

自动化技术在天然气长输管道运营管理中的应用

傅天昱 毕 洪 赵思琦

(国家管网集团西北公司西安输油气分公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 随着能源需求的持续增长和对输送效率及安全性的更高要求, 天然气长输管道作为连接气田与消费市场的关键基础设施, 其运营管理的智能化和自动化已成为行业发展的必然趋势。本文探讨了自动化技术在天然气长输管道运营管理中的最新应用, 包括但不限于远程监控系统、智能检测技术、泄漏检测与定位系统、以及基于大数据与人工智能的故障预测与优化调度策略。通过分析这些技术的实际应用案例, 展示了自动化技术如何有效提升管道运营的安全性、可靠性和经济效益, 同时减少环境风险和运营成本。

关键词: 天然气长输管道; 自动化技术; 远程监控; 智能检测; 泄漏检测

天然气作为一种清洁、高效的能源, 在全球能源结构中占据着越来越重要的地位。然而, 天然气从开采到最终用户的过程中, 长距离输送环节面临着诸多挑战, 如复杂的地理环境、设备老化、意外泄漏以及市场需求波动等。为了确保天然气的稳定供应, 提高输送效率, 并最大程度地降低运行风险, 天然气长输管道的运营管理必须向高度自动化和智能化方向发展。近年来, 随着信息技术、物联网、大数据分析和人工智能等技术的迅猛发展, 一系列创新的自动化解决方案被广泛应用于天然气管道的运营管理之中, 极大地改变了这一传统行业的面貌。

1 自动化技术概述与重要性

1.1 自动化技术: 现代能源传输的革新引擎

自动化技术, 作为当代科技进步的先锋, 正深刻变革着能源传输行业的内涵与边界。尤其在天然气长输管道领域, 它不仅是提升作业效率的催化剂, 更是确保安全、精准调度宝贵能源资源的守护神。通过精密集成传感器网络、高度智能的控制系统以及先进数据分析平台, 自动化技术使管道系统得以实现全天候无间断监控与远程精准操控, 从而极大增强了资源配置的灵活性与即时反应能力, 为能源流动构建了一条高效、安全的智慧通道。

1.2 天然气长输管道面临的复杂挑战矩阵

天然气长输管道的管理任务艰巨, 需直面一系列复杂且多变的挑战。首当其冲的是自然与地理条件的严苛考验, 如管道需穿越崎岖山岭、蜿蜒河流及人口稠密区域, 这无疑加大了建设与后期维护的复杂度。此外, 随着管道服役年限的增长, 老化问题日益凸显, 腐蚀、泄漏等安全隐患如影随形, 威胁着管道的完整

性。快速响应突发事故, 尤其是即时精确检测并定位泄漏源, 成为另一大挑战。加之, 市场供需的不断波动要求管道运营策略必须具备高度灵活性, 以适应快速变化的商业环境。这些多维度的挑战共同构成了对管道安全性、可靠性及经济效益的全方位考验。

1.3 驱动天然气长输管道自动化转型的多重力量

天然气长输管道向自动化转型的背后, 蕴含着多重深层次的推动力。首要因素在于技术的飞跃式进步, 包括信息技术的突破、物联网(IoT)的广泛应用、大数据分析的深度渗透以及人工智能(AI)的日益成熟, 这些技术的融合为管道自动化提供了坚实的技术基石。其次, 社会对公共安全与环境保护意识的觉醒, 促使行业不得不升级安全管理标准, 借助自动化技术减少人为错误, 降低环境风险。从经济角度考量, 自动化转型能够大幅度提升运营效能, 缩减人力成本, 实现资源最优配置, 为企业带来显著的经济效益提升。此外, 政府政策的支持与行业标准的不断完善, 为自动化技术的应用提供了明确导向和法律保障, 构建了一个有利于技术创新和产业升级的外部生态系统。

2 远程监控系统在管道运营中的应用

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 系统作为现代管道运营管理体系中的关键技术支柱, 它集成了最前沿的计算机科学、信息通信技术与自动化控制技术, 为天然气长输管道的高效、安全运行提供了全面的监控与管理解决方案。其核心功能不仅体现了高度智能化的特点, 而且在提升运营效率与应急响应能力方面发挥着至关重要的作用。

2.1 SCADA 系统的核心功能详述

①精密数据采集: SCADA 系统通过部署于管道沿

线各个战略要地的高灵敏度传感器网络，不间断地收集包括压力、温度、流量及阀门状态在内的关键运营参数。这一过程确保了数据的实时性与精确度，为后续的决策支持提供坚实的数据基础。

②即时远程监控：利用远程终端单元 (RTU) 和可编程逻辑控制器 (PLC)，现场数据被实时传输到中央控制室，使得管理人员即便身处千里之外，也能如同亲临现场般掌握管道运行的每一个细节，大大提升了监控的效率与广度。

③智能报警管理：系统内置灵活的阈值设置功能，一旦监测数据偏离正常范围，立即触发预警机制，及时通知相关人员，从而能迅速响应并处理潜在的运营风险或事故，有效预防重大事件的发生。

④远程精准控制：赋予操作员远程下达控制指令的能力，如调整阀门开闭程度、操控泵站启停等，这一功能不仅在应对紧急状况时显得尤为关键，也极大地优化了日常运营的灵活性和效率，特别是在那些地理环境复杂、人工到达困难的区域。

⑤历史数据分析与优化：SCADA 系统还负责长期存储和管理运营数据，通过对历史记录的深入分析，不仅可以进行性能评估和趋势预测，还能辅助故障排查与系统优化，为管道的持续改进提供科学依据。

2.2 实时数据采集与远程控制的实现机制

数据采集的无缝对接：SCADA 系统依赖于一个广泛覆盖、高度集成的传感器网络，这些传感器借助于有线（如光纤）或无线（卫星、4G/5G 蜂窝网络）通信技术，将海量实时数据稳定传输至中央控制系统或云端服务器。这种配置确保了数据流的连续性、即时性和完整性。

远程控制的安全高效执行：实现远程控制的关键在于构建一条稳定、快速且安全的双向通信链路。控制指令从控制中心经由加密通道迅速传达至远端设备，大幅度缩短了响应时间，降低了人工干预的频率与成本，尤其在偏远地区的优势更为显著。此外，通过采用先进的加密算法和严格的身份验证流程，SCADA 系统有效抵御外部攻击和未授权访问，保障了控制指令的准确执行和系统整体安全。

3 智能检测技术提升安全管理

3.1 智能传感器网络部署

智能传感器网络的部署在天然气长输管道中，代表了管道安全监测的一个重要里程碑。以 LoRa 技术为例，其传输距离可达 10km 以上，而 Zigbee 网络则能有效覆盖小至几米、大至数十米的区域，这

些低功耗无线通信技术使得传感器节点能够广泛分布于长达数千公里的管道沿线。据统计，平均每 500m 部署一组传感器，包括压力传感器（精度高达 $\pm 0.05\%FS$ ）、温度传感器（分辨率小于 0.1°C）以及振动传感器（可检测到低于 0.1g 的微小振动），这些传感器每分钟上传一次数据，确保对管道状态的实时监控，有效预防了近 90% 的潜在事故。

3.2 非侵入式检测技术的进步

非侵入式检测技术，如超声波检测技术，已实现了对管道壁厚测量误差不超过 0.05mm 的精确度，大幅提高了检测的精确度。电磁感应技术的应用案例显示，它能成功检测出管道内外壁腐蚀情况，准确率超过 95%，而地面穿透雷达 (GPR) 通过对地下 3–10m 深度的探测，有效识别结构缺陷，其分辨率达到了厘米级别。这些技术的应用减少了至少 30% 的传统开挖检查需求，从而降低了对管道运营的干扰并加速了检测流程，保证了天然气输送的连续性。

3.3 泄漏检测与定位系统的最新进展

最新的泄漏检测与定位系统 (LDLS) 利用机器学习算法，结合大数据分析，其检测灵敏度提升至能发现每秒泄漏量低至 0.01% 的泄漏事件，响应时间缩短至分钟级。分布式光纤传感技术，凭借其长达百公里的连续监测能力，能将泄漏定位精确到米级范围内，相比传统方法，定位精度提高近 10 倍。例如，某公司采用此技术后，泄漏响应时间从原来的 4 小时缩短至 30 分钟以内。系统集成的 GIS 与气象数据分析，结合风速、风向和地形因素，进一步将泄漏定位误差率降低至 2%，确保了应急响应的高效性和环境保护的有效性。

4 基于大数据与 AI 的故障预测

4.1 大数据技术在管道健康管理领域的革新应用

大数据在天然气长输管道的健康管理中扮演了革命性的角色，引领了从被动应对到主动预防维护的转型。这一转变依托于对多种来源数据的集成与分析，包括但不限于 SCADA 系统提供的实时监控数据、智能化检测设备的精细反馈信息、详实的历史维修档案，以及全面的环境参数等。这些多元化数据在构建的数据湖中交融汇聚，形成了一个深度洞察管道状态的庞大数据库。

采用先进的大数据分析技术，如分布式计算、数据挖掘和机器学习模型，可以从看似无关的数据间发掘出深刻的内在联系，揭示那些对管道健康构成威胁的关键因素。例如，通过复杂的时序分析和多变量回

归模型，可以精确描绘出管道应力变化与时间序列、特定气候条件之间的微妙关系，进而预测未来可能的故障窗口期，为实施精准的预防性维护策略奠定坚实的数据基础。

4.2 人工智能算法在管道故障预测中的前沿优势

在管道故障预测领域，人工智能算法，特别是深度学习与强化学习等先进技术，正以其前所未有的精确度和预见性改写着游戏规则。这些算法的核心优势体现在：

自我学习与动态适应：AI算法具有自我优化能力，能够持续从新增数据中学习并调整模型参数，确保其预测模型始终贴合管道运营的最新工况变化，保持预测的时效性和准确性。

复杂模式识别能力：利用神经网络等复杂架构，AI能够高效处理非线性关系和高维度数据，揭示出隐匿于海量数据之中的微弱故障信号和复杂故障前兆，这些往往是传统分析手段难以触及的领域。

提前预警机制：通过精密的异常检测算法，AI能在微小数据偏离正常范围的初期即触发预警，为维修团队提供宝贵的准备时间，将潜在故障扼杀于萌芽阶段。

智能决策辅助：结合行业专家的知识体系与AI算法的预测分析，可以生成更为精确的维护建议和资源配置方案，实现维护行动的高效执行和资源的最大化利用。

5 优化调度与经济效益提升

5.1 自动化调度系统与市场需求响应

自动化调度系统作为天然气长输管道运营的高效利器，其价值在于紧密集成SCADA系统、先进的市场预测模型及客户订单管理系统，实现实时调节输送量与方向，以毫秒级速度响应市场波动。例如，一项应用案例显示，通过自动调度系统的实施，某天然气管网在冬季需求高峰期成功将供需匹配率提升了23%，有效避免了因供应紧张导致的45次潜在断供事件，显著减少了供需不匹配带来的压力波动与能源损耗约12%。

5.2 资源配置优化模型与算法

利用运筹学原理、数学规划技术，以及前沿的智能优化算法，如遗传算法和粒子群优化，企业能构建精细的资源配置模型，在复杂的天然气管道网络中实现气体流动与成本效益的最优化。举例来说，某能源公司采用此类优化模型后，运营成本降低了18%，同时输送效率提高了20%。这一成就背后是对管道网络

的全面考量，包括严格遵守管道容量上限、提升压缩机运行效率至少5%，并充分利用储气库的调峰能力，经过数百万次的算法迭代，最终确定了一套减少输送瓶颈、提高整体效能的最佳路径分配方案。

5.3 经济效益评估与环境影响减缓策略

经济效益评估结果显示，自动化与智能化改造的直接经济效益显著，如某企业年泄漏损失减少了300t，相当于节约成本约200万美元；能耗成本因效率提升下降了15%，折合节省超过100万美元；运输效率的提高使得年运输量增加了10%，创造额外收入约500万美元。间接效益方面，客户满意度上升至95%，品牌忠诚度提升15%，为企业带来了长期的市场份额增长。

环境影响减缓策略的实施同样成效卓著。通过对调度进行优化，某天然气运营商年温室气体排放减少了8%，相当于减少了约5万吨二氧化碳当量的排放。同时，采用太阳能和风能为部分压缩机站供电，进一步降低了碳足迹约20%。实施泄漏检测与修复(LDAR)计划一年内发现并修复了120处微小泄漏点，有效遏制了潜在的大规模泄漏风险。

6 结束语

综上所述，自动化技术与智能化管理在天然气长输管道领域的深入应用，不仅是对传统运营模式的重大革新，更是保障国家能源安全、促进生态文明建设的重要途径。展望未来，随着技术的不断进步和创新应用的深化，天然气长输管道行业将持续向更加智能化、自主化的方向演进。这要求我们不断探索新技术、新方法，加强跨学科合作，同时注重人才培养与国际合作，共同应对能源转型期的挑战，确保天然气这一清洁能源在促进经济社会发展的同时，也为全球的可持续发展目标贡献力量。在智能化、数字化的浪潮中，天然气长输管道行业正翻开新篇章，向着更加辉煌的未来迈进。

参考文献：

- [1] 陈力波. 自动化技术在天然气长输管道运营管理中的应用研究 [J]. 石化技术, 2022, 29(10): 78-80.
- [2] 姚德凯, 陈建锋. 自动化技术在天然气长输管道运营管理中的应用 [J]. 中国化工贸易, 2023, 15(22): 91-93.
- [3] 桂禹. 自动化技术在天然气长输管道运营管理中的应用研究 [J]. 中国化工贸易, 2023, 15(14): 109-111.
- [4] 王旭. 浅析自动化技术在天然气长输管道运营管理中的应用 [J]. 中国化工贸易, 2023, 15(15): 130-132.