文章编号:1000-8152(2010)04-0457-09

环境试验室热工系统规则自提取模糊控制仿真

张吉礼¹,赵天怡¹,卢 振¹,刘 辉²

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 北京西门子西伯乐斯电子有限公司, 北京 100085)

摘要: 以某环境试验室室内温度、送风系统和热水系统多回路在线控制为背景, 针对其存在的多参数、大滞后、非线性等控制难题, 讨论了各个回路热工特性传递函数建立和自组织模糊控制仿真问题. 首先, 提出了规则自提取模糊控制(self-abstracting rules fuzzy control, SARFC)方法. 然后, 根据各被控回路的动态热工特性和参数辨识要求, 试验研究了各回路的动态响应特性, 完成了各回路传递函数模型参数的辨识, 得到了各回路的传递函数模型. 最后, 采用SARFC方法, 仿真研究了基于送风系统调节和热水系统调节的环境试验室温度模糊控制仿真, 得到了较好的控制仿真效果, 为进一步试验研究环境试验室热工系统模糊控制提供了理论基础.

关键词:环境试验室;试验;参数识别;规则自提取模糊控制;控制仿真

中图分类号: TK323 文献标识码: A

Self-abstracting-rule fuzzy control simulation of a real environment chamber system

ZHANG Ji-li¹, ZHAO Tian-yi¹, LU Zhen¹, LIU Hui²

School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
 Beijing Siemens Cerberus Electronics Limited, Beijing 100085, China)

Abstract: This paper discusses the transfer-function modeling of the thermal processes and the self-organizing fuzzy control for the indoor-air temperature control, the supply-air system control and the hot-water system control in a multivariable real environment-chamber system with multi-parameters and large time delays and nonlinearities. Firstly, a self-abstracting-rule fuzzy control(SARFC) method is presented. Then, based on the experimental data from each controlled loop, the involved transfer functions are identified. Third, by properly selecting the order for each transfer function through comparison, we obtained a set of desired transfer functions. Finally, by means of SARFC method, simulations are carried out for the fuzzy control of the supply-air system and the hot-water system. The transfer functions and the control-simulation investigations provide a theoretical basis for further experimental study on fuzzy control for the artificial environment chamber system.

Key words: built environment chamber; experiment; parameter identification; self-abstracting rules fuzzy control; control simulation

1 引言(Introduction)

人工环境试验室是进行建筑通风空调系统及其 设备热工性能试验和检测的关键实验系统,图1所 示的低温热水散热器热工性能试验台由环境测试 室、墙壁送风冷却系统、热水系统、制冷系统和测 控系统构成^[1].环境测试室平面图如图2所示,尺 寸为3976 mm ×3976 mm ×2800 mm,钢制围护结 构,外设保温层,内设矩形风道均匀送风,送风量 约11000 m³/h. 如图3所示,送风系统设有蒸发器和 电加热器,通过调节电加热器控制送风温度,以维持测试室温度稳定.热水系统原理图如图4所示,测试过程中,要求高位水箱供水温度、散热器进口热水温度保持稳定.

在图1所示的试验系统中,测试室温度、高位水 箱供水温度和散热器进口水温是关键的控制目标, 根据温度控制要求,有表1所示的两类系统、5个控 制回路,不同的控制回路具有不同的动态热工特性, 特别是滞后特性.

收稿日期: 2008-12-01; 收修改稿日期: 2009-07-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578049);"十一五"国家科技支撑计划资助课题(2006BAJ01A09, 2008BAJ12B05).



图 1 低温热水散热器热工性能试验台

Fig. 1 Test-bed of low temperature hot water radiator system



¹⁻测试至 2-控制至 3- 取然器 4- 墙壁风道 5-风管 6-保温层 7-温度传感器 8- 检测设备

图 2 测试室平面图

Fig. 2 Real environment chamber diagram



图 3 风系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of air system



Fig. 4 Schematic diagram of water system

	Table 1 Collitor	100p3 01 1031-000 01 103	w temperature not water radiator sys	
回路编号	回路名称	ζ	回路调节方式与滞后特性	所属系统类型
LP-1 LP-2	送风电加热器与送,送风电加热器与室	风温度控制回路 内温度控制回路	通过调节电加热器来控制送风温度, 滞后时间小 通过调节电加热器来控制室内温度, 滞后时间较LP-1大	送风系统
LP-3	热水电加热器与高位	位水箱供水温度控制回路	通过调节电加热器来控制供水温度, 滞后时间小	
LP-4	热水电加热器与散	热器进口温度控制回路	通过调节电加热器来控制进口水温(管路存在热损失),滞后时间较LP-3大	热水系统
LP-5	热水电加热器与室内温度控制回路		通过调节电加热器来控制室内温度, 滞后时间较LP-4大	

表1 低温热水散热器热工性能试验台控制回路及特性 Table 1 Control loops of test-bed of low temperature hot water radiator system

由表1可知,低温热水散热器热工性能试验台 是典型的多输入多输出、大滞后热工系统,该实验 系统现有的PID控制结果表明,对于滞后特性较小 的控制回路可以实现较好的控制效果,但对于大 滞后回路则很难取得了较好的控制效果,而模糊 控制,特别是自组织模糊控制则是一种有效的控 制措施^[1].同时,采用试验的方法研究该类热工系 统的模糊控制方法具有重要的理论和实用价值. 模糊控制规则是保证模糊控制具有较高控制性能 的关键.Tobi和Hanfusa以通风空调系统的温湿度 作为输入,将加热器、表冷器及加湿器的控制阀作 为输出,建立了多输入多输出模糊控制规则模型, 研究了其模糊控制性能^[2]. Huang和Nelson研究了 由变风量空调系统、制冷系统和房间热力系统构 成的建筑热工系统模糊控制问题^[3,4],提出了以一 个中心点为对称设置的模糊规则模型建立方法, 仿真和试验证明了该模型建立方法的有效性;随 后又利用相平面分析法提出了规则模型自调整模 糊控制器^[5],实现了利用相平面上的参考轨迹来 调整模糊控制规则,仿真和试验结果表明,该方法 具有较好的控制性能. Nie等人在模糊控制器中引 入模糊竞争机构和重复学习控制算法^[6],在缺少 专家知识的情况下提出了基于径向基函数网络的 模糊控制规则自组织方法. 叶其革等也提出一种 具有结构和参数学习能力的自组织模糊神经网络 控制器设计方法^[7],无需事先确定模糊控制规则, 在控制过程中由神经网络在线产生模糊控制规 则、调整规则参数. Chen Shyi-Ming等使用遗传算 法从训练数据中提取模糊控制规则,并利用遗传 算法调整规则的前件和后件隶属函数^[8]. 上述模 糊控制规则的优化与自组织大大提高了模糊控制 的性能,但为满足实时控制的要求,一方面需要良 好的控制算法,另一方面也要求满足实时控制要 求,即模糊控制规则优化与自组织算法应简捷且 易于实现.本文首先提出了规则自提取模糊控制 方法,然后采用试验的方法,建立了环境试验室送

风系统和热水系统的传递函数模型,最后,采用规则自提取模糊控制方法完成了模糊控制仿真,为进一步的试验研究奠定了基础.

- 2 规则自提取模糊控制方法(Self-abstracting rules fuzzy control method)
- 2.1 控制器基本结构(Basic structure of controller) 图5为规则自提取模糊控制器基本结构,其中: T为采样周期; r为设定值; y为被控过程的输出; e*, ec*和u*分别为偏差、偏差变化和控制量的 精确量; A*, B*和C*分别为e*, ec*和u*的模糊量; Ke, Kec和Ku分别为e*, ec*和u*的量化因子和比 例因子, K'e, K'ec为规则自组织模块中的量化因子, K'u为比例因子, p(kT)为当前采样时刻规则的调 整量, ANN为被控过程的神经网络模型. 各模糊变 量可采用三角形隶属函数,如图6所示,其中, x为 精确量, A_i(x)为隶属函数.



图 5 规则自提取模糊控制器

Fig. 5 Structure of the SARFC



图 6 三角形隶属函数

模糊控制规则采用Mamdani型规则,如式(1)和表2所示.

if
$$x_1$$
 is A^i_{1,x_2} is A^i_{2,\cdots,x_n} is A^i_{n,x_1}
then y_1 is B^i . (1)

式中 $i = 1, 2, \dots, m, m$ 为控制规则总数. 表2为 初始模糊控制规则, $A_i \pi B_i$ 为输入模糊集, C_{ij} 为 输出模糊集, $i, j = 1, 2, \dots, n$; NB(negative big), NM(negative medium), NS(negative small), ZE(zero), PS(positive small), PM(positive medium), PB(positive big)为模糊等级.

表 2 模糊控制规则表 Table 2 Initial fuzzy control rule

				•						
A_i		B_j								
	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			

2.2 实现方法(Implementation method)

设被控对象的时滞时间为dT,即(k – d)T时 刻的控制作用在kT时刻才产生响应.因此,可根 据*kT*时刻系统响应大小,通过性能评价和校正规则表(如表3所示),实现对(*k*-*d*)*T*时刻的作用模糊控制规则进行校正,并将校正的结果写入模糊控制规则表,以使得系统在以后的控制过程按校正后的规则工作.

表 3 规则自组织模块的校正规则表

 Table 3
 Calibration rule table of self-organizing module

00	е								
ec	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB		
NB	-6	-6	-4	-4	-2	-2	0		
NM	-6	-4	-4	-2	-2	0	2		
NS	-4	-4	-2	-2	0	2	2		
ZE	-4	-2	-2	0	2	2	4		
PS	-2	-2	0	2	2	4	4		
PM	-2	0	2	2	4	4	6		
PB	0	2	2	4	4	6	6		

 (k - d)T时刻作用模糊控制规则的判定.
 设e*((k - d)T)及ec*((k - d)T)是(k - d)T时刻的 偏差和偏差变化,根据作用模糊子集推理方法^[9],确 定作用模糊控制规则.

2) (k – d)T时刻作用模糊控制规则后件校正量的确定.由图5可知,根据被控过程在当前时刻的输出和参考输入,求出该时刻的偏差和偏差变化,将其送入规则自组织模块,根据表3所示的校正规则表,利用作用模糊子集推理方法,得出(k-d)T时刻作用模糊控制规则后件的调整量,记为ΔC_{ii}((k-d)T).

3) (k - d)T时刻作用模糊控制规则后件的校正. 根据表2和 $C_{ij}((k - d)T)$ 则可实现对(k - d)T时刻作用模糊控制规则后件的校正,校正后的规则称为(k + 1)T时刻的作用规则,即

 $C_{ij}((k+1)T) = C_{ij}((k-d)T) + \Delta C_{ij}((k-d)T).$ (2)

3 送风系统传递函数模型的辨识(Identification of transfer function in air supply system)

3.1 传递函数模型(Transfer function model)

测试室墙壁为2 mm厚钢板,可不考虑墙体的蓄 热性;设室内温度和风道空气温度均匀分布.根据线 性系统理论,在辨识送风系统对室内温度影响的传 递函数时不考虑热水系统的影响.根据能量守恒定 律和拉氏变换原理,可得测试室温度和送风平均温



其中: θ_{Room} , θ_{aver} 和 \bar{Q}_{Ea} 分别为测试室温度、送风平 均温度和电加热器功率的拉氏变换值; Q_{Ea} 为送风 系统电加热器加热功率, kW; m_{r} 为室内容积的空 气质量, kg; m_{a} 为某时刻墙壁送风系统内空气总质 量, kg; C_{pa} 为空气定压比热, kJ/(kg·C); θ_{Room} 为测 试室温度, °C; $T\theta_{\text{aver}}$ 为墙壁内送风平均温度, 取送 风和回风温度平均值, °C; K_{a} 为围护结构传热系数, W/(m²·°C); F_{a} 为围护结构换热面积, m².

式(3)即为以送风电加热器加热功率为输入、以 送风平均温度为输出(LP-1回路)的传递函数模型; 式(4)为以送风电加热器加热功率为输入、以室内温 度为输出(LP-2回路)的传递函数模型.从形式看,这 两个回路均为2阶系统.这里将采用试验的方法来确 定传递函数的具体参数.

 3.2 送风平均温度(LP-1回路)传递函数参数辨 识(Parameter identification of transfer function in average supply air temperature control) 式(3)的差分形式为

 $T_{\text{aver}}(kT) = a_1 T_{\text{aver}}(kT - T) + a_2 T_{\text{aver}}(kT - 2T) + b_1 Q_{\text{Ea}}(kT - T) + b_2 Q_{\text{Ea}}(kT - 2T).$ (5)

其中: *a*₁, *a*₂, *b*₁, *b*₂为差分方程的系数.

根据参数辨识要求,试验采样周期取10 s,每个 采样周期内电加热器开启2 s,即以20%的额定功率 加热送风.热水系统在试验时始终处于关闭状态.试 验值如图7和图8中所示,根据该试验结果得

$$\frac{\theta_{\text{aver}}(z)}{\bar{Q}_{\text{Ea}}(z)} = \frac{0.02629z}{z^2 - 0.6382z - 0.36}.$$
 (6)

图7给出了式(6)计算结果和试验结果的比较,同时还给出了3阶模型的输出,可见,送风平均温度用2阶传递函数表示即可.





3.3 测试室温度(LP-2回路)传递函数参数辨

识(Parameter identification of transfer function

in indoor air temperature control)

试验发现,测试室温度对送风电加热器的滞后 时间为260 s. 由于电加热功率为阶跃型输入信号, 并在试验期间保持不变,因此可以先辨识不含滞 后环节的LP-2回路的传递函数模型,则有

$$\frac{\theta_{\text{Room}}(z)}{\bar{Q}_{\text{Ea}}(z)} = \frac{0.174z}{z^2 - 0.766z - 0.2252}.$$
(7)

根据测试室温度对送风电加热器的滞后时间 和采样周期大小,考虑滞后环节后,则测试室温度 对送风电加热器的离散传递函数为

$$\frac{\theta_{\text{Room}}(z)}{\bar{Q}_{\text{Ea}}(z)} = \frac{0.174z^{-25}}{z^2 - 0.766z - 0.2252}.$$
(8)

式(8)的输出与测量数据的比较如图8所示,模型输出与实测数据的最大绝对值误差为0.265 ℃.





- 4 热水系统传递函数模型辨识(Identification of transfer function in hot water system)
- 4.1 高位水箱供水温度(LP-3回路)传递函数辨识(Parameter identification of transfer function in supply water temperature control)

试验采样周期为8 s, 采样周期内电加热器以 100%的额定功率加热供水, 关闭送风系统. 采 用LP-1回路传递函数模型辨识方法, 则高位水 箱供水温度对热水电加热器输入功率的传递函 数(LP-3回路)为

$$\frac{\theta_{\text{Water}}(z)}{\bar{Q}_{\text{Ew}}(z)} = \frac{0.02821z}{z^2 - 0.5904z - 0.4059}.$$
(9)

其中: θ_{Water} 和 \bar{Q}_{Ew} 分别为供水温度和热水电加热器功率的拉氏变换值.

图9为式(9)的输出与试验结果的比较.如图9所 示,高位水箱供水温度对热水电加热器输入功率 的辨识传递函数输出结果与试验结果非常接近, 2阶模型与3阶模型辨识精度基本一致.





Fig. 9 Identification results of *z*-transfer function of supply water temperature to electrical heating load

4.2 散热器进水温度(LP-4回路)传递函数辨 识(Parameter identification of transfer function in radiator inlet water temperature control)

试验确定散热器进水温度对高位水箱电加热的滞后时间.关闭送风系统,采样周期取4 s,高位水箱电加热器采用如图10所示的方波控制信号. 图10中, Ton为电加热器开启后散热器进水温度滞后时间,约150 s; Toff为电加热器关闭后散热器进水温度滞后时间,约224 s.综合6次试验结果,散热 器进水温度对热水电加热器的滞后时间取224 s.





传递函数参数辨识试验的采样周期为8 s, 电加 热器全开,关闭送风系统.不考虑滞后环节时散热 器进水温度对热水电加热的离散传递函数为

$$\frac{\theta_{\rm RIn}(z)}{\bar{Q}_{\rm Ew}(z)} = \frac{0.01144z}{z^2 - 1.412z + 0.4135}.$$
 (10)

其中 θ_{BIn} 为散热器进水温度拉氏变换值.

LP-4回路的滞后时间为224 s,则考虑滞后环 节的散热器进水温度对热水电加热的离散传递函 数(LP-4回路)为

$$\frac{\theta_{\rm RIn}(z)}{\bar{Q}_{\rm Ew}(z)} = \frac{0.01144z^{-27}}{z^2 - 1.412z + 0.4135}.$$
 (11)

散热器进水温度对电加热传递函数,以及测试 室温度对热水电加热传递函数的辨识模型与试验 结果的对比情况分别如图11和图12所示.







4.3 测试室温度(LP-5回路)传递函数辨识 (Parameter identification of transfer function in indoor air temperature control)

测试室温度对电加热器响应的滞后时间实测结果约420 s,则不含滞后环节的测试室温度对热水电加热的传递函数辨识结果为

$$\frac{\theta_{\text{Room}}(z)}{\bar{Q}_{\text{Ew}}(z)} = \frac{0.0009814z}{z^2 - 0.8326z - 0.1984}.$$
 (12)

考虑系统滞后环节的LP-5回路的离散传递函数为

$$\frac{\theta_{\text{Room}}(z)}{\bar{Q}_{\text{Ew}}(z)} = \frac{0.0009814z^{-4}}{z^2 - 0.8326z - 0.1984}.$$
 (13)

5 基于送风系统调节的测试室温度规则 自提取模糊控制仿真(SARFC simulation of chamber temperature control by regulating supply air system)

基于送风系统调节的测试室温度规则自提取 模糊控制系统如图13所示.制冷系统的制冷量和 散热器的散热量作为该过程测试室温度控制的扰 量,自组织模糊控制器依据测试室温度的偏差与 偏差变化,确定送风系统电加热器功率.

图14为测试室温度在对送风系统进行规则自 提取模糊控制时的仿真结果,表4为规则自提取后 得到的控制规则.由图14中可知,测试室温度缓慢 上升,控制过程基本没有超调;由表4可知,从调整 好的规则表可以看出在控制过程中仅有中心区域 的规则起作用.



0

图 13 基于送风系统调节的测试室温度规则自提取模糊控制系统结构图 Fig. 13 Schematic diagram of rule-self-organizing fuzzy control system of chamber temperature by regulating supply air temperature







仿真时,初始规则为零规则,校正规则见表3. 控制周期设为10 s;控制量实际论域为[0,+6]kW, 基本模糊控制器的偏差实际论域设为[-0.6, 0.6]℃, 偏差变化实际论域设为[-0.2, 0.2]℃; 规则 自组织模块中的偏差实际论域设为[-0.2, 0.2]℃; 规则 偏差变化实际论域设为[-0.2, 0.2] ℃; 控制调整量 实际论域设为[-0.1, +0.1] kW; 仿真时, 假定制冷 系统得制冷量为3 kW, 散热器得散热量为2.6 kW, 控制目标是使室温在初始值基础上升高1℃, 并稳 定在该值上.

6 基于热水系统调节的测试室温度自组织 模糊控制仿真(SARFC simulation of chamber temperature control by regulating hot water system)

在LP-3~LP-5回路中,LP-5回路的滞后时间 最大,故以LP-5回路为代表,采用规则自提取模 糊控制调节高位水箱电加热器来控制测试室温度. 其控制系统结构如图15所示.



图 15 基于热水系统调节的测试室温度规则自提取模糊控制系统结构图

Fig. 15 Schematic diagram of the SARFC of chamber temperature by regulating supply water temperature

初始规则为零规则,校正规则如表3所示;采样 周期为80 s;控制量实际论域为[0,6] kW;基本模 糊控制器的实际偏差论域为[-0.6, 0.6] ℃;实际 偏差变化论域为[-0.2, 0.2] ℃;规则自组织模块中 的实际偏差论域为[-0.6, 0.6];实际偏差变化论域 为[-0.2, 0.2] ℃;控制调整量实际论域为[-0.1, +0.1] kW. 仿真时送风系统施加-0.5 kW的干 扰(即制冷系统的冷量为3 kW,送风系统电加热 量为2.5 kW).控制目标是使测试室温度在初始值 基础上升高1 ℃,并维持稳定.图16为测试室温度 规则自提取模糊控制仿真结果,表5为规则自提取 后的控制规则表.

- 表 4 基于送风系统调节的测试室温度规则自提 取后的模糊控制规则表
 - Table 4Calibrated rule table by the SARFC of
chamber temperature by regulating sup-
ply air temperature

00	e								
ct	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB		
NB	0	0	0	0	0	0	0		
NM	0	0	0	0	0	0	0		
NS	0	0	-0.95	-1.42	-0.47	0	0		
ZE	0	0	0.88	0.73	-0.15	0	0		
PS	0	0	6	6	0.33	0	0		
PM	0	0	6	6	0	0	0		
PB	0	0	6	6	4.37	0	0		



图 16 基于热水系统调节的测试室温度规则自提取模糊 控制仿真结果

Fig. 16 Simulation result of the SARFC of chamber temperature by regulating supply water temperature

- 表5 基于热水系统调节的测试室温度规则自提 取后的模糊控制规则表
 - Table 5Calibrated rule table by the SARFC of
chamber temperature by regulating su-
pply water temperature

ac	e							
tt	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
NB	0	0	0	0	0	0	0	
NM	0	0	0	0	0	0	0	
NS	0	0	-4.2	-6	-3.68	0	0	
ZE	0	0	1.46	-0.75	-2.2	0	0	
PS	0	0	6	6	1.47	0	0	
PM	0	0	6	6	0	0	0	
PB	0	0	6	6	1.99	0	0	

由图16可知,基于热水系统调节的测试室温度 自组织模糊控制的室温缓慢,达到设定值后系统 超调较小,表明规则双阶段提取自组织模糊控制 方法对具有大滞后特性的LP-5回路控制效果较 好,适于大滞后系统的过程控制.

7 结论(Conclusions)

由环境测试室、送风系统、热水系统和制冷系 统构成的低温热水散热器热工性能试验台,是典 型的非线性、多变量、多滞后时间特性的热工系 统,提出了规则自提取模糊控制方法,通过对LP-1 ~LP-5回路传递函数试验建模、送风系统和热水 系统规则自提取模糊控制仿真,可以得到以下结 论.

 对于基于送风系统和热水系统调节的各回 路测试室温度响应传递函数,通过2阶和3阶模型 输出结果对比分析,2阶惯性系统模型即可满足上 述各回路动态热工特性的数学描述.

2) 在LP-1~LP-5回路中, LP-1回路(送风电加 热与送风温度控制回路)和LP-3回路(热水电加热 与高位水箱供水温度控制回路)为基本的2阶惯性 系统,在研究和控制时不用考虑滞后环节; LP-2 回路(送风电加热与室内温度控制回路)、LP-4 回路(热水电加热与散热器进口温度控制回路)和 了LP-5回路(热水电加热与室内温度控制回路)是 典型的含有滞后环节的2阶惯性系统,特别是LP-5 回路,滞后时间长达7分钟.

3) 以LP-2回路和LP-5回路为控制对象的规则自提取模糊控制仿真结果表明,对于规则自提 取模糊控制方法适用于大滞后热工过程的自动控制,且超调小、控制精度高;也进一步说明了,对于

得到满意的模糊控制规则和控制效果.

参考文献(References):

- 刘辉. 时滞热工过程自组织模糊控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
 (LIU Hui. Rules self-organizing fuzzy control method of time delay thermal systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.)
- [2] TOBI T, HANAFUSA T. A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 1991, 5(3): 331 – 348.
- [3] HUANG S, NELSON R M. Rule development and adjustment strategies of a fuzzy logic controller for an HVAC system: part oneanalysis[J]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Condition Engineerings Transactions, 1994, 100(2): 841 – 850.
- [4] HUANG S, NELSON R M. Rule development and adjustment strategies of a fuzzy logic controller for an HVAC system: part twoexperiment[J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(2): 851 – 856.
- [5] HUANG S, NELSON R M. Development of a self-tuning fuzzy logic controller[J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105(1): 206 – 213.
- [6] NIE J B, LINKENS D A. Learning control using fuzzified selforganizing radial basis function network[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(4): 281 – 287.

- [7] 叶其革, 吴捷. 一种自组织模糊神经网络控制器[J]. 控制与决策, 1998, 13(6): 694-698.
 (YE Qige, WU Jie. Self-organizing fuzzy neural networks controller[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(6): 694 – 698.)
- [8] CHEN S M, CHEN Y C. Automatically constructing membership functions and generating fuzzy rules using genetic algorithms[J]. *Cybernetics and Systems*, 2002, 33(8): 841 – 862.
- [9] 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 System and Mathematics*, 2000, 14(3): 58-65.)

作者简介:

张吉礼 (1969—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向 为空调制冷系统优化设计与智能监测控制、建筑节能、高性能太阳 能集热及建筑一体化等, E-mail: zhangjili@hit.edu.cn;

赵天怡 (1982—), 男, 博士, 正在做博士后研究工作, 主要研 究方向为建筑节能技术、暖通空调系统优化控制等, E-mail: sebastian.zhao@gmail.com;

卢 振 (1975—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为暖通空调系 统耗能设备能效诊断与智能控制、建筑节能等;

刘 辉 (1975—), 男, 博士, 工程师, 主要从事暖通空调系统及 制冷设备控制系统的开发工作.