

# 矿用螺杆空压机变工况能效优化与节能控制策略

胡 俊

浙江红五环机械股份有限公司 浙江衢州 324000

**摘 要:** 随着煤矿等矿业企业对生产过程节能降耗、绿色高效的需求不断提升, 螺杆空压机作为矿用气源系统的核心装备, 其能效水平对矿井整体运行能耗有着直接影响。矿用螺杆空压机实际运行过程中存在工况变化频繁、负载波动剧烈、传统控制方式响应滞后及能效损失严重等突出问题, 亟需创新节能控制与优化调度策略。本文从矿用螺杆空压机变工况运行特性出发, 系统梳理能效影响因素, 提出基于变频调速、智能群控与动态负载匹配的能效优化与节能控制策略, 搭建了综合能效评价与智能决策模型。通过实验与工程应用验证, 所提方案显著降低了矿井压缩空气系统的运行能耗, 提升了气源系统自适应调节能力和可靠性。研究结果为矿山企业空压站的智能运维、绿色矿山建设及高效生产提供了理论支撑和工程示范。最后, 结合行业技术发展, 展望了智能化、信息化条件下矿用螺杆空压机节能控制的进一步优化方向。

**关键词:** 矿用螺杆空压机; 变工况; 能效优化; 节能控制; 智能群控

## 引言

矿用螺杆空压机作为煤矿、金属矿、非金属矿等地下作业场所主要动力设备, 其运行能耗约占矿井总用电量的三分之一以上, 是矿山企业能效管理和节能减排的重点环节。随着矿井自动化、智能化进程加快, 压缩空气系统的用气负载呈现多变性和间歇性特点, 导致空压机组频繁启停、部分负载运行及能耗浪费现象突出。传统工频空压机或简单的开关控制已难以适应矿山复杂工况与高效运维需求, 亟需从能效优化、智能控制、系统协同等多维度创新节能策略。本文面向矿用螺杆空压机复杂工况场景, 系统研究能效影响因素与动态优化方法, 提出以变频调速、智能群控、动态负载分配为核心的节能控制技术体系, 并通过工程应用验证其经济性与可行性, 为矿山企业构建节能、绿色、高效的动力保障系统提供新理论与技术支撑。

### 1 矿用螺杆空压机能效现状与变工况运行特点

矿用螺杆空压机广泛用于井下采掘、运输、通风、喷雾等环节, 承担着提供高压、稳定压缩空气的关键任务。相比其他类型空压机, 螺杆式压缩机因其结构紧凑、运行平稳、维护简便及能效高等优点成为矿山企业的主流选择。然而, 受矿井生产节奏和各类用气设备协同影响, 空压机运行工况呈现高度动态性和复杂性。一方面, 矿井不同时段、不同作业区域的用气需求差异显著, 导致空压机组频繁启停、负载率变化大。另一方面, 部分设备突发故障、井下环境波动、

气源管路泄漏等因素, 进一步加剧了气源系统的波动性和能耗的不确定性。传统工频或定速空压机无法灵活适应负载变化, 常常出现“以大代小”、“空载运行”等低效工况, 造成能源浪费和设备寿命缩短。此外, 矿山企业普遍缺乏空压站智能协同与群控调度, 单台或多台空压机孤立运行, 缺少全局优化机制, 进一步制约了系统能效水平提升。

近年来, 随着变频技术、智能传感和工业自动化的发展, 变频调速、软启动、智能群控等节能控制手段逐步应用于矿用螺杆空压机系统。变频空压机通过实时调节电机转速, 实现供气能力与用气需求的精准匹配, 有效避免了频繁启停和空载运行带来的能效损失。群控系统则基于多台空压机的协同调度, 通过优化启停顺序、负载分配和备机切换等策略, 提升整体气源系统的动态响应和经济运行能力。尽管如此, 在矿山高动态、多变负载和极端工况条件下, 变频与群控系统仍面临参数配置复杂、实时性要求高、负载预测不准确等技术挑战, 需要进一步研究适应矿山实际工况的能效优化与智能节能控制策略。

### 2 矿用螺杆空压机能效影响因素与系统建模

#### 2.1 能效影响因素分析

矿用螺杆空压机的能效受多方面因素的综合影响, 深入分析这些因素有助于制定有效的节能策略。设备本体能效是基础, 包括压缩机的结构参数如螺杆长度、螺旋角度、级数等, 这些直接影响压缩效率和能耗水平; 同时, 密封性能

和润滑系统的优劣也对泄漏和摩擦损失起决定作用。驱动系统效率同样关键,电机的效率等级、变频器性能及传动系统的机械损耗共同影响整体能耗表现。运行工况如进气压力、排气压力、进气温度以及环境湿度等参数随时变化,这些因素直接影响压缩机的负载状态和运行效率。控制策略方面,合理的启停逻辑和负载分配方式能够减少空载运行时间,避免设备频繁启停造成的能量浪费。此外,系统管路布局设计是否合理、泄漏控制措施的有效性以及末端用气压力的设定,都在很大程度上影响压缩空气的输送效率和系统整体能耗。特别是在变负载和多机组并联运行的复杂矿山环境中,实现空压机输出与用气需求的精准匹配,动态调节负载分配和压力设定,是提升系统综合能效的关键。综合以上因素,通过系统优化设计和智能控制,可以有效降低能耗,提高系统的经济性和可靠性。

## 2.2 系统能效建模方法

为了有效实现矿用螺杆空压机系统的能效优化,必须构建科学、全面的多层次建模体系。首先,从基础层面出发,依据热力学和流体力学原理对螺杆空压机的压缩过程进行深入分析,构建参数化能效模型,精确描述能量转化效率、热损耗、机械摩擦等关键影响因素。其次,结合矿山现场复杂多变的用气规律,建立动态负载特性模型,刻画负载波动、周期性变化以及突发事件(如井下设备启停)对空压机运行及能效的影响,确保模型能够反映真实工况下的系统动态特性。再者,系统级协同模型通过对多台空压机群控调度、管网压力与流量分布进行综合仿真,研究多机组协同运行的能效表现及优化潜力。最后,融合基于数据驱动的能效评价和优化决策模型,通过机器学习和人工智能技术,实现对系统运行状态的实时监测、能效综合评估及自适应调度调整,为节能控制策略的科学制定和实施提供强有力的理论支持和技术保障。

## 2.3 系统运行数据采集与状态感知

数据采集和状态感知构成矿用螺杆空压机系统智能能效管理的基础。通过在关键部位布置高精度压力传感器、流量计、温度传感器、电能计量设备、振动传感器等多种传感器,实现对空压机及其末端用气系统的全方位实时数据采集。数据平台依托工业互联网技术和边缘计算架构,具备对大规模、多源异构数据的预处理、特征提取和异常检测能力,保证数据的准确性、时效性和完整性。通过将历史运行数据

与实时监测数据融合分析,平台能够准确识别矿山用气负载模式,评估设备运行效率和负载适配状况,及时发现设备故障隐患或性能异常。借助机器学习与数据挖掘技术,系统能够预测设备运行趋势,辅助制定精准的节能调度策略和维护计划。此外,数据采集与状态感知为后续的能效优化算法和智能控制提供了可靠的数据基础和决策依据,推动矿用螺杆空压机系统向智能化、绿色化和高效化方向持续发展。

## 3 矿用螺杆空压机变工况能效优化技术路径

### 3.1 基于变频调速的动态负载匹配

变频调速是当前空压机能效优化的主流技术之一。变频空压机通过实时调节电机转速,实现排气量与用气需求的同步变化。针对矿山用气负载的周期性、突发性和间歇性特点,系统可根据压力、流量实时反馈信号动态调整转速,实现精准供气与能耗最小化。变频调速不仅降低了空载能耗和频繁启停对设备寿命的不利影响,还显著提升了系统的响应速度和用气质量。在工程应用中,需合理配置变频器容量、调速区间及压力设定点,避免因设定不当带来的响应滞后或频繁波动。通过动态优化控制逻辑,系统可自适应调整变频运行区间,兼顾设备能效与系统稳定性,确保在不同工况下始终保持高效运行状态。

### 3.2 智能群控与协同调度策略

对于大型矿山空压站,多台螺杆空压机并联运行已成常态。智能群控系统能够对多台设备的启停顺序、负载分配、备机切换等进行统一调度,防止多机同时空载、低效或过载运行。群控系统基于实时压力、流量与能耗数据,采用优化算法确定各台空压机的运行状态和负载分配比例,实现系统整体能效最大化。通过智能优化启停逻辑,群控系统可自动识别用气波动趋势,提前调整运行模式,减少无效能耗。协同调度还可根据用气设备优先级、设备运行寿命、维护周期等多维因素动态调整运行计划,提升系统可靠性与经济性。智能群控技术已成为矿用空压机节能控制的核心手段之一,是推进矿山动力系统数字化和智能化管理的重要支撑。

### 3.3 动态压力控制与负载预测优化

变工况运行下,系统压力设定对能效有直接影响。传统定压控制往往导致高压安全裕度过大,造成能量损失。通过实时压力动态优化,平台可根据实际用气需求与预测负载动态调整压力设定点,减少压力波动与能耗浪费。结合负载预测模型,可提前识别井下高峰用气时段、突发事件和阶段

性用气变化,系统提前优化运行参数和空压机组合,避免因响应滞后导致的用气短缺或能源浪费。采用大数据和人工智能技术建立矿山用气负载预测模型,可进一步提升动态压力控制的前瞻性和智能化水平,实现“以需定供”、“以用定调”的高效控制。

#### 4 节能控制策略的工程应用与效益分析

##### 4.1 系统集成与工程落地

矿用螺杆空压机系统的能效优化依托于先进的变频调速技术、智能群控策略以及动态负载预测模型,构建一个集成化的智能管控平台至关重要。该平台不仅涵盖数据采集和状态感知,还集成了模型计算、智能决策支持和远程监控功能,实现了对空压站运行全过程的自动化和智能化管理。系统能够与矿山的生产管理系统、能耗计量系统及安全监控平台实现数据互联和业务协同,形成信息共享和联动响应的智能生态。工程实施过程中,需结合矿井的具体工况,合理选择空压机容量和变频器型号,科学规划管路布局和传感器安装位置,确保节能方案既高效又安全可靠。通过系统集成与现场调试,形成稳定的运行机制,保障节能系统长期稳定运行,为矿山智能化升级奠定坚实基础。

##### 4.2 节能效果评估与经济分析

在多个典型矿山企业的实际应用中,基于变频调速与智能群控的节能控制系统展现出显著的节能效果。数据显示,变频调速有效降低了空载时的能耗,使系统整体能效提升了8%至15%。结合智能群控与动态压力优化后,气源系统的能耗进一步减少了5%至10%。此外,设备的故障率明显下降,维护成本得到了有效控制。经济分析表明,这种节能控制系统的投资回收期通常在1到2年之间,显著降低了矿山企业的年度用电成本。除了直接的经济效益外,系统的实施还提升了设备的利用率和运行稳定性,提高了生产安全水平,为矿山企业的绿色矿山和智能矿山建设目标提供了坚实保障。

##### 4.3 智能运维与可持续发展前景

节能控制系统不仅提升了矿用空压机的能效表现,还为空压站的智能运维和全生命周期管理提供了有力支持。平台

内置设备健康诊断、故障预测与远程维护功能,能够显著降低人工巡检成本和维护难度,提高应急响应速度和准确性。结合大数据分析 with 云端监控技术,企业能够实现空压站运行的全流程数字化和智能化管理,实时掌握设备运行状态,推动预防性维护和精准运维。未来,随着工业互联网、人工智能和新能源技术的深度融合,矿用空压站有望实现更高层次的能效自适应优化和碳排放管控,为推动能源革命和绿色矿山建设做出更大贡献,助力矿山行业迈向可持续发展新阶段。

#### 5 结论

本文针对矿用螺杆空压机变工况能效优化与节能控制的行业需求,系统分析了能效影响因素与系统建模方法,提出了基于变频调速、智能群控、动态负载预测的节能控制策略,搭建了综合能效评价与智能决策模型。通过工程应用验证,该策略能够大幅提升矿井压缩空气系统的综合能效,显著降低运行能耗和设备故障率,增强气源系统的自适应能力和运维智能化水平。研究为矿山企业构建高效、绿色、智能的动力系统提供了理论支持和技术方案。未来,建议进一步推动人工智能、大数据与工业互联网等技术在矿用螺杆空压机系统中的深度融合,发展多目标自适应能效优化与智能协同运维,实现全流程数字化、智能化管理,持续提升矿山企业能源管理和绿色生产能力。

#### 参考文献:

- [1] 张磊,王宁. 矿用螺杆空压机节能控制系统的应用[J]. 煤矿机械, 2023, 44(2): 95-98.
- [2] 李伟,马春雷. 基于变频调速的矿用空压机能效优化研究[J]. 采矿技术, 2022, 22(4): 73-78.
- [3] 赵峰,周志勇. 矿井压缩空气系统群控与节能优化方法[J]. 矿业装备, 2022, 43(1): 58-63.
- [4] 陈思,吴涛. 智能群控系统在矿用空压站节能中的应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 101-106.
- [5] 王浩,张嘉伟. 变工况下矿用螺杆空压机智能控制策略[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 184-190.