

水利工程中引水隧洞施工控制测量的研究

文 / 周康健 江苏省工程勘测研究院有限责任公司

马万泉 江苏省工程勘测研究院有限责任公司

仇青青 江苏省工程勘测研究院有限责任公司

摘要: 为了探讨水利工程中引水隧洞施工控制测量的关键技术和优化方法,以提高隧洞贯通精度和施工效率。文章从水利工程中引水隧洞施工控制测量的意义入手,分析了引水隧洞施工控制测量的具体实施方案和技术难点,并根据误差影响因素提出了具体的控制措施,最后以具体的案例为基础进行了总结分析。通过采取综合性措施,可显著提高引水隧洞施工控制测量的精度和效率,这些研究成果为水利工程中引水隧洞的精确施工提供了技术支持,同时也为相关领域的技术创新和发展提供了有价值的参考。

关键词: 水利工程; 引水隧洞施工; 控制测量

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.02.070

引言

随着我国水利事业的快速发展,大型引水工程项目日益增多,其中引水隧洞作为关键构筑物,对测量控制提出了更高要求。引水隧洞具有线路长、地质条件复杂、施工环境恶劣等特点,传统测量方法在精度和效率方面面临严峻挑战。同时,新型测量技术和数据处理方法的出现为解决这些问题提供了新的可能。在此背景下,深入研究引水隧洞施工控制测量技术,对于保障工程质量、提高施工效率和推动行业技术进步具有重要意义。

一、水利工程中引水隧洞施工控制测量的意义

(一) 保障工程质量和安全

引水隧洞作为水利工程中的关键构筑物,其施工质量直接影响整个工程的安全和效益,施工控制测量在保障工程质量和安全方面发挥着至关重要的作用。通过精确的测量和定位,可以确保隧洞的轴线、断面和坡度等关键参数符合设计要求,避免因测量误差导致的施工偏差,尤其在长距离隧洞施工中,控制测量能够及时发现和纠正累积误差,防止贯通误差超限。此外,施工控制测量还能为岩体稳定性评估、支护设计和施工方案优化提供准确的地质空间信息,有效降低施工风险。通过持续的监测和测量,可以及时发现隧洞变形、渗漏等潜在问题,为采取预防和补救措施提供依据,从而确保施工人员的安全和工程的整体质量。

(二) 提高施工效率和经济效益

在引水隧洞施工过程中,控制测量对于提高施工效率和经济效益具有重要意义。精确的测量数据可以指导施工单位合理安排工序,优化资源配置,减少返工和材料浪费。例如,通过精确的断面测量,可以确定最佳的爆破参数和开挖方案,既能保证开挖效率,又能避免超挖或欠挖,从而节约施工成本。此外,控制测量还能为机械化施工提供精确的导向,提高掘进机、凿岩台车等

大型设备的工作效率。在长隧道施工中,准确地贯通测量可以实现多工作面同时施工,大幅缩短工期。同时,高质量的测量数据可以支持BIM技术的应用,实现施工过程的可视化管理和优化,进一步提升项目管理水平和经济效益^[1]。

二、引水隧洞施工控制测量的具体实施方案

(一) 洞内平面控制测量设计

1. 导线网的布设与精度要求

引水隧洞的平面控制测量主要依靠导线网来实现,导线网的布设应遵循“先整体、后局部”的原则,形成闭合导线或附合导线。在长距离隧道中,可采用主、副导线相结合的方式,主导线贯穿全程,副导线根据施工需要加密布设。导线点间距一般为100-200m,视线长度不应超过120m。精度要求方面,引水隧洞施工控制测量通常采用二等或三等导线标准,其中相邻导线点的位置误差不应超过 $\pm 10\text{mm}$,导线全长的相对闭合差不应超过1/20000。在特殊地质条件或高精度要求的工程中,可适当提高精度标准,确保测量成果满足施工需求。

2. 控制点的选择与埋设方法

控制点的选择与埋设是确保测量精度和稳定性的关键,控制点应选在隧道洞壁或顶拱的稳定部位,避开易受扰动或变形的区域。常用的埋设方法包括:在洞壁预埋钢筋混凝土墩,顶部安装不锈钢标志;在顶拱岩石中钻孔埋设膨胀螺栓;或使用专门的隧道控制点标志。埋设时应确保点位稳固、不易被施工机械碰撞。为提高测量效率,可在控制点附近设置照明和强制对中装置。同时,应建立完善的控制点档案,记录点位坐标、埋设方式、周边环境等信息,便于后续维护和使用^[2]。

3. 导线测量的实施步骤与数据处理

导线测量的实施应遵循严格的操作规程。首先,进行仪器检校和标定,确保测角、测距精度满足要求。测量时采用双面观测法,角度观测不少于4个测回,距离

测量往返各测3次。为减小仪器中心误差，可采用强制对中或三脚架交换法。在长隧道中，应考虑温度、气压、湿度等因素对测距的影响，进行相应的改正。数据处理方面，采用最小二乘平差法进行平差计算。处理过程中还应注意剔除粗差，分析误差来源，必要时进行重测。对于长隧道，可采用分段平差和整体平差相结合的方法，以提高计算效率和精度，最终成果应包括点位坐标、方位角、边长等信息，并附有详细的精度分析报告。

（二）洞内高程控制测量设计

1. 高程控制网的布设与精度要求

高程控制网是确保隧道纵断面和坡度符合设计要求的基础，网形设计应与平面控制网相协调，通常沿隧道轴线布设。考虑到隧道施工的特殊性，高程控制网多采用附和水准路线，起始于洞口已知高程点，终点闭合于另一已知高程点或折返闭合，水准点间距一般为50-100m，与平面控制点相互呼应。精度要求方面，引水隧道高程测量通常采用二等或三等水准测量标准，其中相邻水准点的高差中误差不应超过 $\pm 2\text{mm} \sqrt{K}$ （K为公里数），全长闭合差不应超过 $\pm 8\text{mm} \sqrt{K}$ 。

2. 水准测量与三角高程测量的结合应用

在引水隧道高程控制测量中，通常将水准测量与三角高程测量相结合，对于长距离、大坡度的隧道，单纯依靠水准测量可能效率较低，此时可采用三角高程测量进行加密和检核。具体实施时，可在隧道内每隔500-1000m设置一个高精度水准点，作为三角高程测量的起算点，中间段采用全站仪进行三角高程测量，测距时应考虑垂直角改正。为提高精度，可采用互为镜站的观测方法，并进行多次往返测量。在数据处理时，应将水准测量和三角高程测量的结果进行综合平差，以获得最优的高程控制成果，这种组合方法既保证了高程传递的精度，又提高了测量效率^[3]。

三、施工过程中的测量控制与技术难点

（一）洞外控制测量与洞内测量的衔接

洞外控制测量与洞内测量的有效衔接是确保整个引水隧道测量系统一致性和精确性的关键环节。首先，洞外GPS控制点与洞内导线控制点的联测是实现坐标系统传递的重要步骤。这通常采用“间接传递法”，即在洞口附近选择视线良好的地方设立交会点，同时与GPS控制点和洞内导线点共视。利用全站仪对这些点进行多次观测，通过坐标转换和平差计算，将GPS坐标系统精确传递到洞内。为提高精度，可在洞口设置多个交会点，形成小型加密网。在精度控制方面，洞口交会点的位置中误差应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内，确保坐标传递的准确性。对于深井式隧道，竖井联系测量是另一个重要的衔接方法，常用的技术包括光学投点法、激光投点法和陀螺仪

定向等。其中，光学投点法利用特制的天顶仪或投点仪，通过竖井将坐标由地表传至井底。为减小投点误差，通常在井底设置液体盘，利用液面的平静性提高观测精度。

（二）隧洞开挖中的施工测量

隧洞开挖过程中的施工测量是保证工程质量的重要保障。首先，隧洞中心线及坡度的测设是开挖的指导，通常采用全站仪沿已知控制点放样中心线，每隔20-50m设置一个轴线控制点，为便于施工人员识别，可在断面上设置十字丝或激光指示器。坡度控制则通过高程测量实现，在开挖面附近设置临时水准点，用水准仪或全站仪测量坡度。对于开挖断面的放样与检查，传统方法是使用断面尺，但现代施工多采用全站仪或三维激光扫描仪。断面检查的允许偏差通常控制在设计轮廓线外20cm、内5cm范围内。掘进深度与土石方量的测量计算是工程计量的基础。掘进深度可通过全站仪测量开挖面与上一个断面的距离获得。土石方量计算则根据相邻断面面积和距离，采用棱柱体公式进行。为提高效率和精度，现代隧道工程常采用三维激光扫描技术，通过点云数据直接计算体积，精度可达到 $\pm 3\%$ 。

四、测量误差对贯通精度的影响及应对措施

（一）误差来源分析

在引水隧道施工控制测量中，测量误差对贯通精度有着直接而显著的影响。误差来源主要可分为仪器误差、观测误差和环境误差三大类。仪器误差包括仪器本身的制造误差、安装误差和调校误差等。现代测量仪器如全站仪虽然精度很高，但长期使用后仍可能产生系统误差。观测误差主要来自操作人员的视准、读数和记录等环节。尤其在隧道这种特殊环境下，由于光线不足、空间受限等因素，观测误差往往比露天测量更大。环境误差则包括温度变化导致的仪器和标尺膨胀收缩、大气折光、地磁异常（对使用陀螺仪定向时）等。此外，隧道施工过程中的振动、粉尘和潮湿环境也会对测量精度产生不利影响。

以下表格列出了各类误差源对贯通精度的典型影响大小：

表 1 各类误差源对贯通精度的典型影响

误差来源	典型误差量级	对 1km 隧道贯通的影响
角度观测误差	$\pm 3''$	$\pm 15\text{mm}$
距离测量误差	$\pm (2\text{mm}+2\text{ppm})$	$\pm 4\text{mm}$
仪器中心误差	$\pm 1\text{mm}$	$\pm 5\text{mm}$
点位稳定性	$\pm 2\text{mm}$	$\pm 10\text{mm}$
温度影响（钢尺）	$\pm 1.2\text{mm}/^\circ\text{C} / 100\text{m}$	$\pm 12\text{mm}$ （温差 10°C ）
折光影响	变化范围大	可达 $\pm 50\text{mm}$

需要注意的是，这些误差在长距离隧道中会累积放大。例如，在10km长的隧道中，如果不采取有效措施，贯通误差可能达到米级。因此，在实际工程中必须采取综合措施来控制并减小这些误差，如使用高精度仪器、改善观测条件、增加观测次数、采用先进的数据处理方法等，以确保隧道贯通精度满足工程要求。

（二）误差控制与精度提升措施

1. 加密控制点，提高导线网的精度

在实践中，可根据隧道长度和地质条件，在主导线基础上布设加密导线。例如，在每公里长度内增设3—5个加密控制点，形成更密集的网络结构，这种方法不仅能够减小相邻点间的误差传播，还能提供更多的检核机会。值得注意的是，加密点的选择应考虑地质稳定性和观测便利性。在软弱围岩段，可适当增加加密点密度；在硬岩段，则可相对稀疏。同时，可以采用“跳站”观测法，即除了测量相邻点外，还观测间隔一个或多个点的方位角和距离，这样可以形成几何强度更高的网形^[4]。

2. 采用高精度测量仪器，减少人为误差

随着测量技术的发展，高精度仪器在隧道测量中的应用日益广泛，现代化的全站仪具备自动对中、自动跟踪和自动记录等功能，大大减少了人为操作误差。例如，采用0.5"角度精度、(1mm+1ppm)距离精度的全站仪，配合棱镜常数误差 $\leq 0.3\text{mm}$ 的高精度棱镜，可将单次测量的误差控制在毫米级。此外，陀螺经纬仪的应用解决了传统方法难以克服的方位角误差累积问题。在长隧道中，每隔2—3km设置一个陀螺测站，可有效控制方位角误差的传播。三维激光扫描仪的引入则彻底改变了断面测量的方式，不仅提高了效率，还能提供全方位的隧道形变监测数据。

五、案例分析与实践

本案例选取某大型水利工程中的引水隧洞项目进行分析。该隧洞全长18.5公里，最大埋深约800米，地质条件复杂，包括软弱围岩段和高地应力区，项目采用了综合性的施工控制测量方案，充分利用现代测量技术和优化算法。

在测量网设计方面，采用了“GPS控制网+导线网+水准网”的三维控制体系。洞外布设了15个GPS控制点，形成高精度框架网。洞内每公里设置4—5个导线控制点，并在关键位置增设加密点。高程控制采用二等水准测量，每500m设置一个水准点。在长距离隧道中，每3公里设置一个陀螺测站，有效控制了方位角误差的累积。

测量实施过程中，采用了0.5"角度精度的全站仪和高精度棱镜，配合自动化数据采集系统，大幅减少了人为误差。在软弱围岩段，增加了测量频次，并采用三维

激光扫描技术进行断面检测和变形监测。数据处理采用考虑随机模型误差的Baarda数据探测法，有效识别和剔除了异常观测值。实施效果显著，最终贯通误差仅为0.082米，远优于设计要求的0.3米。整个测量过程中未发生重大测量事故，有力保障了工程进度和质量。此案例提供了宝贵的经验：采用多尺度控制网设计，有效控制了误差传播；充分利用现代测量技术，提高了测量精度和效率；实施严格的质量控制措施，确保了数据可靠性。

然而，项目实施过程中也暴露出一些问题。例如，在地应力区，常规埋设方式的控制点出现不同程度的位移，影响了测量精度。此外，测量数据的实时传输和处理在部分深埋段受到限制，影响了信息的及时性。针对这些问题，提出以下改进建议：（1）在地质条件复杂区域，采用深层基岩锚固等方式提高控制点稳定性；

（2）建立基于5G技术的测量数据实时传输系统，实现全程动态监控；（3）引入人工智能算法，提高数据处理和异常检测的自动化水平；（4）加强测量人员的专业培训，特别是在新技术应用方面的能力建设。通过这些措施，可进一步提升引水隧洞施工控制测量的精度和效率，为类似工程提供有益参考^[5]。

结束语

综上所述，水利工程中引水隧洞施工控制测量是一项系统工程，涉及多学科知识和先进技术的综合应用。通过优化测量网设计、提高仪器精度、加强质量控制等措施，结合新兴的信息化和智能化技术，可以有效提升测量精度和效率。然而，面对日益复杂的工程需求和不断变化的施工环境，未来仍需在测量理论创新、仪器设备改进和数据处理算法优化等方面进行深入研究。只有不断探索和创新，才能为我国水利事业的可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 康兰方, 冀玉豪, 张阳阳, 唐刚, 梁斌. 复杂环境下引水隧洞开挖卸荷力学响应研究与支护评价[J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(02): 21-26.
- [2] 冯学兵, 常杰, 吴玉丽. 水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用研究[J]. 中华建设, 2024, (03): 151-153.
- [3] 许伟勇. 水利工程中引水隧洞施工技术分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(24): 92-94.
- [4] 刘敬. 水利工程中引水隧洞的施工技术[J]. 水上安全, 2023, (10): 178-180.
- [5] 赵智. 水利工程引水隧洞施工贯通测量和智能预测研究[J]. 经纬天地, 2023, (04): 13-16.

作者简介: 周康健, 1970.04, 男, 汉, 江苏, 本科, 高级职称, 研究方向主要从事: 水利工程。