

空压机变频控制系统的设计与节能效益评估

吉鸿飞

中材建设有限公司 北京 100176

摘要: 空压机作为工业领域中广泛应用的动力设备,其能耗问题日益受到关注。传统工频运行方式存在“大马拉小车”、频繁启停、压力波动大等弊端,造成大量能源浪费。本文针对上述问题,提出一种基于变频调速技术的空压机控制系统设计方案。首先分析了空压机负载特性与能耗机理,阐述了变频控制的基本原理;其次,详细设计了系统的硬件架构(包括变频器选型、传感器配置、PLC控制器)与软件控制策略(恒压PID控制、多机联控逻辑、故障保护机制);最后,介绍了节能效益评估的理论计算方法。变频控制系统可实现节能,同时显著提升供气稳定性、延长设备寿命、降低维护成本。本研究为空压机系统的高效、智能化改造提供了可行的技术路径和实践参考。

关键词: 空压机;变频控制;节能;PID控制;系统设计;效益评估

引言

压缩空气是工业重要动力源,广泛应用于多领域。在工业企业总能耗中,空压机系统能耗占比达8%~15%,且20%~40%能源因系统设计不合理、运行管理粗放被浪费。传统空压机采用工频定速运行,靠加载/卸载或进气节流阀调节排气量,存在明显缺陷:卸载时空转耗能约20%~40%额定功率;压力波动大($\pm 0.2\text{MPa}$),影响设备运行,加剧机械磨损与电气冲击;进气节流阀调节时,低负载工况电机也满负荷运转,效率低。随着相关技术发展,变频调速技术凭借优异调速性能、高效率及良好动态响应,成为空压机节能改造核心手段,能精确匹配用气需求,稳定管网压力,降低能耗。

一、空压机负载特性与变频节能机理

(一) 空压机工作原理与负载特性

空压机按工作原理可分为容积式(如螺杆式、活塞式)和速度式(如离心式)。其中,螺杆式空压机因结构紧凑、运行平稳、维护简便,在工业中应用最为广泛。其基本工作原理是通过一对相互啮合的阴阳转子旋转,使气体在腔体内被压缩并排出。空压机的负载特性主要体现在为流量(Q)、压力(P)、功率(N)与转速(n)之间的关系。对于容积式空压机,其理论特性近似满足:

流量 $Q \propto n$

压力 $P \approx \text{常数}$ (由管网阻力决定)

轴功率 $N \propto Q \times P \propto n$

即在恒定排气压力下,流量与转速成正比,功率也

近似与转速成正比。这与离心风机/水泵的“立方定律”($N \propto n^3$)不同,但依然具备显著的节能潜力——当用气量减少时,若能同步降低转速,则功耗将线性下降。

(二) 变频调速节能机理

变频调速技术的核心在于通过改变供给电机的电源频率来调节其转速,进而控制空压机的排气量。在实际运行中,系统通过压力传感器实时监测储气罐或主管网的压力,并将其与预设的目标值进行比较,所得偏差信号送入控制器进行处理,最终输出频率指令驱动变频器调整电机转速。这种闭环控制方式实现了“按需供气”的理念,从根本上消除了传统加载/卸载模式下的空载损耗^[1]。由于变频运行时空压机始终处于加载状态,避免了卸载时空转所造成的无效能耗,同时启动过程平滑,启动电流仅为额定值的1.2~1.5倍,显著降低了对电网和机械系统的冲击。更重要的是,管网压力波动可被控制在 $\pm 0.01\text{MPa}$ 以内,极大提升了供气质量,有助于保障下游用气设备的工艺稳定性和产品一致性。综合来看,变频控制不仅带来直接的电能节约,还在设备寿命延长、维护成本降低和系统可靠性提升等方面产生多重效益。

二、空压机变频控制系统设计

(一) 系统总体架构

本文设计的变频控制系统采用“传感器—控制器—执行器”三层架构:(1)感知层:包括压力变送器(安装于储气罐出口)、温度传感器、电流/电压互感器等,用于采集系统运行参数。(2)控制层:以可编程逻辑控制器(PLC)为核心,集成PID运算、逻辑判断、通信接

口等功能。(3) 执行层：变频器接收PLC指令，驱动空压机电机；同时保留原工频旁路，确保故障时可切换至工频运行。系统支持单机控制与多机联控两种模式，适用于不同规模的空压站。

(二) 硬件设计

1. 变频器选型

本系统选用具备矢量控制功能的通用型变频器，其额定功率不低于空压机电机的铭牌功率，以确保在满负荷甚至短时过载工况下仍能可靠运行。考虑到空压机启动时需克服较大的静摩擦力矩，且在用气突增时可能出现瞬时负载冲击，所选变频器必须具备良好的低频转矩提升能力，以维持启动平稳性和动态响应性。同时，为便于与PLC实现高效数据交互，变频器需支持ModbusRTU或ModbusTCP等主流工业通信协议，既可通过模拟量（如0-10V或4-20mA）进行简单控制，也可通过数字通信实现参数读写、状态监控与故障诊断^[2]。在环境适应性方面，变频器的防护等级应不低于IP20，以满足一般工业现场的防尘与通风要求。综合性能、兼容性与成本因素，推荐选用ABBACS880、西门子G120或汇川MD500等成熟可靠的工业级产品。

2. 传感器配置

系统在储气罐出口处安装高精度压力变送器，其量程覆盖0~1.0MPa，测量精度达到±0.5%满量程（FS），输出标准4~20mA电流信号，既能满足常规螺杆空压机的工作压力范围，又能保证在微小压力波动下仍具有足够的分辨能力。排气温度监测则采用PT100铂电阻或K

型热电偶，安装于空压机排气口附近，用于实时跟踪压缩过程中的温升情况，防止因冷却失效或润滑不良导致的高温故障。此外，为支撑后续的节能效益量化分析，系统还集成了一套电参数采集模块，可同步记录电机的三相电压、电流、有功功率及累计用电量等数据，并通过通信接口上传至监控平台。这些传感器共同构成了系统的“神经末梢”，为闭环控制与能效管理提供了坚实的数据基础。

3. PLC控制器

PLC作为整个控制系统的“大脑”，其选型需兼顾功能完备性与经济实用性。本设计采用主流的小型PLC，如西门子S7-1200或三菱FX5U系列，这类控制器不仅体积紧凑、编程便捷，而且具备丰富的I/O资源和强大的内置功能。具体而言，PLC需配置至少两路模拟量输入通道，分别用于接入压力变送器和温度传感器的信号；一路模拟量输出通道用于向变频器发送频率设定值（通常为0-10V或4-20mA）；同时配备足够数量的数字量输入/输出点，以处理空压机启停命令、工频/变频切换信号、各类故障报警输入以及HMI交互指令^[3]。尤为重要的是，所选PLC应内置PID控制指令块，使工程师无需编写复杂算法即可快速实现恒压控制逻辑，大幅缩短开发周期并提高程序稳定性。此外，PLC还需支持以太网或RS485通信，便于与上位监控系统或能源管理平台对接，实现远程运维与数据分析。

(三) 软件控制策略

1. 恒压PID控制算法

系统采用闭环负反馈控制，控制框图1如下：

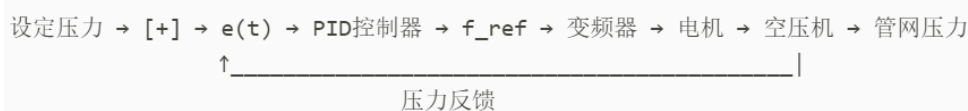


图1 闭环负反馈控制框图

PID控制律为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中， $e(t) = P_{set} - P_{actual}$ 为压力偏差。

参数整定采用Ziegler-Nichols临界比例法或试凑法，目标是在保证压力稳定的前提下，避免超调和振荡。实践中，常采用PI控制（ $K_d=0$ ）即可满足要求。

2. 多机联控策略

对于多台空压机组成的空压站，采用“主从+轮换”

策略：设定一台为主机（变频控制），其余为从机（工频或变频）；主机负责维持管网压力稳定；当主机频率持续高于45Hz（接近满负荷）超过设定时间，则启动一台从机；当主机频率持续低于30Hz（轻载）超过设定时间，则关闭一台从机；定期轮换主从角色，均衡设备运行时间。

3. 故障保护与安全机制

系统内置多重保护：过压/欠压保护；过流、过载保护；排气温度过高停机；通信中断自动切换至工频模式；紧急停止按钮。所有报警信息通过HMI（人机界面）显

示，并可上传至工厂能源管理系统（EMS）。

三、节能效益评估方法

为科学、客观地衡量空压机变频控制系统所带来的节能效果，本文采用“基准能耗与改造后能耗对比法”，即通过构建改造前（工频运行）与改造后（变频运行）两种工况下的能耗模型，并结合理论推导与现场实测数据进行交叉验证。

（一）理论节能率计算

理论节能率的计算基于对空压机在不同控制模式下能耗特性的建模分析。假设空压机的额定功率为 P_n （单位：kW），年运行时间为 T （单位：h），平均负载率为 η （ $0 < \eta \leq 1$ ），即实际所需排气量占额定排气量的比例。在传统工频加载/卸载控制模式下，当用气需求低于额定值时，空压机虽停止产气但仍处于空转状态，此时电机仍消耗一部分电能^[4]。工程实践中通常将卸载阶段的功耗系数 k 取为0.3，即卸载时消耗约30%的额定功率。据此，工频模式下的年耗电量可表示为：

$$E_{old} = P_n \cdot T \cdot [\eta + (1 - \eta) \cdot k]$$

而在变频控制模式下，电机转速随负载动态调节，系统始终处于加载状态，无卸载损耗。此时，空压机的输入功率近似与负载率成正比，同时需考虑变频器自身的能量转换效率 η_{inv} （通常取0.96）。因此，变频模式下的年耗电量为：

$$E_{new} = P_n \cdot T \cdot \eta \cdot \eta_{inv}$$

由此可得理论节能率：

$$\Delta E\% = \frac{E_{old} - E_{new}}{E_{old}} \times 100\%$$

以典型工况为例，若空压机年均负载率 $\eta=0.7$ ，代入上述公式可得理论节能率约为32%。这一结果表明，在中等负载波动场景下，变频控制具备显著的节能潜力。值得注意的是，该模型虽做了适当简化（如忽略管网泄漏、环境温度影响等），但其核心逻辑符合工程实际，可作为初步评估的重要参考。

（二）实测数据分析

尽管理论计算提供了节能潜力的上限估计，但实际节能效果受设备状态、用气规律、控制策略及环境条件等多重因素影响，必须通过现场实测加以验证。为此，在系统改造前后，分别在空压机主供电回路安装高精度智能电表，连续采集至少7天的用电数据，确保覆盖

典型生产周期（包括工作日与周末、高峰与低谷时段）。数据采集期间应尽量保持生产工艺与用气负荷不变，以排除外部干扰。随后，对原始数据进行清洗，剔除因停机检修、异常断电或非正常生产导致的离群值，最终计算改造前后的平均日耗电量 E_{before} 与 E_{after} 。实测节能率按如下公式计算：

$$\text{实测节能率} = \frac{E_{before} - E_{after}}{E_{before}} \times 100\%$$

该方法直接反映系统在真实工业环境中的运行表现，不仅可用于验证理论模型的准确性，还可为后续的能效对标、碳排放核算及能源审计提供权威数据支撑。在实际应用中，建议将实测周期延长至一个月以上，以进一步提高评估结果的统计显著性与代表性。

结语

本文围绕空压机变频控制系统的设计与节能效益展开深入研究。通过分析空压机的负载特性与变频节能机理，构建了以PLC为核心、变频器为执行机构、多传感器为反馈的闭环控制系统，并提出了恒压PID控制、多机智能联控及多重安全保护等软件策略。展望未来，空压机变频控制技术仍有广阔发展空间。一方面，可引入模糊控制、自适应PID或基于机器学习的智能算法，实现控制参数的在线优化与自整定，进一步提升系统鲁棒性与能效水平；另一方面，应加强与工厂能源管理系统（EMS）或工业互联网平台的深度融合，实现空压站的远程监控、能效分析与预测性维护，推动从“节能”向“智慧能源管理”的跃升。在国家“双碳”战略背景下，此类高效、智能的压缩空气系统必将在绿色制造体系中扮演更加关键的角色。

参考文献

- [1] 王成龙. 空压机变频调速控制系统的设计[J]. 机械管理开发, 2020, 35(04): 217-219.
- [2] 姚立强. 基于变频控制技术的空压机集中控制系统应用[J]. 当代化工研究, 2019, (08): 131-132.
- [3] 叶仕生, 曾强, 陈康成, 等. 空压机控制系统变频改造技术分析[J]. 科技资讯, 2022, 20(18): 53-56.
- [4] 田伟平. 空压机电气控制系统的变频改造及效果分析[J]. 机械管理开发, 2020, 35(11): 231-232+285.