

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220893

测量机器人大坝变形自动化监测中的大气折光修正研究

肖 维¹, 杨松林², 韩行进¹, 孙倩雯³, 周建国³

(1. 湖南五凌电力科技有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 五凌电力有限公司, 湖南长沙 410004;
3. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北武汉 430068)

摘要: 测量机器人在水库大坝长期、连续、自动的位移监测中发挥着重要作用, 然而其监测结果的可靠性易受大气折光的影响。在理论分析气象元素修正、基准点差分修正等模型的基础上, 利用碗米坡电站建立的基于测量机器人的自动化监测系统, 对大气折光修正模型的适用性进行了试验分析。结果表明, 对于小监测区域, 仅利用测站处的气象信息进行修正即可取得较好的效果, 同时基准点差分修正与气象元素修正的结果精度相当。结果对于构建基于测量机器人的大坝自动化监测系统具有参考价值。

关键词: 大坝变形监测; 测量机器人; 大气折光; 观测值修正

中图分类号: TV698.1⁺1; [P258]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0110-04

光修正模型的选择提供参考。

1 引言

位移监测是大坝安全监测的重要内容之一^[1], 通过监测大坝坝体、两岸边坡及近坝库区不良地质体等变形体的水平和垂直位移^[2], 为保障大坝的安全运行提供了必要支持。智能全站仪, 俗称测量机器人, 在长期、连续、自动的位移监测方面发挥着重要作用^[3]。当前我国很多大坝都建立了基于测量机器人的自动化位移监测系统^[4]。监测精度对于大坝变形分析的可靠性非常重要^[5], 对基于测量机器人的自动化位移监测系统来说, 影响其监测精度的因素主要包括观测仪器、观测路径及观测目标。在观测仪器和目标确定的情况下, 监测精度的不确定性主要受观测路径, 尤其是路径中大气折光的影响。温度、大气压及湿度等气象条件的变化导致的大气折光对角度、距离等观测值的影响十分显著, 由于自动化监测中无法通过对向观测来削弱大气折光误差, 故必须通过模型对大气折光进行修正。常用的修正方法有基于实测气象元素的修正模型^[6]、基于基准点的差分修正模型^[7]及相关的改进^[8], 但现有研究对各类折光修正模型的实际效果缺乏验证与对比。鉴此, 本文利用碗米坡水电站建立的自动化监测系统, 对不同大气折光修正模型的效果进行了试验分析, 旨在为实际大坝监测项目中大气折

2 大气折光修正方法

2.1 气象元素修正模型

测量机器人监测大坝自动化位移采用单向观测模式, 其大气折光的影响无法通过对向观测进行削弱, 故需对原始观测值进行修正。根据电磁波测距原理可知, 位于测站处的测量机器人到监测点目标棱镜之间的斜距 S 计算式为:

$$S = \frac{c}{2fn}(N + \Delta N) \quad (1)$$

式中, c 为电磁波在真空中的传输速度, 3×10^8 m/s; f 为电磁波的调制频率, Hz; n 为大气折射率; N 为电磁波传播的波长个数; ΔN 为不足一个波长的部分。

所测得的斜距 S 与大气折射率 n 的取值有关, 由于大坝监测区域的大气密度分布不均匀, 大气各点处的折射率不同, 电磁波在大气中传播时会发生漂移和偏折。根据最短光程原理, 对于有折射率梯度的介质, 电磁波的传播会凹向折射率较大的方向, 故需对观测值进行修正, 其修正公式为:

$$\Delta S = (n_0 - n)S \quad (2)$$

式中, n_0 为标准大气折射率; n 为大气实测折射率。

大气折射率 n 主要与大气温度、大气压及湿

收稿日期: 2022-05-02, 修回日期: 2022-07-05

作者简介: 肖维(1988-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为大坝安全监测, E-mail: chauvetxw@163.com

度等气象因素有关,则气象元素修正模型就利用监测现场的温度 t 、气压 P 及湿相对度 e , 根据测距电磁波的波长按一定的修正公式计算得到原始观测值的修正数。通常不同厂商的仪器具有不同的气象修正公式,但其基本原理相同,以徠卡 TM50 测量机器人为例,其测距气象修正公式为:

$$\Delta S = [286.34 - 0.29525P / (1 + \alpha t) + 4.126 \times 10^{-2}e / (1 + \alpha t)] S \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, $\alpha = 1/273.16$ 。

测定气象元素除了可修正斜距外,亦可通过相应公式修正水平角和竖直角。对于大坝自动化位移监测系统来说,需配置高精度的温度计、气压计和湿度计同步采集气象信息修正测量机器人的原始观测值。一般在测站处配置多要素气象传感器获取气象信息,必要时可在目标监测点配置气象传感器,并利用测站点和监测点的平均气象信息进行修正。

2.2 基准点差分修正模型

对于测量机器人大坝自动化监测来说其监测范围一般不大,且整个区域建设有统一的基准网。当确定基准点稳定且监测区域的大气代表性误差规律清楚时,可采用基准点差分修正模型来削弱大气折光的影响。其具体做法为利用测站点到稳定基准点的已知信息校准实时观测值,此时无需测量气象信息,简化了监测系统的设备配置。

设预先获得测站至某基准点 j 的已知斜距为 $d(j, 0)$, 在周期性的自动化监测过程中,某监测周期 T 实测的斜距为 $d(j, T)$, 因测站和基准点一般均位于稳定区域,可认为其距离长期保持稳定不变,故已知值与实测值的差异可认为是由大气折光引起的,测距气象修正比例系数 $\Delta d(j, T)$ 为:

$$\Delta d(j, T) = [d(j, T) - d(j, 0)] / d(j, T) \quad (4)$$

若该监测周期测量机器人实测某目标监测点 i 的斜距为 $d'(i, T)$, 则经过差分修正后的斜距 $d(i, T)$ 为:

$$d(i, T) = d'(i, T) - \Delta d(j, T) d'(i, T) \quad (5)$$

同样,除了修正实测斜距外,亦可基于差分思想修正水平角和竖直角观测值。用于校准的基准点与监测点之间大气折光条件的相似性是保障差分修正精度的必要前提。为了提高监测点与校准基点的折光条件的相似性,实际中可采用分组的形式缩小差分范围。具体可根据监测点所处的平面位置、高程等分布将距离相近的监测点纳入同一组,同时选择与该点组距离接近的校准基点进行修正,使所有监测点均位于测站至该校准基点

所形成的空间锥形体范围内。然而基准点一般均位于变形体外的稳定区域,这使位于变形体中心的部分监测点难以找到具有折光相似性的基准点进行差分修正。对此,可考虑在变形体上设置深入基岩的校准基点,以保证其稳定性用于邻近监测点的差分修正。

3 大气折光修正试验

3.1 试验场地及设备

为了验证大气折光修正模型的适用性,利用湖南省酉水流域碗米坡水电站建立的基于测量机器人的自动化位移监测系统进行了试验分析。该系统主要包括位于大坝上游两岸的 TS05A、TS06 测站点观测房,位于左右岸边坡、左岸上游黄土坡滑坡体及右岸上游跨屋溪蠕变体等四个监测区域的监测点。其中,位于 TS06 测站点观测房内的测量机器人在程序控制下定期自动打开观测窗进行观测,测完后观测窗关闭。观测仪器采用徠卡 TM50 高精度测量机器人(标称精度为测角 $0.5''$, 测距 $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ mm/km}$)。在观测房房顶安装了超声波气象传感器,用于测量气温、气压、湿度及风速等气象信息来修正观测值,同时安装于观测房房顶的雨雪传感器实时检测外界雨雪情况以决定是否打开观测窗执行观测任务。

大气折光修正试验主要选取了右岸上游跨屋溪蠕变体的监测点进行,此监测区域的监测点能同时被 TS05A、TS06 两个测站校准,在跨屋溪蠕变体的监测点均安装了上下同轴的双层棱镜及保护罩。为了统一,当棱镜和保护罩通过防盗螺丝固定后其下层棱镜均正对 TS05A 测站,上层棱镜均正对 TS06 测站。为了分析联合测站点与监测点的气象信息进行修正的效果,试验中选择便携式的气象站固定于典型的监测点处实时采集气象数据,便携式气象站的安装见图 1。



图 1 跨屋溪蠕变体典型监测点便携式气象站安装
Fig. 1 Installation of a portable meteorological station at a typical monitoring point

3.2 主要试验过程

基于碗米坡水电站测量机器人自动化监测系统展开的试验连续采集了 4 d 数据,其具体过程为:①在跨屋溪蠕变体上、中、下三个高程面上选择 6 个典型监测点布设便携式气象站,具体选择的点为 RT04、RT06、RT07、RT09、RT10、RT11,监测点之间的最大高程约 80 m,所选监测点在跨屋溪蠕变体的分布见图 2。在监测点安装便携式气象站的时间为 2021-12-23 上午,安装前调整时钟,以确保各便携式气象传感器与两测站的时间保持一致。各便携式气象传感器可自动采集并存储气温、湿度和气压等气象数据,采样频率设定为 1 min,于 2021-12-27 上午收回所有的便携式气象站。②设定 TS05A、TS06 测站的测量机器人从 2021-12-23 中午 12:00 开始同步观测跨屋溪的监测点,每个监测点观测 4 个测回。监测周期设定为 1 h,两测站处的超声波气象站的采样频率设定为 1 min。若雨雪传感器检测到外部有雨雪,则不执行该期观测任务。

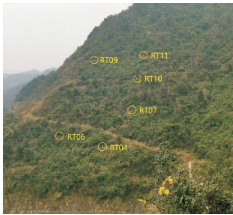


图 2 跨屋溪蠕变体典型监测点选取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of selection of typical monitoring points in Kuawu Creek

3.3 试验结果与分析

3.3.1 气象数据分析

试验期间 TS05A、TS06 两测站的超声波气

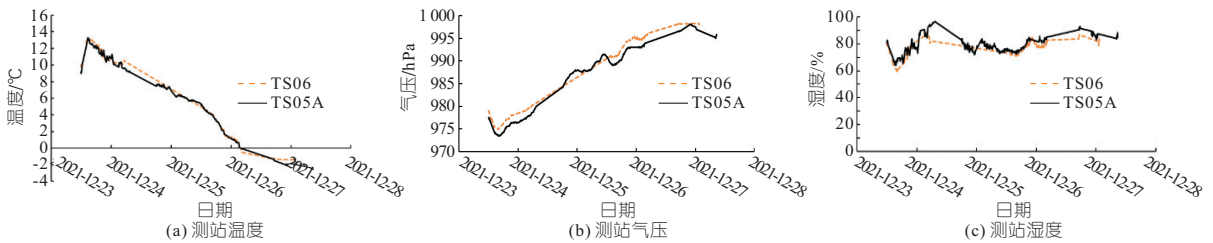


图 3 两测站的超声波气象站数据

Fig. 3 Ultrasonic meteorological station data of two stations

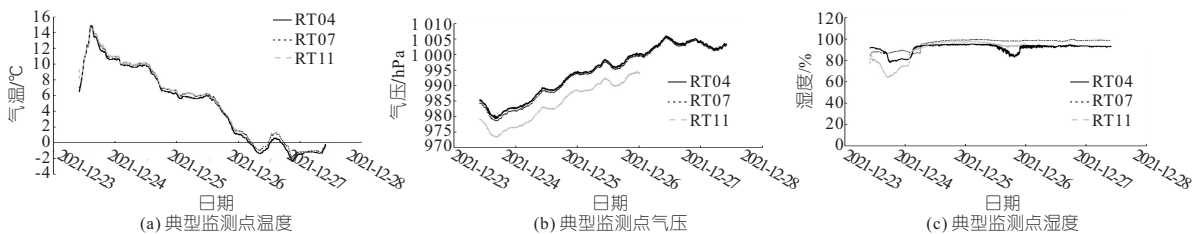


图 4 代表性监测点的便携式气象站数据

Fig. 4 Portable meteorological station data from representative monitoring points

象站采集的气温、气压和湿度数据见图 3。由图 3 可看出,对位于西水河两岸大致同一高程且相距约 500 m 的两测站来说,试验期间两测站采集的气象信息在数值和趋势上均保持一致。试验期间部置于典型监测点的便携式气象站 (RT04、RT07、RT11) 采集的气温、气压及湿度数据见图 4。由图 4 可看出,由于测区范围较小,不同高程的典型监测点处的气温数据基本保持一致,受试验期间天气条件的影响,各监测点处的气温呈下降趋势。对于气压来说,各监测点的气压在试验期间呈较一致的上升趋势,不同高程的监测点各时刻的气压值存在一个较固定的差值。对于湿度来说,整个试验期间各监测点的湿度保持在 60%~90%。同时,对比两测站与各监测点处的气象可知,各监测点与两测站的气象信息也具有 consistency。

3.3.2 修正效果分析

由于典型监测点能同时被 TS05A、TS06 两个测站瞄准,故可分别采用极坐标法和前方交会法计算监测点的坐标,对比两种方法对大气折光修正的效果。

对于极坐标法,利用试验期间 TS05A 测站的观测值,分别采用测站气象元素修正、测站+测点气象元素修正及基准点差分修正等三种大气折光修正模型进行分析。TS05A 测站到该区域各监测点的平均距离约为 500 m,由于试验时间仅 4 d,可认为该期间各监测点的位置保持不变。可采用试验期间计算得到的各监测点的多期坐标的标准差作为衡量修正效果的指标。不同大气折光修正模型下采用极坐标法计算得到典型监测点在 X、Y、Z 方向的标准差见表 1。

表 1 不同大气折光修正模型在极坐标法、前方交会法下的效果

Tab. 1 Effects of different atmospheric refraction correction models under polar coordinate method and forward intersection method

典型 监测 点	TS06A 测站极坐标法下的标准差/mm									TS06A-TS06 前方交会法下的中误差/mm											
	不修正			测站气象元素修正			测站+测点气象元素修正			观测值差分修正			不修正			测站气象元素修正			测站+测点气象元素修正		
	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
RT04	2.6	2.5	0.8	0.3	0.5	1.0	0.2	0.4	1.1	0.2	0.4	0.9	1.8	0.5	0.4	0.2	0.3	0.7	0.2	0.2	0.7
RT06	2.5	1.9	1.5	0.2	0.3	1.2	0.2	0.2	1.2	0.6	0.4	1.3	1.9	0.3	0.9	0.3	0.2	0.6	0.3	0.2	0.5
RT07	3.0	2.1	1.1	0.2	0.4	1.1	0.3	0.5	1.1	0.2	0.5	1.2	2.3	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6
RT09	3.3	1.5	0.7	0.2	0.6	0.8	0.3	0.6	0.8	0.9	1.1	0.6	2.5	0.5	0.4	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	0.5
RT10	3.4	1.8	0.6	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4	0.6	0.4	0.7	0.3	2.7	0.4	0.7	0.5	0.4	0.8	0.6	0.4	0.8
RT11	3.7	1.6	1.0	0.4	0.5	1.1	0.5	0.5	1.1	0.8	0.3	0.7	3.0	0.4	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	0.4	0.8

由表 1 可看出,通过测站气象元素修正,可提高监测点在 X、Y 方向的精度,而对于 Z 方向来说,测站气象修正对其精度的提升并不明显。对于测站+测点气象元素修正,由于监测区域较小,测站与监测点之间的气象差异并不明显,通过测站和监测点的平均气象信息进行修正后计算得到的监测点的精度相对于仅利用测站气象修正无明显提升。基准点差分修正利用坐标固定 RT13 作为校准基点,利用测站到校准基点的固定距离对距离观测值进行修正后计算监测点的坐标。同样通过基准点差分修正仅可提高监测点在 X、Y 方向的精度,这与气象元素修正方法表现一致。与气象元素修正方法对比来看,基准点差分修正结果在精度上的优势并不明显,实际中需考虑校准基点与监测点的折光条件的相似性。

对于前方交会法,利用试验期间 TS05A、TS06 两测站的同期观测值采用测站气象元素修正和测站+测点气象元素修正等模型进行了分析。不同大气折光修正模型下采用前方交会法计算得到典型监测点在 X、Y、Z 方向的标准差见表 1。由表 1 可看出,与极坐标法相似,无论是测站气象元素修正还是测站+测点气象元素修正,均可提高监测点在 X、Y 方向的精度,但对于 Z 方向的精度提升并不明显。同时由于测站点到监测点的距离较近,经过气象修正后的前方交会法精度相对于极坐标法提升不大。

4 结论

a. 对于小区域的大坝变形监测系统,测站和测点的气象信息趋于一致,此时仅需通过测站气象元素修正即可取得较好的效果,基准点差分修正的精度与气象元素修正的精度相当。

b. 当监测距离较短时,需多台测量机器人参与的前方交会法相对于仅需单台仪器的极坐标法在提高监测点精度方面的优势并不明显,这对于工程实践具有参考价值。

参考文献:

- [1] 曹文彬,黄太平,李守雷. 超高土石坝变形监测应用探讨[J]. 水电能源科学,2021,39(3):50-53.
- [2] 张思洪,江德军. 高精度地表三维位移自动化监测技术研究与应用[J]. 长江科学院院报,2021,38(1):66-71.
- [3] 张文,黄声享,李洋洋. 基于测量机器人的自动化变形监测系统设计与实现[J]. 测绘工程,2018,27(2):37-41.
- [4] 崔鹏飞. 基于 GNSS 及测量机器人的大坝安全监测研究——以枕头坝水电站为例[J]. 人民长江,2020,51(增刊 1):132-134,148.
- [5] 柏文锋. 基于智能全站仪的地铁隧道自动化监测精度分析及验证[J]. 测绘通报,2018(11):107-110.
- [6] 江德军,黄会宝,柯虎,等. 多重极坐标分层差分在瀑布沟水电站变形监测中的应用[J]. 水力发电,2019,45(10):106-110.
- [7] 武致宇,张献州,黎冶,等. 最小二乘拟合的多基准站实时差分改正法[J]. 测绘科学,2019,44(9):29-34.
- [8] 李建川,张宇,史波. 高边坡变形监测电磁波测距边长气象改正方法[J]. 人民长江,2018,49(4):56-60.

Research on Refraction Correction of Automatic Dam Deformation Monitoring with Robotic Total Station

XIAO Wei¹, YANG Song-lin², HAN Xing-jin¹, SUN Qian-wen³, ZHOU Jian-guo³

(1. Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Wuling Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 3. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Robotic total station plays an important role in long-term, continuous and automatic displacement monitoring of reservoir dams. But the reliability of the monitoring results is easily affected by atmospheric refraction. Based on the theoretical analysis of the meteorological correction model and reference point differential correction model, the applicability of atmospheric refraction correction model was experimentally analyzed by using the automatic monitoring system based on robotic total station established in Wanmipo power station. The results show that for small monitoring areas, only using the meteorological data at the station for correction can achieve good results, and the accuracy of reference point differential correction model is equivalent to that of meteorological correction model. It has reference value for the construction of dam automatic monitoring system based on robotic total station.

Key words: dam deformation monitoring; robotic total station; atmospheric refraction; observation correction