

天然气长输管道压气站运行优化探讨

李艳文 李欣同 (陕西省天然气股份有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 在天然气远距离输送过程中, 天然气长输管道压气站作为枢纽中心, 其运行稳定关系到管道输送能力、运营成本及能源利用水平。为提升天然气长输管道压气站运行能力, 确保天然气长输系统稳定高效运行, 本文研究分析了压气站运行系统组成, 并且在探讨压气站运行优化的必要性基础上, 针对天然气长输管道压气站运行优化方案展开研究, 以期能够提升压气站运行效率、降低能耗, 助力天然气长输管道行业实现绿色低碳发展。

关键词: 天然气长输管道; 压气站; 运行优化; 调度策略; 节能节电

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 034-0088-03

Discussion on operation optimization of compressor station in long distance natural gas pipeline

Liyanwen, lixintong (Shaanxi Natural Gas Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: in the process of long-distance natural gas transmission, as the hub center, the stable operation of the compressor station of the long-distance natural gas pipeline is related to the pipeline transmission capacity, operation cost and energy utilization level. In order to improve the operation capacity of the compressor station of the natural gas long-distance pipeline and ensure the stable and efficient operation of the natural gas long-distance transmission system, this paper studies and analyzes the composition of the compressor station operation system, and on the basis of discussing the necessity of the compressor station operation optimization, studies the optimization scheme of the compressor station operation of the natural gas long-distance pipeline, in order to improve the operation efficiency of the compressor station, reduce energy consumption, and help the natural gas long-distance pipeline industry achieve green and low-carbon development.

Key words: natural gas long-distance pipeline; Compressor station; Operation optimization; Scheduling strategy; Energy saving

在全国能源结构转型中, 天然气作为清洁高效的化石能源, 它在社会的地位非常重要。截至 2025 年上半年, 我国天然气长输管道总里程已经远超 18 万 km, 形成了“西气东输、北气南下、海气登陆”的输送网络状态。陕西省已建成天然气长输管道总里程达到近 4500km, 实现全省绝大部分地区双向供给, 关中地区环网运行。长输管道系统中压气站属于系统的“驱动力”, 压气站通过压缩机组对天然气进行加压, 能够克服管道沿程阻力, 达到天然气的远距离输送目标。随着“双碳”目标的推进及天然气市场需求的快速增长, 这对压气站运行的经济性、高效性提出更高要求。因此, 深入研究天然气长输管道压气站运行优化方案, 通过攻克调度优化与节能降耗技术难题, 能确保天然气长输管道压气站运行安全、稳定。

1 压气站运行系统组成

天然气长输管道压气站主要由压缩机组系统、燃料气系统、冷却系统、电气系统及控制系统等组成。压缩机组系统是压气站的重点动力装置, 目前我公司已投运压气站的压缩机机型包括燃气轮机驱动离心式压缩机组、燃气轮机驱动往复压缩机组、电机驱

动往复式压缩机组, 其中燃气轮机驱动机组占比约 94%, 具有适应负荷波动能力强的优势; 电机驱动机组占比约 6%, 运行稳定性高且噪音污染小。燃料气系统为燃气轮机提供燃料, 通常采用管道输送的天然气作为燃料, 需经过过滤、调压、计量等处理后送入机组燃烧室。冷却系统分为空气冷却与水冷却两种形式, 用于冷却压缩后的高温天然气及机组设备, 确保设备在安全温度范围内运行。电气系统为压气站所有用电设备提供电源, 包括压缩机组电机、冷却风机、水泵、控制系统等, 是压气站节能优化的重点对象。控制系统采用 SCADA 系统、自控仪表等实现对压气站运行参数的实时监测与远程控制^[1]。

2 压气站运行优化的必要性

从经济性角度看, 运行优化可显著降低运营成本。按我国长输管道年输气量 1.2 万亿 m³ 计算, 压气站单位输气能耗每降低 1%, 可减少能耗成本约 8 亿元。某中型压气站通过调度优化与节能改造后, 年减少燃料气消耗 200 万 m³, 节电 65 万 kWh, 年节约运营成本超 300 万元。从环保角度看, 优化运行能有效降低碳排放。天然气长输管道行业碳排放中, 压气站占比

达 90%，通过节能技术应用，每降低 1t 标准煤能耗，可减少碳排放 2.6t。在“双碳”目标背景下，压气站运行优化是实现行业绿色低碳发展的关键路径。

从安全性角度看，优化调度可提升管道运行稳定性。通过动态调整压气站机组运行负荷，能有效避免管道超压、欠压等风险，降低管道泄漏、破损等事故发生率。我公司靖西三线管道通过多站协同调度优化，管道压力波动幅度明显降低，事故隐患排查次数减少 30%。此外，随着天然气市场化改革推进，下游用户对供气可靠性要求不断提高，运行优化可提升压气站对负荷波动的响应能力，保障供气稳定性，增强市场竞争力。

3 天然气长输管道压气站调度优化策略

压气站调度优化的重点目标是实现“负荷精准匹配、多站协同联动、应急快速响应”，通过构建“预测→调度→监控”一体化体系，提升调度效率与科学性。

3.1 基于负荷预测的动态调度优化

负荷预测是动态调度的前提，需结合历史数据、市场需求及环境因素，构建多维度预测模型，为调度决策提供数据支撑。首先，建立负荷预测数据库，整合近 5 年下游用户用气数据，包括日负荷曲线、周负荷波动规律、季节负荷峰值等，同时纳入气温、节假日、工业生产计划等影响因素。例如，冬季气温每降低 1℃，居民用气负荷增加 3%~5%；节假日工业用气负荷降低 20%~30%，需在预测模型中量化这些影响因素。针对不同类型压缩机组特性，优化运行参数匹配。对于电动机驱动机组，采用变频调速技术，根据负荷变化调整转速，负荷率低于 50% 时采用单机组运行，高于 80% 时启动备用机组并联运行^[2]。对于燃气轮机驱动机组，在负荷率 70%~90% 时运行效率最高，需将负荷控制在该区间。靖西三线张村驿压气站通过该动态调度策略，压缩机组平均运行效率从 72% 提升至 85%，单位输气能耗降低 15%~20%。

3.2 多站协同调度优化

多站协同调度旨在通过统筹沿线各压气站运行状态，实现管道压力分布最优，提升整体输送效率。构建“中心~站级”二级调度体系，调度中心负责统筹沿线所有压气站，各压气站负责执行具体调度指令。采用管道水力计算模型，实时模拟不同调度方案下的管道压力、流量分布，优化各站负荷分配。例如，当靖西二线靖边至延安管段出现压力偏高时，调度中心可指令上游靖边压气站降低负荷，下游延安压气站提升负荷，快速平衡管道压力。同时，可建立多站负荷分配优化模型，以“总能耗最低、压力稳定”为目标函数，约束条件包括机组最大功率、管道压比限值、

输气排量要求等。采用遗传算法求解模型，输出各压气站最优负荷分配方案。靖西一二线、北联络线和姚河线，4 条天然气长输管道沿线 6 座压气站应用该模型后，整体输气能耗降低 12%，管道压力波动幅度明显降低。同时，各压气站将负荷、压力、流量、温度、能耗等运行参数实时上传至 SCADA 系统，调度中心动态监控并调整优化调度方案，实现“数据互通、精准调度、科学指挥、协同联动”^[3]。

3.3 分级应急调度优化

针对设备故障、气源波动、管道泄漏等突发事件，制定分级应急调度预案，提升应急响应能力。根据突发事件影响范围与严重程度，将应急等级分为三级：一级（局部影响），单站设备故障，采用站内备用机组切换方案，切换时间控制在 30min 以内；二级（区域影响），多站负荷波动或局部管道故障，启动区域内压气站负荷调整，通过上下游协同平衡压力；三级（全局影响），气源中断或主干管道故障，启动跨区域调峰预案，调用其他气源点补充供气，同时调整沿线所有压气站负荷。此外，可建立应急调度快速响应机制，在 SCADA 系统中预设应急调度模板，当监测到压力骤降、流量突变、压差激增等异常参数时，自动触发应急预案提示，调度人员可根据提示快速定位并执行操作。

4 天然气长输管道压气站节能节电技术路径

节能节电是压气站运行优化的重点内容，需从压缩机组、余热利用、电气系统三个方向入手，采用“设备优化、能源回收、系统升级”相结合的技术方案，最大限度降低能耗。

4.1 压缩机组运行节能优化

压缩机组作为能耗重点，它的节能优化需从设备改造、参数调整、维护保养三方面开展。

加强设备技术改造，提升机组运行效能。一是对于老旧机组加大大修频次，全面更换老旧配件，加强人员技术创新加大创新技术改造力度，提升机组运行稳定性的同时，降低机组能耗。二是实施压气机叶片清洗与修复，去除叶片积垢、磨损，恢复绝热效率。张村驿压气站对 2 台燃气轮机压缩机进行高压水清洗后，机组效率从 75% 提升至 81%，单位输气燃料消耗降低 6%。三是选择高效密封方式，采用干气密封技术替代传统梳齿密封，减少气体泄漏量，泄漏率从 3% 降至 0.5% 以下。四是加装变频调速装置，对于电动机驱动机组，采用高压变频技术，根据负荷变化调整转速，负荷率 50% 时可节电 30% 以上^[4]。

优化机组运行参数，实现工况精准匹配。一是通过试验绘制机组运行特性曲线，确定不同负荷下的最

优转速、导叶开度及燃料供给量,结合转速、压比等数据可以确定工作点在压缩机性能曲线图中的具体位置,从而判断压缩机距离喘振边界的距离,以及压缩机是否在高效区工作。二是避免节流损失,取消或优化进站节流阀,通过机组转速调节替代节流降压,减少压力能浪费;当进气压力偏低时,优先调整上游气源,而非强行提高机组压比。三是采用自动控制系统实时调整参数,确保机组始终运行在最优工况。四是推行机组集群优化运行,根据机组效率差异,优化运行工艺,优先启动高效机组,低效机组作为备用,实现“高效机组满负荷、低效机组少运行”的运行模式。2024年冬运期间陕西天然气干线机组通过该策略,机组集群运行效能充分发挥,能耗同比降低7.7%。

建立精细化维护保养体系,延长机组高效运行周期。制定基于运行小时数与状态监测的维护计划。例如,靖边站往复式压缩机组每周检查全部螺栓、螺母,检查主轴承和连杆轴承的间隙,活塞杆的跳动;每运行4000h必须更换机体润滑油,每运行8000h更换填料和刮油环组件,每运行25000h进行全面大修,更换冷却系统冷却液。此外,采用振动监测、油液分析等状态监测技术,提前发现机组故障隐患,避免非计划停机。

4.2 余热利用节能技术应用

燃气轮机排气蕴含大量余热,回收利用潜力巨大,可通过余热锅炉、余热发电、预热燃料气等方式实现能源梯级利用。对于大型压气站(输气能力 ≥ 1000 万 m^3/d),推荐采用“余热发电+供暖”综合利用方案:燃气轮机排气进入余热锅炉产生蒸汽,推动蒸汽轮机发电,发电功率可达燃气轮机功率的20%~30%,发电用于压气站自用,剩余电力并入电网^[5];冬季利用余热锅炉产生的热水为站内供暖,替代电采暖。对于中小型压气站(输气能力 < 1000 万 m^3/d),采用“余热预热燃料气+加热锅炉补水”方案:通过余热换热器加热燃气轮机燃料气,将燃料气温度从环境温度提升至80~100℃,提高燃料燃烧效率,降低燃料消耗;同时利用余热加热锅炉补水,减少锅炉蒸汽消耗。某华北中小型压气站应用该方案后,燃料消耗降低8%,年节约天然气12万 m^3 ^[6]。此外,对于采用空气冷却系统的压气站,可利用余热驱动吸收式制冷机,为压缩机组润滑油冷却系统提供冷源,降低冷却风机能耗,实现“余热制冷~节能冷却”的循环利用。

4.3 电气系统节电优化技术

电气系统节电优化需覆盖辅助设备、照明系统、功率因数补偿等方向,采用“变频改造、节能替换、智能调控”的综合方案。辅助设备变频改造是节电重点,针对冷却风机、循环水泵等变负荷设备,加装高

压变频调速装置,根据运行负荷自动调整转速。某压气站对4台冷却风机进行变频改造后,风机平均转速从1450r/min降至900r/min,年节电52万kWh,节电率达45%。对于润滑油泵等恒负荷设备,采用高效电机替代传统电机,高效电机效率达95%以上,较传统电机提升5%~8%,某西北压气站更换10台高效电机后,年节电18万kWh。

照明系统节能改造采用LED节能灯具替代传统高压钠灯,LED灯具光效达100lm/W以上,较高压钠灯提升60%,寿命延长5倍以上。同时安装智能照明控制系统,根据室内外光照强度、人员presence自动开关灯具,无人区域自动关闭或调暗。另外,优化功率因数补偿系统,采用“固定补偿+动态补偿”相结合的方式:针对变压器、电机等固定感性负载,配置固定电容补偿装置;针对负荷波动较大的设备,配置SVG动态无功补偿装置,将功率因数从0.83提升至0.95以上^[6]。此外,推广分布式光伏供电系统,在压气站屋顶、空地安装光伏组件,利用太阳能发电为站内照明、监控等低压负荷供电。同时,可建立电气系统智能监控平台,实时监测各设备能耗数据,识别高能耗设备并发出节能预警,为节电优化提供数据支撑。

5 结语

天然气长输管道压气站运行过程中,为增强压气站运行效率与稳定性,研究从负荷预测的动态调度优化以及多站协同调度优化等方面,探讨了天然气长输管道压气站运行策略,这对实现压气站运行稳定有促进作用。而在未来研究中,为进一步强化压气站运行能力,还需要积极引入智能化在线信息技术实现压气站运行参数的调节,同时可借助AI智能化模块实现调度优化与节能节电目标,从而提升天然气长输管道压气站运行效果。

参考文献:

- [1] 邵军,姜希彤,秦伟,等.长输天然气管道压气站运行分析[J].油气田地面工程,2020,39(08):38-42.
- [2] 张双蕾,明亮,李巧,等.天然气长输管道压气站最大操作压力研究[J].天然气与石油,2021,39(02):1-5.
- [3] 张志.天然气长输管道的节能降耗[J].化学工程与装备,2022(11):125-127.
- [4] 刘恩斌,彭勇,喻斌,等.天然气长输管道低碳优化运行模型[J].油气与新能源,2024,36(02):31-40.
- [5] 于洋,李彦革,丰晓红,等.天然气长输管道站场无人值守发展现状研究[J].石油化工自动化,2024,60(06):6-9.
- [6] 豆锐,韩军涛.工业生产中电气节能技术的研究[J].电工技术,2020(12):130-132.