

机器人技术在水下隧道与管道非排水式检测中的探索与实践研究

黎智聪（国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司，广东 茂名 525000）

摘要：在役水下隧道以及隧道内的管道设施因其特殊的运行环境，运行工况不能直面掌控，风险应对无法制定针对性的整治措施，运营管理存在较大的安全和管理风险。现阶段，国内水下隧道穿越段管道运营管理既缺少行业检修标准且检测技术也不丰富，传统的抽水检查法的特点是成本高、周期长，所以水下隧道内管道检测新技术探索和应用已成为管道运营公司迫切性需求。国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司广东输油一部茂阳作业区借鉴海底管道使用水下机器人技术检测案例成果，提出长距离在役水下隧道检测使用水下机器人技术的假设，考虑到水下隧道内空间环境和设施构成的复杂性，经过全面的风险分析、对检测工艺和技术指标充分论证，广泛调研水下机器人设备并进行深度的拟用类型比选，在罗江水下隧道进行大胆的实践，成功获得真实运行工况数据，为水下隧道运行管理奠定坚实的基础。

关键词：机器人；水下隧道；非排水式检测

1 研究背景

目前国内外油气管道穿越大中型河流隧道分为水下隧道和干式隧道两类，约90%以上为水封运行方式。长期注水运行环境下，受设计、施工水平等因素影响，隧道和管道会出现不同程度问题，如隧道结构沉降、开裂致稳定失稳，管道补口失效引发腐蚀，牺牲阳极过度消耗致阴极保护系统失效，管道钢构件等附属设施防腐失效致管道漂移，运营管理安全和管理风险大。在役水下隧道及隧道内管道附属设施运行环境特殊，工况难掌控，风险应对难及时制定针对性整治措施。国内少数运营公司采用传统抽水检查工法，费用高、周期长，导致水下隧道运行管理经验积累不足，安全风险认识不全面。国内管道运营公司水下隧道投用时间不同，行业未发布油气管道水下隧道检测维修标准，新检测技术工法缺乏创新依据。且因掌握运行工况数据不足，难以准确评估运行状态和潜在风险。此时，非排水方式检测水下隧道重要，可在不影响正常运行前提下获取更准确数据。全面掌握真实运行工况以削减安全风险，是管道运营公司当务之急。

2 研究目标

以水下隧道、管道及其附属设施的运行管理实际需求为出发点，探索应用科学、经济、实用的检测新技术及综合检测方案。通过实践验证该方法论可行性，为其运行管理及维护维修策略制定提供科学依据。推广新工法在水下隧道运行管理中的应用，借助检测指

标和实际工况数据的收集积累，促进业内水下隧道检测、维修作业规程或标准的制定颁布。

3 主要研究内容和结论

从安全性、经济性和有效性等方面对比水下机器人技术检测工法与传统抽水检测工法，确定水下隧道采用水下机器人技术的检测项目及指标。鉴于水下隧道内设施复杂，论证水下机器人设备选型和检测工艺，全面分析检测作业风险。以“国家管网华南分公司广东输油一部茂阳作业区罗江水下隧道非排水方式检测项目”为例，获取隧道结构完整度与稳定状态、管道附属设施钢构件防腐层及指标数据并对比解析。结果表明，水下机器人技术检测水下隧道内设施工况具有可行性和实效性。

3.1 现状分析

经咨询与查阅，国内部分管道运营公司的水下隧道检测技术主要有抽水检查法与饱和潜水检查法。抽水检查技术需处理好受限空间作业的抽水、照明、通风等安全问题，单次检查投入大、周期长，且因难掌握隧道内运行状况，成效不确定性大，若检查后无需维修且风险低，易造成资源浪费。饱和潜水检查技术因水下隧道封闭性强、空间狭窄、长度长、设施结构复杂，潜水员人身安全风险极高。水下机器人检测技术相比传统方式风险小、成本低、耗时短，可获取全面宏观检查结果，为维修策略制定提供有力支撑。

水下机器人检测技术优势显著：①能避免抽水检

测的不确定性和低效回报，相比传统检测方式，大幅降低检测作业安全风险；②可及时发现水下隧道内设施运行的潜在隐患，以先进技术手段准确提供实际运行工况，为管理者决策提供有力依据。管理者依此采取针对性维修行动，防止隐患扩大，保障运营安全，减少资源浪费，提高水下隧道检测与维护的效率和质量。

3.2 水下机器人作业工艺方案

3.2.1 水下机器人作业风险分析

依据水下机器人运行原理，鉴于隧道内设施构造复杂、障碍物多且密闭空间狭小，经充分研讨分析，水下机器人检测作业主要有四项风险：①防止搅动水下悬浮物以保证拍摄效果清晰可用；②水下隧道存在盖板涵等设施导致作业空间受限；③提供续航能力以保证机器人动力持续性和检查完整性；④防止信号中断以确保对机器人设备的运行操作控制。任何一项风险发生都可能致使检测任务失败，故本项目制定了针对性风险应对措施。

3.2.2 水下机器人设备选型

表 1 ARV 主要技术参数

名称	参数
隧道检测机器人	尺寸：480x267x165mm； 重量：≈ 5.7kg；电池：300Wh； 最大深度：150m；续航时间：最长 4h； 工作温度：-10℃ ~45℃； 负载（向前 / 向上 / 侧向）：3.9/3.2/3.0kg
相机	最大图像分辨率：12 兆像素； 图像格式：JPEG/DNG； 视频：4K/1080P； 视频格式 MP4；SD 卡：128G
LED 灯	亮度：2x2000 流明； 色温：5000K-5500K； 显色指数：85；调光：三档

依据水下机器人行业的调研情况，充分考虑适用领域、操控方式、续航能力、传输方式的不同。充分考虑水下隧道斜井、横廊的内部环境工况条件和充分的作业风险分析，选择较适合使用体积较小的水下机

器人。本项目选择 ARV 型水下机器，主要技术参数见表 1。

3.2.3 水下机器人检测项目设定

水下机器人检测项目和内容必须以隧道运营管理功能需求为核心，可以直观反映出隧道内各种设施的运营工况变化状态，检查比例应具有一定代表性和说明，分析和结论提供最有力的支持作用。水下机器人检测内容见表 2。

3.3 隧道检测工艺确定

检测工艺，水下机器人先沿井壁由人工放置水面下，开启检查。检测井内隧道、盖板涵、管道、管托、管支架等设施工艺，水下机器人自水面到水底垂直顺时针、逆时针交替向下检查，每次检查覆盖 10% 前次检查范围，每圈下潜半米。检查过程尽量降低推进器使用，避免造成水质过于浑浊影响录像和照相质量，检查过程中对所有水下检测区域录像，异常位置拍照检查，确保规定位置覆盖检查。

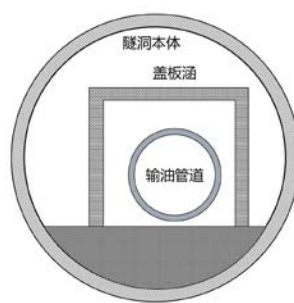


图 1 隧道及内部管道设施

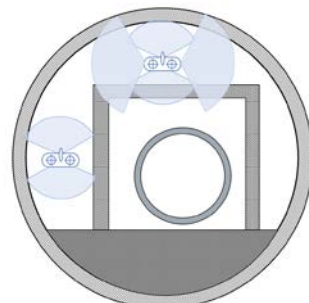


图 2 水下机器人检测工艺

3.4 隧道检测工艺确定

隧道顶部检测工艺：水下机器人悬浮于隧道正上方，沿盖板涵直行方向行走，通过摄像机向上下、左右观察、检测，并且可将拍照摄像机进行拍照。隧道侧部检测工艺：在空间允许条件下，将水下机器人调整到管道一侧靠走道处，顺着盖板涵行走，向管侧左、右进行观察、检测，并且可将拍照摄像机进行拍照。附属设施检查：水下机器人定深功能开启，将机器人转至相应的姿态进行检查。

表 2 水下机器人检测内容

检查项目	检查要求
隧道洞身全视检测	重点检测混凝土剥离、露筋腐蚀、裂缝的情况
隧道内输油管道防腐层表面全视频并加拍照检测	检测防腐层破损、剥落、刮伤等
混凝土剥离、露筋腐蚀、裂缝的情况	检测补口处防腐层剥落、起鼓、破损、刮伤等
管卡表面防腐层表面全视频并加拍照检测	检测管卡断裂、缺失及防腐层剥落、起鼓等
管卡紧固螺栓表面锈蚀度全视频并加拍照检测	检测螺栓缺失、断裂及防腐层剥落、破损等
支座表面防腐层全视频并加拍照检测	检测管托缺失、断裂及防腐层剥落、破损等
隧道内其他设施的外观检测	如果发现异常，异常点加拍照片
检测发现的其他异常问题	应加拍照片，并充分体现出问题特征
安全评价	依据相关基础数据及检测报告对隧道及成品油管道运营安全状况进行评价

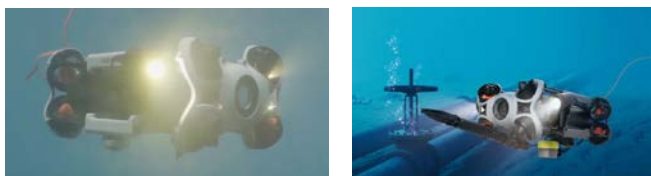


图3 ARV 检测示意图

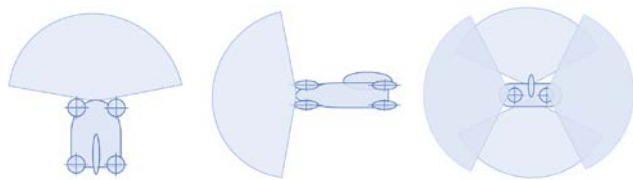


图4 ARV 视觉范围覆盖示意图

3.5 机器人技术在罗江水下隧道非排水方式检测项目中的实践

3.5.1 罗江水下隧道概况

国家管网集团华南公司广东输油一部茂阳作业区罗江水下隧道共计穿越长度约450余米(江底水下约202m),隧道拱形面高度为2.3m,该隧道于2003年建成投用,隧道内运营有406mm的成品油管道。图5为隧道剖面示意图。



图5 罗江水下隧道剖面示意图

3.5.2 水下机器人检测方案和成果

结合罗江水下隧道斜井及横廊工况,参照相关内容和数据,确定采用ARV检测工法,设定隧道及附属设施、管道及附属设施两大类检测项目,隧道分6子项,管道分7子项。历经30天紧张有序的检测作业,罗江水下隧道非排水方式检测取得录像7段、照片892张等成果。管理团队仔细观察机器人传输图像,查看关键部位图像,专业分析后完成综合分析报告和安全评价报告。典型缺陷包括:隧道端部拱顶混凝土保护层脱落,疑似金属拱顶锈蚀;隧道结构钢筋裸露、锈蚀;隧道结构表面附着物发育较普遍;套管绝缘支撑缺失、未做填充处理、锈蚀;管道防腐层破损,疑似裸露母材;管卡及紧固螺栓表面锈蚀;管道防腐层破损,疑似裸露母材;管卡及紧固螺栓表面锈蚀;管道附属盖板表面异物较多。

3.5.3 安全评价与安全措施建议

针对本次检测结果安全评估,主要对罗江水下隧道检测过程中发现的病害风险进行评估,主要目的有:①对其安全状况给予客观的评估;②对存在的问题提出合理可行的安全对策措施。

3.5.4 隧道及隧道附属设施安全对策措施

基于机器人水下检测结果,如不进行抽水后的全面检查,则建议隧道两端陆岸部分各增加地面监测点,定期对运营隧道穿越段进行监测。如进行抽水后的全面检查,则采取:①建议隧道端部拱顶金属弧板防腐处理,恢复混凝土保护层;②建议针对隧道内部结构不同部位出现的直钢筋或钢筋网裸露及锈蚀,对结构钢筋进行防腐处理,恢复混凝土结构;③建议拆除及清理所有隧道结构原金属附属物,与隧道结构接点防腐处理并环氧砂浆涂覆;④建议拆除及清理隧道内杂物;⑤建议在全面检查过程中增加对隧道结构的相关检测。

3.5.5 管道及管道附属设施安全对策措施

管道管理单位应依照《油气输送管道完整性管理规范》(GB32167-2015)规定,定期开展管道内、外检测工作。隧道穿越管道运行期管理重点在于主管道外腐蚀控制。考虑水下细菌繁殖对管道外腐蚀的影响,借助管道内检测成果,分析评估隧道穿越管道本体是否存在超标缺陷,及时进行补强处理。依据管道外检测成果,判断隧道段管道阴极保护水平和交直流干扰强度,采取必要措施,确保管道外腐蚀得到有效控制。

3.5.6 实践结论与建议

通过机器人技术在罗江水下隧道非排水式检测项目实践,检测成果直观反映隧道、管道运行工况,基本覆盖运营管理的核心指标。同时验证了机器人技术检测在役水下隧道切实可行的结论。据此,建议服务商增加机械臂、定位扫描设备等,以使测量更精确直观,为水下隧道与管道检测提供更强技术支持。

4 结语

国家管网华南分公司广东输油一部茂阳作业区基于水下隧道运营管理的迫切需求,运用创新管理思维探索出检测解决方案,创新并完善了水下机器人非排水式检测工法。检测数据实时、直观、真实,为水下隧道与管道设施的维护维修策略的制定提供了直观的科学依据,该法对国家管网内水下隧道运行管理具有一定推广价值。水下机器人技术检测工法隐含的安全收益和维修策略收益都是巨大的,基于检测的维修在经济效益和管理科学性上优于周期性维修策略,也符合现代运营管理理念。

参考文献:

- [1] 陈元杰,葛锐,孔新雄,等.水下机器人测试及相关机构介绍[J].计测术,2014,34(5):5.
- [2] 李硕,赵宏宇,封锡盛.中国深海机器人研究进展与发展建议[J].前瞻科技,2022,1(2):49-59.