

复杂地质构造区大型贯通测量导线网抗差优化设计

孟凯

晋能控股晋城公司掌石沟煤业有限公司, 中国·山西 高平 048400

摘要: 在矿山巷道等大型地下工程建设中, 贯通测量是确保工程精准对接的关键环节, 针对复杂地质构造区大型贯通测量中导线网易受粗差干扰、测量精度难以保障的问题, 开展导线网抗差优化设计研究, 通过分析复杂地质条件下测量误差来源与传播特性, 结合抗差估计理论与优化算法, 提出适用于该区域的导线网布设、观测方案及数据处理优化策略, 研究成果可有效提升贯通测量精度与可靠性, 为复杂地质环境下的大型工程建设提供技术支撑。

关键词: 复杂地质构造区; 大型贯通测量; 导线网; 抗差优化设计; 测量精度

Robust Optimization Design of Large-scale Traverse Network for Through Surveying in Complex Geological Structures

Meng Kai

Zhangshigou Coal Industry Co., Ltd., Jincheng Company, Jinneng Holding Group, Gaoping, Shanxi, 048400, China

Abstract: In large-scale underground engineering such as mine tunnels, through surveying is a crucial step to ensure precise alignment. This paper addresses the issue of large-scale through surveying in complex geological structures where traverse networks are prone to gross errors and measurement accuracy is hard to guarantee. By analyzing the sources and propagation characteristics of measurement errors under complex geological conditions and combining robust estimation theory with optimization algorithms, this study proposes a layout, observation plan, and data processing optimization strategy for traverse networks suitable for this area. The research results can effectively improve the accuracy and reliability of through surveying and provide technical support for large-scale engineering construction in complex geological environments.

Keywords: Complex geological structures; Large-scale through surveying; Traverse network; Robust optimization design; Measurement accuracy

0 前言

在复杂地质构造区往往会出现地层破碎, 岩层移动和地下水侵蚀的现象, 造成仪器在测量时的稳定性降低, 控制点容易发生形变, 继而出现粗差和系统误差等问题, 极大地影响了导线网的测量精度, 本次研究的目的是通过理论分析和技术创新来解决目前在复杂地质构造区内贯通测量精度和可靠性困难的问题。

1 复杂地质构造区大型贯通测量导线网抗差设计存在的问题

1.1 控制点的变形造成基准失真

在复杂地质构造区, 断层活动, 地层沉降对控制点的稳定性有明显影响, 在一个穿越岩溶区工程项目中, 施工期间有 20% 的控制点出现了位移, 其中最大的沉降量是 12mm/月, 水平位移是 8mm/季度, 这远远超过了《工程测量规范》规定的 $\pm 3\text{mm/月}$ 的允许变形阈值^[1]。长时间的观测数据表明, 在软土地层区域, 控制点的年均沉降率介于 5~10mm, 而在断层破碎带的区域, 控制点的位移速度是稳定地层的 2~3 倍, 直接造成导线网起算数据的故障, 从而

影响了后续测量的准确性。

1.2 测量误差累计超限

传统的导线网测量, 在复杂的环境中, 误差容易迅速积累。经过实际测量, 数据显示, 在强振动的环境下, 全站仪的测角中误差从标准的 $\pm 2''$ 逐渐增大到 $\pm 6''$, 而测距的相对误差也从 1/50000 增大到了 1/15000。在一个长度为 3.5km 的矿山巷道贯通测量项目中, 由于测站数量高达 45 个, 累计测角误差和测距误差分别达到了 $\pm 22''$ 和 8cm, 这导致贯通面的横向误差高达 15cm, 超出了规范要求 ($\pm 5\text{cm}$) 的 200%, 从而严重影响了工程对接的精度。

2 复杂地质构造区大型贯通测量导线网抗差优化设计目标

2.1 建设稳定控制基准体系

通过对控制点布设和加固工艺的优化, 控制点的年变形量保持在 $\pm 2\text{mm}$ 范围内, 采用深埋钢管标 (入土深度 $\geq 8\text{m}$) 或岩芯标, 其抗拔力设计值不低于 60kN, 抗侧向压力 $\geq 40\text{kN}$ 。与北斗/GNSS 实时监测系统相结合, 将位移预警阈值设定在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内, 实现了对控制点的状态动态监测, 保证了起算数据的可靠性。

2.2 控制误差符合安全标准

对导线网的布局进行优化,成功地将测站数量减少了 25%,并确保测角的中误差控制在 $\pm 3''$ 之内,使得测距的相对中误差优于 1/35000。采用了高精度的陀螺全站仪(测角精度 $\pm 0.3''$)来传递方位信息,每隔 4km 执行一次陀螺定向操作,确保方位角误差的累计控制在 $\pm 4''$ 之内,确保贯通面横向误差 $\leq \pm 3\text{cm}$,纵向误差 $\leq \pm 2\text{cm}$,以满足高精度工程需求。

3 复杂地质构造区大型贯通测量导线网抗差优化设计的方法

3.1 拓扑结构的优化设计

复杂地质构造区导线网拓扑结构的优化需要综合考虑控制点的稳定性和误差传播控制,在一个 5km 长的穿越断裂带煤矿巷道工程项目中,通过采用“闭合环加支导线”的混合拓扑结构,成功地将传统的单一支导线测站数量从 60 个减少到 42 个,减少了大约 30%。根据误差椭圆理论对网形进行优化,将贯通面的横向中误差从 8cm 减小到 5cm,要达到规范规定的 $\pm 3\text{cm}$ 精度,还需要辅以其他优化措施,在利用遗传算法对拓扑结构寻优的过程中,设种群规模 50、迭代次数 100 次、交叉概率 0.8、变异概率 0.05^[2]。对于断层破碎带地区加密布设控制点,将邻近控制点间距由常规 300~500m 减小到 150~200m;同时,增加双备份控制点。优化后导线网冗余观测分量由 0.2 增加到 0.4,平差结果可靠性明显提高。模拟了在不同地质环境下误差的传播情况,研究结果表明,经过优化的拓扑结构能够将角度闭合差的超限概率减少 40%,同时边长的相对中误差能够控制在 1/30000 的范围内。

3.2 观测权值自适应分配

通过对观测条件的实时评价,实现了观测权值的自适应分配,并对权值进行动态调整,将全站仪应用于山区矿山巷道实测,以大气折光系数为基础,以仪器对中误差和环境振动幅值为权值的计算模型。在环境振动加速度大于 0.05m/s^2 后,测角权值由原来的 1 自动减小到 0.3,测距权值由 1 变为 0.5。实际测量数据表明:通过自适应权值的分配,测角的中误差由原来的 $5''$ 减小到 $3''$,测距的相对中误差也由原来的 1/15000 减小到 1/25000,基于方差分量估计的自适应定权方法,在煤矿巷道项目中,将观测数据按时段划分,初始权比设为 1 : 1。通过三轮的迭代运算,测角的权重调整在 0.2~1.5,而测距的权重调整则在 0.3~2.0。平差后点内误差椭圆的长半轴由 12mm 缩短到 8mm,短半轴由 7mm 缩短到 5mm,证明自适应权值分配在改善测量精度方面是有效的^[3]。

3.3 对抗差数据进行预处理

在抗差数据预处理中,综合运用了多种手段对粗差进行辨识和去除,以水利工程地下洞室测量为研究对象,结

合 3σ 准则和狄克逊(Dixon)检验法实现了测角测距资料粗差探测。设显著水平 $\alpha=0.05$,狄克逊检验的统计量超过临界值,则判粗差。在实际应用场景中,该技术成功地识别了 4 个大于 5cm 的距离测量误差和 3 个超出 $8''$ 的角度测量误差,达到了 100% 的识别准确率,之后采用 IGGIII 估计方法进行稳定的预处理,设定了污染分布比率为 15%,并调整了权重函数参数 $c_1=1.5$ 和 $c_2=2.5$ 。对煤矿巷道实测数据进行处理时,通过抗差预处理,使测角中误差由原来的 $6''$ 减小到 $3.5''$,测距的相对误差从原来的 1/18000 减小到 1/22000。经过平差分析,与未经处理的数据相比,点位的中误差降低了 35%,这显著减少了粗差对测量结果的不良影响。

3.4 导线点的稳定性提高

导线点稳定性的提高是通过埋设工艺的优化和监测预警来完成的,工程通过软土地层,控制点为深埋钢管标,钢管内径 150mm、壁厚 8mm、入土深 10m、底部灌注 C30 混凝土进行扩大基础施工,通过现场实验检测其抗拔力可达 80kN、抗侧向压力可达 50kN,设置静力水准仪和倾角传感器,在控制点的沉降速率大于 1mm/周次或者倾斜角度的变化大于 0.05° 的情况下触发预警,断层破碎带地区采取“一主一备”的双控制点布设战略,主副点间距为 5m。利用 InSAR 技术实现控制点的远程监测可以达到 $\pm 1\text{mm}$ 的精度。矿山项目采用此方案后控制点位移量由平均每年 8mm 减小到 2mm 内,确保导线网基准稳定。根据监测数据,实施了增强措施之后,95% 的控制点在施工过程中的位移都保持在规范所允许的 $\pm 3\text{mm}$ 的范围之内。

3.5 多源资料抗差平差

对全站仪、GNSS 和陀螺全站仪进行多源数据的抗差平差融合,在煤矿巷道测量中,将 GNSS 观测的平面坐标(精度 $\pm 10\text{mm}$)、全站仪的边长与角度,测角的中差为 $\pm 2''$;测距的相对中差为 1/50000,陀螺全站仪的方位角(精度 $\pm 0.5''$)进行联合平差。使用方差分量估计来确定不同数据源的权重比例,初始权重比例设置为 GNSS : 全站仪 : 陀螺全站仪 = 1 : 5 : 3,在多次迭代的计算后,权重被调整到了 1 : 8 : 4 的比例。通过平差分析,发现贯通面的横向中误差从 7cm 降低到 4cm,而纵向中误差则从 5cm 减少到 3cm。相较于单一全站仪的平差数据,点位的中误差椭圆长半轴减少了 30%,而短半轴则缩减了 25%。使用 Huber 估计方法进行了抗差处理,并设定了一个稳健因子 $k=1.345$,这确保了平差结果能够抵御 10% 以内的粗差,从而保障了多源数据融合平差的稳定性和可靠性。为了进一步检验多源数据抗差平差效果,模拟环境下人为地加入了不同数量级粗差。当全站仪的测角数据混入 5% 的粗差、测距数据混入 3% 的粗差、GNSS 坐标数据混入 2% 的粗差时,传统的最小二乘联合平差会导致贯通面的横向误差扩大到 12cm,使用 Huber 估计方法得到的抗差平差结果只增加了

5.5cm, 而误差的增长率下降了 54%。引入稳健估计迭代机制设定最大迭代次数为 10, 在连续三次迭代改正数的变化率低于 0.1mm 的情况下结束计算以保证平差过程的高效收敛, 在实际井下测量导入中, 多源数据抗差平差技术凭借高精度与强抗干扰性, 有效解决了巷道狭长环境下信号遮挡、仪器误差累积问题。通过实时动态调整权重与剔除粗差, 大幅提升测量成果可靠性, 为井下巷道精准贯通、矿层定位及安全生产提供了坚实的技术支撑。

3.6 参数的全局优化算法

参数全局优化算法采用智能计算方法系统地优化导线网布设, 观测和平差等关键参数, 在复杂地质山区的超长贯通测量项目中, 采用粒子群优化算法 (PSO) 对导线网的控制点间距、测站数、观测频率等 12 个参数进行联合优化。设粒子群规模 80, 最大迭代次数 200 次, 学习因子 $c1=c2=1.5$, 惯性权重 ω 由 0.9 线性下降到 0.4, 在优化的过程中, 将贯通面的中误差最小化作为目标函数, 并确保满足《工程测量规范》中关于测角中误差 $\leq \pm 2.5''$ 和测距相对中误差 $\leq 1/40000$ 的相关约束条件。经过一系列的优化措施, 控制点的平均间距从原先的 350m 减小到了 280m, 同时, 测站的数量也减少了 22%。这导致贯通面的横向中误差从 7.8cm 减少到了 4.2cm, 纵向中误差也从 6.5cm 减少到了 3.1cm, 从而明显提高了测量的准确性, 在遗传算法应用方面, 针对岩溶地区的矿山巷道导线网, 设置种群数量 60, 交叉概率 0.75, 变异概率 0.03, 优化导线网图形结构参数, 观测权值分配系数及其他 8 项变量。经历了 150 代的迭代过程后, 优化后的导线网络中多余的观测分量从 0.28 增加到 0.45, 同时网形强度因子也提升了 38%。实际实测数

据表明, 使用优化参数的导线网平差后点内误差椭圆的长半轴由 12.3mm 降低到 8.6mm; 短半轴由 7.5mm 降低到 5.2mm; 导线网整体可靠性得到有效加强, 还采用模拟退火算法和最小二乘配置法相结合的方法优化了一个跨越活动断裂带地下工程导线网的参数。通过设定初始温度为 1000, 降温系数为 0.98, 马尔可夫链长度为 50, 全局寻优控制点坐标, 观测值改正数。经过优化后的数据显示, 采用这种方法可以将导线网在平差后的单位权重误差从 3.2" 减少到 2.1", 在复杂地质中表现出较好的抗差性能, 优化效果明显。

4 结语

本次研究以复杂地质构造区大比例尺贯通实测导线网抗差优化设计为重点, 系统地提出了方案设计至数据处理全过程优化策略。研究结果有效地提高了复杂地质环境贯通测量精度和可靠性, 但是在动态地质变化监测和智能化抗差处理方面还有待改进。今后需要进一步将新兴技术与复杂地质测量理论和应用相结合。

参考文献:

- [1] 张鹏飞. 插件式无人机精确测量树障装置的研制[J]. 设备管理与维修, 2023(16):47-48.
- [2] 张翔. 高速铁路工程测量中的精密导线网布设与数据处理[J]. 信息系统工程, 2024(5):73-75.
- [3] 勾万祥, 郑勇, 闫杰, 等. 基于交叉导线网的隧道洞内测量新方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(10):207-211.

作者简介: 孟凯 (1988-), 男, 中国山西高平人, 本科, 工程师, 从事煤矿地测防治水方面研究。