

引水斜井无人挖机施工技术研究与应用

路立桥¹, 周少波², 孙家波²

(1. 中国华能集团有限公司, 北京 100031; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南 迪庆 674608)

摘要:首次将无人挖机技术应用于 TB 水电工程的引水斜井施工, 同时通过优化爆破参数、强化工序衔接、改善爆破支护时间等措施, 极大提高了施工的安全性, 加快了施工进度, 提高了施工效率, 降低了施工成本, 创造了可观的直接经济和社会效益, 可为类似水电工程的斜井开挖提供参考。

关键词:斜井施工; 无人挖机; 爆破参数; TB 水电工程

中图分类号:TV52

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)S1-0091-03

Research and application of unmanned excavator technology for construction of inclined shaft for water diversion//LU Liqiao¹, ZHOU Shaobo², SUN Jiabo² (1. China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China)

Abstract: The unmanned excavator technology was studied and applied in the construction of the inclined shaft for water diversion in the TB Hydropower Project for the first time. At the same time, through measures such as optimizing blasting parameters, strengthening the connection between processes, and improving blasting support time, the safety of construction was greatly improved, the construction progress was accelerated, the construction efficiency was increased, and the construction cost was reduced, creating considerable direct economic and social benefits, which can provide reference for inclined shaft excavation in similar hydropower projects.

Key words: inclined shaft construction; unmanned excavator; blasting parameters; TB Hydropower Project

斜井开挖常用于常规水电、抽水蓄能电站以及矿井等工程建设, 其开挖效率直接影响直线工期, 是确保工程建设如期竣工的关键要素。相较于竖井, 在抽水蓄能电站等水电工程中, 斜井长度会受到引水发电等因素的影响, 其坡度一般设定为 45°~60°, 长度可达到 400 m 级^[1-2]。受坡度陡、长度长等特点的影响, 斜井开挖安全风险和施工难度较大、事故频发, 凸显了斜井是工程建设需要重点关注的工作面。另一方面, 竖井施工通常需要人工在掌子面进行扒渣^[3-6]或利用起重机将机械化设备垂直吊运至掌子面进行扒渣^[7], 而斜井施工存在无法将扒渣等作业设备起吊至作业面、挖机操作手需要沿着斜井壁行驶至作业面等安全和技术难题, 给施工作业人员带来了严重的安全隐患。截至目前, 尚无将无人驾驶技术应用于斜井开挖的工程实例。

为解决上述难题, 本文结合无人驾驶技术, 实现了无人挖机在斜井扒渣作业中的智能化与无人化施工, 并在 TB 水电工程引水隧洞的开挖阶段得到有效应用。该方法在增强安全、提高效率、控制成本等方面具有显著优势, 具备在工程建设领域中推广普

及的重要价值和深远意义。

1 工程概况

TB 水电工程包含 4 条引水隧洞, 各条隧洞长度不一, 其中 1 号隧洞长 346.991 m、2 号长 387.626 m、3 号长 430.906 m、4 号长 463.908 m, 这些隧洞均处于次关键线路上。引水隧洞由上平段、上弯段、斜井段、下弯段和下平段组成。其中 1~4 号隧洞的斜井段长度分别为 84.876、81.145、83.915、83.183 m, 与水平面所成夹角为 55°。斜井段在开挖时所涉及的围岩类别为Ⅲ类, 其断面为圆形, 开挖直径为 11.1~12.2 m。

2 斜井开挖施工方法

在完成卷扬机基础、操作机房等设备的安装后, 每次斜井开挖爆破作业包括测量放点、钻孔爆破、扒渣、锚喷支护等工序。

2.1 场地布置与设备安装

引水上平洞装配有 1 台型号为 2JTP1.6×

1. 2P-1、额定起重能力为 12.5 t 的双卷筒绞车,该绞车主要用于下放及提升运输小车、挖机等设备。钢丝绳沿线进行了扩挖处理,并在上平洞内沿着钢丝绳的周边采用钢板网或彩钢瓦进行安全防护。在上弯段布置四组托辊,其作用在于对钢丝绳进行平衡导向,降低钢丝绳磨损。施工人员通过斜井井壁上安装的钢爬梯往返于上下工作面之间,而在掌子面与钢爬梯之间,则使用铝合金伸缩梯作为过渡,以方便作业。

2.2 反井钻施工

测量放点后,采用自上而下的“正井法”对引水斜井进行开挖。首先利用型号为 RHINO 1088 DC 的反井钻机以自上至下的方式钻进开挖直径为 285 mm 的导孔,随后安装反拉钻头,再自下至上进行开挖,从而形成直径为 2.25 m 的导井,该导井作为溜渣井,爆破产生的石渣将通过导井溜送至斜井底部。在利用人工手风钻扩挖井口段 30 m 后,安装提升系统、轨道和运输小车,随后进行剩余部分的扩挖作业。

2.3 钻爆法扩挖

在实施全断面扩挖时,斜井掌子面被开挖成一个平面,爆破孔采用 YT-28 手风钻进行造孔作业。在开挖过程中,及时覆盖斜井临时防护井盖,以防止设施和残渣发生滑落。通过爆破试验对孔数、孔深等参数进行调整,严格控制孔间距和装药结构,并按照规范进行孔口堵塞,以确保每排炮的进尺维持在 1.7~2 m。优化后的爆破参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 钻爆法钻孔参数

炮孔	雷管级别	孔径/mm	孔深/cm	孔距/cm	最小抵抗线/cm	孔数/个
主爆孔	MS1	42	250	80	82	17
	MS3	42	250	90	90	22
	MS7	42	250/300	100	100	27
	MS9	42	250/300	100	100	34
周边孔	MS11	42	250/300	60	70	64

鉴于每个施工循环中“一排炮一支护”的做法导致材料及设备的倒运时间较长,经过优化后,将其调整为“两排炮一支护”。即在钻第二排爆破孔时,完成第一排支护锚杆孔的施工操作,这样做不仅节省了人员及钻机设备两上两下的转运时间,还减少了一次喷混凝土后的废料扒底时间。经测算,采用

表 2 钻爆法装药参数

炮孔名称	雷管级别	药径/mm	装药长度/cm	堵塞段长度/cm	单孔药量/kg	线装药密度/(g/m)	段药量/kg
主爆孔	MS1	32	150	100	1.50		25.50
	MS3	32	150	100	1.50		33.00
	MS7	32	150/210	100/90	1.50/2.10		44.70
	MS9	32	150/210	100/90	1.50/2.10		56.40
周边孔	MS11	25/32	243/210	57/90	0.317/2.1	127	52.38

“两排炮一支护”的施工方法后,每个施工循环累计能够节约 4~5 h。

在爆破过程中,为了确保安全,在施工支洞和引水隧洞的交叉口设置伸缩式不锈钢高强钢丝网,以防止爆破飞石及溜渣飞石飞溅。在爆破作业的最后阶段,在底部引水下弯段利用开挖产生的渣料进行回填,直至回填至顶部。同时,在斜井底部预留 5 m 岩柱,以实现一次性贯通爆破。

2.4 无人挖机下井扒渣

引水斜井无人挖机于 2022 年 5 月开始投入使用。相较于传统的人工扒渣方式,在提升系统的牵引下,无人挖机能够从引水上平洞沿着斜井井壁行驶至作业面,达成将爆破后的剩余石渣从导井中扒出并使其溜送至导井底部的施工任务要求。

无人挖机研发技术路线图如图 1 所示,采用型号为 XE75DA 挖机,在挖机内部增设无线信号接收系统、信号处理系统以及辅助设施,并研发了操作系统及信号执行机构以实现改造。经加装研发的控制

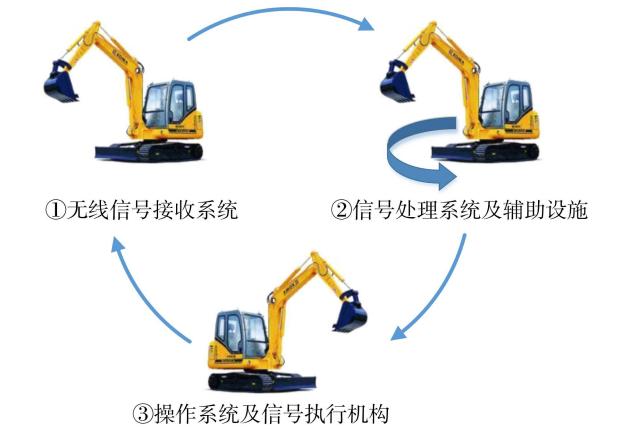


图 1 无人挖机研发技术路线流程

在技术改造完成后,为确保工程实施的一次性成功,在平地上开展了试验验证。试验结果显示,无人挖机实现了转弯、旋转、前进等功能,其性能可完全替代人工操作。工程实践证明,经过技术改造后的无人挖机能够在斜井井壁上平稳行驶,无人挖机下井施工如图 2 所示。

2.5 工序衔接时间

为有效优化各个工序的衔接时间,提升施工效



图2 无人挖机下斜井施工

率,成立了引水斜井开挖支护管理小组,并建立了无缝交接班制度,实现了白班、中班、晚班的一体化管理。通过设计和优化施工流程,同时增加人员和设备,各工序所需时间为爆破作业 8 h,扒渣作业 5 h,打锚杆孔作业 4 h,注锚杆挂网作业 6 h,喷锚作业 5 h,清底作业 3 h,以及测量放点作业 5~6 h。相较于优化调整前,整体施工时间共节约 5.5 h,显著提高了施工进度。

3 建设成效

a. 极大地提高了施工安全性。该施工技术不仅能够确保设备在行驶过程中的安全性,而且免去了施工人员亲临作业面开展扒渣作业的必要性,从而有效避免了落石等可能威胁施工人员生命安全的隐患。同时,它还提供了远距离操作的便利性,大幅降低了粉尘对施工人员的危害,保障了施工人员的职业健康。

b. 实现智能化和少人化的目标。该施工技术提升了智能建造技术在水利水电工程领域的应用水平,为后续工程的无人化作业奠定了坚实的基础。

c. 推动工程建设提质增效。斜井爆破作业的平均进尺为 1.6 m/d,则单条斜井的开挖需要的爆破循环约为 55 次。无人挖机研发改造费用为 20 万元/台,在暂不考虑提升系统、钢丝绳等附属设备费用的情况下,应用无人挖机后施工效率提升状况如表 3 所示。采用无人挖机扒渣具有以下优势:①提升施工效率。针对每次爆破后产生的石渣方量,在传统的人工扒渣方式下,若每班配备 15 名作业人员,则需要耗时达 16 h;而采用无人挖机进行扒渣作业,仅需 5 h 即可完成,从而将施工效率提升了 68.75%。②加快施工进度。自 2022 年 5 月 1 日起,引水斜井启动导井开挖工作,至 2023 年 3 月 31 日,4 条斜井全部施工完成,整个施工周期耗时 11 个月。单条斜井人工扒渣工期为 $55 \times 16 \text{ h} = 880 \text{ h} \approx 36.7 \text{ d}$;单条斜井挖机扒渣工期为 $55 \times 5 \text{ h} = 275 \text{ h} \approx 11.5 \text{ d}$ 。因此,采用挖机扒渣作业相较于人工扒渣方式,单条斜井的施工周期可以缩短大约 25 d,在缩

短建设周期方面非常可观。③提升施工质量。相较于人工扒渣方式,无人挖机对掌子面的扒渣效果更有成效。④降低施工成本。人工扒渣总成本为 $200 \text{ 元/人} \times 15 \text{ 人} \times 55 \times 4 = 66 \text{ 万元}$;挖机扒渣总成本为 $280 \text{ 元/台时} \times 5 \text{ 台时} \times 55 \times 4 + 200\,000 \text{ 元} = 50.8 \text{ 万元}$ 。因此,采用挖机扒渣,相较于人工扒渣,4 条斜井施工共节约资金 15.2 万元,显著降低了施工成本。

表 3 无人挖机施工效率提升状况

扒渣方式	单次耗时/h	单条斜井工期/d	总成本/万元
人工	16	36.7	66.0
无人挖机	5	11.5	50.8

4 结 语

TB 水电工程在引水斜井施工中采用无人挖机技术的研究与实践,验证了该技术在安全性、经济性和智能建造方面的显著优势。在双碳目标的背景下,这一技术有望在传统水电、抽水蓄能电站、矿井、隧道等多个工程领域得到广泛的推广与应用,具有广阔的应用前景和可观的经济效益。

参考文献:

[1] 张军,李守巨,宁忠立,等.抽水蓄能电站引水斜井开挖采用 TBM 施工的研究[J].水电与抽水蓄能,2018,4(2):1-7. (ZHANG Jun, LI Shouju, NING Zhongli, et al. Some key technology problems in excavations of inclined headrace tunnels with TBM tunneling [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2018,4(2):1-7. (in Chinese))

[2] 何金星.荒沟抽水蓄能电站引水斜井开挖施工技术[J].云南水力发电,2022,38(6):174-179. (HE Jinxing. Construction technology for excavation of diversion inclined shaft of Huanggou Pumped Storage Power Station[J]. Yunnan Water Power, 2022,38(6):174-179. (in Chinese))

[3] 黄金林,苏相利,唐贵和.高压引水隧洞斜井开挖施工技术[J].铁道建筑,2009(6):46-48. (HUANG Jinlin, SU Xiangli, TANG Guihe. Construction technology of inclined shaft excavation for high-pressure water diversion tunnel[J]. Railway Engineering, 2009(6):46-48. (in Chinese))

[4] 侯国荣,李名松,冯辉,等.三峡地下电站引水隧洞斜井开挖施工方法的研究[J].工程爆破,2008(1):24-27. (HOU Guorong, LI Mingsong, FENG Hui, et al. Study on construction method of inclined shaft excavation of diversion tunnels of the underground hydropower station on the Three Gorges Project[J]. Engineering Blasting, 2008(1):24-27. (in Chinese))

(下转第 96 页)

提交的资料报审文件 3 646 份,完工分部工程的质量验评表单及相关资料 4 208 份,以及 12 种原材料的试验检测报告 4 270 份,基本实现了此三类业务资料的单套制管理。该系统运用技术手段解决了水电站建设施工过程中电子档案单套制管理面临的文件法律效应问题、业务资料重复采集等问题,彻底解决了工程档案管理中长期存在的双套制/双轨制问题,真正意义上实现了单套单轨电子档案管理模式,显著地提升了工程档案管理的效率,降低了管理成本,并在一定程度上推动了水电站工程建设档案管理方式的变革。

3 结 语

相较于传统的纸质档案,电子档案具有高密度、易传递、易查找以及多媒体等显著优势,这些优势是纸质档案难以企及的。电子档案能够更为丰富且精准地反映社会生活的真实面貌,从而更好地发挥档案的价值与作用,成为连接过去、现在与未来的纽带。该系统在水利水电行业建设项目中,以质量验评、试验检测、工程收发文三个业务方向为切入点,开展了电子档案单套制管理的探索与应用,在档案管理信息化和改革中取得了显著的进步,也为同行业内其他建设工程提供了宝贵的示范,推动了整个行业档案管理水平的提升。

参考文献:

[1] 国家档案局. 电子档案单套管理一般要求: DA/T 92—2022[S].
[2] 国家档案局. 文书类电子档案检测一般要求: DA/T 70—2018[S].

(收稿日期: 2024 - 09 - 20 编辑: 雷燕)

(上接第 44 页)

4 结 语

TB 水电工程大坝采取通仓大斜层滚动浇筑技术,使碾压混凝土浇筑形成流水作业,浇筑间歇期仅 2 d,可持续、均衡浇筑;大大节省了施工时间,提高了施工效率;减小混凝土入仓强度,优化资源配置;有效缩小仓面面积,缩短层间覆盖时间,有利于提升层间结合质量;雨季施工有利于排水。大坝建设质量优良、快速高效。无论是从建设工期,还是从施工质量来说都是可行的。该技术经济和社会效益显

著,节能、环保效益明显,推广应用价值广阔。

参考文献:

[1] 马洪琪,钟登华,张宗亮,等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J]. 中国工程科学, 2011, 13 (12): 20-27. (MA Hongqi, ZHONG Denghua, ZHANG Zongliang, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects[J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13 (12): 20-27. (in Chinese))
[2] 樊启祥,洪文浩,汪志林,等. 溪洛渡特高拱坝建设项目管理模式创新与实践[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (6): 288-293. (FAN Qixiang, HONG Wenhao, WANG Zhilin, et al. Innovation and application of construction management strategy for Xiluodu superhigh arch dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (6): 288-293. (in Chinese))
[3] 郝文旭,雷绍华,王彦宏. 金安桥 RCC 大坝斜层碾压混凝土施工工艺研究[J]. 四川水力发电, 2009 (4): 91-92. (HAO Wenxu, LEI Shaohua, WANG Yanhong. Research on construction technology of inclined layer roller compacted concrete dam at Jin' anqiao[J]. Sichuan Water Power, 2009 (4): 91-92. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 24 编辑: 俞云利)

(上接第 93 页)

[5] 刘旭刚,杨晓辉. 洪屏抽水蓄能电站引水竖井开挖施工技术[J]. 水力发电, 2016, 42 (8): 48-51. (LIU Xugang, YANG Xiaohui. Construction technology of water diversion shaft excavation in Hongping Pumped-storage Power Station[J]. Water Power, 2016, 42 (8): 48-51. (in Chinese))
[6] 朱俊杰,李晓阳,王军,等. 白莲河抽水蓄能电站竖井开挖施工[J]. 水利水电技术, 2008, 39 (12): 64-66. (ZHU Junjie, LI Xiaoyang, WANG Jun, et al. Excavation of shaft for Bailianhe Pumped Storage Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39 (12): 64-66. (in Chinese))
[7] 董少正,齐界夷. 乌东德水电站大型竖井快速安全开挖技术研究与应用[J]. 施工技术, 2017, 46 (14): 100-103. (DONG Shaozheng, QI Jieyi. Research and application of fast and safe excavation technology for Wudongde Hydropower Station Large-scale Shaft [J]. Construction Technology, 2017, 46 (14): 100-103. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 20 编辑: 雷燕)