

石油储罐主动安全防护系统 节能降耗路径研究

汪怡心*, 马孝亮, 杨志军, 郭一帆, 张晓惠, 李爽

(中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司油气运销事业部, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:系统分析了石油储罐主动安全防护系统各运行环节的能耗现状与节能潜力,提出了针对性的优化策略。具体包括:空压机“变频+余热回收”技术、制氮工艺优化策略、基于峰谷电价的氮气储罐储能优化策略、运行管理优化策略。通过实际案例分析验证了方案在降低能耗、优化运行成本方面的经济性和可行性,为石油储罐主动安全防护系统的优化运行、节能降耗提供一定的参考。

关键词:主动安全防护系统;变频改造;余热回收;峰谷电价;优化运行;节能降耗

中图分类号:X74

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0464-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.080

Research on energy conservation and consumption reduction pathways for active safety protection system of petroleum storage tank

WANG Yi-xin*, MA Xiao-liang, YANG Zhi-jun, GUO Yi-fan, ZHANG Xiao-hui, LI Shuang

(Oil and Gas Transportation and Marketing Department, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract:This account analyzes systematically the current energy consumption status and energy saving potential of each operation link in the active safety protection system of petroleum tanks, and proposes targeted optimization strategies. Specifically, it includes air compressor “frequency conversion + spent-heat recovery” technology, nitrogen production process optimization strategy, nitrogen storage tank energy storage optimization strategy based on peak and valley electricity prices, and operation management optimization strategy. Through actual case analysis, the economic and feasibility of the solution in reducing energy consumption and optimizing operation cost are verified, providing a certain reference for the optimized operation, energy conservation and consumption reduction of the active safety protection system of petroleum storage tanks.

Key words: active safety protection system; frequency conversion transformation; spent-heat recovery; peak and valley electricity price; optimized operation; energy conservation and consumption reduction

主动安全防护系统通过对石油储罐一、二次密封环形空间的油气浓度、氧气浓度进行实时监测,并在浓度超标或雷电预警时提前注入氮气。借助注氮惰化技术将油气浓度和氧浓度控制在安全阈值内,主动消除潜在危险源,从而有效降低储罐因雷击、静电或火灾引发的爆炸风险^[1-3]。该系统将传统的“事后灭火抢险”模式转变为“事前主动预防”,显著提升了储罐的本质安全水平^[4-5]。目前,该系统已在吉林、辽河、中原、胜利、长庆、克拉玛依、塔里木等多个国内油田得到广泛应用。

但是,在系统运行过程中,能耗问题逐渐凸显。其中,制氮环节、气体分析检测以及注氮惰化过程中的高能耗设备是主要能耗来源;输配环节中泄漏和调控失准会导致氮气浪费;此外,管理单位的过度防护和粗放式运行管理也会增加氮气消耗,进一步加剧能源浪费、增加运营成本。在“双碳”目标的推动

下,如何在保障储罐安全性的前提下,降低主动安全防护系统的能耗,已成为亟待解决的重要课题。李尚国^[6]、张嘉麟等^[7]通过数值模拟和现场实测相结合的方法优化了煤矿采空区注氮管的埋深和流量,减少了氮气用量并提高防护效果。曹景轩^[8]对煤矿采空区的多种注氮方式进行了模拟,发现多点注氮方式相比单点注氮能够取得更佳的情化效果,提高氮气利用率。王玉军等^[9]从制氮系统的角度分析了不同吸附剂和不同吸附压力、吸附时间、解吸时间对制氮效率和能耗的影响,确定了最佳工艺条件。目前,国内对石油储罐主动安全防护系统的能耗优化研究情况较少,而国外的研究更关注通过智能化控制系统实现注氮操作的自动化和精准化来降低系统能耗^[10]。

上述研究仅针对主动安全防护系统单个环节进行了优化分析,缺乏从系统运行角度的综合考量,对

收稿日期:2025-03-05;修回日期:2025-07-28

作者简介:汪怡心(1996-),女,硕士,工程师,从事完整性管理工作,通讯联系人,15645021526@163.com。

已建系统的参考价值有限。此外,这些研究也未阐述各环节的具体能耗情况,难以全面指导主动安全防护系统在实际应用中的运行优化工作。本文中从制氮系统、输配和运行管理3个方面提出节能策略,为已建系统提供实用的优化方案。

1 空压机“变频+余热回收”技术

主动防护系统主要有制氮系统、分析小屋组成。分析小屋主要对储罐一二次环形空间的混合气体进行采样分析,并对检测结果进行判定是否需要注氮。制氮系统主要由空压机(螺杆式)、冷干机、2台PSA吸附筒、空气缓冲罐、氮气缓冲罐、过滤器组成。空压机将外界空气压缩至设定压力后,依次经过冷干机进行除湿、空气缓冲罐稳压以及过滤器去除杂质,随后输送至PSA变压吸附塔。2台PSA吸附塔交替运行,利用吸附剂的选择性吸附特性,吸附空气中的氧气,从而分离出高纯度氮气,并将其送往氮气缓冲罐。经检测,当氮气纯度大于99%,则输送至原油罐区用于对环形空间的混合气体进行惰化;对纯度未达标的氮气进行排放处理^[11-12]。工作原理如图1所示。

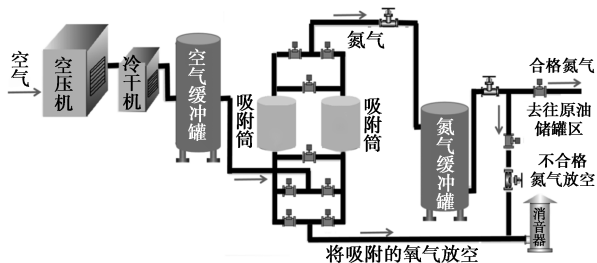


图1 制氮系统工作原理示意图

空压机作为制氮系统的核心设备之一,是系统主要的能耗来源。本文中根据空压机的能耗特性和余热潜力,提出对空压机进行变频改造及余热回收利用,实现制氮系统的节能降耗。

1.1 变频改造技术

传统空压机通常采用工频“加载、卸载”方式运行,压力达到设定值时自动卸载,此时电机空转,进气阀关闭,压缩机停止进气,但电机仍保持额定转速运行,导致大量电能浪费^[13]。当系统压力下降到设定的下限值时,空压机重新加载运行。频繁启停不仅造成了电能的大量浪费,增加设备机械磨损,缩短设备寿命,还会影响防护系统可靠性。通过给空压机(螺杆式)安装变频器,改变电机的供电频率和电压,调节电机转速,实现空压机的无级调速,使排气量与用气量精准匹配,显著降低能耗,在用气量较低

时,变频器降低电机转速,减少空压机的能耗,提高了空压机的整体运行效率^[14-15]。此外变频改造还能提高系统的压力控制精度,减少压力波动,降低对电机的启动冲击,延长设备的使用寿命,减少设备的维护成本和停机时间,提升了系统的可靠性和经济性。变频器工作原理如图2所示。

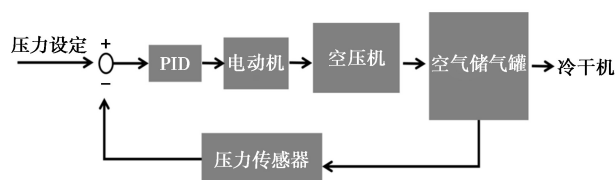


图2 变频器工作原理示意图

通过调节变频器输出频率,可以精确控制电机转速,电机转速与供电频率呈正比,计算公式如下:

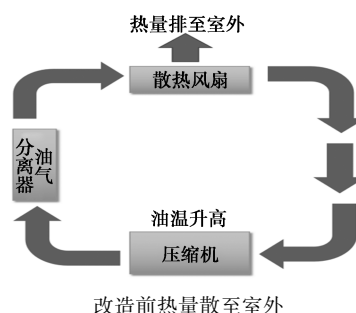
$$n = (1 - s)(60f/p)$$

式中, n 为电机转速; s 为转差率,0~6%; f 为供电频率; p 为电机极对数。

根据某原油站场主动安全防护系统中螺杆式空压机为例,电机额定电压为380 V,点击空载电流为118 A,电机功率因数为0.86,电机功率330 kW,全年运行8 000 h,卸载时间占比30%,通过变频改造后减少卸载损耗,全年可节约用电16万kWh,电费按0.8元/kWh计算,全年可节约12.8万元。

1.2 余热回收技术

空压机在运行时,80%~90%的电能转化为热能^[16],润滑油和压缩空气温度升高可达80~100℃,当润滑油达到较高的温度时会使得空压机的效率变低,一般直接将热量通过加风扇冷却的方式排放到环境中,导致能源浪费^[17]。安装热交换器,通过余热回收技术,回收空压机高温油路和压缩空气中的这部分热量,用来替代传统安装电伴热和热油汀设备的保温方式,用于主动防护系统的制氮装置和分析小屋房屋的采暖和管道的保温,同时节省部分电费;减少设备维护成本和停运时间,降低设备和管道的冻堵风险。具体改造方案如图3所示。



改造前热量散至室外

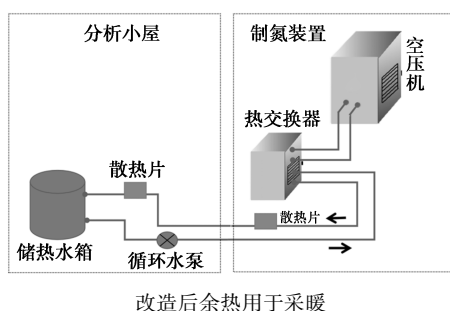


图 3 空压机余热回收技术改造方案

根据某原油站场主动安全防护系统的实际情况,系统冬季依赖配套电伴热和 2 台热油汀进行保温,需连续 6 个月不间断运行。管线及设备所需电伴热保温约 100 m,功率 45 W/m,热油汀功率 3 kW,全年可节约 4.5 万 kWh,电费按 0.8 元/kWh 计算,全年可节约 3.6 万元。

2 制氮工艺优化策略

变压吸附(PSA)是制氮系统的核心工艺,以碳分子筛为吸附剂,利用加压吸附,降压解吸的原理从空气中吸附和释放氧气,从而分离出氮气的自动化设备,通过优化吸附塔的运行参数和工艺流程,可以提高氮气产量和纯度,减少压缩空气耗损率^[18-19]。

选择某原油站场主动安全防护系统的 PSA 变压吸附塔进行测试,发现影响 PSA 吸附效果的主要参数有吸附时间、脱附时间、吸附压力。其中吸附时间是影响氮气产量和纯度的关键参数,过长的吸附时间可能导致吸附剂饱和,降低氮气纯度;而过短的吸附时间则无法充分利用吸附剂的吸附能力,影响氮气产量,测试发现此规格型号下的 PSA 变压吸附塔的最佳吸附时间在 45~50 s。脱附时间决定了吸附剂的再生效果,脱附时间为 30~45 s 时吸附效率最佳。通过调节空压机的输出压力进行测试,吸附压力会直接影响吸附剂的吸附效率,较高的吸附压力可以提高氮气的纯度和产率,但同时也会增加空压机的负荷,当空压机卸载压力设置为 0.8 MPa 为相对合适的工况。将吸附压力从 1.0 MPa 调整至 0.8 MPa。经过一段时间的运行,氮气纯度可以保持在 99% 以上,氮气流量也未受影响,但空压机的运行成本可减少约 25%。

3 运行维护与管理优化措施

3.1 合理设定系统工作模式

根据《GB/T 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准》将石油储罐一、二次密封环

形空间的油气浓度和氧气浓度的安全判定标准分为 3 个等级。根据报警等级,主动安全防护系统设置了工作模式供用户选择^[20],自动防护模式:对个各采样点进行采样分析并进行危险判定,并在判定等级为三级情况下对储油罐进行注氮惰化保护。紧急防护:对个各采样点依次循环采样并进行危险判定,并在判定等级为二级及以上情况下对储油罐进行注氮惰化保护。自动检测:系统循环或仅对选定管道采样并进行危险级别判定,不进行注氮。安全判定等级见表 1。

表 1 主动主动防护系统安全判定等级

氧气体积 分数/%	油气浓度/ LEL	安全判定	
≤8	不限	安全	
不限	≤10	安全	
>8	10~25	一级预警	
>8	25~50	二级预警	紧急模式
>8	>50	三级预警(危险)	自动防护模式

在石油储罐主动安全防护系统的实际运行中,部分单位对系统的运行管理存在诸多不合理之处。例如,注氮惰化系统的报警级别设置过低,甚至在二级预警或一级预警阶段便开始注氮,导致过度防护,增加了氮气的消耗量,造成了资源浪费。其次是缺乏对储罐密封状态的评估,在系统运行过程中,管理单位未能结合环形空间采集的数据对储罐的一次密封和二次密封状态进行针对性分析,而是对所有储罐采用统一的运行频次,甚至 24 h 不间断地运行实时监测环形空间状态,缺乏差异化管理,这种过度防护不仅增加了设备的运行负荷,还可能引发系统疲劳故障。

管理单位应结合站场实际运行情况,参考储罐一、二次密封环形空间的油气浓度和氧气浓度检测结果,对一、二次密封的可靠性进行评估。在日常运行中,建议仅启用自动防护模式,即仅在三级预警(判定存在危险时)启动注氮惰化操作。如遇雷雨天气或夏季高温天气,应将工作模式切换至紧急模式(判定为二级预警),以加强特殊环境条件下的防护措施。此外,管理单位还可探索雷电预警系统、红外泄露监测系统先进智能技术与主动防护系统的联动。通过这些技术,系统能够在雷电预警时自动启动注氮操作,进一步提升系统的智能化水平。根据《Q/SY 08837 浮顶油罐二次密封安全检测规范》的要求,石油储罐一、二次密封的检测频次为每月 1

次,则氮气主动防护系统无需持续监测,用户可根据实际需求自定义系统在不同工作模式下的运行频次,减少氮气的浪费,降低运行成本,确保系统的高效运行和可靠性。

3.2 基于峰谷电价的氮气存储策略

当系统不再24 h连续运行时,可根据原油站场储罐环形空间混合气体惰化所需实际的氮气量,配备相应容积的氮气储罐,将制氮系统制备的合格氮气存入氮气储罐中。制氮装置与氮气储罐内的氮气压力进行联动控制,当氮气储罐内的压力小于设定值时,制氮机能自行启动制氮,当氮气储罐内的压力达到设定值时,制氮机在规定时间内停止制氮,确保氮气在储存和使用过程中的安全性,同时提高主动安全防护系统的可靠性。利用低谷电价政策,在低谷电时段运行制氮设备并储存氮气,可以有效降低系统用电成本,减少因氮气消耗导致的空压机频繁启停,降低能耗损失,提高能源利用效率和设备运行稳定性。

根据某原油站场主动安全防护系统为例,该站场共有5座储罐(3座10 000 m³、2座50 000 m³),根据储罐一、二次密封环形空间的油气浓度和氧气浓度检测结果判定储罐的密封性能较好,设定系统工作模式为自动防护系统,频率为1次/d,一次运行1 h。根据现场的氮气实际消耗量配备一台70 m³的氮气储罐。在电价低谷时段启动制氮系统,进行氮气存储,氮气储罐压力与制氮系统联动(启动值0.4 MPa,停机值0.8 MPa),一月需运行4次,每次运行3 h。当地峰谷电价差值约0.4元/kWh,通过系统优化,每月可节约电费约0.8万元。

4 结论

系统地分析了石油储罐主动安全防护系统从制氮系统、输配及运行管理各环节的能耗现状,并提出了针对性的节能优化策略,并通过实际案例分析验证了方案的可行性。建议运行管理单位在日常操作中,对主动安全防护系统的能耗情况进行持续跟踪与分析,优化设备运行参数,充分挖掘节能潜力。同时,应结合现场实际情况,合理调整设备运行频次,

避免过度防护,确保在保障原油储运安全的前提下,实现能源的高效利用。

参考文献

- [1] 张伟.大型石油储罐主动安全防护技术的应用探析[J].山西化工,2024,44(3):197-198,228.
- [2] 汪映标,吴明军,李伟.大型石油储罐火灾防护技术[J].消防科学与技术,2015,34(2):215-218.
- [3] 李罗,张宗勤,张潇.大型石油储罐火灾的防护[J].现代职业安全,2015,(6):22-23.
- [4] 王志斌,闫志怡,吴大刚,等.大型浮顶储罐雷击火灾预防技术现状及改进探讨[J].石油化工自动化,2023,59(1):40-43.
- [5] 李彦慧.大型石油储罐主动安全防护系统应用与评价[J].石油和化工设备,2016,19(3):69-71.
- [6] 李尚国.低瓦斯自燃采空区注氮工艺优化研究[J].中国矿业,2024,33(6):158-166.
- [7] 张嘉麟,董子文.基于COMSOL动态模型的采空区连续注氮模拟研究[J].矿业安全与环保,2019,46(2):15-19,24.
- [8] 曹景轩.基于Fluent软件的采空区注氮方式优化研究[J].山东煤炭科技,2021,39(3):101-102,106.
- [9] 王玉军,肖立,叶国兵,等.变压吸附制氮系统设计及对比分析[J].广东化工,2024,51(16):110-112.
- [10] Bery R. Analisis proteksi kebakaran pada perusahaan produksi gas dan pembangkit listrik[J].The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health,2018,7(2):142.
- [11] 贾海海,何毅,张玉玺,等.大型油罐主动安全防护系统设计及应用[J].油气储运,2017,36(10):1206-1211.
- [12] 吴明军,王泽强,冯仕君,等.大型石油储罐主动防护系统氮气溢出分析与测试[J].石油与天然气化工,2018,47(3):108-114.
- [13] 陈鹏.螺杆式空压机能耗影响因素及节能措施分析[J].矿业装备,2023,(7):178-179.
- [14] 宋丽娟.空气压缩机变频改造的技术研究[J].中国氯碱,2016,(2):46-47.
- [15] 刘晨光.空压机变频改造节能技术的运用探究[J].中国设备工程,2023,(1):222-224.
- [16] 周亮,贾冠伟,郭泽宇,等.空压机余热回收利用技术[J].液压与气动,2023,47(1):22-31.
- [17] 何晓峰.有油螺杆空压机余热回收的换热器选型技术研究[J].中国机械,2024,(20):22-25.
- [18] 翟宇恺,李轶,王燕,等.碳分子筛变压吸附空气分离活性及表征[J].应用化工,2008,(11):1338-1341.
- [19] 王颖丹.制氮工艺流程的优化及效果评测[J].山西化工,2023,43(8):95-97.
- [20] 周静.大型油罐主动安全防护系统设计分析[J].化工管理,2019,(16):136-137.■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号82—67。