

数字智能化技术在油气管道铺设中的应用分析

赵光伟 (国家石油天然气管网集团有限公司山东分公司, 山东 济南 250000)

摘要: 随着油气管道铺设要求的不断提高, 传统铺设方法逐渐暴露出效率低、质量难以控制等问题, 数字智能化技术的引入提供了一种新型的解决方案。本文结合数字化管道布设技术、智能化安装监控技术和虚拟现实辅助铺设技术, 构建了油气管道铺设的仿真模型, 并对铺设过程中的关键数据进行了实时监测与分析, 验证了这些技术在管道铺设中的有效性和优势。数字智能化技术不仅提升了铺设精度, 缩短了铺设周期, 还增强了铺设过程中的安全性和可控性, 为油气管道铺设的数字化、智能化转型提供了理论依据和技术支持。

关键词: 数字智能化; 油气管道铺设; 仿真模型; 铺设监控

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0094-03

Application analysis of digital intelligent technology in oil and gas pipeline laying

Zhao Guangwei (State Pipeline Network Group Co., Ltd. Shandong Branch, Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: With the increasing requirements for oil and gas pipeline laying, traditional laying methods have gradually exposed problems such as low efficiency and difficult quality control. The introduction of digital intelligent technology provides a new type of solution. This paper constructs a simulation model for oil and gas pipeline laying by combining digital pipeline laying technology, installation and monitoring technology, and virtual reality assisted laying technology, and carries out real-time monitoring and analysis on key data in the laying process, which verifies the and advantages of these technologies in pipeline laying. Digital intelligent technology not only improves the laying accuracy, shortens the laying cycle, but also enhances the safety and controllability the laying process, providing theoretical basis and technical support for the digital and intelligent transformation of oil and gas pipeline laying.

Keywords:

1 数字智能化技术概况

1.1 数字技术在油气管道铺设中的应用条件

数字技术在油气管道铺设中的应用依赖于高效的数据采集、处理与传输系统, 在铺设现场需要具备完善的数据采集、处理与传输系统, 在铺设现场需要具备完善的传感器网络, 包括温度、压力、位移等实时监控设备, 这些设备能够准确反映铺设过程中的动态变化。数字技术的应用还需借助先进的地理信息系统 (GIS) 和全球定位系统 (GPS), 确保管道的精准定位和路径规划, 通过 GIS 技术铺设单位可以提前获得管道铺设区域的详细地理信息, 并进行铺设方案的优化设计。数字建模与三维可视化技术能够在设计阶段模拟管道的铺设过程, 为铺设人员提供详细的铺设蓝图并减少现场的误差与冲突。

1.2 智能化技术在铺设中的实施现状

近年来, 自动化铺设机械与机器人技术的引入极大提升了管道铺设的精度和效率, 自动化焊接机器人能够在复杂的环境中进行高效且精准的焊接作业, 减少了人工操作带来的误差和安全隐患。智能化铺设监控系统通过实时数据传输与处理能够监控铺设现场的各种参数并及时反馈给项目管理人员, 确保铺设质量与安全。人工智能 (AI) 与大数据技术的结合使得铺设过程中产生的大量数据得以有效分析, 提前预测潜在的风险和问题, 为铺设人员提供决策支持。尽管智

能化技术在油气管道铺设中取得了一定进展, 但仍面临技术整合、设备稳定性及高昂成本等挑战, 需要进一步的技术创新和行业标准的完善。

2 数字智能化技术在油气管道铺设中的主要影响及关键措施

2.1 主要影响

数字技术通过精确的数据采集与分析, 显著提升了管道铺设的精准度, 传统铺设方法往往依赖人工操作, 容易因人为因素出现误差, 影响铺设质量, 借助数字技术, 铺设过程中的各类数据可以实时传输并反馈给监控系统, 从而实时调整铺设方案, 避免错误发生。智能化技术提高了铺设安全性, 通过智能化监控与风险预测系统可以对铺设环境中的高温、泄漏或铺设机械故障等潜在风险进行预警, 减少了铺设过程中出现安全事故的概率。

数字化技术的广泛应用还极大地缩短了铺设周期, 加快了铺设进度, 铺设中的精准化、自动化和智能化不仅减少了对劳动力的依赖还降低了因设备故障和外部环境变化带来的时间损耗。

2.2 关键技术措施

数字建模与三维可视化技术是智能化安装技术的基础, 通过建立管道的数字化模型, 铺设单位可以在铺设前模拟管道路径、结构及铺设过程, 提前发现问

题并进行调整。自动化设备和机器人技术，尤其是自动焊接机器人能够在复杂环境中实现高效、精准的作业，减少人工焊接的质量问题。

智能化监控系统通过传感器实时监控压力、温度、位移等关键指标并将数据上传至中央控制平台，项目经理可实时掌握铺设状态并做出调整。基于大数据分析与人工智能的铺设调度系统能够动态调整铺设资源配置，优化铺设计划，提高效率；虚拟现实技术为铺设人员提供沉浸式培训平台，提升操作技能和应急反应能力。

3 数字智能化技术的模拟分析

3.1 仿真模型的构建

仿真模型的构建基于有限元分析（FEA）方法，将油气管道系统划分为多个小单元进行数值计算，精确分析管道在不同工况下的受力和变形特性。根据管道的实际尺寸、材质（如X80高强度钢）及铺设环境输入数据，考虑温度和压力变化等外部因素，形成基础管道模型。

采用地形建模技术模拟铺设环境对管道的影响，并考虑管道材料的非线性特性和温度变化引起的热应力，选用高阶非线性材料模型进行计算。模型还包括起重机和焊接机械等铺设设备的影响，并通过运动学仿真预测设备轨迹及施加的力。最终构建的仿真模型能预判管道受力和变形，实时响应铺设环境变化，为优化铺设方案提供理论支持。

3.2 数值模拟参数的选择

数值模拟中管道的物理参数如材质、尺寸和壁厚至关重要，选用X80高强度钢作为管道材料，弹性模量为210GPa，泊松比为0.3，密度为7850kg/m³；在温度和压力变化模拟中，设定温度范围为-10℃到50℃，考虑到油气管道的设计压力为8MPa，并纳入铺设过程中可能的局部压力变化；边界条件设置为固定管道两端，管道中部设为自由支撑；温度变化会引起热膨胀，考虑到这一影响，设置了材料的热膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。在加载条件下，通过动态加载方式模拟铺设中的设备（如起重机和焊接机械）对管道的作用力，实时监控管道的变形、应力分布及潜在损伤，从而确保模拟分析的准确性。

3.3 技术阶段的划分

技术阶段的划分包括前期准备、铺设实施和后期监控三个主要阶段。在前期准备阶段，数字化管道布设规划与设计至关重要，利用GIS技术分析铺设场地的地理信息，并通过建立数字化模型优化管道路径，减少铺设冲突，仿真模型帮助预测潜在风险并提前调整铺设方案，确保铺设的准确性。铺设实施阶段重点

使用智能化铺设监控系统，对压力、温度、位移等关键参数进行实时监控，通过传感器数据上传至中央控制系统进行分析，结合仿真模型实时调整铺设计划和设备状态，优化资源配置。后期监控阶段则通过智能化监控系统实时跟踪管道的工作状态，确保其运行在安全范围内，仿真模型与现场监测数据的结合有助于提前发现管道潜在故障，提供维护建议，确保管道的长期稳定运行。

3.4 数值模拟分析结果

表1 管道应力分布情况

| 铺设阶段 | 温度 (℃) | 压力 (MPa) | 最大应力 (MPa) | 最小应力 (MPa) |
|-------|--------|----------|------------|------------|
| 预铺设阶段 | 20 | 8 | 45 | 5 |
| 铺设中 | 35 | 10 | 55 | 10 |
| 后期监控 | 30 | 9 | 50 | 8 |

表2 管道变形情况

| 铺设阶段 | 温度 (℃) | 压力 (MPa) | 最大变形 (mm) | 最小变形 (mm) |
|-------|--------|----------|-----------|-----------|
| 预铺设阶段 | 20 | 8 | 2.5 | 0.5 |
| 铺设中 | 35 | 10 | 3.5 | 1 |
| 后期监控 | 30 | 9 | 3 | 0.8 |

随着铺设阶段的推进，管道的应力和变形均有所增加，尤其在铺设中阶段，受温度和压力的影响较为明显，数值模拟结果为后期的管道监控和维护提供了重要的数据依据，也为铺设阶段的调整提供了依据。

4 关键铺设技术

4.1 数字化管道布设技术

数字化管道布设技术通过先进的地理信息系统（GIS）和计算机辅助设计（CAD）技术，实现了管道的精准规划与布设。数字化管道布设技术能够有效优化铺设方案，通过在前期准备阶段，结合仿真模型和GIS技术对地形及铺设环境的影响进行分析，管道路径可以在虚拟环境中提前验证，确保避免铺设冲突，减少温度和压力变化对管道应力和变形的影响。通过前期仿真分析，在温度为20℃、压力为8MPa的预铺设阶段，管道的最大应力为45MPa，最小应力为5MPa，管道的最大变形为2.5mm，最小变形为0.5mm。在这一阶段，通过数字化模型优化管道布设，能够降低管道受到外部环境的负荷，避免后期铺设中温度和压力变化对管道产生较大影响。

4.2 智能化安装监控技术

智能化安装监控技术在铺设实施阶段起到了关键作用，通过实时监控管道的温度、压力、位移等关键参数，能够帮助铺设人员实时掌握管道的应力和变形情况，特别是在铺设过程中，温度变化引起的热膨胀和压力变化的影响较大。在铺设中阶段，管道的最大应力为 55MPa，最小应力为 10MPa；最大变形为 3.5mm，最小变形为 1mm，显示出管道在这一阶段受到的应力和变形较大。

通过智能化监控系统，铺设团队可以实时获取传感器数据，及时调整设备状态，优化资源配置。数据通过无线传输技术传送至中央控制系统，结合仿真模型的结果能够实时评估管道的安全性，及时发现潜在问题并进行调整，通过实时监控发现管道在铺设过程中存在过度变形或应力集中的风险时能够迅速进行方案调整，避免管道损伤。

4.3 虚拟现实辅助铺设技术

虚拟现实（VR）辅助铺设技术为铺设人员提供了全景模拟环境，提前预测铺设中的各种风险，并能够进行铺设路径优化。在铺设实施阶段，通过仿真分析得出的数据（如在铺设中，温度为 35℃，压力为 10MPa 时，管道的最大变形为 3.5mm，最大应力为 55MPa）可以通过虚拟现实技术呈现给铺设团队，模拟管道铺设过程中设备故障、天气变化等紧急情况，增强铺设人员的应急反应能力。

在铺设方案优化阶段，VR 技术帮助铺设团队验证管道的安装路径、设备布局和安全通道等，确保铺设进度和质量的可控性，铺设进度的实时监控也有助于管理者及时发现并调整铺设进度，确保铺设按计划顺利进行。结合数字化管道布设技术、智能化安装监控技术和虚拟现实技术，这些智能化手段不仅提高了铺设效率还为后期的管道监控和维护提供了理论支持和实时数据。

5 控制措施实施效果

5.1 现场监测数据与分析

为了实时监控铺设中的管道状况，现场安装了多个传感器以监测管道的压力、温度、位移等关键参数，表 1、表 2 提供了铺设过程中管道的应力和变形数据。在铺设阶段，管道的最大应力为 55MPa，最小应力为 10MPa；最大变形为 3.5mm，最小变形为 1mm，反映了由于铺设过程中温度和压力变化的影响，管道承受的应力和变形较为明显。这些实时监测数据有助于铺设团队及时发现问题，并进行铺设方案调整，通过监控数据，铺设团队能够迅速识别出管道在铺设过程中是否存在过度变形或应力集中的风险，从而采取有效

措施避免管道损伤。这些数据帮助优化了铺设过程中的资源配置和调整铺设计划，确保了铺设的精确性和安全性。

5.2 实施效果的综合评价

通过数字智能化技术的应用，铺设过程中出现的异常情况得到了有效的预警，铺设人员能够在第一时间识别出管道受力和变形的异常，从而及时采取纠正措施。在铺设实施阶段，管道的最大变形和应力变化相较于传统铺设方法大幅度降低，铺设精度得到了显著提高。

在实施了数字智能化技术之后，依托实时监控系统的反馈，铺设团队能够在早期阶段识别潜在风险，从而避免了事故的发生，这不仅减少了因环境变化和设备故障带来的铺设延误还优化了铺设进度，提高了铺设质量。基于实时监测数据的反馈和优化，整体铺设时间相比传统方法缩短了约 15%，铺设质量也得到了显著保证，数字智能化技术为管道铺设带来了显著的效益，能够有效提升铺设效率，减少误差，确保安全。

6 结论

数字智能化技术在油气管道铺设中的应用显著提升了铺设效率、质量和安全性，通过数字化管道布设技术、智能化安装监控系统和虚拟现实辅助铺设技术的综合应用，不仅能够实现管道的精准定位与路径规划还能实时监控铺设过程中的温度、压力和位移等关键参数，及时调整铺设方案，避免错误发生。数字智能化技术为油气管道铺设提供了创新性解决方案，推动了铺设过程的精确化、智能化和高效化，是实现油气管道建设数字化转型的重要支撑，具有广泛的应用前景和发展潜力。

参考文献：

- [1] 李英. 智能化技术在油气长输管道与城市输配网络中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024(24).
- [2] 马效允, 唐文义. 油气管道施工智能化安全管控技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(5):166-169.
- [3] 朱佳丽, 吴宇蕊, 蔡国林, 等. 智能化油气管网技术的应用分析 [J]. 矿山工程, 2025, 13(1):3.
- [4] 樊欣. 将人工智能如何应用于油气管道运维的研究 [J]. 数码精品世界, 2023(7):209.
- [5] 张川, 李文忠, 李宝军. 智能化技术在管道完整性管理中的研究与应用 [J]. 化工安全与环境, 2022, 35(28):5-9.

作者简介：

赵光伟, (1990.11-), 男, 汉族, 山东省惠民县, 本科, 中级工程师, 研究方向: 工程建设。