

文章编号: 1000-8152(2003)04-0607-05

## 基于相平面轨迹特征的规则自调整模糊控制方法

张吉礼<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>2</sup>, 于达仁<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;  
3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 通过对模糊控制系统相平面响应轨迹特性的分析, 提出了相平面响应轨迹实时特征向量和实时特征向量夹角的概念; 在分析实时特征向量夹角特性的基础上, 提出基于相平面响应轨迹特征的规则自调整模糊控制方法; 仿真结果表明, 该方法可以减小模糊控制系统的超调和过渡过程, 提高系统的收敛速度。

**关键词:** 相平面; 响应轨迹; 实时特征向量; 实时特征向量夹角; 规则自调整

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Method of rule self-tuning fuzzy control based on trajectory performance of phase plane

ZHANG Ji-li<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>2</sup>, YU Da-ren<sup>3</sup>

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China;  
2. School of Civil Engineering & Architecture, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150090, China;  
3. School of Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Heilongjiang Harbin 150001, China)

**Abstract:** The phase plane has already been an important method to design the fuzzy control system and analyze its stability. The concepts of the responding trajectory real-time characteristic vectors and the angles between the real-time characteristic vectors on the phase plane were put forward by analyzing the responding trajectory performance on the phase plane of the fuzzy control system. The method of rule self-tuning fuzzy control based on the responding trajectory performance on the phase plane was presented and the characteristics of the angles between the real-time characteristic vectors were discussed. The simulation results show that the method is capable of increasing the ability to identify and describe the controlled system in small error, reducing the overshoot, rising time greatly and improving the convergence speed of the fuzzy control system, possessed of a simply arithmetic and does not require much storage space and calculating time, and easy to perform.

**Key words:** phase plane; responding trajectory; real-time characteristic vector; angle between the real-time characteristic vectors; rule self-tuning

### 1 前言 (Introduction)

在模糊控制器的设计中, 相平面法是被广泛采用的模糊控制系统稳定性分析方法. 1991 年, 顾树生和平方首先给出了模糊控制系统稳定性分析的相平面法<sup>[1]</sup>, 1995 年, Yi 和 Chung 基于相平面实现了一类模糊控制器的系统化设计和稳定性分析<sup>[2]</sup>. 同时, 相平面法还可以直观地根据控制系统相平面响应轨迹特性, 通过调整偏差、偏差变化和控制量的大小, 来提高系统的控制性能. 1994 年, Huang 和 Nelson 利用相平面分析模糊控制器的动态响应过程, 提

出了模糊控制初始规则的修正方法, 经过规则修正后, 成功地消除了振荡和极限环, 大大缩短了模糊控制系统的收敛时间, 经过仿真分析后, 该方法被用于空调系统模糊控制之中<sup>[3,4]</sup>. 1999 年, Huang 和 Nelson 又利用相平面分析法提出了自调整模糊控制器<sup>[5]</sup>, 他们首先根据控制系统在相平面上的响应轨迹, 将相平面分成若干区域, 使系统的响应轨迹分布在不同区域中; 然后给出控制系统由起点到目标点的理想响应轨迹, 并在其上确定若干参考点; 最后利用实际控制响应轨迹到不同区域参考点的距离来调

收稿日期: 2001-10-08; 收修改稿日期: 2002-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金(59908001); 中国博士后科学基金(LR299004); 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金(HITMD200030)资助项目.

整模糊控制规则,使得模糊控制器按理想的响应轨迹工作.仿真和试验结果表明,该方法具有较好的控制性能,但从其设计和调整过程可知,该方法设计和计算过程复杂,规则的修正将消耗大量的机时和存储空间.针对文[5]中所存在的不足,首先提出了模糊控制系统相平面响应轨迹特征向量的概念,进而提出了基于相平面响应轨迹特征的规则自调整模糊控制方法<sup>[6]</sup>,仿真结果表明,该方法较 Huang 和 Nelson 的工作计算简便,不要求较大的存储空间,且具有较好的控制效果.

## 2 模糊控制系统相平面响应轨迹特性及实时特征向量 (Responding trajectory performance on phase plane and real-time characteristic vectors of fuzzy control system)

设某模糊控制系统如图 1 所示,其中,  $T$  为采样周期;  $s, r$  为设定值;  $\Delta u$  为控制器输出;  $y$  为被控过程输出.被控过程的数学模型如式(1)所示,各变量的隶属函数如图 2 所示,模糊控制规则如表 1 所示( $A_i, B_j$  和  $C_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 7)$  分别为偏差  $e$ 、偏差变化  $ec$  和控制量  $\Delta u$  的模糊子集).图 3 为该系统相平面响应轨迹,其中,  $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为系统在不同时刻的采样值,即响应轨迹;  $R$  为系统超调点;  $O$  为目标点.

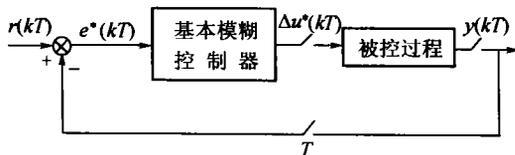


图 1 模糊控制系统模型

Fig. 1 Fuzzy control system model

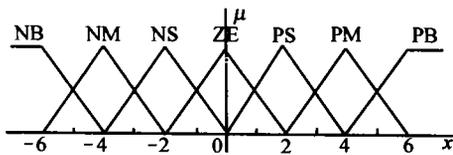


图 2 三角形隶属函数

Fig. 2 Triangle membership function

表 1 模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules

$A_i$	$B_j$							$C_{ij}$
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	
NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	
PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB	

$$HG(s) = \frac{1 - e^{-5s}}{(20s + 1)s} e^{-2s} \quad (1)$$

由图 3 可以看出,系统以  $(e, ec) = (-3, 0)$  为起点,以  $S_i$  为示踪轨迹,先后经相平面的第二( $e < 0, ec > 0$ )、第一( $e > 0, ec > 0$ )、第四( $e > 0, ec < 0$ )和第三象限( $e < 0, ec < 0$ ),沿螺旋线收敛于目标点  $O(0, 0)$ .当系统在第二象限由起点以较大的速度逼近设定值( $e = 0$ )后,由于此时系统仍存在较大的惯性( $ec \approx 1.9$ ),使系统在第一象限中越来越偏离目标点  $O$ ,最后达到超调点  $R$ .尽管系统在第四象限能够尽快逼近设定值,但在目标点附近,系统仍存在一定的滞回现象.可见,在系统收敛于目标点的整个过程中,系统由第二象限进入第一象限的控制十分重要,提前控制或加大控制强度是减小系统超调和滞回特性的有效途径,本文主要通过加大系统控制强度的方法来改善系统的控制性能.

在图 3 中,设  $S_i$  为当前时刻系统响应,  $S_{i-1}$  为前一时刻系统响应,则  $\overline{S_{i-1}S_i}$  即为控制系统相平面响应轨迹实时示踪向量.显然,向量  $\overline{S_{i-1}S_i}$  的起点、终点和方向是实时变化的,  $\overline{S_{i-1}S_i}$  表征了控制系统当前所处的位置 and 变化方向,反映了控制系统的实时响应特性.

同样,以  $S_i$  为起点,以目标点  $O$  为终点,则向量  $\overline{S_iO}$  即为控制系统相平面响应轨迹实时目标向量,  $\overline{S_iO}$  表征了控制系统相对于控制目标的实时位置和方向.

实时示踪向量和实时目标向量统称为控制系统相平面响应轨迹实时特征向量.

控制系统相平面响应轨迹实时示踪向量  $\overline{S_{i-1}S_i}$  和实时目标向量  $\overline{S_iO}$  之间的夹角称为控制系统相平面响应轨迹实时特征向量夹角,用  $\alpha_i$  表示.  $\alpha_i$  的大小表征了当前控制系统状态变化方向偏离还是偏向目标点,也反映了控制系统前后两次调节作用的大小.

在图 3 所示的相平面上,  $\alpha_i$  是向量  $\overline{S_{i-1}S_i}$  和  $\overline{S_iO}$  的夹角,  $S_{i-1}, S_i$  和  $O$  点的坐标为  $(e_{i-1}, ec_{i-1}), (e_i, ec_i)$  和  $(e_0, ec_0)$ , 则

实时示踪向量为

$$\overline{S_{i-1}S_i} = \{e_i - e_{i-1}, ec_i - ec_{i-1}\} \quad (2)$$

实时目标向量为

$$\overline{S_iO} = \{e_0 - e_i, ec_0 - ec_i\} \quad (3)$$

实时特征向量夹角为

$$\alpha_i = \arccos \left( \frac{\overline{S_{i-1}S_i} \cdot \overline{S_iO}}{|\overline{S_{i-1}S_i}| |\overline{S_iO}|} \right). \quad (4)$$

由式(2)~(4)即可计算出  $\alpha_i$ .

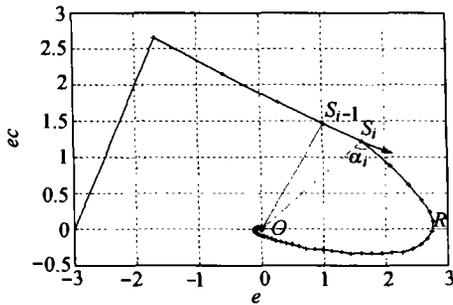


图3 某系统相平面响应轨迹

Fig. 3 Responding trajectory on the phase plane of some fuzzy control system

### 3 模糊控制系统实时特征向量夹角特性分析 (Characteristic analysis of angles between real-time characteristic vectors of fuzzy control system)

图1所示的模糊控制系统的相平面响应轨迹特征向量如图4所示,系统具有纯滞后特性,  $S_1, S_2$  和  $S_3$  点重合. 由图4可知,当  $\alpha_i > 90^\circ$  时,控制系统状态响应  $S_i$  越来越偏离目标点  $O$ , 这时,应加大控制强度; 当  $\alpha_i < 90^\circ$  时,控制系统状态响应  $S_i$  越来越偏向目标点  $O$ , 这时,既可保持原控制强度不变,也可适当加大控制强度; 当  $\alpha_i = 90^\circ$  时,即  $\overline{S_{i-1}S_i} \perp \overline{S_iO}$ , 这时控制系统状态响应  $S_i$  将围绕目标点  $O$  做圆周运动,应加大控制强度.

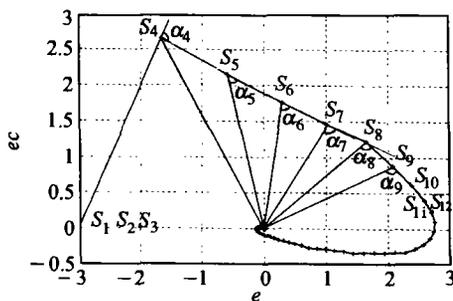


图4 模糊控制相平面响应轨迹特征向量图

Fig. 4 Responding trajectory performance vectors on the phase plane of the fuzzy control system

以  $90^\circ$  为基准, 设实时特征向量夹角相对于该基准的偏差为  $\Delta\alpha_i$ , 即

$$\Delta\alpha_i = \alpha_i - 90^\circ. \quad (5)$$

设  $\alpha_{i-1}$  为前一次实时特征向量夹角, 则相邻两

时刻实时特征向量夹角的差为实时特征向量夹角的偏差变化, 记作  $\Delta^2\alpha_i$ , 即

$$\Delta^2\alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}. \quad (6)$$

图4中实时特征向量夹角的  $\Delta\alpha_i, \Delta^2\alpha_i$  及系统状态响应特性如表2所示, 其中,  $k$  为仿真次数.

由表2可知,  $\Delta\alpha_i$  表征了控制系统状态响应远离或趋近目标点的状态,  $\Delta^2\alpha_i$  表征了控制系统状态响应远离或趋近目标点的趋势, 即

当  $\Delta\alpha_i > 0$  时, 系统远离目标点, 应加大控制强度;

当  $\Delta\alpha_i < 0$  时, 系统趋近目标点, 根据  $\Delta\alpha_i$  的大小, 适当调整控制强度.

当  $\Delta^2\alpha_i > 0$  时, 系统有远离目标点的趋势, 应加大控制强度;

当  $\Delta^2\alpha_i < 0$  时, 系统有趋近目标点的趋势, 根据  $\Delta^2\alpha_i$  的大小, 可适当调整控制强度.

表2 实时特征向量夹角及其变化值

Table 2 The angles between the real-time characteristic vectors and their changes

$k$	$\Delta\alpha_i$	$\Delta^2\alpha_i$	系统状态
1	$0^\circ$	$0^\circ$	起点
2	$0^\circ$	$0^\circ$	起点
3	$0^\circ$	$0^\circ$	起点
4	$31.2^\circ$	$121.2^\circ$	远离目标点
5	$-40.3^\circ$	$-71.5^\circ$	趋近目标点
6	$-14.4^\circ$	$25.8^\circ$	趋近目标点
7	$12.4^\circ$	$26.9^\circ$	远离目标点
8	$32.1^\circ$	$19.7^\circ$	远离目标点
9	$28.8^\circ$	$-3.3^\circ$	远离目标点
10	$34.1^\circ$	$5.3^\circ$	远离目标点
11	$34.7^\circ$	$0.64^\circ$	远离目标点
12	$30.8^\circ$	$-3.9^\circ$	远离目标点
13	$20.8^\circ$	$-9.9^\circ$	远离目标点
14	$-4.9^\circ$	$-25.7^\circ$	趋近目标点
15	$-29.1^\circ$	$-24.2^\circ$	趋近目标点
16	$-47.7^\circ$	$-18.6^\circ$	趋近目标点

### 4 模糊控制规则后件模糊修正方法 (Fuzzy method to modify the consequence of the fuzzy control rules)

设实时特征向量夹角的偏差  $\Delta\alpha_i$  和偏差变化  $\Delta^2\alpha_i$  的论域均为  $[-30^\circ, 30^\circ]$ , 其模糊分割为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ , 其隶属函数如图5所示. 设规则后件模糊等级的修正值为  $\epsilon$ , 论域为  $[-3,$

3],其模糊分割为{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB},隶属函数如图6所示。

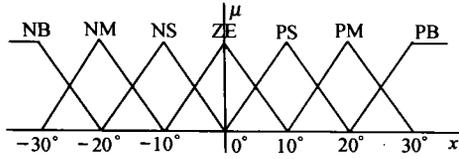


图5  $\Delta\alpha_i$  和  $\Delta^2\alpha_i$  的隶属函数

Fig. 5 Membership function of  $\Delta\alpha_i$  and  $\Delta^2\alpha_i$

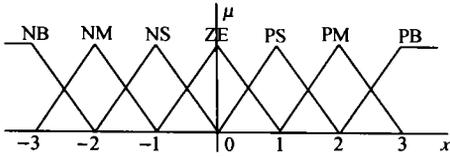


图6 后件模糊等级修正值隶属函数

Fig. 6 Membership function of the modified variable for the consequence

根据实际控制要求,规则后件模糊等级仅朝着增大的方向进行修正,不朝着减小的方向修正,则规则后件模糊等级的修正值  $\epsilon \in [0,3]$ ,当  $\epsilon = 0$  时,不修正;由于规则后件模糊等级和偏差、偏差变化的符号相反,于是,原模糊控制规则后件修正方法如表3所示。

这样,根据  $\Delta\alpha_i, \Delta^2\alpha_i$  和表3即可得到不同时刻规则后件模糊等级修正值  $\epsilon$  的大小,由此修正原来模糊推理的结果  $\Delta u$ ,从而实现模糊控制规则的自调整过程。

表3 初始规则后件修正值  $\epsilon$  调节表

Table 3 Adjusting table of the modified variable  $\epsilon$  of the initial rule consequence

$\Delta\alpha_i$	$\Delta^2\alpha_i$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NM
NM	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM
NS	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM	NM
ZE	ZE	NS	NS	NM	NM	NM	NB
PS	NS	NS	NM	NM	NM	NB	NB
PM	NS	NM	NM	NM	NB	NB	NB
PB	NM	NM	NM	NB	NB	NB	NB

### 5 基于相平面轨迹特征的规则自调整模糊控制方法 (Method of rule self-tuning fuzzy control based on trajectory performance on phase plane)

以作用模糊子集推理 (functioning-fuzzy-subset inference, FFSI) 方法<sup>[7]</sup>为基础,以式(1)为被控对象,以表1为原始控制规则,以表3为修正规则,在图1的基础上,增加性能评价、规则调节器、规则修正模块构成规则自调整模糊控制器,如图7所示。以式(7)所示的 ITAE 指标评价模糊控制的性能。在仿真过程中,  $e$  和  $ec$  的量化因子分别为3和6,  $\Delta u$  的比例因子为 1/30。规则自调整模糊控制和基本作用模糊子集推理法的模糊控制结果如图8和图9所示。

$$ITAE = \sum_{k=0}^n |e(kT)| \cdot kT \cdot T. \quad (7)$$

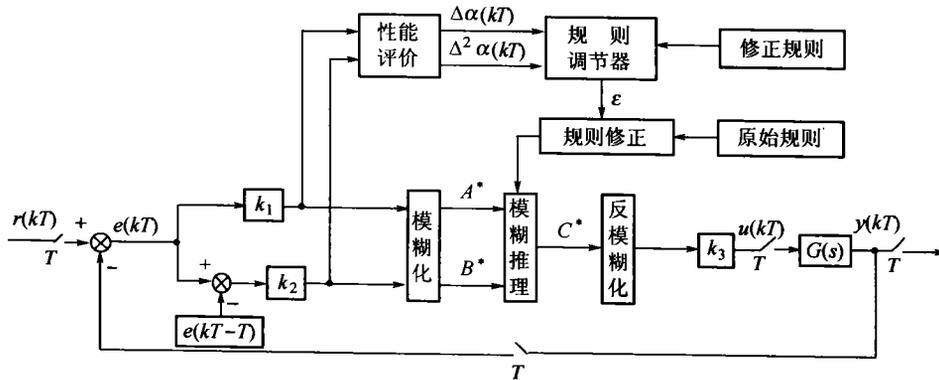


图7 规则自调整模糊控制器

Fig. 7 Rule self-tuning fuzzy controller

在图8中,  $Y_{adj}$  和  $Y_{FFSI}$  分别为规则自调整和基本作用模糊子集推理的模糊控制结果,  $Y_p$  为系统单位阶跃响应;在图9中,  $(e_{adj}, ec_{adj})$  和  $(e_{FFSI}, ec_{FFSI})$  分别为规则自调整和基本作用模糊子集推理的模糊控制

下系统的偏差和偏差变化。由图8可知,规则调整后的超调明显减小,约为原来的一半,且过渡期也减小;由图9可知,控制系统约在第6步仿真时,系统响应轨迹明显偏向目标点,使超调减小、收敛速度加快。

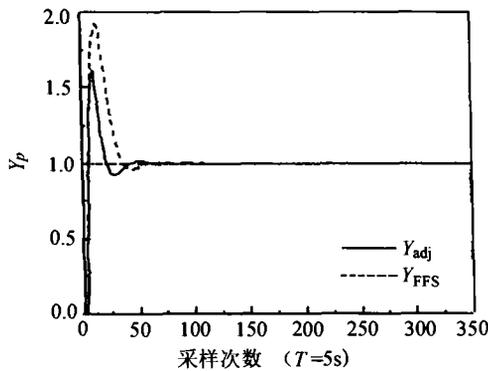


图8 模糊控制仿真结果

Fig. 8 Results of the fuzzy control in simulation

规则自调整模糊控制的 ITAE 指标为  $0.576 \times 10^3$ , 基本作用模糊子集推理模糊控制 ITAE 指标为  $1.450 \times 10^3$ , 可见, 规则调整后, ITAE 指标约减小为原来的三分之一。

另外, 在实现过程中, 规则自调整模糊控制仅比基本的模糊控制多计算式(2)~(6), 多存储表 3, 因此, 不需多消耗多少机时和存储空间。

## 6 结论(Conclusions)

本文以模糊控制系统相平面响应轨迹为研究对象, 提出了相平面响应轨迹特征向量的概念, 给出了基于相平面响应轨迹特征的规则自调整模糊控制方法。通过仿真研究, 可以得到以下结论。

1) 控制系统相平面响应轨迹特征向量能够充分地描述模糊控制系统的动态和静态特性, 特别是以实时特征向量夹角的偏差及其偏差变化来描述控制系统的动静态特性, 大大提高了控制系统在小偏差下分辨能力, 便于实现控制;

2) 基于相平面响应轨迹特征的规则自调整模糊控制方法, 可以成倍地降低控制系统的 ITAE 指标, 减小超调和过渡过程, 提高控制系统的收敛速度;

3) 基于相平面响应轨迹特征的规则自调整模糊控制方法, 算法简单, 易于实现, 不需多消耗多少机时和存储空间。

## 参考文献(References):

- [1] 顾树生, 平力. 模糊控制系统稳定性分析及控制器设计[J]. 控制与决策, 1991, 6(3): 178 - 183.  
(GU Shusheng, LI Ping. Stability analysis and controller design of the fuzzy control systems [J]. *Control and Decision*, 1991, 6(3): 178 - 183.)
- [2] YI S Y, CHUNG M J. Systematic design and stability analysis of a

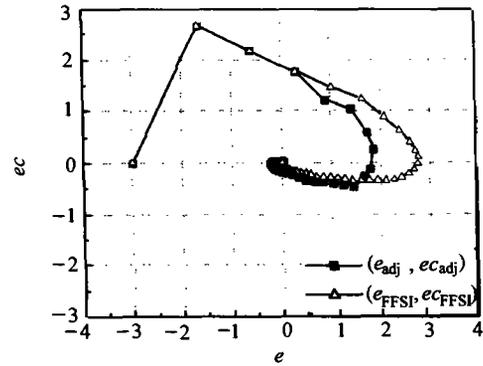


图9 模糊控制相平面轨迹

Fig. 9 Phase plane trajectory of the fuzzy control

fuzzy logic controller [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, 72(3): 271 - 298.

- [3] HUANG S, NELSON R M. Rule development and adjustment strategies of a fuzzy logic controller for an HVAC system: Part one - analysis [J]. *American Society of Heating, Refrigeration, Air-conditioning Engineers Trans*, 1994, 100(1): 841 - 850.
- [4] HUANG S, NELSON R M. Rule development and adjustment strategies of a fuzzy logic controller for an HVAC system: Part two - experiment [J]. *American Society of Heating, Refrigeration, Air-conditioning Engineers Trans*, 1994, 100(1): 851 - 856.
- [5] HUANG S, NELSON R M. Development of a self-tuning fuzzy logic controller [J]. *ASHRAE Trans research*, 1999, 105(1): 206 - 213.
- [6] 张吉礼. 空调机组模糊控制理论与技术开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.  
(ZHANG Jili. *Study on fuzzy control theory and development of intelligent control AHU* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.)
- [7] 欧进萍, 张吉礼. 作用模糊子集推理方法的研究与应用[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(3): 58 - 65.  
(OU Jinping, ZHANG Jili. Study and application on the method of functioning-fuzzy - subset inference [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2000, 14(3): 58 - 65.)

## 作者简介:

张吉礼 (1969 -), 男, 哈尔滨工业大学工程力学博士, 哈尔滨工业大学动力工程与工程热物理博士后, 现工作于哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 副教授, 副院长。一直从事模糊-神经网络控制、单片机智能控制系统开发和空调制冷系统控制与仿真的研究工作, 发表相关论文 20 余篇。目前感兴趣的领域有智能控制, 空调制冷等。  
E-mail: zhangjili@0451.com;

欧进萍 (1959 -), 男, 哈尔滨工业大学工程力学博士, 现于哈尔滨工业大学土木工程学院工作, 教授, 博士生导师, 副校长。发表学术论文 160 余篇, 曾获省部级科技进步一等奖 2 项。目前感兴趣的领域为结构振动与控制、结构损伤与监测以及结构可靠性理论与应用等。

于达仁 (1966 -), 男, 哈尔滨工业大学控制理论与控制工程博士, 现于哈尔滨工业大学能源科学与工程学院工作, 教授, 博士生导师, 副院长。发表学术论文 120 余篇, 曾获中国青年科技奖。目前感兴趣的领域为动力工程控制与仿真, 动力机械故障诊断等。