

CO₂ 制冷系统智能控制及冷库能效提升研究

邵高峰

浙江乾山制冷科技有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8872

[摘要] 冷链物流快速扩张与制冷系统高能耗、高排放矛盾凸显，CO₂作为环保天然制冷剂成为替代主流，但跨临界 CO₂制冷系统工况耦合性强，传统控制难以适配动态负荷，能效偏低。本文围绕 CO₂制冷系统智能控制与冷库能效提升，阐述技术融合的重要意义，从智能监测、负荷调节、预警联动、数据驱动运维等方面提出优化策略，为冷链低碳转型与能效提升提供理论与实践参考。

[关键词] CO₂制冷系统；智能控制；冷库；能效提升

Research on Intelligent Control of CO₂ Refrigeration Systems and Energy Efficiency Improvement in Cold Storage

Shao Gaofeng,

Zhejiang Qianshan Refrigeration Technology Co., Ltd.

[Abstract] The rapid expansion of cold chain logistics has highlighted the contradiction with the high energy consumption and emissions of refrigeration systems. CO₂, as an environmentally friendly natural refrigerant, has become the mainstream alternative. However, transcritical CO₂ refrigeration systems exhibit strong operational coupling, making traditional control strategies inadequate for dynamic load adaptation and resulting in relatively low energy efficiency. This paper focuses on intelligent control of CO₂ refrigeration systems and energy efficiency improvement in cold storage, elucidating the significance of technological integration. It proposes optimization strategies encompassing intelligent monitoring, load regulation, early-warning coordination, and data-driven operations and maintenance, providing theoretical and practical references for the low-carbon transformation and energy efficiency enhancement of the cold chain.

[Key words] CO₂ refrigeration system; intelligent control; cold storage; energy efficiency improvement

冷链物流作为保障民生与商贸流通的核心环节，其规模扩张与制冷系统高能耗、高排放的矛盾日益突出。CO₂因环保性能优异成为制冷剂替代的核心方向，但跨临界 CO₂制冷系统工况耦合性强，传统控制技术难以适配动态负荷变化，导致能效偏低问题凸显。在“双碳”战略与冷链绿色发展政策驱动下，智能控制技术为系统优化提供了新路径。本文聚焦 CO₂制冷系统智能控制与冷库能效提升，探究技术融合路径，为冷链行业实现低碳转型与成本优化提供理论支撑与实践参考。

一、CO₂制冷系统智能控制原理

跨临界 CO₂制冷系统智能控制以多源感知、模型预测、协同调控、闭环优化为核心机理，适应系统强耦合、非线性、时

变工况的特点，实现能效和稳定性协同提升。系统依靠物联网感知网络对冷凝压力、蒸发温度、压缩机频率、膨胀阀开度、库内温湿度、环境参数等实施实时采集，创建起多变量耦合状态空间模型。采用 LSTM 神经网络和模型预测控制 (MPC) 相结合的方式，挖掘负荷时序特征和工况关联规律，完成 24 小时冷负荷精准预测和最优运行参数寻优，输出最优高压压力、电子膨胀阀开度、风机转速和压缩机变频指令，实现冷量输出和动态负荷精准匹配。针对跨临界循环高压侧压力敏感性，采用极值寻优和自适应 PID 复合调节，快速抑制扰动，稳定关键参数，防止过调和欠调造成的能效损耗。采用边缘计算实现数据就地分析和毫秒级响应，结合云端迭代优化控制模型，形成感

知、预测、调控、反馈闭环，保证系统在变工况、变负荷下持续高效运行，为冷库能效提升提供底层控制支撑。

二、CO₂制冷系统智能控制及冷库能效提升的重要性

(一) 契合双碳目标，引领冷链环保升级

我国“双碳”战略与冷链产业政策明确要求制冷系统向低碳化转型，CO₂作为 ODP 为 0、GWP 仅 1 的天然工质，是制冷剂替代的核心选择。冷链企业应用智能控制技术优化 CO₂制冷系统，可精准调控跨临界循环参数，减少无效能耗与 CO₂排放量，直接响应《“十四五”现代冷链物流发展规划》中“推广绿色节能技术”的要求。这种技术融合能推动冷链行业突破传统高碳发展瓶颈，通过能效提升与环保工质的协同作用，构建低碳制冷体系，为全行业碳减排提供可复制的技术路径。

(二) 强化成本管控，夯实企业竞争根基

冷链企业运营中，制冷能耗成本占总运营成本的 30%-50%，CO₂制冷系统因工况复杂易出现能效损失。企业借助智能控制技术实现冷负荷与系统运行的动态匹配，可避免传统控制中“过载运行”“低负荷高耗”等问题，实践表明该模式能使制冷能耗降低 15%-25%。同时，智能控制带来的运行稳定性提升，可减少压缩机卡涩、膨胀阀故障等问题，降低设备维护成本，通过能耗与运维成本的双重管控，显著提升企业盈利水平，增强市场竞争力。

三、CO₂制冷系统智能控制及冷库能效提升策略

(一) 多维度智能监测联动管理，实现冷库运行状态精准感知

制冷企业需以多智能技术为支撑，打通“环境感知-系统调控-人员联动”全链条，让 CO₂制冷系统主动适配冷库运行需求，同时精准提示运维人员开展针对性工作。首先，在冷库关键区域部署由温湿度传感器、CO₂浓度探测器、能耗监测模块组成的多智能感知网络，这些设备每 30 秒采集一次数据，通过 5G 网络实时传输至智能控制平台，平台利用机器学习算法分析数据，预判系统运行趋势。例如，当感知到冷库进货区因新入库货物导致温度波动时，平台无需人工操作，可自动指令 CO₂制冷系统调节膨胀阀开度，将局部温度快速拉回设定范围。其次，系统需建立“异常预警-人员派单-结果反馈”机制，当监测到压缩机能耗突增、管道压力异常等情况时，平台会立即通过手机 APP 向对应运维人员发送含异常位置、可能原因及处理建议的提示信息，例如提示“3 号冷库北区域冷凝器温度超标，需检查散热风扇运行状态”，人员处理后在 APP 上传结果，系统自动记录并优化后续预警参数。同时，制冷企业应定期将

系统运行数据与历史运维记录融合分析，不断迭代算法模型，让感知更精准、调控更高效，实现系统自主管理与人员精准响应的无缝衔接，既提升 CO₂制冷系统运行稳定性，又降低运维成本与能耗。

(二) 负荷动态调节适配管理需求，优化 CO₂制冷系统运行参数

制冷企业需以智能算法为核心，搭建覆盖负荷感知、参数调节、人员提示的全链条管控机制，让系统主动适配需求并引导人员操作。

制冷企业可在冷库的关键部位安装温度、湿度、货物吞吐量等各方面的传感器，将历史运营数据和实时环境信息结合起来，利用 LSTM 神经网络模型预测 24 小时内动态负荷的变化，给出基本的运行参数方案。模型可以对季节更替、昼夜时段、货物种类、入库量、外界温湿度等众多因素对冷负荷的影响规律进行深度挖掘，实现高精度的负荷预测和运行参数寻优，自动输出最优的冷凝压力、膨胀阀开度、压缩机频率等关键控制参数，使负荷和制冷输出达到动态匹配，避免系统过调或者欠调，稳定库内温湿度，降低无效能耗，保证 CO₂制冷系统高效、平稳运行。例如，针对果蔬冷库夜间货物入库高峰，系统可提前 2 小时预判负荷提升 30%，自动将 CO₂冷凝温度下调 2℃，同时调节膨胀阀开度至 80%，避免负荷突增导致的系统波动。

在此基础上，制冷企业应接入智能控制系统和人员管理平台，当系统检测到参数偏差超过阈值的时候，不仅可以自动发出调节指令，还可以用移动端给运维人员发送准确的操作提示。当传感器检测到某个区域的温度异常上升时，系统除了立刻增大 CO₂循环量之外，还会同步发出人员去检查该区域冷库门密封情况的提示，并给出具体的检查位置和标准，从而达到系统调节与人员操作的无缝对接，提高整个运营效率的目的。

(三) 全流程预警联动管理机制，降低冷库运行风险与能耗损耗

制冷企业需以 CO₂制冷系统为依托，创建包含多种数据的智能平台，从而达成对设备运行和人员管理的全方位精准管控。企业可利用物联网传感器对系统运行参数、冷库环境数据进行实时采集，利用 AI 算法建立动态能耗模型、故障诊断模型，实现异常工况自动预警、设备参数智能调节。联动人员管理终端规范操作流程，闭环处理隐患，降低能耗损耗和安全风险，提高系统运行稳定性、管理效率。企业应于冷库关键区域设置物联网传感器，对 CO₂液位、蒸发温度、库内湿度、货物状态等数据实施实时采集，借助 AI 算法创建动态能耗模型，

同历史运行数据以及实时环境参数展开对比分析。当系统检测到夜间库内货物进出频率降低时, AI 会自动调节压缩机运行频率, 把蒸发温度在合理区间内微调 0.5 到 1℃, 同时联动风机转速实现阶梯式调节, 避免传统恒定运行模式造成的能耗浪费。且系统需设置多级预警阈值, 当某区域 CO₂ 泄漏浓度接近安全下限或者设备电流异常波动的时候, 智能平台就会立刻发出声光报警, 同时把故障位置和处理建议推送给管理人员手机端, 保证问题及时响应。制冷企业可利用智能系统对人员操作进行规范化管理, 借助 AI 视频识别技术来监测工作人员是否按照流程关闭库门、检查设备。如果出现操作失误, 系统会立刻发出语音提醒, 并且会把操作数据存入管理台账, 让系统成为人员操作的“智能监督员”, 从管理层面减少能耗损耗和安全风险。

(四) 运维数据驱动管理优化, 构建 CO₂ 制冷系统全生命周期运维

制冷企业需创建以边缘计算网关为中枢的运维数据中枢, 对 CO₂ 制冷系统压缩机频率、蒸发压力、冷凝温度等参数以及冷库内货物储量、品类、进出库频次等管理数据进行实时采集, 采用 5G 模块将数据以毫秒级的速度传输到边缘端进行即时分析, 打破系统运行和运维管理的数据壁垒。

基于数据中枢, 制冷企业要创建智能联动控制模型, 把机器学习算法嵌入其中, 自主学习不同货物品类的温湿度需求, 不同季节的环境特征, 比如当监测到冷库内肉类货物储量增加 30%, 外界环境温度低于 5℃时, 系统可以自动降低冷凝风机转速 15%, 并通过运维 APP 向管理人员推送“重点区域巡检提示”, 明确告知需要关注的压缩机润滑油位范围, 实现“系统主动调控+精准提示管理”的智能模式。

同时制冷企业可建立数据溯源和优化机制, 每季度用数据中枢复盘系统运行和管理动作的匹配度来精准定位能耗异常、冷链断链等潜在风险点。企业可依据设备运行参数、环境监测数据、运维记录等形成可视化分析报告, 针对性地优化制冷系统调控策略和管理流程, 使技术参数和管理标准动态匹配, 不断提高国土空间冷链设施运行的能效和安全韧性。在此基础上, 制冷企业可创建全生命周期数据治理体系, 加强多源数据融合和智能分析能力, 依靠物联网、大数据等技术实现对冷链设施运行状态的全域感知和实时监控。通过建立能耗模型和风险预警算法, 将被动处置转变为主动预判, 提高风险响应速度和处置精度。同时根据国土空间规划布局以及区域冷链需求特

点, 对设施资源进行优化分配和调度, 促进制冷系统高效化、智能化、低碳化发展。在不断迭代优化中形成标准化、可复制的运维管理模式, 既可以降低单位产品能耗和运营成本, 又可以提高极端工况下冷链服务的连续性, 助力国土空间冷链基础设施高质量发展, 为食品药品安全、供应链稳定、双碳目标实现提供坚实的科技支撑和管理保障。

四、结论

传统控制模式下的 CO₂ 制冷系统, 在运行适配性与能效表现上均存在明显不足。而融合多维度智能监测联动管理、优化 CO₂ 制冷系统运行参数, 可有效破解多参数协同难题, 实现系统运行与动态负荷的精准匹配。这种技术革新不仅能显著降低制冷能耗, 还能提升系统运行稳定性, 既助力冷链企业践行绿色发展理念, 又通过优化成本增强市场竞争力, 为冷库能效提升提供了切实可行的路径。

【参考文献】

- [1] 陈文嘉, 李铮伟, 李振海. 基于 Q-learning 的空气源热泵制冷系统无模型优化控制在传感器误差下的鲁棒性分析[J]. 节能, 2026, 45(03): 60-65.
 - [2] 李根, 丁佳雨. 螺杆压缩机制冷系统故障诊断与维护技术研究[J]. 产品可靠性报告, 2026, (03): 62-63.
 - [3] 崔文君. 基于顺序控制防液击技术的低温冷库制冷系统设计与工程应用[J]. 现代制造技术与装备, 2026, 62(03): 20-23.
 - [4] 谭杰, 傅东辉, 王青波, 等. 制冷系统压缩机故障原因分析与维修技术[J]. 现代制造技术与装备, 2026, 62(03): 110-112.
 - [5] 裴子春, 罗俊, 李明悦, 等. 节能环保需求下基于 PSO 和模糊控制的室内制冷系统自动控制[J]. 自动化与仪器仪表, 2026, (03): 282-286.
 - [6] 张孝东, 赵晓丹, 杜心豪, 等. 冷藏与冷冻用同步双循环复合制冷系统研究[J]. 洁净与空调技术, 2026, (01): 14-17.
 - [7] 李家炜, 冷冬梅, 田绅, 等. 肉类冷藏库用亚临界 CO₂ 制冷系统运行性能评价研究[J]. 冷藏技术, 2026, 49(01): 10-16.
 - [8] 吴大伟. 某禽类屠宰场制冷系统冷凝废热回收方案[J]. 低温与特气, 2026, 44(01): 17-21.
 - [9] 陈建平, 张卫士, 卢维国, 等. 二氧化碳制冷系统及融霜[J]. 制冷, 2026, 45(01): 62-65.
- 作者简介: 邵高峰, 出生年月: 1986年11月, 男, 汉族, 籍贯: 浙江省杭州市临安区, 学历: 本科, 研究方向: 制冷系统研发设计。