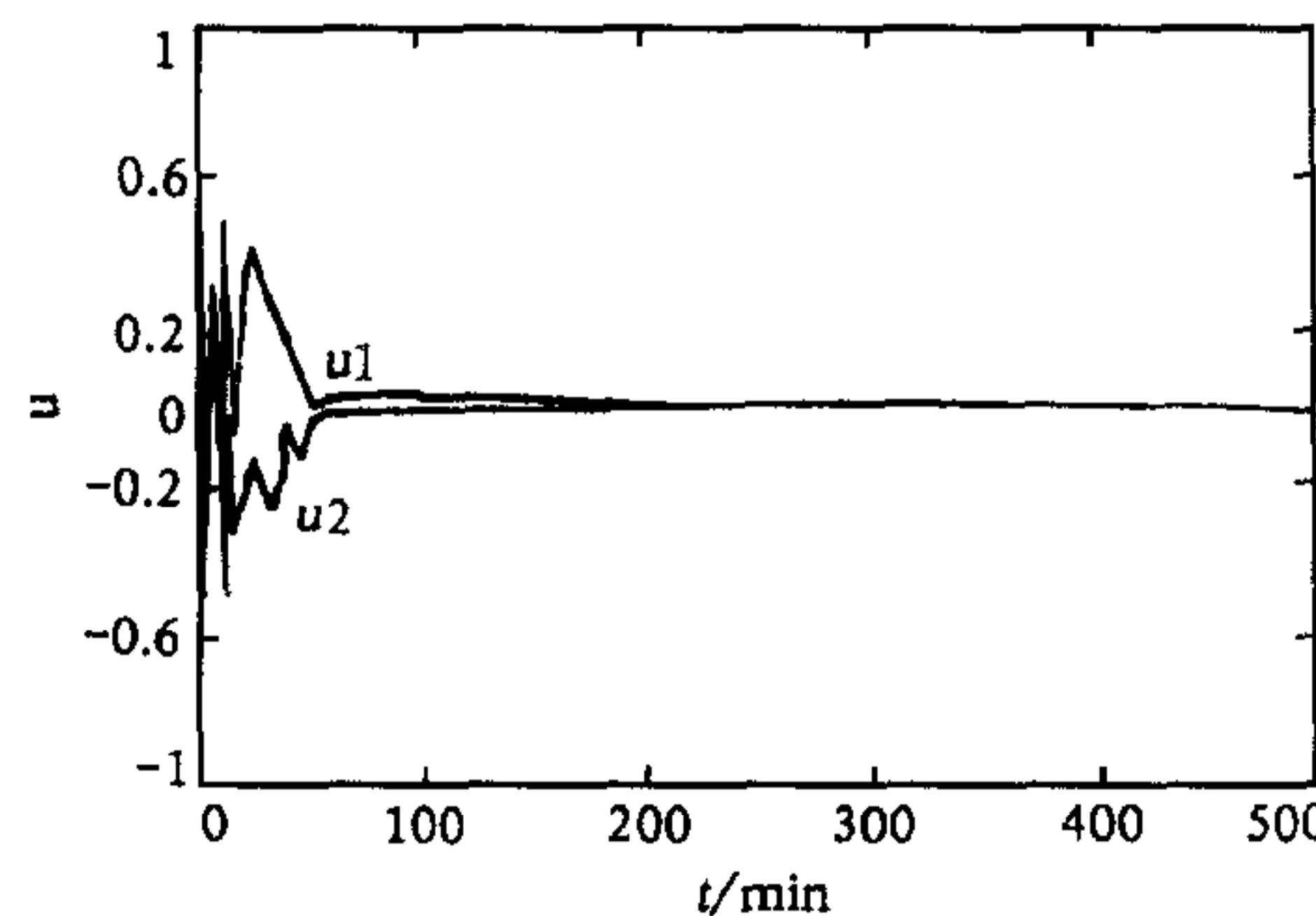
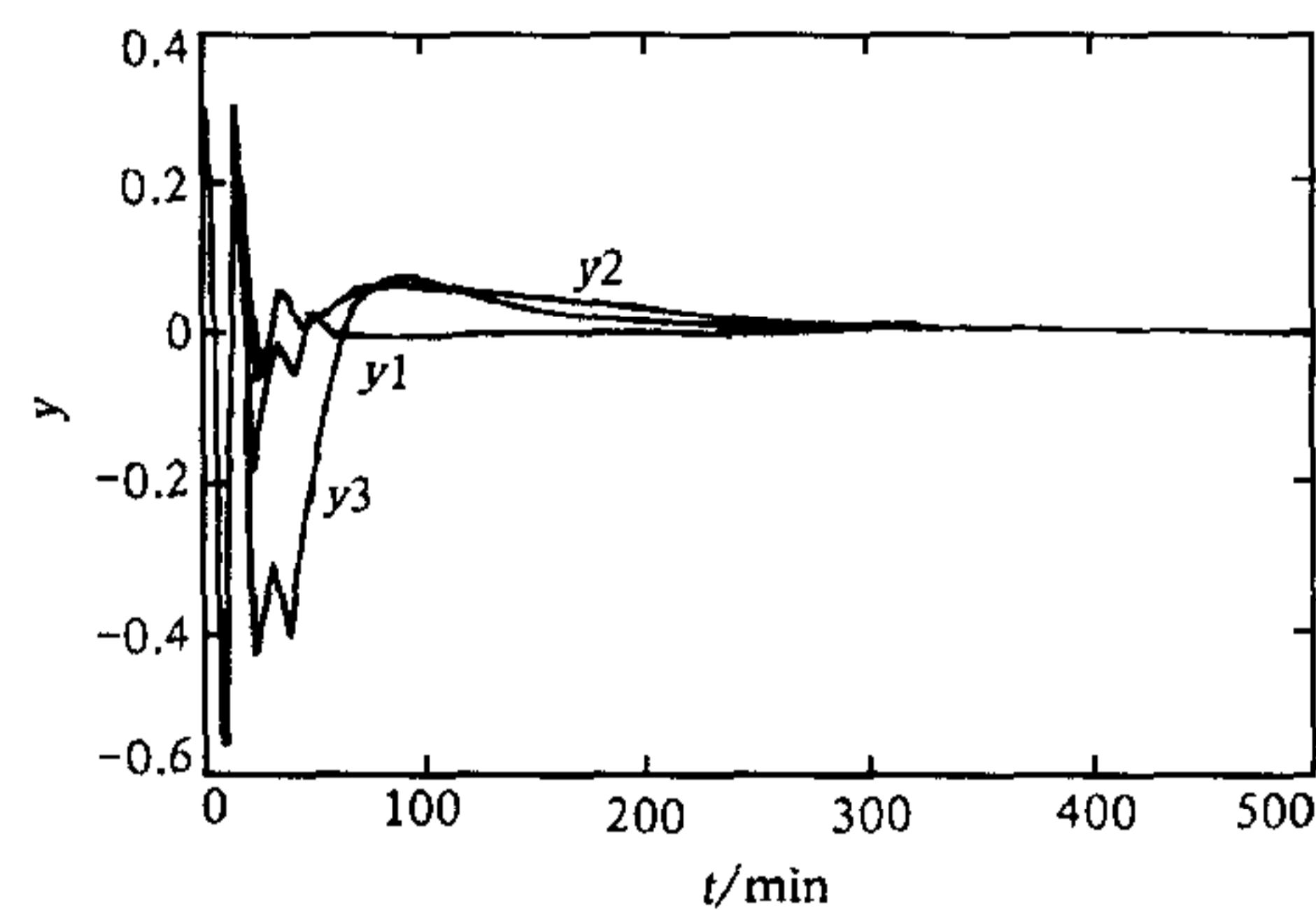
仿真结果见图1到图4, 它们分别对应优先级1)到4). 可见, 在满足控制量约束的前提下, 本调节器较好地实现了按优先级顺序依次满足各个控制目标的功能.



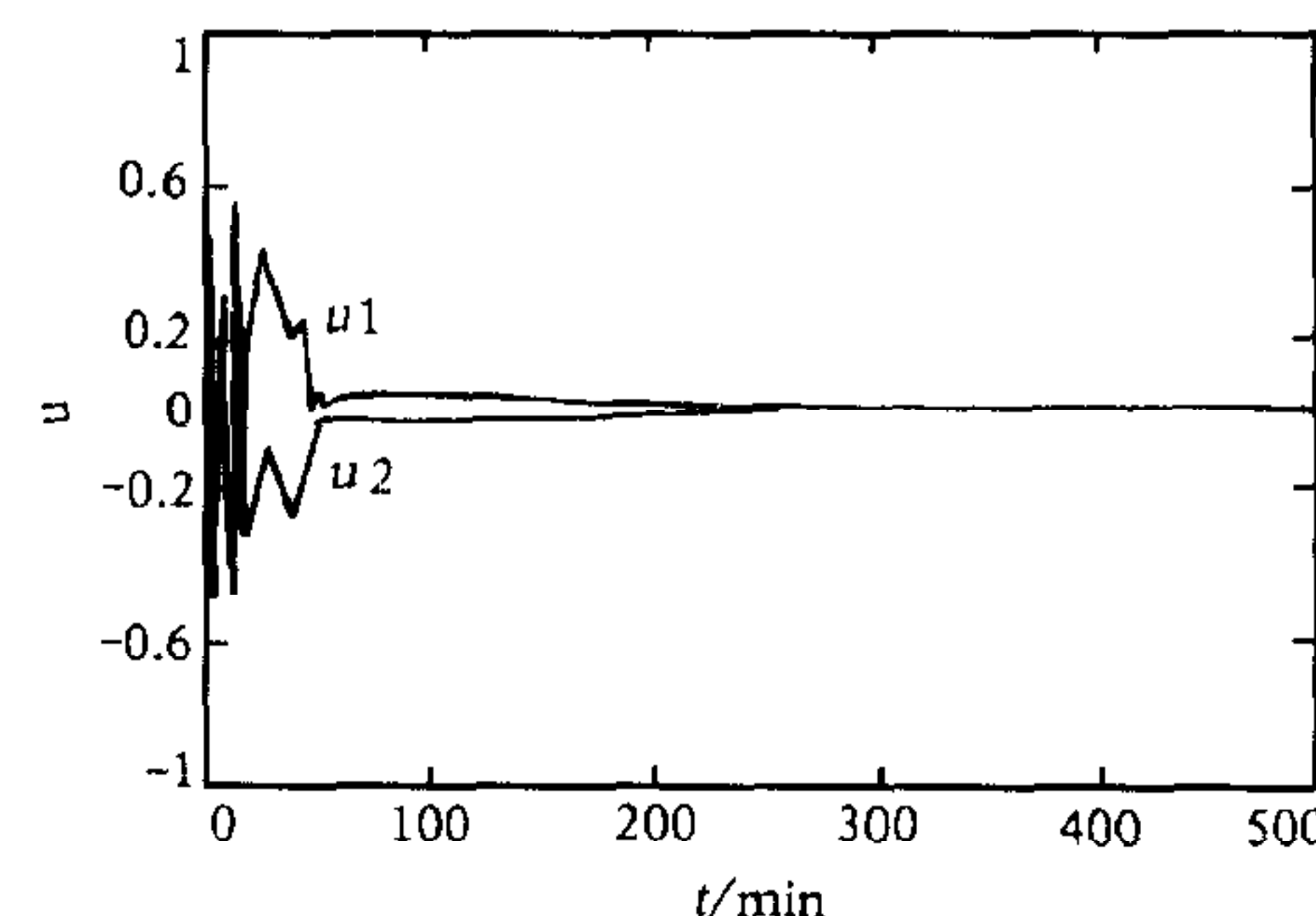
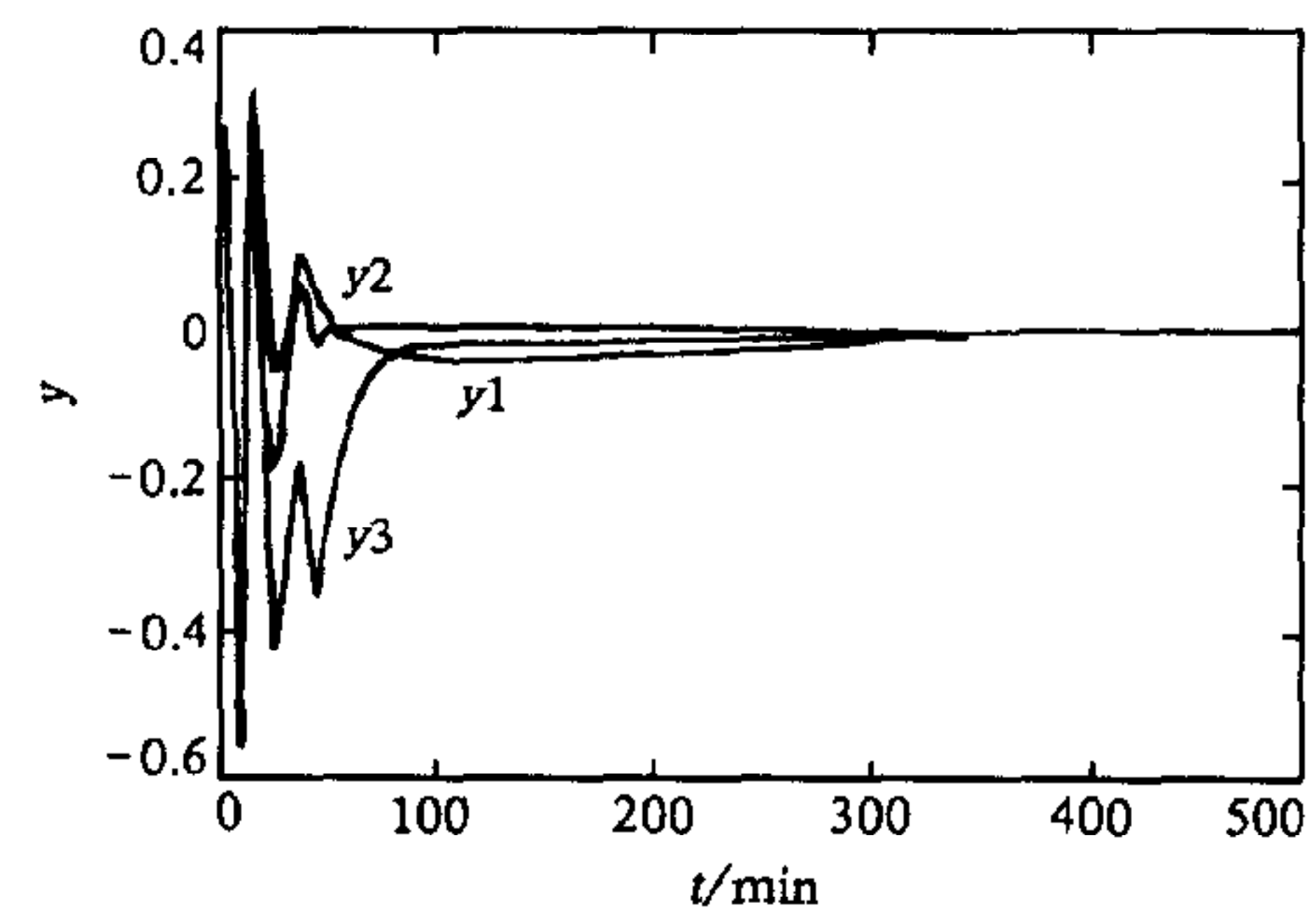
(a) (b)  
图1 对应于优先级1)的被控量(a)和控制量(b)曲线



(a) (b)  
图2 对应于优先级2)的被控量(a)和控制量(b)曲线



(a) (b)  
图3 对应于优先级3)的被控量(a)和控制量(b)曲线



(a) (b)  
图4 对应于优先级4)的被控量(a)和控制量(b)曲线

## 4 结论

模块多变量自校正调节器是一种新的多变量自校正调节器框架结构,它可以显式而有效地处理各种控制目标和约束.仿真结果表明,这种思想具有一定的尝试价值.

### 参 考 文 献

- 1 Meadowcroft T A, Stephanopoulos G, Brosilow C. The modular multivariable controller 1: steady-state properties. *AIChE Journal*, 1992, 38(8):1254~1278
- 2 田智,吴刚等.模块多变量预测控制.见:95'中国控制会议论文集,中国科学技术出版社,1995,642~648
- 3 应爱国,吴刚等.一种新的多变量自校正控制算法—模块多变量法.见:第二届全球华人智能控制与智能化大会论文集(下卷),西安交通大学出版社,1997,1820~1825
- 4 吴刚,孙德敏等.多变量自适应控制系统中两个实际问题的研究.见:第二届全国智能控制专家讨论会论文集(下卷),清华大学出版社,1994,887~893

吴 刚 1964年生.1986年毕业于中国科学技术大学系统科学与管理科学系,1989年获本校控制理论及应用专业硕士学位.现为教授、博士生导师.发表学术论文50余篇,曾获第一届全球华人智能控制与智能化大会最佳论文奖,获省部级科技进步奖四项.主要从事工业过程先进控制和优化研究.

(上接第806页)

### 征文范围

- 智能设计与制造
- 人工神经网络
- 模糊系统
- 进化计算
- 计算智能及软计算
- 智能控制
- 先进控制方法和技术
- 离散事件系统与混合系统
- 机器人
- 多智能体系统
- 人工智能及应用
- 智能信息处理
- 混沌、分形与小波
- 智能管理与决策
- 智能建模与仿真
- 智能故障诊断
- 数据挖掘与知识发现
- 智能技术在通信与网络中的应用
- 智能人机交互技术
- 虚拟现实及多媒体技术
- 计算机视觉
- 模式识别与图像处理
- 智能测量及多传感器信息融合
- 智能化装置
- 智能交通系统
- 智能化系统及应用
- 其它

### 会议联系人

钱宗华 北京清华大学计算机系 100084,电话:010-62788939(O),010-62784458(H),

E-mail:hqzh@sloooe.cs.tsinghua.edu.cn

欲投稿者,可向联系人索要会议论文打印规格要求。