

基于BACnet及VLC可编程控制器 空调系统仿真实验台的设计研究

基于BACnet及VLC可编程控制器针对空调系统中的一次回风全空气系统进行了仿真实验台的设计。基于能量守恒定律，运行策略及逻辑，湿空气相关理论，数据拟合方法等，建立了空调系统的能耗模型并实现了运行过程的仿真。该实验台开放性强，互操作性好，可以与其他同类型实验台联合运行，完成相关的综合模拟任务。并且其易于改造升级以完成不同模拟仿真任务，可拓展性强。实验台既可以用作教学实验演示，也可以模拟在不同的设计参数及实际运行条件下，空调系统的实际运行能耗以及相关运行参数。其模拟结果对全空气空调系统的设计运行优化具有指导意义。

曹正杰 刘成刚 肖 聪 / 苏州科技大学环境科学与工程学院

0 引言

完整的暖通空调系统，包括空气处理机组、冷热源设备、空气和冷热水输配系统以及室内末端装置。空气处理机组的运行对整个空调系统的能耗有较大的影响，同时它也是节能潜力最大的部分^[1]。因此，对空气处理系统进行仿真模拟是非常有意义的。

全空气空调系统是指将新、回风按一定比例进行混合后，送入空气处理机

组内进行各种处理，然后直接将处理好的符合要求的空气送到需要空气调节的房间内使用的空调系统^[2]。全空气定风量空调机组基本控制环节主要包括：新风阀、回风阀、排风阀、过滤器、换热盘管、送风机和加湿器^[3]，如图1所示。

空气处理机组中的直接能耗是指空气处理机组的风机电耗、电热器或电极加湿器等空气处理机组本身的设备耗电^[4]。间接能耗是由换热盘管处（表冷段）处理的负荷，其处理单位负荷所耗电量与冷源系统的控制运行策略息息相关，其构成有冷源系统的冷冻水泵能耗、冷却水泵能耗和制冷机压缩机耗电等^[5]。

本实验台主要对空气处理机组的直接能耗进行模拟，间接能耗由于和冷源系统的控制策略有关，应当与冷源系统相结合来进行分析。而本实验台是可以通过BACnet、VLC互联达到实验台联合运行的目的，从而可以进行综合能耗的分析。

在基于真实空调系统进行节能优化



曹正杰 / 硕士研究生

关键词/Keywords

BACnet •
VLC •
一次回风全空气系统 •
能耗模型 •
联合运行 •
仿真实验台 •
教学实验演示 •

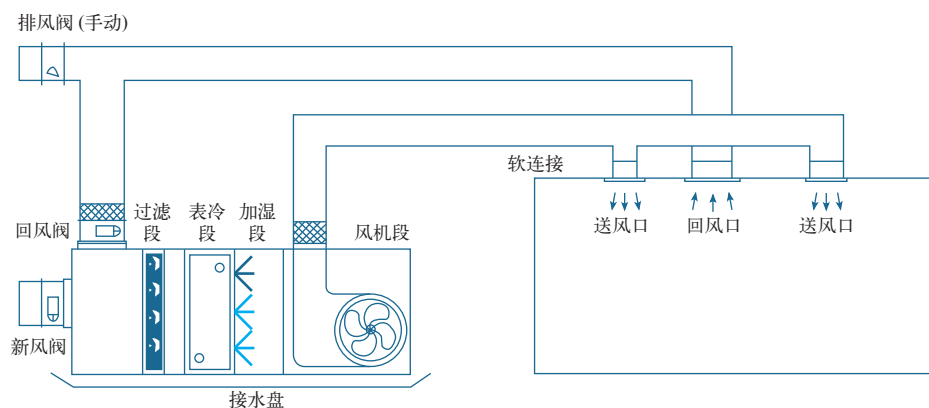


图1 全空气处理机组原理图

的时候,受到系统各设备的性能及运行状况等的影响,系统的运行参数并不能够随意调整,同时实际空调系统具有非线性,大滞后性特点,对其进行节能优化分析存在一定难度。而本实验台基于能量守恒,湿空气理论及实际空调系统的运行逻辑控制所设计的实验台,能够比较真实地模拟全空气系统的实际运行效果,为相关设计以及实际空调系统的设计、运行优化提供参考。

实验台的操作面板上的旋钮及BACtalk人机界面面上的各个参数可以调整,且在已设计好的实验台基础上,还能够较容易地对其进行改造升级。即通过改变可调输入点的意义、增加相关中间模拟变量以及改变DDC应用程序的编写以完成不同的模拟仿真任务,其可拓展性对模拟仿真也具有较大意义。本实验台首先针对全空气定风量露点送风一次回风系统进行实验台的相关搭建,并进行DDC程序的编写。同时基于实验台的灵活性,通过改变实体VLC中输入点的含义、相应DDC程序的编写以及相应人机页面的设计等,它还可以完成诸如全空气变风量露点送风一次回风系统的模拟等,来模拟不同的控制策略对节能的影响^[6]。

如果对实验台进行相应的改造升级,那它不仅能够完成不同的模拟任务,并且可以通过这种改造,让学习者受益。一方面学员在动手改造的基础上可以认识到空气处理系统中各个量之间对应的联系,更好地认识空气处理系统的运作,达到教学的目的;另一方面学员通过比较观察实际运行中受到变化的室内负荷以及室外气象参数变化等影响导致的运行参数的变化,可以认识到系统设计和空调系统实际运行的差异,并且结合相应的课程设计,对自己的设计所产生的实际运行情况有一个更直观的认识,对相关设计起一定指导作用。

综上所述,本实验台的设计研制不论在工程模拟还在教学方面具有相当的意义。

1 BACnet系统介绍

BACnet主要应用于楼宇自控领域,各个数字设备的控制信号可以交换和共享,其系统开放

性、互操作性和集成性都强。并且它是由美国采暖、制冷和空调工程师协会ASHARE协会开发的通信协议,认可度也较高^[7-10]。

利用其平台的开放性、互操作性和集成性,则可将其应用于实验台的模拟仿真^[11]。借助BACnet协议,配套的BACtalk人机交互界面、相应控制设备和VisualLogic图形化编程软件^[12],可以在计算机上通过BACtalk监控试验台的实时运行数据,也可以通过其改变控制参数以完成不同的模拟仿真任务^[11]。

2 全空气空调系统仿真实验台的设计

在全空气空调系统中,对于集中处理空气的空调箱来说,主要有新风阀、回风阀、排风阀、过滤器、换热盘管、送风机和加湿器等。在进行仿真实验台的设计时,需要将这些设备包含进去,并对其特性以及对空气处理过程的影响进行分析。

2.1 实验台硬件设计

本实验台主要采用PLC853控制器,8个10位分辨率通用输入,5个数字输出,3个模拟输出,另外还可以根据具体需要,通过双绞线接入其他同类型实验台的PLC可编程序控制器,进行综合模拟实验台的搭建(并且之前已经单独搭建了一个冷源实验台)。

电控箱以及运行面板如图2所示。



图2 全空气空调控制与模拟实验台

运行面板4个旋钮代表了4个模拟输入，可以基于实验台的实际需要改变其输入输出点的点位表征对象而完成的不同仿真任务。

以下就以定风量露点送风的一次回风空调系统的设计进行说明，如表1所示。

表1 PLC853控制器输入点点位

输入点	监控功能描述	输出点	监控功能描述
BI-0	过滤段报警按钮	AO-0	冷冻水阀控制大小
BI-1	防冻按钮	AO-1	新风阀门开度
AI-2	新风空气温度	AO-2	回风阀门开度
AI-3	新风空气湿度	BO-0	风机运行指示灯
AI-4	回风空气温度	BO-1	加湿指示灯
AI-5	送风筛选温度		
BI-6	风机运行状态		
BI-7	风机故障按钮		

另外模拟输入点位的设计对完成模拟实验功能以及人机交互页面的数据呈现也非常重要，表2列出了定风量露点送风一次回风的全空气系统的模拟数据点设置。

表2 模拟数据点点位

模拟数据点	意义	模拟数据点	意义
AV-21	回风焓	AV-42	需要送风焓
AV-20	新风焓	AV-43	实际送风焓
AV-24	新风比	AV-44	实际送风温度
AV-27	混合空气温度	AV-48	送风机工作压头
AV-29	混合空气焓	AV-49	送风机工作能耗
AV-22	总送风量	AV-31	全压效率
AV-23	新风负荷	AV-32	新风负荷比
AV-26	总负荷	AV-33	新风量
AV-25	室内负荷	AV-71	新风含湿量
		AV-72	回风含湿量
		AV-73	送风含湿量

改变这些输入点与输出点的意义，包括模拟数据点等，继而通过DDC程序的再设计可以实现

实验台功能的拓展，以完成不同的模拟任务，例如变风量系统的模拟等。

2.2 实验台控制逻辑设计

全空气系统实验台的控制设计中，主要分为两个部分：其一是以教学为目的运行演示设计；其二是以设计指导以及工程相关的运行能耗模拟仿真的设计。

2.2.1 教学运行演示设计

通过调节实验台上的旋钮，可以模拟不同情况下，一次回风全空气系统的运行实况。

1) 当按下过载按钮、防冻开关或者风压差报警开关时，系统会根据储存的程序，对整各系统进行相应操作，如停机、开大表冷器阀门以防冻、报警等。

2) 可以演示在运行时回风湿度比设计湿度低一定量时，模拟加湿器打开进行加湿操作。加湿逻辑控制图如图3所示。

3) 可以演示当室外空气状态发生变化时的新风比控制调节策略。如在夏季，当室外新风焓小于回风焓一定量后，会使用全新风模式，以最大程度节约能源，合理利用新风的冷量。新风工作状态逻辑控制图如图4所示。风系统逻辑控制图如图5所示。

2.2.2 运行能耗模拟仿真设计

定风量的露点送风一次回风系统的能量系统整体设计路线如图6所示。图6中方框中的量代表了自变量，特别地，新风比可以作为人为设定的自变量运作也可以以因变量来运作。

(1) 焓值计算

$$h = 1.01t + (2500 + 1.84t)d$$

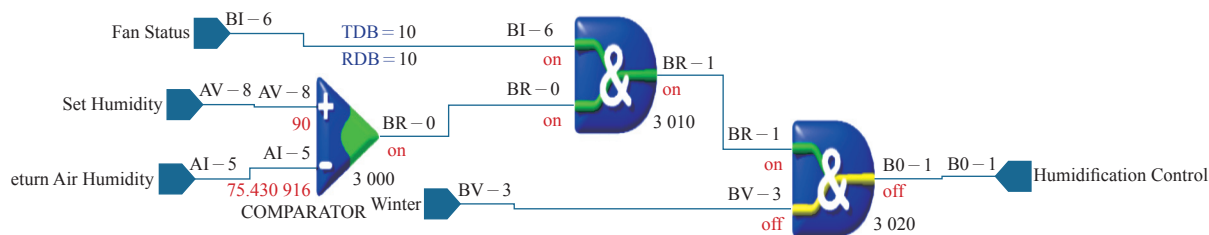


图3 加湿逻辑控制图

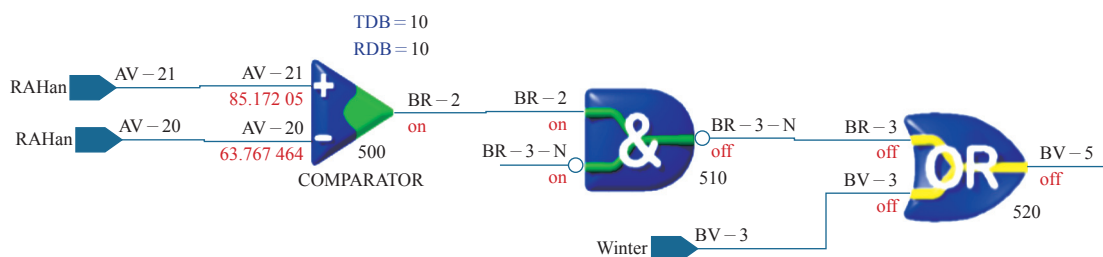


图4 最小新风工作状态逻辑控制图

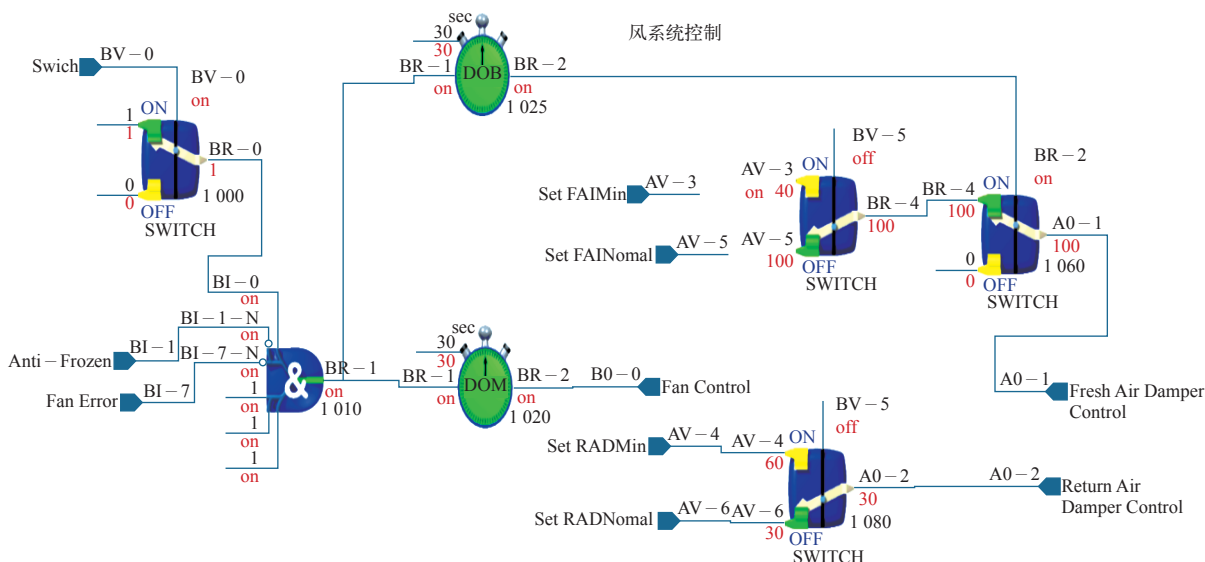


图5 风系统逻辑控制图

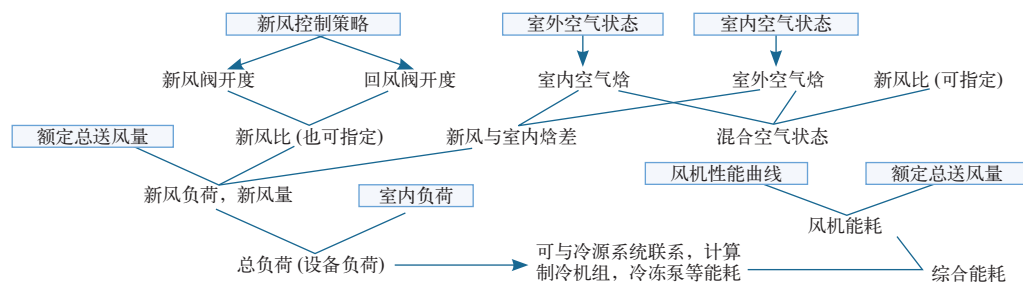


图6 系统整体设计路线

$$= (1.01 + 1.84d)t + 2\,500d \quad (1)$$

式中, h 为单位质量焓, kJ/kg ; t 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; d 为空气的含湿量, g/kg 干空气。

$$d = d_0 \times \varphi \quad (2)$$

式中, d_0 为饱和空气含湿量, g/kg 干空气; φ 为相对湿度。

饱和湿空气的含湿量和温度有关，查相关表可得到一系列的数据点，根据14~43℃之间的温度与饱和含湿量的对应关系，用Matlab进行数据拟

合得到温度 t 与饱和含湿量 d_0 的关系。

$$d_0 = 0.042 \, 15t^2 - 0.811 \, 6t + 13.71 \quad (3)$$

adjusted R -square为0.999 3 (越接近1表示拟合程度越好), 说明此拟合公式可以比较完美地描述 t 和 d_0 的关系。从而根据式(1)~式(3)可得到焓 h 与温度 t 及相对湿度 ϕ 的关系。

根据以上思路进行图形化程序的编写，具体如图7、图8所示。

通过查焓湿图进行对比,证实其可以比较准

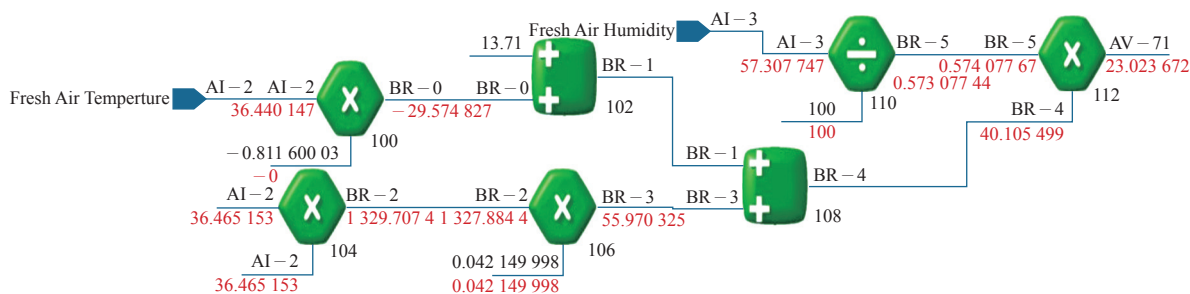


图7 焓值计算模块1

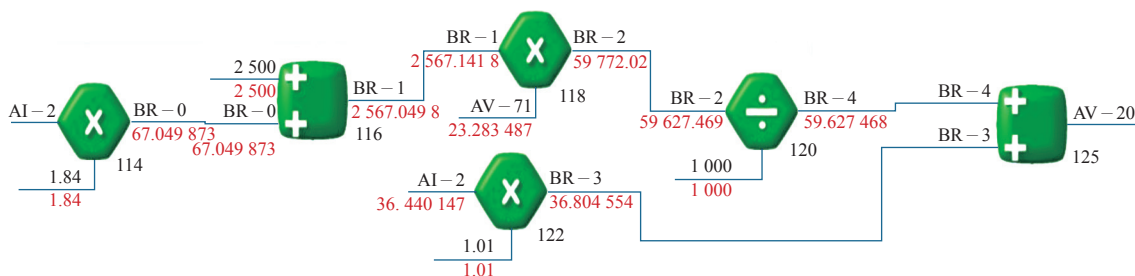


图8 焓值计算模块2

确地计算出不同状态下湿空气的焓。

(2) 风机能耗的计算

根据相关设计参数选出合适的空调机组，其中配备相应的风机，以南京某办公楼一号全空气处理空调机组为实例，其设计送风量为33 879.8 m³/h，管道阻力为742.4 Pa，设计总负荷为188.61 kW。采用的空调箱型号为BFP36W，风机型号为T4-72 No.6A，采用三台风机并联的形式送风。

根据风机的性能参数，包括转速、风压、风量和全压效率等^[13]（含有8个状态点）拟合出相应的风机性能曲线，若并联取并联的状态曲线进行拟合^[14]。完成这些工作之后，便可根据实际送风量得到相应风机压头以及能耗。

对于3台并联的风机，经过Matlab拟合后得到流量与压头、效率的关系，设流量为 V ，压头为 P ，全压效率为 η ，则

$$P = -5.395 \times 10^{-11} \times V^3 + 3.464 \times 10^{-6} \times V^2 - 0.849 5 \times V + 1 900 \quad (4)$$

式中， P 为风机压头，Pa； V 为送风量，m³/h；Adjusted R -square=0.998 1。

$$\eta = 6.787 \times 10^{-13} \times V^3 - 1.757 \times V^2 + 0.008 492 \times V - 24.42 \quad (5)$$

式中， η 为全压效率；Adjusted R -square=0.939 2。

风机消耗的功率可由式（6）、式（7）得到^[14]

$$W_s = \frac{PQ}{3 600\eta} \quad (6)$$

$$W = \frac{W_s}{\eta_0} \quad (7)$$

式中， W_s 为风机所需的轴功率，kW； W 为电动机消耗功率，若风机与电动机直联 η_0 取1，风机与电动机若采取联轴器联接 η_0 取0.95。

图形化编程如图9、图10所示。

(3) 新风量、新风负荷、总负荷及新风负荷占比的模拟计算

新风量可以通过人为设定的新风比乘以额定总送风量进行计算。从而根据室内空气焓、室外空气焓等计算出新风负荷。最后根据假定的实际运行时的室内负荷，可以计算出总负荷以及新风负荷占总负荷的比例。逻辑图如图11、图12所示。具体计算公式为

$$V_f = Vc \quad (8)$$

式中， V_f 为新风量，m³/h； V 为总送风量，m³/h； c 为新风比。

$$Q_f = \frac{(h_f - h_r)V_f \times 1.2}{3 600} \quad (9)$$

式中， Q_f 为新风负荷，kJ； h_f 为新风焓，kJ/kg； h_r

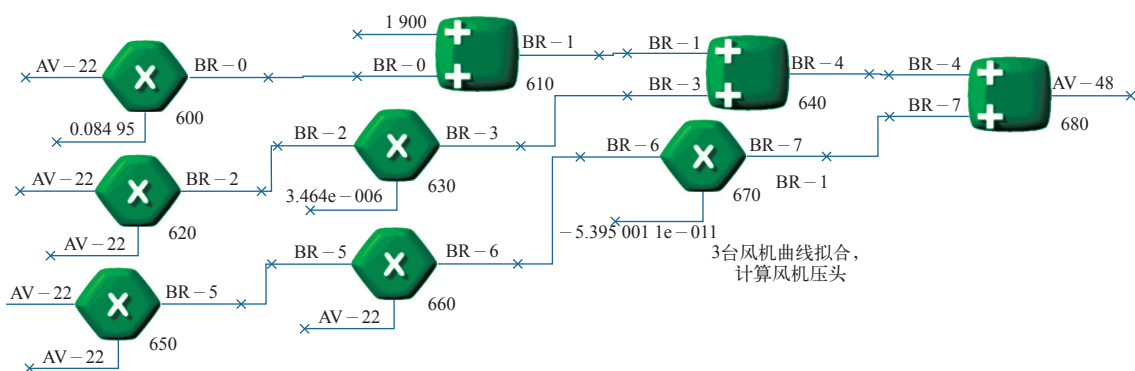


图9 风机流量与压头逻辑关系

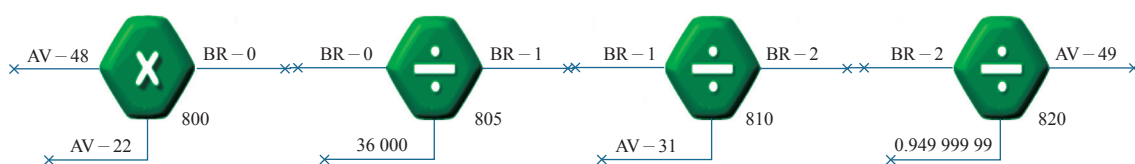


图10 风机流量与能耗逻辑关系

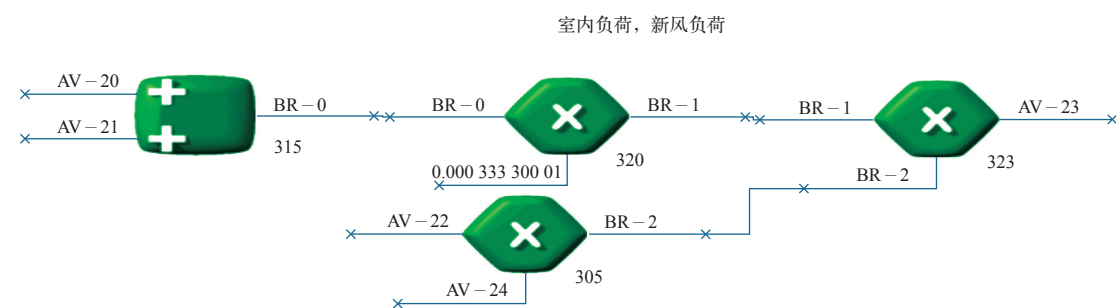


图11 新风负荷逻辑图

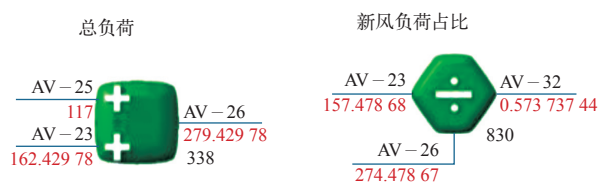


图12 总负荷级新风负荷占比逻辑图

为回风焓, kJ/kg。

(4) 新回风混合后的状态点参数

由实际运行中的新、回风的焓, 新风比, 再根据新回风混合后混合的物理规律, 即在焓湿图上, 新风状态点、回风状态点和混合状态点在一条线上, 并且混合点与新风比的相关性, 可以计算新回风混合后的湿空气温度以及焓。混合空气状态逻辑图如图13所示。

具体公式为

$$\frac{h_r - h_m}{h_r - h_f} = \frac{t_r - t_m}{t_r - t_f} \quad (10)$$

式中, h_m 为混合空气焓, kJ/kg; t_m 为混合空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 送风量温度的确定

通过总送风量以及室内负荷可以计算出消除室内负荷需要的送风焓。而根据露点送风的要求以及表冷器的工作特性, 送风空气相对湿度取90%, 则可以计算出不同温度下露点送风的送风焓。当其与需要送风焓相同时, 其温度就是所要求的送风温度, 所以可以通过相应调整旋钮和试算的原理筛选出送风温度。而当需要送风焓与筛选送风焓的误差在 ± 0.5 kJ/kg以内时, 通过一个保持器, 保存这时的送风温度, 进而得到比较准确

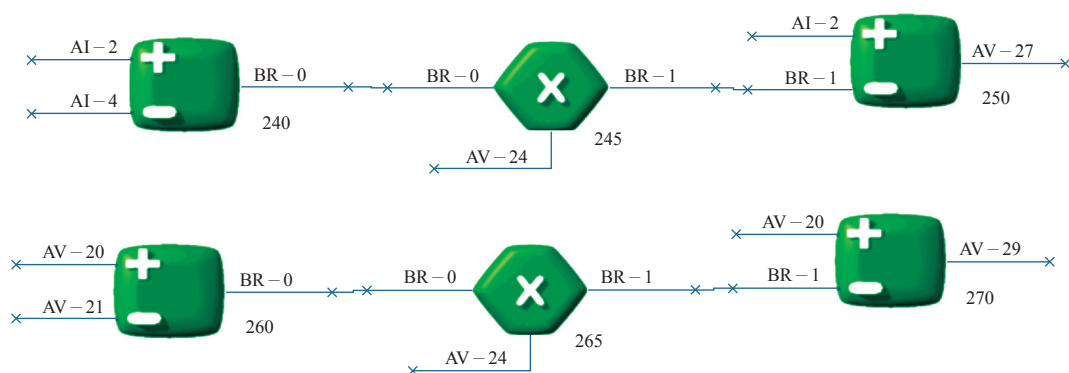


图13 混合空气状态逻辑图

的送风温度。这其实就是一个通过手动调节旋钮可以完成的一个实际功能的演示。计算公式为

$$h'_s = h_r - \frac{Q_c}{V} \times \frac{3600}{1.2} \quad (11)$$

式中， h'_s 为室内需送风焓，kJ/kg； Q_c 为室内冷负荷，kJ。

$$h'_s = h_s \quad (12)$$

h_s 通过焓值计算模块进行试算，当 $h_s = h'_s$ 时，得到相应的送风空气温度。

送风温度获取逻辑图如图14所示。人机界面如图15所示。

通过以上逻辑控制建立的全空气空调系统仿真实验台可以针对不同设计参数以及实际运行时的室内外参数，模拟得到空调系统实际运行中的各类参数，包括各类负荷、比重、风机能耗和空气状态等，使得操作人员能够对空调系统实际运行过程中各个量的动态变化有一个直观的了解与认识，并且通过实际运行能耗的分析，能够对系统的设计以及运行策略优化起一定指导作用。

3 结束语

根据实际的设计参数以及相应选型，将其特性通过DDC程序的编写融入到实验台的模拟仿真当中，使得实验台可以根据具体的实际项目或设计需要完成相应的仿真任务，得到设计与运行时的差别，以及不同运行控制策略下系统的能耗利用情况，从而得到相应的反馈，对设计以及运行策略的设定提供有益的参考与指导。

根据实际全空气系统的多样性，本实验台还可以通过改变输入输出点的定义、模拟数据点的定义以及DDC程序的再设计，完成相应的模拟仿真功能设计。一般基于实际风机、空调系统房间等的实验系统来说，其方便程度以及可拓展性要强很多。并且基于其平台的开放性，其还可与冷源系统联合运行，为实现综合能耗分析实验台的搭建提供了可能。

参考文献

- [1] 李炎锋. 建筑设备自动化系统 [M]. 北京: 北京

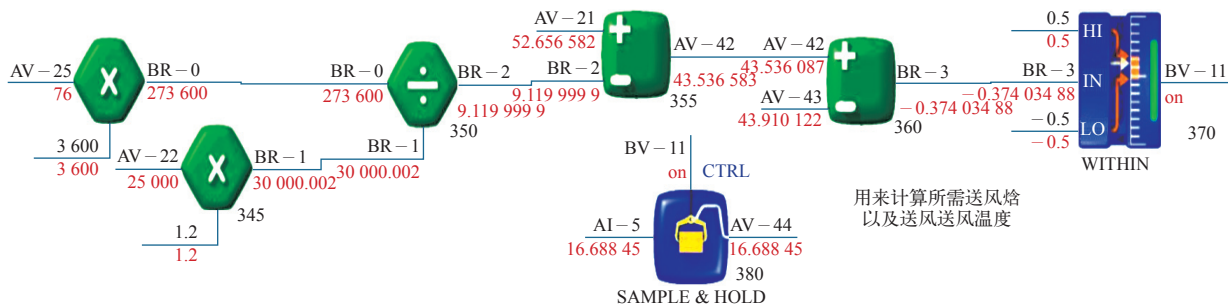


图14 送风温度获取逻辑图

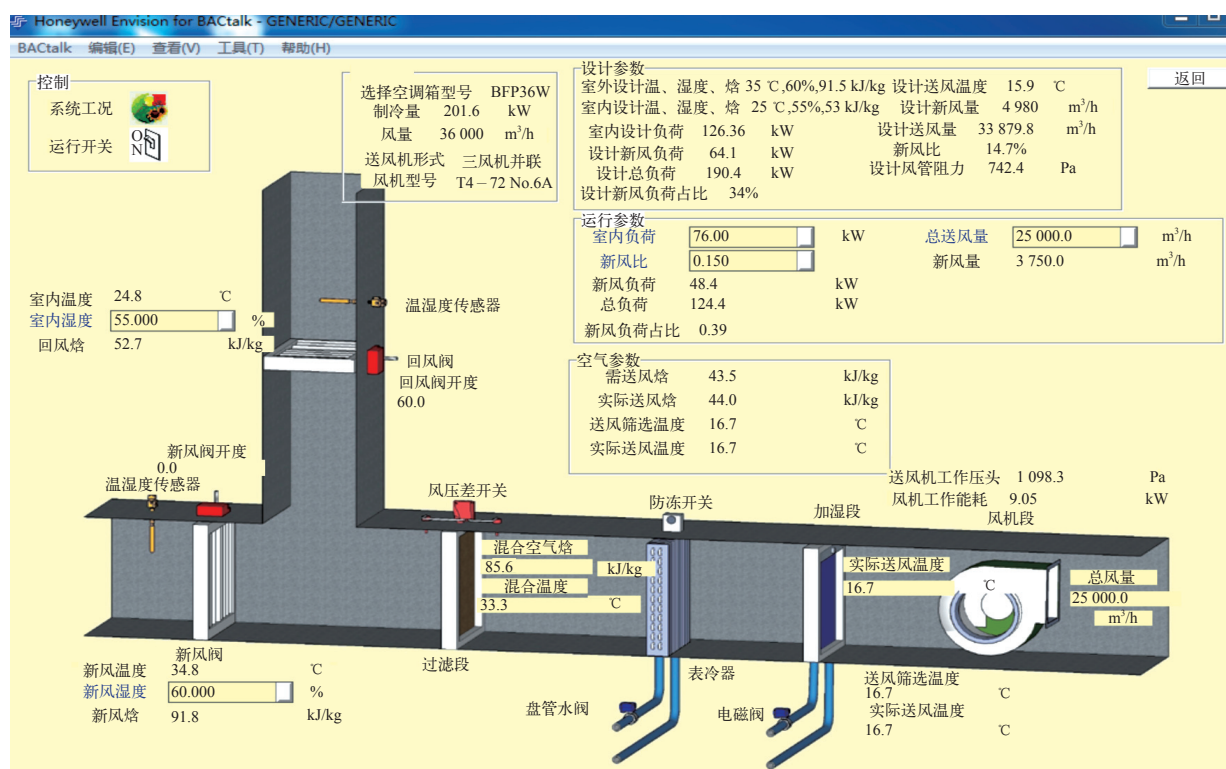


图15 模拟仿真真人机界面

- 工业大学出版社, 2012.
- [2] 陆亚俊, 马最良, 邹平华, 等. 暖通空调 [M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] 王源. 暖通空调自动控制综合系统的研制 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- [4] 任君, 别舒, 牟璇. 办公建筑空调系统中全空气系统的节能改造 [J]. 工程建设与设计, 2015 (3): 66-68.
- [5] 翟力, 黄文美, 宋桂英. 智能楼宇中央空调节能控制研究 [J]. 电气应用, 2011, 30 (18): 32-34.
- [6] Ze Qin Liu, Zhen Jing Wu. The study of simulation on variable-frequency air conditioning systems adopted by control strategy of hybrid automata [J]. Advanced Materials Research, 2014, 945-949: 2629-2632.
- [7] 刘静纨, 张少军, 王睿. 楼宇自控网络模式及优化组态选择 [J]. 电气应用, 2014, 33 (2): 36-38.
- [8] 李锋博. 基于Web的智能建筑系统集成设计与应用 [J]. 电气应用, 2009, 28 (7): 38-41.
- [9] 贾坚萍, 孙浩. 基于BACnet 协议的设备间互操作性研究 [J]. Intelligent Building & City Information, 2010 (1): 49-55.
- [10] 张义, 文亦书. BACnet通用语言-BACnet标准中的对象、属性、服务 [J]. 工程设计CAD与智能建筑, 2001 (8): 13-17.
- [11] 豊田 武二. The outline of open BACS by BACnet and ISO standard [J]. The Journal of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, 2010, 30 (4).
- [12] 桂仁才, 张少军, 朱文生, 等. Honeywell艾顿楼控系统DDC程序的编写实践 [J]. 电气应用, 2012, 31 (14): 36-39.
- [13] 建筑工程常用数据系列手册编写组. 暖通空调常用数据手册 [M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [14] 付祥钊, 王岳人, 王元, 等. 流体输配管网 [M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

(收稿日期: 2017-01-13) EA