

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.021

# 基于BIM和3D扫描的长距离曲线钢管内穿修复技术

龙桂华, 欧阳桢, 胡鹰志, 黄春潮  
(深圳市市政工程总公司, 广东 深圳 518009)

**摘要:** 随着城市的发展,地下管线老化引发的社会问题日渐凸显,地面交通拥堵和管线错综复杂使得明挖换管成为城市管道修复亟待解决的难题。以笔架山水厂-东湖水厂原水管道修复项目为例,研究了基于BIM和3D扫描的长距离曲线条件下钢管内穿非开挖施工方法,通过3D扫描和BIM技术实现原水管道的空间定位、最优井位布置和管节长度设置,特制的承插接口满足原管道曲率要求。实际施工过程表明,该技术的运用大大减少了工作井的数量,降低了管线迁改对交通的影响,取得了较好的经济和社会效益。

**关键词:** 刚性管道; 非开挖修复; 三维扫描; 钢管内穿

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)16-0125-04

## Steel Pipe Slip Lining Rehabilitation under Long-distance Curve Condition Based on BIM and 3D Scanning

LONG Gui-hua, OUYANG Jian, HU Ying-zhi, HUANG Chun-chao  
(Shenzhen Municipal Engineering Co., Shenzhen 518009, China)

**Abstract:** With the development of cities, the social problems caused by the aging of underground pipelines are becoming increasingly prominent. The surface traffic congestion and the complexity of pipelines make the open cut pipe replacement a problem to be solved urgently. Taking the raw water pipeline repair project from Bijiashan waterworks to Donghu waterworks as an example, this paper studies the trenchless construction method of steel pipe under the condition of long-distance curve based on BIM technology and 3D scanning. With the help of 3D scanning and BIM technology, it realizes the spatial positioning of raw water pipeline, the optimal well location layout and pipe joint length setting, the special socket interface to meet the curvature requirements of the original pipeline. The actual construction process shows that the application of this technology greatly reduces the number of working wells, reduces the influence of pipeline relocation and traffic, and achieves good economic and social benefits.

**Key words:** rigid pipe; trenchless rehabilitation; 3D scanning; steel pipe slip lining

由于年久失修、原埋设管材质量不达标、施工作业不规范、环境条件受限制、运营维护不到位等原因,导致现状给排水管道存在大量的三级以上的功能性和结构性缺陷。这些病害缺陷若得不到及时修复,可能会进一步恶化,严重时将影响管道过流能力、引发路面塌陷,继而危及人民生命财产安全。

管道修复不具备开槽敷管条件时,现行主流的

穿插法是一种既能保证原管道结构性缺陷有效修复、独立承受内外压力荷载,又能确保水质安全的较理想的非开挖技术。梁豪等<sup>[1]</sup>利用地面注浆技术,使破损塌陷的钢筋混凝土排水管两侧形成止水帷幕,继而利用机器人切割、预制承插式钢环顶进的方式恢复管道结构和过流断面,最后进行防腐内衬修复以恢复原管道的供排水功能。袁学军等<sup>[2]</sup>针对原

DN200混凝土管老化问题,采用DN1800玻璃夹砂管内穿技术进行原位修复。此类方法常用于解决管道局部修复问题,但修复时管道的流水断面损失大、注浆情况不易确认,特别是当管道破损距离长且位于曲线段时,常规穿插法则存在诸多局限。

笔者从混凝土管道刚性内穿出发,应用3D扫描和BIM建模技术,优化了工作井位置和管节长度,使深圳市笔架山水厂-东湖水厂长距离混凝土管钢管曲线内穿成为现实,可为同类项目提供案例借鉴。

## 1 问题的提出

选取笔架山水厂-东湖水厂DN1200原水管修复工程作为研究对象,该工程是将两厂之间原有废弃的原水管改造成清水转输管,以满足在东湖水厂扩容改造产能下降时罗湖片区 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的供水缺口需求,以及两厂之间清水调度的需要<sup>[3]</sup>。经CCTV检测发现,原水管破损管材大部分为长距离曲线钢筋混凝土管,部分过河、铁路等处为钢管,管道修复不仅需要保证长距离曲线管道修复质量,还须妥善解决混凝土管修复后与部分钢管的连接问题。由于大部分管线位于主干道与辅道之间的绿化带内,不具备开挖修复条件,难以采用明挖法对其进行修复,且当长距离曲线清水管改造为带压供水管时,常规内衬法也往往不适用。

通过研究确定:以先进的架站式3D激光扫描仪获取的高精度密集点云数据为基础,准确获取管道的走向及坐标信息,并借助BIM软件构建管线碰撞模型,对区域内供水管道曲率进行分析。根据现场实际情况,拟定钢管内穿修复方案。

## 2 工艺原理及流程

对原病害混凝土管道进行钢管内穿修复的原理:利用刚性内衬与原混凝土管之间存在的间隙,借助3D扫描与BIM建模技术进行新旧管道碰撞模拟,通过借转接头实现钢管在原混凝土管内的曲线拼接,经焊接和灌缝后形成恢复机械性能的“管中管”复合结构。

主要施工工艺分为2部分:①基于3D扫描和BIM技术的勘察测量技术。对原管道全程进行管内详细勘察测量和内部状态评估,采用先进的架站式3D激光扫描仪对现有管道进行测量和扫描,借助BIM软件建立原管道精确的三维模型,获得管位、走

向、埋深、水平和纵向曲折等精确的信息,从而确定每个施工段的工作井位置及优化管节长度。②长距离曲线钢管内穿施工技术。在不均匀沉降产生水平和纵向曲折的工段,研发形成新的适合钢管段连接的借转承插接头,然后在工作井内通过卷扬机将有承接接头的钢管拖入混凝土管内进行对接承插焊接,焊缝检测和功能性试验完成后,再用高流动性无泌水的孔道压浆料填充两管之间环向间隙固定钢管,从而完成管道结构性修复。

## 3 工程应用

### 3.1 工程案例

笔架山水厂-东湖水厂原DN1200原水管总长约7 km,因供水规划原因已废弃多年。为满足东湖水厂扩容改造期间罗湖片区供水缺口需求,需要废物利用,将其改造成清水转输管用于两厂自来水资源调配,以满足罗湖片区供水需求。改造主要采用钢管内穿和防腐涂料喷涂等修复工艺,经过CCTV检测,需要钢管内穿的原混凝土管长度约3.2 km。进行钢管内穿,原设计需要 $7.0\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 的工作井24座, $\varnothing 3.0\text{ m}$ 接收井18座,通过3D扫描结合BIM优化设计后,工作井减少到21座,接收井减少到4座。

#### 3.1.1 基于3D扫描和BIM技术的勘察测量技术

##### ① 管道3D扫描与BIM建模

管道内腔采用FARO Focus 350三维激光进行勘测和扫描,具体实施过程为:每隔5~10 m设置一个扫描站,扫描站发射激光束,经管壁反射回传感器后获得反射点的空间位置。点云数据可通过管内设置的标靶球或点云的重叠度,利用SCENE软件进行降噪和拼接,并根据各井口处布置的3~4个控制点转换到黄海独立坐标系中。在实施过程中,标靶球作为管腔内的控制点,决定着换站扫描点云的拼接质量,因此在换站过程中,扫描站前面的标靶球应固定不动,后面的标靶球则应根据扫描站的换站逐步向前交替布置。

对于拼接好的点云数据,利用Arena4D VPC Creator软件将其转换成VPC格式,经过Rhino软件加载处理后,利用Clipping工具将非管道数据进行分离,可通过Slices工具进行切片显示,并通过三点绘图工具绘制横断面圆形。通过调节圆形中的编辑点,将所绘制的圆形紧密贴合点云,再利用放样工具,将横断面圆形进行连接,并构建管道的曲面。

将点云数据构建的3D管线导入BIM软件,利用碰撞分析模块模拟DN1 000的新管在点云管道中的移动状况,并根据“承插口在保证环焊间距大于1.5d管径的情况下单次最大偏转角为 $1.5^{\circ}$ ,整段偏转不超过 $7^{\circ}$ ”的原则,进行钢管内穿偏转角、管道长度调整。现有DN1 000钢管外径为1.1 m,标准长度为6.9 m,若标准钢管能够通过碰撞分析,则采用标准管节;若不能通过碰撞分析,则依次采用5.4、3.9、2.4 m长管节进行碰撞分析,直至通过为止。每次碰撞分析均需记录各个管节碰撞部位,针对这些部位,利用不同长度管节进行再碰撞以优化管节长度,管道选择原则是尽量减少短管用量以减少焊接量。碰撞分析见图1,蓝色管道为新管,外部点云为现有管道,红色区域为新管与原有管道的碰撞区域。

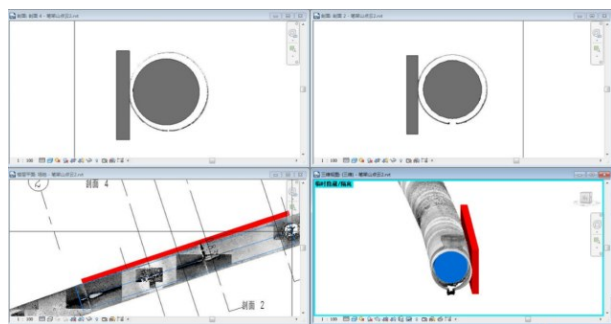


图1 管道碰撞试验

Fig.1 Pipeline collision test

## ② 工作井定位与管节制作

将点云数据构建的3D管线图导入BIM软件,并将内穿钢管插入原管进行碰撞分析,根据原管的曲率优化每段内穿钢管的长度,以保证在借转承插接头最大偏转角范围的内穿钢管可单次施工的最大距离。再结合地面建(构)筑物和地下管线情况,优化并确定工作井的开挖位置,最大程度避让管线和建(构)筑物,减少工作井开挖量。

内穿钢管管节两端设置有一种借转承插式管道接口,接口包括承口端和插口端,二者分别用于承插接头与普通钢管段首尾相连,承口端设有敞开式圆弧形凹槽,插口端为圆弧形接口,插口端圆弧形接口外径与承口段圆弧形凹槽内径一致,钢管段与承插接头对接时插口端拉入承口端内,插口端外壁与承口端内壁紧密贴合并可以沿管中心方向进行旋转。考虑到借转承插口在保证环焊缝间距大于1.5d管径的情况下单次最大偏转角为 $1.5^{\circ}$ 、整段

偏转不超过 $7^{\circ}$ 的要求,经过结合现场实际情况与软件模拟分析,采用定制的管节长度包括2.4、3.9、5.4和6.9 m(包含转接头)。

## 3.1.2 施工技术要点

根据BIM建模结果,选择不同长度管节,按照设定的编号进行内穿施工。主要施工工艺:

① 管道吊装。将钢管运输至施工现场后,先在管道公头内部焊接U型拖耳,然后在管道靠端头部位设置吊点和牵引绳,确保吊装过程稳定可控,落入井底移动支架安全平稳。

② 井内管道调整。首先,将管道放在移动支架后,连接牵引绳与U型拖耳;其次,连接手拉葫芦挂钩与缠绕在管道上的吊带连接,将管道吊起至合适高度,同时推动钢管托架缓慢移动管段送入原混凝土管口直至350 mm后,安装管段前端底部托板车,将钢管放落安装在托板车上;再次,使用原混凝土管内设置的卷扬机将其拖入管内,仅留承插口在外面,安装第二个托板车;最后,将手拉葫芦回落吊索解开,管道两端置于托板车上。

③ 钢管在混凝土管内行进。解开吊索,将钢管置于两个托板车上,通过卷扬机将钢管拉至混凝土管内指定位置。卷扬机应具有防抱死装置,在拖拉过程中应匀速前进,一旦拉力过大应及时停机并检查问题、分析原因,待问题解决后重新牵引。

④ 钢管在混凝土管中对口。当管段行进至上一节管尾端约500 mm处时,通过机械式摇臂千斤顶,将管道前端顶起至满足托板车取出间隙后,取出前端小车。第二节钢管通过卷扬机牵引与前段钢管公头坡口进行对口,直至达到承插深度。对口完成后,拆除第二节钢管尾部的托板车,其方式同前,直至该管段所有钢管对口完成,检查并调整对口偏差满足焊缝每环不超过2 mm的要求。取出托板车时,必须持手柄操作,严禁将手伸入管道下部,以防被夹。

⑤ 管道焊接。待两个井段钢管内穿完毕后,逐一对钢管进行拼接检查并校正固定,然后进行手工焊接。焊接前,需要刷洗清洁焊接区域去除氧化物、油脂等影响焊接质量的杂物;焊接时,采用J427#焊条将每条焊缝施焊三遍,每遍焊完时,需要打磨去除表面浮渣,才可进行下一步焊接。管内有限空间作业要满足相关规范要求,洞内采用轴流风机送风,出口风速达到2 m/s,测算满足10人所需新



鲜空气量 15 L/min 的要求。

### 3.1.3 内穿管道外侧空隙注浆

管道进行焊缝检测和功能性试验后,需将钢管和混凝土管间隙进行填充并固定。孔隙压浆材料需用流动性好、不泌水的复合硅酸盐水泥和 5% 的高效抗裂防水密实剂(见表 1)。根据所用材料的性能,底部选用水灰比为 2:1、顶部选用水灰比为 (0.26~0.28):1 的矿渣复合硅酸盐水泥注浆配合料。

表 1 顶部环缝压浆料性能参数

Tab.1 Performance parameters of top annular gap grouting material

项 目	要求指标			检测值		
流动度/s	28~32			29		
凝结时间/h	初凝	终凝		初凝	终凝	
	≥8	≤24		9	16	
自由膨胀率/%	0~2(3 h)			1(3 h)		
	0~3(24 h)			2.5(24 h)		
抗压强度/MPa	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
	≥20	≥40	≥60	23	45	64.8
抗折强度/MPa	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
	≥5	≥6	≥10	5.5	7.3	10.5
含气量/%	1~3			1.3		
24 h 自由泌水率/%	0			0		
压力泌水率/%	≤2.0			1.0		
Cl <sup>-</sup> 含量/%	≤0.06			0.015		

注浆前,完成管道功能性试验,并将水留在管道内增加管道自重,防止注浆过程中管道上浮;注浆分 4 次进行,首次注浆量为环缝总体积的 1/2,待初凝完成水灰分离后,将上层的泌水排出,再进行第二次注浆,方法同第一次,注浆量为第一次的 1/2,依次直至第三次完成;第三次注浆后在管端顶部安装 Ø109 mm 的排气管,以便空气排出和从管口观察注浆情况;第四次注浆采用高流动性无泌水的孔道压浆料,注浆压力为 0.3~0.8 MPa,直至排气孔溢浆为止,等待 30 min 后再次注浆,往复多次确保环缝顶部注浆饱满。

### 3.2 修复后的质量检测

施工完成后,对内穿钢管进行了 CCTV 检测,结果显示管道连接处平滑、焊缝饱满、无裂纹和纵向棱纹。监理人员也到管道内部进行了外观检查,发

现内穿钢管内部整个被修复区域光滑连续,无剥落,无凹凸和堵塞现象,完全达到预期效果。

### 4 结论

基于三维建模的长距离曲线钢管内穿修复施工技术通过引入 3D 扫描和 BIM 建模,不仅能够准确定位到原管线空间位置,而且通过结合地面交通和管线情况,能够优化工作井的布置和单节钢管长度,大大减少工作井数量和现场钢管切割、焊接的工程量。同时设计的借转承插接口使得单次内穿钢管的最大偏转角度为 1.5°,在保证焊接质量的前提下解决了刚性材料的长距离曲线内穿问题,使得城市管道曲线内衬钢管的长距离结构性修复成为可能。

### 参考文献:

- [1] 梁豪,张京锋,郑博亨. 破碎坍塌钢筋混凝土排水管道非开挖修复技术[J]. 市政技术, 2020, 38(1): 190-191, 236.  
LIANG Hao, ZHANG Jingfeng, ZHENG Boheng. Trenchless repair technology for broken and collapsed reinforced concrete drainage pipeline [J]. Municipal Engineering Technology, 2020, 38(1): 190-191, 236 (in Chinese).
- [2] 袁学军,王向会. 大口径混凝土管道非开挖修复技术的应用[J]. 供水技术, 2012, 6(6): 61-64.  
YUAN Xuejun, WANG Xianghui. Application of trenchless repair technology for large diameter concrete pipeline [J]. Water Technology, 2012, 6(6): 61-64 (in Chinese).
- [3] 张叮叮. 给水大口径钢管穿插刚性管长距修复应用案例分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 121-125.  
ZHANG Dingding. Application of large-diameter steel pipe slip lining with rigid pipeline in long-distance trenchless rehabilitation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 121-125 (in Chinese).

作者简介:龙桂华(1981- ),男,湖北荆州人,博士,高级工程师,主要从事岩土工程及非开挖技术研究及推广工作。

E-mail: 51628172@qq.com

收稿日期: 2021-04-22

修回日期: 2021-07-14

(编辑:衣春敏)