

基于微霜气压自动平衡装置的移动冰箱热力系统建模 与性能优化研究

董军民 李 蓝

浙江和利制冷设备有限公司 浙江 金华 321103

【摘要】：本文开展基于微霜气压自动平衡装置的移动冰箱热力系统建模与性能优化研究。研究构建含该装置的热力系统模型，识别关键影响因素，提出优化方案并验证有效性。测试结果显示，优化后的热力系统在车载颠簸、环境温湿度波动场景下，蒸发器结霜量减少超 75%，霜层厚度 $\leq 0.3\text{mm}$ ，实现微霜运行；气压平衡响应时间 $\leq 0.8\text{s}$ ，系统气压波动幅度 $\leq 5\text{kPa}$ ，避免制冷管路损坏；制冷效率提升 22%，24 小时运行能耗降低 20.5%，连续运行 800 小时无故障，满足高端移动场景严苛需求。

【关键词】：移动冰箱；微霜气压自动平衡装置；热力系统建模；性能优化

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.005

1 引言

移动冰箱因可移动、便携，广泛用于车载制冷、户外作业冷藏、医疗试剂转运、生鲜冷链短途运输等领域。其运行性能关乎存储物品安全完整，如医疗试剂转运中微小温度波动等都可能致试剂失效。与固定冰箱相比，移动冰箱运行环境复杂，需适应颠簸振动、温湿度和电压波动等工况，对热力系统稳定性和抗干扰能力要求更高。

当前，多数传统移动冰箱热力系统采用常规制冷循环结构，缺乏气压平衡与微霜控制机制，存在诸多痛点：一是气压失衡突出，运行中制冷管路内外气压差大，制冷失效故障发生率超 30%；二是蒸发器结霜严重，高湿度环境下霜层厚，制冷效率衰减快，需人工定期除霜，维护成本高且不便；三是制冷效率低，制冷参数固定无法动态调整，能耗高，不符合节能要求；四是抗干扰能力弱，运行稳定性差，温度波动大，无法满足医疗、高端生鲜等存储要求。本文通过建模与优化，解决传统系统痛点，提升设备可靠性、制冷性能与节能效果，降低维护成本。

2 基于微霜气压自动平衡装置的移动冰箱热力系统建模

2.1 核心部件建模

2.1.1 压缩机模型

选用 HL - C120 原配直流变频压缩机，额定功率 300W，额定转速 2800r/min，适用电压 12V/24V，抗颠簸振幅达 0.8g。模型描述转速、吸气与排气压力和制冷功率关系，量化运行特性。制冷功率与转速正相关，电源电压波动 $\pm 10\%$ 、颠簸振幅达 0.5g 以上会影响制冷功率。

2.1.2 冷凝器与蒸发器模型

冷凝器为风冷式盘管结构，配 12V 高速风扇。模型描述制冷剂流量、环境温度、风速与散热效率关系，环境温度和风扇转速影响散热效率。蒸发器为盘管式结构，与微霜气压自动平

衡装置直连。模型描述制冷剂流量、霜层厚度、换热面积与换热效率关系，考虑微霜控制影响，微霜控制可减少霜层对制冷性能的影响。

2.1.3 电子膨胀阀模型

选用口径 2mm 电子膨胀阀，开度调节范围 0~100%，精度 1%，作用是调整制冷剂流量。模型描述阀门开度、制冷剂流量与系统压力关系，阀门开度变化会使制冷剂流量改变。统气压波动超 5kPa 时，阀门开度自动调 $\pm 5\%$ ，稳定制冷剂流量，助维持系统气压平衡。

2.2 微霜气压自动平衡装置集成建模

将微霜气压自动平衡装置模型与核心部件模型集成，构建移动冰箱热力系统模型。

在气压平衡耦合上，装置压力传感器采集系统气压，当内外气压差超 5kPa，控制模块开启平衡阀、调节缓冲腔状态，向电子膨胀阀发信号微调开度以稳定制冷剂流量；当气压差降至 5kPa 内，平衡阀关闭，电子膨胀阀恢复正常。

在微霜控制耦合上，微霜检测模块采集蒸发器表面温度和内胆湿度，霜层达 0.3mm 时，控制模块启动加热片与风扇，调节压缩机转速和电子膨胀阀开度以抑制霜层生长；霜层降至 0.2mm 以下，关闭加热片与风扇，压缩机和电子膨胀阀恢复正常。

通过集成建模，能精准模拟不同工况下系统运行状态，量化参数变化规律，识别关键因素，为系统性能优化提供理论支撑。模型模拟误差控制在 5% 以内，贴合实际工况，满足工程需求。

3 移动冰箱热力系统性能优化

3.1 微霜气压自动平衡装置参数优化

结合模型模拟结果优化调整装置核心参数，具体如下：

(1) 气压平衡参数优化：将气压平衡阈值从 5kPa 调至

4kPa 以提升灵敏度；把缓冲腔容积从 0.8L 优化为 1.0L，使气压平衡响应时间从 0.8s 缩至 0.6s，控制气压波动在 4kPa 内；将压力传感器采集频率从 1 次/2 秒提至 1 次/1 秒，提升检测实时性。

(2) 微霜控制参数优化：把霜层厚度检测阈值从 0.3mm 调至 0.25mm，提前启动控制功能；将加热片功率从 50W 调至 40W，采用间歇式加热模式以减少能耗；把风量调节风扇转速调节范围从 1200r/min - 1800r/min 优化为 1000r/min - 2000r/min，稳定控制霜层厚度在 0.25mm 内。

(3) 控制逻辑优化：建立气压平衡与微霜控制协同优化机制，根据气压波动幅度与霜层厚度动态调整控制优先级。当气压波动超 8kPa 时，优先处理气压失衡；当气压波动小于 8kPa 且霜层厚度超 0.25mm 时，优先处理微霜问题。

3.2 热力系统核心部件优化

3.2.1 压缩机转速调节逻辑优化

结合移动场景特殊性，优化压缩机转速调节逻辑，采用基于系统气压、内胆温度、环境温度的自适应调节逻辑。一是根据冰箱内胆与设定温度差值调速；二是结合系统气压与颠簸工况调幅。优化后，压缩机转速调节响应时间≤1 秒。

3.2.2 电子膨胀阀开度匹配优化

结合模型模拟结果，优化电子膨胀阀开度匹配逻辑。建立其与压缩机转速、蒸发器换热效率、系统气压的耦合匹配模型，随压缩机转速、蒸发器霜层厚度、系统气压波动调整开度。优化后，开度调节精度提至 0.5%，制冷剂流量波动控制在 5% 以内。

3.2.3 蒸发器与冷凝器优化

(1) 蒸发器优化：调整管路布局为蛇形盘管，增加换热面积；表面喷涂防霜涂层，降低结霜速率；安装位置调至冰箱内胆背部中央，降低制冷剂泄漏风险。

(2) 冷凝器优化：优化盘管结构，增加排列密度，增大散热面积；更换为 30W、转速可调的高速风扇，随环境温度动态调整转速，提升散热效率；在表面添加 0.5 mm 厚、间距 8mm 散热片提升散热效果，优化后 40℃ 环境下散热效率维持在 75% 以上，避免高温制冷效率衰减。

3.3 系统整体协同优化

在部件与装置参数优化基础上，开展热力系统整体协同优化，重点优化部件耦合运行逻辑，实现微霜气压自动平衡装置、压缩机等部件协同工作以提升系统性能。具体措施如下：

(1) 建立系统运行参数联动调节机制，整合微霜气压自动平衡装置检测数据与各部件运行参数，实现联动调节，确保部件运行状态匹配，提升系统稳定性与制冷效率。

(2) 优化系统节能运行模式，当冰箱内胆温度、系统气

压、霜层厚度满足条件，系统自动进入节能模式，降低压缩机等部件转速，微霜气压自动平衡装置进入低功耗模式；检测到工况变化，自动退出节能模式恢复正常参数，确保制冷性能。

(3) 提升系统抗干扰能力，优化密封结构，采用双层密封管路接头控制制冷剂泄漏率；在核心部件安装处添加减震垫适应颠簸场景；增加电源稳压模块，确保电压波动时系统运行参数稳定，提升抗电压干扰能力。

4 测试验证

4.1 测试内容与测试方法

4.1.1 模型准确性验证测试

目的为验证基于微霜气压自动平衡装置的移动冰箱热力系统模型准确性。方法：将优化后的 HL-C120 车载移动冰箱置于测试环境，设内胆温度 4℃ 启动，待系统稳定（1 小时内温度波动±0.1℃、气压波动±0.1kPa）后开始测试；模拟不同环境温度（-10℃、20℃、40℃）、颠簸振幅（0.3g、0.5g、0.8g）、电源电压（10.8V、12V、24V、26.4V）工况，每 10 分钟记录一次系统运行参数（内胆温度、系统气压、霜层厚度、制冷功率、能耗），测 24 小时；对比测试数据与模型模拟数据，计算相对误差，误差在 5% 以内表明模型准确可靠。

4.1.2 优化方案有效性测试

目的是验证性能优化方案效果。以未优化的传统车载移动冰箱为对照组，优化后的冰箱为实验组，在相同测试环境、设定温度（4℃）、负载量（50%）条件下开展对比测试，具体如下：

(1) 微霜控制效果测试：在环境湿度 80%、温度 20℃ 下稳定运行 24 小时，每 2 小时记录蒸发器霜层厚度，统计 24 小时内霜层平均与最大厚度，对比两组霜层堆积情况。

(2) 气压平衡效果测试：模拟环境温度骤变（20℃ 骤升至 40℃、20℃ 骤降至 -10℃）与颠簸工况（振幅 0.5g、频率 20Hz），记录系统内部气压波动幅度与气压平衡响应时间，对比两组气压平衡效果。

(3) 制冷性能测试：设内胆温度 4℃，在环境温度 -10℃、20℃、40℃ 下，记录冰箱从室温（25℃）降至设定温度的时间与温度波动幅度，对比两组制冷速度与温度稳定性。

(4) 能耗测试：在环境温度 20℃、设定温度 4℃、负载量 50% 条件下测试 24 小时，记录两组 24 小时运行能耗，计算能耗降低比例。

(5) 运行稳定性测试：模拟车载复杂工况（振幅 0.5g、频率 10 - 20Hz，环境温度 20℃±10℃，电源电压波动±10%），两组连续运行 800 小时，记录故障发生次数与类型。

4.1.3 极端工况适应性测试

目的是验证优化后的热力系统在极端移动工况下的运行

性能。方法：模拟极端低温（-10℃）、极端高温高湿（40℃、湿度90%）、极端颠簸（振幅0.8g、频率30Hz）工况，测优化后冰箱运行参数（温度波动幅度、气压波动幅度、霜层厚度、能耗），测12小时，验证系统极端工况适应性，确保满足高端应用场景需求。

4.2 测试结果与分析

4.2.1 模型准确性验证结果

模型准确性验证测试显示，不同工况下，系统模型模拟数据与实际测试数据相对误差均在3.5%以内，如内胆温度、系统气压等相对误差均小于5%的设计阈值。表明基于微霜气压自动平衡装置的移动冰箱热力系统模型准确可靠，能精准模拟不同移动工况运行状态，为系统性能优化提供理论支撑。

4.2.2 优化方案有效性测试结果

(1) 微霜控制效果：实验组运行24小时后，蒸发器表面霜层平均厚度0.18mm、最大厚度0.25mm，均在0.3mm以内，实现微霜运行，而对照组霜层堆积严重。

(2) 气压平衡效果：实验组在环境温度骤变、颠簸工况下，气压波动幅度在2.5kPa-3.8kPa，在4kPa以内，气压平衡响应时间为0.4s-0.6s，能快速平衡气压，避免管路损坏；对照组气压波动大且无平衡功能，易出故障。优化后的气压自动平衡功能可维持系统气压稳定，提升运行安全性。

(3) 制冷性能：不同环境温度下，实验组较对照组降温速度提升27%-32%，温度波动幅度减小87%以上，制冷性能与温度稳定性显著提升。

(4) 能耗测试：环境温度20℃、设定温度4℃时，实验组24小时运行能耗9.5kWh，对照组12.0kWh，实验组能耗降低2.5kWh，降低比例20.8%，满足设计要求，节能效果显著，主要得益于微霜控制、压缩机调节和电子膨胀阀优化。

(5) 运行稳定性：实验组连续运行800小时无故障，核心部件运行正常，参数在设计范围；对照组故障6次，故障发

生率0.75%/100小时。

4.2.3 极端工况适应性测试结果

极端工况适应性测试表明，优化后的移动冰箱热力系统在极端低温工况（-10℃）下仍能稳定运行，内胆温度、气压、霜层厚度等参数正常，24小时能耗10.8kWh，无故障。在极端高温高湿工况（环境温度40℃、湿度90%）下，系统运行稳定，内胆温度波动±0.3℃，气压波动2.8kPa-3.5kPa，霜层厚度0.20mm-0.23mm，24小时能耗8.9kWh，制冷效率较高；在极端颠簸工况（振幅0.8g、频率30Hz）下，系统运行稳定，无制冷剂泄漏等故障，内胆温度波动±0.4℃，气压波动3.5kPa-3.9kPa，能满足极端移动场景需求。

5 结论

本文围绕基于微霜气压自动平衡装置的移动冰箱热力系统建模与性能优化展开研究，解决传统移动冰箱热力系统气压失衡等问题，主要结论如下：

(1) 明确移动冰箱热力系统与微霜气压自动平衡装置工作机制，整合微霜控制与气压自动平衡功能，设计气压平衡等模块组成的装置，实现系统气压动态平衡与蒸发器微霜运行，气压平衡响应时间≤0.6s，霜层厚度≤0.3mm。

(2) 构建基于该装置的移动冰箱热力系统模型，采用“部件-耦合-装置集成”思路建模，量化核心部件参数与耦合关系并考虑移动场景因素，模型模拟误差≤5%，为性能优化提供支撑。

(3) 识别影响系统性能的关键因素，提出针对性优化方案，涵盖装置参数、核心部件及系统整体协同优化，实现微霜控制等全方位提升，优化后系统能耗降20.8%，制冷速度升27%以上，连续运行800小时无故障。

(4) 实际产品测试显示，优化后系统性能优异，适应移动场景，满足高端需求。研究成果解决公司产品核心痛点，提升了竞争力，可供同类设备借鉴。

参考文献：

- [1] 智能移动冰箱[J]. 中国经济信息,2017,0(19):14.
- [2] 张日鹏. 浅析冰箱技术性能和产品结构发展趋势[J]. 企业文化(下旬刊),2014(7):226-226.
- [3] 张成全,施骏业,陈江平. 采用微通道冷凝器的无霜风冷冰箱系统性能提升[J]. 制冷学报,2017,38(3):43-49.