

中继间自动化控制系统 在长距离顶管施工中的应用

闵 瑞, 李存笔, 舒兆亚, 葛玉剑

(江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225007)

摘要:针对新孟河延伸拓浚工程常州市新北区黄山河立交地涵工程4m直径双排混凝土顶管顶进距离长、路径不直、穿越土层复杂、施工技术难度大的特点,通过对顶管中继间启动技术的研究与设计改进,增设远程自动化控制系统,实现了中继间远程联动启动,较好地减少地下管道内的施工人员人工操作,降低密闭空间内施工安全风险,同时也解决顶管施工中因人工启动中继间停顿时间过长引起摩阻力增加、顶进困难等系列产品。

关键词:顶管; 中继间; 自动化控制系统; 远程联动启动

中图分类号:TV523

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2022)08-0016-0007

Application of relay room automatic control system in long-distance pipe jacking construction

MIN Rui, LI Cunbi, SHU Zhaoya, GE Yujian

(Jiangsu Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225007, China;)

Abstract: Aiming at the characteristics of the 4m diameter double row concrete pipe jacking of Huangshan River interchange ground culvert project in Xinbei District, Changzhou City, the extension and dredging project of Xinmeng River, such as long jacking distance, non straight path, complex soil layer crossing and difficult construction technology, through the research and design improvement of the starting technology of the pipe jacking relay room, a remote automatic control system is added to realize the remote linkage start of the relay room, which can better reduce the manual operation of the construction personnel in the underground pipeline, reduce the construction safety risk in the confined space, and solve a series of problems such as the increase of friction and the difficulty of jacking due to the long pause time between manual start relays in the pipe jacking construction.

Key words: pipe jacking; relay room; automatic control system; remote linkage start

顶管施工技术是目前地下管道工程中非开挖施工常用的施工技术,具有不影响地面建筑设施及人们日常生产活动的优点。在顶管顶进的过程中,长距离顶管须设置多个中继间进行顶进过程启动。以往工程中大多采用人工操作,反复逐个开启

闭合管道中分设的中继间,整个操作过程耗时过长,对工期掌握和成本控制均会造成不利影响。从目前的国内外研究资料和工程实践可发现,对中继间采用人工启动,在理论分析、试验技术、设计方法、施工技术等方面均存在一些不足,而在密闭空

收稿日期: 2022-06-06

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020020)

作者简介: 闵瑞(1980—),男,本科,工程师,主要从事市政桥梁及水利水电工程施工管理相关工作。Email:460162192@qq.com

间内施工人员的安全控制也是个重要的环节。本文结合新孟河延伸拓浚工程常州市新北区黄山河立交地涵大直径顶管工程,就顶管中继间自动控制系统施工技术,以及顶管中继间智能联动改进设计进行了研究^[1]。

1 工程概述

新孟河延伸拓浚工程常州市新北区黄山河立交地涵大直径顶管穿越新孟河出老孟河与小夹江相接(图1),该工程实施后可以加快江苏太湖西北部湖区的水体流动,促进太湖水流循环,提高流域和区域的防洪排涝能力。该工程顶管直径在目前江苏水利工程施工的顶管中最大,且在曲线顶管专业施工中也属罕见,黄山河立交地涵顶管顶进轨迹竖向曲线半径为800 m,顶程单根总长410 m,截面并排共2根,单管采用内直径4.0 m、壁厚32 cm钢筋混凝土顶管;先从黄山河侧始发井出发,后穿越河底按3%的坡度与小夹江侧接收井相接,顶管中心从始发井出发高程为-8.80 m(地表下16.3 m),出接收井中心高程为-7.60 m(地表下15.1 m),最低处管道中心标高-12.35 m(地表下19.85 m),顶管河中心最低处河床覆土厚度约11 m。本工程最大难点是顶管管径大,曲线顶进距离远,顶进穿越的土层为江边土层,地质情况复杂,局部土层有液化的情况,加之混凝土管自重大,管节运输安装施工难度相对较大,长距离顶管顶进阻力大,结合此大直径管径及顶程中顶力以及可能遇到的情况设立6节中继间,通过开发自动化控制系统,对收集的数据进行分析、判断,快速准确下达指令给中继间开始启动,实现多个中继间之间快速联动,解决以往顶管施工中仅凭经验人工启停、效率低下的问题,以及顶管施工因停顿时间过长引起摩阻力增加、顶进困难和管道内施工人员多、安全风险大等问题。



图1 新孟河立交地涵穿越河道卫星平面

2 总体施工工艺设计

2.1 顶管顶进总体施工流程

顶管顶进总体施工流程:顶管施工准备→掘进机头就位→掘进机头穿墙→下管段→管节顶进→顶进测量→掘进机头纠偏→下管段与前管段连接→顶进完成一段→穿插安装中继间→继续顶进至完成→出洞拆除掘进机头^[2]。

2.2 顶管中继间及中继间自动化控制系统装置工艺设计

根据招标文件引用的规范《给排水管道工程施工及验收规范》(GB50268—2008)第6.3.2条规定:“计算施工顶力时,应综合考虑管节材质、顶进工作井后背墙结构的允许最大荷载、顶进设备能力、施工技术措施等因素。施工最大顶力应大于顶进阻力,但不得超过管材或工作井后背墙的允许顶力”。第6.3.3条规定:“施工最大顶力有可能超过允许顶力时,应采取减少顶进阻力、增设中继间等施工技术措施”。第6.3.9条的规定:“1、设计顶力严禁超过管材允许顶力;2、第一个中继间的设计顶力,应保证其允许最大顶力能克服前方管道的外壁摩擦阻力及顶管机的迎面阻力之和;而后续中继间设计顶力应克服两个中继间之间的管道外壁摩擦阻力;3、确定中继间位置时,应留有足够的顶力安全系数,第一个中继间位置应根据经验确定并提前安装,同时考虑正面阻力反弹,防止地面沉降^[3]。”顶管顶进施工前智能控制中继间设置方案中首先要进行前期相关顶力辅助计算。

2.2.1 顶管顶力估算

根据规范要求,顶管顶进前分别要对顶管的总顶进顶力、管材承受的最大推力、后靠背墙允许承受力进行计算,以便在施工中用顶管总顶力与顶管管材的承受最大推力及后靠背墙允许承受力进行比较,然后确定几个中继间及相应的位置^[4],具体计算方法如下:

(1)顶管封闭机头工具管的迎面阻力根据《给排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—97)中6.4.8条规定得计算公式。即,

$$P_1 = r \left(H + \frac{2}{3} \times D_1 \right) \lg 2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

$$N = \frac{\pi}{4} D_1^2 P_1 \quad (2)$$

式中: N 为封闭机头的迎面阻力; D_1 为管道外径,取4.64 m; P_1 为机头底部以上 $1/3 \times D$ 处的被动土压力; r 为土的天然重度(取17.8 kN/m³); φ 为土的内摩擦

角(取 9°); H 为管顶土层厚度,取7.12 m。经计算得 N 为4 208 kN; P_1 为249 kN/m 2 。

(2)根据规范得顶管顶进时周边阻力计算公式,即,

$$F_2 = f_2 \pi D_2 L \quad (3)$$

式中: F_2 为采取触变泥浆工艺时管壁的摩阻力; f_2 为采取注浆工艺的单位摩阻力,取5 kN/m 2 ; D_2 为管道外径,取4.64 m; L 为顶管长度,取410 m。经计算得 F_2 为29 867 kN。

(3)根据规范得总顶进顶力 F 计算公式。即

$$F = N + F_2 \quad (4)$$

式中, F 为总顶进顶力。经计算得 F 为34 075 kN。

因本研究方案中顶管为曲线顶管,曲率半径800 m,即 $R=172 D$,按规范查得相应增加顶力的附力值 K 取1.228。则修正后的总顶力为 $F'=1.228 F$,计算得41 844 kN。

2.2.2 钢筋混凝土顶管管材所能承受的最大推力计算

钢筋混凝土管材允许承受顶力按是(5)计算^[5],即,

$$F_{dc} = 0.5 \times [(\Phi_1 \times \Phi_2 \times \Phi_3) / (\gamma_{Qd} \times \Phi_5)] \times f_c \times A_p \quad (5)$$

式中: F_{dc} 为混凝土管允许顶力; Φ_1 为混凝土材料受压强度折减系数,取0.90; Φ_2 为偏心受压强度提高系数,取1.05; Φ_3 为材料脆性系数,取0.85; Φ_5 为混凝土强度标准调整系数,取0.79; γ_{Qd} 为顶力分项系数,取1.3; f_c 为混凝土抗压强度设计值,本工程为C50混凝土,取23.1 MPa; A_p 为管道最小有效传力面积,本工程DN4000顶管为3.89 m 2 。经计算得 F_{dc} 为35 134 kN。

2.2.3 后靠允许顶力

如图2所示,根据规范得计算后靠允许顶力计算公式,即,

$$F_{后} = \frac{K_p \cdot \gamma \cdot b \cdot h}{2 \cdot \eta} (h_1 + 2h_2 + h_3) \quad (6)$$

$$K_p = \tan 2(45^\circ + \varphi/2) \quad (7)$$

式中: $F_{后}$ 为后靠背允许顶力; K_p 为被动压系数按式(6)计算得1.37; φ 为内摩擦角,取 9° ; γ 为容重,取17.8 kN/m 3 ; b 为后靠宽度,取5 m; h 为工作井底板至地面的深度(16.7 m); η 为安全系数,取1.8; h_1 为后靠背顶至地面高度(11.12 m); h_2 为后座高度(取5.72 m); h_3 为工作井刃脚至底板顶高度(取4 m)。经计算得 $F_{后}$ 为15 068 kN。

2.2.4 中继间位置布置

研究方案中根据《给水排水工程顶管技术规

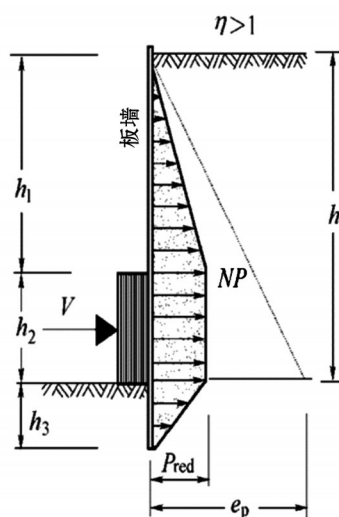


图2 顶管后靠受力计算

程》CECS246:2008第12.4.3条:“当估算总顶力打压管件允许顶力设计值或工作井允许顶力设计值时,应设置中继间”。第12.5.4条:中继间顶力富裕量,第一个中继间不宜小于40%,其余不宜小于30%^[6]要求,本工程方案设计计算,顶管最大顶力41 844 kN,后靠能承受的最大顶力为15 068 kN, DN4000顶管管节能承受的最大顶力为351 347 kN。因此,本段顶管必须加设中继间,否则开顶后靠沉井壁会发生破坏,造成质量事故。

依据中继间距离计算的控制顶力按后靠最大承受顶力计算,排除辅助机头纠偏的第一个中继间效力忽略不计后,根据规范第二只、第三只…继后续中继间之间距离计算公式,即,

$$S_1 = k_1 (F_3 - F_2) / (\pi D f) \quad (8)$$

$$S_2 = k_1 F_3 / (\pi D f) \quad (9)$$

式中: S_1 为中继间的间隔距离; F_2 为顶管机的迎面阻力(4 208 kN); F_3 为控制顶力(15 068 kN); f 为管道外壁与土的平均摩阻力,取5 kPa; D 为管道外径(4.64 m); k_1 为顶力系数,宜取0.50.6(本工程取0.6)。经计算得 S_1 为89 m, S_2 为124 m,第三只及以后中继间距离按式(9)计算,以此类推,为确保安全,单段顶管设置6个中继间,为了配合顶管机头在复杂土层中的纠偏,第一只布置在机头后方20 m处,以后每隔65 m设置1个中继间,如图3所示。

2.2.5 中继间构造

中继间是长距离和超长距离顶管施工的关键设置,它是分段克服摩阻力的一种施工技术,通过将管道分成数段,分段向前推顶,使主千斤顶的顶力分散总顶力等于各分顶力之和,并使每段管道的

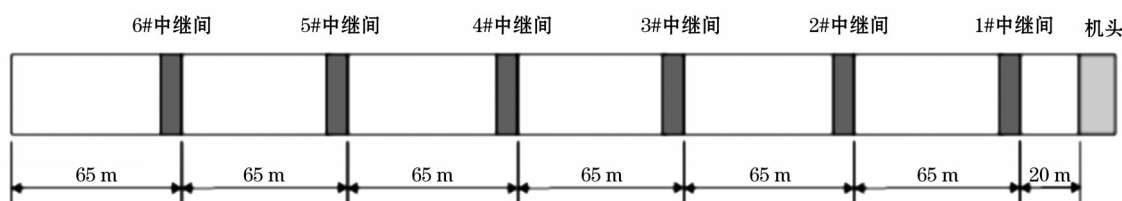


图3 顶管中继间位置布置

顶力降低到允许顶力范围内^[7]。中继间采用二段一铰可伸缩的套筒承插式钢结构件,中继间由40只500 kN千斤顶推动,总顶力可达到20 000 kN;千斤顶行程为30 cm。在铰接处设置两道可径向调节密封间隙的密封装置,确保顶进时不漏浆,并设置4~6只可以压注锂基润滑脂的油嘴,以减少顶进时密封圈的磨损。

2.2.6 中继间自动控制系统

本文介绍中继间自动控制系统分硬件设备和软件系统两个部分组成,硬件设备主要有:中继间电控箱、中继间PLC自动化监控箱、总顶力传感仪、中继间位移传感器仪表、环境监测类仪表(氧量、硫化氢、甲烷、一氧化碳、温度、湿度),视频及语音监控设备、中继间远程主控室监控柜、中继间远程主控电脑工作站、管道监控硬盘录像机及以太网接入等。

中继间软件系统主要为长距离大直径曲线顶管中继间自动化控制软件(V1.0),该软件产品适用于长距离顶管施工自动化控制行业。按模块化、标准化的设计理念,顶管中继间PLC自动化装置采用分区布置方式,通过标准协议方式接入压力、位移传感器仪表、环境监测类仪表,并通过视频、语音等设备网络接入,实现顶管中继间自动启停控制、远程监视与控制。

2.2.7 中继间自动化控制系统的工作原理

以往施工经验顶管工程中继间的启动是在顶管所遇阻力及顶管机头所遇总顶力大于顶管管材允许承受力或后靠背墙承受力时须人工逐个开启中继间,使得顶管在顶进中蠕动前进,并逐级分段分解总顶力,直到打开顶管前方的泥腔通道保持应

有设计曲线顶进姿态,继而不间断地完成整个顶管顶程,最终实现顶管进洞全线贯通。本文所述的顶管工程中继间自动化控制,主要通过开发自动化控制系统,对收集的机头总顶力数据进行分析、判断,当达到预设的最大顶力时,通过中继间远程主控电脑工作站自动快速准确下达指令给逐个中继间开始启动,且多个中继间之间形成快速联动,解决以往顶管施工仅凭经验人工启停而效率低下的问题。通过远程控制,大量减少地下管道内施工人员爬进爬出,降低了施工安全风险,同时解决了顶管施工因停顿时间过长引起摩阻力增加、顶进困难的问题^[8]。

3 中继间自动化控制系统软件开发

3.1 软件开发策略

软件开发采用C语言编程,代码易于移植、维护。同时采用模块化设计思想。模块化设计包括分解与组合两个过程。分解指通过对某一类产品系统的分析和研究,把其中含有相同或相似的功能单元分离处理,用标准化的原理进行统一、归并、简化,以通用单元的形式独立存在;组合是指根据应用需要将分解得到的模块按照既定的规则组合形成多种功能元件。模块划分清楚,代码易于维护。此外,适当提高代码的重复利用性,减少开发周期。

3.2 操作系统软件分解概述

基于Sylxos实时操作系统,其中Client管理程序负责装置初始化管理、调试,DPU/LCD等应用程序完成组态文件解析、算法执行、I/O处理、冗余同步、人机界面及对外通信等功能。

本软件的结构设计按几个核心的功能进行划分,划分为3个子系统,见表1。

表1 子系统功能

子系统	子系统	主要功能	依赖平台
1	系统平台	操作系统管理功能开发,BSP设计,Client,驱动的设计	硬件平台
2	应用平台	NR_DPU/LCD等应用程序完成组态文件解析、算法执行、I/O处理、冗余同步、人机界面及对外通信等功能	系统平台
3	应用功能	完成信号处理、逻辑运算等功能	系统平台、应用平台

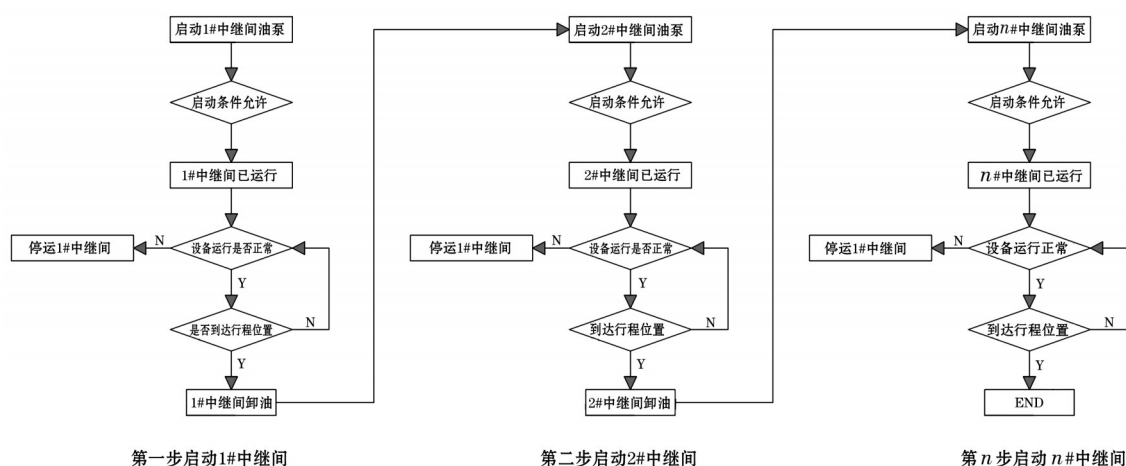


图6 多中继间顺序控制流程

管姿态,第二个中继间安装在85 m处,第三个中继间安装在150 m处,第四个中继间安装在215 m处,第五个中继间安装在280 m处,第六个中继间安装在345 m处。

施工安装前,对中继间千斤顶进行调试、检查,发现问题及时更换。在安装时检查千斤顶的各路油管连接是否正确,检查中继间电控柜与中继间PLC自动化监控柜模块传输信号是否正常,检测中继间PLC自动化监控柜与后台主控柜模块信号传递是否正常^[9]。

由于本工程地处江边,土层复杂,在顶程的前245 m段遭遇大粒径不均匀姜结石,推进105 m后顶进阻力增大明显,因后面的第三个中继间还没有下井,先采用了手动操控开启第二个中继间顶进,进程顺利、效果明显;随后在顶程265 m处顶力增大,此时管路中第五个中继间已经按设计就位,当系统遥测到前方信号经系统集中分析后达到预设条件,系统自动启用中继间并逐个联动。开启中继间顶进要比正常顶进要慢,需二次或多次顶进。先由第1—6号中继间向前顶进,待逐个中继间的千斤顶逐级伸出逐级闭合后,最后一个中继间停止向前顶进,再由工作井内主千斤顶向前顶进,中继间内千斤顶向前回收,回到静止状态。以此往返重复顶进,最后直至本段顶完贯通,如图7所示。

图7 中继间自动化控制系统设备安装集成段完成图(①中继间电控箱,②中继间PLC自动化监控箱,③总顶力传感仪,④环境监测类仪表(氧量、硫化氢、甲烷、一氧化碳、温度、湿度),⑤视频及语音监控设备)

4.2 中继间顶进技术控制要点及其注意事项

(1)中继间及自动化控制系统装置安装时应检

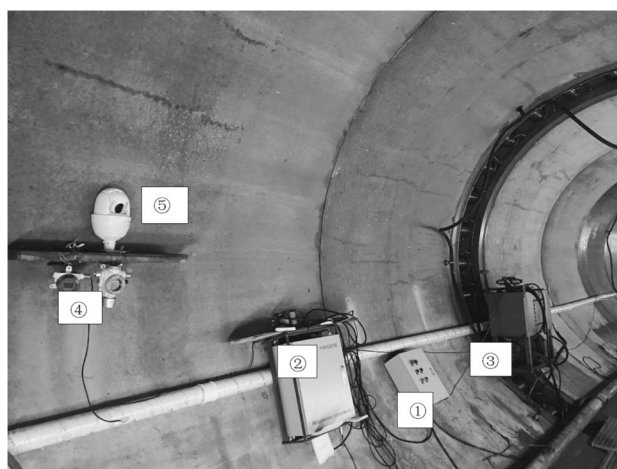


图7 中继间自动化控制系统安装

查各部件工作是否正常,安装完毕应及时调试,特别要注意模块信号传递是否正常。因中继间是伴随着顶管管节顶进逐步安装到位,每安装一个中继间就需要联调一次系统信号,因在地下密闭空间无线信号传输不如光纤信号传输优良,但光纤在施工中布置时要及时巡查保护,特别注意光纤接头信道孔工人保护不周造成堵塞影响模块的信号传输。

(2)中继间在使用中一旦发生故障应立即停机组织修复。例如工作过程中供油管路漏油须及时更换油管油封,油泵电机异响发生故障要及时更换电机等。

(3)多组中继间的使用应进行编组作业,从顶管机头向后按程序一次将每段管节向前推移,一组千斤顶伸出时,其他中继间应保持不动,当所有中继间依次完成顶伸后,主顶千斤顶最后完成顶进作业。

(4)顶管机头进入接收井后,中继间应从第一

组起逐组拆除,中继间外壳不能拆除,只能拆除内壁的小千斤顶,用高强度等级混凝土做内衬,或将外露钢板做防腐处理。

(5)中继间部位的泥水管、注浆总管必须用软管过渡,并留有不小于50 cm的余地。

4.3 中继间自动化控制系统远程联动多个中继间的实施效果

本工程中多个中继间安装就位完成后,系统遥测到预设顶力启动值,立即自动预警顶力超限,主控室工作站监控人员核查完毕后,在系统页面中点击一键启动按钮,通过管道中的视频及主工作站的系统页面监测中继间联动实施完成情况。本自动化控制联动系统方案,是在顶程测控系统中利用智能程序测控总顶力,达到设计启动值时,自动报警同时启动中继间智能系统,按需启动顶程中的各组中继间,直至最终完成总的顶进过程到达接收井。新孟河延伸拓浚工程常州市新北区境内黄山河立交地涵顶管1#线及2#线通过对中继间自动化控制联动改进设计实施,解决了以往一次中继间启动耗时过长施工效率低等施工问题,还减少了因为信号传达不及时引起误操作,以及大量施工人员进入地下施工而增加的安全风险。通过优化顶管施工的相关措施,最终黄山河立交地涵在复杂地质变化施工条件下,圆满地完成施工任务,与原施工工艺比较节约了64天,社会效益、经济效益显著。

5 结 语

结合上述工程案例,通过对中继间自动化控制系统的研发与应用,可以看出整个工序施工中所需把控的重要点及环节相对较多,在实践过程中必须根据现场情况,对其细部做好全面的分析,明确顶

管中继间施工工艺流程和操作要点,从而全面提升顶管的施工质量,保障顶管工程的施工安全,合理提速施工进度,创造更大效益。顶管中继间自动化控制系统技术对顶管工程建设发展有着重要的创新意义。黄山河立交地涵管道工程在施工期间精心组织、科学施工、合理安排,确保了质量和工期,保证了地涵顺利通水,标志着大直径顶管在复杂地层长距离水平曲线顶管中取得了重大突破,为以后的大直径顶管、曲线顶管积累了资料,丰富了设计及施工经验,同时为国内顶管设计智能化控制中继间提供了工程实践经验和技术参数,对以后的复杂地层顶管施工起到了借鉴作用^[10]。

参考文献:

- [1] 龚叶锋,朱伟林,张振.泥水平衡顶管掘进机对地下障碍物的适应性研究[J].特种结构,2009,26(12):90-93.
- [2] 姚峰.大直径排水管道顶管施工技术研究[J].给排水工程,2019,41(7):1322-1324.
- [3] 给排水管道工程施工及验收规范:GB50268—2008[S].
- [4] 严国仙,韩举宇,陈强,等.泥水平衡顶管在复杂地层下的适应性改进技术[J].建筑施工,2018,40(1):112-115.
- [5] 韩林俊.大断面长距离过海顶管在复杂地质条件下顶进效率提升方法研究[J].居舍工艺技术,2022,11(4):49-51.
- [6] 给水排水工程顶管技术规程:CECS246:2008[S].
- [7] 何莲.长距离顶管中继间设计方法的研究[J].给排水,2004,12(6):93.
- [8] 王平.PLC自动化控制系统在长距离顶管施工中的应用[J].建筑施工,2012,34(4):343-345.
- [9] 皮青云.穿越复杂地层长距离水平曲线顶管施工技术[J].非开挖技术,2016,2(2):86-89.
- [10] 梁极,康卫国,颜佩君,等.大直径雨水管顶管及曲线顶管施工技术[J].城市道桥与防洪,2005,6(11):98-101.