

[文章编号] 1002-8528(2008)06-0034-06

基于主成分分析法的 空调系统传感器自动故障诊断

肖 赋, 王盛卫, 徐新华, 葛高明(香港理工大学 屋宇设备工程学系, 香港)

[摘 要] 由于各种各样的故障, 空调系统在整个建筑生命周期内其性能很少能够达到设计目标。为了改善空调系统的性能, 在整个建筑生命周期内对其进行定期或连续检测是很必要的。随着空调系统的日益复杂化和对快速可靠检测的需求, 人工检测已远远不能满足要求, 这使自动检测成为了必须。目前国际上研究建筑空调系统自动检测的技术很热门, 但较少考虑空调系统传感器的准确性。传感器读数准确性是空调系统可靠控制和检测的先决条件。本文提出了一种基于主成分分析法的鲁棒故障诊断策略, 该策略可以有效地对空气处理单元中的传感器进行自动检测。结合建筑自动化系统, 该诊断策略可以实现空调系统传感器故障的在线检测。

[关键词] 自动检测; 传感器; 空气处理单元; 故障诊断; 主成分分析

[中图分类号] TU831.4 [文献标识码] A

Automatic Commissioning of AHU Sensors Using Principle Component Analysis

XIAO Fu, WANG Sheng-wei, XU Xin-hua, GE Gaoming

(Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

[Abstract] HVAC systems seldom perform as intended under the original design concept. As a quality oriented process, commissioning should be conducted regularly or continuously throughout the building life cycle. Considering labor, time and cost consumed by manual commissioning, automatic commissioning is more competent for life cycle commissioning. This paper investigates existing techniques for implementing automatic commissioning. It is found that, although many efforts have been put into developing automatic commissioning techniques, sensor validation was always overlooked. Accurate sensor measurements are prerequisite to reliable commissioning. This paper presents a diagnostic tool for automatic commissioning of sensors in typical air handling units (AHU). The diagnostic tool implements a robust sensor fault detection and diagnosis (FDD) strategy based on the principal component analysis (PCA) method. The diagnostic tool is integrated in a real building automation system (BAS) for automatic commissioning of AHU sensors in a simulated building. The application of automatic online commissioning of AHU sensors is demonstrated.

[Keywords] automatic commissioning, sensor, air handling unit (AHU), fault detection and diagnosis (FDD), principle component analysis (PCA)

1 引 言

由于不合理的设备选型和安装、不适当的设备维护及系统设备的老化、性能降低等原因, 建筑空调系统很少能够按最初的设计意图运行。对空调系统进行检测是一种有效的方法, 它可以提高系统在建筑生命周期内的运行性能。

早期的检测主要指在建筑空调系统投入运行前进行的一次性人工检测。近年来系统检测的定义不

断更新。根据 ASHRAE 手册 1-1996 定义^[1], 系统检测是一个贯穿于整个建筑生命周期的过程, 应包括对系统设计、安装、功能调试以及运行各阶段的检测。这个观念在北美和欧洲已被广泛接受。IEA (International Energy Agency)、ASHRAE (American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers)、ARTI (Air conditioning and Refrigeration Technology Institute)、CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineering)、CSTB (French National Center for Building Science and Technology)、NIST (National Institute of Standards and Technology)、PECI (Portland Energy Conservation, Inc.) 等国际组织都非

[收稿日期] 2007-10-19

[作者简介] 肖 赋(1977), 女, 博士, 讲师

[联系方式] befx@polyu.edu.hk

常重视研究和开发建筑系统检测技术及工具。在香港, HKBCC (Hong Kong Building Commissioning Centre) 也正致力于改进空调系统的检测技术^[2]。

随着现代建筑日益复杂化及对可靠的系统检测需求不断增长, 原来所采用的人工检测已远远达不到要求。在这种情况下, 研究和开发系统自动检测技术和工具成为必须。当前在建筑中广泛应用的建筑自动化系统为自动检测的实现提供了很好的平台, 虽然建筑空调系统检测还远远未达到完全自动化的程度^[3], 但系统自动检测技术的研究与开发已取得了丰硕的成果。

2 建筑空调系统自动检测概述

系统检测包括对空调系统在设计、安装及运行等各阶段进行的检测。当前对系统自动检测的工作主要包括以下 3 方面: 系统信息自动化管理、系统功能自动调试以及系统性能的自动监控和故障自动诊断。

2.1 基于计算机的系统信息管理

为了测试、维护和改进建筑空调系统, 与系统检测有关的系统信息需要不断保存并更新。因此, 信息管理系统应追踪和记录整个生命周期内系统中的所有变化。精确、连贯的信息对自动检测是很重要的, 它能有效地减少检测时的人力、物力, 并有助于提高系统检测的可靠性。ASHRAE、LBNL 和 PECI 等组织都对系统信息管理技术进行了研究与开发。

早在 1996 年, LBNL 就开始致力于建筑生命周期内空调系统信息管理系统的研发^[4]。此研究为基于计算机的信息管理提供了一个基本框架, 很多后来的研究与开发都是基于此进行的。同时由 LBNL 和 PECI^[5] 共同开发的一个信息管理软件 (Design Intent Tool), 可以记录设计过程中的各种设计数据和目标, 能够让诊断人员、设备操作人员及业主等清楚地知道建筑及其子系统的运行目标。ASHRAE TRP 1032^[6] 也开发了一个数学模型来管理 2 个空调子系统的的功能, 并在开发该数学模型的过程中, 提出了互操作这一重要概念, 系统互操作指在保持信息独特的性能和关联性的同时, 允许数据被不同的平台和用户共享^[8,9]。

总之, 自动化信息管理是建筑系统诊断自动化的前提, 信息管理工具与其它诊断工具间的互操作也非常关键。

2.2 系统功能自动调试

功能调试是系统测试与检测的重要部分。系统功能调试包括对制冷机、冷却塔、风机、水泵等系统元件的调试, 以及对控制系统、建筑智能系统和各控制环路的调试。因为空调系统是一个全年运行的系统, 所以它应该包括对不同季节和各种运行工况下的系统调试。然而, 由于调试方案和调试现场等的局限性, 要实现这些调试是很困难的。因此, 功能调试通常在假定的操作状态或通过修改设定值与控制参数来进行测试。通过观测系统的响应情况并与设计目标进行比较, 可以发现并修正系统的性能退化。常规的人工检测费时费力, 不适合复杂系统的调试。建筑自动化系统作为一个经济且有效的功能调试平台, 可以方便地改变设定值、控制信号及 PID 控制器参数等系统参数, 有利于实现自动调试。

目前, 功能调试在系统的自动检测中得到了越来越多的应用。文献[10]提出了一种基于模型的方法来对空气处理单元进行自动性能调试, 并分别采用了开环与闭环 2 种方法进行测试。开环测试主要是为了检测系统是否在其操作范围内正常运行; 闭环测试则用来检测设备与控制器间的耦合作用。这种方法能有效地检测出风量末端、风机及冷却盘管等子系统的故障。

此外, 功能调试结果需要记录在信息管理数据库中, 由于实际运行中存在的问题, 系统实际运行性能与系统设计阶段的预测通常是有差别的。

2.3 系统性能自动监控及自动故障诊断

由于空调系统元部件的老化与不恰当的维护, 空调系统部件有时会部分失效甚至完全失效。理论研究与实验调查表明, 通过排除故障及优化控制, 建筑能耗可降低 20% ~ 30%^[11]。性能自动监控和自动故障诊断技术在自动检测过程中正是用来实时发现并修正出现的故障。

性能监控是在正常运行情况下检测系统的各项性能指标。LBNL 组织开发的信息监控与管理系统 (Information Management Building System), 能有效地监控系统性能, 并具有一定的自动故障诊断功能^[12,13]。

系统故障诊断的方法多种多样, 根据是否采用模型可分为 2 大类: 基于模型的故障诊断和非模型的故障诊断。非模型的故障诊断方法不需对系统建立数学和物理模型, 比如采用元件冗余法或噪声分析法来检测故障的发生^[14,15], 其故障诊断方法简单,

可以避免建模过程中遇到的困难,但对于大型、复杂的系统,却并不适用。基于模型的故障诊断方法需要建立系统在正常条件、甚至已知的故障条件下的系统模型,利用这些模型实时地对系统运行进行预测,将预测的各参数与实际测量的各参数相比较,二者的偏差作为分类器的输入而进行故障分类。用于故障诊断的参考模型通常有纯物理模型^[16]、灰色模型^[17]和黑色模型(或纯数学模型,包括神经网络法^[18]和统计模型法^[19])。参考模型的误差大小对故障诊断的准确性有较大的影响,因此,要提高系统故障诊断的可靠性,必须要尽可能的减少模型的误差。

目前有不少自动故障诊断工具已开发或正在开发,比如已开发的 CITE-AHU 工具可以用来自动检测空气处理单元的故障^[20]。虽然空调系统故障诊断的策略与工具很多,但目前还不能实现用某一种方法就可以有效地检测出空调系统中所有的故障^[21-22]。因此,自动检测技术需要综合不同的故障诊断方法。

通过调查和研究发现,尽管建筑空调系统自动检测的方法与工具很多,但大多数的研究都集中于系统部件的故障诊断,很少有故障诊断方法考虑了传感器的可靠性。其实,传感器的可靠性对空调系统的控制和系统的最优运行起着至关重要的作用,同时传感器的读数也是进行系统部件故障诊断的根据。如果传感器的测量有偏差而不能反映测量数据,那么以这些测量数据为基础的部件故障诊断很有可能是误诊。本文提出了一种针对空调系统传感器的鲁棒故障诊断策略,并在建筑智能系统上开发了相应的软件包来实现空气处理单元中传感器典型故障的自动检测。

3 基于主成分分析法的空调系统传感器故障检测

空调控制系统是一个典型的多变量控制过程,它包括对温度、流量以及压力等参数的监测与控制。由于能量、质量守恒准则和自动反馈控制及其它控制策略(比如 DCV 策略^[23]),空调系统的控制变量或参数间存在着复杂的关联关系。当传感器故障存在时,必然会影响到各参数间的这种相关性,故可以通过检测它们之间的相关性来判断可能的传感器故障。除了采用物理或数学模型来描述各参数间的关联关系外,也可采用统计方法来描述。统计方法通

通过对正常数据进行统计分析,得到正常运行情况下各参数间的关系以及它们的正常变化范围,当某个测量数据导致相关性超出正常范围时,通常就意味着有故障发生。主成分分析方法就是一种基于统计学的故障诊断方法。

3.1 主成分分析法(PCA)简介

主成分分析法是一种多元统计分析方法。其基本数学原理如下:假定 x 是包含有 m 个变量的向量,矩阵 X 是由 n 个 x 样本所组成的 1 个矩阵。根据 PCA 方法,矩阵 X 可分解为:

$$X = \bar{X} + E \quad (\bar{X} \perp E) \quad (1)$$

式中, \bar{X} 为主成分子空间,它保持了系统中变量间的绝大部分相关性; E 为残差子空间,反映了不确定的干扰或噪音的影响。 \bar{X} 与 E 可分别由式(2)、(3)表示:

$$\bar{X} = PP^T X \quad (2)$$

$$E = (I - PP^T) X \quad (3)$$

式中, P 为荷载矩阵($P \in R^{m \times k}$, $k < m$),可由系统在正常情况下运行的一系列数据得到^[24]。此外 P 的列向量分别是 X 的协方差阵的前 k 个最大特征值所对应的特征向量; X 的协方差阵可用下式进行估计:

$$Cov = X^T X / (n - 1) \quad (4)$$

上述为主成分分析法的建模过程。由此,在处理一个新测量数据样本时,可将该样本根据式(5)分解成 2 部分:

$$x_{new} = \hat{x}_{new} + e \quad (5)$$

其中,

$$\hat{x}_{new} = C_x x_{new} = PP^T x_{new} \quad (6)$$

$$e = x_{new} - \hat{x}_{new} = (I - PP^T) x_{new} \quad (7)$$

$$C_x = P(P^T P)^{-1} P^T = PP^T \quad (8)$$

式中, \hat{x}_{new} 是测量向量在主成分子空间上的投影; e 为测量向量在残差子空间上的投影; C_x 为其对应的投影矩阵。

在故障诊断过程中,用残差平方和即 Q -统计值 (Q -statistic)^[25-26] 作为评价指标来判断故障是否发生。 Q -统计值可以采用式(9)来表示:

$$Q\text{-statistic} = \|e\|^2 = \|(I - PP^T) x_{new}\|^2 \leq Q_\alpha \quad (9)$$

式中, Q_α 为 Q -统计值的阈值,可通过统计分析得到。当 Q -统计值 $< Q_\alpha$ 时,认为系统运行正常;当

Q -统计值 $> Q_\alpha$ 时,系统可能出现故障,此时可通过 Q -分布图来判断具体是哪一个传感器最有可能出现故障。通常而言,对 Q -统计值贡献(η)最大的那个传感器最有可能出现故障。

$$\eta_i = \frac{\|e_i\|^2}{Q\text{-statistic}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

3.2 PCA 方法在 AHU 传感器故障诊断中的应用

图 1 给出了 1 个典型 VAV 空调系统的空气处理单元控制原理图。该系统中共用了 9 个传感器,它们是 VAV 系统各自动控制环路所必须的。其中,送风静压控制环路通过调节送风机的转速来达到送风静压点的静压值;送风温度控制环路通过调节冷冻水流量来保证送风温度设定值;回风和新风温湿度的控制是为了采用经济通风 (Economizer control)^[23] 等控制策略。系统中各传感器的测量质量对系统的控制可靠性、AHU 的能效以及室内空气质量 (IAQ) 等都有很大的影响。基于 PCA 方法的故障检测方法可以检测这 9 个传感器是否出现故障^[9]。通过仿真测试发现,当把所有 9 个传感器读数构成一个测量空间(X)时,基于这 9 个传感器读数所建立的 PCA 模型由于所有变量间关联性变化较大,导致模型 Q -统计值的阈值较大,从而造成 PCA 模型对较弱小的传感器故障不敏感。为了提高 PCA 模型对传感器故障的敏感度,本文有选择性地利用部分系统变量来建立 PCA 模型以增强它们之

间的相关性。

从空气处理过程能量守恒的角度,可以选择 9 个变量来建立系统的 PCA 模型,它们分别是:新风流量(M_{fre})、送风流量(M_{sup})、回风流量(M_{rtn})、新风温度(T_{fre})、送风温度(T_{sup})、回风温度(T_{rtn})、新风湿度(h_{fre})、回风湿度(h_{rtn})以及冷冻水阀门的控制信号(C_w)。因为 C_w 在很大程度上代表了冷却盘管的热交换量,它能提高 PCA 模型对传感器故障的敏感度。

本文利用基于 TRNSYS 平台的仿真器来验证基于 PCA 的故障诊断方法在如图 1 所示的 VAV 空调系统中对传感器故障诊断的性能^[27]。图 2、3 显示了 12:30 时,在回风湿度传感器读数发生 0.001 kg/kg 干空气偏差的故障情况下使用 PCA 模型检测到的结果。当故障发生时, Q -统计值明显超过了它的阈值,并且回风湿度的 Q 贡献量远远大于其它测量变量。因此,PCA 方法能有效地检测和分离传感器的故障。

3.3 基于 BAS 系统的在线自动检测工具开发

建筑智能系统 (BAS) 为空调系统的在线自动检测与诊断提供了一个方便的平台。BAS 中央管理服务能连续地采集传感器的读数和直接数字控制器的控制信号等数据,也能让故障诊断工具等应用软件通过信息交换界面,比如 DDE、OPC、ActiveX 等,方便地获取采集到的数据。同时, BAS 系统能为用户

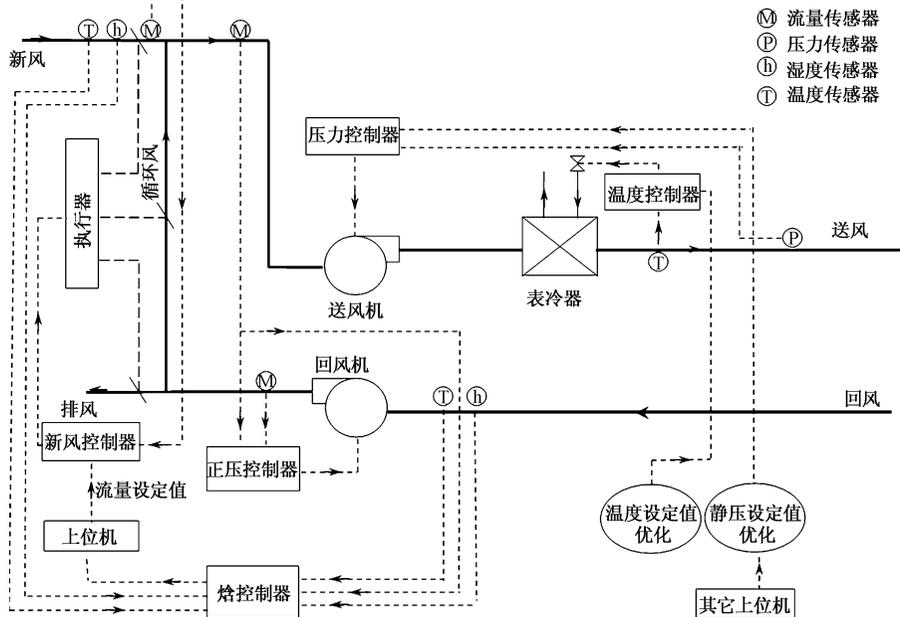


图 1 VAV 空调系统空气处理单元控制原理图

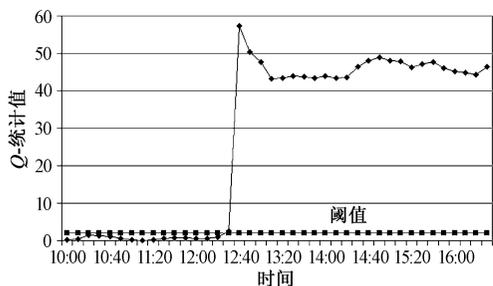


图 2 使用 Q-统计值时回风湿度传感器的故障检测

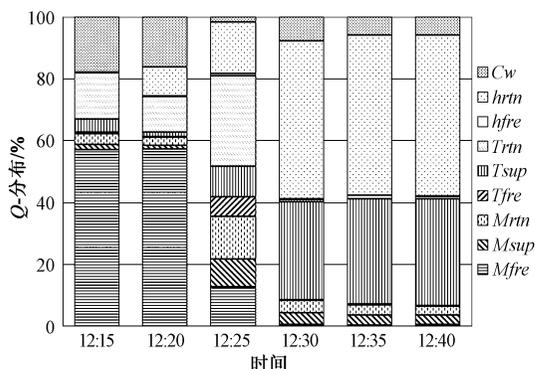


图 3 使用 Q-分布图时对回风湿度传感器故障的分离

提供友好的界面来显示传感器的故障诊断结果。在本研究中, 基于 PCA 的故障诊断软件包已在香港理工大学智能建筑实验室(如图 4 所示)开发出来, 图 5 显示了该软件包与 BAS 的信息交换示意图^[28]。BAS 上的控制器负责收集 HVAC 系统中传感器的测量值, 采集的测量值和控制信号都保存在 BAS 中央管理器数据库内。故障诊断工具通过界面检索到这些测量数据和控制信号, 然后进行故障诊断, 并将诊断结果通过相同的界面返回给 BAS 管理软件来通知操作人员。



图 4 香港理工大学智能建筑实验室

在实际工程中, 很多故障都是不允许人为地引入到真实系统中的, 因为它们会影响系统的正常运转

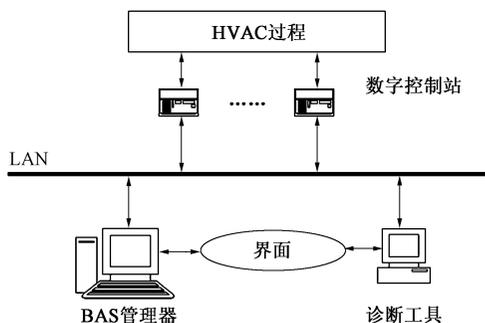


图 5 基于 BAS 系统的故障诊断

行, 甚至会损坏设备。为了模拟这些故障并测试故障诊断工具, 仿真方法是方便有效的。在香港理工大学智能建筑实验室中, 用一个基于 TRNSYS 的虚拟建筑系统代替真实建筑系统, 可以方便地引入各种故障并进行故障诊断, 虚拟建筑与 BAS 系统的连接如图 6 所示。

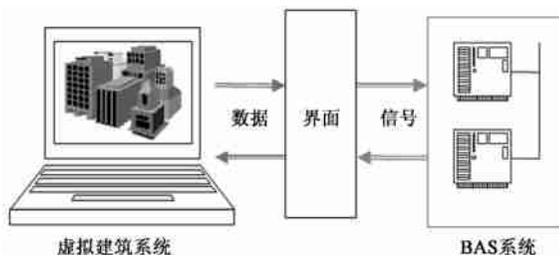


图 6 虚拟建筑系统与 BAS 系统的连接图

当将故障诊断工具安装到 BAS 后, 可以对所仿真的建筑空调系统空气处理过程进行在线自动检测。图 7、8 显示了在 Windows 界面内的检测过程和记录。空气处理过程的数据能够被实时监控, 一旦有传感器故障被诊断出来, 报警灯会变红并不停地闪烁来提醒操作人员, 同时故障报警信息也会在 Windows 窗口上显示。

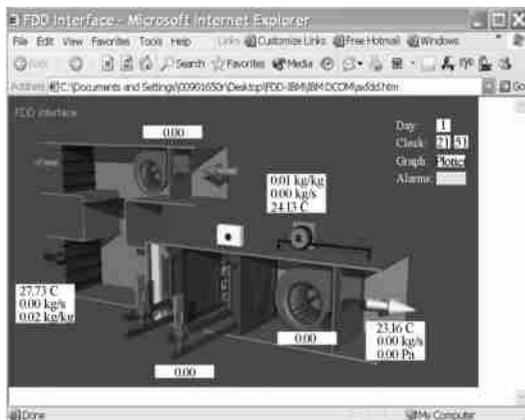


图 7 自动故障诊断界面

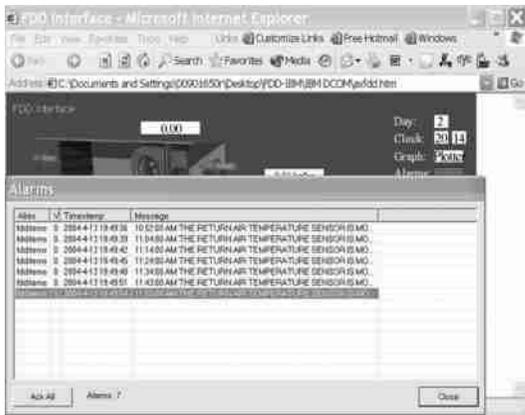


图8 故障信息显示界面

4 总 结

通过在整个建筑生命周期内对建筑系统进行定期或连续检测,建筑系统的性能可以得到极大的改进,比如建筑室内环境品质的提高、设备使用寿命的延长以及建筑能耗节省等。然而,由于人工检测费时、费力、可靠性低以及缺少有效的系统信息管理和检测工具,生命周期内的系统检测很少能真正实现。为了实现对建筑系统在建筑生命周期内的自动检测,建筑系统自动信息管理、自动功能调试以及自动系统性能监控与故障自动诊断都是必须的。BAS为系统自动检测提供了一个方便的平台,随着其在建筑中的广泛应用,许多科研机构都已进行了基于BAS平台上开发有效的空调系统自动检测工具包的研究。尽管目前已存在一些有用的系统自动监测工具,但它们通常都忽视了对传感器的检测,而传感器读数的准确性是进行可靠的系统自动控制 and 检测的前提。本文提出了一种基于主成分分析法的传感器自动故障诊断工具,并实现了在真实的BAS上对模拟建筑中空调处理器的传感器进行故障诊断。结果显示,它是一种有效且经济的自动故障检测工具。

[参考文献]

[1] ASHRAE Guideline F 1996: The HVAC Commissioning Process [R]. ISSN: 1049-894X, ASHRAE, Atlanta, US, 1996.

[2] A Practice Guide to Building Commissioning Management for Hong Kong (Practice Guide M1) [R]. Hong Kong Building Commissioning Centre (HKBCC), 2006.

[3] Building Commissioning Market Industry Analysis [R]. National Energy Management Institute (NEMI), USA, 2001.

[4] Stum K. Commissioning tools for managing design, construction and implementation [C]. Proceedings of 8th National Conference of Building Commissioning, US, 2000.

[5] Design Intent Tool: User Guide [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, US, 2002.

[6] Forester J. A data model for capturing life cycle data for reuse during building commissioning [J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(1): 655~ 660.

[7] Lusky L. Identifying building design information necessary for commissioning and proper system operation [J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(1): 639~ 654.

[8] International Alliance for Interoperability [EB/OL]. <http://www.iarna.org/>.

[9] Bazjanac V. Building energy performance simulation as part of interoperable software environments [J]. Energy and Building, 2004, 39(8): 879~ 883.

[10] Xu P, Haves P, Kim MS. Model based automated functional testing methodology and application to air handling units [J]. ASHRAE Transactions, 2005, 111(1): 979~ 989.

[11] Hyvärinen EJ, Kärki S. Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book [R]. IEA Annex 25, Technical Research Center of Finland, 1995.

[12] Piette MA, et al. Performance Assessment and Adoption Processes of an Information Monitoring and Diagnostic System Prototype [R]. Report of LBNL 44453, 1999.

[13] Piette MA, Kinney S, Haves P. Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations [J]. Energy and Buildings, 2001, 33(8): 783~ 791.

[14] Dor R, Kratz F, Ragot J, et al. Detection, isolation, and identification of sensor faults in nuclear power plants [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 1997, 5(1): 42~ 60.

[15] Ying CM, Joseph B. Sensor fault detection using noise analysis [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, 39(2): 396~ 407.

[16] Wang SW, Wang JB. Law-based sensor fault diagnosis and validation for building air conditioning systems [J]. HVAC&R Research, 1999, 5(4): 353~ 378.

[17] Wang SW, Cui JJ. A robust fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chillers [J]. HVAC&R Research, 2006, 12(3): 407~ 428.

[18] Wang SW, Chen YM. Fault-tolerant control for outdoor air flow in buildings based on neural network [J]. Building and Environment, 2002, 37(7): 691~ 704.

[19] Wang SW, Xiao F. Detection and diagnosis of AHU sensor faults using principal component analysis method [J]. Energy Conservation and Management, 2004, 45(17): 2667~ 2686.

[20] Castro NS, Vaezi Nejad H. CITE AHU, an automated commissioning tool for air-handling units [C]. Proceedings of National Conference on Building Commissioning, New York, 2005.

[21] Katipamula S, Brambley MR. Methods of fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems a review, Part I [J]. HVAC&R Research, 2005, 11(1): 3~ 25.

(下转第53页)

从第1排测线测试结果可以得出,送风速度在0.25 m/s左右,坐姿时人体头脚的温差接近3℃,符合标准ISO 7730规定的人体舒适范围。第3、6排送风速度在0.45 m/s左右,坐姿时人体头脚的温差介于2~3℃之间。相同送风速度下,高位置测线上的垂直温度梯度较小。以上数据是在室内工作区基本没人的情况下测试得出的,如果考虑到有实际人员负荷,则工作区温度梯度会有变大的趋势。

6 结论

1) 本文结合西北地区的气候特点,将置换通风应用到蒸发冷却空调系统中,并提出了蒸发冷却与置换通风复合空调系统的设计思路。2) 通过对体育馆建筑的实际测试,得到送风速度在0.25 m/s左右,坐姿时人体头脚的温差接近3℃,符合标准ISO 7730规定的人体舒适范围;当送风速度在0.45 m/s左右,坐姿时人体头脚的温差介于2~3℃。3) 根据中国国情,结合测试人员的实际感受,建议蒸发冷却与置换通风复合空调系统应用于类似本测试的体育馆或影剧院时,系统送风速度范围取0.4~0.5 m/s。

结论3)中的数据,只是笔者根据实测当天对体育馆内30多人的问卷调查结果,是否适合不同地区的各年龄段人群,还有待继续研究。

[参考文献]

- [1] 黄翔. 国内外蒸发冷却空调技术研究进展(1)[J]. 暖通空调, 2007, 37(2): 24~28.
- [2] Katipamula S, Brambley MR. Methods of fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems: a review, Part II [J]. HVAC&R Research, 2005, 11(2): 169~187.
- [23] Xu XH, Wang SW, Shi WZ. A robust sequencing control strategy for airhandling units [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2004, 25(2): 141~158.
- [24] 陈友明, 郝小礼, 彭建国. 空调系统中传感器故障检测与诊断方法的研究[J]. 测控技术, 2002, 21(11): 1~4.
- [25] Edward JJ. A User's Guide to Principal Components[M]. John Wiley

- [2] 岑鸣, 倪波. 上海体育馆置换通风系统设计研究[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 34~38.
- [3] 屈国伦. 广州新体育馆置换通风空调设计探讨[J]. 制冷, 2002, 21(2): 44~48.
- [4] 章利君. 深圳文化中心音乐厅空调送风方案比较[J]. 暖通空调, 2002, 32(6): 72~74.
- [5] 孙敏生, 王威, 万水娥. 国家大剧院观众厅空调系统和气流组织方式的设计和分析[J]. 暖通空调, 2003, 33(3): 1~8.
- [6] 向瑾, 黄翔, 武俊梅. 蒸发冷却与置换通风相结合空调系统的应用分析[J]. 建筑节能, 2007, 35(7): 12~14.
- [7] 向瑾, 黄翔, 武俊梅. 蒸发冷却与置换通风相结合空调系统的经济性分析[J]. 西安工程科技学院学报(增刊), 2007, 21: 68~69.
- [8] 李强民. 置换通风原理、设计及应用[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 41~46.
- [9] 黄翔. 面向环保、节能、经济及室内空气品质联合挑战的蒸发冷却技术[J]. 建筑热能通风空调, 2003, 22(4): 1~4.
- [10] Xiaoxiong Yuan, Qingyan Chen, Leon R Glicksman. Models for prediction of temperature difference and ventilation effectiveness with displacement ventilation [J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105(1): 353~367.
- [11] 连之伟, 马仁民. 下送风空调原理与设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [12] Xiaoxiong Yuan, Qingyan Chen, Leon R Glicksman. A critical review of displacement ventilation [J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(1): 78~90.
- [13] 赵荣义, 范存养, 等. 空气调节[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [14] 周敏. 置换通风的技术经济性和设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.

(上接第39页)

- [22] Katipamula S, Brambley MR. Methods of fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems: a review, Part II [J]. HVAC&R Research, 2005, 11(2): 169~187.
- [23] Xu XH, Wang SW, Shi WZ. A robust sequencing control strategy for airhandling units [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2004, 25(2): 141~158.
- [24] 陈友明, 郝小礼, 彭建国. 空调系统中传感器故障检测与诊断方法的研究[J]. 测控技术, 2002, 21(11): 1~4.
- [25] Edward JJ. A User's Guide to Principal Components[M]. John Wiley & Sons INC, 1991.
- [26] 徐新华, 崔景潭, 王盛卫. 冷凝器结垢故障对传感器故障诊断方法的影响分析[J]. 建筑节能, 2007, 35(2): 40~43.
- [27] Wang SW. Dynamic simulation of building VAV air conditioning system and evaluation of EMCS on-line control strategies [J]. Building and Environment, 1999, 34: 681~705.
- [28] Wang SW, Xu ZY, Cao JN, et al. A middleware for web service enabled integration and interoperation of intelligent building systems [J]. Automation in Construction, 2007, 16(1): 112~121.