



一种预测优化解耦补偿器的研究设计¹⁾

黄道平 朱学峰

(华南理工大学自动控制工程系 广州 510641)

(E-mail: audhuang@scut.edu.cn)

摘要 提出一种通过对对象输出预测实现对角优化解耦的补偿器设计方法,给出了该补偿器的解耦算式.此预测优化解耦补偿器有别于传统的动态或静态解耦补偿方法,适用于具有非最小相位特性的众多多变量系统的解耦补偿,具有较好的稳定性和可实现性.同时给出了仿真实验结果.

关键词 系统解耦,输出预测,参数优化设计.

STUDY OF PREDICTIVE OPTIMAL DECOUPLING COMPENSATOR

HUANG Daoping ZHU Xuefeng

(Dept. of Automatic Control Engineering, South China Univ. of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract A method for compensator design which can make an object optimally decoupled via system output prediction is proposed. The algorithm of the compensator is presented. The predictive optimal decoupling compensator is different from traditional dynamic or static decoupling compensation, and is suitable for most multi-variable systems including non-minimum phase ones. It has good stability and is easy to realize. The simulation results are also shown.

Key words System decoupling, output prediction, parameter optimal design.

1 引言

解耦控制是实现多变量系统控制的一种有效方法.传统解耦控制(如传统的对角矩阵解耦法^[1])原理简单,解耦器的数学模型也容易推得.但是,它们在实施中往往存在不少问题,解耦器可能是不可实现的,或者本身是不稳定的,或者整个系统在模型稍有误差时即出现不稳定.而实际对象都具有一定的时变性、非线性,这就使得传统的解耦器实用性较差.为此,本文将预测、优化等思想引入解耦器设计中,提出了一种通过对对象输出预测实现对角优化解耦的补偿器设计方法.它并不强求使系统完全解耦,而是在现有条件下“尽量”解耦,即在最优指标下实现解耦.同时引入了在线反馈信号,使该补偿器具有一定的自校正能力.仿真实验展示了本文提出的预测优化解耦补偿器的优越性.

1)国家“863”计划(863-511-945-007)、国家教育部留学回国人员基金(教外司留[1999]363号)资助项目.

收稿日期 1998-02-24 收修改稿日期 1999-04-15

2 传统解耦控制方法及存在的问题

设 $G(z^{-1})$, $D(z^{-1})$ 分别是实际对象和解耦器的传递函数矩阵, $\tilde{G}(z^{-1})$ 是由 $G(z^{-1})$ 的对角线元素组成的对角矩阵. 传统对角解耦控制方法即要使下式成立

$$G(z^{-1})D(z^{-1}) = \tilde{G}(z^{-1}). \quad (1)$$

如果 $G(z^{-1})$ 的逆存在, 则从式(1)可得解耦补偿器如下

$$D(z^{-1}) = G(z^{-1})^{-1}\tilde{G}(z^{-1}). \quad (2)$$

从式(1), (2)可知, 确定解耦器的数学模型是容易的, 但这样获得的解耦补偿器一般地存在以下几个问题^[1]: 1) 按完全解耦推导出的补偿器(式(2))可能是无法实现的; 2) 对于某些对象(如某些非最小相位系统), 式(2)所得的解耦器可能是本质不稳定的; 3) 实现解耦器式(2)产生的误差很容易引起系统不稳定; 4) 实际过程通常还是时变和非线性的, 要达到最优化, 解耦器必须具有一定的自校正能力.

基于上述问题, 不少论文提出了各种其它形式的解耦补偿器设计方法. 本文将预测控制思想引入到解耦补偿器的设计中, 提出了下面的预测优化解耦补偿器.

3 预测优化解耦补偿器的设计

3.1 对象模型描述

为书写简洁, 下面仅以二输入二输出系统为例给出预测优化解耦器的设计方法(对二阶以上的多变量系统, 方法完全相同). 其常见的差分方程(时间关系)式为

$$\begin{cases} y_1(t) = \sum_{i=1}^{na_{11}} a_{11}^{(i)} y_1(t-i) + \sum_{i=1}^{na_{12}} a_{12}^{(i)} y_2(t-i) + \sum_{i=1}^{nb_{11}} b_{11}^{(i)} x_1(t-i) + \sum_{i=1}^{nb_{12}} b_{12}^{(i)} x_2(t-i), \\ y_2(t) = \sum_{i=1}^{na_{21}} a_{21}^{(i)} y_1(t-i) + \sum_{i=1}^{na_{22}} a_{22}^{(i)} y_2(t-i) + \sum_{i=1}^{nb_{21}} b_{21}^{(i)} x_1(t-i) + \sum_{i=1}^{nb_{22}} b_{22}^{(i)} x_2(t-i), \end{cases} \quad (3)$$

其中 $x_1(t)$, $x_2(t)$ 为对象输入, $y_1(t)$, $y_2(t)$ 是对象输出, nb_{kj} , na_{kj} ($k=1, 2$ $j=1, 2$) 是相应通道的输入和输出阶数.

3.2 解耦补偿器的数学模型

令解耦器由下面形式的差分方程描述

$$\begin{cases} x_1(t) = \sum_{i=1}^{nc} c_{11}^{(i)}(t) x_1(t-i) + \sum_{i=1}^{nc} c_{12}^{(i)}(t) x_2(t-i) + \sum_{i=0}^{nd} d_{11}^{(i)}(t) u_1(t-i) + \sum_{i=0}^{nd} d_{12}^{(i)}(t) u_2(t-i), \\ x_2(t) = \sum_{i=1}^{nc} c_{21}^{(i)}(t) x_1(t-i) + \sum_{i=1}^{nc} c_{22}^{(i)}(t) x_2(t-i) + \sum_{i=0}^{nd} d_{21}^{(i)}(t) u_1(t-i) + \sum_{i=0}^{nd} d_{22}^{(i)}(t) u_2(t-i), \end{cases} \quad (4)$$

其中 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 是解耦器的输入(亦是调节器的输出), $x_1(t)$, $x_2(t)$ 是解耦器的输出. nc 是解耦器的输出阶数, nd 是其输入阶数(这里令其所有输入同阶, 输出同阶). 而 $c_{kj}^{(i)}(t)$ ($i=1, 2, \dots, nc, k=1, 2, j=1, 2$) 和 $d_{kj}^{(i)}(t)$ ($i=1, 2, \dots, nd, k=1, 2, j=1, 2$) 是解耦补偿器的待定系数, 并令它们为时变的, 在系统运行过程中不断滚动优化.

3.3 解耦补偿器优化系数的设计

本文将预测控制的思想^[2,3]引入到解耦补偿器的参数设计中, 其参数设计采用滚动优

化的形式. 在每个采样周期, 假设调节器的输出已定, 但解耦补偿器的系数却是待定的, 也就意味着解耦补偿器的输出也是待定的. 此时, 以解耦补偿器的参数(式(4)的 $c_{kj}^{(i)}(t)$, $d_{kj}^{(i)}(t)$)作为自变量(待求量), 通过解耦器数学模型式(4)和对象模型式(3)对多变量对象的输出进行多步预测. 考虑到模型误差和干扰的影响, 在线引入本周期的输出测量值与上一周期对本次输出的预测值之差对直接预测值进行校正, 并将输出预测值与广义对象的目标模型输出值(作为参考轨迹)相比较. 本文以对象模型式(3)相应的传递函数矩阵的对角矩阵作为广义对象的目标模型. 进一步利用最优化方法, 求出使对象预测输出与参考轨迹误差的二次型性能指标最小的一组解耦补偿器参数, 即为此次采样周期的解耦器参数值. 经推导(由于篇幅原因, 推导过程略)即可获得如下的解耦器系数修正律为 c

$$\Delta c(t) = (\tilde{A}^T Q \tilde{A} + F)^{-1} [\tilde{A}^T Q (y_r(t) - y_m(t) - h(t))], \quad (5)$$

其中 \tilde{A}^T 是系数矩阵, $y_r(t)$ 是参考轨迹输出, $y_m(t)$ 是过去输入量等产生的预测输出, $h(t)$ 是反馈校正量, Q 、 F 是加权系数矩阵. 获得 $\Delta c(t)$ 后, 加上上一周期的解耦器系数即可求出当前(本周期)的解耦器优化系数值. 在调节器输出值(作为解耦器的输入值)已知的情况下, 利用式(4)即可求得解耦补偿器的输出. 将它输入到实际多变量对象上, 即可实现多变量系统的优化解耦控制.

3.4 预测优化解耦补偿器部分参数的选取说明及特点分析

要实现双输入双输出系统的完全解耦, 可以证明^[1,4]传统解耦器的输入输出阶数需为 $2(na + nb)$ (na 为对象模型的输出阶数, nb 为其输入阶数). 若对象的估计模型与真实模型不完全一致, 则解耦器的输入输出阶数必须为 $4na + 2nb$ 才能从理论上做到完全解耦. 本文提出的预测优化解耦补偿器的设计思想是实现在一定条件下的优化解耦, 并不强求“完全解耦”. 故在 nc, nd 值小于 $2(na + nb)$ 的情况下, 亦能获得较满意的效果. 而 nc, nd 的减小意味着解耦器的系数个数的减少, 也就是解耦器的简化, 这有利于在线计算. nc, nd 的具体取值可在线调整, 找到使系统解耦效果较好而其值又最小为宜.

4 仿真研究

例1. 某一电加热炉的数学模型如下^[4], 采样周期为 $t_s = 3\text{min}$.

$$\begin{aligned} y(t) = & \begin{bmatrix} 0.2424 & 0.0997 \\ 0.1322 & 0.4265 \end{bmatrix} y(t-1) + \begin{bmatrix} 0.3426 & 0.2105 \\ 0.1070 & 0.2404 \end{bmatrix} y(t-2) + \\ & \begin{bmatrix} 0.0576 & 0.0424 \\ 0.0295 & 0.0751 \end{bmatrix} x(t-1) + \begin{bmatrix} 0.0509 & 0.0319 \\ 0.0372 & 0.0656 \end{bmatrix} x(t-2). \quad (6) \end{aligned}$$

加入本文提出的预测优化解耦补偿器(取 $nc = 4, nd = 4$), 再对两个解耦后的广义对象分别采用 PID 调节器进行单独控制. 仿真结果如图1所示. 为了比较, 图2给出了无解耦情况下单独设置二个 PID 控制器对电加热炉的 y_1, y_2 进行控制的仿真结果. 从图1和图2可看出, 预测优化解耦控制可获得良好的解耦控制效果.

这里还需指出, 本文的预测优化解耦补偿器几乎不需要什么学习时间. 而文献[4]介绍的神经网络解耦器, 需要经过近20 000步的学习过程才能达到较好的解耦效果.

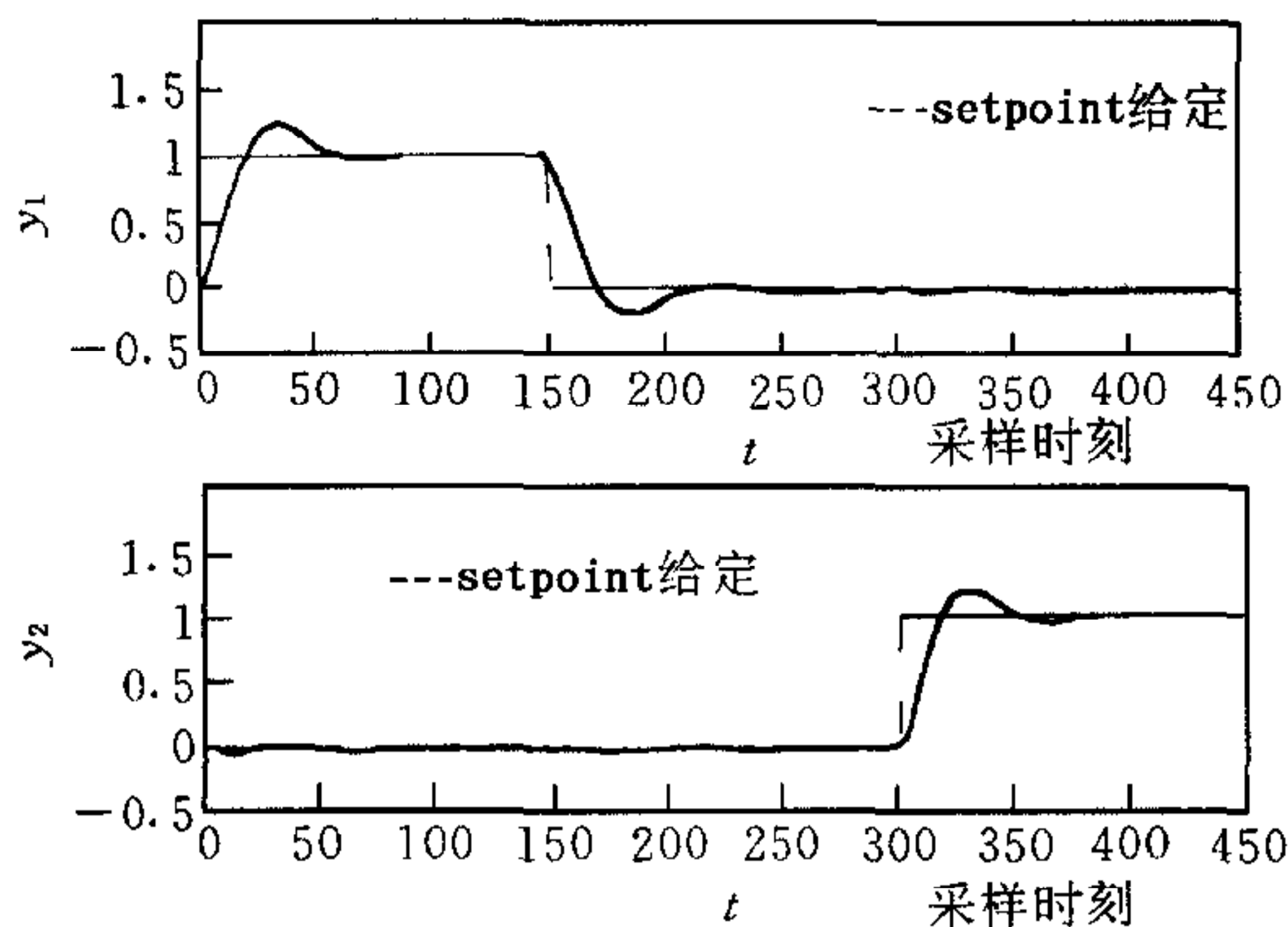


图1 预测优化解耦控制仿真结果

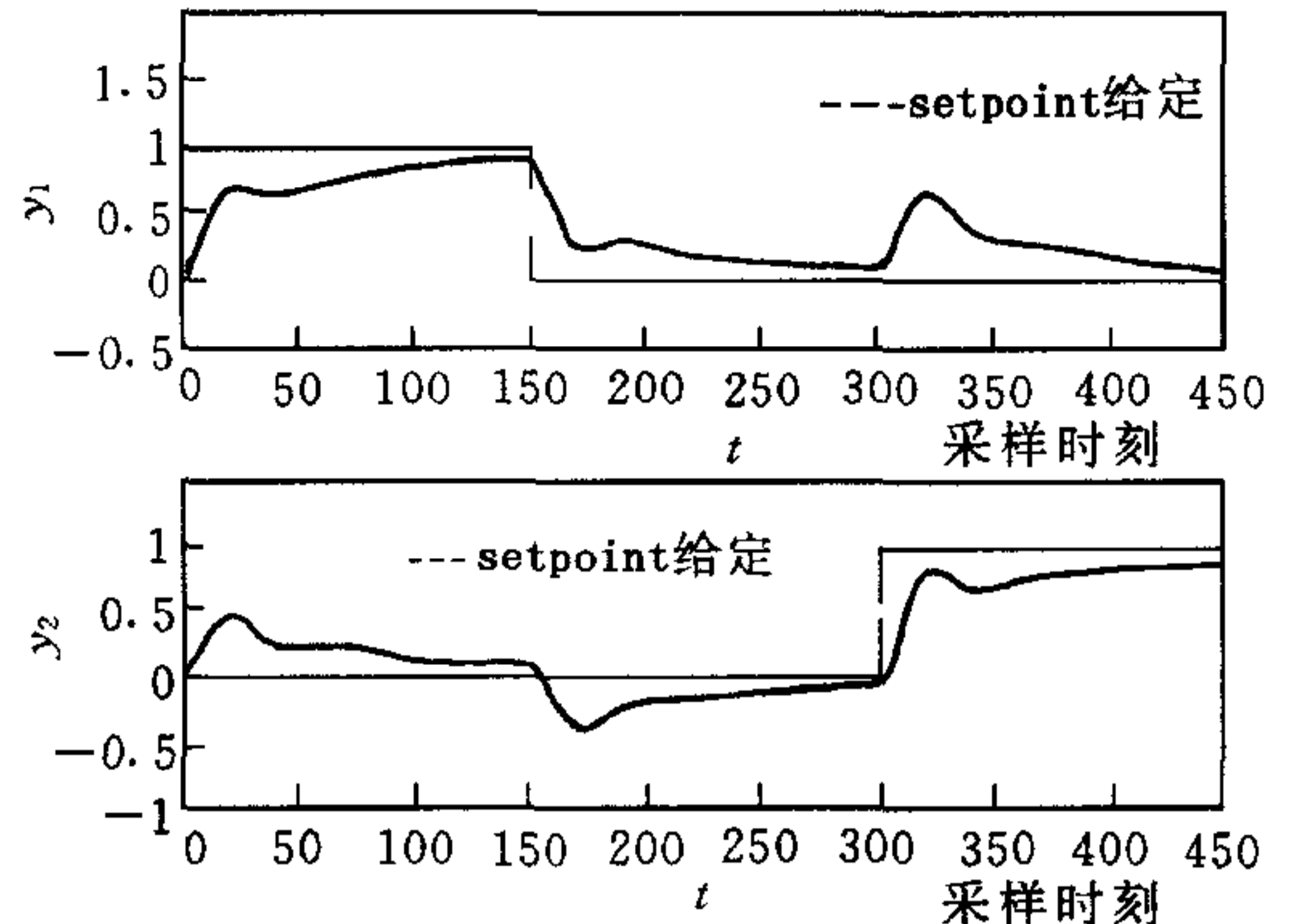


图2 无解耦电加热炉 PID 控制仿真结果

例2. 某一双输入双输出对象的数学模型如下:

$$\begin{cases} y_1(t) = 4.5239y_1(t-1) - 3.4034y_1(t-2) + 4.1746y_2(t-1) - \\ \quad 3.4466y_2(t-2) + 0.8885x_1(t-1) - 1.0051x_1(t-2) + \\ \quad 0.9094x_2(t-1) - 1.6305x_2(t-2) \\ y_2(t) = -2.0205y_1(t-1) + 1.9202y_1(t-2) - 1.3793y_2(t-1) + \\ \quad 1.8199y_2(t-2) - 0.5697x_1(t-1) + 0.6677x_1(t-2) - \\ \quad 0.4662x_2(t-1) + 1.0213x_2(t-2). \end{cases} \quad (7)$$

可以证明,这是一个非最小相位系统(其 z 传递函数有零点在单位圆外).按式(2)所述的传统对角解耦方法,推导出相应的传统解耦补偿器 $D(z^{-1})$.经仿真研究发现 $D(z^{-1})$ 是一个不稳定的解耦器,也就是说,按传统对角解耦方法不能实现式(7)对象的解耦控制.

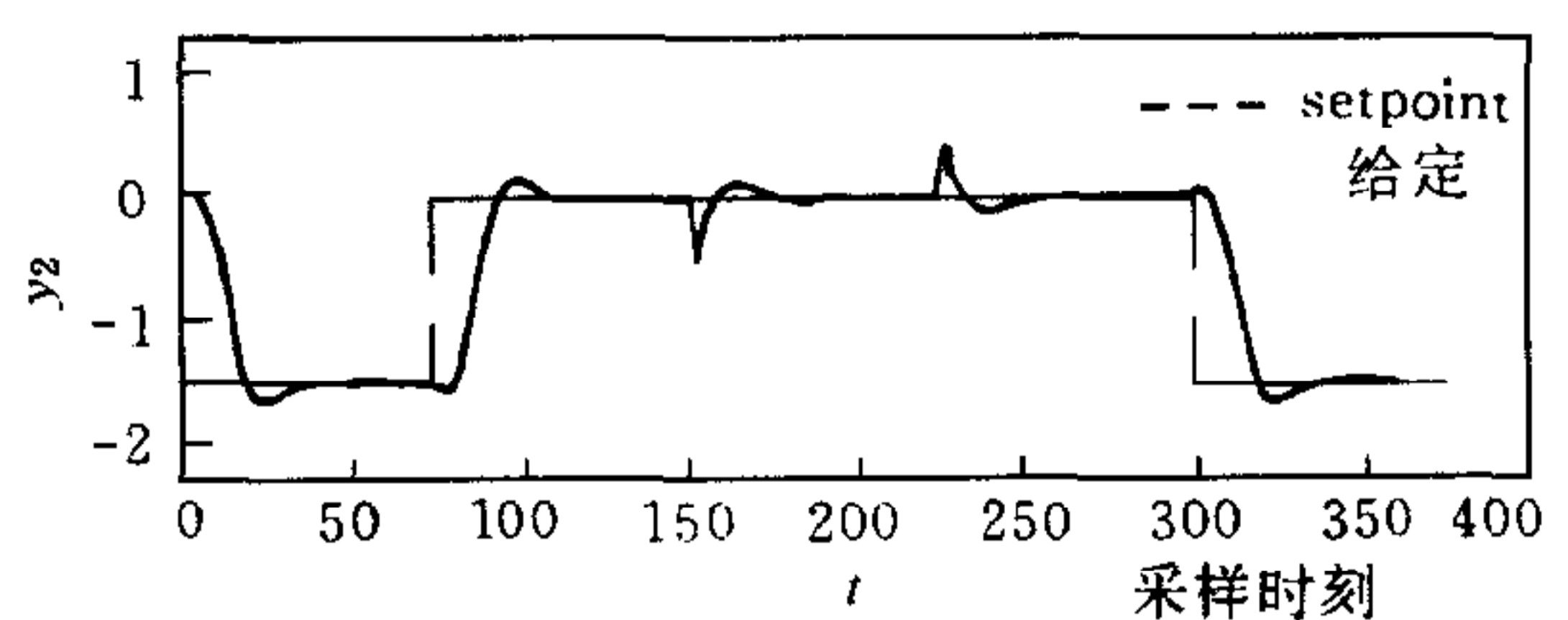
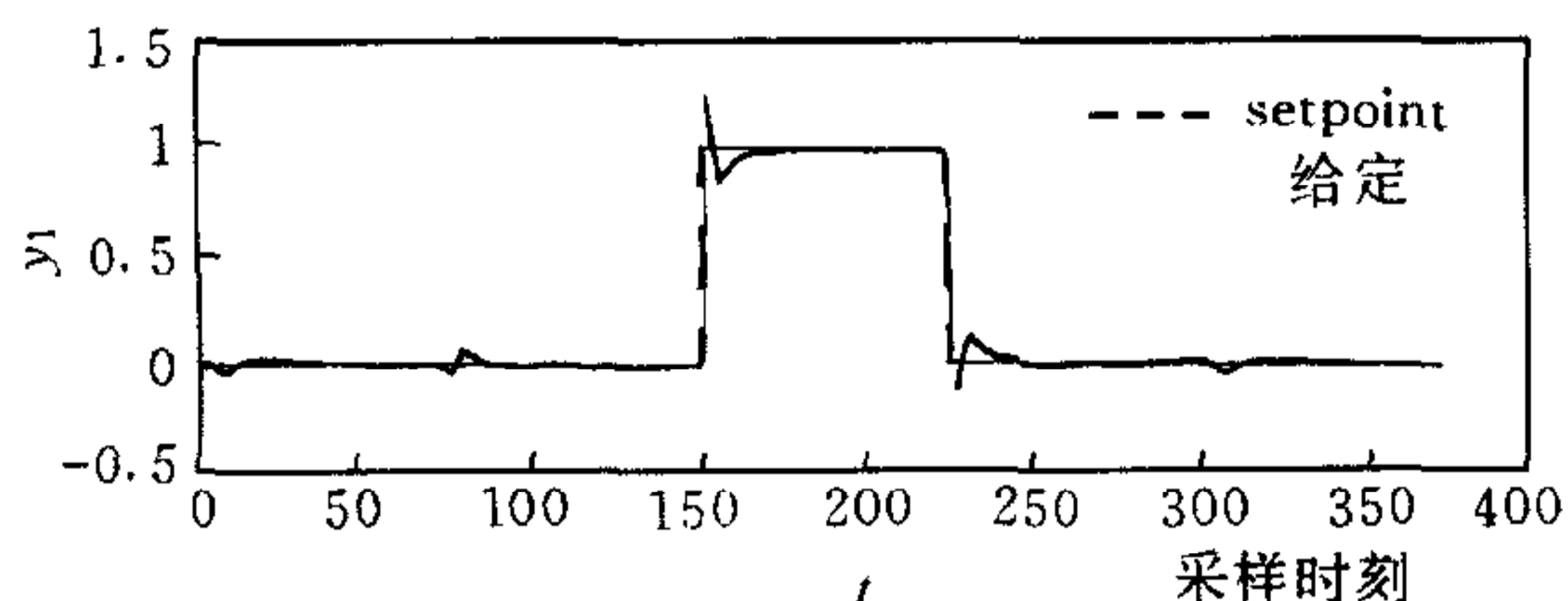


图3 预测优化解耦控制仿真结果

用本文提出的预测优化解耦方法对式(7)对象进行解耦控制,仿真实验结果如图3所示($nc=4, nd=4$).可以看出, y_1, y_2 之间虽然尚有一些耦合,但各自均能达到较好的控制效果.该方法适用于大部分线性多变量系统.

参 考 文 献

- 1 金以慧.过程控制.北京:清华大学出版社,1993
- 2 席裕庚.预测控制.北京:国防工业出版社,1993
- 3 李平,王树青,王骥程.预测控制研究的概况.化工自动化及仪表,1995,22(6):3~9.
- 4 舒迪前.预测控制系统及其应用,北京:机械工业出版社,1996

黄道平 1961年10月生.分别于1982年、1986年和1998年在华南理工大学获得学士、硕士和博士学位.1995至1996年在比利时根特大学作访问学者,现为华南理工大学副教授.主要研究方向为多变量过程控制系统、预测控制、智能控制和人工神经网络.

朱学峰 1940年6月生.分别于1962年和1965年在华南化工学院和华南工学院获得学士和硕士学位.现为华南理工大学教授、博士生导师.主要研究方向为工业过程的建模、仿真、控制和优化.