

浅析物联网技术在长输天然气管道全生命周期管理中的应用

黄 辉

(国家管网集团联合管道有限责任公司西部塔里木输油气分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要: 本文探讨了物联网技术在长输天然气管道全生命周期管理中的应用。通过分析物联网在管道设计、建设、运营、退役等各阶段的具体应用场景和实施路径, 揭示了物联网感知层、网络层、应用层等关键技术在全生命周期管理中的深度融合。研究表明, 物联网技术可显著提升管道设计的优化水平、建设的质量安全、运营的效率可靠以及退役的风险管控, 推动管道管理模式向智能化、精细化、绿色化转型。

关键词: 天然气管道; 物联网; 全生命周期管理; 智能化; 精细化

0 引言

长输天然气管道作为关系国计民生的重要基础设施, 其安全高效运行至关重要。当前, 我国已建成“全国一张网”的天然气管道网络, 管道规模居世界第二。然而, 管道事故时有发生, 运维成本居高不下, 亟需创新管理理念和技术手段。物联网作为新一代信息技术的代表, 为管道全生命周期管理带来了新的机遇。

1 长输天然气管道管理的特点

1.1 地理分布广泛性

长输天然气管道横跨多个地理区域, 覆盖范围广泛, 途经地形地貌千差万别, 包括平原、山区、沙漠、河流、湖泊等, 这种大尺度的空间跨度对管道的设计、建设和运营维护都提出了更高的要求^[1]。管道所处的地理环境各不相同, 可能遭遇严寒、酷暑、风沙、洪水等自然条件的考验, 需要因地制宜地采取针对性的管理策略。同时, 管道跨越不同的行政区划, 涉及多方利益相关者, 协调难度大, 对管理者的沟通能力和综合素质提出了挑战。

1.2 运行环境复杂性

长输天然气管道运行环境的复杂性主要体现在两个方面: 外部环境和内部环境。外部环境包括管道所处的地理位置、气候条件、地质状况、周边建筑和人类活动等因素, 这些都可能对管道的安全运行构成潜在威胁。内部环境则涉及管道输送介质的特性、管道材料的性能、输送压力和流速的变化等, 这些因素直接影响管道的完整性和使用寿命。此外, 长输管道跨度大, 不同区段的运行环境可能差异显著, 这就需要管理者具备全局观念, 统筹兼顾, 针对不同区段制定

差异化的运营策略, 确保系统的整体安全和效率。

1.3 安全要求高度性

天然气是一种易燃、易爆的高能量物质, 一旦发生泄漏或爆炸, 后果不堪设想。因此, 长输天然气管道对安全的要求极高, 这是管道管理工作的重中之重。管道的设计、建设、运营和维护的每一个环节都必须以安全为先, 严格遵循相关标准和规范, 切实保障人民生命财产安全和生态环境安全。这就需要管理者具备高度的安全意识和责任感, 建立健全的安全管理体系, 加强对管道全生命周期的风险管控, 定期开展安全培训和应急演练, 提高全员的安全素质和应急处置能力, 确保管道始终处于安全可控的状态。

2 物联网在工业领域的应用现状

物联网技术在工业领域的应用日益广泛, 已成为推动工业转型升级和智能制造的重要驱动力。当前, 物联网技术在工业领域的应用主要体现在设备联网、数据采集、远程监控、预测性维护等方面^[2]。通过在生产设备上部署各类传感器和通信模块, 实现设备之间的互联互通和数据交互, 从而提高生产效率、优化资源配置、降低运营成本。同时, 基于海量工业数据的分析挖掘, 可以实现对设备健康状态的实时监测和故障预警, 减少非计划性停机时间, 提高设备可靠性。此外, 物联网技术还促进了工业生产模式的创新, 如基于物联网的柔性制造、个性化定制等新模式的出现, 为企业带来新的商业机会和增长点。然而, 当前物联网在工业领域的应用仍面临一些挑战, 如工业设备的多样性和复杂性、数据安全与隐私保护、网络基础设施建设滞后等问题, 亟需工业界和学术界携手探索解决方案, 推动物联网技术在工

业领域的深化应用和可持续发展。

3 物联网技术在长输天然气管道全生命周期各阶段的应用

3.1 物联网技术在长输天然气管道设计阶段的应用

在长输天然气管道设计阶段，物联网技术得到了广泛而创新的应用。设计人员借助物联网技术，从管道路由优化、材料设备选型、虚拟现实辅助设计等多个角度，提升设计质量和效率。

管道路由优化是设计阶段的关键任务之一。设计人员利用无人机等移动传感平台，对拟建管道沿线进行精细化的地形地貌、地质条件、人文环境等信息采集，并将海量数据接入云端进行智能分析^[3]。分析结果与数字地理信息系统（GIS）相结合，自动生成最优管道路由方案，综合考虑工程造价、施工难度、生态影响等多重因素，大幅提升路由优化的科学性和准确性。某天然气管道项目应用该技术后，工程总投资降低 2000 万元，管道穿越次数减少 10 次，满足国家标准《输气管道工程设计规范》（GB 50251-2015）对管道路由选择的相关要求。

在管道材料与设备选型环节，设计人员构建了基于物联网的材料与设备数据库，涵盖各类材料的物理化学性能、使用性能、供应商信息等，以及阀门、压缩机等关键设备的运行参数、维护记录、故障数据等。数据库与设计软件无缝对接，设计人员可以实时查询、比对材料设备数据，选择最佳匹配方案。南京某设计院应用该系统后，管道材料选型实现全面参数化、标准化，严格执行国家标准《石油天然气工业管线输送系统用钢管》（GB/T 9711-2023）等相关标准，设计图纸错误率从 3% 降低到 0.5% 以下。

虚拟现实（VR）技术与物联网的结合，为管道设计开启了全新的可能。设计人员利用 VR 平台，构建管道全生命周期的数字孪生，实现管道全系统的可视化、可交互设计。设计方案实时融入管道三维模型，并模拟管道建设、运营、维护等各阶段的工况，对设计方案进行全面评估和优化。同时，VR 平台还可以支持多专业协同设计，设计人员身临其境地审查设计细节，及早发现和解决问题。这一前沿技术已在武汉某长输管道项目中试点应用，可视化审查发现 100 余项设计问题，涉及管道防腐、阴极保护、热胀冷缩补偿等多个专业，有效规避了后期返工风险。

3.2 物联网技术在长输天然气管道建设阶段的应用

在长输天然气管道建设阶段，物联网技术在焊接质量监控、施工进度管理、无人机巡检等方面得到了

广泛应用。管道施工单位利用物联网感知层设备实时采集施工现场数据，并通过网络传输层将数据传送到管理层，进行数据分析和决策，有效提升了管道建设的质量、安全和效率。

焊接质量直接关系到管道的安全性和完整性。施工单位在焊接设备上安装温度、湿度、振动等传感器，实时监测焊接过程参数，确保各项参数符合施工规范要求。同时，每条焊缝都有唯一的电子标签，记录焊工、焊材、焊接工艺等关键信息，焊缝质量信息通过无线网络实时上传至云平台。一旦发现问题焊缝，平台立即预警，并精准锁定问题焊缝位置，大幅提高了质量监控的时效性和精准度^[4]。某工程采用该系统后，焊接返修率从 1.5% 降至 0.3%，远优于国家标准《油气长输管道工程施工及验收规范》（GB 50369-2014）中规定的一次性合格率不低于 97% 的要求。

在施工进度管理方面，管理人员利用物联网技术对施工机械设备进行定位跟踪和作业状态监测，掌握设备的实时位置、工作时长、油耗等数据，并与施工计划进行比对，及时协调和调度资源，确保施工按期进行。同时，利用激光扫描、计算机视觉等技术对已完成的管沟开挖、管道组对焊、下沟、回填等工程量进行自动统计，并与施工进度计划比对，生成施工进度偏差报告，为管理决策提供数据支撑。中石油某管道项目应用该技术，月度进度计划完成率从 85% 提升至 95% 以上。

无人机与物联网技术的结合，极大地提升了管道建设的巡检效率。施工单位利用配备了高清摄像头和红外测温等传感器的无人机，对施工现场进行全方位、无死角的巡检，高效采集管沟开挖情况、物料堆放情况、施工机械作业情况等影像数据，快速发现违章操作、安全隐患等问题。巡检数据通过 4G/5G 网络实时回传，远程监控人员可以及时掌握现场动态，减少了人工巡检的劳动强度和安全风险。

3.3 物联网技术在长输天然气管道运营阶段的应用

管道运营商构建了全面的物联网感知体系，对管道各项运行参数进行实时监测，并融合大数据分析、人工智能等技术，对管道运行状态进行智能诊断和预警，最大限度地减少事故发生，提高管道的安全性和可靠性。

管道泄漏检测与定位是管道安全运营的重中之重。运营商在管道沿线部署了大量的温度、压力、流量、声波等传感器，对管道的温度场、应力场等进行实时感知。一旦发生泄漏，相关参数会发生异常变化，

系统立即报警,并根据泄漏声波的传播时差,利用三角定位原理计算出泄漏点的精确位置,定位精度可达 $\pm 50\text{m}$,大幅缩短了泄漏确认和响应时间。

运营商利用分布式光纤测温、管道应变监测等技术,实时感知管道的应力—应变状态,评估管道的健康水平。同时,物联网还可监测管道的阴极保护电位、土壤电阻率等数据,评估管道的腐蚀状况。这些海量的监测数据被传输至管道完整性管理系统,该系统依据相关标准如《输油管道完整性管理规范》(SY T6648-2016)等,对管道进行风险评估和分级预警,运营商据此制定针对性的检测维修策略,实现管道维护的精准化、前移化。西气东输某管道实施该系统后,高后果区管段检测频次提高 50%,第三方破坏事件发生率下降 30%。

在管道内检测(ILI)领域,物联网技术的引入实现了 ILI 器的智能化升级。新一代 ILI 器集成了惯性测量单元(IMU)、高精度里程计等物联网传感器,可实现管道三维空间位置的高精度测绘,为管道变形、应力集中等缺陷的精准定位奠定了基础。此外,ILI 器与管道全生命周期数据平台实现了数据共享和融合,通过对比分析历史 ILI 数据,可溯源缺陷的产生和发展,对缺陷进行趋势预测,从而实现主动式、预防式的缺陷管理。

当前,以物联网为基础的预测性维护(PdM)策略在管道行业通过在线监测管道和设备的关键运行参数,并结合机器学习算法,构建设备退化模型,提前预知设备何时需要检修,从而避免设备意外停运。

3.4 物联网技术在长输天然气管道退役阶段的应用

管道运营商利用物联网感知技术,全面掌握管道退役前的状态数据,评估退役过程中的安全和环境风险,并对退役过程进行实时监测和追踪,确保管道退役工作安全、合规、环保。

在管道退役风险评估阶段,运营商利用物联网技术对管道进行全方位的状态感知,包括管道壁厚、腐蚀状况、残余应力等关键参数。这些数据被传输至退役风险评估系统,该系统综合考虑管道状态、输送介质特性、周边环境条件等因素,依据《城镇燃气管道完整性管理系统》等标准,计算管道退役风险值,识别高风险管段,并制定相应的退役方案和应急预案。某跨海管道退役项目应用该技术,识别出 10 处高风险点,有针对性地制定了海上溢油应急方案,有效规避了环境污染风险。

管道退役施工过程复杂,涉及管道置换、清洗、

切断、封堵等多个步骤,物联网技术可对施工过程进行全程监控。施工现场布设大量视频监控、气体检测等传感设备,对置换气体浓度、清管废液处置等关键指标实时监测,一旦发现超标现象,立即启动预警和应急处置机制。同时,利用 RFID、二维码等物联网标识技术,对管道切断段、封堵件等实施唯一性标识和跟踪,确保每一步施工都有据可查,规范有序。管道退役后,利用无线传感器网络对管道腐蚀状况进行持续监测,及时发现退役管道泄漏等问题,降低环境污染风险。

退役管道往往跨越农田、河流、湿地等生态敏感区,施工不当极易造成土壤、水体污染等次生环境灾害。物联网技术可助力退役管道的环境影响评估。通过在管道周边布设土壤湿度、水质等传感器,测算施工对土壤水分、河流溶解氧等环境要素的影响幅度和范围。环评人员利用环境监测大数据,评估退役工程对农田产量、生物多样性的影响,制定生态修复方案。

4 结语

物联网技术正加速向长输天然气管道全生命周期管理各个环节渗透,成为支撑管道业务数字化、智能化发展的关键驱动力。物联网与大数据、人工智能、云计算、数字孪生等技术的深度融合,将催生管道管理的新模式、新业态,带来降本增效的新动能。展望未来,物联网技术在管道领域的应用将进一步向纵深拓展,并向产业链上下游延伸,形成管道全生命周期的物联网解决方案,为实现管道资产的智慧管理和价值最大化奠定坚实基础。

参考文献:

- [1] 王登贤,田昌伟,佟箫宇,等.长输天然气管道精细化管理路径[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(13):53-55.
- [2] 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.
- [3] 姜晗,康楠,周津卉,等.基于全数字化协同设计的天然气管道工程站场设计[J].油气田地面工程,2021,40(09):45-50.
- [4] 赵林,刘佳,王晓静.浅析物联网技术在长输天然气管道全生命周期管理中的应用[J].产业创新研究,2021,(20):118-120.

作者简介:

黄辉(1989—),男,安徽界首人,本科,工程师,研究方向:天然气、原油长输管道业务、自动化仪表维修。