

基于BACnet的空调冷源系统仿真实验台开发及应用研究

分析了当前最常见的空调冷源系统能耗，建立了冷水机组能耗模型，并结合热力学第一、第二定律等理论，建立了空调冷源系统仿真实验台的控制模型，然后将该模型输入到仿真实验台的BACnet系统中，从而设计出空调冷源系统仿真实验台。该仿真实验台功能全面，开放性强，可应用于空调冷源系统优化研究及教学实训。

肖 聪 刘成刚 曹正杰/苏州科技大学环境科学与工程学院

0 引言

常见的空调冷源系统主要包括冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔以及空调系统用户侧的冷水盘管等设备，如图1所示，系统各设备之间相互联系又相互制约。如何控制空调冷源系统稳定高效运行一直是学术界研究的热点，而日趋严重的能源危机使人们的眼光转移到空调系统的节能性上^[1]。空调系统的节能优化应运而生，当然这种节能性要以保证系统稳定性为大前提^[2]。

然而在基于真实空调系统进行节能优化时，受限于系统各设备的性能及运行状况等原因，系统各运行参数不能随意调整，同时实际空调系统又具有非线性和滞后性的特点，从而使得空调系统的节能优化分析受到一定制约。因此，本文参考了一些基于实际空调系统的实验台设计方法以及控制策略^[3-7]，设计出一种基于楼宇自动控制网络数据通信协议（Data Communication Protocol for Building Automation and Control Network, BACnet）系统的空调冷源系统仿真实验台，该仿真实验台比较贴近

真实的空调冷源系统，并且基于其仿真实验台的特性，实验台各参数可随意调整，直至模拟出最佳的空调系统运行策略，从而为实际空调系统的优化分析提供参考。同时该仿真实验台可用作教学实训，由于在基于真实的空调系统进行实训时，其设备多，系统大，学员需要到多个地方才能了解到整个空调系统，而本文所设计的仿真实验台克服了以上缺点，将整个空调冷源系统呈现在学员面前，为学员做系统的介绍和全面的演示。并且能将演示数据通过计算机监控授权分享到各计算机，大大节约教学实训成本，实现了对学员动手能力和综合素质的培养^[8]，同时提高了教学实训效率。



肖 聪/硕士研究生

关键词/Keywords

BACnet系统 ·
空调冷源系统 ·
仿真实验台 ·
开发应用 ·

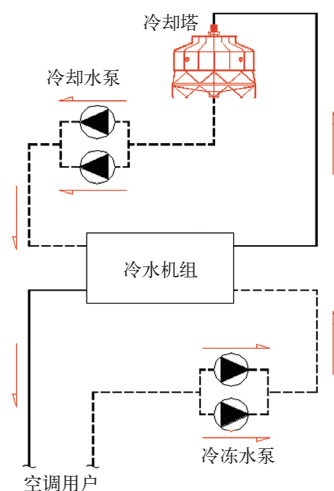


图1 空调冷源系统示意

1 BACnet系统介绍

本文所设计的空调冷源系统仿真实验台所使用的楼宇监控系统为BACnet，它是一种专门为楼宇设备的集成控制制定的数据通信协议，是为了规范楼

楼宇空调系统、给排水系统和供配电系统等楼宇设备自动控制系统之间的互连，使之具有开放性和互操作性的数据通信统一标准协议^[9]。使用该BACnet系统后，通过网络监控授权，即可在计算机上的监控系统中看到实验台的实时运行数据，也可通过计算机上的监控系统完成实验台的起停等操作。

2 空调冷源系统仿真实验台的开发

空调冷源系统示意图见图1。在空调冷源系统中主要设备包括冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔以及空调系统用户侧的冷水盘管等设备，并且还包含了许多控制阀门。在进行仿真实验台设计时，需将这些设备都包含进去，并施加一定的控制。

2.1 实验台硬件设计

本实验台可编程逻辑控制器（PLC）主要采用PLC1600和PLC853，这两个控制器之间可通过信号转换模块相互联系，其中PLC1600控制器主要用于如图2所示的电控箱面板的控制，其主要控制实

验台的起停，手自动运行等。

而PLC853控制器主要用于运行面板的控制，在该控制器中，采用了7个AI输入点，如表1所示。其输入值的大小均由运行面板上的旋钮直接控制。除此之外，在运行面板上还设置了冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、补水泵以及冷却塔的故障模拟按钮，用于模拟在某设备出故障时，其他相应设备自动关闭，以保证系统安全运行。

表1 PLC853控制器输入点点位表

输入点	监控功能描述	输入点	监控功能描述
AI-1	冷冻水供水温度	AI-5	冷负荷率
AI-2	冷冻水回水温度	AI-6	冷冻水压力
AI-3	冷却水供水温度	AI-7	冷冻水压差
AI-4	冷却水回水温度		

2.2 实验台控制逻辑设计

冷源系统实验台控制设计中，包含了多个方面的设计：系统中各设备的起停顺序控制；各阀门的控制；各变频设备的控制；各参数之间的关系控制等。通过这些控制手段，可使设计出的仿真实验台更贴近于实际空调冷源系统。

2.2.1 起停及故障模拟控制

实验台中各设备的自动起停顺序控制逻辑主要为：系统启动时，按下系统开关，60 s后，冷却水泵和冷却塔风机开；170 s时，冷冻水泵开；190 s时，冷水机组开。而当系统关机时，按下系统开关，冷水机组即时关闭；60 s时，冷却水泵和冷却塔风机关；90 s时，冷冻水泵关。系统以此完成开机和关机的程序^[10]。

故障模拟控制逻辑主要为：冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔风机中只要有一台及以上设备出现故障时，冷源系统不能启动；在运行过程中任意一台出现故障时，冷源系统自动关闭。另外补水泵出现故障时，补水泵自动关闭并报警，但不影响系统运行。

2.2.2 系统运行控制

系统运行控制包括了系统中各模拟量数值大小的运算方法以及各模拟量之间的逻辑关系控制，通过这些控制逻辑使得该仿真实验台仿真出

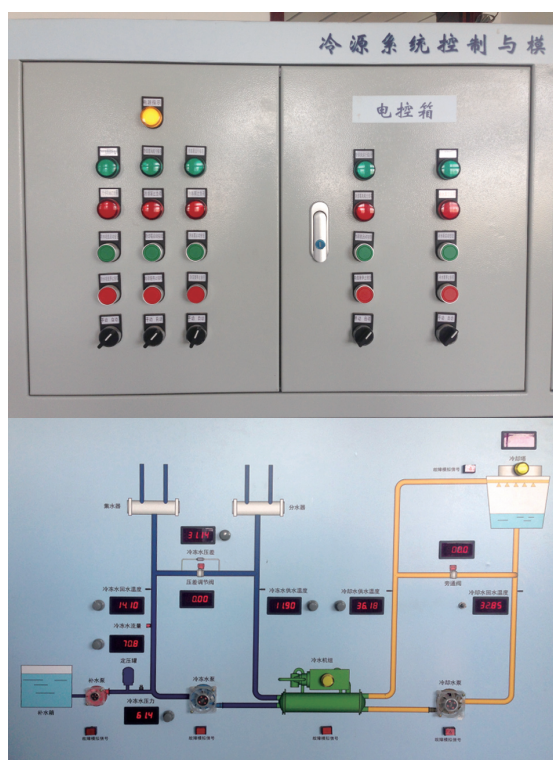


图2 电控箱及运行面板示意图

来的数值更贴近于实际空调冷源系统运行数据。各控制逻辑中的具体计算方法如下。

(1) 冷负荷计算

在本实验台的控制中，冷负荷的大小是由冷负荷率输入点的旋钮进行控制的，在进行仿真模拟时，首先手动输入冷水机组的额定制冷量的数值（在本次模拟中，机组额定制冷量为352 kW），然后乘以负荷率即可得出冷水机组的实际制冷量，在此忽略各种机组和管道能量损失，认为冷水机组实际制冷量约等于冷负荷，其逻辑控制图如图3所示。

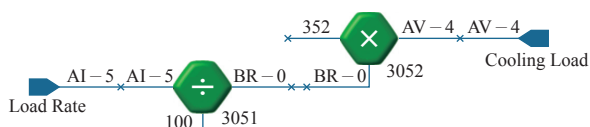


图3 冷负荷计算逻辑控制图

(2) COP计算

ASHRAE Primary Toolkit建立了一系列制冷机组的稳态模型，并提出对于建筑能耗模拟，理论与实验相结合的半经验模型更为合适^[11]。J. M. Gordon从监测制冷机组的运行数据入手，将数据经过归纳、分析和总结，提出了一种半经验模型。在该模型中认为制冷机COP的倒数和制冷量 Q_c 的倒数可以描述成简单的线性关系，其斜率由该制冷机的不可逆机械损失决定，其纵轴上的截距由换热器的性能决定^[12]。其在经过一系列推算及测试后，得出了一台额定制冷量为352 kW的离心式

制冷机COP倒数与制冷量 Q_c 倒数的线性关系。

$$\frac{1}{\text{COP}} = 0.189 + 26.3 \frac{1}{Q_c} \quad (1)$$

式中，COP为冷水机组能效比； Q_c 为冷水机组的制冷量，kW。

本文采用了该半经验模型，并将其输入到冷源系统仿真实验台中，以此建立制冷机的COP与制冷量 Q_c 之间的关系，在已知所需制冷量 Q_c 的条件下，即可计算出制冷机COP的大小。其控制逻辑图如图4所示。

(3) 制冷机输入电耗计算

依据COP的定义^[13]

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (2)$$

式中， P_{in} 为冷水机组输入功率，kW。

结合上文的计算，即可算出制冷机的输入电耗 P_{in} ，其控制逻辑图如图5所示。

(4) 冷却水流量计算

结合热力学第一定律^[13]

$$Q_c + P_{in} - Q_e = 0 \quad (3)$$

式中， Q_e 为冷凝器侧排热量，kW。

依据式（3）即可算出冷凝器侧的排热量 Q_e ，然后依据公式

$$Q_e = cm_c(t_{c1} - t_{c2}) \quad (4)$$

式中， c 为水的比热； m_c 为冷却水流量， m^3/h ； t_{c1} 为冷却水出水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{c2} 为冷却水进水温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

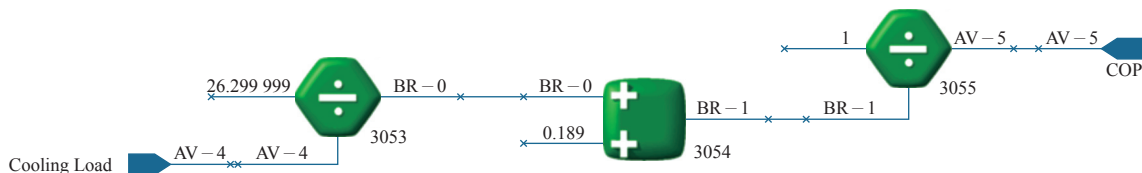


图4 COP计算逻辑图

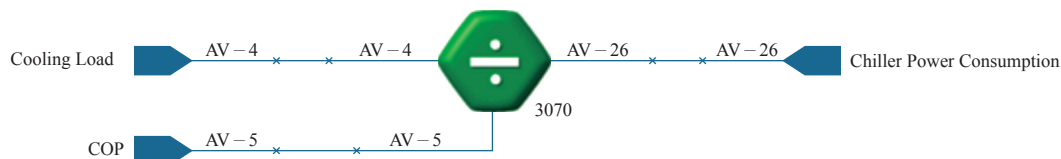


图5 制冷机输入电耗 P_{in} 计算逻辑图

在旋转实验台运行面板上的旋钮输入冷却水供水、回水温度的条件下即可计算出冷却水流量，其控制逻辑图如图6所示。

(5) 冷冻水流量计算

冷却水流量的计算公式为

$$Q_e = cm_e(t_{e1} - t_{e2}) \quad (5)$$

式中, m_e 为冷冻水流量, m^3/h ; t_{e1} 为冷冻水进水温

度, $^{\circ}\text{C}$; t_{e2} 为冷冻水出水温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

其控制逻辑图如图7所示。

通过以上步骤的计算流程即可形成一整套的实验台控制逻辑, 仿真计算出空调冷源系统优化运行所需数据, 各数据可实时传输到如图8所示的计算机控制界面上, 实现实验台数据远程实时监控, 同时也可在该计算机界面上实现仿真实验台

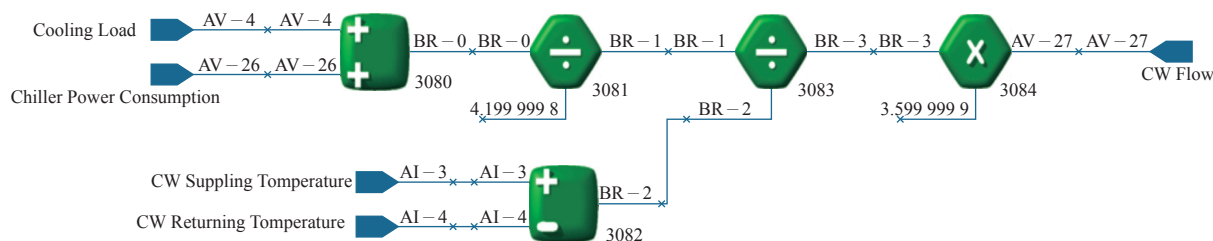


图6 冷却水流量计算逻辑图

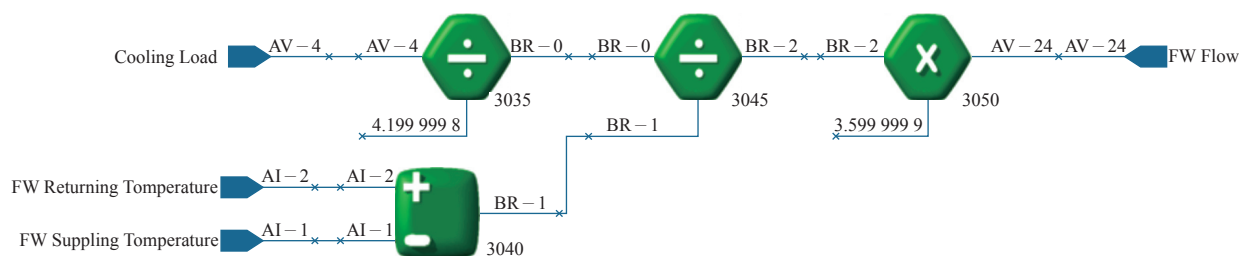


图7 冷冻水流量计算逻辑图

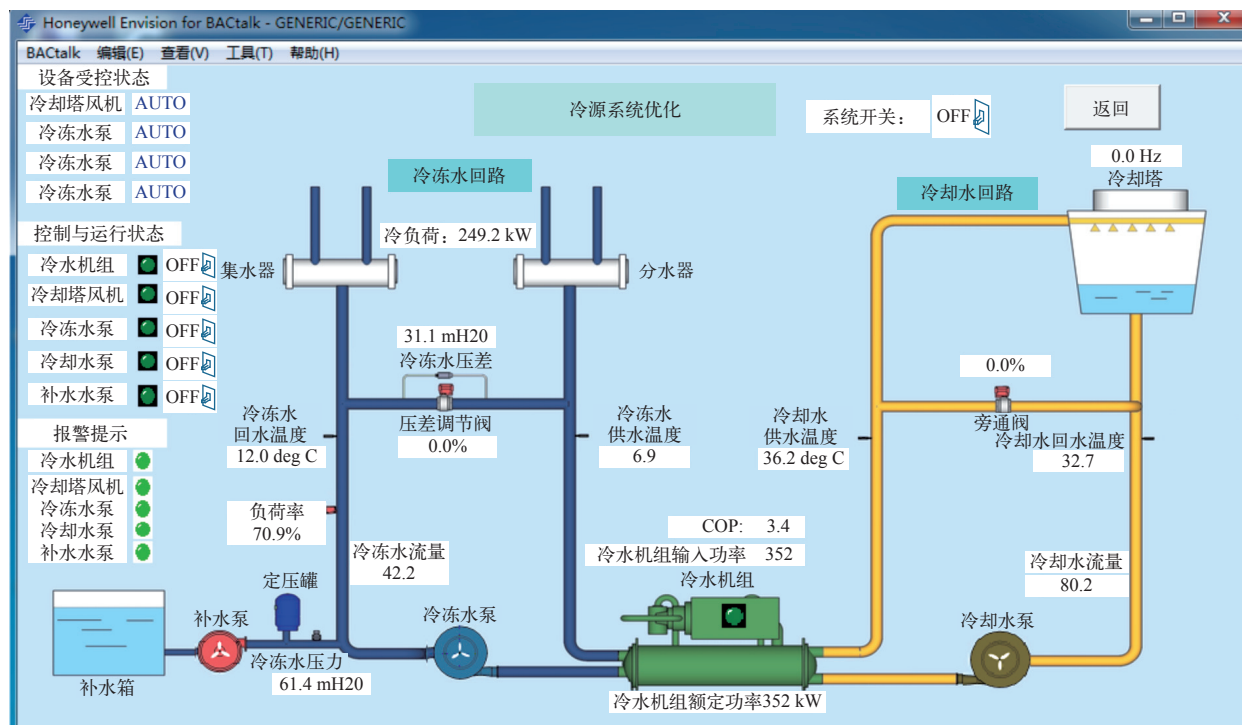


图8 仿真实验台控制界面图

的起停控制。

3 空调冷源系统仿真实验台的应用

该实验台可用于空调冷源系统的优化研究，整个模拟实验台的各模拟参数之间相互关联，具有较好的逻辑性，实验台也比较贴近真实冷源系统，能为冷源系统的运行优化提供参考。在针对实际空调冷源系统进行优化时，该实验台可模拟出实际空调冷源系统的各运行工况，即依据实际冷源系统的厂家样本数据和部分运行数据拟合出制冷机COP的倒数和制冷量 Q_0 的倒数的简单线性关系，并输入到BACnet系统中，然后进行模拟实验，模拟出实际空调冷源系统在各个工况下能耗。在对模拟数据分析与总结的基础上，形成实际空调冷源系统的最佳控制策略，从而达到节约空调冷源系统电耗的目的。

另外该实验台用作教学实训时，可大大节约实训成本，提高实训效率，同时学员通过操作该BACnet系统，可对楼宇自控系统有初步认识，方便以后深入学习。

4 结束语

本文所开发的基于BACnet的空调冷源系统实验台能为工程实践提供一定参考,而不再是只能用于教学实训,相信通过之后不断改进,该空调冷源系统仿真实验台的模拟数据会更贴近实际冷源系统的运行数据,从而为工程实践提供更可靠的参考,为教学实训提供更全面的平台。

参考文献

- [1] 张东海, 高蓬辉. 太阳能与地源热泵耦合系统实验台设计 [J]. 实验技术与管理, 2011, 28 (9): 60-61.
- [2] 燕达, 夏建军, 刘烨, 等. 建筑环境设计模拟分析

软件DeST [J]. 暖通空调, 2005, 35 (4): 56-64.

- [3] 梁辉宏, 史步海, 龚冠祥. 中央空调变流量控制系统探讨[J]. 电气应用, 2009, 28(15): 36-39.
- [4] 张东海, 黄炜, 张建功, 等. 暖通空调多功能综合实验台研制[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(12): 87-90.
- [5] 张东海, 魏京胜, 黄炜, 等. 气流组织综合实验装置设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(11): 70-73.
- [6] Kusiak J A, Li M Y, Tang R. Modeling and optimization of HVAC energy consumption[J]. Applied Energy, 2010, 87(10): 3092-3102.
- [7] Tashtoush B, Molhim M, Al-Rousan M. Dynamic model of an HVAC system for control analysis[J]. Energy, 2005, 30(10): 1729-1745.
- [8] 仇润鹤, 方建安, 唐明浩, 等. 建立综合实验平台 培养学生创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2006, 25(2): 141-144.
- [9] 孙育英. 智能建筑中冷源系统控制实用程序研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002.
- [10] 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.
- [11] Jean Pascal Bourdouxhe, Marc Gordent, Jean Leburn et al. A toolkit for primary HVAC system energy calculation[C]. American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1994.
- [12] JM Gordon, Kim Choon Ng, Hui Tong Chua. Centrifugal chillers: thermodynamic modeling and a diagnostic case study[J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(4): 253-257.
- [13] 廉乐明, 谭羽飞, 吴家正, 等. 工程热力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

(收稿日期: 2016-04-28) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告