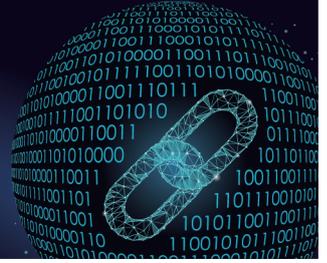




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 基于分散模糊推理的多输入多输出系统预测控制

冯泽, 陈红, 王广军

引用本文:

冯泽, 陈红, 王广军. 基于分散模糊推理的多输入多输出系统预测控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1273–1280.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1369>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation

控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

#### 基于DST融合多视图模糊推理赋值的三维目标检测

3D object detection based on DST fusion multi-view fuzzy reasoning assignment

控制与决策. 2021, 36(4): 867–875 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0434>

#### 线控转向系统的自适应高阶滑模控制

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

#### 输入约束不确定系统的点对点迭代学习控制与优化

Point-to-point iterative learning control and optimization for uncertain systems with constrained input

控制与决策. 2021, 36(6): 1435–1441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0908>

#### 具有未建模动态和输出约束的耦合系统的分散自适应控制

Decentralized adaptive control for interconnected systems with unmodeled dynamics and output constraints

控制与决策. 2018, 33(12): 2113–2121 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0933>

# 基于分散模糊推理的多输入多输出系统预测控制

冯泽<sup>1</sup>, 陈红<sup>1,2</sup>, 王广军<sup>1,2†</sup>

- 重庆大学 能源与动力工程学院, 重庆 400044;
- 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 对于动态过程具有明显迟延和惯性的 MIMO 系统, 常规模糊控制难以建立模糊规则, 控制效果不理想. 针对 MIMO 控制对象, 提出一种基于分散模糊推理的预测控制 (predictive control based on decentralized fuzzy inference, DFIPC) 方法. 构造一组与被控输出相对应的分散模糊推理模块, 每个推理模块利用一组分散的模糊推理单元, 分别根据各个输出的期望值与预测值之间的偏差进行分散推理. 在时间层面, 根据动态响应程度对推理结果进行加权综合, 获得等效控制输入; 进一步, 通过对等效控制输入加权综合产生系统实际控制输入增量, 从而有效克服模糊推理系统处理多维输入信息时模糊规则难以建立的困难. 最后, 通过实验验证所提出控制方法对于迟延和惯性明显的 MIMO 控制对象的有效性和适应性.

**关键词:** MIMO 系统; 分散模糊推理; 加权综合; 等效控制输入; 模糊规则; 预测控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1369

引用格式: 冯泽, 陈红, 王广军. 基于分散模糊推理的多输入多输出系统预测控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1273-1280.

## Predictive control of multiple-input multiple-output systems based on decentralized fuzzy inference

FENG Ze<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>1,2</sup>, WANG Guang-jun<sup>1,2†</sup>

- School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
- Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** For multiple-input multiple-output (MIMO) systems whose dynamic processes have conspicuous time-delay and inertia, the conventional fuzzy control method is hard to establish control rules and the control effect can not be satisfied. In this paper, a predictive control based on the decentralized fuzzy inference (DFIPC) method is proposed for MIMO control objects. A cluster of a decentralized fuzzy inference modules corresponding to the outputs of a control object are established. Each decentralized fuzzy inference module contains a set of decentralized fuzzy inference units, and decentralized fuzzy inference are carried out based on the deviation between the expectation in the future time and the predicted value of each output, respectively. In the time domain, the inference results are weighted and synthesized based on the dynamic response degree, and thus the equivalent control inputs of the system are generated. Further, the control increments of system inputs are generated by weighted synthesis of equivalent control inputs. The difficulty of establishing the control rules of the fuzzy inference system in processing multi-input information is resolved. Simulation experiments are proceeded on MIMO objects with obvious time-delay and inertia to verify the effectiveness and adaptability of the proposed method.

**Keywords:** MIMO systems; decentralized fuzzy inference; weighted and synthesized; equivalent control inputs; fuzzy rules; predictive control

## 0 引言

许多实际系统具有多个输入和多个输出, 同时, 动态过程具有明显的迟延和惯性且难以建立有效的

动态过程数学模型<sup>[1-2]</sup>.

以模糊推理为核心的模糊控制 (fuzzy control, FC), 根据专家的定性知识和运行人员的操作经验建

收稿日期: 2022-07-30; 录用日期: 2022-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51876010, 52276051).

责任编委: 刘向杰.

†通讯作者. E-mail: wangguangjun@cqu.edu.cn.

立模糊推理规则,不依赖于控制对象的精确数学模型,具有适应性强和推理过程简单等特点.目前,关于模糊控制已经有了较多的研究积累和应用成果<sup>[3-4]</sup>.

对于单输入单输出 (single-input single-output, SISO) 控制对象,可以基于专家经验,根据被控量在当前时刻的偏差和偏差变化率,采用集中式推理模式形成常规的模糊控制方案<sup>[5]</sup>.对于多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 系统,由于其模糊关系矩阵维数较高,难以根据专家经验建立完备的模糊控制规则<sup>[6-7]</sup>.针对该问题,文献<sup>[8]</sup>借鉴人工推理过程的信息处理模式,建立了一种基于分散模糊推理 (decentralized fuzzy inference, DFI) 的钢坯温度分布控制方案,通过对钢坯温度偏差及其变化率分布的分散推理和综合,获得加热炉炉温补偿量.

另一方面,在前述的模糊控制方案中,通常只能根据当前时刻被控量的偏差信息通过模糊推理确定控制量,在控制过程中难以考虑系统输出的未来变化趋势,对于具有明显迟延和惯性的控制对象,控制效果并不理想<sup>[9]</sup>.

模型预测控制 (model predictive control, MPC) 通过预测模型、滚动优化和反馈校正 3 个基本环节,根据系统未来输出的预测信息确定系统的控制规律,对系统的输出进行超前调节,且能够有效处理多变量和具有复杂结构的系统,对于 MIMO 控制对象具有独特优势<sup>[10-12]</sup>.但由于 MPC 在线计算复杂度高,控制效果对扰动和模型失配敏感,在工程应用中存在比较明显的局限性<sup>[13-14]</sup>.

FC 和 MPC 两种控制思想具有一定的互补性.在文献<sup>[8]</sup>的基础上,文献<sup>[15]</sup>通过 FC 和 MPC 两种控制

方案的结合,针对一种 SISO 控制对象,通过将预测偏差信息引入控制决策过程,提出了一种基于分散模糊推理的预测控制方法,并通过中和过程 pH 值控制问题讨论了控制方案的有效性.

对于 MIMO 控制对象,变量间的动态耦合使控制回路相互关联,需综合考虑所有输出响应以确定控制输入,模糊关系矩阵更为复杂.前述针对 SISO 控制对象的分散模糊推理预测控制方法,仅通过对单个输出的预测偏差进行分散推理和综合,无法用于 MIMO 控制对象.

本文结合分散模糊推理和模型预测控制思想,针对 MIMO 控制对象建立一种基于分散模糊推理的预测控制 (predictive control based on decentralized fuzzy inference, DFIPC) 方法.构造一组与系统输出对应的分散模糊推理模块 (decentralized fuzzy inference models, DFIMs).每一个 DFIM 利用一组分散模糊推理单元 (decentralized fuzzy inference units, DFIs),分别根据各个输出的预测偏差进行分散模糊推理.在时间层面,根据动态响应程度对分散模糊推理单元的推理结果进行加权综合,获得与各个被控输出相对应的时序等效控制输入;进一步,对等效输入进行多变量加权综合,产生系统实际的控制输入增量序列.文中通过  $2 \times 2$ 、 $2 \times 3$  和  $3 \times 2$  三个 MIMO 控制对象仿真实验,验证了 DFIPC 的有效性和适应性.

## 1 DFIPC 基本方案概述

### 1.1 DFIPC 控制系统结构

对于具有  $N$  个输入  $u_n$  和  $M$  个输出  $y_m$  的  $N \times M$  控制对象 ( $n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M$ ),所设计的 DFIPC 控制系统结构如图 1 所示.

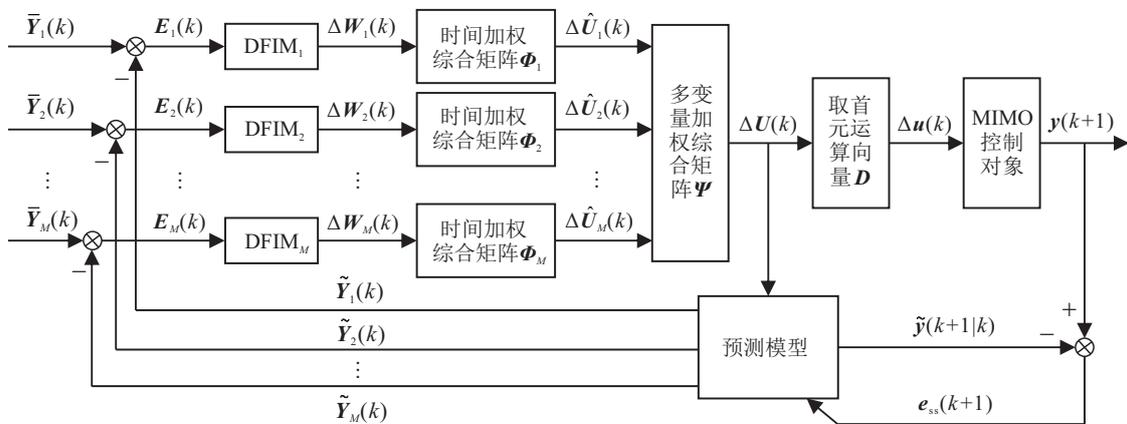


图 1 DFIPC 控制系统结构

图 1 中:  $\bar{\mathbf{Y}}_m(k)$  和  $\tilde{\mathbf{Y}}_m(k)$  分别为输出  $y_m$  在  $k$  时刻的期望时序向量和预测时序向量,  $\mathbf{E}_m(k) = \bar{\mathbf{Y}}_m(k) - \tilde{\mathbf{Y}}_m(k)$  为预测偏差向量,  $\mathbf{y}(k+1)$  是由  $M$  个

输出  $y_m(k+1) (m = 1, 2, \dots, M)$  组成的向量. 具体表达式如下:

$$\bar{\mathbf{Y}}_m(k) = [\bar{y}_m(k+1), \bar{y}_m(k+2), \dots, \bar{y}_m(k+P)]^T,$$

$$\tilde{\mathbf{Y}}_m(k) = [\tilde{y}_m(k+1|k), \tilde{y}_m(k+2|k), \dots, \tilde{y}_m(k+P|k)]^T,$$

$$\mathbf{y}(k+1) = [y_1(k+1), y_2(k+1), \dots, y_M(k+1)]^T.$$

其中:  $\bar{y}_m(k+p)$  是  $y_m$  在  $k+p$  时刻的期望输出值;  $\tilde{y}_m(k+p|k)$  是在  $k$  时刻对  $k+p$  时刻的预测值 ( $p = 1, 2, \dots, P$ ),  $P$  是预测时域.

图1中的DFIPC控制方案包括以下4个基本过程:

1) 在  $k$  时刻, 利用输出  $y_m$  的预测向量和期望值向量产生预测偏差向量  $\mathbf{E}_m(k)$ , 并利用分散模糊推理模块DFIM<sub>*m*</sub> 对  $\mathbf{E}_m(k)$  进行分散模糊推理, 产生分散推理结果向量  $\Delta\mathbf{W}_m(k)$ ;

2) 建立时间加权综合矩阵  $\Phi_m$ , 通过对  $\Delta\mathbf{W}_m(k)$  的时间加权综合, 产生与  $y_m$  对应的等效输入时间序列向量  $\Delta\hat{\mathbf{U}}_m(k)$ ;

3) 建立多变量加权综合矩阵  $\Psi$ , 并对等效输入时间序列向量  $\Delta\hat{\mathbf{U}}_m(k)$  进行多变量加权综合, 获得系统  $N$  个输入的时序控制增量矩阵  $\Delta\mathbf{U}(k)$ ;

4) 在  $k+1$  时刻, 利用阶跃响应预测模型重新产生输出的  $P$  步预测值并对预测结果进行反馈校正.

### 1.2 分散模糊推理模块及加权综合矩阵

在DFIPC控制方案中, 设计了  $M$  个与输出  $y_m$  对应的分散模糊推理模块DFIM<sub>*m*</sub>, 其中的每一个DFIM模块包含  $P$  个分散模糊推理单元DFIU<sub>*p*</sub>, 分别根据预测偏差  $e_m(k+p)$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ ) 进行分散推理, 产生对应的推理结果向量  $\Delta\mathbf{W}_m(k)$ .

在DFIPC控制方案中, 建立了两类加权综合矩阵, 即时间加权综合矩阵  $\Phi_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) 和多变量加权综合矩阵  $\Psi$ , 通过对分散模糊推理结果向量  $\Delta\mathbf{W}_m(k)$  的双重加权综合, 产生系统的时序控制增量矩阵  $\Delta\mathbf{U}(k)$ . 首先, 利用与输出  $y_m$  对应的时间加权综合矩阵  $\Phi_m$ , 在仅考虑输出  $y_m$  本身预测偏差的前提下, 对分散模糊推理结果向量  $\Delta\mathbf{W}_m(k)$  进行时间加权综合, 获得与  $\mathbf{E}_m(k)$  对应的输入时序向量  $\Delta\hat{\mathbf{U}}_m(k)$ . 时序向量  $\Delta\hat{\mathbf{U}}_m(k)$  体现了为消除输出  $y_m$  的偏差, 应该施加给系统的某种等效的输入时序增量, 本文称之为系统的等效控制输入的时序向量. 进一步, 根据系统的控制输入  $u_n$  对各输出响应的耦合影响关系, 通过多变量加权综合矩阵  $\Psi$  对等效输入时序增量向量  $\Delta\hat{\mathbf{U}}_m(k)$  进行综合协调, 确定系统当前时刻  $N$  个输入的时序控制增量矩阵  $\Delta\mathbf{U}(k)$ . 该时序控制增量矩阵的结构为

$$\Delta\mathbf{U}(k) =$$

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1(k) & \Delta u_1(k+1) & \dots & \Delta u_1(k+P-1) \\ \Delta u_2(k) & \Delta u_2(k+1) & \dots & \Delta u_2(k+P-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta u_N(k) & \Delta u_N(k+1) & \dots & \Delta u_N(k+P-1) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $\Delta u_n(k)$  为  $u_n$  在  $k$  时刻的控制增量.

在  $k$  时刻, 仅需要将时序控制增量矩阵  $\Delta\mathbf{U}(k)$  中的即时控制增量  $\Delta\mathbf{u}(k)$  作用于控制对象. 即时控制增量  $\Delta\mathbf{u}(k)$  根据下式确定:

$$\Delta\mathbf{u}(k) = \Delta\mathbf{U}(k)\mathbf{D}. \quad (2)$$

其中:  $\Delta\mathbf{u}(k) = [\Delta u_1(k), \Delta u_2(k), \dots, \Delta u_N(k)]^T$ ;  $\mathbf{D}$  为取首元运算向量, 即  $\mathbf{D} = [1, 0, \dots, 0]^T$ .

### 1.3 预测模型与反馈校正

DFIPC利用阶跃响应模型对控制对象的  $P$  步未来输出进行预测, 即

$$\tilde{\mathbf{Y}}(k) = \tilde{\mathbf{Y}}^0(k) + \mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{U}}(k). \quad (3)$$

其中: 预测输出向量

$$\tilde{\mathbf{Y}}(k) = [\tilde{\mathbf{Y}}_1(k), \tilde{\mathbf{Y}}_2(k), \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_M(k)]^T;$$

控制增量  $\Delta\tilde{\mathbf{U}}(k)$  为前述控制增量矩阵  $\Delta\mathbf{U}(k)$  的向量形式表示, 即

$$\Delta\tilde{\mathbf{U}}(k) = [\Delta\mathbf{U}_1(k), \Delta\mathbf{U}_2(k), \dots, \Delta\mathbf{U}_N(k)]^T,$$

$$\Delta\mathbf{U}_n(k) = [\Delta u_n(k), \Delta u_n(k+1), \dots, \Delta u_n(k+P-1)];$$

$\mathbf{A}$  为预测模型动态矩阵, 即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \dots & \mathbf{A}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{M1} & \dots & \mathbf{A}_{MN} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{mn} = \begin{bmatrix} a_{mn}(1) & & & \mathbf{0} \\ a_{mn}(2) & a_{mn}(1) & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{mn}(P) & a_{mn}(P-1) & \dots & a_{mn}(1) \end{bmatrix},$$

$a_{mn}(p)$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ ) 是  $P$  个采样时刻的单位阶跃响应;

$$\tilde{\mathbf{Y}}^0(k) = [\tilde{\mathbf{Y}}_1^0(k), \tilde{\mathbf{Y}}_2^0(k), \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_M^0(k)]^T,$$

这里的  $\tilde{\mathbf{Y}}_m^0(k) = [\tilde{y}_m^0(k+1|k), \dots, \tilde{y}_m^0(k+P|k)]$  是系统控制作用保持不变时的输出预测时序向量, 通过校正后的单步预测向量  $\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cor}}(k)$  移位获得, 有

$$\tilde{\mathbf{Y}}^0(k) = \mathbf{S}_{\text{cor}}\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cor}}(k), \quad (4)$$

$\mathbf{S}_{\text{cor}}$  为移位矩阵, 即

$$S_{\text{cor}} = \begin{bmatrix} S & 0 \\ & \ddots \\ 0 & S \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

控制过程中需要通过反馈校正补偿模型失配和不可测干扰等因素的影响.  $k$ 时刻控制作用施加后,可预测出对象在未来时刻的输出值. 在  $k+1$ 时刻,利用输出实测值  $\mathbf{y}(k+1)$  与  $k$ 时刻的预测值  $\tilde{\mathbf{y}}(k+1|k)$  构成输出误差向量

$$\mathbf{e}_{\text{ss}}(k+1) = \mathbf{y}(k+1) + \tilde{\mathbf{y}}(k+1|k). \quad (5)$$

进一步,利用误差向量  $\mathbf{e}_{\text{ss}}(k+1)$  得到校正后的输出预测向量

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cor}}(k+1) = \tilde{\mathbf{Y}}^1(k) + \mathbf{H}\mathbf{e}_{\text{ss}}(k+1). \quad (6)$$

其中:  $\tilde{\mathbf{Y}}^1(k)$  是基于  $\tilde{\mathbf{Y}}^0(k)$  产生的一步输出预测向量,  $\mathbf{H}$  是误差校正矩阵.

## 2 分散模糊推理及加权综合机制

### 2.1 分散模糊推理模块与推理单元

DFIPC控制系统的每一个分散模糊推理模块  $\text{DFIM}_m (m=1, 2, \dots, M)$  包含  $P$  个分散的模糊推理单元  $\text{DFIU}_p (p=1, 2, \dots, P)$ .

$\text{DFIU}_p$  根据预测偏差  $e_m(k+p)$  进行分散模糊推理, 确定为消除该偏差所需的模糊推理分量  $\Delta w_m(k+p)$ . 推理单元  $\text{DFIU}_p$  由模糊化、模糊推理规则及推理、解模糊化3个环节构成, 如图2所示. 其中  $e_m(k+p) = \bar{y}_m(k+p) - \tilde{y}_m(k+p|k)$ .

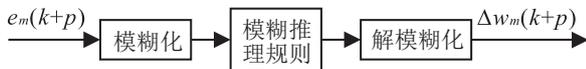


图2 模糊推理单元  $\text{DFIU}_p$

取  $e_m(k+p)$  和  $\Delta w_m(k+p)$  的模糊集论域为  $[-f_{e,m}, f_{e,m}]$  和  $[-f_{w,m}, f_{w,m}]$ , 并分别将其划分为7个模糊子集  $\{A_1, A_2, \dots, A_7\}$  和  $\{B_1, B_2, \dots, B_7\}$ . 各模糊子集元素所对应的语言值分别为NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大). 采用三角形隶属度函数确定模糊子集的隶属度  $\gamma_{A_r}[e_m(k+p)]$  和  $\gamma_{B_r}[\Delta w_m(k+p)]$ , 见图3和图4.

模糊推理单元  $\text{DFIU}_p$  的推理规则见表1. 推理过程遵循Mamdani最大-最小原理<sup>[16]</sup> 确定推理结果

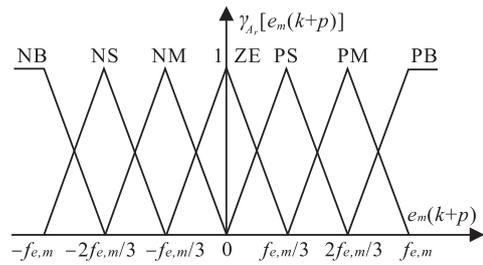


图3  $e_m(k+p)$  对于模糊子集  $A_r$  的隶属度

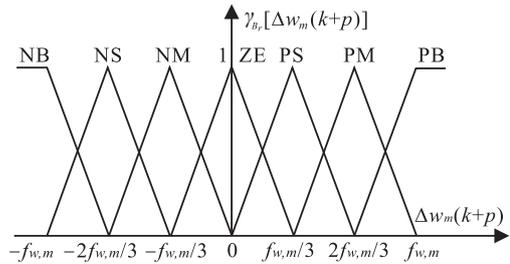


图4  $\Delta w_m(k+p)$  对于模糊子集  $B_r$  的隶属度

$\Delta w_m(k+p)$  在论域  $[-f_{w,m}, f_{w,m}]$  上的模糊集合  $B$ . 当预测偏差  $e_m(k+p)$  为  $e_m^*(k+p)$  时,  $\text{DFIU}_p$  输出变量  $\Delta w_m(k+p)$  的模糊集合由下式确定:

$$\gamma_B[\Delta w_m(k+p)] = \max_{r=1}^7 \{\min\{\gamma_{A_r}[e_m^*(k+p)], \gamma_{B_r}[\Delta w_m(k+p)]\}\}. \quad (7)$$

其中:  $e_m^*(k+p)$  和  $\Delta w_m(k+p)$  对应于模糊子集  $A_r$  和  $B_r$  的隶属度  $\gamma_{A_r}[e_m^*(k+p)]$  和  $\gamma_{B_r}[\Delta w_m(k+p)]$ , 分别通过图3和图4确定.

表1  $\text{DFIU}_p$  的模糊推理规则

$e_m(k+p)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$\Delta w_m(k+p)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

推理结果的模糊判决采用重心法<sup>[17]</sup>, 通过下式确定  $e_m^*(k+p)$  所对应的推理结果:

$$\Delta w_m^*(k+p) = \frac{\int_{-f_{w,m}}^{f_{w,m}} \gamma_B[\Delta w_m(k+p)] \Delta w_m(k+p) d\Delta w_m(k+p)}{\int_{-f_{w,m}}^{f_{w,m}} \gamma_B[\Delta w_m(k+p)] d\Delta w_m(k+p)}. \quad (8)$$

### 2.2 分散推理结果的时间加权综合

分散推理结果的时间加权综合的目的在于, 利用时间加权综合矩阵  $\Phi_m = [\varphi_{m,ij}]_{P \times P}$  对分散推理结果向量  $\Delta \mathbf{W}_m(k)$  进行时间加权综合, 产生与  $y_m$  对应的等效输入时间序列向量  $\Delta \hat{\mathbf{U}}_m(k)$ , 即

$$\Delta \hat{\mathbf{U}}_m(k) = \Phi_m \Delta \mathbf{W}_m(k). \quad (9)$$

其中

$$\Delta \hat{\mathbf{U}}_m(k) = [\Delta \hat{u}_m(k), \dots, \Delta \hat{u}_m(k+P-1)]^T,$$

$$\Delta \mathbf{W}_m(k) = [\Delta w_m(k+1), \dots, \Delta w_m(k+P)]^T.$$

时间加权矩阵  $\Phi_m$  中的加权系数  $\varphi_{m,ij}$  表征了  $k+i$  时刻的等效输入  $\Delta \hat{u}_m(k+i)$  对于  $y_m(k+j)$  的影响程度 ( $i = 0, 1, \dots, P-1, j = 1, 2, \dots, P$ ).

利用 DFIP<sub>p</sub> 进行分散式推理确定推理分量  $\Delta w_m(k+p)$  时, 仅考虑了输出  $y_m$  在  $k+p$  时刻的预测偏差  $e_m(k+p)$ . 实际上,  $k+p$  时刻的输入对该时刻之后的输出均有影响. 以  $k$  时刻为例, 在确定等效输入  $\Delta \hat{u}_m(k)$  时, 必须综合考虑基于  $k$  时刻之后预测偏差获得的所有分散模糊推理结果  $\Delta w_m(k+p)$  ( $p = 1, 2, \dots, P$ ); 同理, 在确定后续时刻的等效输入时, 依此类推.

在预测时域  $P$  内, 输入  $\Delta u_n(k)$  对输出  $y_m(k+p)$  的影响能够利用对象的单位阶跃响应  $a_{mn}(p)$  完全表征. 因此, 控制输入  $\Delta u_n(k+i)$  对输出  $y_m(k+j)$  的影响程度可以通过下式定义的阶跃响应增量  $\Delta a_{mn}(j, i)$  确定:

$$\Delta a_{mn}(j, i) = \begin{cases} a_{mn}(j-i) - a_{mn}(j-i-1), & i < j; \\ 0, & i \geq j. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $i = 0, 1, \dots, P-1, j = 1, 2, \dots, P$ .

此外, 前述的等效输入时序向量  $\Delta \hat{U}_m(k)$  反映了为消除输出  $y_m$  的偏差应该施加给系统的等效输入时序增量, 其元素  $\Delta \hat{u}_m(k+i)$  表示在  $k+i$  时刻系统输入  $u_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 叠加的等效作用. 因此, 在确定  $\Delta \hat{U}_m(k)$  时, 需要综合考虑系统  $N$  个输入对输出  $y_m$  影响的叠加作用.

基于上述考虑, 本文根据控制对象的单位阶跃响应构造时间加权综合矩阵  $\Phi_m$  中的时间加权系数  $\varphi_{m,ij}$ , 即

$$\varphi_{m,ij} = \Delta \hat{a}_m(j, i) / \sum_{p=1}^P \hat{a}_m(p), \quad i = 0, 1, \dots, P-1, j = 1, 2, \dots, P. \quad (11)$$

其中:  $\hat{a}_m(p) = \sum_{n=1}^N a_{mn}(p)$ , 反映系统  $N$  个输入对输出  $y_m$  影响的叠加作用;  $\Delta \hat{a}_m(j, i)$  代表  $y_m(k+j)$  对于等效输入  $\Delta \hat{u}_m(k+i)$  的阶跃响应增量, 参照式(10), 由下式确定:

$$\Delta \hat{a}_m(j, i) = \begin{cases} \hat{a}_m(j-i) - \hat{a}_m(j-i-1), & i < j; \\ 0, & i \geq j. \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)可见,  $\sum_{i=1, j=1}^P \varphi_{m,ij} = 1$ , 即时间加权系

数  $\varphi_{m,ij}$  满足归一化条件.

### 2.3 等效输入时序向量的多变量加权综合

通过时序分散模糊推理结果  $\Delta \mathbf{W}_m(k)$  的时间加权综合, 在仅考虑  $y_m$  预测偏差的前提下, 获得与  $y_m$  对应的等效输入时序向量  $\Delta \hat{U}_m(k)$ .

实际上, 系统的每一个输出  $y_m$  的响应均是系统的  $N$  个输入共同作用的结果. 本文通过建立多变量加权综合矩阵  $\Psi = [\Psi_{n,m}]_{N \times M}$ , 根据系统输入  $u_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 对各输出响应的耦合影响关系, 对等效输入时序增量向量  $\Delta \hat{U}_m(k)$  进行综合协调, 根据下式确定系统当前时刻  $N$  个输入的时序控制增量矩阵:

$$\Delta \mathbf{U}(k) = \Psi [\Delta \hat{U}_1(k), \Delta \hat{U}_2(k), \dots, \Delta \hat{U}_M(k)]^T. \quad (13)$$

多变量加权综合矩阵  $\Psi$  中权值系数  $\Psi_{n,m}$  表征第  $n$  个输入变化对被控输出  $y_m$  的耦合影响程度. 具体地, 本文利用  $y_m$  对  $u_n$  在整个预测时域  $P$  的单位阶跃响应  $a_{mn}(P)$ , 确定归一化的多变量加权综合系数  $\Psi_{n,m}$ , 有

$$\Psi_{n,m} = a_{mn}(P) / \sum_{m=1}^M |a_{mn}(P)|. \quad (14)$$

## 3 仿真实验及讨论

分别以二输入二输出 ( $2 \times 2$ )、二输入三输出 ( $2 \times 3$ ) 和三输入二输出 ( $3 \times 2$ ) 的精馏塔模型为控制对象, 通过仿真实验验证本文方法的有效性及其适应性.

### 3.1 $2 \times 2$ 系统的 DFIP<sub>C</sub> 控制仿真

#### 3.1.1 设定值跟踪及扰动实验

以  $2 \times 2$  的 Wood-Berry 精馏塔经验模型<sup>[18]</sup> 为控制对象, 考察 DFIP<sub>C</sub> 方法的跟踪性能和扰动抑制能力. 控制对象传递函数为

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21.0s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3.3e^{-8s}}{14.9s+1} \\ \frac{4.9e^{-3s}}{13.2s+1} \end{bmatrix} d(s). \quad (15)$$

其中:  $y_1$  和  $y_2$  分别为精馏塔塔顶和塔釜的甲醇浓度;  $u_1$  为塔顶馏出物回流流量,  $u_2$  为塔釜通往再沸器的蒸汽流量; 扰动项  $d$  为原料液流量波动量.

仿真实验中, 控制器参数设置为: 预测时域  $P = 15$ , 预测偏差模糊集论域  $f_{e,1} = f_{e,2} = 2$ , 推理分量模糊论域  $f_{w,1} = 0.36, f_{w,2} = 0.80$ .

初始时刻, 输出  $y_1$  和  $y_2$  的给定值分别产生单位阶跃, 并于  $t = 150$  s 时向系统施加幅值  $d = 0.1$  的阶

跃扰动,扰动持续时间为100 s.控制系统的输出响应曲线如图5所示.

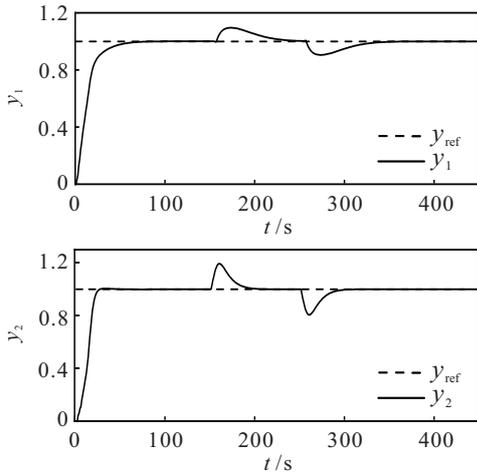


图5 设定值跟踪及扰动实验输出响应

由图5可以看出:当系统各输出的参考值发生变化时,控制系统能够快速响应,实现有效跟踪,调节过程中未出现明显超调;控制系统能够克服外部扰动的影响,实现无偏控制.

### 3.1.2 模型失配仿真实验

为进一步验证本文方法对控制对象模型失配的适应能力,以前述Wood-Berry精馏塔模型为仿真对象进行模型失配实验(不考虑扰动项).假设被控对象的特性发生改变,其传递函数矩阵<sup>[19]</sup>由式(15)变化为

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{15.36e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-2.5s}}{21.0s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{8.72s+1} & \frac{-23.28e^{-3s}}{18.72s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

实验过程中,保持阶跃响应预测模型和控制器参数不变.分别在 $t = 0\text{ s}$ 和 $200\text{ s}$ 时两个输出的设定值产生单位阶跃.

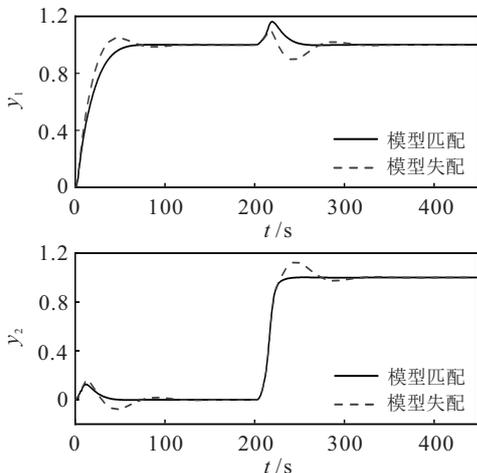


图6 对象模型匹配/失配时的输出变化过程

模型失配前后系统输出响应曲线如图6所示.由图6可以看出,当实际对象模型与控制器设计工况不匹配时,DFIPC控制系统各输出响应曲线的超调量和控制过程调节时间较模型匹配时有所增加,但仍能实现对设定值的完全跟踪,控制效果并未出现严重恶化.说明本文提出的方法对模型失配具有一定的适应能力.

### 3.2 非方MIMO系统的DFIPC控制仿真

实际过程中普遍存在输入变量与输出变量数目不相等的非方MIMO系统.非方系统包含胖系统和瘦系统.前者输入变量多于输出变量,后者输入变量少于输出变量.非方系统具有典型的超定(胖系统)或不定(瘦系统)特征,相对于方系统,非方系统控制尚面临许多困难<sup>[20]</sup>.目前,对于非方系统控制的主要处理方法是增加或移除变量将其近似转化为方系统进行控制.分别以Shell重油催化裂化分馏塔 $2 \times 3$ 和 $3 \times 2$  MIMO系统为控制对象,检验本文方法应用于非方系统的控制效果.

$2 \times 3$ 瘦系统归一化模型<sup>[21]</sup>为

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s+1} \\ \frac{4.38e^{-20s}}{33s+1} & \frac{4.42e^{-22s}}{44s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1.20e^{-27s}}{45s+1} \\ \frac{1.52e^{-15s}}{25s+1} \\ \frac{1.14}{27s+1} \end{bmatrix} d(s). \quad (17)$$

该系统输出为分馏塔顶部拔出产品成分 $y_1$ ,侧线拔出产品成分 $y_2$ 及塔底部回流液温度 $y_3$ ;系统的输入分别为顶部产品采出率 $u_1$ 和侧线产品采出率 $u_2$ ;扰动 $d$ 为分馏塔中间部分的回流热负荷.模型中各传递函数的一阶惯性时间常数及纯延迟时间的单位均为min,呈现出明显的延迟和惯性特征.

仿真实验过程中,取预测时域 $P = 100$ ,模糊集论域取值 $f_{e,1} = f_{e,2} = f_{e,3} = 5; f_{w,1} = 3.2, f_{w,2} = 2.0, f_{w,3} = 2.4$ .参照文献<sup>[22]</sup>,假设初始时刻系统3个输出的期望值分别阶跃增加0.5、0.5和0.4175.同时,当 $t = 500\text{ min}$ 时,向系统施加幅值为 $d = 0.1$ 的阶跃扰动;扰动作用在 $t = 1000\text{ min}$ 时消失.控制效果如图7所示.

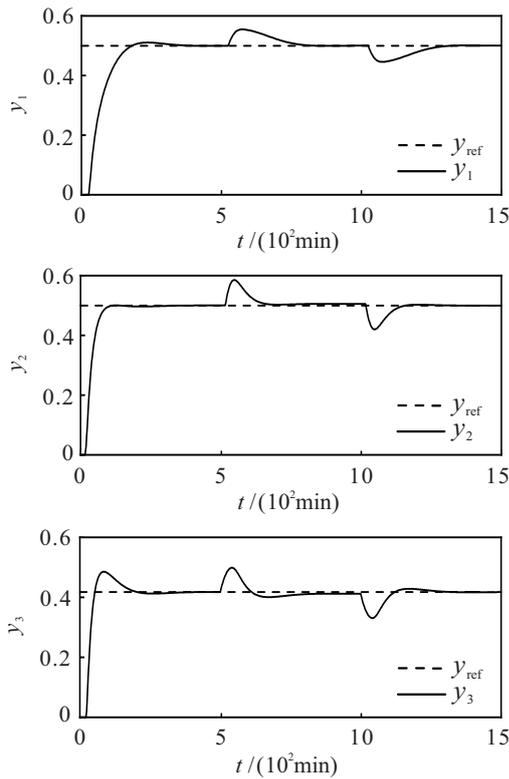


图 7 2×3瘦系统设定值跟踪及扰动实验输出响应  
3×2胖系统归一化模型<sup>[22]</sup>为

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4.05e^{-27s}}{50s+1} & \frac{1.77e^{-28s}}{60s+1} & \frac{5.88e^{-27s}}{50s+1} \\ \frac{5.39e^{-18s}}{50s+1} & \frac{5.72e^{-14s}}{60s+1} & \frac{6.90e^{-15s}}{40s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ u_3(s) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中  $u_3$  为分流器底部回流热负荷。

仿真实验中预测时域仍取  $P = 100$ , 模糊集论域  $f_{e,1} = f_{e,2} = 5; f_{w,1} = 1.2, f_{w,2} = 4.1$ . 控制系统输出  $y_1$  和  $y_2$  的单位阶跃响应如图 8 所示。

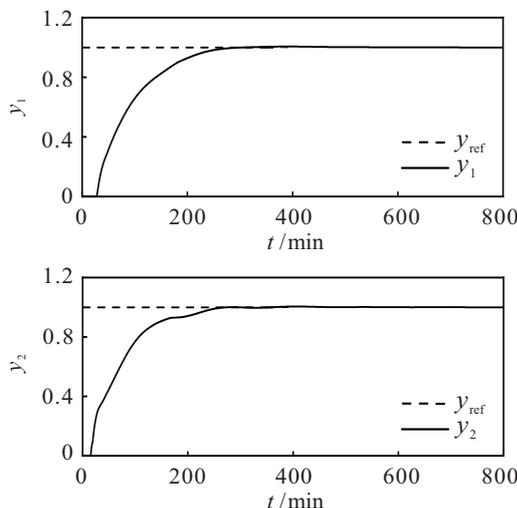


图 8 3×2胖系统设定值跟踪实验输出响应

由图 7 和图 8 可以看出: 对于输入个数少于输出的瘦系统, 本文控制策略能够保证所有输出均跟随各自的设定值变化, 且无稳态偏差, 控制系统对于外部扰动也具有较好的抑制效果; 对于输入个数多于输出的胖系统, 控制系统也表现出良好的设定值跟踪性能. 由此可见, 本文方法对于非方 MIMO 系统具有良好的适应能力。

### 4 结 论

本文针对 MIMO 控制对象, 提出了一种基于分散模糊推理的预测控制 (DFIPC) 方法。

DFIPC 通过构造分散模糊推理结构, 分别根据系统各个输出在未来时刻的预测值与期望值的偏差进行分散式的模糊推理, 并通过推理结果双重加权综合, 产生系统的控制输入, 克服了模糊控制应用于 MIMO 对象控制时难以建立模糊规则的困难; 引入未来时刻的偏差参与推理决策, 提高了模糊控制对控制对象延迟和惯性的处理能力。

仿真结果表明, 本文方法对于具有延迟和惯性特点的控制对象能够实现有效控制, 且对于非方 MIMO 系统也具有较好的适应性。

### 参考文献 (References)

- [1] Liao Q F, Cai W J, Li S Y, et al. Interaction analysis and loop pairing for MIMO processes described by T-S fuzzy models[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2012, 207: 64-76.
- [2] Gao Y K, Zeng D L, Ping B Y, et al. Research on coordinated control system of drum boiler units considering energy demand decoupling[J]. Control Engineering Practice, 2020, 102: 104562.
- [3] Thompson R, Dexter A. A fuzzy decision-making approach to temperature control in air-conditioning systems[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(6): 689-698.
- [4] Hong L L, Wang W, Liu X, et al. Modeling of multi-variable fuzzy systems by semi-tensor product[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 28(2): 228-235.
- [5] 王广军, 沈曙光, 彭晓艳. 延迟系统的一种模糊增量控制方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 93-96.  
(Wang G J, Shen S G, Peng X Y. A fuzzy increment control method of delay system and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 93-96.)
- [6] 葛爱冬, 王玉振, 魏爱荣, 等. 多变量模糊系统控制设计及其在并行混合动力汽车中的应用[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(8): 998-1004.  
(Ge A D, Wang Y Z, Wei A R, et al. Control design for multi-variable fuzzy systems with application to parallel hybrid electric vehicles[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(8): 998-1004.)

- [7] Lin J, Lian R J. Hybrid fuzzy-logic and neural-network controller for MIMO systems[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(6): 972-986.
- [8] 朱丽娜, 王广军, 沈曙光. 基于分散推理结构的加热炉钢坯温度分布模糊控制[J]. *控制与决策*, 2009, 24(9): 1425-1428.  
(Zhu L N, Wang G J, Shen S G. Fuzzy control method based on decentralized reasoning structure for billet temperature distribution[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(9): 1425-1428.)
- [9] Wang G J, Lv C, Chen H, et al. Predictive control of superheated steam temperature based on decentralized fuzzy inference[C]. *The 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Guilin, 2018: 1505-1509.
- [10] Mayne D Q. Model predictive control: Recent developments and future promise[J]. *Automatica*, 2014, 50(12): 2967-2986.
- [11] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(7): 733-764.
- [12] Darby M L, Nikolaou M. MPC: Current practice and challenges[J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(4): 328-342.
- [13] 刘建帮, 孙威, 张宪霞, 等. 多变量预测控制工程应用的控制模型前馈解耦策略[J]. *控制与决策*, 2019, 34(5): 1094-1102.  
(Liu J B, Sun W, Zhang X X, et al. A feedforward decoupling strategy based on control model for the engineering application of multi-variable predictive control[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(5): 1094-1102.)
- [14] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 222-236.  
(Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control—Status and challenges[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 222-236.)
- [15] Wu H, Yan F, Wang G J, et al. A predictive control based on decentralized fuzzy inference for a pH neutralization process[J]. *Journal of Process Control*, 2022, 110: 76-83.
- [16] Sargolzaei J, Khoshnoodi M, Saghatoleslami N, et al. Fuzzy inference system to modeling of crossflow milk ultrafiltration[J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(1): 456-465.
- [17] Van Broekhoven E, De Baets B. Fast and accurate center of gravity defuzzification of fuzzy system outputs defined on trapezoidal fuzzy partitions[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, 157(7): 904-918.
- [18] Li L J, Lu L H, Huang Z, et al. A model mismatch assessment method of MPC by decussation[J]. *ISA Transactions*, 2020, 106: 51-60.
- [19] Wang S Y, Simkoff J M, Baldea M, et al. Autocovariance-based plant-model mismatch estimation for linear model predictive control[J]. *Systems & Control Letters*, 2017, 104: 5-14.
- [20] 栾小丽, 王志强, 刘飞. 多变量非方系统集中式PI控制器设计[J]. *控制与决策*, 2016, 31(5): 811-816.  
(Luan X L, Wang Z Q, Liu F. Centralized PI control for multivariable non-square systems[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 811-816.)
- [21] Godoy J L, Ferramosca A, González A H. Economic performance assessment and monitoring in LP-DMC type controller applications[J]. *Journal of Process Control*, 2017, 57: 26-37.
- [22] 邹涛, 李海强, 丁宝苍, 等. 多变量预测控制系统稳态解的相容性与唯一性分析[J]. *自动化学报*, 2013, 39(5): 519-529.  
(Zou T, Li H Q, Ding B C, et al. Compatibility and uniqueness analyses of steady state solution for multi-variable predictive control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 519-529.)

### 作者简介

冯泽(1997—), 男, 硕士生, 从事多输入多输出系统预测控制的研究, E-mail: 202010021081t@cqu.edu.cn;

陈红(1970—), 女, 副教授, 博士, 从事热力系统动态特性、热工过程控制等研究, E-mail: chenh@cqu.edu.cn;

王广军(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事热力系统动态特性、热工过程控制等研究, E-mail: wangguangjun@cqu.edu.cn.