长距离引水隧洞精准贯通施工测量控制技术

李 明， 王 超， 吕骏辰， 黄 薇
（中国水利水电第十工程局有限公司，四川 都江堰 611830）

摘 要：以绰斯甲水电站 CⅡ标长距离引水隧洞为例，阐述了全球定位系统(GNSS)高精度首级地表控制网在该隧洞施工过程中的布置、1″级全站仪在提供高精度的角度和距离测量中的作用以及定期、多点的变形监测和多点管控技术的数据分析与校正等长距离隧洞施工测量的要点，这些关键技术的应用确保了该长距离引水隧洞的精准贯通，所取得的经验可为同类型隧洞施工时参考。

关键词：绰斯甲水电站；引水隧洞；全球定位系统；多点管控技术；变形监测；精准贯通
中图分类号：TV7；TV52；TV554；TV221.1 **文献标志码**： B **文章编号**：1001-2184(2025)03-0007-04
DOI：10.20196/j.cnki.scslfd.20250303

Construction Survey and Control Technology for Precise Through-Connection of Long-Distance Headrace Tunnels

LI Ming, WANG Chao, LYU Junchen, HUANG Wei
(Sinohydro Bureau 10 Co., Ltd., Dujiangyan 611830, China)

Abstract: Taking the long-distance headrace tunnel of Contract CII of the Chuosjia Hydropower Project as a case study, this paper elaborates in detail on the layout of a high-precision primary surface control network using the Global Navigation Satellite System (GNSS), the role of total stations of class 1 in providing high-precision angular and distance survey, as well as key survey aspects for long-distance tunnels such as regular multi-point deformation monitoring, data analysis and correction techniques for multi-point management and control. The application of these key technologies ensures precise breakthrough of long-distance water diversion tunnels and provides technical references for tunnels of the same type.

Key words: Chuosjia Hydropower Project; headrace tunnel; global navigation satellite system; multi-point management and control technology; deformation monitoring; precise through-connection

1 概 述

绰斯甲水电站位于四川省阿坝州壤塘县和金川县境内，是绰斯甲河梯级规划开发的第三级电站，上承蒲西水电站，下接观音桥水电站库尾。该电站为闸坝引水式开发，由首部闸坝、左岸引水系统、左岸厂区枢纽构成。该电站的装机容量为 392 MW，多年平均年发电量为 17.62 亿 kW·h，为单一发电工程，无灌溉、防洪等其他功能。

引水隧洞 CⅡ标为全长 12.3 km 的有压隧洞，布置于绰斯甲河左岸山体中，总长度为 21.185 km，引用流量 $Q=232\ m^3/s$。进水口底板高程为 2 767.00 m，至调压井底高程 2 720.00 m，隧洞纵坡为 $i=2.214‰$、$i=2.253‰$、$i=2.216‰$及 $i=2.384‰$四种型式。引水隧洞低压段(10+588.00 桩号上游)的Ⅲ类围岩采用平底马蹄形断面，其底宽为 7.0 m，高 10.45 m，边顶拱采用挂网锚喷支护，底板为素混凝土衬砌；引水隧洞高压段(10+588.00 桩号下游)的Ⅲ类围岩和全隧洞的Ⅳ类、Ⅴ类围岩采用内径为 8.9 m 的圆形断面，钢筋混凝土衬砌。

收稿日期：2024-12-28

2 测量方案的制定

2.1 首级控制网复测

(1)平面控制。根据《水利水电工程测量规范》SL 197－2013，该工程首级平面控制网的复测采用 GPS 静态测量方法布设二等 GNSS 网，其网形结构为边连式，使用中海达后处理软件进行静态数据的处理。通过新建项目、数据导入、基线解

算、网平差等步骤最终生成控制网的坐标数据，然后对网平差的结果进行检查，其包括坐标系的转换参数、点位精度等信息并确保固定误差 $a \leqslant 10$ mm，比例误差 $b \leqslant 2$ mm/km，最弱相邻点边长的相对中误差不大于 1/150 000。经检算，整个控制网的精度满足设计要求。

(2)高程控制。首级控制网的高程采用光电测距三角高程进行测量[1]；水准路线采用往返对向观测构成闭合或附合路线，起闭于设计提供的已知高程控制点。鉴于所构建的是四等水准网，其对高程的精确度具有严格要求。具体而言，对于高程中误差应严格控制在 ±3 cm 以内，而每 km 高差的中误差不得超过 ±10 mm。测量过程中，项目部遵循《水利水电工程测量规范》SL 197—2013 中四等高程控制网规定的相关技术要求，使用全站仪用中丝法进行天顶距观测，盘左位置和盘右位置分别照准同一目标读数为一测回[2]，应用水平丝精确照准目标 2 次，各读数 2 次，其两次的读数较差不应大于 3″。为了确保数据的准确性，与已知点进行了联测并进行了往返各一次的观测。此外，在附合或环线观测中采取一次性通过的策略，以进一步提高测量的效率和精度。

2.2　联系测量

对于洞外水准点，在每个洞口埋设了 2 个基准点。该基准点尽可能地与洞口等高，两基准点间的高差以保证水准测量 1～2 站可联测为标准。这些基准点被埋设在易于观测、保存，不易受开采活动干扰的地点，且需便于与隧洞洞内联测。进行导线测量时，应严格按照设计要求进行位置控制。首先，需要确定导线的起始点和终止点，利用导线与其他测量点的关系确定导线的位置。将导线的位置在隧洞平面图上进行标示，并与其他测量数据关联，以便开展后续的测量和施工工作。洞内的导线布设为双导线，以形成多边形闭合环[3]，导线点的间距为 200 m 左右。

2.3　洞内施工的测量

(1)导线的布设。导线的布设是施工测量的重要环节，其准确性直接影响到隧洞的施工质量和安全性。因此，在进行隧洞导线布设时，应严格按照设计要求和施工规范进行操作以确保隧洞的准确定位和工程质量。由于该标段的长度为 12.3 km，考虑到贯通误差的累积效应增大，为确保隧洞的精准贯通，在洞口附近或关键部位采用了三等导线；洞内则根据实际情况适当加密了四等导线点，在部分关键施工段采用三等导线进行控制。

为保证贯通精度，在引水隧洞导线布设中采用了徕卡 TZ08 全站仪，其能够满足较高精度的测量要求，无论是长距离的导线边长测量，还是高精度的角度测量其均可提供可靠数据。

(2)洞口测量。洞口测量是在洞外控制网的基础上采用坐标法，利用洞门放样数据及进洞施工数据进行洞口和明暗交界桩点的放样。为了加强放样点的检核条件，使用了全站仪坐标实测功能，利用两个已知导线点来实测放样点的坐标。地形条件好时则采用三方向进行交会以方便施工放样。

(3)掌子面测量。根据隧洞施工情况，对于不同的隧洞施工方案采用不同的方法进行测量、放样，其开挖面测量的内容为中线测量、拱顶、隧底标高控制及隧洞开挖轮廓线的测量放样。测点布设过程中，应注意测点之间的相互关系和布设的合理性。隧洞掘进过程中，每循环均需恢复开挖面中线、开挖面控制标高与开挖面轮廓线。为了保证掘进施工的方向及标高的准确性，其隧洞开挖断面的中线和高程必须符合设计要求。对于掌子面的施工测量应加强隧洞轮廓线测量的精度，每循环的放样控制必须到位，并需根据围岩级别的预留量控制好隧洞的超欠挖；对于个别坚硬岩石突出的部分(每 1 m^2 不大于 0.1 m^2)侵入衬砌应小于 5 cm，其断面严禁欠挖。开挖面测量完成后，一定要进行书面交底并与监理和第三方进行共同检验，必须做好原始测量记录。

二衬施做前，一定要对初支施工进行检查测量。根据隧洞工程测量规范要求，对于不大于 5 m 进行一个断面扫描，以此检查初支是否侵入二衬，避免影响二衬的设计厚度。

(4)贯通测量。隧洞贯通前，应根据测量的精度要求、测量方法和隧洞长度等因素预估贯通误差，看其是否在允许范围内。如果预计误差超出范围则需要采取相关措施，如调整测量方案或增加测量次数以用于提高测量精度。

隧洞贯通过程中，应及时进行贯通误差的测量，包括横向贯通误差、纵向贯通误差和高程贯通误差[4]。横向贯通误差可以通过测量贯通面两侧

的导线点坐标差值计算得出；纵向贯通误差则可通过测量贯通面两侧的中线点里程差值计算得出；高程贯通误差可以通过测量贯通面两侧的水准点高程差值计算得出。设计要求的四等导线允许误差：tan(6″)×7 100/100＝20.65 cm。

根据贯通误差的测量结果，按照一定的方法对隧洞的中线和腰线进行调整。横向贯通误差可以在贯通面处将隧洞中线向误差较小的一侧平移，使隧洞中线与设计中线重合；纵向贯通误差可以根据实际情况在洞内调整中线点的里程；高程贯通误差可以通过调整腰线的高程实现。该隧洞施工通过以上关键技术的研究与应用，有效降低了 86％左右的贯通，误差实际为 2.9 cm，实现了超长隧洞的精准贯通。

通过测量隧洞中的各个参数，可以用于评估隧洞的贯通质量，核实隧洞的位置，确认支护效果，为后续工作提供数据和依据以提高工作效率和安全性。

3　变形监测过程的保证措施

3.1　监测点的布置

为了确保测量工作的正常进行及施工的安全性，必须及时发现隧洞在施工和使用过程中的微小变形与位移，一旦变形超过安全阈值即可迅速采取有效措施进行处理，以保护隧洞内工作人员及周围居民的生命财产安全与生态环境，项目部在洞口边坡、生活营地及隧洞内布设了多组变形监测点。

3.2　监测周期的确定

隧洞开挖初期每天进行一次监测，以获取开挖过程中的实时变形数据。随着施工进展，当变形速率逐渐稳定后，可适当延长监测周期至每 2～3 d 一次。

4　测量质量及安全保证措施

4.1　人员方面

(1) 精确测量与放线。隧洞施工前，应依据设计图纸进行精确的测量与放线以确保隧洞的位置、方向和尺寸准确无误。使用高精度的测量仪器和设备，如全站仪、GPS 等进行隧洞进出口、中线、高程等关键点的测量。

(2) 开挖过程中的监控测量。在隧洞开挖过程中，应定期对开挖面进行测量，检查开挖尺寸、形状和进度是否符合设计要求。对围岩的稳定性进行监测，包括对变形、位移等参数的测量，及时发现并处理潜在的安全隐患。

(3) 支护与衬砌的测量控制。在进行支护和衬砌施工时，应确保支护结构的尺寸、位置和形状符合设计要求；对衬砌的厚度、平整度等关键参数进行测量[5]以确保衬砌结构的质量和稳定性。

(4) 建立完整的测量档案。记录隧洞施工过程中的所有测量数据，包括原始数据、处理结果和结论等。定期对测量档案进行整理与分析，用以评估隧洞施工的质量和安全状况。

(5)技术交底。外业作业前，测量技术人员应首先对内业资料进行检查，对所采用的测量方法、测量用的桩点以及测量要达到的目的向测工进行交底，做到测工人人明白。

(6)安全保证。在测量过程中必须清除干扰，需要停工时必须停工以保证测量的精度；各种建筑物放样时一定要与施工人员密切配合，避免出现不必要的偏差。

4.2　仪器

(1)徕卡 TZ08 全站仪具有 1″的测角精度和 1 mm(固定误差)＋1.5 ppm(距离每增加百万毫米，误差将增加 1.5 mm)的测距精度，在引水隧洞导线布设中，其能够满足较高精度的测量要求。无论是长距离的导线边长测量，还是高精度的角度测量，其均可提供可靠的数据。

(2)在隧洞内选择合适的位置布设导线点，徕卡 TZ08 全站仪可以通过其自动量高功能快速获取仪器的高度值，进而减少了人工丈量产生的误差，在确定导线点高程时更为准确。同时，其良好的防水防尘等级可适应隧洞内复杂的环境。

(3)在观测导线转折角时，利用徕卡 TZ08 全站仪进行连续、对径测量，其角度测量精度可以达到 1″。在进行环形导线或双导线测量时，可以根据不同的观测方向数进行测量，如方向数为 2 个时采用左右角观测法，方向数为 3 个或超过 3 个时采用全圆观测法，徕卡 TZ08 全站仪都能快速、准确地获取角度数据。

(4)由于徕卡 TZ08 全站仪的测距精度高，在测量导线边长时，其能够精确测量出相邻导线点之间的距离，并且可以根据实际情况进行温度和气压改正以提高边长测量的精度。

5　结　语

测量是整个隧洞工程中质量最为重要的一环，对于绰斯甲水电站引水隧洞长度为 12.3 km 的CⅡ标来说尤为重要，每个测量工序的误差都将叠加影响到最终工程的贯通情况。为此，项目部对于导线的设置及测量过程均采用了高精度、多次数、多检核的测量方式并定期监测洞内的变形情况，有效保证了工作人员的安全以及隧洞的精准贯通。通过对以上关键技术的研究与应用，有效降低了贯通误差，所取得的经验对于长大隧洞精准贯通测量具有指导意义。

参考文献：

[1] 熊军. 矿山井下贯通测量误差探讨与控制[J]. 低碳世界，2019，9(9)：152-153.

[2] 杨伟波，吴亚争，谭丽清. 岩土工程基础施工中深基坑支护技术的应用探析[J]. 建材发展导向，2024，22(11)：105-107.

[3] 邹符良. 大竖直角三角高程测量方法研究与应用[J]. 交通世界，2023，30(12)：157-160.

[4] 范政龙. 地铁工程测量误差研究分析[J]. 城市建设理论研究(电子版)，2015，5(11)：4214.

[5] 梁文川. 浅谈滑模摊铺水泥混凝土路面施工技术[J]. 建筑工程技术与设计，2015，3(35)：139.

作者简介：

李　明(1975-)，男，四川自贡人，项目经理，高级工程师，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

王　超(1984-)，男，河北邢台人，高级工程师，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

吕骏辰(2002-)，男，山西大同人，助理工程师，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

黄　薇(1993-)，男，四川成都人，助理工程师，从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(编辑：李燕辉)

(上接第 6 页)

高精度三维地形信息。

(3)激光雷达测量可以获取地表物体的垂直结构形态，配合地物视频或红外成像可以增强对地物的认知和识别能力，在森林调查和资源勘查方面具有广泛的应用空间。

(4)鉴于激光雷达测量不受日照和天气条件的限制，能够全天候对地进行观测，因此，其在海岸带地形测绘方面具有独特的优势。

(5)激光雷达测量可以获取长线路电力设施、输气管道线路或高速公路、城市排水管线、道路等线状地物的详细信息，从而大大节省了人工成本，提升了工作效率。

(6)激光雷达测量技术可以快速获取高精度、高空间分辨率的数字地表模型，从而帮助工程技术人员更好地了解和应对各种自然灾害，例如地震、洪水等，亦可用于灾害和环境监测，例如空气污染与水质状况等。

5　结　语

通过无人机机载激光雷达地形测量技术在老挝孟松 600 MW 风电场项目的成功应用，与传统“GPS＋全站仪”人均测量面积为 0.5 km^2/d 的工作方式相比，仅用时 54 d 即完成了整个施工区域 335.82 km^2 的 1∶2 000 地形图的测量，并将所取得的成果应用于工程施工，极大程度地保证了施工进度和项目履约，获得监理和业主的一致好评，取得了很好的社会与经济效益。该技术的成功应用具有较强的指导性意义和实际操作价值，所取得的经验可为类似工程借鉴。

参考文献：

[1] 熊威，焦明东，李云昊，等. 基于机载激光雷达的大比例尺地形图测绘应用实践[J]. 测绘与空间地理信息，2022，45(8)：237-239.

[2] 刘和平. 机载激光雷达技术在矿山大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 能源与节能，2024，29(8)：264-267.

[3] 吕琼琼. 激光雷达点云数据的三维建模技术[D]. 北京：北京交通大学信息管理学院，2009.

[4] 郝立贞，赵洪，葛亚建，等. 三维激光点云数据在 1∶500 地形图成图方面的应用[J]. 现代测绘，2022，45(3)：43-45.

[5] 李晓双，宋彬，郑丹. 基于 Geomagic 的复杂实体三维点云建模研究[J]. 测绘与空间地理信息，2017，40(8)：130-132.

作者简介：

陈　行(1985-)，男，四川成都人，高级工程师，学士，从事水电工程施工技术与管理工作；

黄晓华(1977-)，女，四川西昌人，高级工程师，一级建造师，从事水电工程施工技术与管理工作.

(编辑：李燕辉)