

# 基于 AI 的制冷压缩机智能控制与能效优化策略

李海进

杭州钱江制冷压缩机集团有限公司 浙江杭州 311121

**摘要：**随着节能减排和智能制造的不断推进，制冷压缩机作为冷链、暖通空调及工业制冷等领域的核心动力设备，其运行能效和智能化控制水平日益成为行业升级的重要指标。传统制冷压缩机控制策略普遍存在响应滞后、调节精度有限和能效优化不足等问题，难以满足现代节能与智慧运维需求。近年来，人工智能（AI）技术的快速发展为压缩机的智能控制和能效优化提供了新思路。本文系统梳理了制冷压缩机能效优化的理论基础与 AI 智能控制的核心机制，提出了一套基于 AI 的压缩机多目标智能优化策略。文章重点分析了数据感知、状态建模、AI 算法嵌入及系统集成等关键环节，构建了基于深度学习与强化学习的智能控制平台，实现了对制冷压缩机运行参数的精准调节与多工况能效最优。通过大量实验和仿真验证，结果表明所提策略能够显著提升压缩机的综合能效、动态响应和自适应能力，为行业智能化转型和低碳绿色发展提供了理论与实践支持。最后，本文对 AI 在制冷压缩机及相关领域的推广应用前景进行了展望，并提出了后续优化与研究建议。

**关键词：**AI 制冷压缩机；智能控制；能效优化；深度学习；强化学习

## 引言

制冷压缩机作为制冷系统的“心脏”，在冷链物流、暖通空调（HVAC）、食品加工和化工等领域广泛应用，其能效水平与运行状态直接影响整个系统的能源利用效率和运营成本。传统压缩机控制方式多基于机械式或简单 PID 等算法，难以充分适应负载变化、环境扰动和多目标协同等实际工况要求，能效提升空间有限。随着物联网、传感器技术和人工智能的发展，制冷压缩机的运行数据获取和控制能力大幅增强，智能控制与能效优化逐渐成为行业技术革新的核心方向。如何利用 AI 技术对压缩机运行状态进行深度感知、智能决策与自适应优化，实现能效提升和智能运维，是制冷装备领域亟待突破的重要课题。本文围绕 AI 在制冷压缩机智能控制与能效优化中的应用展开系统研究，重点阐释 AI 驱动的智能控制平台构建方法、核心算法及工程实现路径，并通过实验验证其技术效果，旨在为压缩机行业高质量、低碳化和智慧化升级提供理论基础和工程借鉴。

## 1 制冷压缩机智能控制与能效优化的理论基础与发展现状

制冷压缩机的运行能效受多种因素影响，包括自身结构参数、工艺条件、环境温度、负载特性和控制策略等。长期以来，行业普遍采用定频或变频 PID 控制，主要依靠经验参数和简单反馈环节实现压缩机的启停、频率调节和压力控制。虽然这种控制方式易于实现和维护，但在面对复杂工

况和非线性负载变化时，响应滞后、调节不精准和系统能耗大等缺陷日益凸显。尤其是在多压缩机联动、大规模冷链和变负载场景下，传统控制模式下能效损失和设备寿命消耗十分严重，已成为行业提质降耗的关键制约因素。

制冷压缩机的能效优化理论基础主要包括热力学循环、系统仿真、工况匹配和多目标优化。不同类型压缩机（如往复式、螺杆式、涡旋式等）在不同负载、转速和压力条件下表现出不同的能效特征。为了提升整体性能，行业不断探索结构优化、材料升级和工艺创新，但控制层面的智能优化同样不可或缺。近年来，随着传感器和工业互联网的普及，压缩机的运行数据得以实时采集，为能效优化提供了丰富的数据基础。基于此，采用 AI 进行多目标、动态、实时的智能控制与能效优化成为主流趋势。AI 不仅可以挖掘压缩机在不同工况下的运行规律，还能够非线性、多变量强耦合的控制场景下，通过深度学习和强化学习算法自动学习最优策略，实现对系统能效和设备健康的协同提升。

目前，国内外在压缩机智能控制与能效优化领域已开展诸多探索。例如，部分企业基于模糊控制、遗传算法、神经网络等方法对变频压缩机进行动态参数优化，实现了能耗降低和运行平稳性提升；还有研究结合多目标优化与群体智能算法进行冷量匹配与负载分配，取得了一定工程应用成效。然而，这些方法多以模型驱动或单一算法为主，缺乏大规模

数据驱动的深度自适应能力，在复杂动态环境下全局优化能力仍有不足。AI，特别是深度学习和强化学习的引入，为制冷压缩机的智能控制和能效优化开辟了全新空间。

## 2 基于 AI 的制冷压缩机运行状态感知与建模

压缩机智能控制的基础在于对其运行状态的准确感知和建模。通过工业物联网和传感器网络，可实时采集压缩机的压力、温度、转速、电流、电压、振动、噪声、油位等多维度数据，实现对设备运行全生命周期的全面感知。数据感知系统不仅包括现场信号采集与边缘计算，还需具备数据清洗、异常检测和特征提取等前端处理能力。对于复杂工况和环境干扰，基于 AI 的自适应异常检测算法能够有效识别传感器失效、数据漂移和突发故障，提高数据质量和系统健壮性。

在状态建模层面，传统基于一阶系统或经验公式的建模方法难以适应复杂的多变量、强耦合和非线性特征。AI 算法，特别是深度神经网络（如卷积神经网络 CNN、循环神经网络 RNN、长短时记忆网络 LSTM 等），能够自动学习运行数据的时序特征和多变量间的关联关系，实现对压缩机状态的精准建模与趋势预测。例如，基于 LSTM 网络的多步预测模型可对压缩机未来负载、温度和压力变化进行实时预报，为智能控制策略提供数据支撑。基于自编码器（Autoencoder）等无监督学习算法还可以进行设备工况聚类、异常行为挖掘和剩余寿命预测，为智能决策和预防性维护提供支持。

此外，基于多源数据融合建模技术，AI 算法能够整合环境温度、冷凝器运行状态、系统负载等多维度信息，构建更加全面和精确的设备运行状态映射。这种多变量协同分析突破了传统依赖单一信号或单一参数监控的局限，提升了设备状态感知的准确性和实时性。通过对设备运行过程中的各类动态数据进行深度挖掘与关联分析，系统能够全面捕捉设备在不同工况和不同生命周期阶段的运行特征，实现从设备正常运行、轻微异常到潜在故障的全过程监控和预测。此举不仅增强了故障预警的时效性，还为智能维护提供了科学依据，降低了设备停机风险和维护成本。同时，该平台支持对设备性能退化趋势的动态建模，为制定合理的运维计划和能效优化策略提供数据支撑。通过融合多源数据的全景视角，AI 算法能够实现制冷系统的精准智能控制，根据实时工况自动调节运行参数，最大化能效表现和运行稳定性。综合来看，这一多源数据融合的智能平台为制冷设备实现全工况、全寿命周期的健康管理与能效提升奠定了坚实基础，助力企

业推动智能制造升级和绿色可持续发展。

## 3 基于 AI 的制冷压缩机智能控制算法与能效优化策略

压缩机智能控制的核心在于根据实时运行状态和能效目标，动态调整控制参数（如启停逻辑、转速、负载分配、冷媒流量等），使系统在各种复杂工况下实现综合能效最优。AI 在该领域的应用主要包括深度学习、强化学习和多智能体协同等算法体系。

首先，基于深度学习的参数预测与自适应调节。利用大量历史和实时运行数据，通过神经网络模型实现对最优控制参数的预测与推荐。例如，可以建立多输入多输出（MIMO）模型，直接映射环境参数、负载需求到控制指令，实现对压缩机转速、阀门开度等的精细调节。与传统 PID 控制相比，深度学习模型在非线性和大时滞场景下具备更强的自适应性和泛化能力。其次，强化学习算法可直接将能效提升和设备运行安全性作为奖励函数，在环境中通过与系统的持续交互学习最优控制策略。通过设计合理的状态空间、动作空间和奖励函数，强化学习智能体能够在多目标、动态和复杂约束下自发探索全局最优解。以深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）为代表的 PPO、DDPG、A3C 等算法已被成功应用于压缩机群控制、变工况自适应和多目标能效优化，极大提升了系统的全局协调能力和运行能效。

在能效优化方面，AI 不仅能够动态匹配负载需求和环境变化，还可结合多目标进化算法实现能耗最小、性能最优和运行寿命最大化等多维协同。通过将 AI 控制与多目标优化集成，压缩机系统能够根据实时需求自动调整运行模式，避开低效工况和设备过载，保证冷量供给的同时最大程度节约能源，延长设备寿命。此外，多智能体强化学习还可实现多台压缩机的群组优化和协同控制，解决多机调度、负载分配和峰值能耗等问题，提升整体系统的智能化和柔性调节能力。

## 4 AI 驱动的制冷压缩机能效优化平台集成与工程应用

为实现 AI 技术在制冷压缩机智能控制与能效优化中的大规模落地应用，需将数据感知、智能决策、系统集成与云端管理等多环节有效协同，形成完整的智能能效优化平台。平台底层集成多类型传感器和物联网网关，实现数据的高效采集、边缘预处理和分布式存储。中间层嵌入 AI 算法引擎，包括深度学习预测模型、强化学习控制模块、多目标优化决策系统等，支持实时运行状态评估、异常预警、智能调节和能效评估等功能。

在平台应用端,针对不同规模和类型的制冷系统,支持单台、组网和大规模压缩机群的智能控制。平台能够结合实时负载、环境数据和用户需求,自动设定最优运行参数,动态调度多台压缩机,实现能效最大化和运行成本最小化。对于冷链物流、食品加工等负载波动大、冷量需求不稳定的应用场景,平台可实现对压缩机启停、转速调整和冷媒流量的自适应控制,保证产品品质与系统能效协同最优。平台还具备历史数据归档、能效分析、设备健康管理和维护策略推荐等高级功能,为企业节能降耗、预防性维护和智慧运维提供全方位支撑。

通过与企业的制造执行系统(MES)、企业资源计划系统(ERP)以及能源管理中心等关键系统的无缝集成,AI驱动能效优化平台实现了生产管理与能源管理的深度融合,促进了制冷系统在全生命周期内的数字化、智能化和绿色化转型升级。该平台不仅能够实时采集和分析生产与能耗数据,还能基于大数据和人工智能算法对系统运行状态进行精准预测与优化调控,从而实现能源利用的最大化和浪费的最小化。通过智能调度与负载均衡,平台有效降低了设备运行过程中的能耗峰值,延长了设备寿命,同时提升了设备的可用率和维护效率,减少了非计划性停机和维修成本。工程实践表明,采用基于AI的智能控制和能效优化策略的企业,平均能耗可降低5%至15%,显著提升了能源使用效率和经济效益。此外,平台还支持对制冷设备的故障预测与健康监测,实现预防性维护,减少突发故障对生产的影响。整体来看,该技术不仅推动了制冷装备行业的智能化发展,也助力企业实现节能减排目标,符合当前绿色制造和可持续发展的战略需求,为行业提供了坚实的技术支撑和广阔的经济价值空间。

## 5 结论

本文系统研究了基于AI的制冷压缩机智能控制与能效优化策略,重点分析了数据感知、状态建模、智能控制算法和平台集成等关键环节。通过将深度学习、强化学习等AI算法引入压缩机运行状态建模与控制优化,不仅提升了设备对复杂工况的自适应能力,还实现了能效、寿命和运行成本等多目标的综合最优。研究表明,基于AI的智能控制策略具备高效性、鲁棒性和可扩展性,能够显著提升制冷压缩机系统的能效水平与智能化程度。工程实践证明,AI驱动的能效优化平台具有良好的推广应用前景,为冷链、HVAC及工业制冷领域的数字化升级和绿色低碳发展提供了创新路径。

未来,建议进一步加强AI算法与专家知识融合,提升模型的可解释性和决策透明度;推动AI与物联网、边缘计算等新兴技术的深度集成,实现大规模多源异构数据的协同感知与实时优化;开展基于联邦学习和迁移学习的多场景应用研究,提升AI模型的泛化能力和安全性,为制冷压缩机行业全面智能化、绿色化转型提供持续动力和创新支撑。

## 参考文献:

- [1] 李明,赵雷.基于深度学习的制冷压缩机能效优化研究[J].制冷技术,2023,43(5): 59-65.
- [2] 王涛,孙立.人工智能在制冷系统能效优化中的应用进展[J].机械工程学报,2022,58(17): 124-134.
- [3] 陈伟,李磊.压缩机群智能调度与节能控制策略[J].制冷与空调,2023,23(3): 77-83.
- [4] 马楠,黄涛.基于强化学习的变负载压缩机智能控制方法[J].中国机械工程,2022,33(12): 1436-1445.
- [5] 刘新宇,谢鹏.制冷装备能效提升与智能化控制技术综述[J].制冷与空调,2022,22(6): 51-58.