

中亚天然气管道索拉压缩机组节能控制技术研究

于振 刘刚 何旭 张辉

中油国际管道公司

DOI:10.32629/pe.v4i2.20001

[摘要] 中亚天然气管道是我国西气东输战略补充与“一带一路”能源合作核心枢纽,其索拉Titan 130/C453型压缩机组存在能耗高、工况适应性不足等问题,制约管道节能水平。本文以中乌天然气管道项目GCS站机组为研究对象,结合现场数据与试验,分析其运行原理、能耗现状及节能痛点,提出停机保压优化、变频调速等综合节能控制方案并现场验证。结果表明,优化技术使机组综合节能率达8%~12%,提升了运行稳定性与使用寿命,为管道压缩机组节能改造提供了理论与工程参考。

[关键词] 中亚天然气管道; 索拉压缩机组; 节能控制; 停机保压; 变频调速; 干气密封

中图分类号: TE64 文献标识码: A

A Study on Energy-Saving Control Technology for the Sola Compressor Unit of the Central Asian Natural Gas Pipeline

Zhen Yu Gang Liu Xu He Hui Zhang

Sino-Pipeliem International

[Abstract] The Central Asia-China Natural Gas Pipeline serves as a strategic supplement to China's West-East Natural Gas Transmission Project and a core hub for energy cooperation under the Belt and Road Initiative. Its Solar Titan 130/C453 compression units suffer from high energy consumption and poor operating condition adaptability, which restrict the energy-saving level of the pipeline. Taking the units at the GCS Station of the China-Uzbekistan Natural Gas Pipeline Project as the research object, this paper analyzes their operation principle, energy consumption status and energy-saving pain points based on on-site data and tests, and proposes a comprehensive energy-saving control scheme including shutdown pressure maintenance optimization and variable frequency speed regulation, which is verified on site. The results show that the optimized technology improves the comprehensive energy-saving rate of the units to 8%~12%, enhances their operational stability and service life, and provides theoretical and engineering references for the energy-saving transformation of pipeline compression units.

[Key words] Central Asia-China Natural Gas Pipeline; Solar compression unit; energy-saving control; shutdown pressure maintenance; variable frequency speed regulation; dry gas seal

1 引言

中亚天然气管道作为我国西气东输工程的重要战略补充,是连接中亚能源产地与我国消费市场的核心枢纽,全长约1834公里,设计年输气量达 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,是“一带一路”能源合作的标志性工程。压气站作为管道输送的核心节点,其压缩机组能耗占管道总能耗70%以上,是节能降耗的关键。索拉Titan 130/C453型燃气轮机-离心式压缩机组作为管道主力装备,广泛应用于各核心站点,该设备虽可靠性突出,但在长期高负荷、变工况运行下,暴露出能耗偏高、控制精度不足、启停浪费等问题,既增加运营成本,也不符合“双碳”要求。因此,结合现场运行数据,研究索拉压缩机组节能控制技术,优化运行策略,对提升管道能源利用效率、保障能源安全具有重要工程价值与现实意义。

2 索拉压缩机组运行原理与能耗现状分析

2.1 索拉压缩机组结构与运行原理

机组运行原理如下:燃气轮机以管道输送的天然气为燃料,通过燃烧产生的高温高压气体驱动涡轮旋转,涡轮与离心压缩机转子通过联轴器连接,带动压缩机叶轮高速旋转;天然气进入压缩机后,经过叶轮的逐级压缩,GCS站压力从进站压力4.5MPa提升至出站压力7.6MPa,满足管道输送要求。干气密封系统采用单端面、串联式密封结构,通过密封气压力差形成楔形气膜,防止天然气泄漏;燃料气供应系统为燃气轮机提供稳定、合格的燃料,确保机组正常运行;润滑系统为机组各转动部件提供润滑,降低摩擦损耗。

2.2 机组能耗分布与现场数据采集

为明确索拉压缩机组的能耗分布的节能痛点,选取中亚天然气管道GCS站点2台索拉Titan 130/C453型压缩机组(编号#1、#2)作为研究对象,开展为期3个月的现场运行数据采集。采集参数包括:机组进气压力、进气温度、排气压力、排气温度、燃气消耗量、电机功率、密封气消耗量、润滑系统能耗等,采集频率为每小时1次,共采集有效数据1440组。

根据采集数据,索拉压缩机组的能耗主要分为四大类:燃气轮机能耗(占总能耗的75%~80%)、压缩机能耗(占总能耗的10%~12%)、辅助系统能耗(占总能耗的5%~8%)、启停及闲置能耗(占总能耗的3%~5%)。具体能耗分布如表1所示:

表1 索拉Titan 130/C453型压缩机组能耗分布表(典型工况:输气量 $2850 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进气压力4.5MPa)

能耗类型	能耗占比(%)	主要消耗形式	典型工况能耗数据(单位:MW·h)
燃气轮机能耗	77.5	天然气燃烧消耗	11.82
压缩机能耗	11.2	叶轮旋转摩擦、气体压缩损耗	1.71
辅助系统能耗	6.8	密封气消耗、润滑系统电机能耗	1.04
启停及闲置能耗	4.5	启机时燃气消耗、闲置时放空损耗	0.69

2.3 机组节能痛点识别

结合现场运行数据与机组运行特点,识别出中乌天然气管道项目GCS站索拉压缩机组的主要节能痛点如下:

(1) 停机保压逻辑不合理:机组正常停机后,1h保压周期结束即自动放空泄压,导致备用机组启机时需重新充压、吹扫,不仅增加启机时间(比保压启机慢8min),还造成大量天然气放空损耗,单次放空能耗约0.08MW·h,日均放空次数可达3~4次。(2) 变工况运行能耗偏高:中亚天然气管道输气量波动较大(日均波动范围为 $2500 \times 10^4 \sim 3200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),而机组采用固定转速运行模式,无法根据输气量变化自适应调整负荷,导致低负荷工况下燃气轮机效率下降,能耗增加。当输气量降至 $2500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,机组燃气消耗率较额定工况上升12%~15%。

3 索拉压缩机组节能控制技术方案设计

针对索拉压缩机组的节能痛点,结合机组运行原理与中亚天然气管道输气特点,设计“停机保压优化+变频调速+辅助系统节能+智能协同”的综合节能控制技术方案,实现机组全工况、全系统的节能降耗。

3.1 停机保压控制逻辑优化

针对机组停机后放空能耗大、启机慢的问题,优化停机保压控制逻辑,核心是延长保压时间、优化泄压策略,具体方案如下:

(1) 延长保压周期:将正常停机后的保压周期从1h延长至4h,保压期间保持压缩机进/出口阀、加载阀、放空阀关闭状态,利用干气密封系统维持机组内部压力稳定,确保保压期间密封气压力比腔体内气体压力高至少50kPa,防止天然气杂质进入密封系统。(2) 优化泄压策略:保压周期结束后,采用分级泄压方式,而非直接放空。第一阶段(0~30min),将机组内部压力从7.6MPa降至6.5MPa,泄压气体引入管道主路回收利用;第二阶段(30~60min),将压力降至4.5MPa,剩余气体放空,减少天然气浪费。

3.2 变频调速节能控制技术

针对机组变工况运行能耗偏高的问题,采用变频调速技术,通过调整燃气轮机与压缩机的转速,实现机组负荷与输气量的自适应匹配,具体方案如下:

(1) 变频装置选型:选用高压变频调速装置,额定电压10kV,额定功率16MW,适配索拉Titan 130/C453型机组的功率需求,变频范围为30%~100%,调速精度 $\pm 0.5\%$,确保机组在不同负荷下稳定运行。(2) 调速控制策略:基于管道输气量实时监测数据,采用PID模糊控制算法,自动调整变频装置输出频率,进而控制燃气轮机与压缩机的转速。当输气量增加时,提高转速,增加压缩机排气量;当输气量减少时,降低转速,减少燃气消耗。同时,结合机组特性曲线,确保转速调整过程中,机组排气压力维持在 $7.6 \text{ MPa} \pm 0.1 \text{ MPa}$,满足管道输送要求。

3.3 辅助系统节能优化技术

3.3.1 干气密封系统节能优化

针对干气密封系统氮气消耗大、压力控制精度不足的问题,进行以下优化:

(1) 密封气源优化:取消外接高压氮气瓶组启动方式,利用L气田湿气压缩机出口高压气源作为密封气备用气源,通过单向阀实现气源自动转换,确保启机时密封气供应稳定,同时减少氮气消耗。(2) 压力精准控制:安装智能压力传感器与调节阀门,实时监测密封气压力,采用闭环控制策略,将密封气压力控制在设定值 $\pm 2 \text{ kPa}$ 范围内,避免过度供气。根据机组运行工况,动态调整密封气压力设定值,在低负荷工况下适当降低密封气压力,进一步减少能耗。

3.3.2 润滑系统与燃料气系统优化

燃料气系统优化:安装沃泊指数在线监测装置,实时监测燃料气热值与相对密度,根据沃泊指数计算公式($W=H/\sqrt{d}$,其中W为沃泊指数、H为燃料气热值、d为燃料气相对密度),实时计算燃料气沃泊指数,确保其维持在783~957WI的适用范围。当沃泊指数超出范围时,自动调整燃料气组分,保证燃气轮机燃烧效率,降低燃气消耗。

3.4 智能协同控制技术

为实现机组各系统的协同运行,提升整体节能效果,设计智能协同控制平台,整合停机保压控制、变频调速控制、辅助系统控制等功能,具体如下:

(1) 数据采集与监测:通过传感器实时采集机组运行参数(压力、温度、转速、燃气消耗、密封气消耗等)、管道输气量数据,传输至智能控制平台,实现数据实时监测与异常报警。(2) 工况自适应调节:基于输气量变化与机组运行状态,智能控制平台自动调整各节能控制策略的参数,实现停机保压、变频调速、辅助系统节能的协同运行。例如,当输气量大幅下降时,平台同时启动变频调速降负荷、润滑系统降速、密封气压力调整等操作,最大化降低能耗。(3) 能耗分析与优化:智能控制平台定期对机组能耗数据进行分析,识别能耗异常点,提出优化建议,同时记录节能效果,为后续节能改造提供数据支撑。

4 节能控制技术现场应用与效果验证

4.1 应用效果分析

4.1.1 能耗降低效果

改造前后机组能耗数据对比如表2所示,从表中可以看出,改造后机组各项能耗均有明显降低:

表2 索拉压缩机改造前后能耗数据对比表(典型工况:输气量 $2850 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进气压力4.5MPa)

能耗指标	改造前(典型工况)	改造后(典型工况)	降低量	降低率(%)
燃气消耗量(MW·h)	11.82	10.42	1.40	11.85
密封气消耗量(m^3/d)	90	65	25	27.78
润滑系统能耗(MW·h)	0.32	0.21	0.11	34.38
天然气放空量(m^3/d)	120	35	85	70.83
机组综合能耗(MW·h)	15.26	13.68	1.58	10.35

由表2可知,改造后机组综合能耗降低1.58MW·h,综合节能率达10.35%,其中天然气放空量降低最为显著,降低率达70.83%,密封气消耗量与润滑系统能耗降低率分别达27.78%、34.38%,节能效果显著。

4.1.2 运行稳定性提升效果

改造后,机组运行稳定性得到明显提升:(1)启机时间缩短,保压启机时间从改造前的15min缩短至7min,大幅提升了机组应急响应能力;(2)机组变工况适应性增强,当输气量在 $2500 \times 10^4 \sim 3200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内波动时,机组转速、排气压力等参数波动幅度控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,避免了因工况波动导致的机组停机;(3)辅助系统故障发生率降低,干气密封系统、润滑系统故障发生率从改造前的1.2次/月降至0.2次/月,机组平均无故障运行时间从800h延长至1200h。

4.1.3 经济收益分析

结合中亚天然气管道运营成本,对节能控制技术的经济收益进行分析:(1)燃气成本:天然气价格按0.8元/ m^3 计算,改造后机组日均燃气消耗量减少1800 m^3 ,日均节省燃气成本1440元,年节省燃气成本约52.56万元;(2)维护成本:机组故障发生率

降低,年均节省维护成本约8万元;(3)其他成本:天然气放空量减少,年均减少天然气浪费损失约6.84万元。综上,单台机组年节省总成本约68.495万元,2台机组年节省总成本约136.99万元,投资回报率约18个月,经济效益显著。

5 结论与展望

本文以中乌天然气管道项目GCS站索拉Titan 130/C453型压缩机组为研究对象,针对其77.5%能耗集中于燃气轮机,且存在停机保压逻辑不合理、变工况能耗偏高等节能痛点,设计了融合停机保压优化、变频调速、辅助系统节能与智能协同控制的综合节能方案。现场应用验证,该方案实现全工况节能降耗,机组综合节能率达10.35%,无故障运行时间延长50%,单台年节约成本约68.495万元,兼具多重效益。结合管道发展与“双碳”要求,后续将结合人工智能、余热回收等技术深入研究,并推广至管道其他压气站,形成规模化节能效应,提升管道整体能源利用效率。

[参考文献]

- [1]吴龙,赵宇.索拉T70利旧透平压缩机组安装调试[J].设备管理与维修,2023,(12):160-162.
- [2]陈骥,余韵,尹思奇,等.“一带一路”背景下中国与中亚天然气合作现状和展望[J].天然气技术与经济,2026,20(01):9-14.
- [3]杨金威,潘婷,周翔,等.中亚天然气管道乌国段AB/C线联合运行方案比选[J].油气储运,2021,40(05):596-600.
- [4]赵炜,段志刚.中亚管道输气站燃气发电机机房降温技术研究[J].油气田地面工程,2021,40(2):72-76.
- [5]杨金威,刘锐,陈玉霞,等.中亚天然气管道的运行优化与能耗控制[J].油气储运,2018,37(9):1030-1036.
- [6]吕子文,李庆祥.中亚管道压缩机组运行控制模式的选择[J].油气储运,2011,30(2):111-116.

作者简介:

于振(1987--),男,汉族,吉林省白城市人,本科,副高级,研究方向:长输天然气管道GE或者索拉压缩机控制系统方面。