

文章编号:0253-4339(2026)05-0014-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250520001

制冷空调多重并发故障解耦模型适用性及失效机理研究

赵鑫祥¹ 刘江岩² 庞 源¹ 刘 彬¹ 李夔宁¹

(1 重庆大学能源与动力工程学院 重庆 400030; 2 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400044)

摘 要 本文开展了制冷空调制冷剂不足、制冷剂过量充注、冷凝器脏污、蒸发器脏污等故障在不同故障数量、严重等级耦合下的多重并发故障实验,研究了基于虚拟制冷剂充注量、虚拟空气流量的故障解耦模型的适用性。提出了基于贝叶斯分类的故障解耦阈值构建方法,定量评估了不同故障双重、三重耦合下的解耦精度。结果表明:制冷剂不足、制冷剂过量充注需分别解耦,解耦精度可达 100%,但实际应用时模型混用易导致误诊;虚拟空气流量对冷凝器脏污、蒸发器脏污单故障,并发故障的识别精度高于 94.38%,但难以辨识具体故障等级。制冷剂严重不足时换热器出口不饱和引起工质参数剧烈变化会导致换热器脏污故障的解耦失效。制冷剂过量充注下冷凝温度升高、内外工质温差增大等,亦引起虚拟空气流量计算误差增大,换热器脏污的解耦精度显著降低。

关键词 制冷空调;并发故障;虚拟传感器;贝叶斯分类;故障解耦

中图分类号: TU831.4; TP306⁺.3

文献标识码: A

Research on the Applicability and Failure Mechanism of Decoupling Models for Multiple Concurrent Faults in Refrigeration and Air Conditioning Systems

Zhao Xinxiang¹ Liu Jiangyan² Pang Yuan¹ Liu Bin¹ Li Kuining¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400044, China)

Abstract This study performs multiple simultaneous fault (MSF) experiments on refrigeration and air-conditioning systems, including refrigerant undercharge (RU), refrigerant overcharge (RO), condenser fouling (CF), and evaporator fouling (EF), under conditions that include various combinations of fault types and severity levels. Fault-decoupling models based on the virtual refrigerant charge and virtual airflow rate are evaluated. In addition, a Bayesian classification-based approach for establishing fault-decoupling thresholds is proposed, and the decoupling accuracy under different double- and triple-fault combinations is quantitatively assessed. The results demonstrate that RU and RO should be decoupled separately to achieve a decoupling accuracy of 100%. However, the practical application of mixed models often leads to misdiagnoses. The virtual airflow rate model achieved a decoupling accuracy exceeding 94.38% for single faults and MSFs related to CF and EF. However, it failed to distinguish specific fault severity levels. Further, under severe RU conditions, two-phase refrigerant at heat exchanger outlets significantly impacted working fluid parameters, leading to the failure of decoupling fouling faults. Moreover, RO increased the condensation temperature and widened the temperature differential between fluids inside and outside the heat exchangers, resulting in larger calculation errors for the virtual airflow rate and a substantially reduced decoupling accuracy.

Keywords refrigeration and air conditioning; concurrent faults; virtual sensor; Bayesian classification; fault decoupling

制冷空调系统长期运行不可避免地出现制冷工质泄漏、换热器脏污等故障,导致运行能耗增加,温控效果降低,并严重影响设备寿命^[1-4]。目前,领域内针对制冷空调单一故障的诊断研究及技术开发已取得长足进展^[5-6]。然而,实际制冷空调一般多个故障同时发生(泄漏、脏污等),不同故障叠加耦合对系统

运行参数变化的影响存在复杂的加强或抵消效应^[7],显著增加了故障辨识难度。传统针对单一故障的诊断方法极易出现误诊和漏诊^[8]。因此,开展制冷空调多重并发故障的诊断研究对于故障诊断技术实际应用具有重要意义^[9]。

故障解耦是多重并发故障诊断重要理论,旨在

基金项目:国家自然科学基金(52406008)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52406008).)

收稿日期:2025-05-20;修回日期:2025-05-30;录用日期:2025-08-21

将多故障同时诊断分解成单故障逐步解耦。通过提取对特定故障敏感的解耦特征,构造特定故障的解耦模型,逐步判断每个可能发生的故障。Li Haorong等^[10]理论揭示了空调过热度、过冷度变化与制冷剂充注质量的热力学关系,并提出虚拟制冷剂充注量模型实现制冷剂充注故障解耦。W. Kim等^[11]发现在过冷度、过热度为0时制冷剂充注预测模型失效,引入蒸发器入口干度和压缩机排气过热度提升了模型适用范围。Li Guannan等^[12]实验发现虚拟制冷剂充注量模型在多联机制冷剂过量充注诊断中失效,并利用相关性分析与支持向量机进行了改进。Li Haorong等^[13]理论分析了换热器脏污对空调系统性能的影响机理,提出了虚拟换热器空气流量用于换热器脏污故障解耦。W. Kim等^[14]将机器学习算法与虚拟空气流量模型结合,提升了对不同节流机构空调系统换热器脏污故障的解耦适用性。Y. Lee等^[15]将深度学习与虚拟传感器技术结合,通过建立性能退化比模型,实现了多联机系统冷凝器脏污故障的智能诊断与评估。

虽然已有研究提出了针对制冷剂充注、换热器脏污等故障的解耦方法,但其适用性并未得到充分验证。一方面,多重并发故障涉及故障类型、数量、严重等级的多重叠加,多故障组合数量远大于单一故障(指数倍增加),导致多故障实验耗时长、成本高。而现有模型主要利用单故障或少量固定数量与严重等级的多故障数据进行测试,模型的有效性并未得到广泛验证。另一方面,同一故障与不同故障耦合以及故障不同严重等级的耦合,对运行参数加强或抵消的影响是非线性的,进而影响解耦特征的可靠性。Hu Yifeng等^[16]研究发现并发故障中包含不凝性气体故障时,制冷剂充注解耦模型基本失效;Zhou Zhenxin等^[17]实验发现冷凝器脏污等级从2增至3时,冷凝器入口压力增幅为0~1级增幅的7倍。虽然部分研究证实了已有故障解耦模型的适用性缺陷,但缺乏对模型失效机理的深入探讨。此外,已有研究通常基于实验设计的硬性、离散边界(如:充注量、脏污等级等)作为解耦阈值,并未考虑实际工况运行参数分布的连续性不同故障耦合下参数分布的重叠性,进而导致多故障的误诊和漏诊。

基于上述问题,本文针对制冷空调多重并发故障解耦模型适用性及失效机理开展研究。开展了制冷空调制冷剂不足、过量充注、冷凝器脏污、蒸发器脏污等故障在不同数量及严重等级耦合下的全新的、全面的故障实验;提出了基于贝叶斯分类的故障解耦阈值构建方法;研究了现有解耦模型在多故障

下的解耦适用性,分析总结了模型失效的热力学机理。论文结果将为制冷空调多重并发故障诊断研究提供重要实验基础和理论依据,为制冷空调故障诊断技术应用提供技术参考。

1 基本原理

本研究采用虚拟制冷剂充注量模型用于制冷剂充注故障(制冷剂不足、制冷剂过量充注)解耦,采用虚拟换热器空气流量模型用于冷凝器、蒸发器脏污故障解耦,并利用贝叶斯分类算法构建解耦模型的解耦阈值,基本原理如下。

1.1 虚拟制冷剂充注量

虚拟制冷剂充注量(virtual refrigerant charge, VRC)由Li Haorong等^[10]提出,旨在通过建立制冷系统制冷剂充注量与过冷度、过热度之间的相关关系,实现不同工况下制冷系统内制冷剂含量的预测。

$$\frac{m_{\text{total}} - m_{\text{total, rated}}}{m_{\text{total, rated}}} =$$

$$k_1(T_{\text{sc}} - T_{\text{sc, rated}}) + k_2(T_{\text{sh}} - T_{\text{sh, rated}}) \quad (1)$$

式中: m_{total} 为系统当前制冷剂充注量,g; $m_{\text{total, rated}}$ 为额定制冷剂充注量,g; T_{sc} 为当前过冷度,K; $T_{\text{sc, rated}}$ 为额定过冷度,K; T_{sh} 为当前过热度,K; $T_{\text{sh, rated}}$ 为额定过热度,K; k_1 、 k_2 为常数,可通过最小二乘法进行拟合计算。

Li Guannan等^[12,18]研究发现上述VRC模型(后称VRC-不足模型)在制冷剂不足故障下精度较高。对于制冷剂过量充注故障,需进一步增加模型输入变量,提升预测精度^[18],如式(2)所示(后称VRC-过充模型)。

$$\frac{m_{\text{total}} - m_{\text{total, rated}}}{m_{\text{total, rated}}} = k_1(T_{\text{sc}} - T_{\text{sc, rated}}) +$$

$$k_2(T_{\text{sh}} - T_{\text{sh, rated}}) + k_3(x_1 - x_{1, \text{rated}}) + k_4(x_2 - x_{2, \text{rated}}) \quad (2)$$

式中: x_1 和 x_2 为补充特征参数的当前测量值; $x_{1, \text{rated}}$ 和 $x_{2, \text{rated}}$ 为补充特征参数在正常充注条件下的额定值; k_3 、 k_4 为对应常数。补充特征参数可选择与制冷剂充注量线性相关度高的系统参数^[12,18],其中,皮尔逊相关系数 r 可用于量化特征相关度,如式(3)所示。

$$|r| = \left| \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(N-1)S_x S_y} \right| \quad (3)$$

式中: $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 为2个特征变量的样本均值; S_x 为样本标准差; $(x_i - \bar{x})/S_x$ 与 $(y_i - \bar{y})/S_y$ 分别为对应变量的样本标准分数。相关系数 r 取值范围为 $[-1, 1]$ 。若 r 为1或-1,表明显著正相关或负相关;若 r 为0,则认为非线性相关^[19]。

1.2 虚拟空气流量

换热器脏污会导致流过换热器表面的空气体积流量减少,因此可通过换热器表面空气流量大小来判断是否脏污^[20]。但直接测量换热器表面空气流量较困难且成本高昂,因此现有研究通过能量平衡法来虚拟计算换热器表面空气流量,如式(4)所示^[20]。

$$V = \frac{(h_{in}(p_{in}, T_{in}) - h_{out}(p_{out}, T_{out}))m_{ref}\nu_{air}}{c_{p,air}(T_{out,air} - T_{in,air})} \quad (4)$$

式中: V 为虚拟换热器空气体积流量, m^3/s ; h_{in} 、 h_{out} 分别为换热器制冷剂侧入口、出口焓, J ; T_{in} 、 T_{out} 分别为换热器制冷剂侧入口、出口温度, K ; p_{in} 、 p_{out} 分别为换热器制冷剂侧入口、出口压力, Pa ; $T_{in,air}$ 、 $T_{out,air}$ 分别为换热器空气侧入口、出口温度, K ; ν_{air} 为空气比容, m^3/kg ; $c_{p,air}$ 为空气比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m_{ref} 为制冷剂质量流量, kg/s ,可通过经验公式(5)计算^[21]。

$$m_{ref} \approx 150 \frac{D_c^{4.36} p_{f,in}^2}{L_c^{0.57} h_{fg}^{1.5} v_f^{2.08} \mu_f^{0.07}} \left(1 + \frac{h_{f,in} - h_f}{h_{fg}}\right)^{0.64} \left(\frac{v_g}{v_f}\right)^{1.42} \quad (5)$$

式中: D_c 为毛细管内径, m ; L_c 为毛细管总长度, m ; $p_{f,in}$ 为毛细管进口压力, Pa ; h_{fg} 为制冷剂蒸发潜热, J/kg ; $h_{f,in}$ 为毛细管进口制冷剂焓值, J/kg ; h_f 为 $p_{f,in}$ 下制冷剂饱和液体状态焓值, J/kg ; v_f 为 $p_{f,in}$ 下制冷剂饱和液体状态比容, m^3/kg ; v_g 为 $p_{f,in}$ 下制冷剂饱和气体状态比容, m^3/kg 。

在实际换热器(冷凝器、蒸发器)脏污故障解耦中,为进一步展现故障和正常条件下的特征差异,用式(6)和式(7)归一化处理虚拟空气流量。

冷凝器侧:

$$F_c = \frac{V_c - V_{c,normal}}{V_c} \quad (6)$$

蒸发器侧:

$$F_e = \frac{V_e - V_{e,normal}}{V_e} \quad (7)$$

式中: F 为归一化后的空气流量; V 为空气流量, m^3/s ; V_{normal} 为无故障工况下空气流量均值, m^3/s ;下标 c 表示冷凝器; e 表示蒸发器。

1.3 贝叶斯分类

制冷系统无故障与故障下解耦特征通常呈现不同统计分布,基于贝叶斯原理,可计算特征故障与无故障状态的后验概率,判定系统故障状态。在此基础上,通过最小化误分类率,获取贝叶斯分类算法在已知特征分布条件下的最优决策边界,形成故障解耦阈值 θ ,即:

$$\theta = \frac{\mu_1^2 \sigma_0^2 - \mu_0^2 \sigma_1^2 + 2\sigma_0^2 \sigma_1^2 \ln \frac{\sigma_1 P(C_1)}{\sigma_0 P(C_0)}}{2(\mu_1 \sigma_0^2 - \mu_0 \sigma_1^2)} \quad (8)$$

式中: μ_0 和 μ_1 分别为无故障和故障状态的特征均值; σ_0^2 和 σ_1^2 分别为无故障和故障状态的方差; $P(C_0)$ 和 $P(C_1)$ 分别为无故障和故障状态的先验概率。

基于故障解耦阈值,进一步设计故障解耦精度评价指标,即正确解耦故障样本数占总故障样本数的比例,如式(9)所示。

$$A_d = \frac{n_{cor}}{n_{fault}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: A_d 为故障解耦精度; n_{cor} 为正确解耦故障的样本数量; n_{fault} 为故障的总样本数量。

2 实验装置及数据获取

本研究设计的空调实验系统如图1所示。系统额定制冷量为 3.5 kW ,采用制冷剂 R32,额定充注量为 620 g 。实验模拟了4种典型故障:制冷剂过量充注(refrigerant overcharge, RO)、制冷剂不足(refrigerant undercharge, RU)、蒸发器脏污(evaporator fouling, EF)以及冷凝器脏污(condenser fouling, CF)。



图1 实验设备

Fig.1 Experimental equipment

制冷剂不足和过充故障通过制冷剂充注设备等额减少或增加制冷剂质量实现。冷凝器脏污和蒸发器脏污故障通过 M. Mehrabi 等^[22]的实验方法,在换热器翅片表面均匀涂抹脏污材料(由4%切割羽毛和96%石英砂组成)(图2)。故障具体实现方法如表1所示。

多故障实验包含了4种典型故障在不同类型、严重等级下的所有组合(表2)。为模拟家用空调实际运行环境,所有故障实验均在自然工况下进行,室外干球温度为 $25 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 $32\% \sim 90\%$,经历不同气象条件(晴、阴、雨等)。此外,针对每组实验分别设置 21 、 24 、 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 室内温度设定值。实验系统采集的特征变量包括:冷凝器进/出口温度、毛细管进/出口温度与进口压力、蒸发器进/出口温度、压缩机进/出口温度与压力、压缩机功率、室内外温/湿度,蒸发

器/冷凝器进/出风温度等。图 3 标识了测点的具体位置及传感器类型。

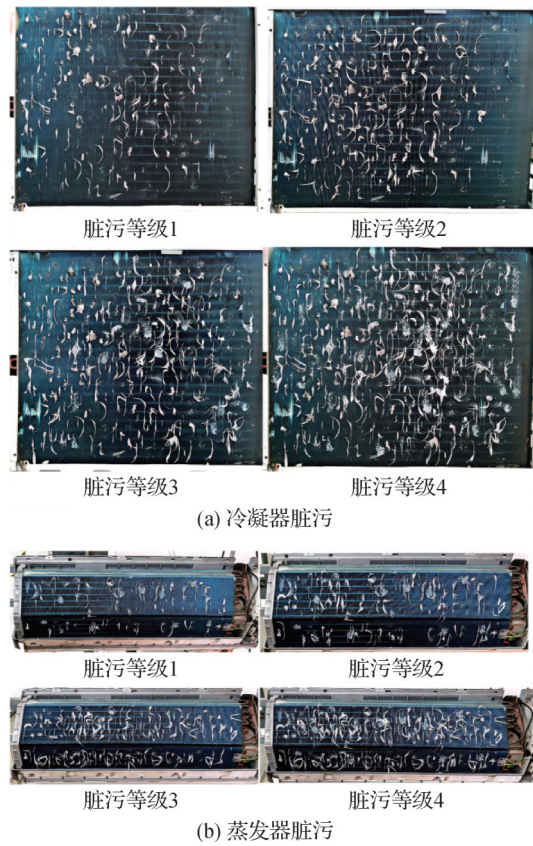


图 2 脏污实验

Fig.2 Fouling experiment

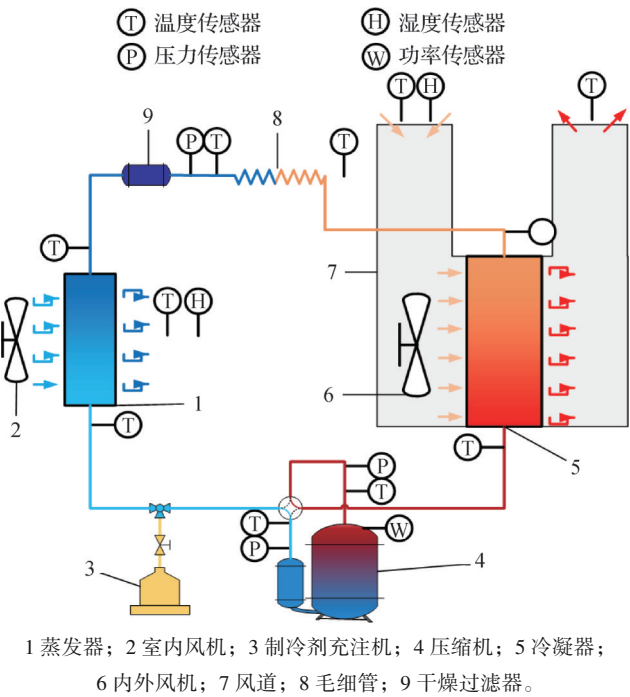


图 3 实验系统

Fig.3 Experimental system

表 1 故障强度定义及模拟方法

Tab.1 Fault intensity definition and simulation method

故障名称	故障等级	故障描述
RO	1	充注 713 g 制冷剂
RU	1、2、3	充注 558、496、434 g 制冷剂
EF	1、2、3、4	添加 3、6、9、12 g 脏污
CF	1、2、3、4	添加 6、12、18、24 g 脏污

表 2 故障实验组合

Tab.2 Fault experiment combinations

故障类型	故障组合	实验组数	样本数量
单故障	RU	9	1 892
	RO	3	6 926
	CF	12	8 764
	EF	12	9 820
双故障	RU+CF	36	23 980
	RU+EF	36	16 168
	RO+CF	12	8 310
	RO+EF	12	7 682
	CF+EF	48	42 276
三故障	RU+CF+EF	144	89 266
	RO+CF+EF	48	31 112
总计		372	246 196

为消除原始数据中系统启动和温度设定调节阶段的动态数据,采用基于滑动窗口的稳态滤波方法进行检测和消除,如式(10)所示。

$$k_w = \frac{\sum_{i=1}^l (t_i - \bar{t}) (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^l (t_i - \bar{t})} \leq \delta \quad (10)$$

式中: k_w 为滑动窗口内数据的移动斜率; t_i 为特征序列中时间点; y_i 为对应时间点 t_i 采样值; l 为滑动窗口内数据量; δ 为预设判定阈值。本研究将冷凝器入口温度和压缩机出口压力作输入参数,斜率阈值为 0.2。

此外,利用四分位距的方法消除离群数据点,超出上下限的数据点即被识别为离群值。具体如式(11)与式(12)所示。

$$L_L = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (11)$$

$$L_U = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (12)$$

式中: Q_1 为第一四分位数; Q_3 为第三四分位数; L_L 为下限; L_U 为上限。

3 多重并发故障解耦流程

本研究提出的制冷空调多重并发故障解耦模型

适用性评估及失效机理分析流程如图 4 所示,包含故障实验与数据采集、数据预处理、解耦模型构建、解耦阈值计算、多故障解耦分析等。

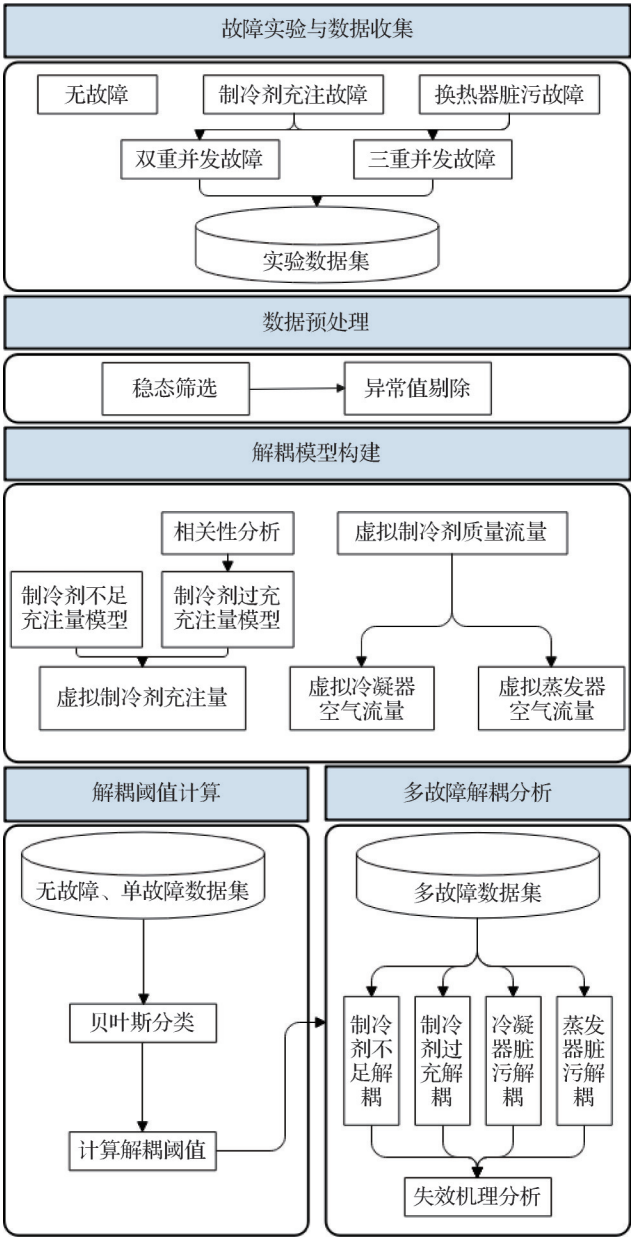


图 4 多故障解耦策略流程图

Fig.4 Flowchart of multi-fault decoupling strategy

1)故障实验与数据采集。针对 4 种典型故障:制冷剂不足、制冷剂过充、冷凝器脏污、蒸发器脏污,开展了无故障、单一故障和任意类别、数量、等级组合的多重并发故障实验,并采集相关实验数据。

2)数据预处理。通过滑动窗口稳态滤波法与四分位法去除非稳态值与离群值。

3)解耦模型构建。对于制冷剂充注故障,基于过冷度及过热度,构建 VRC-不足模型,采用相关性分析选取补充特征,构建 VRC-过充模型。对于换热

器脏污故障,分别计算冷凝器虚拟空气流量 V_c 和蒸发器虚拟空气流量 V_e ,并归一化计算 F_{CF} 与 F_{EF} 。

4)解耦阈值计算。采用贝叶斯分类方法分析无故障与单故障工况下的虚拟传感特征分布,分别确定各故障的最优解耦阈值。

5)多故障解耦分析。分别研究双重并发、三重并发下制冷剂不足、制冷剂过充、冷凝器脏污、蒸发器脏污等故障的解耦效果,通过解耦精度定量评估解耦模型的适用性,揭示模型解耦失效的热力学机理,分析后续优化方向。

4 结果与讨论

4.1 虚拟传感故障解耦模型构建

对于制冷剂不足故障,利用制冷剂不足数据,拟合式(1)中的系数,建立 VRC-不足解耦模型,结果如表 3 所示。

表 3 VRC-不足与 VRC-过充模型系数
Tab.3 VRC-RU and VRC-RO model coefficients

模型	k_1	k_2	k_3	k_4
VRC-不足	-0.439 9	-0.735 7	—	—
VRC-过充	-1.542 3	-0.131 4	1.172 4	1.147 1

对于制冷剂过充故障,利用制冷剂正常充注与过充数据,计算充注量与特征之间的皮尔逊相关系数 r (图 5)。选择 r 大于 0.9 的毛细管入口温度、冷凝器入口温度、冷凝器出口温度作为模型补充特征。其中,毛细管入口温度与冷凝器出口温度的测量位置邻近且变化趋势高度相似,因此仅保留毛细管入口温度。以毛细管入口温度、冷凝器入口温度为补充,拟合式(2)中系数,建立 VRC-过充解耦模型,结果如表 3 所示。

对于冷凝器脏污及蒸发器脏污故障,利用冷凝器脏污、蒸发器脏污单故障数据,分别计算冷凝器虚拟空气流量和蒸发器虚拟空气流量,进而形成冷凝器脏污和蒸发器脏污解耦模型。

4.2 虚拟传感模型故障解耦阈值计算

采用贝叶斯分类法,利用式(7)计算各虚拟传感模型的解耦阈值。图 6 所示为各虚拟传感模型解耦阈值对于单故障的分离效果。可以看出,VRC-不足模型中的各解耦阈值可精确地区分不同等级的制冷剂不足故障,精度达 100%,但对于过充故障数据的预测误差极大(图 6(a))。相反,VRC-过充模型的解耦阈值能有效识别正常充注与过充故障,精度为 100%,但无法准确识别制冷剂不足故障(图 6(b))。因此,

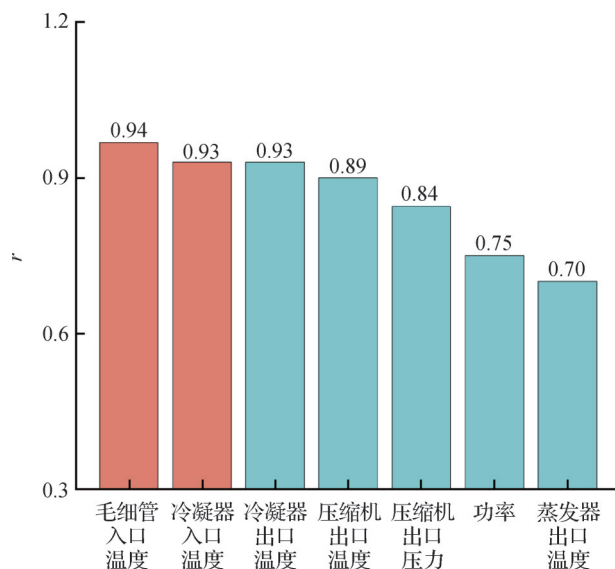


图 5 相关性分析

Fig.5 Correlation analysis

对于制冷剂充注故障,不足和过充需要分别进行解耦。

对于冷凝器脏污故障,空气流量(F_{CF})随脏污等级升高逐渐降低。解耦阈值(-28.61%)能有效区分脏污故障与无故障,精度为99.78%。但脏污等级1、2下的虚拟空气流量分布相似(图6(c)),无法建立解耦阈值。原因在于不同等级换热器脏污对系统性能影响的非线性,低等级脏污下系统参数变化不显著,相邻等级间参数差异较小^[23],导致虚拟空气流量分布重叠。随着脏污等级增加,系统性能退化加速,相邻等级间的参数差异放大。因此虚拟空气流量能有效区分轻微与严重脏污。

对于蒸发器脏污故障,故障与无故障之间的解耦精度为98.32%(图6(d))。但不同脏污等级下的虚拟空气流量分布重叠,因而无法实现不同脏污等级的解耦。

4.3 多重并发故障下制冷剂充注故障解耦

图7所示为多重并发故障下的制冷剂充注故障解耦结果。VRC-不足模型针对制冷剂不足故障解耦精度为100%,而对于过充则无法识别(图7(a))。主要原因是制冷剂不足对冷凝、蒸发温度影响较大,系统过冷度和过热度发生明显改变,这些改变与充注量大小呈现良好线性关系,符合式(1)的模型线性假设^[24-25]。相反,制冷剂过量充注虽导致冷凝温度升高,但此时毛细管入口温度也相应升高(高压液管内充满过冷液体),导致二者差值(过冷度)与正常充注相比变化不明显,使VRC-不足模型对过量充注故障预测失效。

因此,在模型中补充加入毛细管入口温度、冷凝

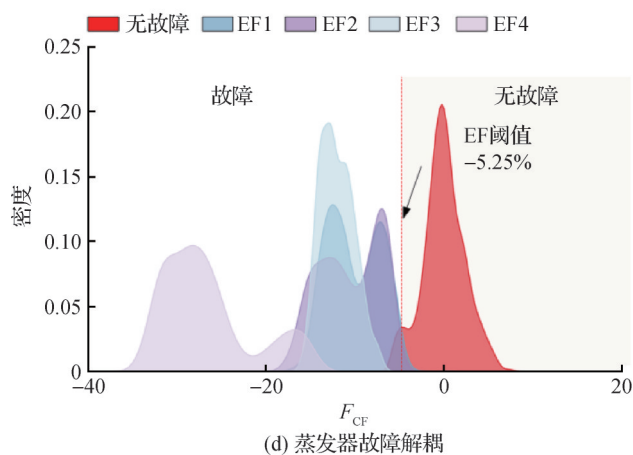
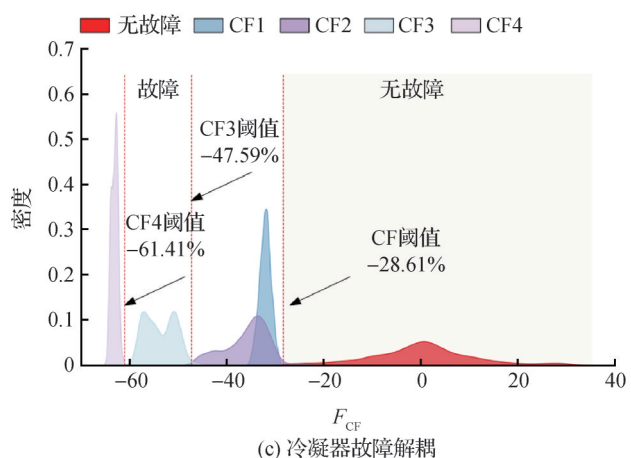
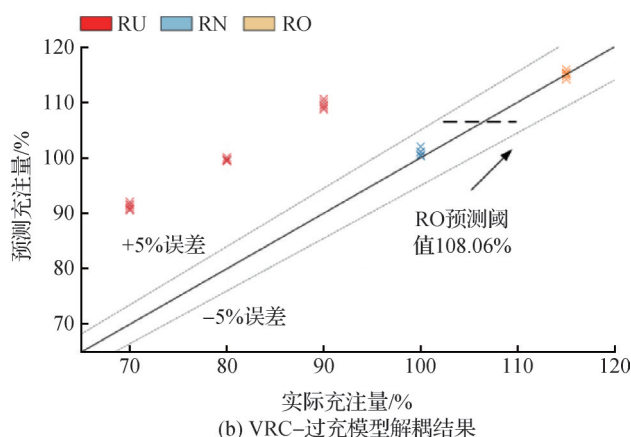
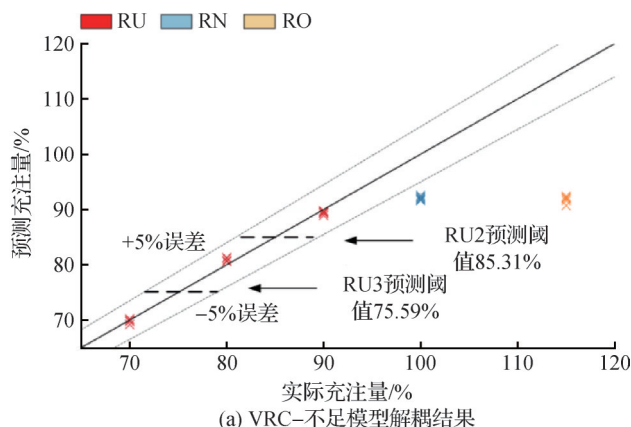
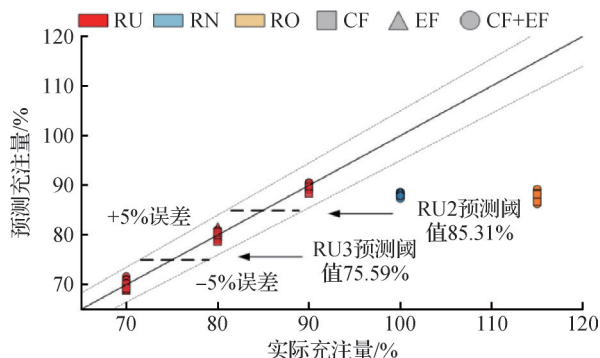


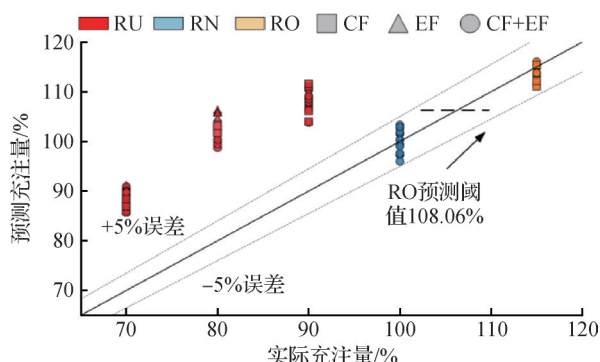
图 6 单故障解耦

Fig.6 Single fault decoupling

器入口温度特征后,VRC-过充模型能有效感知充注量的变化,对正常充注和过充的解耦精度达到100%(图7(b))。但此时对不足故障则无法识别。原因在于制冷剂不足下的充注量与毛细管入口温度、冷凝器入口温度并非线性相关,特征冗余使模型对充注量过量估计(图7(b)),进而产生较大误差。



(a) VRC-不足模型解耦结果



(b) VRC-过充模型解耦结果

图7 制冷剂充注故障解耦

Fig.7 Decoupling of refrigerant charge faults

4.4 多重并发故障下换热器脏污故障解耦

4.4.1 冷凝器脏污故障解耦

图8所示为多重并发故障下冷凝器脏污故障的解耦结果。在双重并发故障中,冷凝器脏污与蒸发器脏污下的 F_{CF} 低于解耦阈值,解耦精度为94.38%。其次,制冷剂不足等级1、2与冷凝器脏污并发下的 F_{CF} 低于解耦阈值,解耦精度均为100%。然而,制冷剂不足等级3与冷凝器脏污并发下的 F_{CF} 高于解耦阈值,解耦精度仅为0.42%,无法实现解耦。原因在于:制冷剂严重不足(等级3)下冷凝器出口不饱和,此时基于潜热、密度、焓等(式(5))计算的虚拟质量流量误差急剧增大,导致虚拟换热量、空气流量计算值误差增大,引起解耦失效。

此外,制冷剂过充与冷凝器脏污并发下的 F_{CF} 同样高于解耦阈值,原因是过充故障导致冷凝温度升高,与空气侧传热温差增大,计算得到的虚拟冷凝器

空气流量增大,导致解耦精度仅为23.12%。

在三重并发故障中(图8),冷凝器脏污解耦模型能够解耦包含制冷剂不足等级1、2下的脏污故障,解耦精度分别为100%与97.59%。然而,在包含制冷剂不足等级3、制冷剂过充并发故障下,解耦精度分别为11.03%和2.08%,无法有效实现故障解耦。

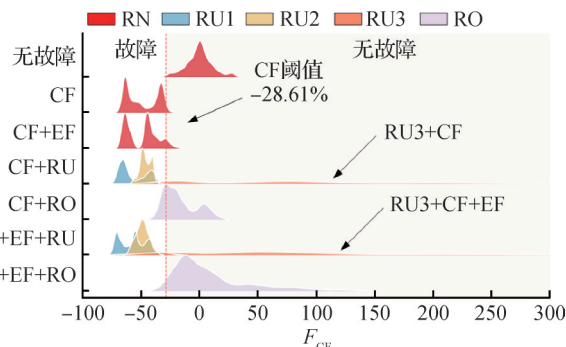


图8 冷凝器脏污故障解耦

Fig.8 Decoupling of condenser fouling faults

4.4.2 蒸发器脏污故障解耦

图9所示为多重并发故障下蒸发器脏污故障的解耦结果。在双重并发故障中,蒸发器脏污与冷凝器脏污并发下的 F_{EF} 分布低于解耦阈值,解耦精度为98.47%。其次,包含制冷剂不足等级1、2下的蒸发器脏污故障的 F_{EF} 均低于阈值,解耦精度为100%。与冷凝器脏污解耦模型类似,蒸发器脏污解耦模型无法识别制冷剂不足等级3下的蒸发器脏污故障,说明制冷剂严重缺乏下的工质参数剧烈变化导致解耦模型计算误差显著增大,引起解耦失效。此外,制冷剂过充与蒸发器脏污并发故障下 F_{EF} 分布低于解耦阈值,解耦精度为64.20%,可实现制冷剂过充下蒸发器脏污的部分解耦。

在三重并发故障中(图9),蒸发器脏污解耦模型能有效识别包含制冷剂不足等级1和2下的蒸发器脏污故障,无法识别制冷剂不足等级3下的蒸发器脏污故障。同时,在包含制冷剂过充下的蒸发器脏污故障解耦精度为61.99%。

5 结论

针对制冷空调多重并发故障解耦模型适用性评估及失效机理分析问题,本文开展了全面的制冷空调多重并发故障实验,提出了基于贝叶斯分类的解耦阈值构建方法,研究了现有基于虚拟传感故障解耦方法在不同类型、数量、严重等级故障耦合下的适用性。同时,分析了解耦模型失效的热力学机理。得到结论如下:

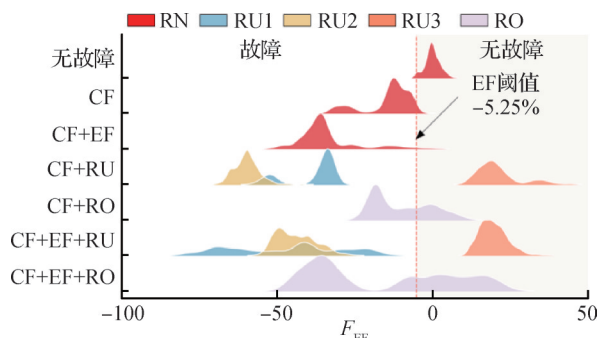


图 9 蒸发器脏污故障解耦

Fig.9 Decoupling of evaporator fouling faults

1) 包含制冷剂不足和过量充注的多重并发故障需分别用 VRC-不足和 VRC-过充模型进行解耦。虽然解耦精度可达 100%,但在实际应用中制冷剂充注量未知情形下,模型选择错误可能导致误诊和漏诊。

2) 虚拟空气流量可有效识别冷凝器脏污、蒸发器脏污单故障及冷凝器脏污与蒸发器脏污并发故障,但难以辨识具体的脏污故障等级。

3) 虚拟空气流量模型难以适用于换热器脏污与制冷剂严重不足、制冷剂过量充注耦合故障解耦。制冷剂严重不足下解耦模型输入的工质参数急剧变化,模型计算误差增大;制冷剂过量充注下冷凝温度升高、内外工质温差增大等,亦引起虚拟空气流量计算误差增大。因此,需进一步提升换热器脏污解耦模型的适应性。

参考文献

[1] 徐玲, 韩华, 崔晓钰, 等. 基于 PSO 优化 BP 的冷水机组故障诊断研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 115-123. (Xu Ling, Han Hua, Cui Xiaoyu, et al. Fault diagnosis for centrifugal chiller based on PSO-BP [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(3): 115-123.)

[2] 程亨达, 陈焕新, 李正飞, 等. 多联机系统制热工况下的制冷剂充注量故障诊断模型——基于多层卷积神经网络[J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 40-47. (Cheng Hengda, Chen Huanxin, Li Zhengfei, et al. Fault diagnosis model for refrigerant charge of variable refrigerant flow system under heating conditions based on multi-layer convolution neural network [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(1): 40-47.)

[3] 尚鹏涛, 郭亚宾, 谭泽汉, 等. 基于 EWMA-BN 的冷水机组故障诊断策略[J]. 制冷学报, 2019, 40(2): 113-119. (Shang Pengtao, Guo Yabin, Tan Zehan, et al. Fault diagnosis strategy based on EWMA-BN for chillers [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2): 113-119.)

[4] 石大亮, 刘江岩, 李夔宁, 等. 基于关联规则分类的冷水机组故障诊断[J]. 制冷学报, 2020, 41(5): 66-75.

(Shi Daliang, Liu Jiangyan, Li Kuining, et al. Fault diagnosis of chillers based on association classification rules[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(5): 66-75.)

[5] Chen Jianli, Zhang Liang, Li Yanfei, et al. A review of computing-based automated fault detection and diagnosis of heating, ventilation and air conditioning systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112395.

[6] 陈焕新, 刘江岩, 胡云鹏, 等. 大数据在空调领域的应用[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 16-22. (Chen Huanxin, Liu Jiangyan, Hu Yunpeng, et al. Application of big data in air-conditioning field [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(4): 16-22.)

[7] Wang Zhanwei, Xia Penghua, Zhou Sai, et al. Examining the impact of common faults on chiller performance through experimental investigation and parameter sensitivity analysis[J]. Energy and Buildings, 2024, 317: 114389.

[8] Liu Jiangyan, Zhao Xinxiang, Li Guannan, et al. Feature-engineering-enhanced multiple simultaneous fault detection in residential air conditioners[J]. Building and Environment, 2025, 272: 112671.

[9] Li Pengcheng, Liu Zhurong, Anduv B, et al. Diagnosis for multiple faults of chiller using ELM-KNN model enhanced by multi-label learning and specific feature combinations [J]. Building and Environment, 2022, 214: 108904.

[10] Li Haorong, Braun J E. Development, evaluation, and demonstration of a virtual refrigerant charge sensor [J]. HVAC&R Research, 2009, 15(1): 117-136.

[11] Kim W, Braun J E. Extension of a virtual refrigerant charge sensor [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 55: 224-235.

[12] Li Guannan, Hu Yunpeng, Chen Huanxin, et al. Extending the virtual refrigerant charge sensor (VRC) for variable refrigerant flow (VRF) air conditioning system using data-based analysis methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 908-919.

[13] Li Haorong, Braun J E. Decoupling features and virtual sensors for diagnosis of faults in vapor compression air conditioners [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(3): 546-564.

[14] Kim W, Lee J H. Fault detection and diagnostics analysis of air conditioners using virtual sensors [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 191: 116848.

[15] Lee Y, Kim W. Fault detection and diagnosis for variable refrigerant flow systems by using virtual sensors and deep learning[J]. Energy Reports, 2024, 11: 471-482.

[16] Hu Yifeng, Yuill D P. Effects of multiple simultaneous faults on characteristic fault detection features of a heat pump in cooling mode [J]. Energy and Buildings, 2021,

- 251: 111355.
- [17] Zhou Zhenxin, Chen Huanxin, Xing Lu, et al. An experimental study of the behavior of a model variable refrigerant flow system with common faults [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 202: 117852.
- [18] Sun Chengbin, Wang Hexu, Jiang Yanlong, et al. A hybrid piecewise FDD strategy for refrigeration charge fault of airborne vapor-compression cycle system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 135: 164–173.
- [19] Kim S H, Oh S, Lee B C, et al. Building multi air conditioner with higher efficiency and fault detection function[C]//*International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2008: 141–142.
- [20] Bellanco I, Fuentes E, Vallès M, et al. A review of the fault behavior of heat pumps and measurements, detection and diagnosis methods including virtual sensors [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 39: 102254.
- [21] Rasti M, Jeong J H. A generalized continuous empirical correlation for the refrigerant mass flow rate through adiabatic straight and helically coiled capillary tubes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 143: 450–460.
- [22] Mehrabi M, Yuill D. A laboratory test method to realistically simulate air side fouling of condensers (RP-1705) [J]. *Science and Technology for the Built Environment*, 2020, 26(6): 805–815.
- [23] Yuill D, Hu Y. Investigation of air-side fouling of split system outdoor heat exchangers: characterization, performance effects, and frost formation interactions [C]// *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2021.
- [24] Llopis-Mengual B, Navarro-Peris E. Selection of relevant features to detect and diagnose single and multiple simultaneous soft faults in air-source heat pumps [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 121922.
- [25] Liu Jiangyan, Li Guannan, Chen Huanxin, et al. A robust online refrigerant charge fault diagnosis strategy for VRF systems based on virtual sensor technique and PCA-EWMA method [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 119: 233–243.
- 通信作者简介**
刘江岩,男,副教授,重庆交通大学机电与车辆工程学院, 17723893589, E-mail: liujiangyan@cqjtu.edu.cn。研究方向: 制冷空调系统故障检测与诊断技术。
- About the corresponding author**
Liu Jiangyan, male, associate professor, School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, 86-17723893589, E-mail liujiangyan@cqjtu.edu.cn. Research fields: fault detection and diagnosis technology of refrigeration and air conditioning system.
- (责任编辑:王亚薇)