

长大隧道及长斜井短边导线测量方案优化研究

王传猛

(中铁十二局集团第三工程有限公司, 山西 太原 030024)

摘要 在长大隧道工程中, 精确的导线测量是确保隧道顺利贯通和施工质量的关键环节。本文以某铁路全长 9.6 km 的长大隧道为研究对象, 细致且全面地阐述了在其施工过程中测量方面的重点以及难点。针对长大隧道平面测量, 现场采用在斜井小里程方向贯通前利用斜井交叉导线控制, 单方向贯通后联合正洞从隧道进口交叉导线联合测量, 并且通过精密平差与精度分析, 以及延长进口导线边长减小累计误差等一系列方法, 对隧道导线进行优化处理, 有效提高导线精度, 以期为类似工程提供实践参考。

关键词 长大隧道; 导线测量; 交叉导线; 导线优化

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.041

0 引言

随着交通基础设施建设的持续发展, 长大隧道工程数量日益增多。在隧道施工过程中, 测量工作贯穿始终, 而导线测量作为洞内平面控制测量的重要手段, 其精度直接影响隧道的贯通精度和施工质量。对于长度达 9.6 km 的本隧道工程, 施工包括进口、出口及斜井, 其中斜井长度 1 400 m, 斜井大里程掘进 3 100 m, 在测量过程中面临诸多挑战, 如何提高导线精度成为亟待解决的关键问题。

导线测量的精度是确保隧道施工顺利进行和最终贯通的极为关键的因素。传统的导线测量方法在长大隧道中可能无法满足高精度要求, 尤其是在斜井施工中, 导线边长的急剧变化和短边起算对长距离测量所产生的累计误差等一系列问题尤为突出。因此, 对导线测量的方案加以优化, 提高测量精度^[1], 对于保障长大隧道工程的贯通和施工质量具有重要意义。

1 工程概况

本隧道全长 9.6 km, 属于典型的长大隧道工程, 施工采用“进口 + 斜井 + 出口”的布局。其中, 1 400 m 长的斜井不仅承担着辅助通风、出渣的关键功能, 更通过开辟新的施工工作面, 将原有的单头掘进模式转变为多头并进, 有效缩短了工程周期。在斜井与正洞衔接段, 受到空间布局方面的限制条件影响, 此处隧道转弯半径较小, 导致导线测量的边长骤减至 100 m^[2]。与此同时, 斜井大里程方向的单向开挖长度达到 3 100 m, 远远大于常规隧道施工段 (见图 1)。

这种“短边 + 长距”的特殊工况, 给洞内导线测量带来双重技术挑战: 一方面, 短导线边长会放大测角误差对点位精度的影响, 根据误差传播定律, 边长每缩短一半, 角度测量误差对点位横向误差的影响将呈指数级增长; 另一方面, 超长掘进距离导致测量误差持续累积, 若不采取针对性优化措施, 那么贯通面

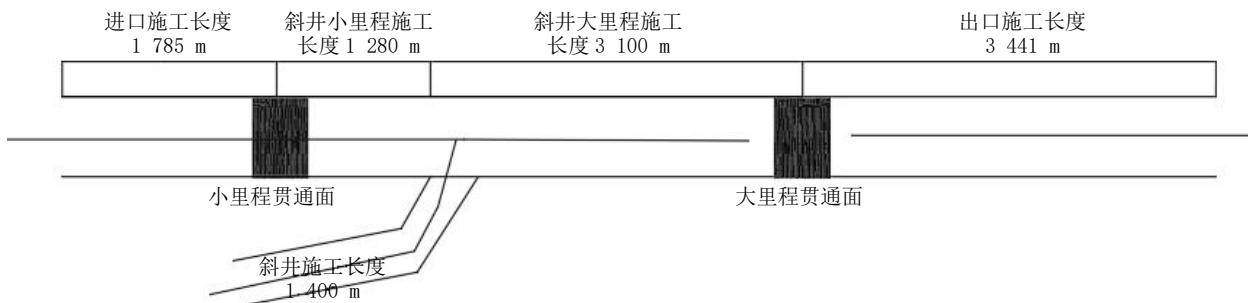


图 1 施工示意图

误差可能超出规范规定的限值。在实际施工中,此类工况已成为影响隧道精准贯通的核心风险点,迫切需要通过测量技术创新和工艺方面改进实现精度提高。

2 长大隧道及长斜井短边导线测量难点分析

2.1 导线边长变化影响

在斜井与正洞连接处,导线边长因通视原因急剧缩短至两条100 m短边。按照测量误差传播方面的相关理论来看,较短的导线边长会使测角误差对横向贯通误差的影响显著增大。因为测角误差对横向贯通误差的影响与导线边长成反比,边长越短,相同测角误差所导致的横向贯通误差就越大。在实际测量中,这种边长变化对测量精度的影响相当明显,特别是在面临着复杂的地质条件,再加上施工环境也会产生干扰的情况下,短边导线的测量精度更容易受到干扰。

2.2 长距离测量累计误差

斜井大里程方向掘进长度达3 100 m,在此超长测段开展洞内导线测量作业时,系统误差与偶然误差的效应显著。其中,仪器标称精度限制引发的系统误差、观测人员操作偏差导致的偶然误差,起算短边误差在长距离传递过程中呈现累积误差,进而很大程度上影响贯通误差,若该误差超出了规范所规定的限值,那么会对隧道轴线控制精度产生不利影响,所以需要采用具有针对性的技术措施来对其加以控制。

2.3 施工环境干扰

隧道内施工环境状况颇为复杂,存在大量施工机械尾气、粉尘,空气湿度较大,这些种种因素综合起来,便会给测量视线带来干扰,降低观测精度。与此同时,在施工过程当中所产生的振动情况,也极有可能对仪器的稳定性产生影响,进而使得测量误差进一步增大。

3 提高导线精度的措施

3.1 交叉导线的应用

在该隧道的平面测量工作中,现场采用了交叉导线的导线测量方式,将洞外的测量基准延伸至洞内。这种交叉导线的测量方法,通过增加更多的测量数据,能有效提升导线测量的可靠性和精准度。具体来说,在交叉导线测量过程中,通过对多个角度和距离的测量,可以形成多个闭合的测量回路或相互关联的导线路径,从而实现对测量数据的检查核对和误差分摊。

以该隧道的斜井测量为例,交叉导线的布置使得每个测量点都与多个观测方向和距离相关联。当某个测量数据出现异常时,就可以通过其他的测量数据进

行判断和修正,这极大地提高了测量结果的准确性。例如:在某次测量中,某个角度的测量值与其他数据差异较大,通过交叉导线的闭合回路计算,及时发现并修正了这个异常值,保证了整体测量数据的可靠性。

交叉导线的另一个优点是它的灵活性和对环境的适应能力。在复杂的施工环境中,交叉导线可以根据现场的实际情况进行调整和优化,确保测量工作顺利开展。例如:在斜井与正洞的连接处,由于空间限制,导线的边长较短,这时交叉导线可以通过增加测量点和调整测量方法,有效降低短距离测量对精度的影响。在该区域测量时,通过增加观测点的数量,形成更多的测量回路,即使导线边长较短,也能保证测量精度满足施工要求。

3.2 斜井与小里程贯通前后的测量策略

在斜井小里程方向贯通前,采用斜井交叉导线控制方案。该方案通过在斜井内布设相互交叉的闭合导线网,形成双重校核机制:每段导线均采用全站仪进行往返观测,对水平角观测采用全圆测回法,测回数不少于6个,边长测量采用对向观测取均值,同步记录温度、气压等气象参数进行实时修正。在此阶段,利用交叉导线的冗余观测条件,借助严密平差计算消除粗差,将开挖方向偏差控制在 ± 10 mm以内,确保斜井在小里程方向实现精确贯通。

在斜井进正洞处,导线边长因通视原因急剧缩短至两条100 m短边。为减小短边长造成的测角误差及仪器对中误差影响,采用强制对中装置,确保仪器安装时的对中精度,便有效降低了短边测量时的误差影响。

在斜井与小里程完成贯通之后,实施斜井与正洞联合测量平差工作,以此对大里程导线加以控制。具体操作上,首先建立统一的测量基准体系,采用全球卫星导航系统(GNSS)在洞口及斜井口布设控制点^[3],确保基准一致性。然后以隧道进口高精度交叉导线作为起算数据,将斜井导线点纳入正洞导线网,形成“正洞—斜井”联合导线环。在数据处理环节,运用专业软件采取赫尔默特(Helmert)平差方式进行整体平差计算,充分利用进口导线起始边方位角精度高、起算点坐标误差小的优势,有效抵消斜井长距离导线测量中因边长归化、高程投影、短边测角误差影响等因素产生的累计误差。经实际验证,该方法使隧道横向贯通误差控制在 ± 15 mm以内,较传统独立测量方法精度提升30%以上,显著提高了整个隧道导线网的可靠性和工程施工安全性。

3.3 延长进口导线边长, 减小累计误差

当斜井与小里程方向顺利贯通后, 可采用延长进口导线边长的技术手段。该方法通过科学合理地增加导线边长, 削减测角误差对导线全长的影响, 利用“长边控制”原理, 对既有隧道导线进行系统性优化。相较于短边导线, 延长后的导线边长能够显著降低测角误差的累积效应, 同时减少仪器对中、目标照准等操作带来的误差, 从而实现隧道导线测量精度的有效提升。

在隧道洞内导线测量中, 测角误差与横向贯通误差之间存在显著的反比关系: 导线边长越长, 由测角误差导致的横向贯通误差增量就越小。此外, 增加导线边长可有效减少设站次数。设站次数的减少, 不仅能降低仪器对中误差和目标偏心误差的累积效应, 还能降低观测误差在测量过程中的传递, 从而显著提升测量精度。

在实际操作环节, 该隧道工程综合考量各种因素后进行比选, 将进口导线的边长从 300 m 延长至 450 m。优化后, 借助交叉导线网平差计算, 新方案呈现出显著的精度提升效果: 测角中误差由原来的 $1.2''$ 降至 $0.8''$, 边长相对中误差从 $1/100\ 000$ 提升至 $1/120\ 000$ 。经贯通误差预估算, 横向贯通误差预计值较原方案减少 38%。这一数据有效验证了延长导线边长对提升测量精度的显著效果^[4]。

3.4 精密平差与精度分析

在测量数据采集完成后, 在测量数据采集完成后, 需运用专业测量平差软件 (如科傻平差系统、铁四院 SYADJ 等) 进行精密平差计算。在平差过程中, 充分考虑各种误差因素, 如测角误差、测距误差、仪器常数误差等, 并根据误差传播定律对这些误差进行合理分配。同时, 对平差结果进行详细的精度分析, 计算出每个导线点的点位中误差、边长相对中误差以及方位角中误差等精度指标。通过精度分析, 可以直观地了解导线测量的精度情况^[5], 及时发现精度较低的区域和环节, 为后续的精度优化提供依据。例如: 在该隧道导线测量的精度分析中, 发现某段导线由于受施工环境干扰较大, 点位中误差超出了预期范围, 随后对该区域进行了重新测量和数据处理, 有效提高了该区域的导线精度。

4 实施效果验证

4.1 贯通误差测量

隧道整体贯通后, 采用 Leica MS60 全站仪 (测角精度 $\pm 0.5''$, 测距精度 $\pm (1\text{ mm}+1\text{ ppm})$) 对贯通面两侧

导线点进行联测, 按规范要求进行 6 测回观测。测量结果显示: 横向贯通误差为 15 mm (规范允许值 50 mm), 纵向贯通误差为 10 mm (规范允许值 70 mm), 误差指标均控制在规范要求的 1/3 以内。

对比原方案贯通误差预估算值 (横向 24 mm), 实际贯通误差减小 37.5%, 与优化后导线精度提升效果 (测角中误差降低 33.3%) 明显。该结果验证了延长导线边长 (300 m 延长至 450 m)、交叉导线网平差及精度闭环管理等措施的有效性, 为长大隧道高精度贯通提供了可复制的技术方案。工程实践表明, 通过导线边长优化与精密平差技术, 可将隧道贯通误差控制在设计允许值的 50% 以内, 显著提升隧道工程的施工安全性与结构可靠性。

4.2 与设计值对比分析

将隧道衬砌完成后的实际轴线与设计轴线进行对比分析。通过在隧道内多个断面测量实际轴线坐标, 并与设计坐标进行差值计算, 结果显示, 最大偏差值为 12 mm, 且大部分断面的偏差值均在 10 mm 以内。这说明隧道施工过程中的导线测量精度能够满足设计要求, 确保了隧道施工的准确性和质量。

5 结束语

通过对长大隧道工程导线测量优化, 针对斜井施工中导线边长变化、长距离测量累计误差以及施工环境干扰等难点, 采用交叉导线形式、斜井贯通前后不同测量策略、加强测量数据的处理与分析等措施, 可以有效提高导线的精度, 实现隧道的高精度贯通, 保证隧道施工质量。这些方法和经验对于类似的长大隧道工程具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 张华丰. 长大隧道控制测量精度提高的优化策略与研究 [J]. 科技资讯, 2024(23):144-147.
- [2] 王晓辉. 多测回测角软件在长大隧道导线测量中的应用 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2020,19(04):1-5.
- [3] 曹起. 利用不同导线测量方法对地铁隧道贯通误差的估算 [J]. 工程建设与设计, 2020(14):98-99.
- [4] 梁旺. 隧道洞内导线测量精度的影响因素和防范对策分析 [J]. 建筑技术开发, 2019,46(19):120-121.
- [5] 吴敬奎, 方秀友, 王文龙. 长距离隧道控制测量与精度分析 [J]. 江西建材, 2022(12):88-90.