

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.019

超长牵引管下穿南水北调河道设计案例分析

黄勇¹, 王科亮¹, 黄雅萱², 汤庆隆³

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏扬州 225127; 2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏盐城 224051; 3. 江苏邗建集团万达市政工程有限公司, 江苏扬州 225127)

摘要: 为改善洪泽湖水环境,保证南水北调东线水质稳定,将江苏省淮安市蒋坝镇污水收集汇总后用倒虹管连续下穿3条河流,接入污水处理厂集中处理,下穿长度超过1 km;结合现场条件,对管网的过河方案、输水断面、施工措施、牵引回拖力验算、实施效果等进行分析总结,可为类似超长牵引管设计施工提供参考。

关键词: 南水北调; 超长牵引管; 倒虹吸; 定向钻法; 牵引施工; 回拖力; 屈服应力; 回填灌浆

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0119-07

Design Case Analysis of Ultra-long Traction Pipe Crossing the South-to-North Water Diversion Canal

HUANG Yong¹, WANG Ke-liang¹, HUANG Ya-xuan², TANG Qing-long³

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co. Ltd., Yangzhou 225127, China; 2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 3. Jiangsu Hanjian Group Wanda Municipal Engineering Co. Ltd., Yangzhou 225127, China)

Abstract: To improve the water environment of Hongze Lake and ensure stable water quality on the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project, sewage from Jiangba Town, Huai'an City Jiangsu Province is collected, continuously cross three rivers by inverted siphon pipes and then is connected to the sewage treatment plant for centralized treatment. The underpass length exceeds 1 km. Based on the on-site conditions, the crossing river scheme, water transmission section, construction measures, traction and drag force verification, and implementation effects of the pipeline network are analyzed in summary, which could provide reference for the design and construction of similar ultra-long traction pipes.

Key words: South-to-North Water Diversion; ultra-long traction pipe; inverted siphon; directional drilling method; traction construction; pullback force; yield stress; backfilling grouting

1 项目背景

江苏省淮安市洪泽区蒋坝镇位于洪泽湖东南岸,至今已有1 800多年的悠久历史。古镇四面环水,东依三江源湿地,西临洪泽湖,南接淮河第一闸“三河闸”,北靠南水北调东线工程洪泽站。近年来,

随着城市化进程的加快,新城区面积不断扩大、人口增多,污水排放量逐年增加;由于新城区没有污水处理厂,污水均就近排入河道,最终排入洪泽湖,对南水北调东线的水质造成一定的不利影响。

为落实国家《城镇污水处理提质增效三年行动

方案(2019—2021年)》目标,按照国家流域环境治理以及江苏省政府的要求,蒋坝镇实施了生活污水集中治理工程,以改善洪泽湖的水质及区域水生态环境,确保南水北调东线供水水质。

1.1 项目现状

根据蒋坝镇城市总体规划(2015—2030),污水收集系统以三河船闸引河为界,划分为老城区、新城区两部分。老城区已建有污水处理厂1座,2017年已投入运行,区域内污水已全部排入污水处理厂进行处理,处理规模 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 。受地理条件限制,新城与古城之间河网密集,新城区污水无法接入老城区,另外老城区的污水处理厂规模较小且不具备扩容条件,故新城区(河东片区)总体规划新建污水处理厂1座,设计规模 $2\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。

2022年淮安食品科技产业园污水处理厂(设计规模 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)开工建设,为充分利用社会资源,蒋坝镇污水规划也做相应调整,新城区规划的污水处理厂项目取消,拟将新城区的污水全部接入淮安食品科技产业园污水处理厂进行集中处理。

1.2 项目位置

新城区彭祖大道末端有现状DN600污水管网,排水方向由西向东,管网末端现已引至三河船闸引河南堤防;河对岸经十一路有现状DN600污水管网,管道已下穿长深高速接至淮安食品科技产业园污水处理厂。该项目拟将蒋坝镇新城区彭祖大道末端的污水收集汇总后,途经三河船闸引河、南水北调洪泽站上游引河、洪金南干渠,最终接入淮安市食品产业园污水处理厂进行集中处理。项目总体位置见图1。



图1 项目总体位置

Fig.1 Overall project location

2 实施方案

该项目关键的技术难点是排水管要连续穿过

三河船闸引河、南水北调洪泽站上游引河和洪金南干渠3条河道,其总长度超过 1.1 km ;由于南水北调工程是国家级重要调水工程,必须确保排水管道施工期间及后期运行的绝对安全,因此管道过河方案的选择非常重要。常规的管道过河方式有2种:一种是管桥式,另一种是倒虹吸式。

2.1 管桥式过河方案

经现场勘察,该项目东侧约 300 m 处为长深高速“宁淮高速公路(G25)三河航道特大桥”,排水管道可以直接敷设在桥下,用明管从空中跨越三河船闸引河、南水北调洪泽站上游引河、洪金南干渠,最终接入食品产业园经十一路现状污水管道。

若采用管桥式方案,管道长度约 1.2 km ,排水管道最高点(桥面最高位置)距离排水管道最低点(河道水面高程处)约 30 m 。管桥式布置技术简单,施工方便,但需将污水提升至最高点,运行能耗较高;运行过程中停泵时最高处易形成负压,水流状态不太稳定;运行维护费用较高;管网一旦渗漏还会造成水体污染。管桥式方案位置见图2。



图2 管桥式方案位置

Fig.2 Location diagram of pipe bridge scheme

因现行《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)和《城市道路交通工程项目规范》(GB 55011—2021)均规定“不得在桥上敷设污水管”,故该项目直接否决管桥式方案。

2.2 倒虹吸式过河方案

因三河船闸引河、南水北调洪泽站上游引河、洪金南干渠及两侧堤防具有通航、调水、防洪等重要功能,尤其是南水北调引河,在国家级水网中具有重要战略意义,故排水方案不得影响航运、调水,不得存在任何环境安全隐患。

倒虹吸式方案位置见图3。



图3 倒虹吸式方案位置

Fig.3 Location of inverted siphon scheme

虽然采用倒虹吸过河方案技术要求高、施工难度较大,但是对通航、调水、防洪无影响。经现场勘察,倒虹管上游入土点起点高程 8.5 m,下游出土点终点高程 9 m,三河船闸引河河床高程 3.61 m、南水北调洪泽站上游引河河床高程 3.3 m、洪金南干渠河床高程 7.81 m,倒虹管中间水平段高程 -5.1 m;由于上下游水位基本持平,开始输水时需加压克服管道内水力损失,加压设备及管网维护费用较低;不足之处就是下凹处容易有沉淀物,若管理不善易堵塞。

2.3 方案确定

经过上述分析,综合考虑技术、造价、运行管

表2 国内现有长距离拖拉管项目统计(截至2023年12月)

Tab.2 Statistics of existing long-distance drag pipe projects in China (as of December 2023)

项目	工程地址	管径/mm	管材	一次性拖拉距离/m	施工工艺
华北油田岔任输油管线	河北省赵王新河	273	无缝钢管	2 181	3级扩孔+1级洗孔
山东天然气管网东干线	烟台莱州郭家店镇小沽河	1 200	无缝钢管	1 285	地磁导向仪进行导向孔钻进
中俄东线天然气管道工程	讷谟尔河	1 422	无缝钢管	752	6级扩孔技术
寿光至东营天然气管道工程	小清河	400	PE管	738	导向钻孔、扩孔、回拖
太忻滹沱河供水工程	滹沱河	1 300	涂塑复合钢管	658	多级扩孔钻进、分级调配浆液浓度
小清河复航供水工程	南水北调东线山东邹平段干渠和小清河	1 200	PE管	603	导向钻孔、扩孔、回拖
安钢西线	浙江平湖	1 000	球墨铸铁管	550	导向钻孔、扩孔、回拖
银川都市圈城乡东线供水工程	吴忠市利通区利红公路和清水沟	1 200	焊接钢管	456	管中管,导向钻进、12级扩孔

3.1 穿越位置

倒虹管设计时一些重要的控制节点,比如牵引管入土井、出土井、排泥井、事故井等位置都需要结合现场情况综合确定。根据金宝线淮安段航道整治工程可研报告中“蒋坝船闸下游待泊区平面布置

理、环保节能、现行规范等因素,拟采用倒虹管过河方案。倒虹管施工方案常规有拖拉管和顶管两种,经过技术经济综合比较可知,采用拖拉管施工时综合单价约为 14.71 万元/100 m,采用顶管施工时综合单价约为 18.72 万元/100 m,故该项目最终选用倒虹管拖拉管过河。倒虹吸拖拉管和顶管方案比较见表 1。

表1 倒虹吸的拖拉管和顶管方案比较

Tab.1 Comparison of the inverted siphon schemes

between drag and pipe jacking 元·100 m⁻¹

项目	拖拉管方案	顶管方案
人工费	4 450.9	51 630.05
材料费	477.5	9 592.68
机械费	33 175.2	51 042.40
管理费	9 782.7	26 694.85
利润	4 515.2	12 320.69
未计价材料费	94 705.4	35 913.20
综合单价	147 106.9	187 193.87

3 下穿设计

倒虹吸方案最大的技术难点是要一次性连续下穿 3 条河,下穿长度达 1 122 m。据调查,目前国内拖拉管一次性牵引长度超过 1 km 的案例极少(管材均为钢管);用 PE 塑料管一次性牵引长度超过 1 km 尚无先例。国内现有长距离拖拉管项目统计见表 2。

规划用地”资料,下游待泊锚地拟布置于 S330 和 G25 长深高速间航道南岸位置,锚地岸线总长 320 m,前沿线距离航道中心线 85 m。该项目牵引入土井布置于三河船闸引河南堤外,牵引出土井布置于洪金南干渠北堤外,且距堤防坡脚均不小 120 m,满

足位于堤脚外侧不小于 110 m 堤防保护范围的要求;同时避开开坝船闸下游待泊区规划用地,设防标准与措施恰当,符合规划要求。

为尽量缩短穿河管道长度,降低施工难度,并减少对堤防的影响,设计下穿管道纵轴线和河道尽可能正交;为减少牵引施工对附近村民房屋的影响,出入土点靠近堤后空旷处布置,避开村庄。据此确定下穿管道纵轴线位于长深高速西侧约 283 m,与 3 条河道中线交叉角度分别为 74°、88°、68°,均符合规范要求。该项目牵引管设 2 根(1 用 1 备),单根长度约 1 122 m。倒虹吸管线平面布置见图 4,纵断面见图 5。

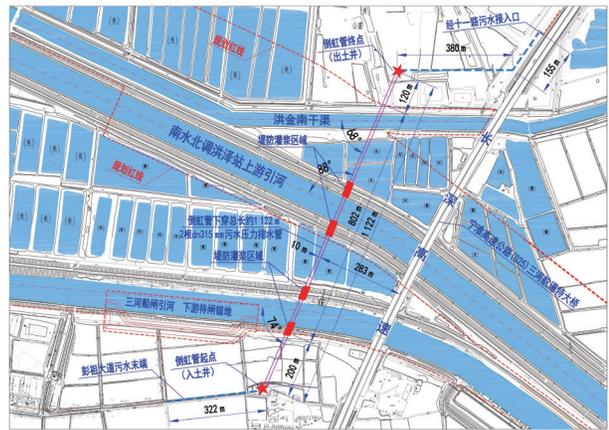


图 4 倒虹吸管线平面布置

Fig.4 Layout plan of inverted siphon pipeline

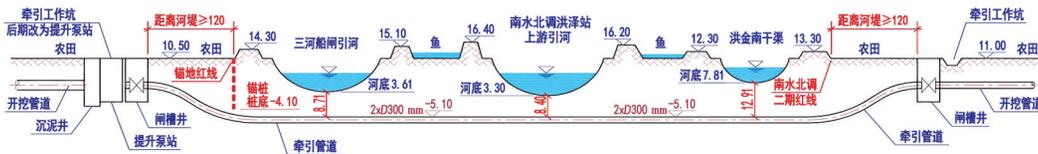


图 5 倒虹吸管线纵断面

Fig.5 Vertical section of inverted siphon pipeline

3.2 下穿管径

对于工程总投资,应选择合适的输水断面尺寸,在工程前期建设费用与后期运行费用之间找到最佳平衡点。污水排放流量为 6 798 m³/d,初拟 3 种管径,从管径与水头损失的关系及管道投资角度进行综合分析,拟选用倒虹管内径 300 mm,设计流速 1.22 m/s,总水头损失 6.8 m(68 kPa,以下均按 1 m=10 kPa,不再一一换算)。不同管径水力状态与经济分析见表 3。

表 3 不同管径水力状态与经济分析

Tab.3 Hydraulic state and economic analysis of different pipe diameters

管道内径/mm	工程沿程水头损失/m	工程局部水头损失/m	工程总水头损失/m	管内流速/(m·s ⁻¹)	管道投资(含牵引费用)/(元·m ⁻¹)
200	24.8	10.1	34.9	2.42	1 200
300	4.6	2.2	6.8	1.22	1 400
400	0.9	0.4	1.3	0.62	2 500

3.3 牵引力验算

由于牵引力与土质情况有直接关系,施工前应了解管道穿越位置处的地质构造情况。该项目地勘资料主要结论如下:(1)场地处于抗震一般地段,地震加速度 0.05g,抗震设防烈度为 6 度。(2)场地地势平坦,地表分布层填土,自上而下分布的土层为

可塑~硬塑粉质黏土、黏土和中密~密实的粉土,各层土工程力学强度一般~高,分布较稳定,无不良地质作用,属稳定性较好的天然地基持力层。(3)管道及其他主要设施底板主要位于②₂、④层以及⑧层粉质黏土上,满足拟建构筑物的荷载要求。

管材的力学性能应满足管道最大回拖力的要求,该项目牵引长度超过 1 km,故管材的选择很关键。选用非开挖工程用聚乙烯管(简称 PE 管),依据《非开挖工程用聚乙烯管》(CJ/T 358—2019),选用的 PE 管材料等级 PE100,压力等级 1.6 MPa,公称外径 315 mm,内径 257.8 mm,尺寸比 SDR11,环刚度≥64 kN/m²,拉伸屈服应力≥20 MPa。对管材的力学性能验算如下:

① 总回拖力

根据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)^[1]6.6.2 条,最大控制回拖力应满足管材力学性能和设备能力要求,总回拖阻力可按下式计算:

$$P=P_1+P_f \quad (1)$$

$$P_f=\pi D_k^2 Ra/4 \quad (2)$$

$$P_1=\pi D_o L f_i \quad (3)$$

式中:P 为总回拖阻力,kN;P_f 为扩孔钻头迎面阻力,kN;P₁ 为管外壁周围摩擦阻力,kN;D_k 为扩孔

钻头外径,一般取管道外径的1.2~1.5倍,该项目牵引管道外径设计为315 mm,故取0.45 m; D_0 为管道外径(0.315 m); R_a 为迎面土挤压力,一般情况下,黏性土可取500~600 kN/m²,砂性土可取800~1 000 kN/m²,根据地勘报告,穿越土层主要为黏性土,故该项目取600 kN/m²;L为回拖管段总长度,该项目为1 122 m; f_1 为塑料管外壁单位面积摩擦阻力,kN/m²,泥浆的黏滞系数参照《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382:2014)^[2]5.4.2条,取0.2 kN/m²。

代入上述参数, $P_1=221.95$ kN, $P_f=95.4$ kN,总回拖阻力 $P=317.35$ kN。

② 拉伸屈服应力

屈服强度和抗拉强度计算公式如下:

$$F_0 = \sigma S \quad (4)$$

式中: F_0 为管道在拉断前承受的极限应力值, N ; σ 为管材的屈服强度,MPa,依据《非开挖工程用聚乙烯管》(CJ/T 358—2019)^[3]6.4.3条,选用的排水管拉伸屈服应力要求 ≥ 20 MPa; S 为管材截面积, m^2 , $S = \pi(D_1^2 - D^2)/4$,外径为 D_1 ,内径为 D 。

代入上述参数,管道在拉断前承受的极限应力

值 $F_0=514.4$ kN。

根据《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382:2014)5.2.5条:管道在回拖施工时,管材所能承受的最大回拖力可按式计算:

$$F = \sigma \times \frac{\pi(D_1^2 - D^2)}{4N} \quad (5)$$

式中: F 为管道能承受的最大回拖力, N ; σ 为管材的屈服强度,取20 MPa; D_1 为管道外径,0.315 m; D 为管道内径,0.257 8 m; N 为安全系数,给水、排水、通信、电力管道等低压管道取2.0,燃气等高压管道取3.0。

代入上述参数,管材所能承受的最大回拖力 $F=257.2$ kN。

③ 验算结果

根据上述计算结果,牵引需要的总回拖力为317.35 kN(其中扩孔钻头迎面阻力95.40 kN,管道外壁周围与泥浆之间的摩擦总阻力221.95 kN),选用管材在安全系数为2的情况下所能承受的最大回拖力为257.2 kN(>217.60 kN),极限破坏应力为514.40 kN(>317.35 kN),选用管材性能满足要求。

工程勘察综合成果建议值见表4。

表4 工程勘察综合成果建议值

Tab.4 Suggested values for comprehensive results of geotechnical engineering survey

层号	土层描述	土层分布高程/m	双桥探头静力触探			直接快剪		固结快剪		压缩试验		地基承载力特征值/kPa
			锥尖阻力/MPa	侧摩阻力/kPa	摩阻比/%	凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)	凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa	
②②	灰黄夹灰色粉质黏土,含铁锰质结核	层顶:7.06~12.09; 层底:4.41~10.19	1.24	63.1	4.9	24.1	11.6	25.5	13.5	0.33	5.45	140
④	灰黄、褐黄色黏土、粉质黏土,含贝壳,局部富集	层顶:0.31~6.38; 层底:-1.49~2.06	1.88	83.6	4.3	32.4	12.1	38.5	14.8	0.27	6.48	180
⑧	棕黄、棕红夹灰白色黏土、粉质黏土,含铁锰质结核、砂礓,砂礓局部富集	层顶:-1.49~10.19; 层底:-14.01~-6.59	3.66	173.1	4.7	49.6	14.4	52.1	16.3	0.21	8.06	230

4 施工管理

4.1 牵引施工

该项目施工现场为基本农田及村庄,下穿土层主要为淤泥质黏土层;设计采用定向钻进牵引法施工。设计牵引管径为315 mm,平行间距为10 m,入土角为14°,出土角为12°,曲率半径为600 m;入土段长度为150 m,水平段长度为842 m,出土段长度为130 m,过河牵引管总长度约1 122 m。牵引管2条(1用1备)。

倒虹管平面、剖面见图6。

施工采用导向仪进行导向钻进,质量控制要点:①根据地质勘查情况及沉淀试验数据进行钻进泥浆配比,选用优质的膨润土,另加入化学纤维素等添加剂,控制好泥浆浓度及pH;②施工过程中导向仪根据设计曲线钻进,及时调整方向,使得穿越曲线与设计穿越曲线的偏差不大于1%;钻机安装在入土点与出土点的连线上,左右偏差不大于30 mm;③钻孔导向完成后采用反拉旋转扩孔法,向孔内注入膨化泥浆,将孔内原有的土层稀释并从入土点和出土点排出;④因管线较长,回拖时必须连续

作业,避免因停机再次拖拉造成阻力增大,二次启动阻力超过管道拉伸屈服应力则拖拉失败;⑤注浆开始后必须保持泥浆循环,合理控制钻进速度和孔

内泥浆压力,避免对上部地层造成破坏,工作坑有泥浆排出时应及时清运,防止对农田及水体造成污染。

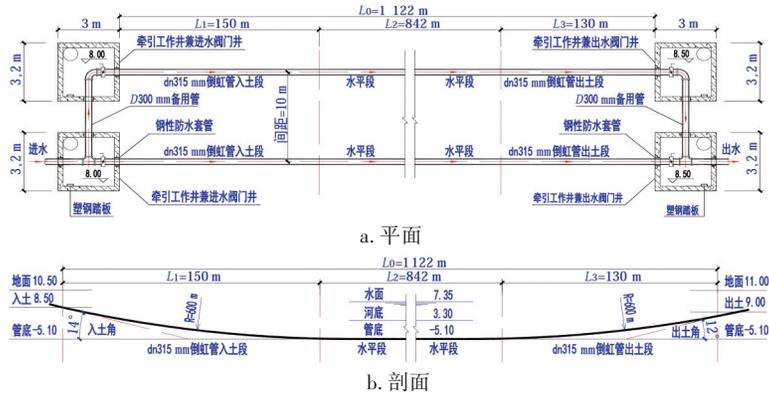


图 6 倒虹管平面、剖面

Fig.6 Plan and section view of inverted siphon pipeline

4.2 堤防灌浆

由于定向钻穿越会对河道堤防造成扰动,穿越管道处容易形成渗流通道,根据洪水影响评价要求,该项目需要对三河船闸引河及洪泽站上游引河堤防进行防渗加固处理,确保堤防安全。设计注浆范围为拖拉管两侧各 10 m,注浆孔间距 2.0 m×2.0 m,注浆高程为-7.00~3.00 m,灌浆采用双排孔梅花形布置。堤防填筑灌浆平面、剖面见图 7。

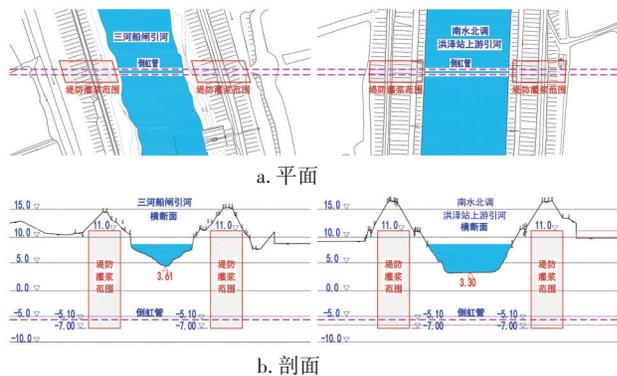


图 7 堤防填筑灌浆平面、剖面

Fig.7 Plan and profile of grouting for embankment filling

注浆加固质量控制要点:①灌浆采用干法钻孔,双排梅花形布置,先灌边排孔,再灌中排孔,钻孔壁应平直完整,钻孔位置与设计位置偏差不大于 10 cm,垂直偏差不大于孔深 2%;②灌浆孔口压力小于 0.05 MPa,灌浆采用水泥浆,425 普通硅酸盐水泥,水泥含量不低于 20%;③每次平均灌浆量控制在 0.3~0.5 m³/m 孔深;④当浆液升至孔口,经连续

复灌 3 次不再吃浆时,即可终止灌浆;⑤当每孔灌浆完成后,待孔周围泥浆不再流动时,将孔内浆液取出,扫孔到底,用直径 2~3 cm、含水量适中的黏土球分层回填捣实;⑥浆液按质量比可添加少量五氯酚钠防治白蚁,但要防止污染水源;⑦堤防灌浆完成后对加固处道路按原标准恢复。

牵引施工成功穿越现场实景见图 8。



图 8 牵引施工成功穿越现场实景

Fig.8 Realistic view of successful traction construction crossing the site

4.3 项目管理

项目管理及风险防控策略是保证项目施工质量和安全的关键,应严格遵守质量规范,落实科学合理的施工方案,采取密切配合与协调等管理措施;采取预先制定风险评估与应急预案、定期检查与维护设备、严格执行安全规范、加强人员岗位培

训、加强施工现场的环境管理等风险防控措施;应有效防控施工现场的风险,确保施工质量与安全。

运行管理措施是保证项目正常运行的保障,项目建成后应严格按照《室外排水设计标准》《排水管网维护管理质量标准》等进行管理,重点分为组织管理和技术管理两大部分。组织管理主要任务为成立管理机构、健全规章制度、人员资格审查、专业技术培训等;技术管理的主要任务为验收排水管、发放排放许可证、监督排水过程、检查疏通排水管、检查养护污水一体化泵站、及时处理意外事故等。

5 结论

针对该项目牵引管超长的特点,管线定位测量时创新采用惯性定位仪,相对于传统的超声波定位等方法,优势主要体现在:①设备直接置入管道内测量中轴线数据,定位精度高,测量数据不间断;②测量不受地域、地形、环境等限制,无需操作人员地面追踪定位;③测量不受深度限制,不受电磁干扰;④探测数据除出入口点坐标由GPS获得外,其余数据皆由设备自行运算,自动生成三维空间曲线图,消除人为误差;⑤经过多次测量,定位数据重复性良好,全部符合设计要求。

根据现有资料统计,截至2023年底,该项目在国内(含输水管、输气管、输油管等项目)一次性牵引施工长度排名第三,PE管一次性牵引施工长度排名第一,创国内PE管穿越长度新纪录(1 122 m)。

5.1 生态环境效益

该项目建成后,蒋坝镇污水全部排入食品工业园污水处理厂集中处理,减少了对南水北调、淮河入海水道及金宝航道等的污染;区域环境得到明显改善;对整个淮河流域、洪泽湖水环境的治理起到积极的作用,在确保南水北调东线调水水质方面发挥重要作用。

5.2 社会及经济效益

该项目建成后直接提升了镇区水生态环境,保证了地方农、林、牧、副、渔业的正常生产,对提高蒋

坝镇人民的物质和精神文化生活水平起到了积极作用;进一步完善了镇区基础设施、改善了投资营商环境,对树立良好的政府形象、发展新质生产力、促进地区的可持续发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 给水排水管道工程施工及验收规范:GB 50268—2008 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008: 65-66.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for Construction and Acceptance of Water and Sewerage Pipeline Works: GB 50268-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 65-66 (in Chinese).
- [2] 中国工程建设标准化协会. 水平定向钻法管道穿越工程技术规程:CECS 382:2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2014: 14-17.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Pipeline Crossing by Horizontal Directional Drilling: CECS 382: 2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014: 14-17 (in Chinese).
- [3] 住房和城乡建设部. 非开挖工程用聚乙烯管:CJ/T 358—2019 [S]. 北京:中国标准出版社,2019: 12-13.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Polyethylene (PE) Pipes for Trenchless Engineering: CJ/T 358-2019 [S]. Beijing: China Standard Press, 2019: 12-13 (in Chinese).

作者简介:黄勇(1974—),男,江苏扬州人,本科,教授级高级工程师,注册给排水工程师,中国勘察设计协会水系统分会理事,主要从事给排水工程设计与研究工作。

E-mail: 1720993902@qq.com

收稿日期: 2024-03-24

修回日期: 2024-06-28

(编辑:衣春敏)