输气管道河流穿越段水下检测技术关键点研究

张若雯　孔佑健　芦思宇（国家管网集团储运技术发展有限公司沈阳分公司，辽宁　沈阳　110167）

摘　要：河流穿越段是输气管道工程中最为关键和薄弱的环节，受水流冲刷、泥沙沉积及水下腐蚀等因素影响，管道存在悬空、暴露、腐蚀及机械损伤等安全风险。本文系统研究了河流穿越段水下检测的关键技术，包括水下机器人集成检测系统、高精度管道定位与埋深测量技术、二维/三维声呐成像、超声波壁厚测量等监测技术。针对可清管与不可清管管道提出智能清管器和模块化可回收机器人内检测方案，并结合多波束测深和水动力模拟分析河床演变及管道暴露风险。

关键词：输气管道；河流穿越段；水下检测；水下机器人

中图分类号：TE973　　　**文献标识码：**A　　　**文章编号：**1674–5167（2026）012–0109–03

Research on Key Technologies for Underwater Inspection of Gas Pipeline River-Crossing Sections

Zhang Ruowen, Kong Youjian, Lu Siyu (Shenyang Branch, China National Pipeline Group, Storage & Transportation Technology Development Co., Ltd., Shenyang Liaoning 110167, China)

Abstract: River-crossing sections are the most critical and vulnerable parts of gas pipeline projects. Influenced by factors such as water flow scouring, sediment deposition, and underwater corrosion, pipelines face safety risks including suspension, exposure, corrosion, and mechanical damage. This paper systematically studies the key technologies for underwater inspection of river-crossing sections, including underwater robot-integrated inspection systems, high-precision pipeline positioning and burial depth measurement, 2D/3D sonar imaging, and ultrasonic wall thickness measurement monitoring techniques. For piggable and unpiggable pipelines, intelligent pigs and modular recoverable robotic in-line inspection solutions are proposed. In addition, multibeam bathymetry and hydrodynamic simulations are combined to analyze riverbed evolution and pipeline exposure risks.

Keywords: gas pipeline; river-crossing section; underwater inspection; underwater robot

近年来，水下机器人集成检测系统、二维/三维声呐侧扫成像、超声波壁厚测量以及阴极保护电位测量等技术在河流穿越管道检测中得到广泛应用，同时智能清管器和模块化内检测机器人能够满足不同管道条件下的检测需求。通过多源数据融合与分析方法，可实现缺陷识别、完整性评价及寿命预测，为管道维护和加固提供技术支撑。本文系统总结了河流穿越段水下检测的关键技术原理、实施流程及数据分析方法，为管道安全管理提供理论与实践参考。

1 穿越段工程特征

河流穿越段是输气管道工程中最为关键且复杂的部分，其工程特征主要体现在以下几个方面：

首先，地质及水文条件较为复杂。河床底部通常存在淤泥、砂砾、岩石或含水层，这些材料的承载力与稳定性差异较大，同时河流水位及流速会随季节出现明显变化，使施工环境不够稳定。

其次，施工难度颇高。管道需铺设在河床下方，常采用顶管、明挖沉管及水平定向钻等施工方法。施工过程中必须精确控制管道坡度、深度及水平位置，同时避免河床坍塌或管道漂浮，以确保施工安全及质量。

再次，水下环境影响显著。河流穿越段受到水流冲刷、泥沙沉积及水体腐蚀影响较大，管道在长期运行过程中存在外力冲击、腐蚀和沉降风险，因此对材料选择、防护措施及后期维护要求较高。

最后，检测与监控要求严格。为保障管道安全，需要对穿越段开展高精度水下检测，包括管道埋深、变形、外护层完整性及焊缝质量等方面，以确保工程安全可靠。

2 主要安全风险

2.1 管体暴露与悬空

在河流穿越段，鉴于河床泥沙冲刷以及沉积不均，管道部分区域会出现埋深不足甚至悬空现象，如果管体发生悬空，那么流体动力荷载以及自重作用就会在管道局部产生弯曲和应力集中，长期循环载荷也容易引发疲劳裂纹以及局部变形。同时，河流水位和流速季节性变化还会加剧管道支撑条件不稳定性，将冲击荷载施加到高流速时的管体上，进一步增加管道整体失稳风险。

2.2 外部腐蚀与防腐层损伤

河流穿越段水下环境通常会呈现弱酸性或是含氧量波动条件，易对管道金属本体产生腐蚀作用，管道

外部防腐层在长期受到水流冲刷砂砾摩擦以及水体中微生物作用情况下，可能会出现破损剥落或是开裂情况，如果防腐层受到了损伤，管道金属就会直接暴露在水下环境当中，腐蚀速率会显著加快，进而形成局部腐蚀坑和穿孔，降低管道安全系数。除此之外，流体振动和外力冲击也会加速防腐层的劣化过程，管道在长期运行时存在潜在泄漏风险，及时检测防腐层完整性并采取局部修复措施，是保障穿越段安全的关键。

2.3 机械损伤

河流穿越段管道还面临第三方机械破坏风险，包括船舶抛锚河道疏浚作业以及其他水下施工活动，这类外力作用可能会造成管道局部碰撞划伤或是凹陷，严重时还会破坏管道结构完整性，机械损伤往往具有突发性以及不可预测性，它危害性要比常规腐蚀问题更大，易引发泄漏或爆裂事故。同时，水下检测难度较高，机械损伤在初期往往不容易被发现，此过程增加了事故发生隐患，因此开展河道施工行为监控工作划定保护区以及加强水下巡检，是降低机械损伤风险必要措施。

3 水下检测关键技术原理与方法

3.1 水下机器人（ROV）集成检测系统

水下机器人（ROV）集成检测系统是一种高效且精确的河流穿越段管道检测手段，它核心在于把载体平台导航定位系统以及多种探测载荷有机整合起来，实现管道实时定位埋深测量以及环境监测，载体平台通常会选用长度约 2–3 m、宽度 1 m、排水量 500–700 kg 电动或是液压推进型结构，它具备最大潜深 100 m 作业能力以及最高航速 2 m/s，这样就可以在复杂水流环境下稳定运行。

导航定位部分主要依靠多波束多普勒速度测量（DVL）以及超短基线声学定位系统（USBL），同时把管道相对精度 ±0.05 m、绝对精度 ±0.2 m 三维位置测量工作给实现出来，还可结合惯性测量单元也就是 IMU 去修正姿态误差，探测载荷则包括了高分辨二维/三维声呐侧扫以及剖面成像设备，其中二维声呐侧扫能够覆盖宽度 30–50 m 河床区域，分辨率可以达到 10 cm；而三维声呐剖面成像则可以提供 ±5 cm 管道埋深精度以及河床形数字化模型。

核心技术方面，高精度管道定位与埋深测量技术凭借融合声呐回波、DVL 流速数据以及 USBL 定位信息的方式，完成管道管体中心线精确提取和悬空裸露区域自动识别这两项任务，二维/三维声呐成像能够对管道外护层完整性局部腐蚀以及河床形态变化开展实时监测，为管道加固和防护措施提供量化依据，该系统同时还可以集成高清摄像头，辅助视觉检测管道焊缝及防腐层表面状态，并且实现声学与光学数据多模态融合分析。

3.2 管道外腐蚀与阴极保护（CIPS/DCVG）检测技术

管道外腐蚀以及阴极保护检测主要依托 CIPS（Close Interval Potential Survey，密间隔电位测量）和 DCVG（Direct Current Voltage Gradient，直流电位梯度）这两项技术开展，并借助水下机器人（ROV）实现高效检测工作，水下阴极保护电位测量通常会选用接触式探头或者近场感应探头，管电位测量范围一般设定为 −1.2 V ~ 0 V，相对精度能够达到 ±10 mV，ROV 可以沿着管道每隔 1–2 m 进行连续测量工作，采集电位分布曲线，并且还能对阴极保护系统有效性以及管道保护覆盖率进行评估。

电位梯度检测被用来识别管道防腐层缺陷，ROV 搭载探头沿管道横向扫描，把直流电位梯度测量出来，梯度峰值通常就对应涂层破损或者金属裸露区域，它的分辨率可以达到 ±0.1 m，便于精确定位腐蚀风险点，同时借助 GPS/USBL 定位，还能生成管道沿程电化学状态图，实现裸露区、薄弱保护区以及潜在腐蚀点的精确标注，为局部修复和阴极保护优化提供可靠数据支持[1]。

3.3 声学与超声波检测技术

管道水下声学以及超声波检测技术，是开展河流穿越段安全评估的重要手段，主要被用来进行管体壁厚测量、泄漏监测以及几何变形评估，管体壁厚检测通常会选用超声波测厚仪即 UT 来开展，其探头频率处于 2–5 MHz 之间，能够实现 ±0.1 mm 的壁厚分辨率，用它来评估局部腐蚀减薄情况，ROV 搭载多点超声测厚阵列后，就可以沿着管道每隔 0.5–1 m 进行扫描，形成管道沿程壁厚分布图，同时实现早期腐蚀监测和寿命评估。

在泄漏检测方面，分布式光纤声学传感（DAS）以及水下声学阵列能够实现实时监测工作，DAS 系统会将光纤沿管道布设，布设长度可以达到数百米直至 1 km，并且借助声学扰动来检测泄漏异常信号，其灵敏度可以达到 μPa 级，还能捕捉到由微小气体或液体泄漏引起的水下声波特征，水下声学阵列则是凭借多通道水听器，对流体异常流动或气泡声进行定位，定位精度可以达到 ±0.5 m。

对于可清管管道，可以选用智能清管器即 PIG 去开展内检测工作，PIG 能够集成磁通泄漏也就是 MFL、惯性导航也就是 INS 以及超声波壁厚检测模块，它将管道几何变形和缺陷的测量精度提高到 ±2 mm 水平，适合用于开展穿越段管道完整性评估工作，对于“不可清管”管道，创新方案运用模块化可回收水

下机器人内检测技术，凭借微型推进与传感模块，结合声学或超声波传感器，完成局部几何变形和.腐蚀状态的监测工作，适合在没有发射/接收设施的复杂河段环境中使用[2]。

3.4 河床演变与水动力安全评估

河流穿越段管道安全状况，不仅会受到管体本身情况影响，也会受到河床演变以及水动力作用制约，借助多波束测深系统来获取河床高程数据，分辨率可达 ±0.1 m，结合水文监测数据也就是流速 0–3 m/s、水位 0–10 m 来建立河段水动力模型，常用模拟工具为 HEC–RAS，能够对不同流量工况开展短期洪水冲刷以及长期泥沙淤积演变模拟工作，并且分析管道埋深变化趋势。模拟结果能够预测管道可能会裸露或悬空的高风险区域，还会对冲刷深度以及淤积厚度进行量化，在高流速 2 m/s 区段里，3 年平均冲刷深度就有可能达到 0.5–0.8 m，这样就能对水下监测布点以及重点监控工作进行指导，借助将模型预测和实测数据相结合的方式，则可形成河床演变风险图，为管道加固防护设计以及日常检测提供科学依据，实现穿越段安全管理动态化与数据化[3]。

4 检测实施流程与关键环节

4.1 前期调查与方案设计

在开展水下管道河流穿越段检测工作之前，前期调查以及方案设计是整个流程的基础，也是其中关键环节。要收集管道穿越设计资料，包括管径、管材焊接方式和、埋深设计以及沿线防护措施。与此同时，还要获取河段水文水质数据、河床形态剖面、流速水位变化、泥沙类型以及厚度，并且对历史检测记录和施工记录进行分析，以此识别出已知风险点以及敏感区域。基于这些收集到的资料，再结合风险评估方法，就能确定检测目标和优先级，把重点监控区域和常规监控区域区分开来。在方案设计阶段，还要根据管道类型、水深、河流流速以及河床条件，选用合适的检测技术组合，如运用水下机器人、超声波测厚、声学探测、分布式光纤声学传感以及阴极保护电位测量等[4]。

4.2 现场作业实施

现场作业实施阶段是整个水下检测工作的核心，需要综合考虑水文以及气象条件，选用合适的作业窗口，以保证水流流速、水位以及能见度适宜，确保作业安全。导航与定位是保证数据准确性的重要环节，通过建立高精度水下定位坐标系，融合多普勒速度测量（DVL）、超短基线声学定位（USBL）以及惯性导航系统（INS）等手段，实现管道三维位置的精确控制。以预定路径为依据开展多传感器同步采集工作，即数据采集，采集内容包括声学侧扫和剖面成像、超声波壁厚测量和、阴极保护电位测量以及视频图像采集等。同时开展实时数据质量监控工作，避免漏测、数据丢失以及干扰影响，确保检测区域覆盖完整。如果遇到特殊河段，如流速大或者水深变化明显的区域，应采用多次重复扫描来提高可靠性。此阶段还需要配合安全监控措施，包括水面指挥监控、作业人员安全保障以及设备防护，确保作业过程高效安全[5]。

4.3 数据处理、分析与评估

数据处理与分析评估是将采集到的多源数据转化为可用信息的关键环节。要开展数据融合工作，对声学图像、壁厚测量数据和、阴极保护电位数据以及定位信息进行空间对齐和时间同步，生成管道沿程的完整数字化模型[6]。在此基础上开展缺陷识别与量化工作，借助图像处理和人工智能算法自动识别管道悬空、外露、腐蚀、减薄及焊缝缺陷等异常现象，并且对异常区域的尺寸、形态和位置进行量化分析，提供可视化报告。最后开展完整性评价工作，综合各类检测结果对管道整体结构状态进行评估，包括当前安全等级、管道剩余寿命预测以及风险分布分析，为管道维护和加固决策提供科学依据，同时还为后续定期监测提供基准数据。

5 结束语

综上，结合河床演变及水动力模拟可识别高风险区域，为检测重点和管道加固提供依据。研究结果表明，系统化、智能化的水下检测方法能够为河流穿越段管道安全管理提供科学支撑，并为长期维护和剩余寿命预测奠定基础。未来可进一步优化检测方案，提升无人水下平台作业效率及数据处理自动化水平，以应对复杂水文地质条件下的管道安全挑战。

参考文献：

[1] 吴超，刘中迪，王子，等．输气管道河流穿越段水下检测技术 [J]. 管道保护 ,2025,2(5):66-72.

[2] 何沫，陈涵，吴文莉．基于多次校准的绝对电磁法河流穿越管段敷设状态检测技术应用研究 [J]. 内蒙古石油化工 ,2024,50(2):82-86.

[3] 肖生彩，张春霞．试论金属检测技术在水质监测中的应用 [J]. 皮革制作与环保科技 ,2024,5(8):56-58.

[4] 周兆明，张佳，杨克龙，等．输气管道泄漏检测技术发展及适应性 [J]. 油气田地面工程 ,2019,38(1):7-12.

[5] 崔省安，李德升，李群升，等．漏磁式智能检测技术在输气管道上的应用 [J]. 科技创新导报 ,2020,17(6):16,18.

[6] 孙媛，陈曦，周诗岽，等．水下输气管道泄漏扩散行为研究 [J]. 常州大学学报 (自然科学版),2025,37(2):52-61.