

VAV 空气处理机组故障检测与诊断方法及应用

王海涛^{1,2}, 陈友明²

(1. 河南工业大学 土木建筑学院, 郑州 450001; 2. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 针对变风量空气处理机组故障, 考虑到变风量空调系统的动态性, 给出了一种变风量空气处理机组故障检测与诊断方法. 残差累积和(cumulative sum, CUSUM)控制图被用于检测空气处理机组故障, 残差 CUSUM 控制图不仅可很好地适应变风量空调系统的动态性, 还可消除数据自相关性对控制图性能的不利影响, 有助于提高故障检测的准确性. 根据质量守恒、能量守恒和控制原理, 设计了 3 个基于规则的故障分类器, 可用于寻找故障源. 该故障检测与诊断方法在实际建筑中进行了在线应用, 利用多种变风量空气处理机组故障验证了故障诊断方法的有效性和可靠性.

关键词: 变风量空气处理机组; 故障检测; 故障诊断; 残差累积和(CUSUM)控制图; 专家规则

中图分类号: TU 831.3

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)02-0290-06

Method and Application of Fault Detection and Diagnosis for Variable Air Volume Air Handling Units

WANG Hai-tao^{1,2}, CHEN You-ming²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aimed at faults of variable air volume (VAV) air handling units, a fault detection and diagnosis (FDD) strategy using a hybrid approach is presented for VAV air handling units in this paper. Fault detection and diagnosis software is also developed based on the FDD strategy. Residual-based cumulative sum (CUSUM) control charts are utilized to detect faults in VAV air handling units. The residual-based CUSUM control chart can cope with the dynamic characteristics of the air handling units well. It can also improve the accuracy of fault detection by eliminating the effects of serial correlation on the performance of control charts. Three rule-based fault classifiers, derived from mass and energy balances, are used to find fault sources. The FDD strategy for VAV air handling units was online validated and tested on real VAV air-conditioning systems.

Key words: variable air volume (VAV) air handling units; fault detection; fault diagnosis; residual-based cumulative sum (CUSUM) control chart; expert rule

变风量空气处理机组是水子系统和空气子系统进行能量交换的地方, 是新风进入建筑的地方, 也是进行湿度控制的地方. 然而, 受传感器故障、控制器故障、设备故障、安装错误和设计不合理等因素影

响, 变风量空气处理机组经常不能按设计意图运行. 试验研究和调查表明, 通过实施故障诊断和优化空调系统运行, 可降低 20% ~ 30% 的办公建筑能耗^[1]. 通过成功实施故障检测与诊断 (fault

收稿日期: 2012-09-01

基金项目: 湖南省科技计划重点项目(2010WK4018)

作者简介: 王海涛(1979—), 男, 讲师, 主要从事供热供燃气通风及空调工程方面的研究, E-mail: haitao-wangshd@163.com

detection and diagnosis, FDD), 可减少 10% ~ 40% 的空调系统能耗^[2-3], 其节能潜力主要由建筑用途、设备新旧、设备状态和设备维护情况等决定. 空气处理机组对系统能耗和室内空气质量均有较大影响, 因此空气处理机组的故障检测与诊断研究备受瞩目, 学者们已经对空气处理机组故障检测与诊断进行了广泛研究^[4-7]. 然而, 受传感器信息不足、系统的动态性和非线性等因素限制, 目前仍缺少可适用于实际变风量空调系统的故障检测与诊断方法^[8-9].

故障检测与诊断方法研究是开发空调系统故障诊断工具的关键. 故障检测与诊断方法主要分为 2 类: 基于模型的 FDD 方法和基于历史数据的 FDD 方法. 现代大型建筑大都安装了能源管理与控制系统 (energy management and control system, EMCS), 用于建筑设备的监测、控制以及提高建筑能源利用效率. EMCS 保存的空调系统运行数据为基于历史数据的 FDD 方法在空调系统中的应用提供了方便. 基于历史数据的 FDD 方法已经在空调系统中得到了广泛应用, 例如人工神经网络、逻辑控制和主成分分析法等.

受室外气候变化、室内空调负荷变化和运行工况改变等因素影响, 变风量空调系统具有很强的动态性, 变风量空气处理机组正常运行时某些变量经常短时间内超出合理范围, 因此, 故障检测与诊断方法必须能适应变风量空气处理机组的动态性. 本文将残差 CUSUM 控制图与专家规则相融合用于诊断变风量空气处理机组故障, 给出了一种变风量空气处理机组故障检测与诊断方法. 利用残差 CUSUM 控制图检测空气处理机组故障, 该故障检测方法既可很好地适应变风量空调系统的动态性, 又可消除数据自相关性对控制图性能的不利影响, 可有效提高故障检测结果的准确性. 设计了 3 个基于规则的故障分类器, 可用于寻找故障源, 对故障诊断结果进行解释.

1 试验建筑和变风量空气处理机组

本研究选用一座试验建筑作为研究平台, 用于变风量空气处理机组故障检测与诊断方法研究. 该试验建筑是一座 36 层的高档办公建筑. 由于建筑的楼层较高, 考虑设备的承压能力, 建筑采取分区供冷, 第 1 ~ 25 层为低区系统, 第 26 ~ 36 层为高区系统. 建筑的第 2、20 层和顶层为设备层, 用于放置冷却塔、热交换器、水泵和新风机组等. 设备层之外的

各层均安装了变风量空调系统. 新风从设备层被输送到各层的变风量空气处理机组机房, 回风通过吊顶回到空气处理机组机房, 新风和回风混合后被空气处理机组处理到送风状态点.

图 1 给出了变风量空气处理机组及其控制装置. 根据空调负荷的变化, 变风量空调系统对总送风量和各房间的送风量进行实时控制, 从而使变风量空调系统的节能性和经济性得到充分体现. 变风量空气处理机组控制主要包括送风温度控制、送风静压控制和新风量控制. 表面冷却器、送风温度传感器、控制器和冷冻水水阀共同组成了送风温度控制系统; 送风机、压力转化器、控制器、变频器和送风压力传感器共同组成了送风静压控制系统; 电动风阀、新风流量传感器、控制器和新风温度传感器共同组成新风控制系统. 控制器通过改变送风机转速维持送风静压在其设定值, 控制器通过调整冷冻水水阀开度控制送风温度在其设定值.

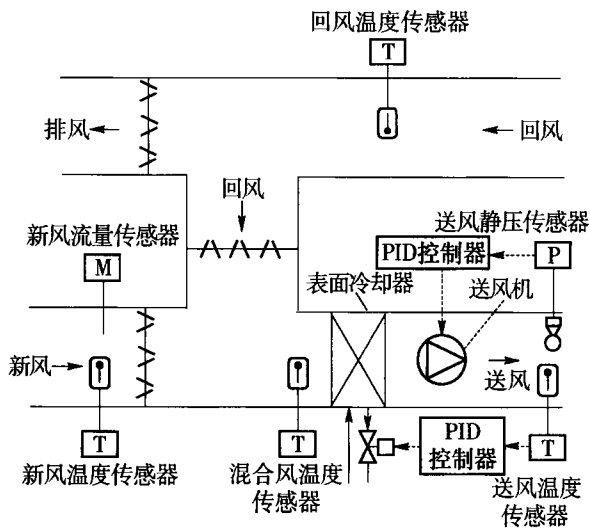


图 1 风量空气处理机组及其控制装置示意

Fig. 1 Schematic of VAV air handling units and measurement instrumentations

2 空气处理机组故障检测与诊断方法

2.1 空气处理机组故障诊断方法概述

针对变风量空气处理机组故障, 考虑到变风量空调系统的动态性, 本文给出了一种变风量空气处理机组故障检测与诊断方法. 该故障诊断方法是一种组合的故障诊断方法, 残差 CUSUM 控制图被用于检测变风量空气处理机组故障, 残差 CUSUM 控制图既可很好适应空气处理机组的动态性, 又可消

除监控数据自相关性对控制图性能的不利影响,可提高故障检测的准确性. 设计了 3 个基于规则的故障分类器,用于分离和寻找故障源. 其中,故障分类器 1 用于检测与诊断温度传感器故障和送风静压是否偏低;当正偏差累积和(S)大于控制图上限值时,故障分类器 2 用于寻找故障源;当负偏差累积和(N)小于控制图下限值时,故障分类器 3 用于分离故障源. 图 2 给出了变风量空气处理机组故障检测与诊断的流程.

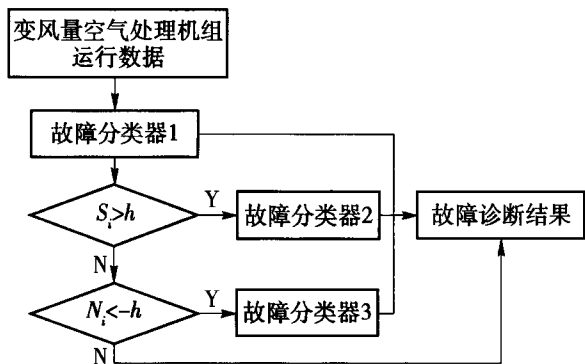


图 2 变风量空气处理机组故障检测与诊断流程

Fig. 2 Flow chart of the FDD strategy for air handling units

2.2 变风量空气处理机组故障检测

2.2.1 送风温度差

送风温度差 E_T ,是指送风温度测量值与送风温度设定值之间的偏差,其定义式为

$$E_T = T - T_{set} \tag{1}$$

式中: T 是送风温度测量值; T_{set} 为送风温度设定值. 设备故障、控制器故障、传感器故障、安装错误和不合理的设计均会引起送风温度差偏离系统正常运行时的正常值. 残差 CUSUM 控制图可监测到送风温度异常,从而可检测空气处理机组故障.

2.2.2 残差 CUSUM 控制图

在本文中,送风温度的采样时间间隔为 5 min,送风温度测量数据具有高度的自相关性. 数据自相关性会影响控制图的性能,导致较多的假警报和故障漏报. 残差 CUSUM 控制图可消除数据自相关性对控制图性能的不利影响^[10-12],可用于监测送风温度控制过程. 残差 CUSUM 控制图首先建立反映数据自相关性的时序分析模型. 然后计算实测数据与模型预测数据之间的残差,若时序分析模型是准确的,残差将具有数据独立性. 最后利用标准 CUSUM 控制图监测残差. 采用 1 阶自回归时序分析模型 AR(1)^[13] 预测送风温度差的公式为

$$\hat{E}_i = \mu_1 + r(E_{i-1} - \mu_1) \tag{2}$$

式中: $\hat{E}_i$ 为 i 时刻送风温度差的预测值; E_{i-1} 为 $i-1$ 时刻送风温度差的实测值; μ_1 为送风温度差的期望; r 为自回归系数.

送风温度差实测值与模型预测值之间的残差($\hat{\omega}_i$)可表示为

$$\hat{\omega}_i = E_i - \mu_1 - r(E_{i-1} - \mu_1) \tag{3}$$

式中: E_i 为 i 时刻送风温度差的实测值; E_{i-1} 为 $i-1$ 时刻送风温度差的实测值; μ_1 为送风温度差的期望; r 为自回归系数.

利用式(4)对残差进行标准化处理,以便使具有相同参数的控制图可用于监测多个控制过程.

$$y_i = (\hat{\omega}_i - \hat{\mu}_0) / \hat{\sigma}_0 \tag{4}$$

式中: y_i 为标准化处理后的 i 时刻的残差; $\hat{\omega}_i$ 为 i 时刻的残差; $\hat{\mu}_0$ 为系统运行正常时残差期望的估计值; $\hat{\sigma}_0$ 为系统运行正常时残差标准方差的估计值.

K. W. Kemp^[14] 开发的 2 个 CUSUM 控制图被用于检测变风量空气处理机组故障,定义式为

$$S_i = \max[0, S_{i-1} + y_i - k] \tag{5}$$

$$N_i = \min[0, N_{i-1} + y_i + k] \tag{6}$$

在变风量空调系统运行时,残差累积和控制图算法被用于监测空气处理机组送风温度控制过程. 若 S 大于控制图上限 h ,或者 N 小于控制图下限 $-h$,均表明变风量空气处理机组存在故障或异常. 若 S 小于控制图上限 h 且 N 大于控制图下限 $-h$,则意味着变风量处理机组运行正常. 在变风量空调系统不运行时,累积和将被重新设置为 0.

2.3 变风量空气处理机组故障诊断

基于规则的故障诊断方法已经在空调系统中得到了广泛应用^[15]. 由于变风量空气处理机组的故障特征比较明显,本文设计了 3 个基于规则的故障分类器,用于寻找变风量空气处理机组故障源. 本文根据历史运行数据对专家规则中的阈值进行了反复调整和验证,以确保故障诊断阈值的正确性. 在专家规则中, ε_{vp} 是表冷器水阀开度反馈信号的阈值; ε_f 是送风流量测量误差的阈值; ε_p 是送风静压测量误差的阈值; ε_T 是送风温度测量误差的阈值; ε_{cw} 是冷冻水温度测量误差的阈值; ΔT_{sf} 是送风经过送风机的温升. 专家规则需要以下传感器数据、控制信号和设计数据:混合风温度(T_{ma})、新风流量(F_{oa})、新风流量设定值($F_{oa,s}$)、新风温度(T_{oa})、回风温度(T_{ra})、送风温度(T_{sa})、送风温度设定值($T_{sa,s}$)、送风静压(p_{sa})、送风静压设定值($p_{sa,s}$)、冷

冻水温度(T_{cw})、冷冻水温度设定值($T_{cw,s}$)和表冷器水阀开度反馈信号(U_{cc})。

本文设计了基于规则的故障分类器 1 用于诊断送风静压偏低和温度传感器故障。图 3 给出了基于规则的故障分类器 1 的故障诊断流程。因为残差 CUSUM 控制图对送风静压偏低、回风温度传感器故障和混合风温度传感器故障不敏感,所以故障分类器 1 不需要残差 CUSUM 控制图检测到故障。若某个专家规则被满足的时间超过 30 min,就说明变风量空气处理机组存在相应的故障。若送风静压与其设定值之间的偏差超出了阈值,就意味着系统存在送风静压偏低问题,可能的故障原因包括送风机皮带打滑、控制器故障和送风机故障等。如果混合风温度低于回风温度,而且混合风温度又低于新风温度,则说明系统存在混合风温度传感器故障。若混合风温度既高于新风温度又高于混合风温度,也意味着系统存在混合风温度传感器故障。若送风温度十分接近送风温度设定值,而且送风温度又高于回风温度就意味着系统存在回风温度传感器故障。若送风温度十分接近送风温度设定值,同时送风温度又高于混合风温度,则说明系统存在混合风温度传感器故障。

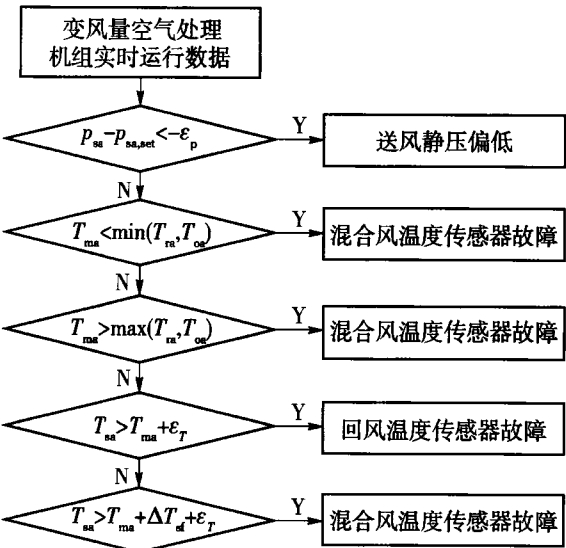


图 3 故障分类器 1 的故障诊断流程

Fig. 3 Fault isolation algorithm for rule-based fault classifier 1

当残差 CUSUM 控制图超出了控制图上限值时,基于规则的故障分类器 2 将被用于诊断空气处理机组故障。图 4 给出了基于规则的故障分类器 2 的故障诊断流程。若某个专家规则被满足,则意味着系统存在相应的故障。空气处理机组运行正常

时,如果送风温度高于其设定温度,控制器将调大表冷器水阀开度,若送风温度与其设定值之间的偏差不能被消除,则意味着系统存在故障或异常。此时,若表冷器水阀不在全开位置,则表明变风量空气处理机组存在表冷器水阀故障;如果送风温度高于混合风温度,则意味着空气处理机组存在送风温度传感器故障;若冷冻水温度高于冷冻水设定温度,则说明空气处理机组存在冷冻水温度偏高问题;如果新风量远大于其设定值,则意味着空气处理机组可能存在新风阀故障。若以上的情况均未出现,则系统可能存在表冷器结垢、表冷器设计容量偏小、循环水泵停转等问题。

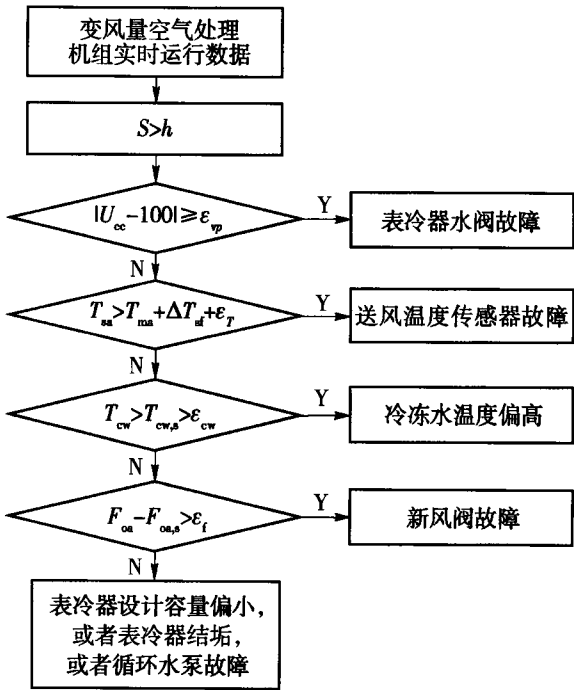


图 4 故障分类器 2 的故障诊断流程

Fig. 4 Fault isolation algorithm for rule-based fault classifier 2

当残差 CUSUM 控制图超出了控制图下限值时,基于规则的故障分类器 3 将被用于诊断空气处理机组故障。基于规则的故障分类器 3 的故障诊断流程见图 5。如果某个专家规则被满足,则意味着变风量空气处理机组存在相应的故障。若送风温度低于其设定温度,则说明空气处理机组的供冷量过多。此时,若表冷器水阀在较大开度位置,则表明表冷器水阀存在故障;若冷冻水温度低于其设定温度,就说明系统存在冷冻水温度偏低的问题;若新风量远小于其设定值,则意味着新风阀存在故障。若以上情况均未出现,则系统可能存在送风温度传感器故障。

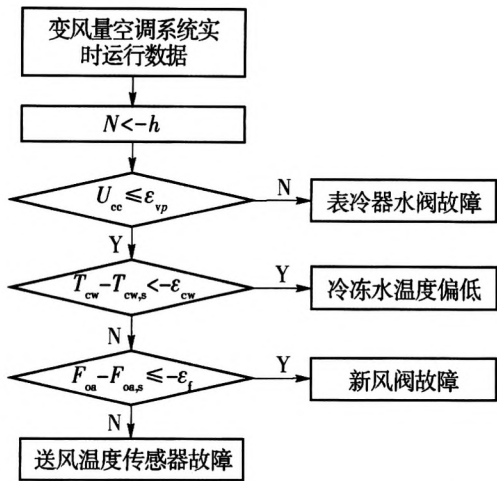


图 5 故障分类器 3 的故障诊断流程
Fig. 5 Fault isolation algorithm for rule-based fault classifier 3

3 故障检测与诊断方法的验证

3.1 空气处理机组故障诊断软件

以提出的故障检测与诊断方法为理论依据,开发了变风量空气处理机组故障检测与诊断软件. 故障检测与诊断软件可自动获取变风量空调系统运行数据,进行变风量空气处理机组在线故障诊断,引导设备维护人员及时发现和排除故障. 故障检测与诊断软件主要有 4 种功能:1) 读取变风量空调系统运行数据;2) 检测与诊断变风量空气处理机组故障;3) 可视化显示变风量空气处理机组运行数据,可用于评估空气处理机组原始设计,也可用于分析空气处理机组的故障原因;4) 自动生成空气处理机组故障报告,故障报告包含详细的空气处理机组故障信息,可为空气处理机组故障的维修和排除提供依据. 图 6 是试验建筑第 8 层空

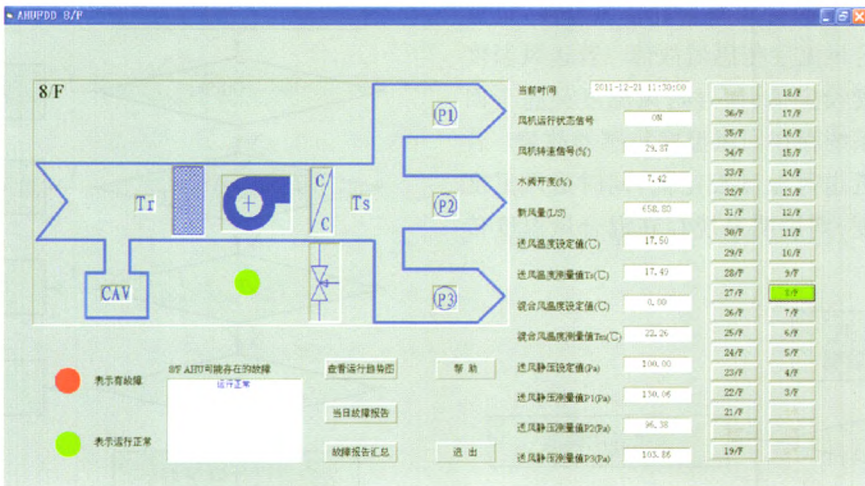


图 6 试验建筑空气处理机组故障诊断界面
Fig. 6 Interface of the fault diagnosis software for VAV air handling units

气处理机组故障检与测诊断界面.

3.2 空气处理机组故障诊断方法的验证

3.2.1 故障引入

空气处理机组故障检测与诊断软件在试验建筑中进行了在线应用,利用多种人工故障检验了故障检测与诊断软件的有效性和可靠性. 空气处理机组可能存在的故障类型很多,因此研究时很难涉及全部的故障类型. 由于自然故障是随机发生的,因此很难获得并用于故障诊断研究. 在实际工程中,人们经常利用人工故障检验故障检测与诊断软件的有效性和可靠性,这是目前国内验证空调系统故障检测与诊断软件的常用方法^[14]. 为了检测故障检测与软件的可靠性,本文引入以下 5 种故障:1) 送风温度传感器故障,2011 年 3 月 31 日 20:00—22:00,试验建筑第 27 层变风量空气处理机组的送风温

度传感器被置换为一个存在故障的传感器;2) 送风静压偏低,2011 年 3 月 31 日 12:00—14:00,试验建筑第 27 层变风量空气处理机组的表冷器被用塑料皮带包裹;3) 表冷器水阀卡在较大开度位置,2011 年 3 月 31 日 16:00—19:00,试验建筑第 27 层变风量空气处理机组的表冷器水阀被人为固定在较大开度位置;4) 表冷器水阀被人为关闭,2011 年 3 月 31 日 19:00—20:00,试验建筑第 27 层变风量空气处理机组的表冷器水阀被人为关闭;5) 混合风温度传感器故障,2011 年 3 月 31 日 14:30—15:30,试验建筑第 27 层变风量空气处理机组的混合风传感器信号被人为设定为 40 ℃.

3.2.2 故障诊断软件的在线应用情况

在验证故障检测与诊断软件的有效性和可靠性时,空气处理机组故障检测与诊断软件成功诊

断出了全部 5 种故障. 图 7 是自动生成的 2011 年 3 月 31 日试验建筑变风量空气处理机组的故障报告.

故障检测与诊断软件的在线应用和验证结果表

明,故障检测与诊断软件成功实现了各种预期功能,可直观反映空气处理机组的运行状态,准确判断变风量空气处理机组的故障原因,故障报告可作为变风量空气处理机组维护和检修的重要依据.

Microsoft Excel - VAVAHUFDREPORT2011-3-31.xls					
文件(F) 编辑(E) 视图(V) 插入(I) 格式(O) 工具(T) 数据(D) 窗口(W) 帮助(H) 故障查询与统计(S) 故障查询与统计(S) Adobe PDF(P)					
E13	A				
	A	B	C	D	E
1	Floor Number	AHU Number	Start Time	End Time	Possible Fault
2	27	1	2011-3-31 12:00	2011-3-31 13:55	送风静压太低
3	27	1	2011-3-31 14:30	2011-3-31 15:30	混合风温度传感器故障
4	27	1	2011-3-31 16:00	2011-3-31 18:55	表冷器水阀故障
5	27	1	2011-3-31 19:00	2011-3-31 20:00	表冷器水阀故障
6	27	1	2011-3-31 20:00	2011-3-31 21:55	送风温度传感器故障

图 7 试验建筑变风量空气处理机组故障报告
Fig. 7 Fault diagnosis report for air handling units

4 结论

- 1) 针对变风量空气处理机组故障,提出一种组合的故障检测与诊断方法.
- 2) 残差 CUSUM 控制图被用于诊断变风量空气处理机组故障,设计的 3 个基于规则的故障分类器被用于寻找故障源.
- 3) 基于实际系统的验证结果表明,提出的故障检测与诊断方法具有有效性和可靠性.

参考文献:

[1] HYVARINEN J, KARKI S. Building optimization and fault diagnosis source book [R]. Espoo, Finland: International Energy Agency, 1996.

[2] PIETTE M A, 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.

[3] WESTPHALEN D, ROTH K W. System and component diagnostics [J]. ASHRAE Journal, 2003, 45(4): 58-59.

[4] HOUSE J M, LEE W Y, SHIN D R. Classification techniques for fault detection and diagnosis of an air-handling unit [J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105 (1): 1087-1097.

[5] WANG S W, XIAO F. AHU sensor fault diagnosis using principal-component analysis method [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(2): 147-160.

[6] YOSHIDA H, KUMAR S, MORTA Y. Online fault detection and diagnosis in VAV air handling unit by RARX modeling [J]. Energy and Buildings, 2001, 33: 391-401.

[7] JIANG Y, LI J, YANG X. Fault direction space method for on-line fault detection [J]. ASHRAE Transactions, 1995, 101(2): 219-228.

[8] KATIPAMULA S, BRAMBLEY M R. Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-a review: part I [J]. International Journal of HVAC&R Research, 2005, 11(1): 3-25.

[9] KATIPAMULA S, BRAMBLEY M R. Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-a review: part II [J]. International Journal of HVAC&R Research, 2005, 11(2): 168-187.

[10] LU C, REYNOLDS M. CUSUM chart for monitoring an autocorrelated process [J]. Journal of Quality Technology, 2001, 33: 316-334.

[11] ALWAN L, ROBERTS H. Time series modeling for statistical process control [J]. Journal of Business and Economic Statistics, 1988, 6: 87-95.

[12] MONTGOMERY D, MASTRANGELO C. Some statistical process control methods for autocorrelated data [J]. Journal of Quality Technology, 1991, 23: 179-193.

[13] 杨叔子, 吴雅, 轩建平. 时间序列分析的工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 1-52.

[14] KEMP K W. The average run length of the cumulative sum control chart when a V mask is used [J]. Journal of the Royal Statistical Society: B, 1961, 23: 149-153.

[15] HIMMELBLAU D M. Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes [M]. Amsterdam: Elvisar Press, 1978: 27-93.

(责任编辑 吕小红)