

长输管道离心式压缩机组国产化控制系统可靠性提升策略

刘银德 (国家管网西部管道新疆输油气分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 长输管道作为国家能源输送的核心枢纽, 离心式压缩机组是保障天然气平稳输送的关键设备, 其控制系统的可靠性直接关系到能源供应安全与国民经济稳定。基于此, 本文结合实际工程案例, 系统剖析现有控制系统存在的问题, 提出国产化控制系统可靠性提升的具体策略, 为行业内类似工程提供借鉴, 为长输管道行业国产化控制系统的推广应用与可靠性保障提供技术参考。

关键词: 长输管道; 离心式压缩机组; 国产化控制系统; 可靠性; 提升策略

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0124-03

Reliability Improvement Strategies for Localized Control Systems of Centrifugal Compressor Units in Long-Distance Pipelines

Liu Yinde (National Pipeline Network Western Pipeline Xinjiang Oil and Gas Transmission Branch, Urumqi Xinjiang 830011, China)

Abstract: As a critical hub for national energy transmission, long-distance pipelines rely on centrifugal compressor units to ensure the stable transportation of natural gas. The reliability of their control systems directly impacts energy supply security and the stability of the national economy. Based on this, this paper systematically analyzes the issues in existing control systems by drawing on practical engineering cases and proposes specific strategies to enhance the reliability of localized control systems. It aims to provide reference for similar projects in the industry and offer technical insights for the promotion, application, and reliability assurance of localized control systems in the long-distance pipeline sector.

Keywords: long-distance pipelines; centrifugal compressor units; localized control systems; reliability; improvement strategies

长输管道承担着天然气等清洁能源跨区域输送的战略任务, 是我国能源保障体系的重要组成部分。离心式压缩机组作为长输管道的“心脏”设备, 负责维持管道内天然气的压力稳定, 其运行状态直接决定了管道输送效率与安全水平。控制系统作为压缩机组的“大脑”, 承担着机组运行参数监测、逻辑控制、安全保护等核心功能, 其可靠性是机组连续稳定运行的前提。随着我国长输管道建设的快速发展, 早期投用的压缩机组控制系统已逐步进入服役中后期。

1 长输管道离心式压缩机组控制系统现状分析

1.1 现有控制系统配置与运行概况

我国早期长输管道离心式压缩机组控制系统多采用进口设备, 核心技术与硬件依赖国外厂商。以西气东输二线为例, 不同压气站的控制系统配置呈现差异化特征, 但均已进入高服役年限阶段:

①连木沁压气站二期工程。2010年投产, 配置3台GE燃驱压缩机组, 控制系统采用GE公司Mark VIe系列PLC作为基本过程控制系统, 设置MLT8000远程I/O机架, 安全仪表系统和火气系统采用HIMA F35系列PLC。

②烟墩压气站二期工程。配置3台RR燃驱压缩机组, 机组控制系统均采用罗克韦尔公司的AB ControlLogix控制器, 扩展机架采用1794系列远程I/O机

架。2022-2024年间因控制系统故障导致停机4次。截至2025年5月, 两种控制系统已连续运行15年, 随着运行年限增加, 其固有缺陷与环境影响逐步显现, 已难以满足当前长输管道安全平稳运行的需求^[1]。

1.2 国产化控制系统应用现状

近年来, 我国在工业自动化控制系统领域的自主研发能力持续提升, 国产化控制系统逐步打破国外垄断, 具备了替代进口产品的技术条件。西部管道公司作为行业先行者, 开展了一系列国产化控制系统的研发与应用实践:

①国产化产品认证与技术成熟度。MS1000系列国产化压缩机组控制系统已取得CE、SIL等国际权威认证, 符合工业控制领域的安全与兼容性标准, 具备市场推广应用条件。该系列产品针对长输管道压缩机组的运行特性, 优化了硬件结构与软件算法, 适配不同机型的控制需求。

②工业性实验与工程应用。2024年, 西部管道公司在乌苏压气站RR机组开展了国产化控制系统硬件与软件升级的工业性实验, 通过了西部管道公司各项验收, 运行效果达到预期。在此基础上, 公司逐步扩大推广范围, 先后在乌苏压气站2和3RR燃驱机组、西一线鄯善压气站GE燃驱机组、西三线乌鲁木齐压气站国产沈鼓电驱机组开展国产化应用替代工作, 为

后续大规模推广积累了宝贵经验^[2]。

2 现有控制系统可靠性问题深度剖析

2.1 硬件老化与停产, 备件保障能力不足

①核心模块老化失效。长输管道压气站多处于复杂环境中, 压缩机厂房现场温度较高, 加速了远程 I/O 系统、控制器等硬件的老化。连木沁压气站的 MLT8000 远程 I/O 机架、MARK VIe 主控制模块, 烟墩压气站的润滑油调节阀、GS3 控制器、燃气发生器振动信号前置转换器等核心部件, 经过 15 年运行, 均出现不同程度的老化问题, 如调节阀偏差变大、电子元件性能衰减等。

②关键设备停产断供。由于技术迭代与市场调整, 早期进口控制系统的核心模块已逐步停产, 机组运行风险持续增加。

③备件储备与采购困境。进口备件采购周期长(通常为 6-8 个月)、成本高, 且部分备件已无库存, 无法满足应急维修需求。

2.2 通信可靠性下降, 系统协同能力不足

①通信链路老化不稳定。现有控制系统采用的通信协议与链路经过长期运行, 出现了线路损耗、接口松动、协议兼容性下降等问题, 导致控制器与远程 I/O、现场仪表之间的通信中断或延迟, 数据传输准确性降低。近三年来, 机组多次出现因通信不稳定导致的机组误报警、控制指令执行延迟等问题, 故障率呈逐年上升趋势。

②系统冗余设计失效。部分控制系统的冗余设计已无法满足当前安全要求, 烟墩压气站通过模块升级、配置优化仍无法解决冗余失效导致的机组故障停机问题, 说明现有冗余架构已难以适应老化后的硬件状态, 系统容错能力显著下降。

③跨系统协同兼容性差。早期进口控制系统与后期新增设备、其他系统(如站场监控系统、应急联动系统)的兼容性不足, 数据交互存在壁垒, 无法实现全系统的协同控制与统一调度, 影响了站场管理效率。

2.3 控制逻辑与仪表配置缺陷, 运行稳定性不足

①控制逻辑设计落后。现有控制系统的控制逻辑与当前最新的压缩机组控制策略相比存在明显缺陷。高压补偿孔板压力未实现在线监测、机组启机点火逻辑可靠性较低等问题; 燃料调节阀 SAVC 控制器稳定性差、报错故障率高, 这些逻辑缺陷导致机组运行灵活性不足、备用率较低, 无法适应管道输送负荷的动态调整需求。

②现场仪表配置不合理。部分现场仪表的安装位置、测量范围与实际运行需求不匹配, 如排烟烟道可燃气体探测器故障高发, 既与设备老化有关, 也存在

仪表选型与安装环境不适应的问题, 导致安全监测存在盲区, 无法及时发现潜在风险。

2.4 运维环境恶劣, 管理效率低下

①现场运维条件受限。压缩机厂房温度高、空间狭小, 给远程 I/O 系统等硬件的巡检、维护带来极大不便, 运维人员需在高温环境下作业, 不仅工作效率低, 还存在安全隐患。同时, 恶劣环境也加速了运维工具与设备的损耗, 进一步增加了运维成本。

②运维工作量与难度剧增。随着硬件老化与故障频发, 运维工作量逐年增加, 连木沁压气站、烟墩压气站的控制系统运维时间较投产初期增加了 3 倍以上, 且故障排查难度加大, 需要依赖专业技术人员与专用工具, 导致运维响应速度较慢。

③运维数据支撑不足。现有控制系统缺乏完善的故障诊断与数据分析功能, 无法实现对硬件状态、运行参数的趋势分析与预测性维护, 运维工作多为“事后维修”, 难以提前规避故障风险^[4]。

3 国产化控制系统可靠性提升策略

3.1 国产化硬件替代与升级, 筑牢硬件基础

3.1.1 优选成熟可靠的国产化产品

优先选取通过 CE、SIL 等权威认证的国产化控制系统产品, 扩大选型范围, 可重点考量 MS1000 系列 PLC 及远程 I/O 模块、康吉森 Tricon 系列安全控制系统、和利时 HOLLiAS 系列过程控制系统三类主流产品, 并结合长输管道压缩机组的安全等级与运行需求做差异化选型。三类产品核心特性对比如下:

认证与核心定位: MS1000 系列产品涵盖了 SIL2-SIL3 的安全级别, 以传统控制和远程数据采集为主要目标, 适用于中、低压级别的压缩机机组控制场合; 康吉森 Tricon 系列是国内自主研发的安全仪器(SIS)中的基准产品, 其重点在于高安全性的单元连锁保护和应急停机控制; 该系列产品已获得 SIL2 认证, 适用于生产工艺控制要求的国内压缩机组。

机型适配与接口兼容性: MS1000 系列与 GE、RR 等进口产品的接口匹配性能稳定, 采用标准化的接口设计, 大大减少了调试的时间; 康吉森 Tricon 系列与高档进口压缩机具有更好的兼容性, 特别是与 GE 重型燃气轮机和 RR 型离心式压缩机的安全互锁界面非常匹配, 可以直接取代某些引进的安全控制系统; 赫利士的 HOLLiAS 系列更适合国内的陕鼓、申鼓等厂家的压缩机, 可以减少不同品牌之间的适配费用。

通信协议支持: MS1000 系列支持 TCP/IP、MODBUS 等主流开放式协议, 满足常规的机组数据交互需求; 康吉森 Tricon 系列兼容 PROFIBUS、基金会现场总线(FF)等工业总线协议, 可无缝接入机组的分布

式控制系统 (DCS)；和利时 HOLLiAS 系列支持 OPC UA 协议，便于与上位机管理系统实现数据互通。

3.1.2 优化硬件结构设计

针对压气站现场高温振动等苛刻条件，选择具有耐高温、耐振动、高防护水平的国产硬件，例如：采用工业级宽温远程 I/O 组件，在 -25°C ~ 70°C 的工作温度区间，以适应压缩机厂房的使用环境需求。在此基础上，通过对硬件结构进行优化，使核心控制器和容易受到外界干扰的遥控 I/O 组件分开放置，并将其安装在恒温、防尘的控制室中（如图 1 所示）。



图 1: 工业级宽温远程 I/O 模块

3.2 控制逻辑优化与软件升级，提升控制性能

3.2.1 重构核心控制逻辑

针对长距离输气管线机组的实际工作要求，对国产机组的控制逻辑进行了优化。为了解决连木清压气站的高压补偿孔板压力不能在线监控的问题，在系统中加入了压力在线监控模块和数据采集逻辑，可以对压力的变化进行实时反馈，从而实现对操作参数的自动调节。

3.2.2 升级软件功能模块

采用模型预测控制等先进控制算法，对机组进行动态优化，减少能源消耗。新增故障诊断和预测维修模块，通过对设备运行状态进行实时分析，对设备老化、性能衰退等问题进行预警，达到由“事后维修”到“预测性维修”的过渡；将机组运行状态、故障信息和控制参数等信息集成在一起，提高了操作的方便性^[5]。

3.3 完善运维体系，提升运维管理水平

3.3.1 改善现场运维环境

对压缩机车间进行了有针对性的改造，采用了通风冷却装置，使车间内的温度低于 40°C ；优化设备的安装布置，保证足够的运行和维护空间；通过增加防尘、防潮、防震等措施，减少外部环境对设备的冲击。

3.3.2 构建智能化运维平台

建立完善的变电站 - 变电站运行维护管理平台，

将各个单元的运行数据、故障信息和维修记录等信息进行集成，达到了对维护工作进行数字化管理的目的。利用该平台进行远程监测和远程诊断，使操作人员可以在控制室内对设备进行实时监测，并对一些常见的故障进行远程排除，降低了现场维护的负担。

3.4 强化安全与冗余设计，提升系统容错能力

3.4.1 完善安全仪表系统 (SIS)

根据 SIL2 及以上的安全水平，对国产控制系统中的安全仪器进行设计，针对气体泄漏、超压、超温等关键的安全隐患，分别建立了各自的安全保护逻辑和冗余探测信道，以保证在主系统发生故障的情况下，该系统可以可靠地动作，从而达到机组应急停机和危险隔离的目的。

3.4.2 优化冗余配置方案

核心控制器采用热备份方式，通信链路通过光纤和 Ethernet 双链路作为备用，电源采用 UPS 备用。这样，即使某一条设备或单条链路出现了故障，也可以在不影响整个单元的运行情况下，自动进行切换。针对烟墩站已有的冗余故障现象，在推动国产替代时，特别加强了冗余逻辑的测试验证，保证了系统的稳定可靠。

4 结论

长输管道离心式压缩机组控制系统的可靠性直接关系到国家能源输送安全，推进国产化控制系统替代与可靠性提升是解决现有系统老化、备件短缺、效率低下等问题的有效途径，也是实现能源技术自主可控的战略选择。本文结合西气东输二线连木沁压气站、烟墩压气站等实际案例，深入剖析了现有控制系统存在的硬件、通信、控制逻辑、运维等方面的问题，提出了“硬件替代升级、软件逻辑优化、运维体系完善、安全冗余强化、全生命周期管理”的国产化控制系统可靠性提升策略。

参考文献：

- [1] 李彪, 王程成, 雷永生, 等. 长输天然气管道离心式压缩机异常停机原因分析及对策 [J]. 中国设备工程, 2025, (S2): 108-110.
- [2] 袁镇华, 茅大钧, 李玉珍. 基于注意力机制与 XBOA-Bi-LSTM 的离心式压缩机故障预警方法 [J]. 机电工程, 2024, 41(03): 400-408.
- [3] 蒲斌, 王朝阳, 王龙, 等. 离心式压缩机的喘振特征及喘振检测思路 [J]. 天然气与石油, 2022, 40(05): 17-25.
- [4] 柏奕呈. 长输气管道离心式压缩机防喘振 PSO 优化控制研究 [D]. 西安石油大学, 2022.
- [5] 何东海, 曹勇, 杜俊. 长输管道设计中的节能技术应用 [J]. 化工管理, 2022, (11): 46-48.