

水下管道腐蚀检测技术 在长江穿越管道的成功应用

高志贵

(天津嘉信技术股份有限公司 天津 300384)

摘要: 天津嘉信技术结合积累多年的管道检测技术经验,融合多种先进技术,历经七年的研发与改进,开发出江河水下管道外腐蚀检测系统 River-ROV,并通过 40 余条穿越江河管段检测工程的成功实施,有效地提升系统的性能和适用性。尤其是金陵石化两条穿越长江的水下管道,江水深流速大、江面宽度航运繁忙,检测项目极具挑战性。本文对 River-ROV 系统的升级成果进行了描述,以金陵石化穿越管道检测项目为案例,展示出该系统优秀的性能和良好的适用性。

关键词: 水下管道、腐蚀检测、水下机器人、River-ROV

1. 引言

随着我国经济的快速发展,作为重要的能源输送手段之一的长输油气管道也在大规模进行着建设,其中穿越江河等水体的管道数量也在逐年增加。穿越水体的管道往往采用定向钻+拖管的方式进行铺设,主要采用加强级防腐层和外加电流阴极保护。穿越施工过程中,因地质条件、多次反复拖拽等状况可能会使得管道外防腐层损伤严重,加之穿越段防腐层没有修复条件,只能依靠阴极保护方法来控制管体的腐蚀。而且,目前应用于陆上管道的地面检测方法无法应用到江河穿越段管道检测。致使管网运行单位对江河水下管道外防腐以及阴极保护情况无法掌握,这样的管理盲区给管网运行安全带来巨大隐患。

目前国内外对水下管道检测的技术手段包含潜水员水下作业、ONE-PASS 技术、PURE 技术和 ROV 技术。潜水员下潜至水底进行检测时,检测设备需要和管道表面进行接触,检测的条件比较苛刻不易满足,另外这种检测的周期无法保证,安全风险高,因此不具备普及的条件;ONE-PASS 技术属于水中检测技术,对管道施加交流信号后通过在水中拖拽接收器,蛇形游走来定位管道位置,其检测结果仅能提供位置信息,无法满足外腐蚀检测需求;PURE 技术属于水面检测技术,同样对管道施加交流信号,在载具上使用接收器进行定位和测深,找到管道位置后将参比电极用探杆将其插入水底测量阴保数据,该技术仅适用于水深较浅,管道埋深小于 20 米的环境。ROV 技术属于水下检测技术,将接收器和参比电极搭载到机器人上,下潜至水底,通过推进器控制其移动,定位管道后获取管道埋深、阴保等数据,适用环境更为广泛。

2. River-ROV 系统简介

天津嘉信技术自 2011 年初开始了水下管道外腐蚀检测项目,将用于深海管道检测的 ROV (Remote Operated Vehicle) 技术,与陆上埋地钢质管道检测技术相结合,历经 3 年时间研发出专门应用于江河水下管道外腐蚀检测系统 River-ROV。此后通过与管道运行单位的合作,在包括长江、黄河、珠江等不同的河流穿越环境中进行检测,针对检测过程中遇到的问题不断将设备进行完善,2017 年底定型。River-ROV 系统整合管道定位、埋深测量、阴保电位 CIPS 测量、电位梯度 DCVG 检测、网络通讯、GNSS 定位、数据库及检测数据分析等技术手段,可对埋

深 40m、水深 100m 的水下管道进行管道定位测深、外防腐和阴极保护状况评估，为管道的安全运行提供的数据支持，有效控制管道发生失效风险的可能性，保障油气管线的安全运行^[1]。



图 1 River-ROV 系统组成

3. River-ROV 检测技术的后期改进工作

1) 定位测深技术改进

River-ROV 管道定位测深系统应用有源电磁探测方法，起初采用的是定型的 PCM 上下两个单一的水平线圈，组合成测量系统，此时测量需要线圈与管道走向垂直摆放，才能有效实施定位和测深，这对 ROV 的水下姿态提出了很高的控制要求，大大影响了检测的效果和效率。采用双正交矢量线圈组合方式替换原有测量系统，使用线圈矢量测量方法来获取管道上方所施加信号的分布情况，避免了因 ROV 姿态差异导致的测深精度差的现象，使得水下机器人可以在任意航向角下精确定位管道的位置和测量埋深。River-ROV 可实时显示定位信号强度和管道埋深，方便对管道的测量及追踪。通过先进的信号处理技术，River-ROV 实现了对大埋深管道水下定位和深度的精确测量，目前具备水下 40 米埋深管道的探测能力。

2) 声纳检测技术的应用

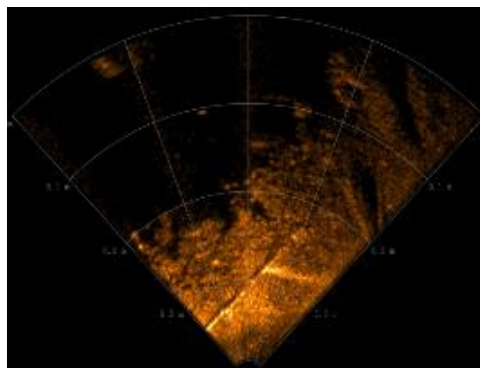


图 2 2D 成像声纳检测

声纳是利用水中声波对水下目标的反射进行探测、定位和通信的电子设备，是水声学中应用最广泛、最重要的一种装置。在江河水体能见度较低的情况下，River-ROV 通过 BlueView 的 2D 声纳可以观察周围的环境情况，一方面可通过声纳判断 ROV 在水下的位置及运动状态为用户提水水下环境状况，起到避障作用；另一方面可以通过观察判断管道是否存在管道悬浮、冲刷等埋设情况^[3]。

3) GNSS+INS 捷联式导航技术的应用

GNSS 系统(全球导航卫星系统, Global Navigation Satellite System)是便捷的地理坐标获取方式。但是基于如 GPS、北斗等导航定位系统广播的无线电信号,无法在水中传播,不能实现水体下管道位置坐标的直接获取。当前主要有两种水下管道坐标获取的技术方法:一是在母船上安装超短基线设备,水下 ROV 上用换能器接收声呐的定位信号,实现水上 GNSS 天线与水下 ROV 位置的测量,进而换算出水下的坐标。该方法获得的位置坐标的精度受超短基线设备定位精度的局限,很难达到管道位置坐标的亚米级精度。此外,超短基线设备十分昂贵,测量流程相对复杂,极大地限制了江河水下管道位置坐标获取的广泛。

获取水下管道坐标的另一种方法是,采用 GNSS+INS 捷联式导航技术来实现。其测量流程是:在完成 ROV 水下管道定位后,将 ROV 从水底上浮到水面,使用卫星天线实施坐标的精确获取,再通过惯性导航设备精确计算出 ROV 从管道上方浮到水面过程中 ROV 的位移值,精确计算出水下管道的位置坐标。惯性导航是一种自主导航方法,它是通过测量运载体本身的加速度来获取载体的速度位移等数据。根据牛顿惯性原理,利用惯性元件(陀螺仪、加速度计)测量出运载体的加速度,由欧拉角法,利用姿态矩阵将运载体系加速度转换为地理坐标系加速度,经过积分和运算,便可获得地理坐标系的速度和位移。在实际操作中,使用惯性导航系统记录 ROV 机器人从水底管道位置移动至水面位置过程产生的位移,结合搭载的 GNSS 系统记录的水面 GPS 天线的位置坐标通过换算,得出水下管道位置的精确位置坐标。该测量方法具有设备成本低、检测流程自动化程度高等优点。

4. 长江水下管道检测工程的成功实践

1) 水下管道检测的一般流程

River-ROV 检测系统对水下穿越管道进行检测时,首先需要对穿越管道进行现场勘查,确定入水/出水点处管道位置及深度,确定 River-ROV 投放和检测结束位置;其次在投放位置附近对 ROV 进行下水前的调试及检查工作,完成以上工作后将 ROV 投入水,由 ROV 操控人员通过岸上操控系统控制 River-ROV 在水下实施检测工作^[5];最后获取现场检测数据,使用嘉信公司的专业数据分析和评价软件对管道的腐蚀与防护状况进行综合评价。

2) River-ROV 长江管道检测的过程

2017 年 3 月对南京金陵石化的两条穿江管道(同期建设,2003 年投产至今已服役 15 年。穿越长江的水下管道部分采用定向钻方式完成,穿越长度设计 1870m。其中,粗汽油管道为 $\Phi 159\text{mm} \times 7\text{mm}$ 的 20#无缝钢管、设计压力 5.0MPa,由扬子石化输送至金陵石化;石脑油管道为 $\Phi 273\text{mm} \times 7.9\text{mm}$ 的 L290 直缝电阻焊钢管、设计压力 2.5MPa,由金陵石化输送至扬子石化。)进行检测。这个检测过程历时将近一个月的时间,其中只有两周的时间实施水面的检测数据获取。其他的时间因天气条件、航道管制、配合安全学习等活动未能更为高效地实施检测工程。此外,由于大跨度穿越江河的管道检测,对施加到管道上的检测信号要求极为苛刻,也使得在检测初期,在给管道施加有效检测信号的环节上,花费了较长的时间不断尝试。该工程成功地对管道的埋设位置、覆土深度、水深情况、铺设环境、外防腐层完好性、阴保有效性等项目实施了检测和评价,为管理运行单位进行管道运行安全性风险评估和制定后续管理维护计划提供数据支持^[2],受到了委托方的高度赞誉。

2.1 路由及埋深测量



图 3 River-ROV 测量管道路由及埋深



图 4 水下穿越管道 GPS 定位图

使用 River-ROV 检测系统对该处水下管道应用电磁法进行测量，所测得的管道埋深及水深检测数据曲线图如下：

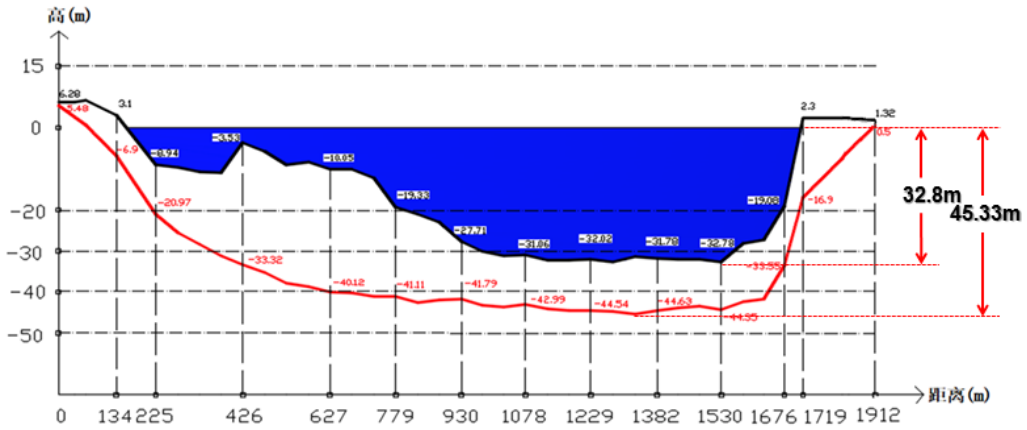


图 5 水下穿越管道埋深和水深测量曲线

使用 River-ROV 检测系统对水下管道路由进行探测，对管道埋深进行测量，以及 2D 声纳系统环境的成像，验证了石脑油和粗汽油管道穿越管段在水下的铺设情况及管道上方的覆土层情况：两条被检测管道水下管段没有出现管道悬跨现象，靠近港口的辅航道水深最大为 10.3 米，主航道水深最大为 32.8 米，石脑油管道穿越管段上方的覆土深度在 11.39m~28.63m 之间，粗汽油管道穿越管段上方的覆土深度在 11.25m~30.42m 之间，管道距水面最大深度为 45.33m。两条管道穿越管段的水下覆土层状况良好，满足管道安全运行的需求。

2.2 阴保电位及电位梯度测量

使用 River-ROV 检测系统对该处水下管道应用电场法进行测量，所测得的阴保电位及电位梯度数据曲线图如下：

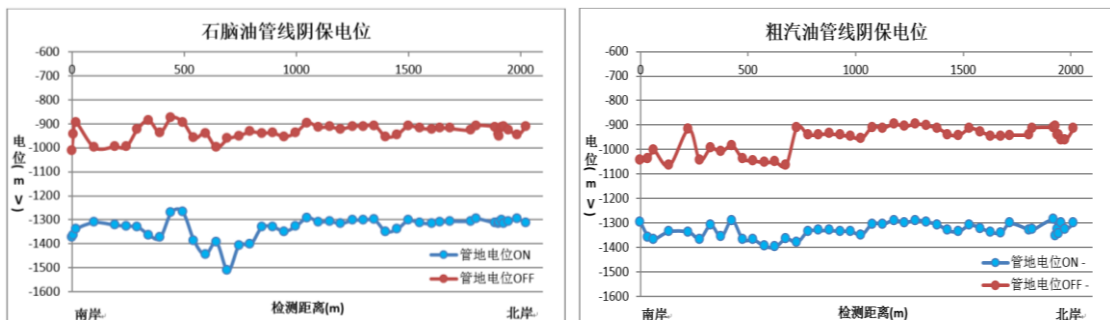


图 6 管道阴保电位测量曲线

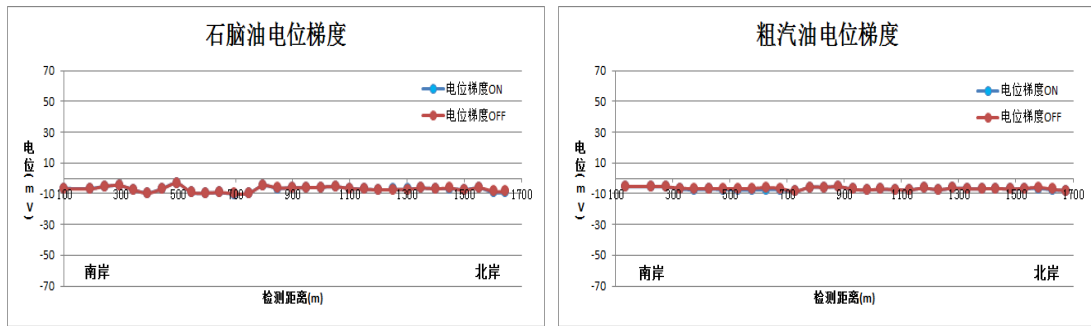


图7 管道电位梯度测量曲线

在阴保电位和电位梯度测量上，测得石脑油穿越管段阴保电位的测量值在-875.8~-1012.6mV (CSE) 之间，粗汽油穿越管段阴保电位的测量值在-896.2~-1066.0mV (CSE) 之间，均达到了有效保护。石脑油和粗汽油两条管道穿越管段上方的电位梯度值均在±10mV/m 以内，管道不存在明显的防腐层破损点，外防腐层的整体状况良好。

水下管段外防腐和阴保状况结论是：两条管道穿越管段无明显的防腐层破损点，阴极保护状况良好，能够有效保护管道的安全运行。

此外，基于穿越长江的水下管道腐蚀的成功实施，中国特种设备检测研究院委托天津嘉信技术参与了国家标准《GB/T 37369-2019 埋地钢质管道穿越段检验和评价》中江河水下管道腐蚀检测部分的重新编写工作。该标准已于2019年3月25日正式发布，10月1日实施。

5. 结论

随着多个穿越管段检测项目的开展，对水下穿越管段腐蚀检测需求的认识得以不断加深，嘉信公司面对各种检测中遇到的难题，持续攻关、不断改进，开发了双正交矢量线圈定位测深技术，集成了声呐2D成像技术，成功开发出GNSS+INS捷联式组合定位技术。并不断针对River-ROV系统中定位测深、腐蚀检测和GPS坐标采集等功能进行了完善和优化，为穿越管段的全面检测工程提供了一种适应性更强、稳定性更高、结果更准确的检测手段。

金陵石化穿越长江管道水下环境复杂，航道管理严格、江水流速大、穿越距离长；最大水深度达33米，是非常具有挑战性的检测环境。通过对管道铺设环境、保护电位、防腐层损伤等状况的River-ROV检测，为管理运行单位提供了穿越管段的腐蚀与防护状况的科学评价结果。运行单位可基于检测评价结果采取加大保护电流、补加牺牲阳极等方式提高管道保护程度，降低腐蚀事故发生的风险，从而保障水下管道的安全运行。可以相信，穿越长江管道外腐蚀检测项目的成功实施，使River-ROV系统的功能设置及实用性得到了很好的验证。

参考文献

1. 天津市嘉信技术工程公司： 江河水下管道外腐蚀检测系统 River-ROV 使用技术手册
2. 兰玉明等：金陵石化穿越管道检测报告，天津市嘉信技术工程公司。 2017年3月
3. 于桂菊：ROV在沿海领域应用研究，中国测绘学会海洋测绘专业委员会研讨会论文集， 2010年10月
4. 张爱军：水下潜器组合导航定位及数据融合技术研究.南京，南京理工大学博士学位论文， 2009；P75
5. 张杰：在海洋石油工程项目中ROV的基本运作模式， 中国造船， 2007年11月，第48卷增刊