

# 风机盘管空调系统智能控制方案的实验研究

李炎锋, 张 宁, 边 江

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 采用 MATLAB/Simulink 动态仿真模拟软件实现风机盘管空调系统智能控制, 通过开发数据交换接口 BAC Window 软件来实现智能控制系统与楼宇自动化系统 (Building Automation 简称 BA) 系统相结合, 开展了传统 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制方案应用于风机盘管空调系统的实验研究, 并从鲁棒性、静态特性、动态特性及经济性方面对控制效果进行对比分析. 研究表明: 数据交换接口软件能够有效地将智能控制方案引入 BA 系统; 模糊 PID 控制兼有模糊控制、传统 PID 控制两者的优点, 有利于改善实际工程中系统的控制品质并且在节能方面更具有优势.

**关键词:** 风机盘管; 智能控制; BA 系统; 优化控制

**中图分类号:** TU 83

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)05-0731-06

风机盘管布置灵活, 可以有效地利用建筑空间, 降低风机噪音. 风机盘管空调系统适合于个性化房间, 便于根据不同的要求灵活简便地调节达到节能目的. 在办公楼、宾馆、医院、商用住宅、科研单位、休闲娱乐等公共场所中大部分都采用风机盘管空调系统<sup>[1]</sup>. 目前, 最广泛应用风机盘管系统是双管式、风机三档调速、电动水阀通断控制的风机盘管系统. 传统的三档调速控制方法虽然具备一定的节能改进空间, 但风机盘管的优化控制不仅能提高空调控制精度, 而且是中央集中空调系统乃至建筑节能的重要实施手段<sup>[2-3]</sup>.

对风机盘管空调系统优化控制的研究, 目前主要集中于控制策略和风机盘管温控器两方面的研究. 廖凡宗<sup>[4]</sup>、田亮<sup>[5]</sup>、唐鑫<sup>[6]</sup>等提出将优化及反馈的思想引进逻辑推理过程之中完善模糊控制, 并且将模糊控制与传统 PID 控制相结合形成一种根据不同参数自动推理的一种新型模糊推理方法, 并将该方法用于控制空调房间温度. 仿真结果表明这种新型模糊推理方法在温度控制系统中具有良好的控制品质和较强的鲁棒性. 赵瑞军等<sup>[7]</sup>提出通过  $\alpha$  因子及 Ku 因子的自调整形成一种在规则上自适应的模糊控制器, 仿真结果表明这种自适应模糊控制器的控制效果比传统 PID 控制系统在控制系统的稳态精度、动态特性和鲁棒性三方面更有优势. 郭旭红等<sup>[8]</sup>提出将遗传算法引进空调模糊控制系统中, 实现输入变量隶属函数和控制规则能够协同自动寻找最优值, 结果表明这类控制系统实现了工作稳定、响应迅速、节能为基础的多目标优化的目的. 迟光亮<sup>[9]</sup>、赵天怡等<sup>[10-11]</sup>将占空比模糊控制方法引入风机盘管电动水阀的控制之中, 结果表明相比于传统控制, 该方法在取得良好控制效果的同时也比传统控制方法更节能.

上述研究多是基于仿真模拟及实验研究, 研究成果没有应用到实际工程中. 为了更好在实际工程应用中推行智能控制方案, 本文针对楼宇自动化控制系统 (Building Automation System, 以下简称 BA 系统) 广泛应用于风机盘管空调系统这一情况, 提出将智能控制与传统控制相结合. 即以建筑设备自动化控制系统 BAS 实测数据为基础, 借用 Simulink 模拟软件灵活搭建各种控制策略的优势, 设计一个数据交换端口搭建楼控系统模拟软件之间的桥梁, 将模糊控制器在 MATLAB 仿真中得到的实时数据, 读/写入楼控系统中支持 BACnet 协议的 AV/BV 点, 实现传统控制与智能控制的结合. 这样在 BA 系统的基础上进行相关研究, 无需增加任何硬件设备, 简单易行. 本文依托该实验台开展风机盘管空调系统的传统 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制特性的实验研究.

## 1 风机盘管空调系统智能实验台

### 1.1 智能控制实验台实验对象

风机盘管空调系统智能控制实验台是以北京工业大学建筑环境与设备工程实验室的实际空调系统为基础(如图 1 所示), 选取二楼办公室为实验对象, 包括 11 个空调房间, 建筑面积为 206.3 m<sup>2</sup>, 层高三层. 空调系统采用目前在中国应用最广泛的双管制、三档调速风机、电动二通水阀通断控制的风机盘管空调系统, 风机盘管使用上海 Seasons 富田空调冷冻设备有限公司生产的型号为 FTFP 系列的产品. 建筑物总冷负荷

为 22 970 W, 最大送风量为 6 266 m<sup>3</sup>/h. 考虑到尽量减少外部环境通过维护结果的对室内的影响, 选取 204 房间为研究对象. 该空调房间坐南朝北, 建筑面积为 10.23 m<sup>2</sup>(3.3 m×3.1 m), 风机盘管型号为 FTFP-34, 根据样本参数可知风机高、中、低三档送风量分别为 340 m<sup>3</sup>/h、260 m<sup>3</sup>/h、170 m<sup>3</sup>/h, 输入功率分别为 31 W、26 W、21 W. 房间最大冷负荷为 1 718.05 W, 最大冷负荷出现在 14:00.

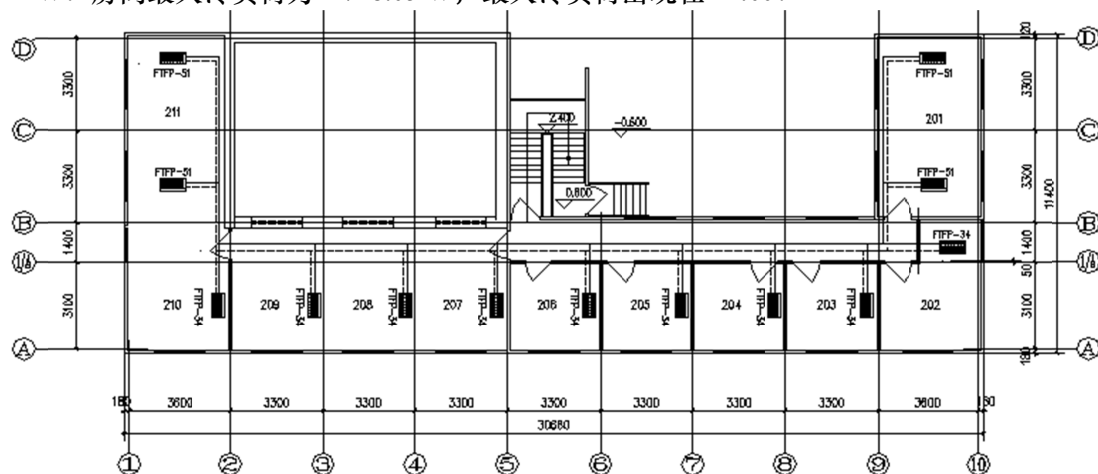


图1 建筑环境与设备工程实验室及空调系统

Fig.1 Laboratory and air conditioning system of building environment and facility engineering

## 1.2 智能控制实验台工作原理

图 2 给出了风机盘管空调智能控制实验台示意图. 智能控制实验台的基本结构可分为三部分, 第一部分是由 Alerton 楼宇自动化控制系统、Simulink 仿真模拟软件组成的控制系统, 第二部分是由 BAC Window 软件构成的数据交换系统, 第三部分是由空调房间 (其中包括风机盘管、室内散热设备、维护结构)、冷热源系统 (清华同方空气源热泵、循环水泵)、温度传感器、水阀及水阀执行器组成的外围设备系统.

Alerton 楼宇自动化控制系统通过室内温度传感器 Microset II 采集空调房间室内温度, 通过数据交换接口 BAC Window 实现 Alerton 与 Simulink 之间的数据交换; 将室内温度偏差及温度偏差变化率作为输入信号传输给模糊控制器, 模糊控制器将输入信号经过模糊化、模糊逻辑推理决策、反模糊化处理计算得出控制结果并传输给艾顿系统; Alerton 控制系统通过调整风机档位 (高档、中档、低档、停机), 以达到调节空调房间室内温度的目的.

数据交换系统是将智能控制方案引入 BA 系统的“桥梁”, 其中数据交换系统主要由 BAC Window 数据交换接口软件组成, 实际操作界面如图 3 所示. 数据交换接口 BAC Window 使用 Visual basic 语言编写程序, 将楼宇自动化控制系统中国化的 I/O 点通过 BACnet 的 AV/BV 点开放并以 EXCEL 表格形式存储, 便于 MATLAB 软件进行读写操作.

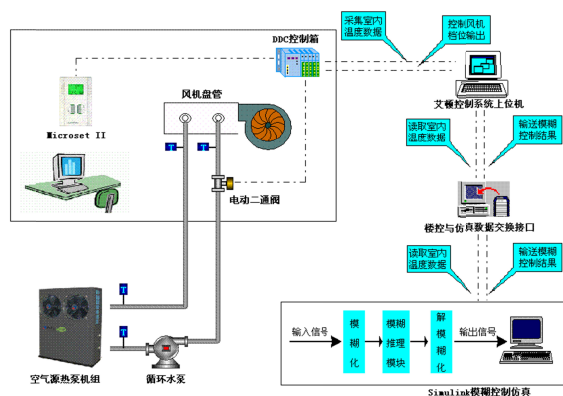


图2 智能控制实验台结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of Intelligence control experimental devices



图3 数据交换接口界面

Fig.3 Data exchange software interface

## 2 传统 PID 控制实验

### 2.1 传统 PID 控制程序设计

风机盘管空调系统智能控制实验台上采用传统 PID 控制 (比例-积分-微分控制), 算法[12]如下:

$$u(t) = K_p + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d (de(t)/dt) \quad (1)$$

式中： $u(t)$  为控制器输出； $K_p$  为比例系数； $K_i$  为积分系数； $K_d$  为微分系数； $e(t)$  为反馈信号与设定值之差。

图 4 给出了使用 Alerton 系统的 Visual Logic 编程工具搭建的传统 PID 控制策略.其中 PI 模块是 PI 控制器(比例系数  $KP=15$ ，积分系数  $KI=9$ ，SP 为空调房间室内设定温度，FB 为室内实测温度，AV-26 为控制器计算输出)。在传统 PID 控制系统中，温度传感器采集空调房间内的实际温度传输给 PID 控制器，PID 控制器根据实际温度与设定温度的偏差计算出风机的实际送风量 (AV-26)，调整风机档位以达到空气调节的目的。

2.2 传统 PID 控制实验结果及分析

选择 204 房间作为测试对象，通过优化分析确定传统 PID 的控制参数为：比例参数  $P=15$ ，积分参数  $I=9$ ；输入变量经过 PID 控制器的计算结果（即图 4 中 PI 模块的输出 AV-26 进行分区以对应风机的不同档位，区间 $[0,33]$ 、 $[33,50]$ 、 $[50,75]$ 、 $[75,100]$ 分别对应风机的停机、低档、中档、高档。通过分区来实现不同温度环境下自动调整风机档位，实现空调房间室内温度控制的目的。

图 5 给出了依据上述分区方法传统 PID 控制策略下的实验结果.由图 5 可知,204 房间初始温度为  $29.9^{\circ}\text{C}$ ，室外温度为  $30.9^{\circ}\text{C}$ ，室内设定温度为  $24.0^{\circ}\text{C}$ 。204 房间室内温度在实验期间温度波动范围为  $24\pm1^{\circ}\text{C}$ ，房间的类型属于办公室，满足舒适性空调的要求。在夜间室内温度波动范围为  $23.5\sim24.5^{\circ}\text{C}$ ，稳态偏差为  $\pm0.5^{\circ}\text{C}$ ，在白天办公时间(9:00AM-9:00PM)温度波动加大，室内温度与室外环境温度曲线变化趋势一致，说明在传统 PID 控制系统中，抵抗外界干扰尤其是室外环境温度因素的能力不强。

传统 PID 控制以控制系统精确数学模型为基础，但风机盘管空调系统具有时滞性、非线性、存在多种干扰因素等特点，使得传统 PID 控制在用于参数时变性较强的控制系统时表现出抵抗外界干扰能力不强的缺点<sup>[13-14]</sup>。本文提出采用智能控制策略来优化风机盘管空调控制系统的控制品质。

3 智能控制实验

模糊控制是基于专家的操作者的经验建立模糊控制模型模糊逻辑推理实现决策过程，因而不需要被控对象的精确数学模型。因此，有学者提出提出风机盘管占空比模糊控制方法并通过分析发现该方法可以使风机盘管能耗减少<sup>[9]</sup>。

3.1 模糊控制器设计

本文利用 MATLAB 的模糊逻辑工具箱(Fuzzy Logical Toolbox)建立模糊控制器，选择空调房间的温度偏差及偏差变化率作为模糊控制器的输入变量  $e$ 、 $c$ ，风机送风量作为模糊控制器的输出变量  $u$ ，因而本文中风机盘管空调控制系统的模糊控制器属于双输入、单输出的二维控制器。隶属函数选择三角形隶属函数，精确量的模糊化方法是就近取整法，模糊量的反模糊化方法采用 MIN-MAX-重心法，输入变量中的温度偏差论域  $m=6$ 、温度偏差变化率论

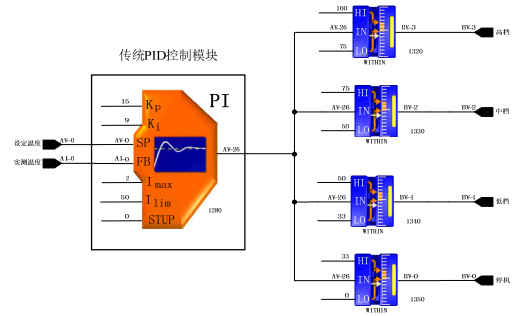


图 4 传统 PID 控制程序  
Fig.4 Classical PID control program

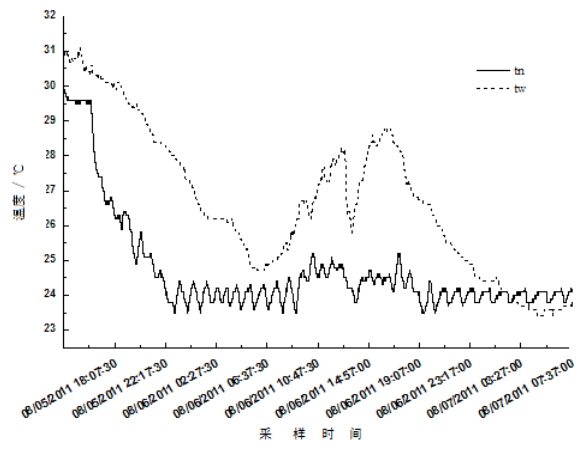


图 5 传统 PID 控制系统中的房  
间室内温度分布  
Fig.5 Indoor and outdoor temperature  
under classical PID control

e		cE(u)					
		NB	NM	NS	O	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	O
NM	PB	PB	PB	PB	PB	PM	O
NS	PM	PM	PM	PM	O	NS	NS
O	PM	PM	PS	O	NS	NM	NM
PS	PS	PS	O	NM	NM	NM	NM
PM	O	O	NM	NB	NB	NB	NB
PB	O	O	NM	NB	NB	NB	NB

域  $n=6$ , 输出变量控制量论域  $l=7$ , 选择七个词汇{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}作为描述变量的词集. 使用条件语言描述手动控制策略(如表 1 所示), 完成模糊控制器的控制规则设计<sup>[15]</sup>.

图 6 所示的模糊控制系统是将温度偏差及温度偏差变化率 Derivative 作为模糊控制器的输入信号, 通过模糊控制器(图 6 中设计的模糊控制器代替图 4 中的传统 PID 控制器模块)中的模糊规则逻辑判断决策出控制量, 调整风机档位来适应温度变化的控制系统, 控制算法采用的是模糊算法.

图 7 所示的模糊 PID 控制系统是将模糊控制与传统 PID 控制模式进行结合, 采用阈值区间在两种控制模式之间切换, 实现两种控制模式的优势整合.

3.2 风机盘管空调系统智能控制实验结果及分析

以风机盘管空调智能控制实验台为实验平台, 采用传统 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制三种控制策略进行实验研究. 测试对象为 204 房间, 室内设定温度为 24.5℃, 采集空调房间室内温度值如图 8 所示. 空调房间室内设定温度为 24.5℃, 整理采样数据得见表 2. 根据图 8 和表 2 的结果从分析稳定性、静态特性、动态特性、经济性四个方面分析不同风机盘管控制系统的特征:

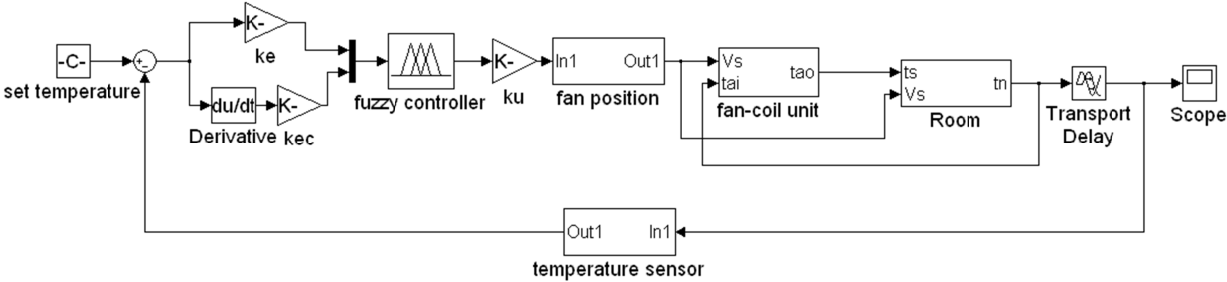


图 6 模糊控制系统仿真模型  
Fig.6 Simulation model of the fuzzy control system

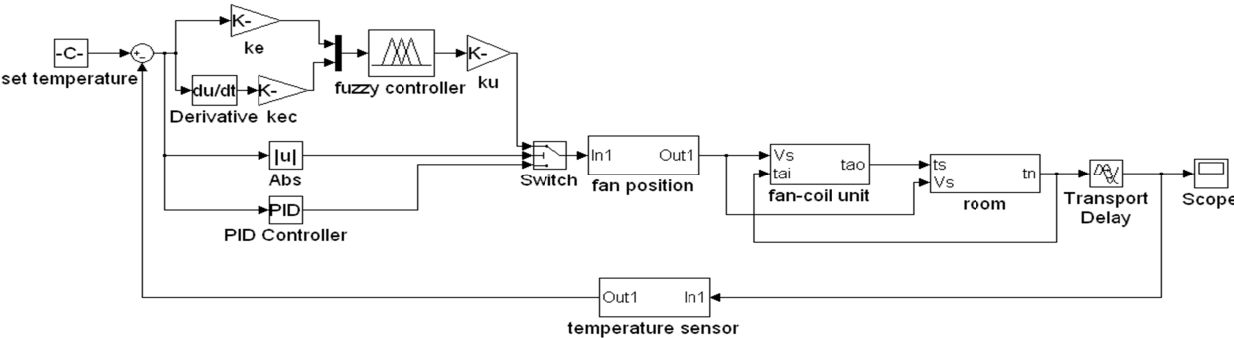


图 7 模糊 PID 控制系统仿真模型  
Fig.7 Simulation model of the Fuzzy-PID control system

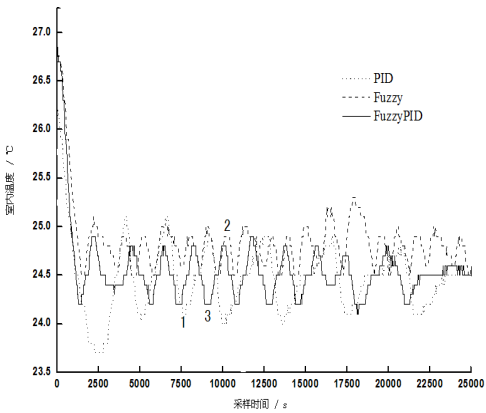


图 8 传统 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制系统中的室内温度对比  
Fig.8 Change curve of indoor temperature under different control models

表 2 传统 PID 控制、模糊控制、模糊 PID 控制系统的对比分析  
Tab.2 Comparative Analysis of the classical PID control, fuzzy control and fuzzy PID control

性能评价指标	传统 PID 控制	模糊控制	模糊 PID 控制
温度波动范围	24.0~25.0℃	24.5~24.8℃	24.2~24.8℃
温度偏差	上偏差为 0.5℃ 下偏差为 0.5℃	上偏差为 0.3℃ 下偏差为 0℃	上偏差为 0.3℃ 下偏差为 0.3℃
静态偏差	0	0.15	0
超调量/%	3.06	1.01	1.02
峰值时间/min	40	25	23
过渡时间/min	75	55	42
延迟时间/min	20.0	12.5	11.0
每小时耗电量 /10 <sup>-3</sup> kW.h	17.00	10.94	10.29

(1)稳定性: 从室内外温度变化趋势可知, 当空调房间存在外界干扰时, 模糊 PID 控制系统与模糊控制

系统比传统PID控制系统更能保持相对的稳定性及不变性,说明模糊PID控制与模糊控制抗干扰能力较强,具有较强的稳定性。

(2)静态特性:当空调房间室内设定温度为 $24.5^{\circ}\text{C}$ 时,传统PID控制系统的温度变化范围为 $24.0\sim 25.0^{\circ}\text{C}$ (温度偏差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ),模糊控制系统温度变化范围为 $24.5\%\sim 24.8^{\circ}\text{C}$ (上偏差为 $0.3^{\circ}\text{C}$ ,下偏差为 $0^{\circ}\text{C}$ ),模糊PID控制系统温度变化范围为 $24.2\sim 24.8^{\circ}\text{C}$ (温度偏差为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ )说明模糊控制存在一定的静态偏差,模糊PID控制系统消除了稳态偏差属于无差调节,而且控制精度较高。

(3)动态特性:传统PID控制的超调量分别为 $3.06\%$ ,模糊PID控制的超调量为 $1.02\%$ ,相比于传统PID减少了 $66.7\%$ 。同理分析,模糊PID控制的峰值时间缩短 $42.5\%$ ,过渡时间缩短 $44.0\%$ ,延迟时间缩短 $45.0\%$ ,说明相比于传统PID控制,模糊PID控制具有过渡时间短、超调量小、响应过程反应速度快的特点。

(4)经济性:根据风机档位运行时间统计结果可知传统PID控制系统中风机单位时间耗电量为 $17\text{ W}$ ,模糊控制系统中风机单位时间耗电量为 $10.18\sim 10.94\text{ W}$ 左右,模糊PID控制系统中风机单位时间耗电量为 $9.64\sim 10.29\text{ W}$ 左右。模糊PID控制的风机能耗相比于传统PID控制降低 $39.5\%\sim 43.3\%$ ,因此在保证风机档位分布合理的前提下,模糊PID控制系统相比于传统PID控制及模糊控制从风机耗电量这方面来说更为节能,更加经济。

## 4 结论

以北京工业大学建筑环境与设备工程系办公楼的风机盘管空调系统的实际工程为基础,通过所开发的数据交换系统,将传统控制与智能控制相结合引入BA系统搭建风机盘管空调智能控制实验台,对传统PID控制、模糊控制、模糊PID控制三种控制方案的效果进行实验研究。研究结果表明:

(1)搭建的风机盘管空调系统智能控制实验台,由BAC Window数据交换接口软件构成的数据交换系统,能实现智能控制与BA系统两者的无缝结合,无需增加任何硬件设施,简单易行,能为工程实践提供重要平台。

(2)在保证风机档位分布合理的前提下,模糊PID控制系统相比于传统PID控制及模糊控制从风机耗电量这方面来说更为节能,更加经济。模糊PID控制集合模糊控制、传统PID控制两者的优点,适用于风机盘管空调系统这种时变性强、非线性、多干扰的复杂控制系统,有利于改善实际工程中控制系统的控制品质并且在节能方面更具有优势。

## 参考文献 References

- [1] 韩璐. 干盘管加独立新风空调系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
HAN Lu. The study on the fan-coil unit with fresh air system on dry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [2] ZHAO Kang, LIU Xiaohua, ZHANG Tao, et al. Performance of temperature and humidity independent control air-conditioning system in an office building[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8):1895-1903.
- [3] ESCRIVA' G, Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(11):2258-2267
- [4] 廖凡宗. 模糊PID参数自整定技术及其在中央空调系统中的应用[J]. 智能建筑行业应用, 2006(10): 131-138.  
LIAO Zongfan. The Fuzzy-PID control technique of parameter auto-tuning based on self-learning and its application in central air conditioner system[J]. Intelligent building industry application, 2006(10):131-138.
- [5] 牟永欣. 基于最优模糊PID温度控制方法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(5): 195-197.  
MOU Yongxin. Temperature control based on optimal Fuzzy-PID[J]. Computer Simulation, 2009,26(5):195-197.
- [6] 唐鑫, 左为恒, 李昌春. 中央空调房间温度智能PID控制的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(5):140-144.  
TANG Xin, ZUO Weiheng, LI Changchun. Emulation of Intelligent PID Controller in Temperature of Central Air-conditioning system Computer Simulation, 2010, 27(5): 140-144.
- [7] 赵瑞军, 王先来. 模糊-PID控制器在空调温度控制中的应用[J]. 计算机仿真, 2006, 23(11): 311-313.  
ZHAO Ruijun, WANG Xianlai. Application of Fuzzy-PID control in central air-conditioning system[J]. Computer Simulation, 2006,23(11): 311-313
- [8] 郭旭红, 芮延年, 李军涛, 等. 基于遗传算法模糊智能控制系统的研究[J]. 苏州大学学报, 2004, 24(5): 38-41.  
GUO Xuhong, RUI Yannian, LI Juntao, et al. Research on the control system of fuzzy intelligence based on genetic algorithm[J]. Journal of Suzhou institute of silk textile technology, 2004, 24(5):38-41.
- [9] 迟光亮, 张吉礼, 赵天怡. 风机盘管占空比模糊控制仿真研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(12): 80-84.  
CHI Guangliang, ZHANG Jili, ZHAO Tianyi. Simulation of duty ratio fuzzy control of fan coil units[J]. Heating Ventilation& Air Conditioning, 2010,40(12):80-84.
- [10] 赵天怡, 马良栋, 张吉礼. 风机盘管占空比模糊控制试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010(12):92-98.  
ZHAO Tianyi, MA Liangdong, ZHANG Jili. Experimental analysis on duty ratio fuzzy control for fan-coil unit[J]. Journal of

- Civil, Architectural& environmental Engineering, 2010(12):92-98.
- [11] ZHAO Tianyi, ZHANG Jili, SUN Dexing. Experimental study on a duty ratio fuzzy control method for fan-coil units[J]. Building and Environment, 2011,46(2):527-534.
- [12] 李炎锋.建筑设备自动控制原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- LI Yanfeng. Automatic principle of building facilities[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [13] RIEGER C. Demonstration of a hybrid intelligent control strategy for critical building HVAC systems[J]. Control and Intelligent Systems, 2010, 38(2):110-119.
- [14] RIEDERER P, MARCHIO D, VISIER J.C, et al. Room thermal modeling adapted to the test of HVAC control systems[J]. Building and Environment, 2002 (37):777-790.
- [15] MCINTOSH RUSS. Energy saving strategies for air handlers[J]. Journal of the Association of Energy Engineering, 2012, 109(4): 40-62.

## Experimental research on intelligence control scheme for fan coil air-conditioning system

LI Yanfeng, ZHANG Ning, BIAN Jiang

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** MATLAB/Simulink dynamics simulation software has been adopted to implement the intelligent control scheme. BAC Window software for data exchanging interface has been developed to realize the combination of intelligence control system and building automation(BA) system. Experimental research has been done on different control strategies including traditional PID control, fuzzy and fuzzy-PID control for fan coil air-conditioning system. The effect of control strategies have been compared and analyzed from the aspect of robustness, static and dynamics character, economy. Results have shown that the developed data exchange interface software could induce the intelligent control scheme to the BA system effectively. Among these selected control strategies, fuzzy-PID control strategy which has both advantages of traditional PID and fuzzy strategies is an optimal scheme for improving control quality and saving energy.

**Key words:** fan coil unit; intelligence control; BA system; optimal control

(本文编辑 吴海西)



西安建筑科技大学学报(自然科学版)  
荣获第五届中国高校优秀科技期刊奖。特颁此证。

