

[文章编号] 1002-8528 (2012) 12-0104-04

冷水机组故障诊断新模型

郑超瑜¹, 肖 赋², 陈 武¹ (1. 集美大学, 厦门 361021; 2. 香港理工大学, 香港)

[摘要] 冷水机组在大型建筑物空调系统中得到了广泛应用, 其故障诊断也受到了广泛关注。本文提出使用压缩机功耗、冷凝器负荷、虚拟蒸发器负荷以及虚拟冷凝器负荷替代蒸发器负荷, 组成冷水机组故障诊断新模型, 以满足不同参数条件下的故障诊断要求。通过 ASHRAE 1043-RP 数据的验证, 新模型具有很好的预测精度, 能够作为冷水机组的故障诊断模型。

[关键词] 冷水机组; 故障诊断; 模型; 数据驱动

[中图分类号] TU831.4 **[文献标识码]** A

New Reference Models for Fault Detection and Diagnose in Water Chillers

ZHENG Chao-yu¹, XIAO Fu², CHEN Wu¹ (1. Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

[Abstract] Water chiller has been widely used in large building air-conditioning system, and its fault detection and diagnosis has received extensive attention. In this paper, compressor power consumption, condenser load, pseudo evaporator load and pseudo condenser load were used to replace real evaporator load to develop new reference models for fault detection and diagnosis in water chillers, these reference models could satisfy different fault detection and diagnosis requirements under different parameters. All developed reference models had good prediction accuracy through the validation of the data sets of ASHRAE 1043-RP, and could be used as alternative reference models for fault detection and diagnosis in water chillers.

[Keywords] water chiller, fault detection and diagnosis, model, data-driven

1 引言

在暖通空调与制冷 (HVAC & R) 领域, 故障诊断的相关研究是从 20 世纪 80 年代末期开始逐渐兴起的, 严重滞后于航空、核工业以及化学领域的故障诊断, 原因在于 HVAC & R 领域的故障诊断并非用于确保安全^[1-2], 无法承受高昂的成本。随着电子计算机技术的发展、硬件价格的下降以及建筑物 HVAC & R 系统复杂性及能耗的增加, 出于节能、减少运营成本以及提高室内热舒适环境的目的, 越来越多的建筑物所有者开始考虑在 HVAC & R 系统中引入故障诊断系统。

现代大型中央空调系统几乎都采用冷水机组。在热带和亚热带地区, 大型建筑物冷水机组的能耗可占整个建筑物能耗的 35% ~ 40%^[3], 甚至更多。因此, 冷水机组的故障诊断受到了广泛关注^[3-4]。

在冷水机组的故障诊断研究中, 清晰的第一性原理 (firstprinciple)、丰富的经验知识以及丰富的数据有助于研究人员发展各种基于数据驱动的故障诊断模型, 如简单线性回归模型^[4]、Bi-quadratic (BQ) 回归模型^[4]、多元多项式回归模型^[3,5-9]、Gordon-Ng 简化模型^[10]、Gordon-NG 通用模型^[11]、Lee 简化模型^[12]以及神经网络模型^[13]等。

由于建筑物所有者对制冷空调系统的投资不同, 所能获取的参数亦有所差异, 因此, 有必要探讨不同的系统模型, 以适应不同参数条件下故障诊断的需要。同时, 从节约成本的角度出发, 也有必要探讨使用更为低廉的测量参数的系统模型。

2 典型冷水机组

大型建筑物的空调系统大都采用冷水机组, 典型的冷水机组系统如图 1 所示, 它包含 3 个子回路: 定流量的冷冻水回路、制冷剂回路和定流量的冷却水回路, 制冷剂回路与冷冻水回路和冷却水回路分别在蒸发器和冷凝器中相互耦合。

为了便于控制和管理, 商业化的冷水机组通常

[收稿日期] 2012-07-31

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2012D034)

[作者简介] 郑超瑜 (1979-), 男, 硕士, 讲师

[联系方式] chenwu73@jmu.edu.cn

行阶段测量的冷却水的稳定流量;其余参数含义同前。

3.2 模型的预测精度

在故障诊断中,模型对系统正常运行工况的预测精度是判断该模型是否具有价值的主要标准之一。为了验证新模型的预测能力,本文使用 ASHRAE 1043-RP 的数据进行验证。ASHRAE 1043-RP 由 ASHRAE 资助,通过实验研究的方式产

生冷水机组正常运行工况的数据和典型故障工况下的数据,用以发展和评估故障诊断方法。实验的冷负荷从 25% 变化到 100%,模拟了正常运行工况和 8 个典型的故障工况,正常运行工况包含 27 组数据;对于故障工况,除失效的膨胀设备外,其余的 7 个故障按故障的程度分 4 级进行模拟,每个级别各有 27 组数据,具体如表 1 所示。

表 1 ASHRAE RP-1043 的 7 个典型故障的模拟方法

故障	仿真方法	正常工况	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
冷冻水减少	减少流量	13.6 kg/s	10%	20%	30%	40%
冷却水减少	减少流量	17.0 kg/s	10%	20%	30%	40%
润滑油过多	增加润滑油	10 kg	14%	32%	50%	68%
制冷剂过多	增加制冷剂	136 kg	10%	20%	30%	40%
制冷剂泄漏	减少制冷剂	136 kg	10%	20%	30%	40%
冷凝器脏堵	堵塞管子	164 根管子	20 根堵塞 12%	33 根堵塞 20%	49 根堵塞 30%	74 根堵塞 45%
不凝性气体	加入氮气	无氮气	0.045 4 kg	0.072 6 kg	0.10 kg	0.245 kg

采用 ASHRAE 1043-RP 在正常工况下的数据 Normal 2 用于训练模型,结果如表 2 所示,各个模型的都有很好的拟合精度, R^2 至少大于 95%。

表 2 各个模型的 R^2 值 (Normal 2) %

特征参数	传统模型 R^2	模型 1 R^2	模型 2 R^2	模型 3 R^2	模型 4 R^2
TEI-TEO	99.998 5	99.915 8	99.983 1	99.995 1	99.975 2
TCO-TCI	99.983 1	99.938 2	99.996 3	99.978 8	99.986 0
T_{ev}	99.224 0	99.176 6	99.226 0	99.218 2	99.232 8
T_{suc}	99.909 3	99.904 4	99.909 9	99.908 4	99.910 8
T_{oil}	99.948 4	99.942 8	99.962 2	99.947 8	99.961 6
T_L	99.944 0	99.945 4	99.948 3	99.944 9	99.948 2
T_{oil}	99.480 6	98.612 2	99.395 1	99.480 3	99.448 9
T_{oil}	97.143 5	95.136 6	97.107 6	97.148 4	97.153 5

注:(TEI-TEO)为冷冻水进出口温差;(TCO-TCI)为冷却水进出口温差; T_{ev} 为蒸发压力; T_{suc} 为压缩机进口温度; T_{oil} 为冷凝温度; T_{oil} 为压缩机出口温度; T_L 为液管温度; T_{oil} 为油温。

为了进一步验证模型对系统正常运行工况的预测能力,用 ASHRAE 1043-RP 正常工况的数据 Normal 1 进一步验证,结果如表 3 所示。可以看出,各个模型的预测精度都很好,除了模型 1 对油温 T_{oil} 的 R^2 值为 92.182 1% 以外,其余的 R^2 都大于 95%。

4 结论

有效的故障诊断往往取决于所能准确获取的参数。传统的用于冷水机组故障诊断的多元多项式回

表 3 各个模型的 R^2 值 (Normal 1) %

特征参数	传统模型 R^2	模型 1 R^2	模型 2 R^2	模型 3 R^2	模型 4 R^2
TEI-TEO	99.996 9	99.833 6	99.953 2	99.992 3	99.957 5
TCO-TCI	99.952 2	99.906 5	99.992 3	99.948 3	99.987 5
T_{ev}	97.012 1	97.119 2	96.981 3	97.008 9	97.023 1
T_{suc}	99.813 8	99.824 7	99.817 7	99.815 9	99.824 0
T_{oil}	99.718 7	99.748 5	99.742 9	99.719 2	99.744 3
T_L	99.907 6	99.918 5	99.912 9	99.907 1	99.918 8
T_{oil}	99.460 5	97.496 3	99.333 1	99.444 6	99.389 5
T_{oil}	96.166 3	92.182 1	95.880 6	96.185 6	95.947 0

注:各参数含义同前。

归模型需要蒸发器负荷、冷冻水出口温度和冷却水进口温度等信息,当蒸发器负荷信息不能有效获取时(如由于成本、安装等原因没有安装流量传感器、流量传感器损坏或测量精度很差),模型将失效。

冷水机组的冷冻水回路、冷却水回路与制冷剂回路之间的耦合作用使得蒸发器、压缩机以及冷凝器的负荷信息相互关联,本文将压缩机负荷以及冷凝器负荷信息替代多元多项式回归模型的蒸发器负荷信息组成新的故障诊断模型。此外,根据用于大型中央空调的冷水机组定流量的特性,也可利用虚拟的蒸发器负荷以及冷凝器负荷替代多元多项式回归模型中的蒸发器负荷信息。这些新模型各有不同参数要求,可以用于不同参数条件下的冷水机组的故障诊断。新模型经过 ASHRAE 1043-RP 的数据验证表明,在稳定工况下,新模型对冷水机组重要的

运行参数(如蒸发温度、冷凝温度、压缩机进出口温度、冷却水进出口温差、冷冻水进出温差以及液管温度)的预测 R^2 值都大于 95%, 即新模型具有良好的预测能力, 可以适用于冷水机组的故障诊断。

参考文献

- [1] Braun JE. Automated fault detection and diagnosis for vapor compression equipment [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125:266 ~ 274.
- [2] Li H, Braun JE. Economic evaluation of benefits associated with automated fault detection and diagnosis in rooftop air conditioners [J]. *ASHRAE Transactions*, 2007, 113 (2):200 ~ 210.
- [3] Cui JT, Wang SW. A model-based online fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chiller systems [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2005, 44 (10):986 ~ 999.
- [4] Swider DJ. A comparison of empirically based steady-state models for vapor compression liquid chillers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23 (5):539 ~ 556.
- [5] Comstock MC, Braun JE, Groll EA. The sensitivity of chiller performance to common faults [J]. *HVAC & R Research*, 2001, 7 (3):263 ~ 279.
- [6] Jia YE, Reddy TA. Characteristic physical parameter approach to modeling chillers suitable for fault detection, diagnosis, and evaluation [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2003, 125 (3), 258 ~ 265.
- [7] Reddy TA. Application of a generic evaluation methodology to assess four different chiller FDD methods (RP-1275) [J]. *HVAC & R Research*, 2007, 13 (5):711 ~ 729.
- [8] Zhou Q, Wang SW, Xiao F. A novel strategy for the fault detection and diagnosis of centrifugal chiller systems [J]. *HVAC & R Research*, 2009, 15 (1):57 ~ 75.
- [9] Xiao F, Zheng CY, Wang SW. A fault detection and diagnosis strategy with enhanced sensitivity for centrifugal chillers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (17 ~ 18):3963 ~ 3970.
- [10] Gordon JM, Ng KC, Chua HT. Centrifugal chillers: Thermodynamic modeling and a diagnostic case study [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18 (4):253 ~ 257.
- [11] Ng KC, Chua HT, Ong W, et al. Diagnostics and optimization of reciprocating chillers: Theory and experiment [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1997, 17 (3):263 ~ 276.
- [12] Lee TS. Thermodynamic modeling and experimental validation of screw liquid chillers [J]. *ASHRAE Transactions*, 2004, 110 (1):206 ~ 216.
- [13] Swider DJ, Browne MW, Bansal PK, et al. Modelling of vapour-compression liquid chillers with neural networks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21 (3):311 ~ 329.

(上接第 89 页)

- [7] Li Huimin, Qi Ye. Carbon embodied in international trade of China and its emission responsibility [J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2010, 8 (2):24 ~ 31.
- [8] 杨会民, 王媛, 刘冠飞. 2002 年与 2007 年中国进出口贸易隐含碳研究 [J]. *资源科学*, 2011, (8):1563 ~ 1569.
- [9] Zhu Qirong. Empirically analysis of the CO₂ emissions embodied in exports of China [J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2011, 9 (3):86 ~ 96.
- [20] 张云, 杨来科, 闫云凤. 出口产品国内 CO₂ 排放与行业国内总排放的比较 [J]. *世界经济研究*, 2011, (7):70 ~ 74.
- [21] 徐大丰. 碳生产率、产业关联与低碳经济结构调整——基于我国投入产出表的实证分析 [J]. *软科学*, 2011, 25 (3):42 ~ 46.
- [22] 徐大丰. 低碳经济导向下的产业结构调整策略研究——基于上海产业关联的实证研究 [J]. *华东经济管理*, 2010, 24 (10):6 ~ 9.
- [23] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20 (5):28 ~ 34.
- [24] 肖文, 樊文静. 低碳经济发展的测度指标——兼谈我国低碳经济的发展水平 [J]. *工业技术经济*, 2011, (1):27 ~ 33.
- [25] Hendrickson CT, Lave LB, Matthews HS. *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-output Approach* [M]. Washington DC: Resources for the Future Press, 2006.
- [26] 陈国谦. 建筑碳排放系统计量方法 [M]. 北京: 新华出版社, 2010.

更正

2011 年第 12 期第 109 页“空调冷负荷计算方法发展状况研究”一文补充基金项目如下: [基金项目] 国际科技合作项目“住房城乡建设系统应对气候变化的低碳技术研发与应用合作研究”(S2011ZR0392)。

2012 年第 4 期第 29 页“乡村居住建筑生态节能性对比分析研究——以关中乡村民居建筑夏季热工性能对比分析研究为例”一文中第一作者冯涛的工作单位有误, 应为“河南理工大学 建筑与艺术设计学院”。

2012 年第 4 期第 1 页“中国大陆绿色建筑发展现状及前景”一文补充基金项目如下: [基金项目] 中美清洁能源联合研究中心建筑节能合作项目“建筑节能市场化研究与推广”(2010DFA72740-08)。

2012 年第 10 期第 46 页“模块式立体绿化对建筑节能的影响研究”一文补充基金项目如下: [基金项目] 中美清洁能源联合研究中心建筑节能合作项目“建筑节能市场化研究与推广”(2010DFA72740-08)。

特此更正。

本刊编辑组