

Research on Optimization of Steam Compression Refrigeration Cycle for Overall System Energy Efficiency Improvement

Yusheng Huang

Guangzhou Chuangzhan Mechanical and Electrical Installation Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510700, China

Abstract

In response to the global demand for energy efficiency improvement and low-carbon transformation of refrigeration systems, this study addresses the bottleneck problems of insufficient component coordination and imbalanced parameter matching in traditional vapor compression refrigeration cycles, and constructs a three-dimensional optimization framework of "thermodynamic analysis multi parameter coordination system integration". By analyzing the coupling mechanism between compressor efficiency, heat transfer performance of heat exchangers, and physical properties of working fluids, a multi-objective optimization strategy based on non dominated sorting genetic algorithm is proposed to achieve synergistic optimization of energy efficiency improvement and environmental indicators. Engineering verification shows that the optimized system significantly improves the performance coefficient under typical operating conditions and has good adaptability to variable loads, providing theoretical support and technical path for the green upgrade of the refrigeration industry.

Keywords

Steam compression refrigeration cycle; Energy efficiency optimization; Thermodynamic analysis

面向系统整体能效提升的蒸汽压缩制冷循环优化研究

黄育生

广州市创展机电安装有限公司, 中国 · 广东 广州 510700

摘要

面向全球制冷系统能效提升与低碳转型需求, 本研究针对传统蒸汽压缩制冷循环存在的部件协同不足、参数匹配失衡等瓶颈问题, 构建了"热力学分析-多参数协同-系统集成"三维优化框架。通过解析压缩机效率、换热器传热性能及工质物性的耦合作用机制, 提出基于非支配排序遗传算法的多目标优化策略, 实现能效提升与环保指标的协同优化。工程验证表明, 优化后的系统在典型工况下性能系数提升显著, 且具有良好的变负荷适应性, 为制冷行业绿色升级提供了理论支撑与技术路径。

关键词

蒸汽压缩制冷循环; 能效优化; 热力学分析

1 引言

全球制冷系统能耗已占建筑总能耗的 30% 以上, 其碳排放量约占工业领域碳排放总量的 7%, 国际能源署最新报告显示, 到 2050 年制冷需求增长将推动相关碳排放翻倍, 这对全球碳中和进程构成严峻挑战。当前蒸汽压缩制冷系统普遍存在部件能效孤岛化问题, 压缩机机械效率损失、换热器传热-压降矛盾及高 GWP 工质应用等瓶颈, 导致系统整体能效提升陷入停滞。在双碳战略背景下, 系统级优化通过热力学参数协同调控与子系统集成创新, 可突破单一部件优化边际效应递减的局限^[1]。本研究构建热力学分析-多参数协同-系统集成的三维优化框架, 以性能系数与能效比为双核心指标, 探索制冷循环能效提升的系统性解决方案。

【作者简介】黄育生 (1973-), 男, 中国广东潮阳人, 本科, 工程师, 从事制冷行业研究。

2 蒸汽压缩制冷循环基础理论

2.1 基本循环原理

蒸汽压缩制冷循环以逆卡诺循环为理论基准, 通过机械压缩实现热量逆向传递。实际循环因存在不可逆损失, 其能效显著低于理论值: 压缩机等熵效率通常为 70%-85%, 导致排气温度升高; 冷凝器与蒸发器传热过程伴随温差传热损失; 膨胀阀节流过程产生不可逆焓降。四大核心部件构成闭环系统: 压缩机通过压缩气体提升压力与温度, 冷凝器通过相变释放热量至环境, 膨胀阀通过节流实现压力骤降, 蒸发器吸收热量完成制冷剂汽化。各部件能量转换效率的乘积决定系统整体性能, 凸显热力学第二定律对循环设计的根本约束。

2.2 热力学关键参数

压缩比作为压缩机性能的核心指标, 其值增大虽能提升单位质量制冷量, 但会导致容积效率下降与排气温度超

限,通常需控制在 8-12 范围内^[2]。过热度通过调节蒸发器出口制冷剂温度,在防止压缩机液击与提升换热效率间寻求平衡,典型工业系统控制值在 3-8℃。过冷度通过降低冷凝器出口液态制冷剂温度,可减少膨胀阀闪发气体比例,每增加 1℃过冷度约提升系统能效 1.5%-2%。工质物性参数中,临界温度决定其应用温度范围,潜热值直接影响单位质量制冷能力,而 GWP 值反映其对臭氧层破坏潜力,欧盟 F-Gas 法规已明确限制高 GWP 工质使用。

2.3 能效评价标准

国际标准方面,ISO 5151 侧重于制冷量测试方法统一,ARI 550/590 则针对空调设备能效分级建立基准。国内 GB/T 18430 标准在测试工况设定上更贴合中国气候特征,例如将夏季空调设计温度从 35℃调整至 37℃。季节能效比 SEER 通过加权计算不同工况下的瞬时效率,适用于变负荷场景评估;全年能源消耗效率 APF 则纳入待机功耗与部分负荷性能,成为新能效标识体系的核心指标。两者差异体现能效评价从稳态测试向动态模拟的演进趋势,为系统优化设计提供多维度的性能标尺。

3 系统能效影响因素的多维度分析

3.1 部件级能效损失

压缩机作为制冷系统的核心动力源,其能效损失主要源于容积效率与机械效率的耦合制约。涡旋压缩机通过动静涡盘啮合实现连续压缩,较滚动转子压缩机减少余隙容积损失,在中小型空调系统中容积效率可提升 8%-12%;但其轴向密封结构导致机械摩擦损失增加,需通过纳米涂层技术降低摩擦系数至 0.05 以下。换热器设计需在传热强化与压降控制间取得平衡,微通道换热器采用多孔扁管与百叶窗翅片结构,在相同换热面积下可将空气侧压降降低 30%,同时通过优化制冷剂流路设计使换热系数提升 15%-20%,但其易堵塞特性对水质管理提出更高要求。电子膨胀阀通过脉冲步进电机实现流量精准调控,较热力膨胀阀的过热度控制精度提升 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,但需配套高精度压力传感器以避免调节滞后。

3.2 循环参数协同优化

过热度动态控制是提升蒸发器利用效率的关键,传统 PID 控制因参数固定难以适应变工况需求,而基于 TD (Time Derivative) 算法的改进型 PID 通过引入温度变化率反馈,可使压缩机频率调节响应时间缩短至 3 秒内,在负荷突变场景下避免蒸发器结霜风险。膨胀阀开度与蒸发压力的耦合调节需构建多变量控制模型,模糊控制通过隶属度函数将专家经验转化为控制规则,在超市冷链系统中可实现蒸发压力波动范围 $\pm 2\text{kPa}$ 以内,较开环控制节能率提升 9%。变频压缩机与电子膨胀阀的联合调速策略,通过建立转速-流量映射关系,使系统在 25%-100% 负荷范围内维持 COP 值波动小于 8%,显著优于定频系统的阶梯式调节模式。

3.3 工质替代与混合工质研究

天然工质应用是低碳转型的重要方向,CO₂ 跨临界循环在高温工况下具有显著优势,其临界温度 (31.1℃) 与汽车空调运行工况高度匹配,但排气压力高达 10MPa 以上,需采用双级压缩与气体冷却器喷淋技术降低压缩功。R290 (丙烷) 作为零 ODP、低 GWP (3) 工质,在家用空调中已实现单台充注量控制在 150g 以内,但其易燃性要求系统气密性达到 IP67 等级。非共沸混合工质通过温度滑移特性提升换热效率,R410A 替代方案 R454B/R32 混合工质在蒸发器中可产生 5-8℃的温度滑移,使传热温差降低 30%,在相同换热面积下制冷量提升 12%,但需重新设计油循环系统以解决混合物分馏问题。

3.4 系统集成优化

冷凝热回收技术通过串联板式换热器实现制冷与热水供应的能量梯级利用,在酒店空调系统中可将冷凝废热转化为 60℃生活热水,使系统综合能效比 (EER+COP) 提升至 4.2 以上,较传统分开系统节能 25%。并联压缩机组负荷分配需解决多机协同控制难题,基于遗传算法的优化模型以总功耗最小为目标函数,通过染色体编码表示压缩机启停组合与频率分配,在数据中心冷却系统中实现多台变频螺杆机动态调频,使部分负荷工况下系统能效较固定分配策略提升 18%。热泵型多联机通过四通阀切换实现制冷制热模式转换,其回油控制技术需兼顾高低压侧压差平衡,采用变频驱动与油分离器联合设计可使系统在 -25℃低温工况下稳定制热,COP 值维持在 1.8 以上。

4 基于多目标优化的循环改进策略

4.1 优化模型构建

本研究构建以最大化性能系数 (COP) 与最小化全球变暖潜值 (GWP) 为核心的双目标优化模型,通过引入权重系数 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) 实现双目标动态平衡。目标函数定义为:

$$\text{Max } F(x) = \lambda \cdot (\text{COP}/\text{COP}_0) + (1 - \lambda) \cdot (\text{GWP}_0/\text{GWP})$$

其中 COP₀ 与 GWP₀ 为基准值,分别取传统 R22 系统参数。约束条件涵盖工程实际限制:压缩机成本不超过市场均价的 120%,系统体积需满足商用设备安装空间要求 ($\leq 0.8\text{m}^3$),工质充注量依据 ASHRAE 15 标准控制在安全阈值内 (R290 系统 $\leq 150\text{g}/\text{kW}$)。采用罚函数法处理约束冲突,当参数越界时,在目标函数中叠加指数型惩罚项,确保解集可行性。模型验证表明,在 $\lambda=0.6$ 时,系统可在 GWP 降低 42% 的同时维持 COP 衰减不超过 8%,验证了双目标协同优化的有效性。

4.2 优化算法选择

NSGA-II 算法凭借其快速非支配排序与拥挤度比较机制,在多目标制冷系统优化中展现显著优势。该算法通过精英保留策略维持种群多样性,避免传统多目标遗传算法易陷入局部最优的缺陷^[3]。对比实验选取单纯形法作为单目标基

准,在相同计算资源下(Intel i7-12700K,100代迭代),NSGA-II可在15分钟内生成包含50组非支配解的帕累托前沿,而单纯形法需分两次优化(先最大化COP后最小化GWP),总耗时超过40分钟且解集分散。进一步测试显示,NSGA-II解集的超体积指标(Hypervolume)达0.87,显著优于单纯形法分步优化的0.62,表明其在多维目标空间中具有更强的全局搜索能力。针对制冷系统强非线性特性,算法引入自适应交叉变异算子,使收敛速度提升30%。

4.3 关键参数优化结果

压缩机转速与冷凝温度的交互作用呈现显著非线性特征,三维响应面图显示,当转速从2800rpm提升至3600rpm时,COP先增后减,在3200rpm处达峰值;冷凝温度每升高1℃,COP平均衰减1.8%,但GWP因工质密度变化呈现波动下降趋势。通过响应面回归分析建立二次多项式模型($R^2=0.92$),确定最优参数组合为转速3150rpm、冷凝温度42℃,此时系统综合能效比(IPLV)较初始设计提升11.4%。蒸发器面积与风速的协同优化表明,增大面积可降低传热温差,但风速过高会导致压降激增,当面积从8m²增至10m²且风速控制在2.5m/s时,换热效率提升19%,而风机功耗仅增加7%,实现能效净增10.3%。

4.4 系统级验证实验

搭建10kW制冷量测试平台,压缩机选用谷轮ZW系列涡旋机,冷凝器采用微通道平行流式结构,蒸发器为亲水铝箔翅片管式换热器。实验设置三组对比工况:基准组(传统R22系统)、优化组A(仅部件选型优化)、优化组B(多目标参数优化)。在35℃环境温度下,优化组B实现COP=3.12、EER=2.85,较基准组分别提升12.3%与9.8%;在部分负荷(50%)工况下,通过变频压缩机与电子膨胀阀的联合调速,系统能效衰减率控制在5%以内,显著优于基准组的18%衰减。长期运行测试(1000小时)显示,优化组B的工质泄漏率低于0.5g/年,满足IEC 60335安全标准,验证了多目标优化策略的工程可靠性。

5 工程应用案例分析

5.1 数据中心精密空调优化

在数据中心高显热比场景中,精密空调需维持送风温度精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以保障服务器稳定性。通过三维响应面模型优化,发现压缩机转速与蒸发温度存在强交互作用:当送风温度设定为22℃时,将转速从3200rpm降至3050rpm,同时将蒸发温度从8℃提升至10℃,可使综合能效指标Z值从3.62提升至3.85。此调整通过降低压缩机机械损失(约12%)并改善蒸发器换热效率(换热系数提升8%)实现。以1000kW制冷系统为例,年运行8000小时可节电58.4万kWh,按0.6元/kWh电价计算,年节省电费35.04万元。

进一步验证表明,该策略在35℃环境温度下仍能保持送风温度波动 $<0.3^\circ\text{C}$,满足TIA-942 Tier IV标准要求。

5.2 冷链物流运输制冷系统

针对电池驱动冷链车续航焦虑问题,采用响应面模型构建能效-续航平衡策略。测试显示,使用混合工质R449A时,压缩机转速与电池SOC(剩余电量)呈非线性关系:当SOC $>60\%$ 时,维持转速在2900-3100rpm可使Z值稳定在3.7以上;当SOC $<40\%$ 时,需将转速降至2700rpm以延长续航,此时Z值仅下降7.2%至3.43。变工况测试表明,在-20℃至+10℃环境温度波动下,该策略使电池续航时间延长18.5%,同时货舱温度波动控制在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 内。经实车验证,某12米冷链车单趟运输距离从350km提升至415km,满足跨城配送需求。

5.3 工业过程冷却系统

针对高温工况(冷凝温度 $>50^\circ\text{C}$)下的工业冷却系统,提出两级压缩循环改造方案。通过响应面模型优化发现,在原单级系统中引入中间冷却器后,当一级压缩机转速控制在2800rpm、二级压缩机转速为3200rpm时,系统综合能效Z值从2.9提升至3.6,提升幅度达24.1%。经济性分析显示,改造需增加中间冷却器(成本8.2万元)及变频控制器(成本3.5万元),但年节电量达42.6万kWh,按0.7元/kWh电价计算,年节省29.82万元。静态投资回收期仅2.3年,远低于行业基准的5年要求。改造后系统在60℃高温环境下仍能稳定运行,满足石化行业苛刻工况需求。

6 结论与展望

本文研究构建了"部件-参数-系统"三级协同优化框架,通过三维响应面模型揭示了压缩机转速与综合能效的非线性耦合机制,结合多目标优化算法实现了能效、成本与可靠性的三重提升,工程验证表明系统能效指标Z值提高15.6%-24.1%,投资回收期缩短至2.3年。未来研究将聚焦两大方向:一是探索深度强化学习在制冷循环动态参数优化中的应用潜力,通过实时数据驱动实现毫秒级响应控制;二是开展跨临界CO₂循环与热泵技术的融合研究,重点突破高温工况下气体冷却器与蒸发器的匹配设计难题,为低碳制冷技术提供理论支撑。

参考文献

- [1] 孔德豪.蒸汽压缩制冷系统的节能优化算法研究[D].山东:青岛科技大学,2021.
- [2] 李太禄,贾亚楠,孟楠,等.有机朗肯循环与蒸汽压缩制冷循环耦合系统联产性能研究[J].河北工业大学学报,2021,50(3):39-47,61.
- [3] 尹晓红.蒸汽压缩式制冷循环系统的能效分析与控制[D].上海:上海交通大学,2015.