

用参数自整定模型在线检测空气处理机组故障

王海涛¹, 陈友明¹, 陈永康², 秦建英²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 香港太古地产有限公司 技术统筹部, 香港)

摘要:大型现代建筑大都安装了能源管理与控制系统(EMCS), EMCS系统储存的大量监控数据为空调系统的在线故障检测与诊断提供了方便。提出了一种利用参数自整定空调部件模型在线检测变风量空气处理机组故障的方法。利用遗传算法优化模型参数使模型预测数据与实测值数据的残差最小, 因此空调部件模型有较高的预测精度。若模型预测数据与实测数据的残差超出了预先设定的阈值, 就意味着变风量空气处理机组可能存在故障。针对在实际应用时确定故障检测阈值的困难, 给出了用统计方法确定阈值的方法。故障检测方法在真实建筑中进行了应用和验证, 结果表明该故障检测方法可以结合EMCS系统准确有效的检测变风量空气处理机组故障。

关键词:变风量空气处理机组; 故障; 参数自整定模型; 残差; 故障检测

中图分类号: TU831.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0085-06

Application of Self-tuning Models to Air Handling Units for Fault Detection

WANG Hai-tao¹, CHEN You-ming¹, CHEN Yong-kang², QIN Jian-ying²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China;

2. Swire Properties Management Ltd, Island East, Hongkong, P. R. China)

Abstract: Building management control systems (BMCS) are widely employed in modern buildings. The huge amount of data available on central stations and outstations provide rich information for fault diagnosis of HVAC systems. An online fault diagnosis method for variable air volume air handling units was presented using self-tuning HVAC component models. The model parameters are tuned online by using a genetic algorithm (GA) which minimizes the error between measured and estimated performance data, so high modeling accuracy is assured. If the error between measured and estimated performance data exceeds preset thresholds, it means the occurrence of faults or abnormalities in the air handling unit system. The statistical method of selecting thresholds also is presented. The fault detection method was tested and validated using data collected from real HVAC systems. The results of validation show that the fault detection method can be integrated in BMCS systems to detect faults in air handling unit systems efficiently.

Key words: VAV air handling units; faults; self-tuning models; residuals; fault detection

随着生活水平的提高, 人们对室内环境的要求越来越高, 因而空调及其控制系统正变的日益复杂, 这不但导致空调系统故障的发生比较频繁, 而且增

加了故障诊断的难度。故障会影响空调系统的正常运行, 进而导致空调系统能耗的增加、室内环境的恶化和空调设备服务寿命的缩短。故障自动检测与诊

收稿日期: 2011-05-18

基金项目: 香港太古地产建筑智能控制研究基金项目(JRP0901); 湖南省科技计划重点项目(2010WK4018)

作者简介: 王海涛(1979-), 男, 博士生, 主要从事供热、供燃气、通风及空调工程方面研究, (E-mail) haitao-wangshd@163.com。

陈友明(通讯作者), 教授, 博士生导师, (E-mail) ymchen@hnu.edu.cn。

断工具可以发现故障和辅助消除其不利影响,有利于空调系统的稳定运行和建筑节能。选择合适的故障诊断方法是开发故障检测与诊断工具的关键。目前,空调系统故障诊断方法主要分为 2 类^[1],一类是基于历史数据的故障诊断方法,该类方法首先提取历史数据的特征和特征参数,并把它们作为先验知识来检测和诊断空调系统故障。该类方法需要大量的训练数据,对数据质量有较高要求。例如,文献[2-7]利用神经网络和主成分分析等方法诊断空调系统故障。另一类是基于模型的故障诊断方法,该类方法首先计算模型预测数据与实测数据之间的残差,然后通过比较残差与阈值的大小,来判断空调系统是否运行正常。人们已经对基于模型的故障诊断方法进行了广泛研究,开发了很多空调部件模型。例如,Salsbury 和 Diamond 利用前反馈模型检测空气处理机组故障^[8],Liu 和 Dexter 利用模糊模型预测空调系统的性能和能耗,检测空调系统故障^[9],王盛卫等利用能量和质量守恒模型诊断制冷机的温度传感器和流量传感器故障^[10]。

空调部件模型是基于模型的故障诊断方法的关键。因为模型参数是额定工况下的定值,所以简单空调部件模型的预测精度不高。详细空调部件模型有较高的预测精度,但需要详细的设计数据和物理参数,用于诊断空调系统故障时这些数据很难全部获得。因此,开发简单、准确和可靠的空调部件模型是空调系统性能预测、运行优化和故障诊断的迫切需要。针对这一情况,本文提出了参数自整定空调部件模型,给出了利用这些模型在线检测变风量空气处理机组故障的方法,并结合真实建筑的 EMCS 系统对故障检测方法进行了应用和验证,取得了令人满意的结果。

1 变风量空气处理机组和 EMCS

变风量空气处理机组是变风量空调系统的重要设备。变风量空气处理机组的主要功能是为空调系统提供足量的新风、维持送风温度在其设定值、维持送风静压在其设定值。空气处理机组对空调系统能耗和室内空气环境有较大的影响。图 1 是典型变风量空气处理机组及其控制装置示意图。变风量空气处理机组主要包括表冷器、送风机、新风阀、回风阀、混合风阀和控制装置。变风量空调系统通过调整新风阀开度控制新风量在其设定值,通过调整水阀开度来维持送风温度在其设定值,通过调节送风机转

速来维持送风静压在其设定值。在变风量空气处理机组中,传感器和 PID 控制器被用于变风量空气处理机组的监测和控制。

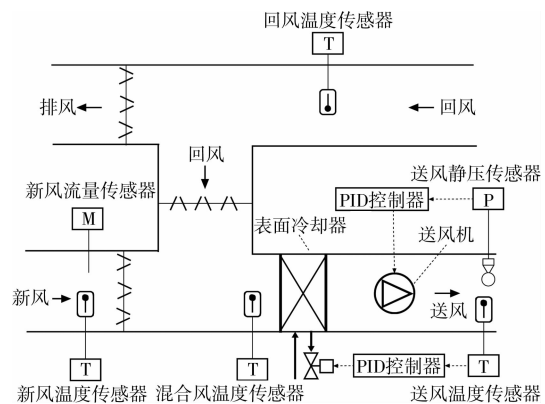


图 1 典型变风量空气处理机组及其控制装置示意图

现代大型建筑大都安装了能源管理与控制系统,用于建筑设备的监测、控制和提高建筑能源利用效率。EMCS 系统主要由电子处理器和通信设备组成。在 EMCS 系统中,传感器用于测量控制变量,控制器用于逻辑计算和输出设定值,执行器用于接受控制信号和执行控制指令。EMCS 系统的现场控制器可以自动收集空调系统的运行数据。EMCS 系统的中央处理器持续地从现场控制器获取最新的空调系统运行数据,并将数据储存在数据库(例如 SQL Server)中。因为可以通过局域网获取最新的空调系统运行数据,所以 EMCS 系统为空调系统的在线故障诊断提供了方便。现有 EMCS 系统只能收集空调系统的运行数据,不具有故障检测与诊断功能。

2 故障检测方法及其应用

2.1 基于模型的故障检测方法

本文提出了一种利用参数自整定空调部件模型在线检测变风量空气处理机组故障的方法。图 2 是故障检测方法的流程图。首先,建立参数自整定空调部件模型,并利用遗传算法优化模型参数使模型预测数据与实测数据的残差最小,该工作可以离线完成。然后,把参数自整定空调部件模型与 EMCS 系统相结合,在线预测空调系统性能。因为根据正常运行数据整定了模型参数,所以空调部件模型有较高的预测精度。最后,在相同的输入条件和运行条件下,计算空调部件模型预测数据与实测数据的残差,比较残差与阈值的大小,若残差超出了预先设定的阈值,就意味着变风量空气处理机组可能存在故障。

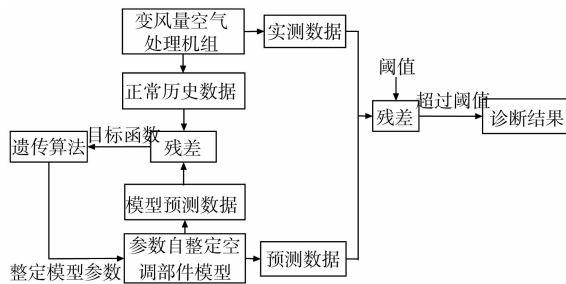


图 2 故障检测方法结构图

2.2 故障检测方法的应用

提出的故障检测方法可以结合建筑的 EMCS 系统,实现变风量空气处理机组的在线故障检测。故障检测方法已经于一个真实建筑进行了应用和验证。建筑的各层均安装了一个变风量空调系统。建筑安装了一套 EMCS 系统,用于建筑设备的监测、控制和提高建筑能源利用效率。EMCS 系统每 5 min 自动收集和储存一次空调系统的运行数据。本文通过从 EMCS 系统读取空调系统的运行数据,实现了用参数自整定模型在线检测变风量空气处理机组故障。大部分模型所需变量可以通过测量得到。例如,新风温度、新风流量、回风温度、新风湿度、送风温度、送风静压、混合风温度、送风静压、风机转速和冷冻水温度。一些模型所需变量虽然不能直接测量得到,但可以根据测量变量计算得到。例如风机送风量和冷冻水流量等。其中,风机送风量可以通过累加各空调区域的送风量得到,冷冻水流量可以利用水阀模型根据水阀开度计算得到。

2.3 应用故障检测方法时的注意事项

为了确保较高的故障检测准确率,在利用参数自整定空调部件模型在线检测变风量空气处理机组故障时,应该注意以下几个事项:

1) 参数自整定模型的预测误差是不可避免的。这主要是因为不确定性因素是不可避免的,不确定性因素主要有测量误差、建模误差和故障检测模式误差。测量过程中的误差可能是由传感器引起的误差,这个误差有时不能被检测到,更不能消除,还有可能是估计误差,这是因为传感器的输出有大量噪声信号。建模方面的误差包括 2 个方面,一是数学模型结构与空调系统的实际过程不匹配产生的结构误差。一是在建模过程中只进行粗略的估计,有些扰动甚至没有进行建模考虑,这是最大的不确定性来源。

2) 选择合理的阈值。即使在无故障条件下,实测数据和模型预测数据之间也会有残差,将残差与基准值进行比较,如果残差值超过了基准值就判断系统出现异常,这个基准值称为故障阈值。故障阈值的选取对故障检测很重要,如果阈值选择太大,会

引起故障的漏报,故障发生时故障诊断系统不发出故障警报。如果阈值设定太小,会造成假警报,没有故障时故障诊断系统却发出故障警报。本文采用统计的方法,结合变风量空气处理机组的历史运行数据来确定故障发生的阈值。计算的送风温度阈值为 1.7℃,计算的送风静压阈值是 30 Pa。式(1)是阈值的计算公式^[11]:

$$Th_{0,i} = t_{\frac{\alpha}{2}, n-p} \sqrt{\sigma_{Y_i}^2 [1 + \mathbf{X}_0^T (\mathbf{X}_{reg}^T \mathbf{X}_{reg})^{-1} \mathbf{X}_0]} \quad (1)$$

其中: $Th_{0,i}$ 是第 i 个模型输出变量的故障阈值; $t_{\frac{\alpha}{2}, n-p}$ 是在 $(1-\alpha)$ 置信水平的 $(n-p)$ 自由度的 t 分布值; n 是建模数据的数据数量; p 是模型输入变量的数量; $\sigma_{Y_i}^2$ 是第 i 个模型输出变量的预测数据与实测数据之间残差的方差总和; \mathbf{X}_0 是空气处理机组运行数据的矩阵(输入变量); \mathbf{X}_0^T 是 \mathbf{X}_0 的转置矩阵; \mathbf{X}_{reg} 是建模数据的矩阵(输入变量); \mathbf{X}_{reg}^T 是 \mathbf{X}_{reg} 的转置矩阵。

3) 正确选择与空调部件模型有关的故障。在大多数情况下,一个故障可能有多种故障特征,而一个故障特征可能与多种故障有关。因此,必须正确选择与空调部件模型有关的故障。在利用参数自整定模型检测到变风量空气处理机组故障后,需进行实地调查和故障核查来确定故障源。

3 用遗传算法整定模型参数

遗传算法是模拟生物在自然环境中优胜劣汰的遗传和进化过程而形成的一种概率搜索算法。遗传算法的特点是处理对象是参数的编码集而不是问题参数本身,搜索过程既不受优化函数联系性的约束,也不要求优化函数可导,具有较好的全局搜索能力;算法的基本思想简单,运行方式和实现步骤规范,具有全局并行搜索、简单通用、鲁棒性强等优点^[12]。本文利用遗传算法整定模型参数使实测数据与预测数据的残差最小,图 3 是利用遗传算法整定模型参数的流程图。

式(2)是计算模型参数的公式。

$$\delta_i = \delta_i + a_i \cdot \delta_{ref,i} \quad (2)$$

其中, δ_i 是模型参数, a_i 是自整定系数, $\delta_{ref,i}$ 是模型参数的设计值。

利用遗传算法整定模型参数使模型预测数据与实测数据的残差最小,也就是使目标函数最小,式(3)是目标函数:

$$f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{n}} \quad (3)$$

其中: n 是数据的数量; M_i 是实测值; E_i 是模型的预测值。

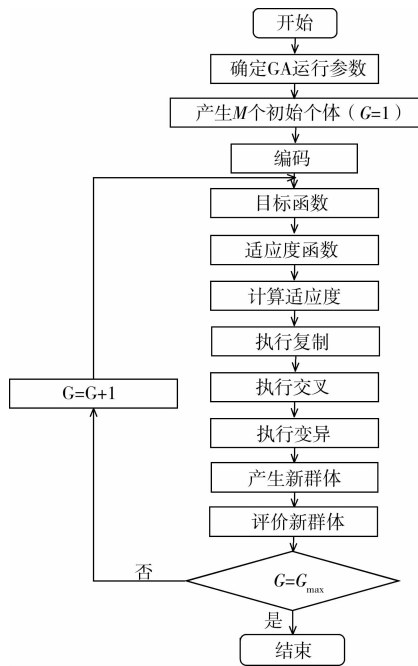


图 3 利用遗传算法整定模型参数的流程图

遗传算法首先从初始群体开始,初始群体代表问题的 1 个解集,并将表现型映射到基因型(即编码),每个编码对应问题的一个解,称为染色体或个体。计算第 1 代各个体的适应度。接着,按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化产生出越来越好的近似解。在每一代,根据个体的适应度大小选择个体,并借助自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异,产生新种群。这个过程像自然进化一样,后代种群比前代更加适应于环境,末代种群中的最优个体经过解码可以作为问题的近似最优解。在本研究中模型参数的参考值为模型参数的设计值,自整定系数 $a \in [-1, 1]$,交叉算子 $P_c = 0.7$,变异算子 $P_m = 0.05$, L 为个体中基因串长度,群体规模 $P = 108$,最大代数 $G = 100$ 。

4 参数自整定空调部件模型

4.1 风机模型

变风量空气处理机组通过调整转速或叶片安装角度来改变送风量。变风量空气处理机组通常采用离心式风机。在本文中风机模型用于预测送风静压,参数自整定风机模型以 Clark^[13] 提出的稳态风机模型为基础。

$$\varphi = \frac{V + a_1 V_{des}}{(N + a_2 N_{des}) d^3} \quad (4)$$

$$\xi = \alpha_0 + \alpha_1 \bar{\omega} + \alpha_2 \bar{\omega}^2 + \alpha_3 \bar{\omega}^3 + \alpha_4 \bar{\omega}^4 \quad (5)$$

$$\lambda = \beta_0 + \beta_1 \bar{\omega} + \beta_2 \bar{\omega}^2 + \beta_3 \bar{\omega}^3 + \beta_4 \bar{\omega}^4 \quad (6)$$

其中: φ 是无量纲流量; ξ 是无量纲压头; λ 是无量纲

轴功率; N 是风机转速; d 是叶片直径; ρ 是空气密度; V 是空气流量; 系数 α_i 和 β_i 可以通过实验回归获得,或由生产厂商提供的风机性能曲线回归获得。

风机的总压头由式(7)计算得到:

$$P_{fan} = \rho(\xi + a_3 \xi_{des})(N + a_2 N_{des}) d^2 \quad (7)$$

送风静压可以从风机的总压头按式(8)计算得到:

$$P = P_{fan} - P_{mix} - \Delta P_{com} \quad (8)$$

$$P_{mix} = C_m(1 + a_4)(V + a_1 V)^2 \quad (9)$$

$$P_{mix} = C_c(1 + a_5)(V + a_1 V)^2 \quad (10)$$

其中: P_{mix} 是混合风箱的压降; P_{com} 是从混合风箱到送风静压测量点之间的压降; C_m 和 C_c 由设备在额定条件下的压降确定; 系数 a_3 、 a_4 和 a_5 用于修正无量纲压头、混合风箱压降、混合风箱至送风静压测量点之间的压降。

图 4 是 2010 年 9 月 15 日建筑第 15 层送风静压测量数据与模型预测数据的对比。当模型的全部自整定系数都为 0 时,参数自整定风机模型就变成了稳态风机模型。若风机模型预测数据与实测数据的残差超出了预先设定的阈值,则说明变风量空气处理机组可能存在风机皮带打滑、控制逻辑错误和送风静压传感器故障等问题,故障原因需经过实地调查和故障核查才能确定。

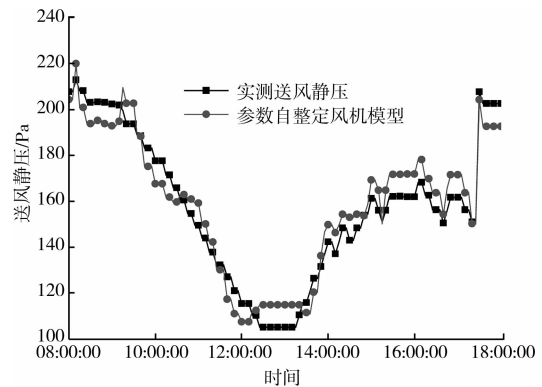


图 4 送风静压实测数据与模型预测数据的对比

4.2 水阀模型

阀门是流体输配管网的控制和调节装置,基本功能是截断或开通流体流通的管路,调节或分配管路的流量。因为变风量空气处理机组没有测量冷冻水流量,本文利用文献[14]提出的水阀模型计算冷冻水流量。水阀能控制的最大流量与最小流量之比称为可调比 R ,式(11)是其定义式。

$$R = \frac{V_{l,max}}{V_{l,min}} \quad (11)$$

其中: $V_{l,max}$ 是水阀的最大流量; $V_{l,min}$ 是水阀的最小可调流量。一般最小可调流量为最大流量的 2%~4%。冷冻水流量是水阀开度的函数,冷冻水流量可

以由水阀开度按下式计算得到:

$$V_l = V_{l,\max} R^{\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)^{-1}} \quad (12)$$

其中: l 是水阀开度; l_{\max} 是水阀的最大开度。

4.3 表冷器模型

在本文中表冷器模型用于预测送风温度。变风量空气处理机组利用表冷器把送风处理到送风温度。表冷器传热是以对流-导热-对流方式进行的间壁式传热。表冷器的总传热速率可以写成:

$$q = KA\Delta T_m \quad (13)$$

其中: q 是表冷器的传热速率; A 是表冷器的传热面积; K 是总传热系数; ΔT_m 是表冷器两侧流体的平均温度差。

表冷器两侧流体的平均温度差 ΔT_m 由下式计算得到:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (14)$$

其中: ΔT_1 是较大的流体温度差; ΔT_2 是较小的流体温度差。表冷器的总热阻为:

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{KA} = R_{\text{out}} + R_\lambda + R_{\text{in}} \quad (15)$$

其中: R_{total} 是表冷器的总传热热阻; R_{out} 是表冷器外表面的对流热阻; R_λ 是表冷器的导热热阻; R_{in} 表冷器内表面的对流热阻。

文献[15]提出了一个简单的稳态的表冷器模型,表冷器内表面的对流传热系数和表冷器外表面的对流传热系数被认为是额定工况下的定值。而在本文提出的表冷器模型中,表冷器内表面的对流传热系数是冷冻水流量的函数,如式(16);表冷器外表面的对流传热系数是空气流量的函数,如式(17)。

$$K_{\text{in}} = K_{\text{in,design}} \left(\frac{V_l + b_1 V_{l,\text{design}}}{V_l} \right)^{b_2} \quad (16)$$

$$K_{\text{out}} = K_{\text{out,design}} \left(\frac{V_g + b_3 V_{g,\text{design}}}{V_g} \right)^{b_4} \quad (17)$$

其中: K_{in} 是表冷器内表面的对流传热系数; K_{out} 是表冷器外表面的对流传热系数,系数 b_2 反映了冷冻水流量与表冷器内表面的对流传热系数的联系,系数 b_4 反映了空气流量与表冷器外表面的对流传热系数的联系,系数 b_1 用于修正用水阀模型的预测误差,系数 b_3 用于修正漏气和测量误差引起的偏差。

由于送风机安装在送风气流中,电机能耗转化为送风气流中的热能,从而引起送风温度的升高,式(18)是预测送风温度的公式。

$$T_{s,\text{sensor}} = T_s + \Delta T_{\text{ref}} \left(\frac{V_g + b_3 V_{g,\text{design}}}{V_g} + a_5 \right)^3 \quad (18)$$

其中: T_s 是送风离开表冷器时的温度; $T_{s,\text{sensor}}$ 是送风温度的预测值; ΔT_{ref} 是送风经过送风机时的设计温升; a_5 是自整定系数。

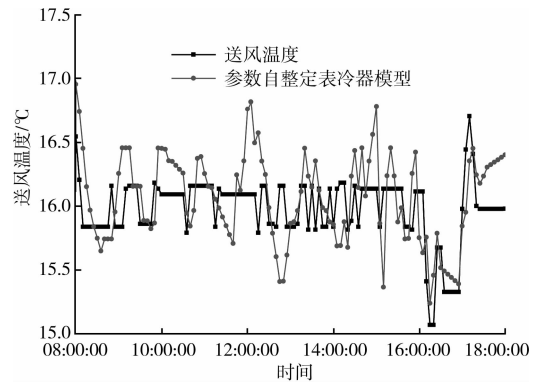


图 5 送风温度实测数据与模型预测数据的对比

图 5 是 2010 年 9 月 15 日建筑第 15 层送风温度实测数据与参数自整定表冷器模型预测数据的对比。当全部自整定系数都为 0 时,本文提出的表冷器模型就变成了简单的稳态的表冷器模型。若模型预测温度与实测温度的残差大于 1.7°C ,则说明变风量空气处理机组可能存在水阀故障、表冷器结垢、冷冻水温度太高、循环水泵故障、送风温度传感器故障或控制逻辑错误等故障。若模型预测温度与实测温度的残差小于 -1.7°C ,则意味着变风量空气处理机组可能存在水阀故障、冷冻水温度太低、送风温度传感器故障和控制逻辑错误等故障。具体的故障原因需经过实地调查和故障核查才能确定。

5 结论

提出了参数自整定空调部件模型,给出了利用这些模型在线检测变风量空气处理机组故障的方法。故障检测方法在真实的建筑中进行了应用和验证,结果表明参数自整定空调部件模型有较高的预测精度,利用参数自整定模型可以准确有效的检测变风量空气处理机组故障。大型现代建筑大都安装了能源管理与控制系统,故障检测方法可以结合 EMCS 系统,实现变风量空气处理机组的在线故障检测。本文仅研究了变风量空气处理机组的故障检测问题,因为一个故障特征可以与多个故障有关,所以故障原因需经实地调查和故障核查才能确定。

参考文献:

- [1] ROSSI M, BRAUN J. A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners[J]. International Journal of HVAC & R Research, 1997, 3(1):19-37.

- [2] LEE Y, HOUSE J, SHIN D. Fault diagnosis and temperature sensor recovery for an air-handling unit [J]. ASHRAE Transactions, 1997, 103 (1):621-633.
- [3] WANG S, CHEN Y. Fault-tolerant control for outdoor ventilation air flow rate in building based on neural network[J]. Building and Environment, 2002, 37 (7): 691-704.
- [4] WANG S, XIAO F. AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method[J]. Energy and Buildings, 2004, 36:147-160.
- [5] WANG S, CUI J. A robust fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chillers[J]. Heating Ventilating and Air Conditioning and Refrigerating Research, 2006, 12 (3): 407-428.
- [6] DU Z, JIN X. Detection and diagnosis for sensor fault in HVAC systems [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3):693-702.
- [7] XU X, XIAO F, WANG S. Enhanced chiller sensor fault detection, diagnosis and estimation using wavelet analysis and principal component analysis methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (2/3): 226-237.
- [8] SALSBURY T, DIAMOND R C. Fault detection in HVAC systems using model-based feedforward control [J]. Energy and Buildings, 2001, 33 (4):403-415.
- [9] LIU X, DEXTER A. Fault-tolerant supervisory control of VAV air-conditioning systems [J]. Energy and Buildings, 2001, 33 (4):379-389.
- [10] WANG S, WANG J. Robust sensor fault diagnosis and validation in HVAC systems[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2002, 24 (3): 231-262.
- [11] MONTGOMERY D, GEORGE C. Applied Statistics and Probability for Engineers [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [12] 师旭超, 郭志涛. 膨胀土等级判别的遗传支持向量机多分类方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 44-48.
- SHI XU-CHAO, GUO ZHI-TAO. Multi-classification method of GA-SVM on identifying grade of expansive soils [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(4): 44-48.
- [13] CLARK D. Building Systems and Equipment Simulation Program HVACSIM+, User's Manual [M]. National Bureau of Standards and Technology, Washington, DC, 1985.
- [14] NASSIF N, KAJL S, SABOURIN R. Modeling and validation of existing VAV system components, in: Proceeding of eSim 2004 [C]//Canadian Conference on Building Simulation, Vancouver, 2004:135-141.
- [15] BRANDEMUECHL M, GABELS, ANDERSEN I. A toolkit for secondary HVAC system energy calculation [C]//American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, 1993.

(编辑 王秀玲)

(上接第 79 页)

- [15] 严永红, 关杨, 刘想德, 等. 教室荧光灯色温对学生学习效率 and 生理节律的影响[J]. 土木建筑与环境, 2010 (4):85-89.
- YAN YONG-HONG, GUAN YANG, LIU XIANG-DE. Productivity and physiological response of students subjected to fluorescent lamps with different colour temperatures and luminance level[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010 (4): 85-89.
- [16] YAN YONG-HONG, GUAN YANG, TANG G LEE, et al. Evaluation index study of students' physiological rhythm effects under fluorescent lamp and LED [C]//2010 International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, 2010: V11-134-139.
- [17] 陈芷若. 神经电生理[J]. 现代电生理学杂志, 2008(3): 188-191.
- CHEN ZHI-RUO. Electric neurophysiology [J]. Journal of Modern Electrophysiology, 2008(3):188-191.
- [18] LU SHI, TETSUO KATSUURA, YOSHIHIRO SHIMOMURA, Koichi IWANAGA. Effects of different light source color temperatures during physical exercise on human EEG and subjective evaluation[J]. Journal of the Human-Environmental System, 2009, 12(1): 27-34.
- [19] INOUE M, KATSUURA T, HARADA H. The effect of color temperature on visual fatigue[J]. J Physiol Anthropol Appl Human Sci, 1997, 16(5):218.

(编辑 胡玲)