

压缩机变工况运行下的控制策略优化与实验研究

郭旭桐

江苏禄航动力科技有限公司 江苏南京

【摘要】在工业生产过程中，压缩机常面临工况频繁变化的复杂场景，传统控制策略难以保障其高效稳定运行。从控制算法革新与参数精细化调整入手，结合先进控制理论与技术，构建适用于变工况的新型控制策略。经系统实验验证，优化后的控制策略使压缩机能耗降低 12%，响应速度提升 18%，有效改善运行性能，为压缩机在多变工况下的可靠运行提供科学可行的方案，对推动工业领域压缩机应用发展具有重要意义。

【关键词】压缩机；变工况；控制策略；优化；实验研究

【收稿日期】2025 年 2 月 24 日

【出刊日期】2025 年 3 月 28 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250138

Experimental study on optimization of control strategy under variable operating conditions of compressor

Xutong Guo

Jiangsu Luhang Power technology Co.Ltd, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】In the industrial production process, compressors often face complex scenarios with frequent changes in operating conditions. Traditional control strategies struggle to ensure their efficient and stable operation. By innovating control algorithms and finely adjusting parameters, combined with advanced control theory and technology, a new control strategy suitable for variable conditions is constructed. Systematic experiments have verified that the optimized control strategy reduces compressor energy consumption by 12% and improves response speed by 18%, effectively enhancing operational performance. This provides a scientifically feasible solution for reliable operation of compressors under varying conditions, which is of great significance for promoting the development of compressor applications in the industrial sector.

【Keywords】Compressor; Variable working condition; Control strategy; Optimization; Experimental study

引言

随着现代工业的快速发展，压缩机作为关键动力设备，广泛应用于化工、制冷、石油等多个领域。传统控制策略基于固定工况设计，在面对负荷突变、环境温度和压力波动等情况时，无法及时做出有效调整，导致压缩机效率低下、能耗增加，甚至出现设备故障。这不仅有助于降低企业生产成本，还能推动工业生产向高效、节能、智能化方向发展，对提升工业整体竞争力具有重要的现实意义。

1 工况运行问题剖析

在工业生产的实际运行场景中，压缩机工况的变化是多种复杂因素交织作用的结果。生产流程的动态调整是其中极为关键的因素之一。以化工生产为例，整个生产过程涉及多个反应阶段，每个阶段对气体流量和压力的需求大相径庭。在合成反应初期，可能需要压缩机提供较大流量、相对较低压力的气体，以保证反应原料的充足供应；而在反应后期，随着反应进程的推进，

为促进产物的分离与提纯，则要求压缩机能够输出高压、小流量的气体^[1]。这种频繁且剧烈的需求变化，使得压缩机必须在短时间内精准完成负荷切换，对其性能和响应速度构成了严峻挑战。

与此环境参数的波动同样不可小觑。环境温度和压力的改变，会直接作用于压缩机的进气状态，进而深刻影响其运行特性。在炎热的夏季，环境温度显著升高，压缩机吸入的气体温度随之攀升，气体密度减小。根据气体状态方程，在同等功率输入的情况下，压缩机的压缩效率会大幅降低，能耗则显著增加^[2]。相关研究表明，当环境温度从常温（25℃）升高至 35℃时，压缩机的能耗可能会增加 15%-20%。环境压力的变化也不容忽视，在高海拔地区，大气压力较低，压缩机的进气量会相应减少，为满足生产需求，不得不提高转速，这又进一步加剧了设备的磨损和能耗。

这些复杂多变的工况给压缩机的运行带来了一系列棘手问题。运行效率下降是最为直观的表现。由于压

缩机难以在工况突变时迅速调整至最佳工作状态，导致压缩过程中的能量损耗急剧增大。以离心式压缩机为例，当负荷突然降低时，其内部的气流分布会发生紊乱，原本稳定的叶轮流道内出现回流和漩涡现象，使得压缩机的工作点偏离高效区，效率大幅下降。有数据显示，在负荷骤降 20% 的情况下，离心式压缩机的效率可能会降低 10%-15%。振动加剧也是常见问题之一，工况变化导致压缩机的受力状态发生改变，不平衡力显著增加。长期处于这种异常振动状态下，压缩机的零部件磨损加速，连接部件容易松动，严重时甚至可能引发设备故障，危及整个生产系统的安全稳定运行。据统计，因振动问题导致的压缩机故障占比高达 30%-40%。

2 控制策略优化

算法改进作为优化控制策略的核心环节，具有至关重要的意义。引入智能控制算法，如模糊控制、神经网络控制等，能够赋予压缩机控制系统强大的自主学习和适应能力。模糊控制基于模糊逻辑规则，巧妙地将复杂的工况变化信息转化为清晰、可执行的控制指令。当压缩机遭遇负荷突变时，模糊控制系统能够迅速采集实时的压力、流量等关键数据，通过预先设定的模糊规则库，快速计算并调整压缩机的转速和吸气阀开度，确保设备运行的稳定性^[3]。当检测到压力突然下降且流量急剧增加时，模糊控制系统能够快速判断出负荷增大，进而及时提高压缩机转速，同时适当开大吸气阀，以维持系统的压力和流量平衡。神经网络控制则通过对海量工况数据的深度学习训练，构建起工况与控制参数之间的复杂映射关系，从而实现对压缩机运行状态的精准预测与控制。

参数调整是优化控制策略的重要支撑。针对压缩机在不同工况下的独特运行特性，对控制参数进行精细化整定显得尤为必要。通过建立精确的压缩机运行数学模型，并结合大量的实际运行数据，深入分析各参数对压缩机性能的影响规律。以压缩机的容积效率和压缩比为例，通过巧妙调整余隙容积、活塞行程等关键参数，能够有效优化压缩机的压缩过程，显著提高能量转换效率。研究表明，合理调整余隙容积，可使压缩机的容积效率提高 5%-10%^[4]。考虑到工况变化的频率和幅度具有不确定性，动态调整控制参数的响应速度和调节范围至关重要。

优化控制系统结构能够进一步提升控制策略的整体性能。采用分布式控制系统架构，将压缩机的控制功能合理分散到多个子系统中，实现对压缩机各部件的协同控制。通过构建先进的传感器网络，实时、精准地

采集压缩机运行过程中的温度、压力、振动等多维度数据，并将这些数据迅速传输至中央控制单元进行综合分析。中央控制单元依据深入的分析结果，精准协调各子系统的工作，实现对压缩机运行状态的全面监控与精准控制。当传感器检测到压缩机某一部位的温度异常升高时，中央控制单元能够立即分析判断可能的原因，并及时调整相关子系统的运行参数，如增大冷却水量或降低压缩机负荷，以确保设备安全运行。

3 实验验证与分析

为了科学、严谨地验证优化后的控制策略的有效性，专门搭建了高度模拟真实工业环境的压缩机变工况实验平台。该平台具备强大的功能，能够实现对负荷、温度、压力等关键工况参数的精确调节与控制，为深入研究压缩机在变工况下的运行性能提供了坚实的基础。实验平台主要由压缩机本体、驱动系统、数据采集系统和控制系统四大核心部分组成。数据采集系统配备了高精度传感器，能够实时、准确地采集压缩机运行过程中的一系列关键参数，如排气压力、流量、功率、振动加速度等^[5]。这些高精度传感器的测量精度可达 $\pm 0.1\%$ ，确保了采集数据的可靠性。控制系统集成了优化后的先进控制算法，能够根据预先设定的工况自动、精准地调整压缩机的运行参数，实现智能化控制。

在实验过程中，精心设计了多个典型的工况变化场景，包括负荷阶跃变化、温度渐变和压力波动等。在负荷阶跃变化实验中，首先设定压缩机的初始负荷为 50%，模拟实际生产中负荷较低的工况。然后在极短的时间内将负荷突增至 80%，模拟生产过程中负荷突然增大的情况，对比优化前后压缩机的响应过程。实验数据清晰地显示，优化前压缩机达到新的稳定状态需要 15 秒，且在这一过程中运行参数波动较大，排气压力的波动幅度可达 $\pm 0.2\text{MPa}$ ；而优化后，压缩机仅需 12 秒即可稳定下来，运行参数的波动幅度显著减小，排气压力的波动幅度降低至 $\pm 0.14\text{MPa}$ ，减小了 30%^[6]。在温度渐变实验中，模拟环境温度从 20℃ 逐渐升高至 35℃ 的实际过程，实验结果表明，优化后的控制策略使压缩机的能耗降低了 12%，效率提升了 10%，充分彰显了优化策略在节能增效方面的显著优势。

对实验数据进行深入、全面的分析，从多个维度评估优化效果。在能耗方面，通过精确计算单位压缩量的能耗，对比发现优化后的控制策略在不同工况下均能有效地降低能耗。在稳定性方面，仔细分析运行参数的波动范围和频率，结果表明优化后的压缩机运行更加平稳，振动幅值降低了 25%，有效减少了设备磨损，

提高了运行的可靠性。在响应速度方面,通过准确计算工况变化后压缩机达到稳定状态的时间,验证了优化后的控制策略响应速度显著提升,能够更好地适应复杂多变的工业生产需求。实验结果充分、有力地证明,优化后的控制策略能够切实有效地改善压缩机在变工况下的运行性能,成功达到了预期的优化目标,为工业生产中压缩机的高效、稳定运行提供了可靠的技术支撑。

4 成果总结与展望

通过对压缩机变工况运行控制策略的深入研究与优化,成功攻克了传统控制策略在复杂工况下的诸多不足。从全面剖析工况运行问题,到精心设计并实施控制策略优化方案,再到严谨的实验验证与分析,形成了一套完整、系统的研究体系^[7]。优化后的控制策略在实际应用中取得了显著成效,大幅提升了压缩机的运行效率,有效降低了能耗,显著增强了运行稳定性,为工业生产中压缩机的高效、可靠运行提供了坚实保障。

展望未来,随着工业智能化的蓬勃发展,压缩机控制策略优化领域仍蕴含着广阔的研究空间。一方面,可进一步探索融合更先进的人工智能算法,如深度学习、强化学习等,使压缩机控制系统具备更为强大的自主决策能力,能够更加精准、快速地应对各种复杂多变的工况。另一方面,结合物联网技术,实现压缩机的远程监控与故障预测,构建智能化运维体系,提前发现潜在故障隐患,及时采取维护措施,降低设备故障率,提高生产的连续性和稳定性^[8]。对压缩机变工况运行的机理研究也需进一步深化,通过多学科交叉融合,综合运用热力学、流体力学、机械动力学等多学科知识,为控制策略优化提供更为坚实的理论基础,推动压缩机技术向更高水平迈进,更好地满足工业生产不断发展的需求。

5 结语

在工业领域,压缩机变工况运行的控制难题通过策略优化与实验研究得以有效解决。革新控制算法、调整参数并优化系统结构后,压缩机能耗显著降低、响应

更迅速、运行更稳定。此次研究成果为工业生产提供了可靠方案,提升了压缩机运行效益。未来,可融合深度学习等前沿算法,结合物联网技术,深化运行机理研究,推动压缩机控制策略向智能化、精准化迈进,满足工业不断升级的需求。

参考文献

- [1] 张宇鑫,左志涛,郭文宾,等.带可调导叶斜流压缩机变工况性能预测方法研究[J].工程热物理学报,2025, 46(03): 777-789.
- [2] 李源,赵明智,徐玉杰,等.液态二氧化碳储能系统变工况运行特性[J/OL].储能科学与技术,1-13[2025-04-19].
- [3] 金鹏,李瑞雄,王焕然,等.基于热压解耦的 CAES 系统的压缩机部分负荷性能分析[J].风机技术,2025,67(01):11-15+66.
- [4] 郭豪,许宏宇,韩禹,等.燃煤半闭式超临界二氧化碳发电系统变工况性能分析[J/OL].中国电机工程学报,1-12[2025-04-19]
- [5] 饶翰文,张莹,李明,等.蒸汽压缩式冷库变工况动态特性及最优运行性能实验研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2025,45(01):19-23.
- [6] 张旭,李阳海,王廷举,等.大容量压缩空气储能电站压缩机宽工况动态特性研究[J].汽轮机技术,2024,66(06): 449-455+460.
- [7] 张萱,陈来军,崔森,等.先进绝热压缩空气储能系统宽工况运行可行域分析[J/OL].电网技术,1-10[2025-04-19].
- [8] 罗金平,黄景聪,田盛,等.并联压缩机系统变工况运行负荷分配研究[J].风机技术,2024,66(05):73-77.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

