

功能分层以及设备分布来保证整个系统的可靠性和灵活性。管理层是整个系统的“大脑”，用于监视全厂情况，分析数据并进行优化等操作。如 SCADA 系统利用人机界面 (HMI) 显示设备工作状况以及生产信息，便于管理人员进行远程观察及干预；而 MES 系统侧重于生产调度管理，通过对排程、质量管理等工作改进提高产量及品质。控制层是整个系统的核心，负责实时控制的任务。PLC 通过计算以及顺序控制使生产线自动运转；DCS 使用多个分散的小型控制器来进行对连续工艺进行精细调整等。工业 PC 由于具有很强的运算性能可以实现复杂的算法以及大量的数据进行分析。

工业通信网络是连接管理级与控制级、设备级与设备级的“神经系统”，它对整个系统是否具备良好的及时性和稳定性起着至关重要的作用。现场总线技术比如 PROFIBUS、Modbus，利用串行通信方式实现现场设备与控制器之间信息传递，其优点是经济实惠并且安装方便；工业以太网技术例如 EtherNet/IP、PROFINET，由于其大带宽以及高传输速度可满足大量设备连接以及快速数据传输需求，因而成为工业控制领域的主要通信手段；而无线通信技术如 Wi-Fi、蓝牙、Zigbee 等则在移动设备监测或灵活布线场合发挥重要作用^[2]。

分层分布式架构与工业通信网络结合促使系统朝着“管控一体化”的方向发展。通过统一通信协议以及数据格式使得各层之间以及各个设备之间可以互相连接；使用时间敏感网络 (TSN) 保证重要数据的及时性传输以适应实时控制的要求；借助边缘计算在设备上完成一部分的数据分析工作从而释放服务器资源加快整个系统的反应速度。这将使整个系统更加紧密同时也有利于以后工业互联网以及智能制造的发展。

3.4 安全机制与冗余设计的全面保障

安全是一套自动化控制系统的核心，它包括功能安全、信息安全以及物理安全三个方面。功能安全是为了防止危险的发生或者是减少其影响而保障人们的生命安全和设备不受损害，比如安全仪表系统 (SIS) 利用独立的传感器、逻辑控制器及执行机构一旦发现异常就会立即做出相应的响应动作；安全完整性等级 (SIL) 是对系统可靠性的评价，从而进行安全的设计。信息安全则是为了防止系统受到网络攻击以及信息泄露等，在工业互联网时代，由于工业控制系统越来越频繁地暴露在互联网中，所以它会面临更多的外部风

险，例如病毒、数据被篡改或者服务被拒绝连接等，可以通过部署防火墙、入侵检测系统以及使用加密通信等手段来提高安全性。使用零信任架构，对每一个访问请求都进行身份认证以及权限检查以避免非法访问。

物理安全是指设备在恶劣环境下能够正常工作。比如，采用防爆设计保证传感器和执行器能在易燃易爆环境中安全运转；取得 IP 防护等级证书以防止灰尘和水分对设备造成损害；配备有备用电源以及冷却装置以防由于温度过高或者失电导致设备出现问题等。冗余是提高系统的可靠性的有效方法，在系统出现某些问题的情况下可以使整个系统仍然可以正常工作的冗余即为冗余，硬件冗余包括两个 PLC 系统、两个电源模块等用主备切换的方式来避免单一故障点的存在；软件冗余则是指两套不同的控制策略或者数据备份与恢复机制来保证控制系统工作的准确性。网络冗余例如环形拓扑、双链路通信等方式都是利用多条路径进行通信以保证通信可靠性的方法。

安全机制以及冗余设计所提供的全方位保护，不仅可以减少系统的故障率，还可以提高生产的连续性，如在电力系统中，冗余设计可以使电网在设备发生故障的情况下仍然可以正常供电，在智能制造系统中，安全机制可以避免生产的数据泄露以及生产设备受到黑客攻击等，而这些正是使自动化控制系统可以在一些重要行业得到广泛使用的基础也是实现工业向“无人化”、“自主化”的前提条件^[3]。

4 结语

电气工程自动化控制技术主要包括几方面内容，其中核心控制理论和算法相结合使系统具有一定的自主判断能力，高性能传感器以及执行机构配合使用保证控制精确度，分层分布结构及工业通信网络结合提高了系统整体性和及时性，安全保障措施以及容错设计全方位保护系统正常工作。理解和利用以上要点有助于提高电气工程自动化控制技术水平，有利于电气工程行业发展，更好地服务社会发展。

参考文献

- [1] 徐文婧. 机械设备电气工程自动化供配电节能控制技术分析[J]. 模具制造, 2025, 25 (12): 183-185.
- [2] 刘畅. 人工智能技术在石化企业电气工程自动化控制中的运用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (22): 177-179.
- [3] 李松林, 李明. 电气工程自动化控制现状及智能化技术的有效应用分析[J]. 中国设备工程, 2025, (22): 28-30.

Risk assessment and protection reinforcement technology for geological hazard sections of long-distance oil and gas pipelines

Yihui Wu Yaguang Cui

Xi'an Oil and Gas Transportation Branch Northwest Pipeline Company, State Pipeline Network, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract

China's long-distance oil and gas pipelines often pass through complex geological conditions such as mountainous areas, loess areas, and karst areas. Geological disasters such as landslides, loess subsidence, and mudslides occur frequently, seriously threatening the safety of pipeline operation and the stable supply of oil and gas resources. In order to carry out risk assessment of pipelines in areas prone to geological disasters and improve the efficiency of pipeline disaster prevention and reinforcement, this article combines field geological surveys, comprehensively uses monitoring and numerical analysis methods, constructs a pipeline risk management system in disaster prone areas, analyzes the failure modes of pipelines under various geological disasters, and studies supporting disaster prevention and reinforcement technologies. The research results can be used for identifying and assessing the risk level of geological hazards in long-distance oil and gas pipelines, providing efficient technical means to reduce pipeline operation risks, ensuring safe and stable pipeline operation, and providing technical ideas for risk control and governance of geological hazards in long-distance oil and gas pipelines.

Keywords

Long-distance oil and gas pipelines; Geological hazards; Risk assessment; Protection reinforcement

长输油气管道地质灾害区段风险评估与防护加固技术

吴毅辉 崔雅光

国家管网西北公司西安输油气分公司, 中国·陕西 西安 710018

摘要

我国长输油气管道多途经山区、黄土区、岩溶区等地质条件复杂地段, 滑坡、黄土湿陷、泥石流等地质灾害频发, 严重威胁管道运行安全与油气资源稳定供应。为开展地质灾害易发区管道风险评估、提升管道防灾加固效率, 本文结合外业地质调查, 综合运用监测与数值分析方法, 构建灾害易发区管道风险管理体系, 分析各类地质灾害作用下管道的失效模式, 研究配套防灾加固技术。研究成果可用于长输油气管道地质灾害易发区识别与风险等级评估, 提供高效技术手段降低管道运行风险, 保障管道安全稳定运行, 为地质灾害易发区长输油气管道风险管控与治理提供技术思路。

关键词

长输油气管道; 地质灾害; 风险评估; 防护加固

1 引言

伴随着长输油气管道工程建设规模的持续加大, 在工程建设期间势必会对沿途环境造成不同程度的破坏并遗留下地质风险隐患, 而在运营期管道也会遭受到人类工程活动的侵扰和自然环境的破坏, 在管道的全生命周期中, 由地质灾害引发的管道事故将不可避免的时有发生, 这给管道安全运营造成了巨大威胁。根据第十次欧盟天然气管道事故数据报告, 1970 ~ 2016 年, 世界范围地质灾害致管道失效占总

失效事故约 14%, 其中滑坡占 64.66%, 洪水占 14.66%, 河流冲刷占 4.31%, 采矿占 3.45%, 溃堤占 0.86%, 其他因素占 13.5%。随着 21 世纪全球管道总里程的高速增长, 地质灾害对管道安全运营造成的不良影响以及如何提高管道公司地质灾害管控水平将越来越被重视。开展长输油气管道沿线地质灾害重点区段风险识别与防护加固研究, 实现地质灾害风险精准识别与针对性防护加固, 提升管道防灾、抗灾、减灾能力, 对保障长输油气管道运营安全、保护沿线生态环境与公共安全具有重要现实意义与紧迫性。

【作者简介】吴毅辉 (1988—), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 管道管理技师, 从事长输管道地灾、风险评估研究。

2 长输油气管道地质灾害类型与致灾机理分析

2.1 典型地质灾害类型及分布特征

长输油气管道沿线地质灾害类型受地形地貌、岩土工程地质条件、气象水文、地质构造等因素控制,不同区域地质灾害发育特征差异显著。西北湿陷性黄土区以黄土湿陷、地面塌陷、边坡坍塌为主,该区域黄土疏松多孔,遇水浸湿后土体结构易破坏,产生不同程度湿陷变形,灾害多分布于管道穿越黄土塬、梁、峁、沟谷等部位;西南山地丘陵区地形复杂、岩体破碎、降雨集中,易诱发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,灾害多沿线路两侧边坡分布,具有突发性强、破坏力大的特点;南方岩溶地貌区岩土体中溶洞、土洞发育,地下水活动频繁,易引发地面塌陷,导致管道地基失稳、受力不均。不同区域管道地质灾害类型差异明显,常出现多种灾害叠加发生或同一部位反复致灾的情况,管道受损兼具渐变与突发双重特征^[1]。

2.2 地质灾害对管道的破坏机理

各类地质灾害作用方式不同,对管道的损伤破坏机理存在差异。黄土湿陷、地面沉降主要引发管道不均匀沉陷变形,土体局部快速沉降使管道承受弯曲应力,当应力集中超过管道材料屈服应力时,会造成管道弯曲、防腐层刮擦破损,甚至断裂;滑坡、泥石流主要通过崩滑体与泥石流体的重力作用,以冲击、拖拽、挤压方式破坏管道,产生侧向推力与拉应力,导致管道受拉扭断、拉脱、挤压变形,甚至被直接剪断;崩塌落石以冲击荷载为主,落石冲击管道上方覆土,作用力传递至管道,造成管道局部凹陷、刮擦、开裂;岩溶地面塌陷导致管道下部土体瞬间悬空,管道在覆土自重与输送介质重力作用下,易发生拉伸破裂、接口松动、介质泄漏^[2]。管道损伤破坏均与岩土体变形、应力传递及管道自身受力状态相关,多因素耦合作用会加剧管道损伤。

2.3 灾害致灾影响因素耦合分析

长输油气管道地质灾害是自然营力与人类活动共同作用的结果。坡度、岩土体性质、地质构造、降雨、地下水位是主要自然致灾因素:坡度大于 15° 、黄土湿陷系数大于0.3、岩层破碎区域,地质灾害发生概率显著升高;降雨强度增大会快速降低土体抗剪强度,易引发边坡失稳、黄土湿陷等灾害。人为致灾因素主要包括管道建设施工、沿线工程活动、地下水资源开采等:管道施工中边坡开挖会扰动原状土体结构,处置不及时易诱发滑坡;沿线农田灌溉、工程排水导致地下水位抬升,会加剧黄土湿陷、岩溶塌陷等灾害。通过分析自然与人为致灾因素,识别主控因素并明确耦合作用规律,可为地质灾害防控与加固治理提供依据。

3 长输油气管道地质灾害区段风险评估技术

3.1 针对性风险评估指标体系构建

结合各段长输油气管道地质灾害的区域特征,构建层次化、差异化、针对性强且贴合现场实际的指标体系,替代

通用型指标体系。指标体系分为目标层、准则层、指标层:目标层为地质灾害易发区管道综合风险等级;准则层包含地质灾害易发性、管道易损性、防控难易性3类指标;指标层选取原则与准则层对应。其中,地质灾害易发性指标包括地质类型、灾害规模、地形稳定性、降水敏感度;管道易损性指标包括管道材料强度、管道埋深、管径、管道使用年限;防控难易性指标包括交通条件、施工作业空间、管道监测布设难度^[3]。结合不同地质灾害特征分配指标权重,湿陷性黄土区适当提高湿陷系数、地形高差、地下水位等指标权重,山区适当提高坡度系数、岩体风化破碎程度等指标权重,提升评估结果的准确性。

3.2 多方法融合风险评估模型

采用野外勘测、多手段监测与数值模拟相结合的耦合评价方法,弥补单一评价方法的缺陷。通过野外地质调查、原位测试获取沿线岩土条件、灾害点分布等基础数据;利用分布式光纤、InSAR监测、边坡测斜仪等设备,实时监测管道地表沉降、土体含水率、管道应力等数据,精准识别威胁管道安全的灾害点。采用层次分析法计算指标权重,结合模糊评价与FLAC3D数值分析,定量评价灾害风险概率与管道破坏后果等级,从单体灾害体到线路区间综合划分风险等级,将管道区段划分为高风险、中风险、低风险、无风险四级,指导后续防护加固工作。

3.3 工程案例风险评估实践

以西北某长输天然气管道黄土湿陷区段为研究对象,该管道管径813mm,已运行8年,途经黄土沟壑地段长度12.6km,区域黄土湿陷等级为II~III级,曾发生3处局部湿陷变形。采用上述评估方法对该区段开展风险评估,选取10处典型灾害隐患点,依据评估指标体系统计各项指标并赋值,评价结果见表1。结果显示,该区段高、中、低风险隐患点分别为3处、4处、3处,高风险点主要分布于黄土沟壑边坡及灌溉区下方,致灾类型为黄土湿陷与边坡滑塌耦合。该评估结果可精准锁定高风险管控区段,为后续重点防护加固提供依据,验证了该方法的可行性与有效性。

4 长输油气管道地质灾害区段防护加固技术

4.1 分灾害类型针对性防护技术

针对不同类型地质灾害采取差异化防治措施,实现因地制宜、精准治理。湿陷性黄土灾害点采用“地表封闭+土体加固+导排水系统”综合措施:地表采用黏土、混凝土盖板封闭,阻隔雨水、灌溉水下渗引发黄土湿陷;周边布设排水暗沟与截水沟,快速疏排地表水;湿陷严重区段采用灰土挤密桩加固土体,提升土体强度与地基稳定性。山地滑坡、泥石流灾害点采用“边坡锚固+挡挡工程+生态防护”综合措施:采用锚杆、锚索、框架梁加固边坡土体,抑制滑坡发育;坡脚设置拦石坝、泥石流导流槽,避免泥石流冲击管道;边坡表面栽植乡土植被,固土保水、减少坡面冲刷。