

[文章编号] 1002-8528(2007)06-0045-04

离心式制冷机系统 传感器故障诊断的试验研究

徐新华¹, 崔景潭², 王盛卫¹

(1. 香港理工大学 屋宇设备工程学系, 香港; 2. 丹佛斯(上海)自动控制有限公司, 上海 200233)

[摘要] 传感器的可靠性及准确性对制冷机系统的可靠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部件故障诊断的基础。本文提出了基于主元分析法的制冷机传感器故障诊断方法, 该方法的主元分析模型由离心式制冷机系统中的相关测量变量在正常条件下的观测样本构成。这一方法利用这些变量在正常条件下的相关性来对传感器的测量观测值进行故障检测与诊断及测量重构, 并分别用 Q -统计及 Q -分布图来对传感器故障进行检测及诊断。本文利用实验室离心式制冷机的试验数据对这一基于主元分析法的传感器故障诊断方法进行了验证。

[关键词] 离心式制冷机系统; 传感器故障; 主元分析; 故障检测诊断与重构; 试验研究

[中图分类号] TU834.8+63 [文献标识码] A

Experimental Study on Sensor Fault Detection and Diagnosis and Estimation of Centrifugal Chiller System

XU Xin-hua¹, CUI Jing-tan², WANG Sheng-wei¹

(1. Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China; 2. Danfoss (Shanghai) Automatic Control Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

[Abstract] The reliability and accuracy of sensor measurements are greatly of significance to control and optimal operation of chiller system, as well as the basis of fault detection and diagnosis of chiller component faults. This paper presents a principle component analysis (PCA)-based sensor fault detection and diagnosis and estimation method for chiller system. A PCA model is composed of the observations of correlated variables in centrifugal chiller system in normal operation conditions aiming to capture the systematic variations of chiller system. These variations are used for the fault detection and diagnosis of new observations in terms of Q -statistic and Q -contribution plot. This PCA-based chiller sensor fault detection and diagnosis method was validated using the experimental test data of a centrifugal chiller.

[Keywords] centrifugal chiller system; sensor fault; principal component analysis; fault detection and diagnosis and estimation; experimental study

1 引言

自动故障检测与诊断 (fault detection and diagnosis) 对于大型、超高层、多功能性建筑的供热通风空调系统的运行与管理越来越必要。故障诊断不仅能为使用者节约能源消耗, 降低能耗费用, 对维持舒适的室内环境、提高室内空气品质, 延长设备的使用寿命, 减少温室气体的排放等都起到非常重要的

作用。它能帮助操作者及时做出正确决策, 保证系统的最优运行。正是由于故障诊断系统的重要性, 已引起了各国学者的广泛关注。国际能源组织 (International Energy Agency, IEA) 专门为 HVAC 系统的故障诊断制定了 Annex34 研究计划^[1]。

制冷机系统(冷冻站)是空调系统的核心, 其能耗占整个空调系统能耗的大部分。但由于制冷机系统的性能自然衰减及各种故障的发生使系统会消耗更多的能源。制冷机系统的故障可以分为制冷机部件故障及传感器故障。很多文献对制冷机部件故障的诊断提出了有效的方法^[2-5], 而对传感器故障的研究则较少。其实, 传感器的可靠性对制冷机系统的

[收稿日期] 2006-11-15

[作者简介] 徐新华(1972-), 男, 博士, 博士后

[联系方式] bexhu@polyu.edu.hk

可靠控制和系统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部件故障诊断的基础。如果传感器的测量有故障,那么以这些测量数据为基础的部件故障检测与诊断必定会造成误诊。可见,进行传感器故障诊断研究同样是非常重要的。在空调领域,有些学者对空调水系统,空调器的传感器进行了研究。文献[6]对多台制冷机并联时的水系统环路的传感器进行了卓有成效的检测及数据恢复;文献[7]也对空调水系统传感器的各种故障进行了分析并提出有效的诊断方法;文献[8]对空调柜进行了有效的传感器故障诊断及部件的故障诊断。

本文针对制冷机系统提出了一个基于主元分析法的制冷机系统传感器的故障诊断方法。主元分析法是根据系统变量之间的相关性来对传感器的测量值进行故障检测与诊断及测量重构的。本文利用一离心式制冷机的试验数据对这一基于主元分析法的制冷机系统传感器的故障诊断方法进行了验证,结果表明这一方法可以有效地对制冷机常用传感器的故障进行检测诊断及故障重构。

2 主元分析法基本原理

对于一个特定的系统,各传感器的测量值之间并不是孤立的,它们之间具有高度的相关性,在正常情况下,这种相关性是由物理、化学等基本规律所制约的,如质量守恒、能量守恒、热特性等。当某些传感器出现故障时,这种测量值之间的相关性就会被打破。主元分析法(Principle Component Analysis, PCA)是一种多元的统计方法,它能够捕捉系统的各个变量之间的相关性,当这些变量的测量值偏离它们的实际值或者真值时,这一相关性就不再存在。主元分析法就是利用系统变量之间的这种相关性来对传感器的测量值进行故障检测与诊断及测量重构的。

根据主元分析方法,正常过程的 m 个相关变量的 n 个观测构成的抽样阵列($X^{n \times m}$)可分解为

$$X = X + E \quad (1)$$

式中, X 的列向量进行了零平均化处理, X 称为可模变量, E 称为不可模变量或者残差。在正常情况下, E 主要是测量噪声。 X 及 E 可分别由下式表示:

$$X = TP^T \quad (2)$$

$$E = TP^T \quad (3)$$

式中, T 为得分矩阵, $T \in R^{n \times l}$, 实际上是原始数据向量在各元分方向上的坐标值。 $T \in R^{n \times (m-l)}$, 实际上是 X 在各非主元方向上的坐标值。 P 为荷载矩阵, $P \in R^{m \times l}$, P 的列向量分别是 X 的协方差阵 R 的前 l 个最大特征值 λ_i 所对应的特征向量, 一个列向量表示一个主元方向。 $P \in R^{m \times (m-l)}$, 其列向量分别是剩下的特征值所对应的特征向量。

很显然, 由于 P 及 P 的每一列都是空间 R 的特征向量。因此, 矩阵 $[P \ P]$ 是一个正交矩阵。可见, 主元分析法实际上是进行了一个正交变换, 但变换前后的数据方差未变, 只是方差分布发生了变化。方差分布最多的方向称为第一主成分, 按其递减的顺序, 依次称为第二主成分, 第三主成分等。根据统计学原理, X 的协方差阵可以用下式进行估计:

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

以上是主成分分析法的建模过程。一旦模型建立之后, 一个新的测量数据样本向量 (x) 就可以分解成为 2 个部分, 如式(5)~(7)所示:

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

$$\hat{x} = xPP^T \quad (6)$$

$$e = xPP^T = x(I - PP^T) \quad (7)$$

实质上, \hat{x} 是 x 在主元子空间 PCS (principal component subspace) 内的投影, 而 e 是 x 在残差子空间 RS (residual subspace) 内的投影。PCS 内主要包含测量数据的正常值, 而 RS 内主要为故障和测量噪声。余差 (e) 描述了这一新观测样本的变化及噪声, 它是传感器故障检测诊断及数据重构的基础。

3 故障检测诊断与重构

采用主元分析方法进行故障诊断时, Q -统计 (Q -statistic) 用作故障条件的指标, 如式(8)所示, 这一统计值也称作平方预测误差 (Squared Prediction Error, SPE)。当没有故障时 Q -统计低于一个置信限 (Q_a), 这个置信限代表了这些测量值的噪声以及动态性。当传感器有故障时, 测量值之间的相关性被破坏, Q -统计将超出这一置信限, 此时利用 Q -分布图 (Q -contribution plot) 即可诊断出是哪一个传感器发生了故障, 发生故障的传感器有最大的 Q -分布值, 如式(9)所示。置信限 (Q_a) 可按式(10)进行计算, 式(10)中的参数 θ_i 及 h_0 分别按式(11)、(12)计算。

$$Q\text{-statistic} = SPE = e^T e = \|x(I - PP^T)\|^2 \leq Q_\alpha \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \max(\eta_i) = \max(\|e_i\|^2 / \|e\|^2) \\ &= \max(\|e_i\|^2 / Q\text{-statistic}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$Q_\alpha = \theta_1 \left[\frac{c_\epsilon \sqrt{\theta_2 h_0^2}}{\theta_1} + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} + 1 \right]^{1/h_0} \quad (10)$$

$$h_0 = 1 - 2\theta_1 \theta_3 / (2\theta_1 \theta_3) \quad (11)$$

$$\theta_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j^i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

式中, λ 是协方差矩阵的特征值, l 为主元数, ϵ_ϵ 是置信度为 ϵ 的标准正态分布置信限。根据故障诊断的结果确定了故障的方向 β_i 。比如 $\beta_1 = [1, 0, \dots, 0]$ 表示观测的第 1 个测量值出现故障, 即第 1 个传感器有故障, 根据故障方向利用式(13)使得平方预测误差(SPE)最小化从而对传感器的测量进行重构。

$$\bar{x} = x[I - \beta_i \beta_i^T (I - PP^T) / \|\beta_i(I - PP^T)\|^2] \quad (13)$$

式中, \bar{x} 是观测的测量向量的重构向量。

4 制冷机主元分析模型

在离心式制冷机系统中有很多的传感器用于制冷机监控及控制。主要的测量变量如下: 蒸发温度(T_{ev})、蒸发压力(P_{ev})、冷冻水出水温度(T_{dws})、冷冻水进水温度(T_{dwr})、冷冻水流量(M_{dws})、压缩机输入功(W_{elec})、压缩机吸气温度(T_{suc})、压缩机排气温度(T_{dis})、冷凝温度(T_{cd})、冷凝压力(P_{cd})、冷却水出水温度(T_{lw})、冷却水回水温度(T_{ew})、冷却水流量(M_{ew})。在空调水系统中, 为了保证制冷机的稳定工作, 冷冻水流量及冷却水流量保持不变。通过这 2 个量的测量值与其对应的历史平均值就能很容易的检测到这两个流量传感器是否出现故障, 因此在本文中不考虑这两个流量传感器的故障。本文的制冷机主元模型包括剩下的 11 个测量变量, 即: T_{ev} 、 P_{ev} 、 T_{dws} 、 T_{dwr} 、 W_{elec} 、 T_{suc} 、 T_{dis} 、 T_{cd} 、 P_{cd} 、 T_{lw} 、 T_{ew} 。对于一个冷冻水流量及冷却水流量保持不变的制冷机系统来说, 冷冻水的进出水温度(T_{dws} 、 T_{dwr})及冷却水的进出水温度(T_{lw} 、 T_{ew})是制冷机系统的工况条件及工作性能的不确定性变量^[9-10]。这些测量值可

以用来计算表征制冷机运行的性能特征参数^[9,10], 可以说构成制冷机主元模型的这 11 个测量变量是相互关联的, 这种关联关系可以用主元模型来捕捉。

5 故障诊断方法的试验研究

5.1 试验描述

用于验证该故障诊断方法的试验数据来源于 ASHRAE1043-RP 研究项目^[11]。该项目由 ASHRAE 资助以研究制冷机故障, 试验产生的数据用于故障检测及诊断方法的研究及方法评估。试验用 310kW 的水冷离心式制冷机, 制冷机的测量变量主要为冷冻水进出水温度、冷冻水流量、蒸发器的蒸发温度及蒸发压力、压缩机的吸气压力及排气压力、压缩机的输入功率、冷凝器的蒸发压力及蒸发温度、冷却水的进出水温度、冷却水流量等。所有的数据由 BMS 自动采集, 采样时间为 10s。制冷机在不同工况下的运行通过控制 3 个变量来实现, 即冷冻水出水温度、冷却水进水温度及制冷机的制冷负荷, 制冷机冷负荷控制在 25%~100%之间。做了 2 组在制冷机无部件故障条件下的试验称为“Normal”和“Normal NC”以及在有部件故障条件下的试验。本文采用在制冷机无部件故障条件下的“Normal”及“Normal NC”试验数据来验证该基于主元分析法的制冷机传感器故障诊断方法。

5.2 主元分析模型

用“Normal”的试验数据来建立主元模型, 数据为 433 组, 经过稳态过滤器后有 161 组试验数据直接用于建模。在主元模型中保留 3 个主元, 这 3 个主元可以解释系统方差的 99.32%。图 1 是模型训练数据的 Q -统计(Q -statistic), 置信度为 95%时的置信限(Q_α)为 0.2985, 所有样本的 Q -统计值小于置信限, 说明这一模型可以很好地捕捉系统的主要相关性及系统的方差。这 3 个主元组成的荷载矩阵用来计算新的观测量余差和计算新观测样本的 Q -统计。置信限 Q_α 用于判断新观测样本的 Q -统计是否超出这一极限值进而判断传感器是否发生故障。

5.3 故障诊断与重构

为了验证这一主元分析模型用于传感器的故障诊断, 在“Normal NC”的试验数据上加载传感器偏差故障, 然后用这些有故障的试验数据来验证传感器的故障诊断方法。在同一时间, 只加载一种故障偏

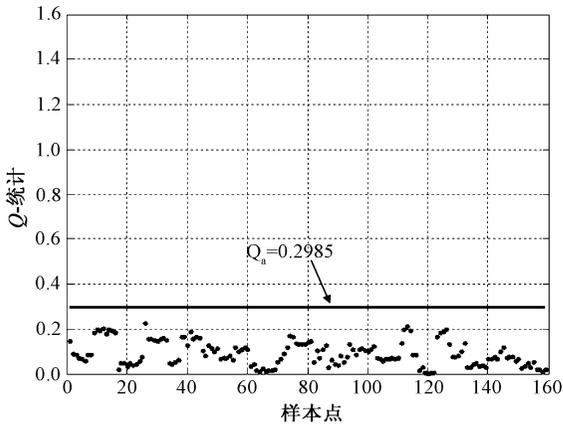


图1 主元分析模型的训练数据的 Q -统计图

差,用于反馈控制的测量值不加载偏差故障,即冷冻水出水温度(T_{dws})及冷却水回水温度(T_{ecw})不加载故障。因为如果反馈控制的测量值加载偏差故障而不考虑这种偏差故障对其它测量变量的影响是没有意义的,其它9个测量都分别加载偏差故障,各个测量量加载的偏差约为各测量量平均值的15%。表1所示为各传感器变量加载的故障偏差及诊断结果。检测率为检测到有故障的样本占检测样本的百分比,诊断率为成功确定出是哪一个传感器发生故障的样本占检测到发生故障样本的百分比。如表中所示,该传感器故障诊断方法对各个传感器的偏差故障能有效地检测到并能够成功地诊断及重构出来,重构误差除蒸发温度传感器外都小于10%。

本文以冷冻水进水温度(T_{dwr})的故障检测及诊断为例进行进一步的说明。 T_{dwr} 的故障偏差是 2.2°C ,该故障数据观测样本共148组,这些样本100%被检测到有故障发生如图2所示。图3是加载了故障的试验数据 Q -分布图。明显看出冷冻水

进水温度(T_{dwr})的测量值 Q 贡献量最大,说明冷冻水进水温度传感器发生故障的可能性最大。有95.97%的样本能够成功地被诊断出是冷冻水进水温度传感器发生故障,这一故障的重构值为2.368,与加载的故障偏差相比,相对误差为7.64%。

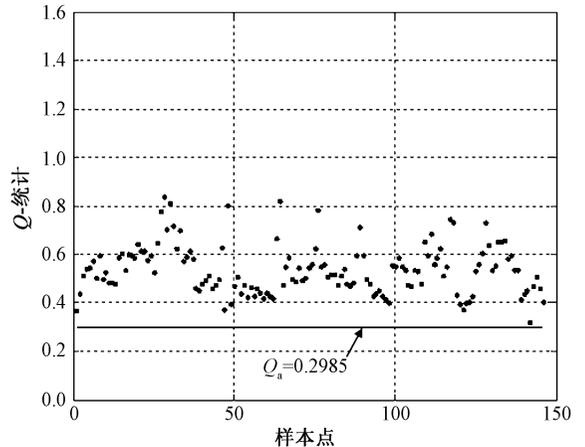


图2 主元模型的试验数据的 Q -统计图
(T_{dwr} 的故障偏差为 2.2°C)

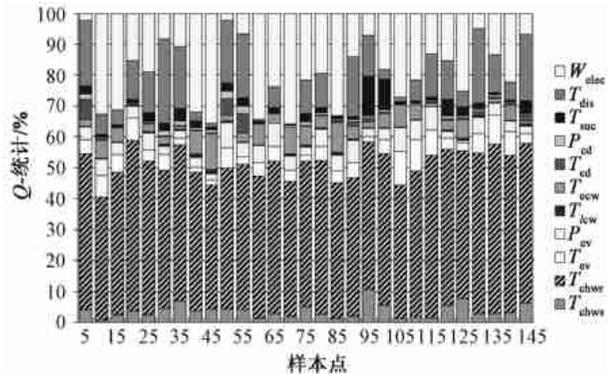


图3 主元模型的试验数据的 Q -分布图
(T_{dwr} 的故障偏差为 2.2°C)

表1 加载的偏差的大小及检测诊断重构的结果

变量	$T_{dwr}/^{\circ}\text{C}$	$T_{ev}/^{\circ}\text{C}$	P_{ev}/kPa	$T_{lw}/^{\circ}\text{C}$	$T_{cd}/^{\circ}\text{C}$	P_{cl}/kPa	$T_{suc}/^{\circ}\text{C}$	$T_{dis}/^{\circ}\text{C}$	W_{elec}/kW
加载的偏差	2.2	1.2	20	3.5	3.5	7.5	1.5	7	12
检测率/%	100	99.32	100	100	91.89	100	95.27	93.92	48.28
诊断率/%	95.97	98.64	100	100	100	100	100	100	100
重构的偏差	2.368	1.057	1.842	3.636	3.555	7.430	1.607	7.210	13.165
相对误差/%	7.64	11.90	7.88	3.90	1.58	0.93	7.11	3.00	9.71

6 结论

本文提出了基于主元分析法的离心式制冷机传感器的故障诊断方法,该方法根据系统变量之间的

相关性来对传感器的测量值进行故障检测与诊断及测量重构。该方法用 Q -统计来检测故障,然后用 Q -分布图来诊断判别是哪个传感器发生故障,最后

(下转第67页)

2)对风机盘管的使用应注意舒适性的要求。实际设计过程中,往往只注意风机盘管的冷量与室内负荷的匹配,而对室内的舒适性极少考虑,这是风机盘管使用过程中比较普遍的现象。因此,实际选用时应对所选风机盘管的送风温差进行计算。

3)风机盘管通常与新风机组配套使用,因此必须注意相应的新风系统,避免新风短路。只有风机盘管与新风机组配合好,才可能营造出良好的室内舒适性。

[参考文献]

- [1] 徐凤林. 风机盘管电机的合理匹配[J]. 暖通空调, 2002, 32(2): 43~45.
- [2] 刘宗源. 风机盘管机组的合理选用[J]. 暖通空调, 1996, 26(3): 39~43.
- [3] 倪美琴, 刘光远, 沈炜. 风机盘管机组不同工况下的冷量计算方法[J]. 暖通空调, 2006, 36(8): 67~69.
- [4] 徐菱虹. 风机盘管机组的变风量运行[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 30(1): 29~30.
- [5] 戎卫国, 张洪宁, 李鹏翔. 风机盘管机组的技术经济评价[J]. 暖通空调, 2002, 32(4): 100~101.
- [6] 许远超, 李苏泷. 风机盘管加新风系统变水温节能研究[J]. 节能技术, 2005, 23(133): 447~449.
- [7] 韩伟国, 陆亚俊. 风机盘管加新风空调系统 ϵ 值比较设计方法[J]. 暖通空调, 2002, 32(5): 80~83.
- [8] 史钟璋, 邢秀强. 风机盘管空调系统新风处理终参数选择方法的可行性分析[J]. 暖通空调, 1996, 26(4): 61~63.
- [9] 荆有印, 郑国忠. 隔断式风机盘管工位空调系统气流组织与微环境评价[J]. 暖通空调, 2006, 36(6): 18~23.
- [10] 宋宏光. 卧式风机盘管机组舒适性能的评价[J]. 暖通空调, 1996, 26(2): 36~39.
- [11] 陆亚俊等. 暖通空调[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 244~246.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB 50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 65~67.

(上接第 48 页)

对发生故障的传感器的测量值进行重构, 并利用实验室离心式制冷机的试验数据对这一方法进行了验证。试验中加载的各传感器偏差的检测率、诊断率基本上都在 95% 以上, 重构的偏差基本上也小于 10%, 结果表明该方法可以成功地对传感器的偏差故障进行检测、诊断以及故障重构。该传感器故障诊断方法可以与制冷机部件故障诊断方法、优化控制方法联合应用, 以提高建筑管理系统的可靠性及制冷机系统的能效。

[参考文献]

- [1] Dexter A, Pakanen J. International Energy Agency Building Demonstrating Automated Fault Detection and Diagnoses Methods in Real Buildings[R]. Technical Research Centre of Finland, Laboratory of Heating and Ventilation, Espoo, Finland, 2001.
- [2] Bailey MB. The Design and Viability of a Probabilistic Fault Detection and Diagnosis Method for Vapor Compression Cycle Equipment[D]. School of Civil Engineering, University of Colorado, 1998.
- [3] Jia YZ, Reddy TA. Characteristic physical parameter approach to modeling chillers suitable for fault detection, diagnosis and evaluation[J]. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 2003, 125(3): 258~265.
- [4] 徐新华, 崔景潭, 王盛卫. 基于模型的离心式制冷机故障诊断研究, 第一部分: 理论基础[J]. 流体机械, (接收待刊).
- [5] 徐新华, 崔景潭, 王盛卫. 基于模型的离心式制冷机故障诊断研究, 第二部分: 试验及现场验证[J]. 流体机械, (接收待刊).
- [6] Wang SW, Wang JB. Law-based sensor fault diagnosis and validation for building air-conditioning systems[J]. International Journal of HVAC & R Research, 1999, 5(4): 353~378.
- [7] 陈友明, 郝小礼. 建筑能源管理与控制系统中传感器故障及其检测与诊断[J]. 暖通空调, 2004, 34(2): 83~88.
- [8] Wang SW, Xiao F. Detection and diagnosis of AHU sensor faults using principal component analysis method[J]. Energy Conservation & Management, 2004, 45(17): 2667~2686.
- [9] Jia YZ. Model-Based Generic Approaches for Automated Fault Detection, Diagnosis, Evaluation (FDDE) and for Accurate Control of Field Operated Centrifugal Chillers[D]. Drexel University, 2002.
- [10] Braun JE. Methodologies for the Design and Control of Central Cooling Plant[D]. University of Wisconsin, Madison 1988.
- [11] Comstock MC, Braun JE. Fault Detection and Diagnostic (FDD) Requirements and Evaluation Tools for Chillers[R]. ASHRAE 1043-RP, Purdue University, 1999.