文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-07
doi:10.12465/issn.0253-4339.20260706001

多联机制冷剂充注量诊断方法实验研究

吴庆壮　李双良　侯佳鑫　单联瑜　张坤坤　熊成龙　徐漫仪

(小米智能家电(武汉)有限公司　武汉　430075)

摘　要　针对传统无主动控制的诊断方法在微小制冷剂偏差检测中灵敏度低、易受系统运行工况耦合干扰等问题,本文提出了一种基于主动控制的高精度制冷剂充注量诊断方法。该方法通过主动锚定空调系统核心热力学边界条件,结合质量守恒原理与换热机理,将制冷剂充注量变化定向转化为冷凝器内液相滞留量的改变,进而以冷凝器出口过冷度作为定量诊断的核心特征参数,建立了包含"启动—粗调—细调—取值"四阶段的标准化诊断流程。在焓差实验室中,以名义制冷量为16 kW和18 kW的2台多联机组为测试对象,开展了覆盖20~45 ℃室外温度区间的6种工况交叉验证实验。结果表明:在85%~105%的充注率区间内,过冷度对充注量变化呈严格单调递增响应;100%与90%充注量对应的过冷度差值在全部测试工况下均维持在6 ℃以上,该对应关系在不同机型及20~45 ℃室外环境温度区间内均保持稳定。基于该响应关系构建的诊断模型能够准确识别低至5%的制冷剂充注量偏差,为多联机制冷系统的在线运维诊断与早期故障预警提供了可靠的技术方案。

关键词　多联机;制冷剂充注量;主动控制;过冷度;故障诊断
中图分类号:TB657.2;TU831.3　　**文献标识码**:A

Experimental Study on a Refrigerant Charge Diagnostic Method for Multi-split Systems

Wu Qingzhuang　Li Shuangliang　Hou Jiaxin　Shan Lianyu　Zhang Kunkun
Xiong Chenglong　Xu Manyi

(Xiaomi Smart Appliances (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430075, China)

Abstract　This paper proposes a high-precision refrigerant charge diagnostic method based on active control, which effectively addresses the shortcomings of traditional passive diagnostic methods, such as low sensitivity to small deviations and susceptibility to interference from system operating conditions. The method actively anchors the core thermodynamic boundary conditions of the system and, based on the principle of mass conservation and heat transfer mechanisms, directionally converts variations in refrigerant charge into changes in liquid-phase retention within the condenser. The condenser outlet subcooling degree is thereby employed as the core characteristic parameter for quantitative diagnosis, and a standardized four-stage diagnostic procedure, including startup, coarse regulation, fine regulation, and measurement is established, with quantitative stability criteria. Cross-validation experiments covering six operating conditions and outdoor temperatures from 20 ℃ to 45 ℃ were conducted in an enthalpy difference laboratory using two multi-split units with nominal cooling capacities of 16 kW and 18 kW. The results demonstrate that, within the charge ratio range of 85%–105%, the subcooling degree exhibits a strictly monotonic increasing trend with respect to refrigerant charge. The subcooling difference between 100% and 90% charge levels remains above 6 ℃ across all test conditions, and this relationship remains stable across different unit models and outdoor temperatures. The diagnostic model constructed from this relationship can accurately identify refrigerant charge deviations as low as 5%, providing a reliable technical solution for online operational diagnostics and early fault warning in multi-split air-conditioning systems.

Keywords　multi-split system; refrigerant charge; active control; subcooling degree; fault diagnosis

多联式空调热泵机组(多联机)因能效高、布置灵活等优势被广泛应用[1-3]。然而,该设备对安装要求高,需要额外加注制冷剂,且多联机由于管路长、节点多,制冷剂充注不足、缓慢泄漏等问题成为工程

收稿日期:2026-07-06;修回日期:2026-09-23;录用日期:2026-09-24　　责任编辑:田甜

移动阅读

中的频发故障。充注量异常会改变系统热力循环状态，使其制冷/制热性能显著变差：欠充导致制冷/制热量衰减与排气温度过高；过充则引发高压攀升，严重时可致压缩机液击[4-5]。然而，多联机系统凭借变频压缩机与电子膨胀阀的宽范围主动调节能力，即使制冷剂充注量存在偏差，仍可通过增大压缩机频率或调节阀开度使室内温度达标，但这种"补偿式"运行以牺牲系统能效为代价，容易造成严重的能源浪费与设备损耗，且用户难以察觉性能的渐进式衰减。因此，开发兼具物理可解释性与工程普适性的高精度制冷剂充注量诊断方法至关重要。

围绕制冷剂充注量诊断，现有研究主要分为数据驱动与物理模型2类。数据驱动方法借助机器学习技术从运行数据中提取特征进行状态分类。近年来，一维卷积神经网络、集成学习方法（如支持向量机[4]与随机森林融合[6]、XGBoost[7]）以及新型Kolmogorov-Arnold网络[8]相继被应用于该领域，在特定实验数据集上取得了91%～99.8%的高诊断准确率。然而，该类方法在工程落地时面临以下技术挑战：1）模型训练高度依赖覆盖全工况的高质量标注数据，在工程现场获取该类数据的成本极高；2）模型以“黑盒”方式工作，其输出结果缺乏与物理故障机制的明确对应关系，不利于指导现场维修决策；3）不同容量和型号的机组运行参数空间差异显著，在某一机型上训练的模型直接迁移至其他机型时泛化性能难以保障[9-10]。

物理模型方法从热力学机理出发，利用充注量与特定热力参数的确定性关联进行诊断，具有良好的物理可解释性。Li Haorong等[11]提出的虚拟制冷剂充注量传感器（VRC，virtual refrigerant charge sensor）是该方向的经典方法，其核心思想是建立冷凝器出口过冷度与充注量之间的映射关系，无需海量训练数据且物理机制清晰。后续研究进一步将该思路拓展至带储液器的系统、多维特征拟合[12]及引入闭合方程[11]等场景。Liu Shurong等[13]针对多联机系统开展了充注量与过冷度关系的模拟研究，从仿真层面确认了过冷度作为充注量优化判据的潜力，但该研究缺乏实验验证，且未涉及不同容量机组的普适性检验。同时，现有物理模型方法的验证多局限于简单的分体式系统或仿真环境，直接将其移植至多联机（VRF，variable refrigerant flow）系统面临以下关键技术障碍：1）VRF系统包含多台室内机并行运行，各蒸发器的热力状态空间离散，无法像分体式系统那样以单一蒸发器的状态代表系统全局热力状态；2）VRF系统内制冷剂在各蒸发器之间的流量分配为动态耦合过程，受室内负荷变化和室外环境波动的双重扰动，缺乏稳定的系统状态参考基准；（3）不同容量机组的换热器设计参数差异显著，过冷度与充注量的定量映射关系具有机型依赖性，单一机型的模型参数难以直接推广。因此，如何在VRF系统中建立一个可复现的标准化诊断状态，并确认诊断规律在不同容量机组间的普适性，是该领域亟待解决的核心问题。

针对上述问题，本文以多联机为研究对象，提出一种基于主动控制思想的高精度制冷剂充注量诊断方法。首先，基于质量守恒与换热机理，剖析了在主动控制边界条件下过冷度与充注量的定量关联，阐明了换热物理极限对诊断边界的约束机制；在此基础上，构建了包含量化判稳准则的“启动—粗调—细调—取值”四阶段标准化诊断流程与双阈值判别策略；最后，通过在焓差实验室中依托16 kW和18 kW的2套不同容量多联机组开展多工况交叉验证实验，系统证实了该诊断方法的有效性、高精度及跨机型普适性。

1 制冷剂充注量诊断方法

1.1 制冷剂充注量诊断原理

制冷系统的蒸气压缩循环依次经历等熵压缩、等压冷凝、等焓节流和等压蒸发。稳定运行时，制冷剂在冷凝器中由过热蒸气冷凝为饱和液态，并在冷凝器后段进入过冷状态。制冷剂在多联机系统中保存在压缩机、冷凝器、蒸发器及管道中，根据系统内质量守恒关系，总充注量在各部件间的分布可表示为：

$$M_{\mathrm{total}} = M_{\mathrm{comp}} + M_{\mathrm{c}} + M_{\mathrm{e}} + M_{\mathrm{pipe}} \tag{1}$$

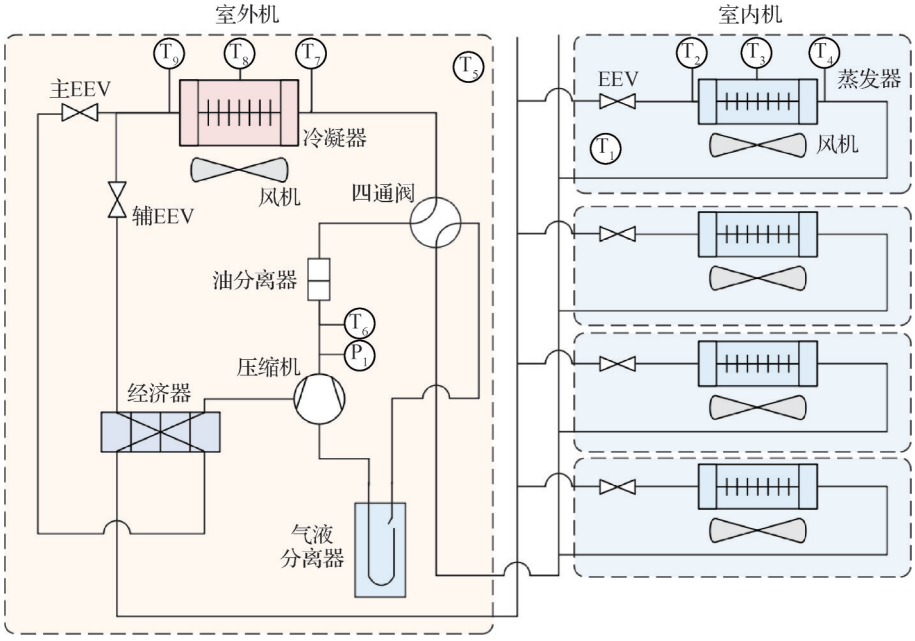
式中：M为质量，kg；下标comp、c、e、pipe分别表示压缩机、冷凝器、蒸发器、管道。

多联机系统如图1所示，由1台室外机和多台室内机组成。制冷模式下，室外侧换热器作为冷凝器，室内侧换热器作为蒸发器。机组中布置有温度与压力测点以实现系统状态监测与控制，各传感器的编号、安装位置与测量功能详见图1图注。当系统中未安装冷凝压力传感器或其信号不可用时，可采用冷凝器中部温度结合饱和状态方程推算冷凝压力。

在诊断过程中，由于主动控制策略将各室内机出口过热度维持在设定值以上（>0 ℃），蒸发器出口为稳定的过热状态，进入气液分离器的制冷剂以气相为主，气液分离器内暂存的液态制冷剂量在单个稳定诊断周期内可视为基本不变。因此，气液分离器的存在不影响过冷度随总充注量变化的单调响应关系。

在机组运行过程中，制冷剂充注量的改变直接影响各换热器内部制冷剂的相态分布与传热特性，进而引发系统可测参数的系统性变化。当系统中的

冷凝压力、蒸发压力与蒸发器出口过热度均被主动控制在目标区间的稳定工况条件下,空调机组中的制冷剂状态也维持稳定。制冷剂在冷凝器中由过热蒸气逐步冷凝为饱和液体,并在冷凝器后段进入过冷状态。因此,液态制冷剂主要存储于液管和冷凝器后段。从换热面积分配角度分析:在冷凝压力和冷凝器传热端差被锁定的条件下,冷凝器内两相冷凝段的换热面积由热负荷决定,而过冷段的换热面积则由液相制冷剂的累积量决定。当制冷剂总充注量增加时,冷凝器内液相制冷剂总质量增加,液相过冷区占据的换热面积增大,冷凝器出口过冷度随之增大。该物理机制与Li Haorong等[10]关于过冷度-充注量映射关系的论述一致,亦与Liu Shurong等等[13]的模拟研究结论相符。由此可见,在空调系统的运行状态被维持稳定的条件下,制冷剂充注量与冷凝器出口过冷度之间存在强关联关系。



T_1室内环境温度;T_2蒸发器入口温度;T_3蒸发器中部温度;T_4蒸发器出口温度;T_5室外环境温度;T_6压缩机排气温度;T_7冷凝器入口温度;T_8冷凝器中部温度;T_9冷凝器出口温度;P_1压缩机出口压力。

图1 多联机系统原理及传感器位置分布

Fig.1 Principle of VRF system and sensor locations

1.2 运行过程

本诊断方法适用于制冷剂充注完成后的状态验证或售后维护时的故障排查,其核心在于通过主动控制策略将系统驱动至标准化的热力学状态,再以过冷度作为诊断判据。诊断过程中,系统进行的状态迁移如图2所示。初始为关机状态,室外机无运行模式,处于待机状态。启动阶段,以制冷模式完成系统启动,使系统状态初步建立。粗调阶段,系统各控制参数在较宽范围内快速收敛;细调阶段,各参数在较小范围内精确逼近目标值。取值阶段,系统已达到稳定状态,连续采集多组过冷度数据并计算其平均值,作为制冷剂充注量状态的诊断依据。诊断结束后,系统停机,恢复至关机状态。

在诊断运行过程中,通过不同执行部件的解耦控制实现系统状态的精确锚定。为扩宽机组对室外温度的应用范围,采用冷凝器传热端差(冷凝温度与室外环境温度之差)作为冷凝侧的控制目标:当冷凝器传热端差偏小时,以一定比例降低室外风机转速;当冷凝器传热端差偏大时,则以一定比例增大室外风机转速,从而将冷凝侧的换热边界条件锁定。类似地,通过压缩机频率与室内机风机的协同控制将蒸发温度维持在设定区间;通过各室内机电子膨胀阀的独立调节将蒸发器出口过热度控制在目标值附近。

各项参数通过机组自带的温度传感器与压力传

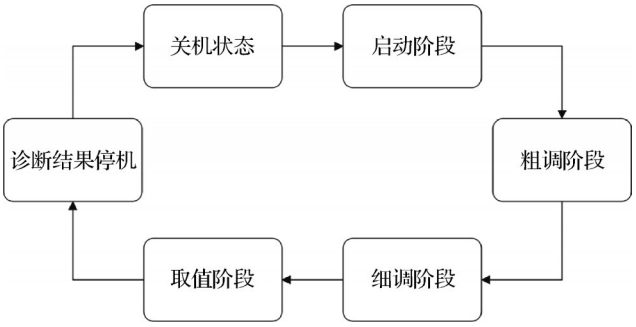


图2 制冷剂诊断状态迁移

Fig.2 State transitions during refrigerant charge diagnosis

感器获取。过冷度的计算式如下：

$$T_{sc} = T_c(p_c) - T_9 \tag{2}$$

式中：T_c为冷凝温度，℃，由测得的冷凝压力p_c(MPa)结合饱和状态计算得到。

为平衡不同内机的状态，采用内机加权平均过热度作为内机调控状态值，表征为：

$$T_{sh} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(T_{4,i} - \min\left(T_{2,i}, T_{3,i}\right)\right) \cdot H_i\right]}{\sum_{i=1}^{n} H_i} \tag{3}$$

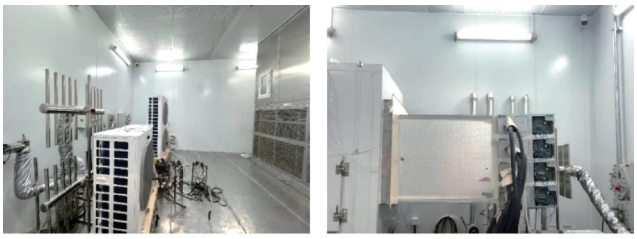
式中：$\min(T_{2,i}, T_{3,i})$为第i台室内机蒸发器入口与中点温度中的较小值，用作该室内机蒸发压力的近似指示；$T_{4,i} - \min(T_{2,i}, T_{3,i})$为该室内机的过热度；$H_i$为能力码，反映该室内机的额定能力占比。该加权指标避免了多室内机因容量差异采用简单算术平均所引入的表征偏差。

冷凝器传热端差定义为冷凝温度与室外环境温度的差值：

$$\Delta T_c = T_c(p_c) - T_5 \tag{4}$$

2 多联机制冷剂量诊断实验设置

本研究的实验数据采集自焓差实验室，测试现场如图3所示。该测试台能够高精度模拟标准规定的各类室内外环境温湿度条件，独立控制室内与室外侧空气的干球温度与相对湿度，温度控制精度达±0.2 ℃，满足GB/T 18837—2026[13]的测试要求。实验过程中所用测量仪器的精度及测量不确定度如表1所示。



(a) 室外机侧　　(b) 室内机侧

图3 焓差实验室测试现场

Fig.3 Test setup in air enthalpy laboratory

表1 不确定性分析

Tab.1 Uncertainty analysis

序号	测量项目	测量仪器	不确定度/精度
1	制冷剂/空气温度	温度传感器	±0.2 ℃
2	制冷剂压力	压力传感器	±5 kPa
3	空气体积流量	皮托管	±2%
4	制冷剂质量流量	涡轮流量计	±2%

为评估诊断方法的有效性与跨机型普适性，选用了2套采用R410A制冷剂、配置变频压缩机与开度调节型电子膨胀阀的多联机热泵机组。主要测试设备为名义制冷量(CCo)为16 kW的单风轮室外机(型号：160Wn-OC30/N1C1)，连接4台室内机，其名义制冷量分别为2.2、2.8、3.6、7.1 kW。另选1台名义制冷量为18 kW的双风轮室外机(型号：180Wn-OC60/N1C1)作为交叉验证机组，用于分析该诊断模型在不同设备中的通用性。此外，为分析上述主动控制诊断方法在不同环境条件下的运行状态与诊断特性，本文设计了6组覆盖典型温度区间的测试工况，具体测试工况组合如表2所示，其中工况4为名义工况。本文中指出的100%标准制冷剂充注量为设备规定的制冷剂注入总量，包含外机的标注制冷剂量与管道的加注制冷剂量。

表2 测试工况

Tab.2 Test conditions

编号	室外干球温度/℃	室内干球温度/℃
1	20	20
2	25	25
3	30	30
4	35	27
5	40	32
6	45	35

3 结果与讨论

3.1 诊断过程参数变化特性

图4展示了多联机系统在额定工况(室外干球温度35 ℃/室内干球温度27 ℃，100%标准制冷剂充注量)下的制冷剂量诊断过程参数变化曲线。由图4可知，完整的诊断逻辑按照“启动—粗调—细调—取值—停机”5个阶段有序运行。整个控制过程约在37 min内完成：启动阶段为0～22 min，粗调阶段为22～30 min，细调阶段为30～36 min，取值阶段为36～37 min，取值后即执行停机。其中，启动与粗调阶段占据了主要时间，用于收敛系统的宏观状态。

在调节机制上，本方法通过多变量解耦控制实现了系统关键状态的锚定。首先，通过调节室外机风机转速，快速将冷凝换热温差锁定在目标值，稳定了冷凝侧的边界条件(该值稳定过程最快)；其次，利用各室内机电子膨胀阀开度的动态调节，精准控制加权平均过热度，各膨胀阀在粗调后段即基本达到稳定，保障了蒸发器内制冷剂的有效气化；最后，通

过压缩机频率与室内机风机的协同,将蒸发温度维持在设定区间。实验验证了,当各个执行部件参数被主动固定后,机组的全局运行状态达到高度稳定。此时,看似未被直接控制的冷凝器过冷度,实质上已由系统内的制冷剂充注总量唯一决定。在该工况下,各项参数稳定后,各项控制参数被锁定后,未被直接控制的冷凝器出口过冷度作为系统在该标准化状态下的涌现值,自然稳定在约11.5 ℃(该值由机组设计参数与制冷剂物性共同决定,不同机型将呈现不同数值)。

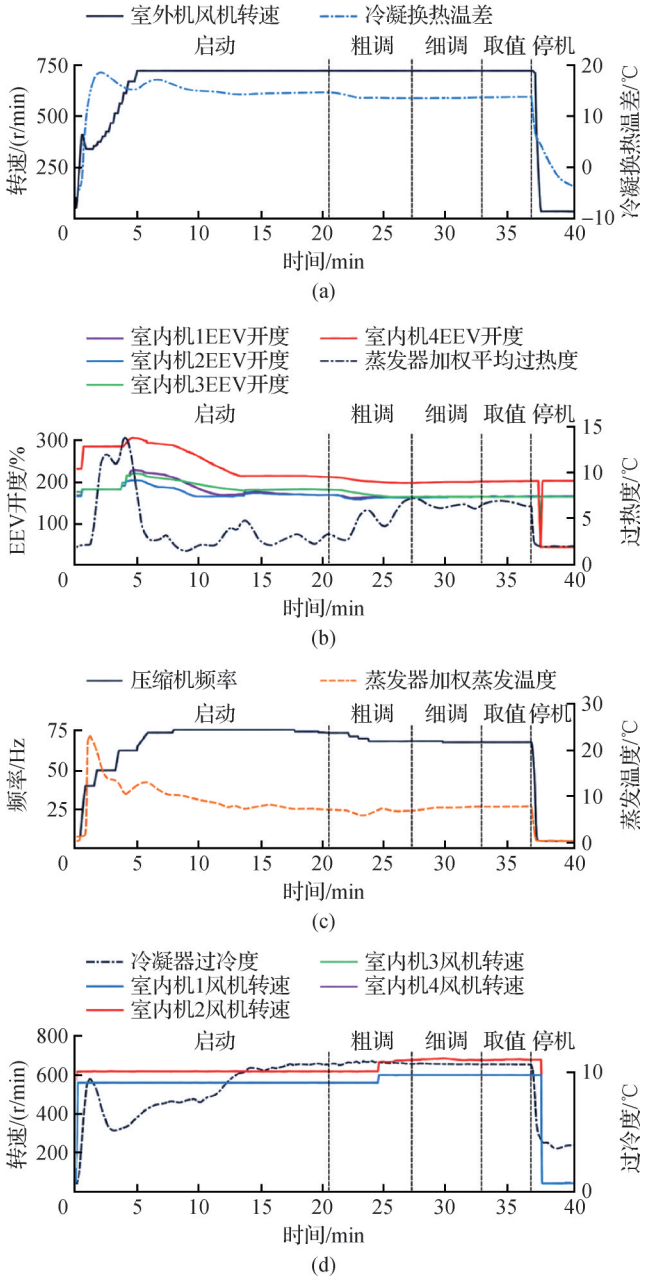


图4 制冷剂量诊断过程参数变化

(额定工况,100%制冷剂充注量)

Fig.4 Parameter variations during refrigerant charge diagnosis (rated conditions, 100% refrigerant charge)

3.2 不同工况下的诊断特征值变化

为验证该诊断方法在复杂气候条件下的适用性与准确性,本文在表2所示的6个不同工况下进行了对比实验,结果如图5所示。对比各工况下的实验数据可知,该诊断方法展现出极佳的灵敏度与显著的识别度。在所有测试工况中,额定制冷剂量对应的过冷度均稳定维持在9.5~11.5 ℃的高位区间,而90%充注量下的过冷度则始终处于1~3 ℃的低位区间。两者之间存在平均达8 ℃的明显数值差异。充分证明,即便在制冷剂仅10%欠注的工况下,该方法依然能够提供清晰且无重叠的诊断信号。

实验结果验证了前文的理论假设,即当冷凝换热温差、蒸发温度和加权平均过热度等核心运行参数被主动控制并维持恒定时,多联机系统的全局热力学状态即被基本锚定。在该约束条件下,系统内多余的液态制冷剂必然在冷凝器后段及液管中发生规律性堆积。因此,作为非直接控制变量的冷凝器出口过冷度,实质上已转化为吸收系统总制冷剂量变化的关键响应变量。该现象表明,通过主动调控消除环境与负荷扰动后,过冷度能够作为反映总制冷剂量的高信噪比特征参数。

此外,传统基于过冷度的诊断方法极易受到室外气温波动的耦合干扰——室外温度的变化会同时影响冷凝压力和过冷度,导致过冷度信号中混入非充注量因素引起的波动。本文通过主动控制冷凝器传热端差与蒸发侧换热边界条件,有效解耦了室外温度变化对制冷剂侧诊断参数的直接影响。+风机转速以增强换热能力,维持冷凝温度与室外温度的差值(传热端差)恒定,从而将冷凝侧的换热状态与室外温度的隔离。同时,蒸发侧通过蒸发温度控制和过热度控制双重锚定,进一步缩减了系统状态受环境影响的自由度。实验数据表明,在室外环境温度20~45 ℃区间内,100%充注量与90%充注量各自对应的过冷度均保持了良好的区分度和诊断可靠性,二者的差值在所有测试工况下均维持在6 ℃以上。在室外温度为45 ℃的极端高温条件下,系统高压侧压力逼近设计上限,R410A制冷剂的气相密度增大(从20 ℃时的约50 kg/m^{3}增至45 ℃时的约75 kg/m^3),气相制冷剂占据的冷凝器内体积比例略增,间接缩减了可供液相堆积的换热空间,使得2种充注量下的过冷度绝对值均出现小幅(约1~2 ℃)下降。然而,由于R410A气液相密度比约为10∶1量级,气相质量占比变化对液相过冷段长度的影响十分有限,2种充注水平下的过冷度差值依然显著(>5 ℃),不影响最终的诊断判别逻辑。

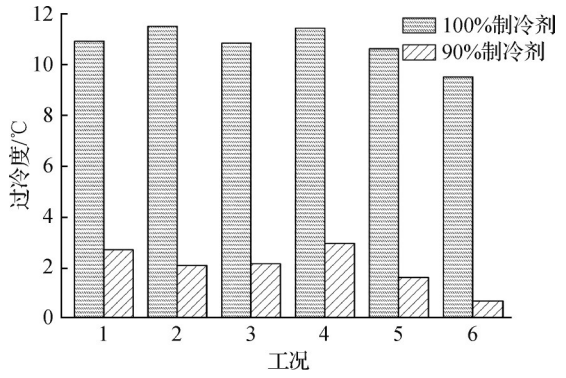


图5 不同工况下2种充注水平对应的过冷度对比（CCo=16 kW）

Fig.5 Comparison of subcooling at two refrigerant charge levels under different operating conditions (CCo=16 kW)

3.3 不同制冷剂充注量下诊断特征值变化

为进一步量化制冷剂充注量偏差对系统运行特征的深层影响，并验证诊断方法的普适性与精度，本文在额定工况下，测试了系统制冷剂充注量在85%～105%区间变动时的运行演变规律。

图6展示了16 kW机组在不同制冷剂充注量下的制冷能力与过冷度变化。由图6可知，过冷度对制冷剂量的变化表现出高敏感性及单调递增趋势。由于本文采用的主动控制策略已将蒸发侧状态严格锚定，依据质量守恒原理，系统充注量的增减被直接转化为冷凝器内液相制冷剂滞留量的变化，该结果进一步确定了过冷度作为核心诊断指标的可行性。

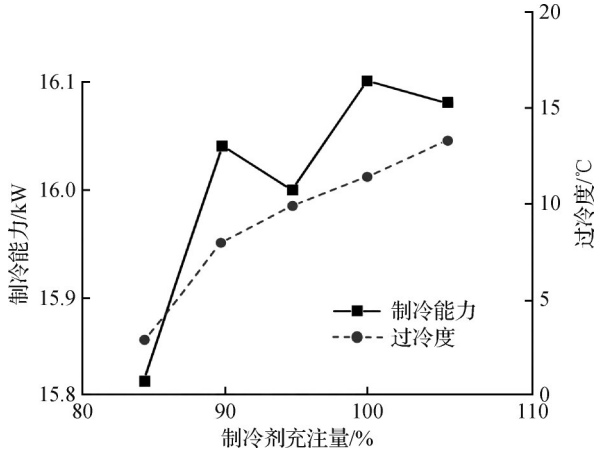


图6 不同制冷剂充注量下的制冷能力与过冷度变化（额定工况，CCo=16 kW）

Fig.6 Variations in cooling capacity and subcooling at different refrigerant charge levels (rated conditions, CCo=16 kW)

为确认上述规律的跨机型通用性，采用18 kW的双风轮机型进行了交叉验证，结果如图7所示。2套机组的过冷度对充注量的单调响应趋势高度一致，证实了过冷度与充注量映射关系在不同机型间的普适性。

然而，16 kW与18 kW机组的制冷量对充注量偏差的响应幅度存在明显差异：在85%～105%充注率区间内，16 kW机组（单风轮）的制冷量仅变化约2%，而18 kW机组（双风轮）制冷量变化达约14%。该差异的物理原因分析如下：1）18 kW双风轮机组采用2套独立的冷凝器并联结构，冷凝器总体内容积较大，但其总换热面积的增大受限于室外机箱体尺寸，导致换热面积与内容积之比（A/V）低于16 kW单风轮机组。在相同的充注量偏差下，A/V较低的机组其冷凝器内液相体积的相对变化幅度更大，过冷段的缩短更为显著，因此制冷量的衰减也更为剧烈。2）18 kW机组的名义制冷剂充注量更多，相同的充注百分比偏差下，相差的实际制冷剂质量偏差更大。

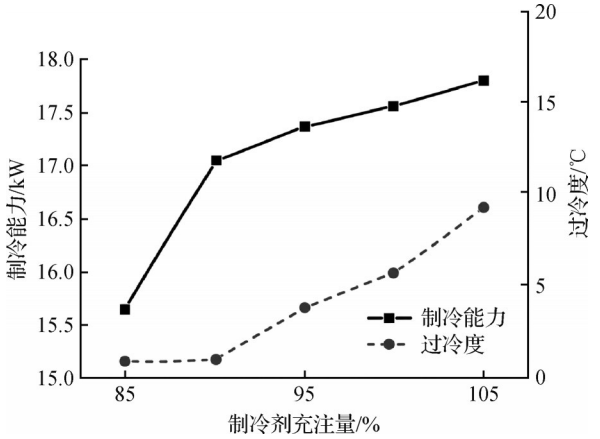


图7 不同制冷剂充注量下的制冷能力与过冷度变化（额定工况，CCo=18 kW）

Fig.7 Variations in cooling capacity and subcooling at different refrigerant charge levels (rated conditions, CCo=18 kW)

4 结论

本文针对多联机制冷系统中制冷剂充注量偏差的定量诊断难题，提出了一种基于主动控制的诊断策略，建立“启动—粗调—细调—取值”四阶段标准化流程，并利用16 kW和18 kW的2套多联机组进行了多工况交叉验证，得到如下结论：

1）提出了充注量主动控制诊断方法。通过控制核心热力学边界条件将系统锚定至标准化状态，有效消除了动态调节与环境温度的干扰。在该状态下，冷凝器出口过冷度成为高信噪比的特征参数。名义工况下，完整诊断流程耗时约37 min。

2）验证了诊断规律的普适性与可靠性。2套机

组在充注量85%～105%区间内,过冷度均呈单调递增趋势,诊断精度可识别5%充注量偏差;在20～45 ℃室外环境温度区间,100%与90%充注量的过冷度差值始终维持在5 ℃以上。此外,虽然两机型的制冷量对充注量的响应幅度存在显著差异,但过冷度的单调特性不受机组结构差异影响,进一步证实了其作为诊断参数的有效性。

参考文献

[1] 田博, 彭芃, 吴庆壮, 等. 多联机热泵空调系统智能控制用快速负荷预测模型研究[J]. 暖通空调, 2025, 55(12): 105-113. (Tian Bo, Peng Peng, Wu Qingzhuang, et al. Fast load forecasting model for intelligent control of VRF heat pump air conditioning systems [J]. Journal of HV&AC, 2025, 55(12): 105-113.)

[2] 石竹青, 陈欣, 任道一, 等. 多联式空调(热泵)机组全年性能系数分析[J]. 制冷与空调(北京), 2024, 24(8): 57-62. (Shi Zhuqing, Chen Xin, Ren Daoyi, et al. Annual performance factor for multi-connected air-condition (heat pump) unit [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2024, 24(8): 57-62.)

[3] 贺红霞, 杨昭, 张淑萍. 多联机系统低GWP制冷剂替代及润滑油技术发展[J]. 制冷学报, 2026, 47(4): 1-11. (He Hongxia, Yang Zhao, Zhang Shuping. Advancements in low-GWP refrigerant substitution and lubricant technologies for variable refrigerant flow systems [J]. Journal of Refrigeration, 2026, 47(4): 1-11.)

[4] 黄倩云,陈焕新,孙劭波,等. 基于支持向量机的多联机系统制冷剂充注量故障检测与诊断[J]. 暖通空调. 2018, 48(1): 91-95. (Huang Qianyun, Chen Huanxin, Sun Shaobo, et al. Fault detection and diagnosis of refrigerant charge for multi-split systems based on support vector machine [J]. Journal of HV&AC. 2018, 48(1): 91-95.)

[5] 刘倩, 李正飞, 丁新磊, 等. 多联机系统故障类型识别及故障细化诊断模型研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(2): 118-126. (Liu Qian, Li Zhengfei, Ding Xinlei, et al. Fault type identification and fault refinement diagnosis model of variable refrigerant flow system [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(2): 118-126.)

[6] 魏文天, 李正飞, 王誉舟, 等. 基于Boosting的多联机制冷剂充注量故障诊断集成模型[J]. 制冷学报, 2020, 41(2): 70-78. (Wei Wentian, Li Zhengfei, Wang Yuzhou, et al. Boosting-based refrigerant charge fault diagnosis integration model of variable refrigerant flow system [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(2): 70-78.)

[7] 何金凝, 徐廷喜, 黄巍, 等. 基于极端梯度提升算法的空调系统故障诊断自适应模型[J]. 制冷技术, 2022, 42(2): 25-31. (He Jinning, Xu Tingxi, Huang Wei, et al. Adaptive fault diagnosis model of air conditioning system based on eXtreme gradient boosting algorithm [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2022, 42(2): 25-31.)

[8] Zhang Xue, Cheng Yunxi, Chen Huanxin, et al. Refrigerant charge fault diagnosis in VRF systems using Kolmogorov-Arnold networks and their convolutional variants: a comparative analysis with traditional models [J]. Energy and Buildings, 2025, 336: 115608.

[9] 张丽,彭友伦,陈焕新,等. 多联机制冷剂充注量故障检测模型评估及参数优化[J]. 制冷技术. 2023, 43(1): 37-42. (Zhang Li, Peng Youlun, Chen Huanxin, et al. Evaluation and parameter optimization of refrigerant charge fault detection models for multi-split systems [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology. 2023, 43(1): 37-42.)

[10] 蔡亚君. 基于多维曲线拟合算法的空调制冷剂不足故障诊断模型[J]. 制冷与空调(四川), 2023(1): 92-96. (Cai Yajun. Fault diagnosis model of air conditioning refrigerant shortage based on multidimensional curve fitting algorithm [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2023(1): 92-96.)

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

[12] 寻惟德, 李绍斌, 谭泽汉, 等. 基于离散型Hopfield神经网络的制冷剂充注量故障诊断的新策略[J]. 制冷技术, 2018, 38(3): 8-13. (Xun Weide, Li Shaobin, Tan Zehan, et al. A new fault diagnosis tactic for refrigerant charge amount based on discrete Hopfield neural network [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2018, 38(3): 8-13.)

[13] Liu Shurong, Zhou Yujue, Dai Chuanmin, et al. Refrigerant charge optimization in direct expansion air conditioning systems under variable operating conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 290: 130108.

[14] GB/T 18837—2026多联式空调(热泵)机组[S]. (GB/T 18837—2026 Multi-split air-conditioning (heat pump) units[S].)

通信作者简介

侯佳鑫,男,博士研究生,工程师,小米智能家电(武汉)有限公司,19972068539,E-mail:hjx96y@163.com。研究方向:空调系统与两相流。

About the corresponding author

Hou Jiaxin, male, Ph. D., engineer, Xiaomi Smart Appliances (Wuhan) Co., Ltd., 86-19972068539, E-mail: hjx96y@163.com. Research fields: air-conditioning systems and two-phase flow.