

文章编号:0253 - 4339(2018) 03 - 0085 - 07

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2018. 03. 085

基于稳态 ANN 模型和模糊 PD 控制的变速直膨式空调系统 温湿度同时控制方法

李 钊 崔凌闯 陈剑波

(上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093)

摘 要 直膨式空调系统温湿度控制过程高度耦合,造成传统方法下室内空气温湿度的同时精确控制较难实现。本研究基于模糊 PD 控制逻辑,利用稳态 ANN 模型建立新型温湿度同时控制算法,根据实时温湿度的控制误差计算所需的显、潜冷量,输出风机、压缩机转速,实现温湿度的同时控制。针对建立的新型控制算法,进行了控制性能验证实验,命令跟随实验结果表明,在新型控制算法的控制下,空气干球与湿球温度设定值改变后在 720 s 内被稳定在新的设定值,误差在 ± 0.2 °C 以内;负荷干扰实验结果表明,在有负荷扰动的条件下,控制器在干湿球温度偏离设定值 0.5 °C 后迅速响应,并在 600 s 内将干湿球温度控制到设定值,波动不超过 0.2 °C。因此本文建立的新型控制方法可以实现使用变速直膨式系统进行室内空气温湿度同时控制。

关键词 空气调节系统;人工神经网络;模糊 PD;温湿度同时控制

中图分类号:TU831; TP183

文献标识码:A

Simultaneous Control Strategy of Temperature and Humidity in Variable Speed Direct-expansion Air-conditioning System Based on Steady-state ANN Model and Fuzzy PD Algorithm

Li Zhao Cui Lingchuang Chen Jianbo

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract The temperature and humidity control processes in a variable-speed direct-expansion air-conditioning (DX A/C) system are significantly coupled, which makes it difficult to realize the precise control of indoor air temperature and humidity simultaneously when traditional methods are used. Based on a fuzzy proportional-derivative (PD) control logic and pre-established and validated steady-state artificial neural network (ANN) model, a novel temperature and humidity simultaneous control strategy was developed in this study. This control strategy uses the updating temperature and humidity errors to calculate the actually required control signals, the compressor, and the fan speeds to achieve simultaneous control of the temperature and humidity. Controllability tests were carried out to examine the performances of the novel controller including command following tests and disturbance rejection tests. The command following test results showed that the air dry-bulb and wet-bulb temperatures can be controlled to their new set points within 720 s with an oscillation of no more than ± 0.2 °C after the set points are changed. The disturbance rejection test results showed that, when a disturbance is introduced into the cooling load, the controller can respond immediately if the temperature differences between the set points and the present values reach 0.5 °C and maintain the dry-bulb and wet-bulb temperatures at their set points within 600 s, with a moderate oscillation of ± 0.2 °C. Thus, the experimental results suggest that the novel control strategy established in this study can realize the simultaneous control of the indoor air temperature and humidity using a variable-speed DX A/C system.

Keywords air conditioning system; artificial neural network(ANN); fuzzy PD; simultaneous control of temperature and humidity

与传统基于冷冻水系统的大型中央空调系统相比,直膨式空调 DX A/C (direct expansion air conditioning) 系统因其高能效、安装灵活、低运行成本而被广泛应用于中小型办公、居住建筑。传统直膨式系统通常配备定速压缩机与风机,仅依靠压缩机启/停对

室内空气温度进行控制,造成室内湿度失控,导致室内热舒适、空气品质 IAQ (indoor air quality)、系统能效下降。而针对大型中央空调系统开发的湿度控制策略,如新风预处理技术等,不完全适用于 DX A/C 系统。

变频驱动 VFD (variable frequency driven) 的引入,实现了 DX A/C 系统压缩机、风机转速的自由调控。改变压缩机(C)、风机(F)转速对系统输出总冷量与显热比产生耦合影响,从而改变系统输出显冷量(Q_s)与潜冷量(Q_l)的大小,导致室内空气温度与湿度的改变。这一耦合影响表征了变速直膨式系统的运行特性,为建立使用变速直膨式系统同时控制室内空气温湿度提供了理论基础^[1-2]。

新型控制策略,如基于直接数字控制(DDC)的容量控制器^[3-4]和基于 DX A/C 系统状态空间模型的多参量控制器^[5-6],都基于难以准确建立的复杂系统数学模型。因此,基于系统数学模型的控制器建立困难^[7-8],且模型复杂性导致控制灵敏度和精度较低,而传统控制方法不能进行温湿度同时控制。因此开发新型的温湿度同时控制方法十分必要。人工神经网络 ANN (artificial neural network) 模型在暖通空调领域被广泛使用^[9],如负荷预测^[10]、特殊系统模型辨识^[11-12]、制冷空调器仿真^[13-14]、系统故障分析诊断^[15-18]等。因此,基于 ANN 模型的控制策略是室内温湿度同时控制问题的潜在解决办法之一。

1 新型控制方法的建立

1.1 总体控制逻辑

在各种基于经验的建模方法中,ANN 模型使用广泛。ANN 是作为并行分布式计算网络的模拟大脑学习过程的简化数学模型。ANN 模型仅依靠实验数据识别系统输入输出间的关系,因此较建立详细数理模型简单。ANN 模型已广泛应用于暖通空调领域进行稳动态建模和热力系统控制器开发。

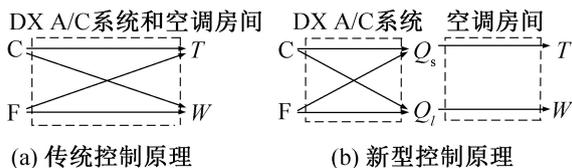
除 ANN 模型外,模糊逻辑指模仿人脑的不确定性概念判断、推理思维方式,对于模型未知或不能确定的描述系统,以及强非线性、大滞后的控制对象,应用模糊集合和模糊规则进行推理,表达过渡性界限或定性知识经验,进行模糊综合判断,推理解决常规方法难于解决的规则型模糊信息问题。因此,区别于机器逻辑,模糊逻辑可以实现对 HVAC 系统控制的改进。

模糊逻辑控制器 FLCs (fuzzy logic controllers) 主要利用基于人们的常识和经验的一组模糊推理规则,FLCs 的使用提供了获取现实世界的近似和不精确性质的有效方法。当研究对象过于复杂而不易常规定量分析,或可用的信息不能准确解释时,FLCs 方法可以起到有效改善作用。

由于 DX A/C 系统高度非线性,且温度和湿度的两个控制回路高度耦合,使室内空气温度和湿度的同

时控制较难实现。本文的研究目的是开发一个适用于 DX A/C 系统的新型 FLCs,使用 ANN 模型作为系统的描述,最终实现室内温湿度同时控制。

在已往的研究中,DX A/C 系统通过 2 个控制回路同时控制室内空气温度和湿度,即通过同时改变压缩机和风机转速以改变室内空气温度和湿度,如图 1 (a) 所示。然而,这两个控制回路强烈耦合,改变 C 和 F 中的任何一个都将影响两个控制参数,导致传统 PID 控制器的控制精度降低。为实现两个控制回路的解耦,本文提出了新型控制原理,如图 1 (b) 所示。由图 1 (b) 可知,该控制原理引入了系统输出显冷量 Q_s 和潜冷量 Q_l 两个中间变量。理论上, Q_s 仅影响室内空气温度, Q_l 仅影响室内湿度,因此实现两个控制回路的解耦,在两个相对独立的控制回路中,控制过程特性可以通过 FLCs 进行表达,不必基于类似 PID 控制方法详细而准确的控制过程特性。另一方面,DX A/C 系统稳态运行特性可以通过建立 ANN 模型进行描述^[19],系统输入 C 和 F 与输出 Q_s 和 Q_l 的关系可以通过 ANN 模型获得。因此,引入这两个中间变量,结合稳态 ANN 模型和 FLCs 可以建立使用 DX A/C 系统实现温湿度同时控制的新型算法。



T 室内空气温度; C 压缩机转速; Q_s 显冷量; W 室内空气湿度; F 供风风扇转速; Q_l 潜冷量。

图 1 传统和新型控制原理的对比

Fig. 1 Comparison between traditional and novel control principles

1.2 基于 ANN 的新型控制算法

图 2 所示为新型控制原理的控制算法,整个控制过程分为 A 和 B 两个过程。过程 A 通过将当前干球温度 $T_{db}(t)$ 和湿球温度 $T_{wb}(t)$ 与设定值进行比较获得的误差信号经比例(P)和微分(D)处理后送入 FLC 中,计算中间控制变量的变化值,表示为 $dQ_s(t)$ 和 $dQ_l(t)$ 。

过程 B 中的重要组成部分是 ANN 和逆 ANN 模型,其参与控制过程的作用在于系统的输出冷量或根据所需冷量计算输入的转速组合。ANN 模型的建立与验证已在前一部分研究中进行^[19]。在控制过程 B 中,首先由系统 ANN 模型计算得出对应当前输入 C 和 F 的输出冷量 $Q_s(t)$ 和 $Q_l(t)$ 。当前系统 $Q_s(t)$ 、 $Q_l(t)$ 和 FLC 计算所得中间控制变量之和为下一时间

步长系统目标输出,表示为 $Q_s(t+1)$ 和 $Q_l(t+1)$ 。通过逆 ANN 模型,计算出 $Q_s(t+1)$ 和 $Q_l(t+1)$ 对应的系统输出压缩机和风机转速,作为实际控制信号送

到受控系统,完成控制循环。对 C 和 F 连续调节实现室内温度和湿度的同时控制。

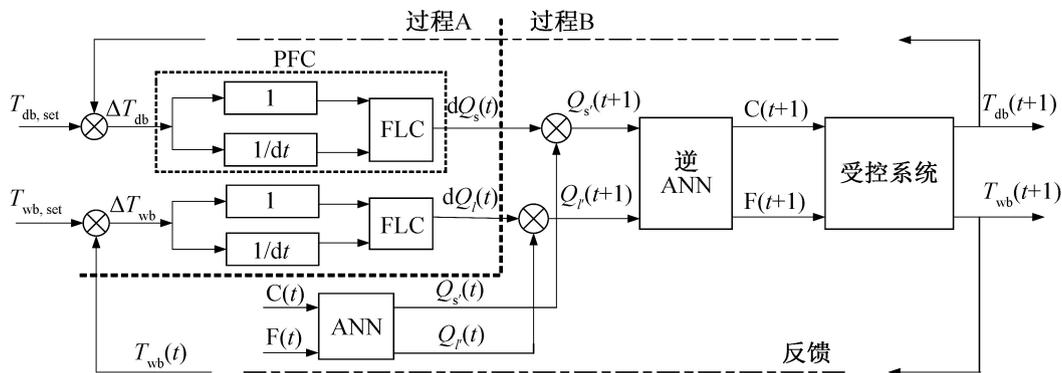


图 2 基于 ANN 辅助 PD 模糊控制原理

Fig. 2 Principle of the ANN aided fuzzy PD control strategy

通常基于 PID 方法的模糊逻辑控制器(PFC)由两部分组成,即 PID 误差处理模块和模糊推理模块,模糊推理规则通过经验获得。根据 PID 方法,有三个输入信号,绝对误差 $p(t)$,积分误差 $i(t)$ 和微分误差 $d(t)$ 。在模糊推理模块中:1)模糊化通过一组模糊集合和对应的隶属度函数实现;2)模糊推理单元由基于经验的模糊规则组成,进行决策,该模糊推理模块将建立一个模糊推理矩阵以表示模糊输入和模糊输出之间的对应关系;3)解模糊接口将模糊控制输出转换为实际控制信号。其中,模糊推理矩阵的大小决定于进行模糊化时选择的模糊集合的数量。例如,如果用于跟踪绝对误差的模糊集合数量为 k ,积分误

差为 m ,微分误差为 n ,则模糊推理矩阵的大小为 $k \times m \times n$ 。如果模糊集的数量稍微增加,虽然可以提高控制系统的精度,但模糊推理矩阵的大小将被放大。因此,在 PFC 的大小和精度之间存在最优化点,可使用 PD 法则取代 PID 法以简化计算。

研究所建立的 PFC 模糊化阶段的隶属函数的设置如表 1 和图 3 所示。对分别作为干球和湿球温度的比例和微分误差列出的每个 PFC 的输入信号,设置一个隶属函数。4 个隶属函数具有相同的形式(图 3)。为了简化,使用变量 R 表征不同的输入误差。不同输入误差的隶属度函数的语言变量设置如表 1 所示。

表 1 隶属度函数语义变量和对应权重设置

Tab. 1 The linguistic variables of the membership function and their corresponding WEIGHTS

误差	变量 R	语言变量和对应权重										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
ΔT_{db}	2 °C	VH*	H	W	FW	SW	C	SC	FC	Cool	Cold	VC
		5	1.8	0.5	0.3	0.02	0	-0.02	-0.3	-0.5	-1.8	-5
dT_{db}/dt	0.1 °C/s	THMQ	THVQ	THQ	THG	THS	NC	TCS	TCG	TCQ	TCVQ	TCMQ
		5	2	0.8	0.4	0.06	0	-0.06	-0.4	-0.8	-2	-5
ΔT_{wb}	2 °C	VH	H	W	FW	SW	C	SC	FC	Cool	Cold	VC
		5	1.8	0.5	0.3	0.02	0	-0.02	-0.3	-0.5	-1.8	-5
dT_{wb}/dt	0.2 °C/s	THMQ	THVQ	THQ	THG	THS	NC	TCS	TCG	TCQ	TCVQ	TCMQ
		5	2	0.8	0.4	0.06	0	-0.06	-0.4	-0.8	-2	-5

注:VH 非常热;H 热;W 温暖;FW 相当温暖;SW 略温暖;C 舒适;SC 略冷;FC 相当冷;VC 非常冷;THMQ 变热最快;THVQ 变热非常快;THQ 迅速变热;THG 逐渐变热;THS 轻微变热;NC 无改变;TCS 轻微变冷;TCG 逐渐变冷;TCQ 迅速变冷;TCVQ 快速变冷;TCMQ 变冷最快。

使用 PD 法则的模糊推理矩阵的表达方式仍不够简便,对于 PFC 的每个语言变量将存在一个对应

的模糊控制规则。根据图 3,每个 PFC 的输入误差类别设置有 11 个语言变量,对于使用比例、微分误差,

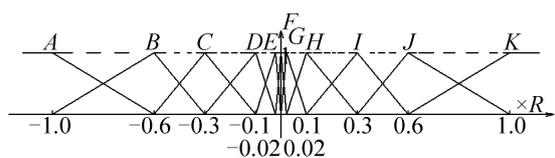


图 3 隶属度函数

Fig. 3 The membership function

将存在 121 个模糊控制规则。然而,这样的设计忽略了比例误差和微分误差之间的固有联系。前者表示当前控制参数与其设定值之间的差值,而本研究使用控制参数的变化率来定义微分误差。因此存在输入不同,输出控制信号相同的情况。例如,在一次采样中,温度比设定值高 5 °C,同时,温度以 0.5 °C/min 降低;而在另一次采样中,温度比设定值低 3 °C,温度以 0.3 °C/min 的速度升高。如果控制目标在 10 min 内达到设定值,在这两种情况下,系统的输出控制信号应保持不变,不需要为模糊推理单元建立全部 121 个模糊规则。

引入具有权重概念的模糊推理模块,为每一输入误差的隶属度函数中模糊子集的语言变量分配权重,如表 1 所示。模糊推理模块输出的模糊值 FV (fuzzy value) 按下式计算:

$$FV = \sum [f(n)_i W] \quad (1)$$

式中:FV 为 PFC 的输出模糊值; $f(n)_i$ 为通过隶属度函数计算得到的比例和微分误差输入信号的隶属度; W 为表 1 中列出的每个模糊子集语言变量的相应权重。以一个具体的计算为例,如果干球温度比例误差位于 VH 的模糊子集,对应权重为 5,而微分误差位于 TCMQ,对应权重为 -5,隶属度均为 1,由式 (1) 可得, $FV = 1 \times 5 + 1 \times (-5) = 0$ 。表明在这种情况下,不需要改变当前输出显冷量。

对于去模糊化阶段,模糊值通过以下 4 个方程转换为有具体物理意义的中间变量。

$$dQ'_s = Q'_s(t+1) - Q'_s(t) = (Q'_{smax} - Q'_s(t))/10 \times FV_s; FV_s \geq 0 \quad (2)$$

$$dQ'_s = Q'_s(t+1) - Q'_s(t) = (Q'_s(t) - Q'_{smin})/10 \times FV_s; FV_s \leq 0 \quad (3)$$

$$dQ'_l = Q'_l(t+1) - Q'_l(t) = (Q'_{lmax} - Q'_l(t))/10 \times FV_l; FV_l \geq 0 \quad (4)$$

$$dQ'_l = Q'_l(t+1) - Q'_l(t) = (Q'_l(t) - Q'_{lmin})/10 \times FV_l; FV_l \leq 0 \quad (5)$$

式中: dQ'_s 和 dQ'_l 为过程 A 的输出信号,即所需的冷量变化值,为了扩大控制算法的适用性,使用显、潜冷量的相对值,定义为冷量与最大冷量的比值; t 为当次采样; Q'_{smax} 和 Q'_{lmax} 为显、潜冷量的最大相对

值,取值 1。

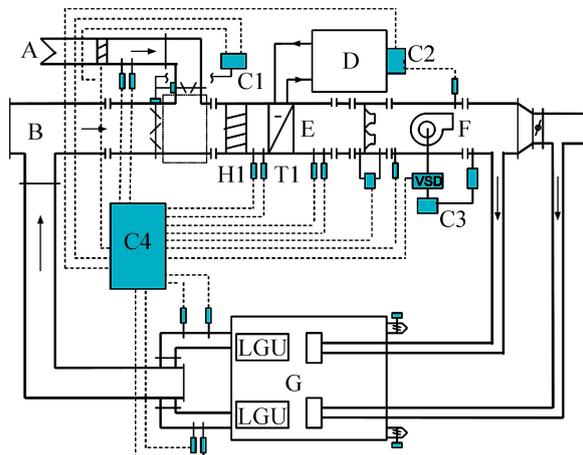
引入新的权重概念后,复杂的模糊推理矩阵被更简单的权重表代替,以及简单算法取代解模糊机制,并使用控制参数变化率重新定义微分误差,考虑了绝对误差和微分误差之间的内在联系,使 PFC 在结构和算法上都被简化。

2 控制性能实验

2.1 实验设置

为了验证建立的新控制方法的实际控制性能,在已建立的实验 DX A/C 系统进行了新型控制方法的控制性能实验。

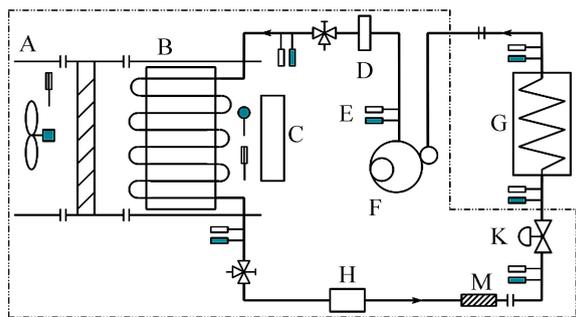
变速直膨式空调系统如图 4 所示。该变速直膨式系统主要由两部分组成:直膨式制冷系统和空气输送系统。图 5 所示制冷系统包括一个变频涡轮式压缩机,电子膨胀阀 (EEV),直膨管翅式蒸发器和一个风冷冷凝器。变频压缩机的名义制冷量为 9.9 kW,工质 R22 质量为 5.3 kg。空调空间尺寸为 7.6 m × 3.8 m × 2.8 m,内置负荷发生器 LGUs (load generation units) 模拟不同的室内热湿负荷。实验系统配备高精度测量仪器与传感器以测量各运行参数,包括温度、空气侧与制冷剂侧流量、制冷系统的压力等。为了方便测量,空气湿度由测得的空气干球温度 T_{db} 和湿球温度 T_{wb} 计算得到。空气与制冷剂温度都由精度为 ±0.1 °C 的铂电阻温度传感器测得。数据采集系统提供 48 个通道以记录该实验变速直膨式系统的各类运行参数,数据采集计算机化,并与控制系统集成,利于开发与应用新型控制算法^[18]。



A 新风; B 回风; C 控制单元; D 冷凝器; E 直膨式蒸发器; F 送风机; G 空调房间; H1 湿球温度; T1 干球温度; LGU 室内负荷发生器; VSD 变频驱动。

图 4 变速直膨式空调系统

Fig. 4 System of the VS DX A/C



A 冷凝风道; B 冷凝器; C 电加热器; D 油分离器;
E 制冷剂温度压力传感器; F 变频压缩机;
G 直膨式蒸发器 H 接收器; K EEV; M 制冷剂流量计。

图 5 变速直膨式制冷系统

Fig. 5 System of the VS refrigeration plant

实验中不引入室外新风,围护结构隔热良好(可认为绝热),空调负荷只考虑室内热湿负荷,使用 LGUs 进行模拟。冷凝器风量在 35 °C 的固定入口温度下保持恒定在 3 100 m³/h。过热度由 PID 控制器调节 EEV 的开度维持在 6 °C,实验中控制信号更新时间间隔为 30 s,数据采样时间为 2 s。

控制性能实验主要有两种:命令跟随实验和负荷干扰实验。

1) 命令跟随实验:在室内干球温度和湿球温度的设定值改变后,监控控制器是否能够迅速做出反应,并且提供正确的控制信号以调节压缩机风机的转速组合,使 DX A/C 系统将室内空气状态控制到新的设定值并保持稳定。

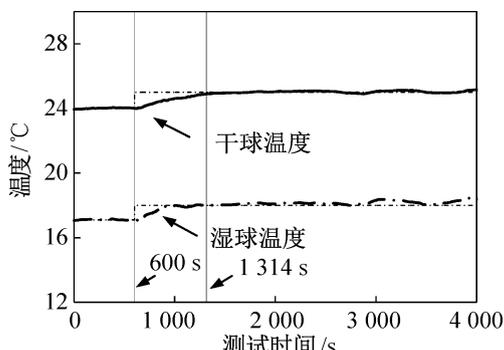
2) 负荷干扰实验:当改变室内热湿负荷时,室内空气状态发生改变,监控控制器对室内干、湿球温度的偏移是否能够迅速做出反应,将室内空气干、湿球温度维持在设定值。

2.2 命令跟随实验

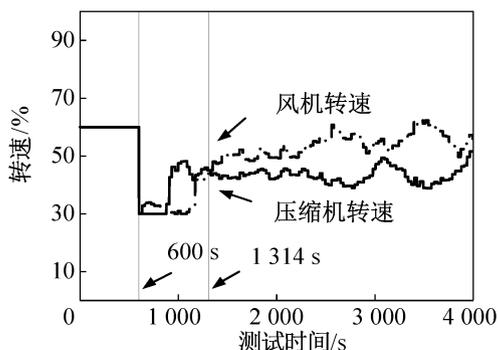
实验中室内空气干、湿球温度分别预先设置为 24 °C 和 17.1 °C,在运行稳定后将设定值改为 25 °C 和 18 °C,以测试控制器的命令跟随能力。

实验结果如图 6 所示。图 6(a) 为室内干球温度和湿球温度的变化,初始室内空气状态设定值分别为干球温度 24 °C 和湿球温度 17.1 °C,稳定运行 600 s 后设定值分别变为 25 °C 和 18 °C。图 6(b) 所示为对应压缩机和风机转速的变化,可知控制器对设定值的改变做出了迅速反应。随着实验的进行,控制器对压缩机和风机转速进行同时调节,具有良好的动态性能。而干、湿球温度约在 1 314 s 达到稳定状态,并在之后 2 500 s 内保持稳定,波动不超过 ±0.2 °C。结果表明,控制器在设定值改变时,可以迅速反应,将室

内空气干、湿球温度控制在改变的设定值并维持稳定。



(a) 室内空气干球和湿球温度变化指令下的实验



(b) 压缩机和风机转速在命令跟随实验的变化

图 6 命令跟随实验的测试结果

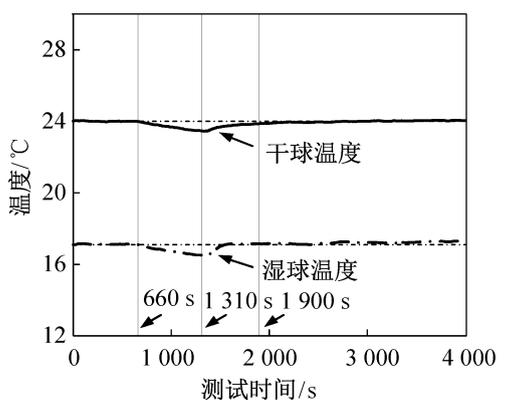
Fig. 6 Results of the command following test

2.3 负荷干扰实验

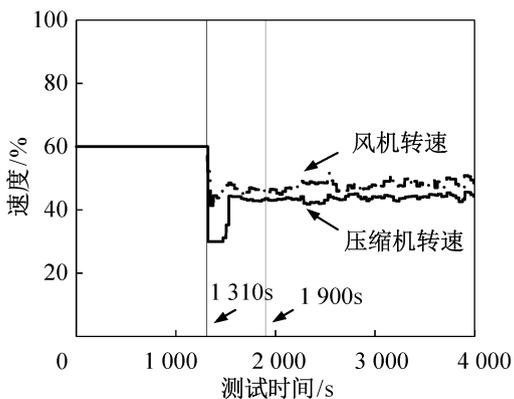
在负荷干扰实验中,空气干、湿球温度分别设置为 24 °C 和 17.1 °C。通过将稳定运行下的系统 LGUs 输出显、潜负荷从 4.33 kW 和 1.89 kW 分别降低到 3.65 kW 和 1.66 kW,实现对室内空气状态的干扰,以测试空调空间负荷受到干扰变化时,控制器将干、湿球温度维持在设定值的能力。

当统处于稳定运行状态 660 s 后,通过引入扰动改变室内的显、潜冷负荷,改变室内空气状态,破坏系统的平衡。当室内干球温度和湿球温度两者都改变 0.5 °C 时,控制器动作,监测控制器将室内空气干、湿球温度控制到设定值的情况。

图 7 所示为负荷干扰实验结果。图 7(a) 给出了室内干、湿球温度的变化,图 7(b) 显示了对应压缩机和风机转速的变化。稳定运行 660 s 后, LGU 输出显、潜热量从 4.33 kW 和 1.89 kW 分别降低到 3.65 kW 和 1.66 kW,室内空气干、湿球温度开始降低,降低到 23.5 °C 和 16.6 °C 需要约 650 s,在 1 310 s 时,控制器立即响应,开始同时调节压缩机和风机转速(图 7(b))。在 1 900 s 时,室内干、湿球温度上升到设定值,并在之后的实验过程中保持稳定,波动不超



(a) 负荷干扰实验中的室内干球和湿球温度变化



(b) 压缩机和供风风扇转速变化在负荷干扰实验

图 7 负荷干扰测试的实验结果

Fig. 7 Experimental results of load disturbance test

过 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明控制器在室内负荷受到干扰, 造成室内空气状态改变时, 可以有效、动态地将空气干、湿球温度维持在设定值, 具有较好的抗干扰调节能力。另外, 实验中为了探究新型控制器的灵敏度, 控制器的动作温差设置为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 结果表明: 该新型控制器可以对 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差做出灵敏反应, 进行负荷干扰控制。在将来的实际应用中, 室内空调的温度传感器精度通常为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控制器的实际使用效果将会体现为使用稍长的调控时间使温湿度恢复到设定值。由图 7 (b) 可知, 当干湿球温度低于设定值 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控制器作出响应时, 系统的输出并未降至最低, 所以即使响应温差变为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控制器响应时会根据温差更大地改变输出冷量, 控制器将干湿球温度控制回到原设定值的时间也只会增加, 不会过多影响控制器的灵敏度。另一方面, 本文的目的是使用 DX A/C 系统实现温湿度的同时精确控制, 因此, 想要最大限度发挥新型控制算法的优势, 需要尽量提高室内空气温度传感器的测量精度, 使控制过程中的计算值更加准确。

由于建立系统动态 ANN 模型需要更大量的训练数据, 所以采用动态 ANN 模型会增加控制器开发成本, 并且过于复杂的系统模型也会降低控制器的灵敏

度。综合考虑控制器建立难度及控制性能, 使用稳态 ANN 模型结合模糊 PD 控制来建立室内空气温湿度同时控制方法。对比上述两组控制性能实验, 得出基于 DX A/C 系统稳态 ANN 模型的新型温湿度同时控制方法具有良好的动态性能。

3 结论

本文建立了基于 ANN 辅助和 PD 控制的模糊逻辑控制器。此新型控制器由 PFC, ANN 模型和逆 ANN 模型 3 个部分组成。在 PFC 的建立中, 使用 PD 取代 PID 控制, 并对模糊子集的语义变量赋予权重, 从概念和结构两方面简化了控制算法。

为了检验新型控制器的控制性能, 在干球温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, 湿球温度为 $17.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (相对湿度 50%) 的初始稳态工况条件下分别进行了命令跟随实验和负荷干扰实验两种控制性能实验。结果表明: 在命令跟踪测试中, 控制器对于设定值的变化能够迅速响应, 通过同时调节压缩机和风机转速, 在 720 s 内分别跟踪室内干球温度和湿球温度的变化, 并将它们控制在新的设定值。在负荷干扰测试中, 引入室内冷负荷干扰后, 当温度变化量达到 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 控制器迅速响应, 通过改变压缩机和风机转速, 在 700 s 内将温度控制到设定值。因此, 此新型控制器可以实现使用 DX A/C 系统对室内空气温湿度进行同时控制。

参考文献

- [1] LI Zheng, DENG Shiming. An experimental study on the inherent operational characteristics of a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) unit[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 1-10.
- [2] XU Xiangguo, XIA Liang, CHAN Mingyin, et al. Inherent correlate on between the total output cooling capacity and equipment sensible heat ratio of a direct expansion air conditioning system under variable-speed operation[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(13): 1601-1607.
- [3] LI Zheng, DENG Shiming. A DDC-based capacity controller of a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) unit for simultaneously indoor temperature and humidity control-part I: control algorithms and preliminary controllability tests[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(1): 113-123.
- [4] LI Zheng, DENG Shiming. A DDC-based capacity controller of a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) unit for simultaneously indoor temperature and humidity control-part II: further development of the controller to improve control sensitivity[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(1): 124-133.

- [5] QI Qi, DENG Shiming. Multivariable control-oriented modeling of a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) system [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(5): 841-849.
- [6] QI Qi, DENG Shiming. Multivariable control of indoor air temperature and humidity in a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) system[J]. Building of Environment, 2009,44(8): 1659-1667.
- [7] 王晓非. 面向室内温湿度同时控制的直膨式空调系统混合建模[D]. 浙江:浙江大学,2017. (WANG Xiaofei. A hybrid model of a direct expansion air conditioning system for the simultaneous control of indoor air temperature and humidity[D]. Zhejiang:Zhejiang University,2017.)
- [8] 黄小清,徐象国,晋欣桥,等. 直膨式空调系统的混合建模研究[J]. 制冷技术, 2017, 37(1): 33-37. (HUANG Xiaoqing, XU Xiangguo, JIN Xinqiao, et al[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(1): 33-37.)
- [9] 李玉云,王永骥. 人工神经网络在暖通空调领域的应用研究发展[J]. 暖通空调, 2001, 31(1): 38-41. (LI Yuyun, WANG Yongji. Application and development of artificial neural network in HVAC field[J]. Journal of HV & AC, 2001, 31(1): 38-41.)
- [10] 朱能,史学宇,刘俊杰,等. 人工神经网络对空调负荷预测过程的优化研究[J]. 制冷学报, 2002, 23(2): 35-38. (ZHU Neng, SHI Xueyu, LIU Junjie, et al. The optimum study of neural network control in air conditioning system load prediction[J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(2): 35-38.)
- [11] 吴杰, 陈光明, 张绍志. 用人工神经网络预测冰蓄冷系统蓄冰时间[J]. 制冷学报, 2001, 22(4): 25-28. (WU Jie, CHEN Guangming, ZHANG Shaozhi. Predicting ice store time using artificial neural network[J]. Journal of Refrigeration, 2001, 22(4): 25-28.)
- [12] 周天泰, 林章, 宋春玲, 等. 运用神经网络辨识直燃式溴化锂系统模型[J]. 制冷学报, 2001, 22(1): 35-42. (ZHOU Tiantai, LIN Zhang, SONG Chunling, et al. Artificial neural network used in the direct-fired absorption chiller system identification [J]. Journal of Refrigeration, 2001, 22(1): 35-42.)
- [13] 丁国良, 张春路, 李灏. 神经网络在空调器仿真中的应用研究[J]. 制冷学报, 1999, 20(2): 31-37. (DING Guoliang, ZHANG Chunlu, LI Hao. Application of artificial neural networks in simulation of air conditioners [J]. Journal of Refrigeration, 1999, 20(2): 31-37.)
- [14] 丁国良, 张春路, 李灏, 等. 制冷空调装置智能仿真方法研究初探[J]. 制冷学报, 1998, 19(2): 10-14. (DING Guoliang, ZHANG Chunlu, LI Hao, et al. Intelligent simulation methodologies of refrigeration and air-conditioning appliances[J]. Journal of Refrigeration, 1998, 19(2): 10-14.)
- [15] 鲍士雄, 陈丽萍. 制冷系统故障诊断若干方法研究[J]. 制冷学报, 1997, 18(4): 28-32. (BAO Shixiong, CHEN Liping. The study of several methods in refrigeration system troubleshooting [J]. Journal of Refrigeration, 1997, 18(4): 28-32.)
- [16] 姜益强, 姚杨, 马最良. 空气源热泵冷热水机组的故障诊断[J]. 制冷学报, 2002, 23(3): 57. (JIANG Yiqiang, YAO Yang, MA Zuiliang. Fault diagnosis for air source heat pump water heater/chillers[J]. Journal of Refrigeration, 2002, 23(3): 57.)
- [17] 石书彪, 陈焕新, 李冠男, 等. 基于改进 BP 网络的冷水机组故障诊断[J]. 制冷学报, 2015, 36(6): 34-39. (SHI Shubiao, CHEN Huanxin, LI Guannan, et al. Research on fault diagnosis of chillers based on improved BP network[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(6): 34-39.)
- [18] 李中领, 金宁, 朱岩. 人工神经网络应用于空调系统故障诊断的研究[J]. 制冷与空调(北京), 2005, 5(1): 50-53. (LI Zhongling, JIN Ning, ZHU Yan. The study on application of ANN in fault diagnosis of air conditioning system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2005, 5(1): 50-53.)
- [19] 李钊, 邓仕明. 变速直膨式空调系统运行特性的稳态 ANN 模型[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 54-60. (LI Zhao, DENG Shiming. A steady state ANN model for the operational characteristics of a variable speed (VS) direct expansion (DX) air conditioning (A/C) system[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1): 54-60.)

通信作者简介

崔凌闯,男,在读硕士研究生,上海理工大学建筑环境与能源工程系,18721168116,E-mail: clccl@aliyun.com。研究方向:直膨式空调系统运行特性及控制,空气洁净技术。

About the corresponding author

Cui Lingchuang, male, master degree candidate, Department of Building Environment and Energy Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 18721168116, E-mail: clccl@aliyun.com. Research fields; operational characteristics and control of direct expansion air conditioning system, air cleaning technology.