

# 变风量末端联合串级温湿度控制

闫秀英, 韩宏权, 王乐唯

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 本文结合工程实际, 以变风量空调系统为研究对象, 分析温湿度耦合因素, 研究了夏季工况露点除湿和变风量末端控温联合作用下, 基于绝对湿度控湿的变风量末端温湿度控制方法-联合串级双闭环控制。温度控制回路采用单神经元自适应 PID, 湿度控制回路采用单纯形寻优的增量式 PID 算法, 仿真与实验研究结果表明本文提出的控制方案较传统方案能快速除湿, 较好的满足人体舒适度要求, 本文的研究具有一定的理论意义和工程应用价值。

**关键词:** 绝对湿度; 温湿度控制; 解耦; 末端

中图分类号: TP29

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0766-05

## Temperature and humidity control of joint cascade of VAV terminal

YAN Xiuying, HAN Hongquan, WANG Lewei

(College of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Combined with practical system, and taking variable air volume (VAV) air-conditioning system as the object, the coupling factors of temperature and humidity are analysed. Under joint action of dehumidification through changing dew point and temperature control based on absolute humidity, the Joint Cascade Double Closed Loop Control method in VAV terminal temperature and humidity control is researched in this paper. Single neuron adaptive PID algorithm and incremental PID algorithm optimized by simplex optimization method is adopted in temperature and humidity control loop separately. Simulation and experimental results show that the proposed control scheme compared with traditional one can dehumidify faster and better satisfy human comfort requirements. The research has certain theoretical significance and engineering application value.

**Key words:** absolute humidity; temperature and humidity control; decoupling; terminal

夏季是空调系统能源需求最突出的季节, 主要原因在于湿度和环境温度的上升。相对湿度与温度之间存在耦合, 对系统舒适度控制与节能影响很大。同时, 湿度影响人体的热代谢和水盐代谢, 高温高湿影响人体汗液的蒸发, 机体的热平衡受到破坏, 因而会使人感到闷热不适。为了使空调房间维持适宜的温湿度, 需要采取除湿措施。随着人们对舒适度要求的提高, 温湿度控制也成为夏季空调控制的关键, 是目前国内外空调学者的研究热点。

温湿度是空调房间环境控制效果的关键参数。针对空调系统的温湿度控制, 国内外许多学者展开了研究: HUANG<sup>[1]</sup>提出了模型预测控制策略解决房间温度控制的非线性、不确定性和条件限制。采用双线性预测控制器控制区域温度, 鲁棒模型预测控制器控制末端风阀, 实践证明, 此方法比传统 PI 控制器更具有鲁棒性。北京空间飞行器总

体设计部刘东晓等<sup>[2]</sup>提出了基于绝对含湿量控湿的温湿度独立控制方法, 主要应用于航天飞行器密封舱内空气温度和湿度的解耦控制; 通过绝对含湿量控制点位置转移, 减小了控制系统惯性, 从而克服以相对湿度作为反馈量引起的湿度调节过程缓慢、随温度变化存在振荡的问题。Kang Zhao 等<sup>[3]</sup>将温湿度独立控制策略成功应用于办公建筑, 利用溶液除湿法, 提供干燥新风, 控制室内湿度; 采用高温冷源达到节能降耗的目的。ZHENG<sup>[4]</sup>根据房间使用率重设房间温度, 可使系统额外节能 8%。ZHOU<sup>[5]</sup>将一个房间分成多个独立区域, 分别安装 VAV 末端, 在人员呼吸的高度安装无线传感器测得人员实际体感温湿度, 同时考虑温湿度耦合关系, 根据需求进行温湿度控制, 提高房间温度控制效果, 降低能耗。当房间全部使用与使用一半时可节省 20%~30% 的送风量, 至少可节省 10% 能耗。LIM 等<sup>[6]</sup>提出了基于蒸发器压力和相对湿

收稿日期: 2017-04-21

修改稿日期: 2018-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508446), 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-GY-025), 陕西省教育厅专项科研项目(17JK1002)

第一作者: 闫秀英(1980—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为建筑智能化与节能; E-mail: xjdyxy1219@163.com

度的压力控制方法,该方法根据干球温度和空气的相对湿度改变蒸发压力,相较于传统的仅利用干球温度控制蒸发压力方法提高了室内空气的热舒适性和能量效率.沈锡骞<sup>[7]</sup>在双冷源温湿度独立控制的基础上开发出变新风温湿度独立控制空调系统,利用末端干式风机盘管机组控制房间温度,新风控制房间的湿度,间接根据房间人数控制新风量,不降低舒适度的基础上实现节能.

综上所述,国内外学者对温湿度控制策略及解耦策略进行了大量研究,研究多集中在前端,对变风量末端侧研究较少.作者在近几年研究期间对空调子系统回路参数(供水温度、供水量、送风温度、送风量、房间温度等)之间存在的耦合,进行了初步研究,包括:空调系统的分解、协调、开环迭代学习控制在底层控制中的应用、系统优

化研究,并通过实验证明了其可行性<sup>[8-9]</sup>.同时,在研究中发现末端的温湿度耦合严重,对系统舒适度控制与节能影响很大,是当前研究的难点,需进行深入研究.在此基础上提出了基于绝对湿度控湿的VAV空调系统室内温湿度控制方案<sup>[10]</sup>,将变风量末端进行基于绝对湿度控湿和末端控温的联合控制,力求达到舒适性和节能的统一.

## 1 室内温湿度控制原理

针对西安建筑科技大学变风量空调系统(结构如图1所示),研究了VAV空调系统室内温湿度控制.针对相对湿度和温度之间的耦合性,引入绝对湿度,采用露点除湿;针对控制回路之间的温湿度耦合现象,引入不同的修正系数进行解耦协调.

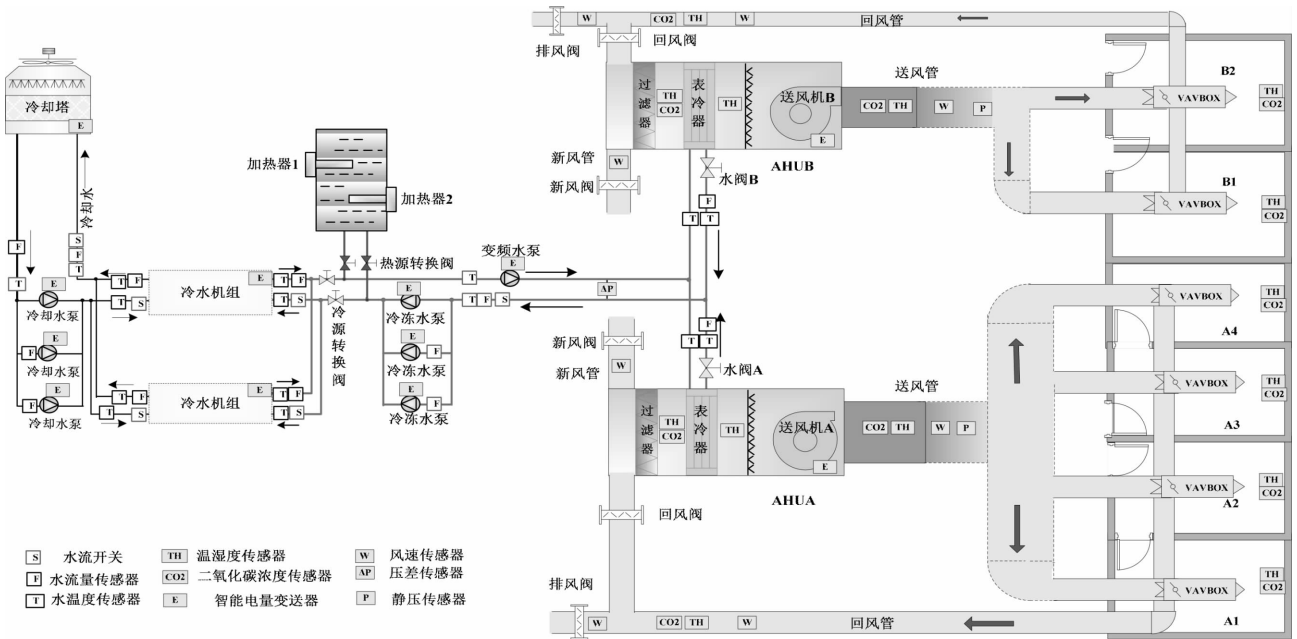


图1 变风量中央空调系统结构图

Fig.1 The structure diagram of variable air volume air-conditioning system

室内温湿度控制具有时变性,即露点和末端送风量均实时变化,需同时动态调整.要进行绝对湿度控湿研究必须获得房间的实时绝对湿度,而所有的湿度传感器采集到的数据均为相对湿度.根据绝对湿度与相对湿度的关系,推导出绝对湿度计算公式如下:

$$d_v = 216.7 \frac{\varphi \cdot p_{q,b}}{T} \quad (1)$$

$$p_{q,b} = a e^{\frac{b-T}{\lambda+T}} \quad (2)$$

式中:  $d_v$  为绝对湿度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $\varphi$  为相对湿度, %;  $T = 273.15 + t$ , 其中  $t$  为空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $p_{q,b}$ : 饱和

水蒸气压力,  $\text{Pa}$ ;  $\lambda = 243.12^{\circ}\text{C}$ ,  $a = 611.2 \text{ Pa}$ ,  $\beta = 17.62$ .

针对控制回路之间的温湿度耦合现象,本文引入修正系数  $\delta$ 、 $\mu$ , 如式(3)、式(4)所示<sup>[11]</sup>.

$$G = f_{G,PID}(T_{set}, T_r) + \delta f_{G,TSS}(T_{s,set}, T_{s,set0}) \quad (3)$$

$$T_{s,set} = f_{ts,PID}(d_{set}, d_r) + \mu f_{TSS,G}(G, G_0) \quad (4)$$

式中:  $f_{G,PID}$  为温度控制回路计算送风量,  $\text{CMH}$ ;  $f_{ts,PID}$  为湿度控制回路计算露点,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $f_{G,TSS}$  为露点设定值影响的送风量设定值,  $\text{CMH}$ ;  $f_{TSS,G}$  为送风量设定值影响的露点设定值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{set}$ ,  $T_r$  分别为房间温度设定值和实际值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{s,set}$ ,  $T_{s,set0}$  分别为

现时刻送风温度设定值和上时刻送风温度设定值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{\text{set}}$ ,  $d_r$  分别为绝对湿度设定值和实际值,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $G$ ,  $G_0$  分别为现时刻送风量设定值和上时刻送风量设定值,  $\text{CMH}$ ;  $\delta$  为风量修正系数;  $\mu$  为露点修正系数。

本系统采用压力无关型 VAV 末端, 结合绝对湿度, 在传统双闭环温度控制基础上, 提出了房间温湿度联合串级双闭环控制方法, 控制框图如图 2 所示。从图 2 可以看出, 湿度控制通过内环调节冷冻水阀开度改变送风露点, 外环通过温度控制器调节露点设定值; 温度控制环节按照传统的串级控制调节末端风阀改变送风量实现温度控制。

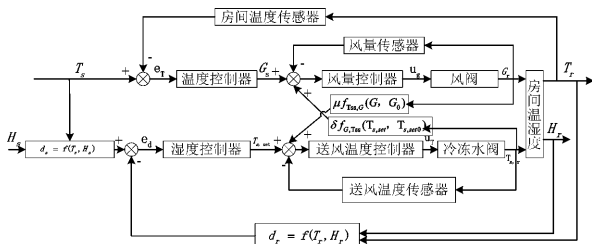


图 2 基于绝对湿度控湿的温湿度控制框图

Fig. 1 The control block diagram of temperature and humidity based on absolute humidity

根据规范可知: 夏季工况舒适性空调房间温度为  $24 \sim 28^{\circ}\text{C}$ , 湿度为  $40\% \sim 65\%$ <sup>[12]</sup>。通过温度-湿度-露点对照表<sup>[13]</sup>查得当温度为  $25 \sim 26^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度为  $40\% \sim 65\%$  时, 绝对湿度为  $9.2 \text{ g}/\text{m}^3 \sim 14.95 \text{ g}/\text{m}^3$ 。通过式(1)、(2)得出露点范围  $5 \sim 17^{\circ}\text{C}$ , 而实际系统冷机出水温度为  $7^{\circ}\text{C}$  左右, 所以送风露点的范围为:  $7^{\circ}\text{C} < t < 17^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 室内温湿度控制研究

### 2.1 基于绝对湿度控湿的温湿度控制仿真研究

由于末端内环风量控制回路的封闭性, 根据设备技术手册知内环风量控制器为 PI 控制器, 其控制器参数为:  $K_p = -12$ ,  $K_i = -40$ 。据其他控制回路特性设计了满足其要求的控制器: 外环房间湿度控制采用基于单纯形法的增量式 PID 控制算法, 其控制结构如图 3 所示。露点控制和外环房间温度控制回路采用单神经元自适应 PID 控制算法, 学习规则采用有监督 Hebb 学习法则, 其控制结构如图 4 所示。

图 4 中  $w(K)$  为加权系数,  $K$  为单神经元比例系数,  $K$  值越大系统调节速度越快, 超调量也越大<sup>[14-15]</sup>。最终寻优可得绝对湿度控制回路单神经元自适应 PID 控制器调节参数:  $K_j = 0.025$ ; 末端外环房间温度控制回路神经元自适应 PID 控制器

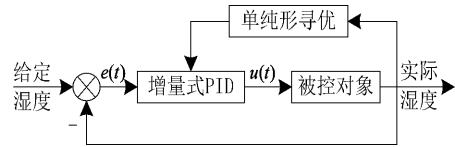


图 3 单纯形法增量式 PID 控制框图

Fig. 3 Control block diagram of incremental PID controller with simplex method

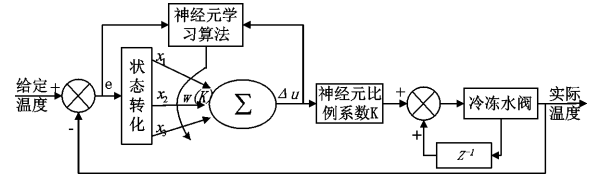


图 4 单神经元自适应 PID 控制框图

Fig. 4 Control block diagram of single neuron adaptive PID controller

调节参数:  $K_w = 0.9$ 。外环房间湿度控制回路增量式 PID 控制器调节参数:  $K_p = -11.0025$ ,  $K_i = -1.3095$ ,  $K_d = 0.5686$ 。

经过反复测试研究得到温湿度修正系数:  $\delta = 0.082$ ,  $\mu = 0.117$ 。结合本文建立的系统数学模型, 在 Simulink 中进行房间温湿度联合控制仿真。房间温度仿真控制效果如图 5 所示, 房间湿度仿真控制效果如图 6 所示。

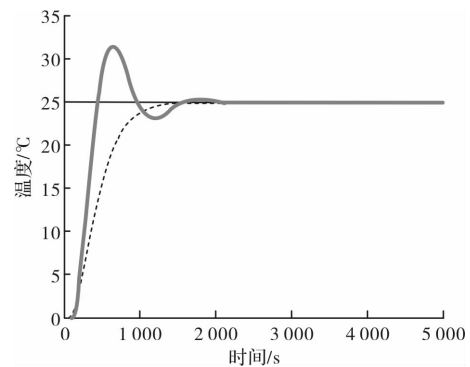


图 5 房间温度仿真控制效果图

Fig. 5 Simulation control diagram of room temperature

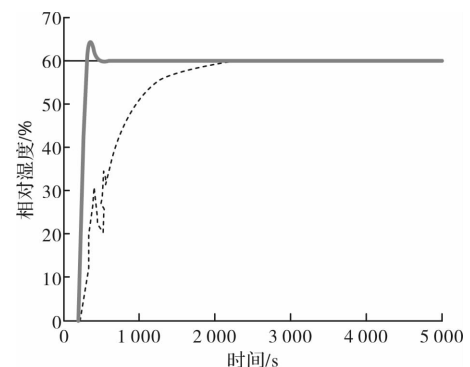


图 6 房间湿度仿真控制效果图

Fig. 6 Simulation control diagram of room humidity

从图 5 可以看出, 温度控制回路未加载风量修正系数  $\delta$  时, 控制出现了一定的超调和震荡, 调整时间较长; 加载  $\delta$  后调整时间缩短至 1 200 s 左右, 且没有超调和震荡。从图 6 可以看出, 湿度控制回路未加载露点修正系数  $\mu$  时, 控制前期出现了震荡, 调整时间较长。加载了  $\mu$  后, 虽然有一定的超调量, 但响应速度加快, 调整时间缩短至 500 s 左右, 具体性能参数见表 1。综上所述, 温湿度联合控制下系统总体控制效果有明显提升。

2.2 基于绝对湿度控湿的温湿度控制实验研究

夏季工况下, 将上述控制方案在空调系统实验平台进行研究调试, 室内温湿度设定值分别为 25 ℃和 60%, 运行 4 000 s 左右系统达到稳定状态, 其控制效果如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 送风量和房间湿度控制波动

较大, 且调节时间较长。主要原因是末端系统工况复杂, 实验系统与模型仿真的理想工况相比受到内外扰动的作用, 工作状态发生了变化。对此, 在上述室内温湿度串级双闭环联合控制的基础上, 加入修正系数  $\delta$ 、 $\mu$ , 再次进行实验, 其控制效果如图 8 所示。

表 1 房间温湿度控制性能指标

Tab. 1 The performance index of room temperature and humidity

	修正系数 ( $\delta$ 、 $\mu$ )	超调量 /%	上升 时间/s	调整 时间/s
房间温度	未加修正系数	26.4	490	1 500
房间温度	加入修正系数	0	1 200	1 200
房间湿度	未加修正系数	0	2 200	2 200
房间湿度	加入修正系数	7.5	300	500

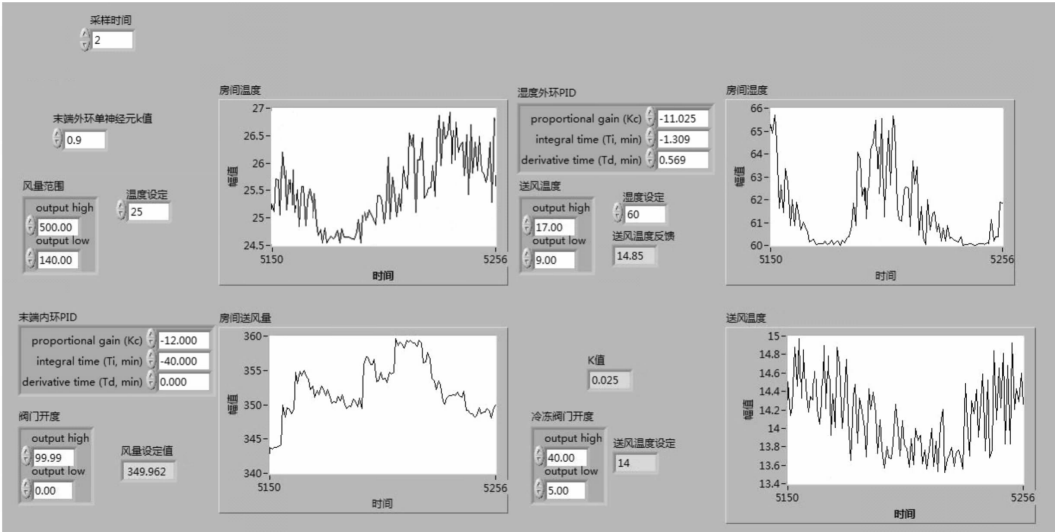


图 7 房间温湿度控制效果图

Fig. 7 Control effect diagram of room temperature and humidity

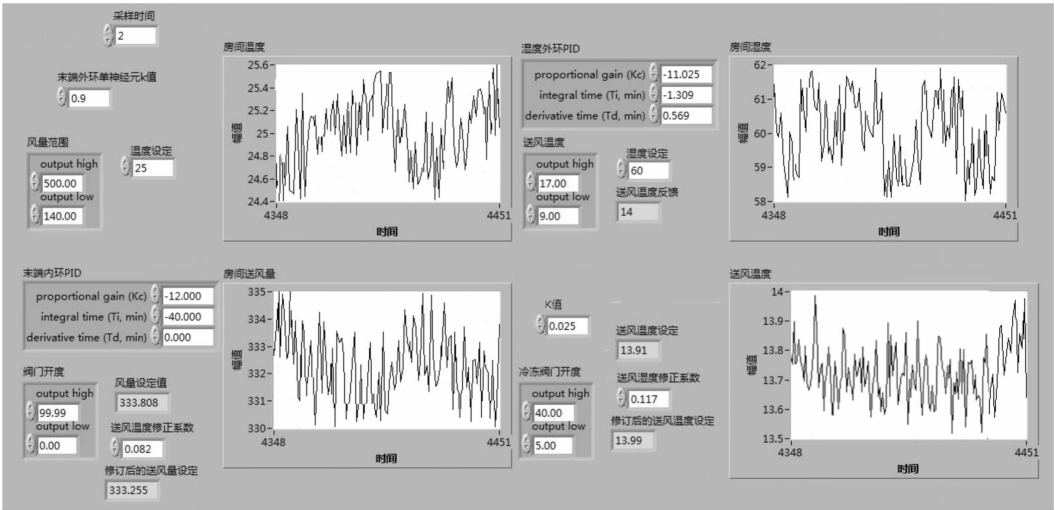


图 8 加载修正系数后房间温湿度控制效果图

Fig. 8 Control effect diagram of room temperature and humidity with correction factor

从图7可以看出房间温度稳定于 $25.5 \pm 1^\circ\text{C}$ , 湿度稳定于 $63 \pm 3\%$ , 系统调节时间较长;图8表明系统加载修正系数后运行802 s达到稳定, 房间温度稳定于 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 湿度稳定于 $60 \pm 2\%$ , 系统调节时间较之前明显减少。

综上所述, 系统加载修正系数后抗扰能力增强, 系统总体控制效果有明显提升, 且在一定程度上消除了耦合对控制系统的影响。

### 3 结语

针对末端的温湿度耦合严重现象, 首先, 分析了绝对湿度与相对湿度间的影响关系, 研究确定了VAV空调系统室内温湿度控制方案——联合串级双闭环室内温湿度控制方法。其次, 对空调系统的必要控制回路采用经典系统辨识进行建模, 针对末端回路封闭的特性, 房间风量、房间温度模型采用闭环辨识建模。最后, 在房间温湿度控制回路中引入修正系数解除温湿度之间的耦合作用。

仿真与实验研究结果表明温度控制回路采用单神经元自适应PID, 湿度控制回路采用基于单纯形寻优的增量式PID算法能快速较好的满足室内温湿度控制要求。本文工作对舒适度研究具有一定的理论意义和参考价值, 但此方法在工程应用推广中需进一步研究。

### 参考文献 References

- [1] HUANG Gongsheng. Model predictive control of VAV zone thermal systems concerning bi-linearity and gain nonlinearity[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(7): 700-710.
- [2] 北京空间飞行器总体设计部. 基于绝对含湿量控湿的温、湿度独立控制方法: CN201310028972.7[P]. 2013-7-24  
Beijing Space Vehicle General Design Department. Independent control method of temperature and humidity based on absolute humidity control: CN201310028972.7[P]. 2013-7-24
- [3] 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, 4: 1-9.
- [4] ZHENG Yang, Burcin Becerik-Gerber. The coupled effects of personalized occupancy profile based HVAC schedules and room reassignment on building energy use[J]. Energy and Building, 2014, 78(8): 113-122.
- [5] ZHOU Pei, HUANG Gongsheng, LI Zhengwei. Demand-based temperature control of large-scale rooms aided by wireless sensor network Energy saving potential analysis[J]. Energy and Buildings, 2014, 68(1): 532-540.

- [6] LIM, KYU D, Ahn, et al. Method to control an air conditioner by directly measuring the relative humidity of indoor air to improve the comfort and energy efficiency[J]. Applied Energy, 2018, 215: 290-299.
- [7] 沈锡骞, 沈士圣. 变新风温湿度独立控制空调系统技术及经济性分析[J]. 制冷与空调, 2017, 17(1): 58-63.  
SHEN Xiqian, SHEN Shishe. Technology and economic analysis on VAV temperature and humidity independent control air-conditioning system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(1): 58-63.
- [8] MENG Qinglong, YAN Xiuying, REN Qingchang et al. Variable air volume air-conditioning experiment system with advanced controls[J]. Indoor and Built Environment, 2016, 25(1): 114-127.
- [9] MENG Qinglong, YAN Xiuying, REN Qingchang. Global optimal control of variable air volume air-conditioning system with iterative learning: an experimental case study[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2015, 16(4): 302-315.
- [10] 韩宏权. 基于绝对湿度控湿的VAV空调系统室内温湿度控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.  
HAN Hongquan. Research on indoor temperature and humidity control of VAV air-conditioning system based on absolute humidity control[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017.
- [11] 程贝贝. 变风量(VAV)空调系统温湿度控制的节能策略[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.  
CHENG Beibei. Energy saving strategy of temperature and humidity control in VAV air conditioning system. [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB/T 50019-2015[S]. 北京, 中国计划出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Constuction of the P. R. C.. Design code for heating ventilation and air conditioning of industrial buildings: GB/T 50019-2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [13] 赵荣义, 范存养, 薛殿华等. 空气调节[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 271-272.  
ZHAO Rongyi, FAN Cunyang, XUE Dianhua et al. Air conditioning[M]. 4th ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2009: 271-272.
- [14] 彭彦平, 任庆昌, 闫秀英, 等. 中央空调冷却水系统双机变频节能控制研究[J]. 控制工程, 2015, 22(6): 1047-1052.  
PENG Yanping, REN Qingchang, YAN Xiuying et al. Research on energy-saving control of the cooling water system in central air conditioning system by using double machine frequency conversion[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(6): 1047-1052.
- [15] 孔超波, 周武能. 一种基于神经内分泌的单神经元PID智能控制器[J]. 控制工程, 2016, 23(2): 265-264.  
KONG Chaobo, ZHOU Wuneng. A single neuron PID intelligent controller based on neuron endocrine. Control Engineering of China, 2016, 23(2): 265-264.

(编辑 沈 波)