



长江航道工程测量投影变形修正 新方案研究及试验

张国平, 舒晓明, 刘力, 梁向棋, 梁超峰
(长江航道测量中心, 湖北武汉 430010)

摘要: 在长江航道工程测量中, 对高斯投影长度变形问题进行修正尤为重要。GPS快速静态定位, 能够快速获取较高精度的点位坐标信息以及精准的基线信息。研究利用快速静态测量获取高精度基线信息, 在水平距离受地球曲率影响可忽略的范围内, 通过在椭球切面上的水平投影计算真实水平距离, 实现长度变形的修正。试验数据表明, 修正后距离与全站仪精密测距结果偏差在厘米级, 最大偏差为1.4 cm, 满足航道工程测量精度要求。

关键词: 高斯投影; 长度变形; 快速静态; 基线信息

中图分类号: U 612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0025-03

New modification program of projection distortion in survey of the Yangtze River engineering

ZHANG Guo-ping, SHU Xiao-ming, LIU Li, LIANG Xiang-qi, LIANG Chao-feng
(Changjiang Waterway Survey Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: In the engineering survey of Yangtze River waterway, the correction of length deformation in Gauss projection is especially important. The rapid static positioning can quickly acquire the accurate coordinate and baseline information. In case that the influence of the earth curvature on horizontal distance can be ignored, this paper illuminates an original method which employs the exact baseline information acquired by rapid static positioning to calculate the real distance using the baseline horizontal projection on ellipsoid tangent plane, and finally corrects the length deformation. The results indicate that, the deviations between corrected distance and the corresponding distance measured by the total stations are all at cm level, and the maximum deviation is 1.4 cm, which satisfies the requirement of the engineering survey of the Yangtze River waterway.

Keywords: Gauss projection; length deformation; rapid static positioning; baseline information

长江航道测量区域往往呈现以东西向为主的沿长江分布的带状特征, 在国家地形图制作标准框架下, 这些带状工程测量区域往往会占据整个投影带的东西向宽度。高斯投影是正形投影, 保证了投影角度的不变性、图形的相似性以及在某点各方向上长度比的同一性, 但高斯投影长度变形向远离中央经线的方向逐渐增大^[1-3]。

为此, 测量规范中的解决方案包括重新选择中央经线进行投影、变更椭球基准或选择区域独

立坐标系等^[2-3]。但是在长江航道的实际工程测量应用中, 往往要求工程测量区域在地形图标准分幅下进行, 不进行中央经线的变更、参考基准的改变或独立坐标系的建立。在这种约束条件下, 当前工程中的主要办法一是在投影变形区某已知控制点区域利用全站仪进行控制点加密, 二是采取快速静态布设控制点结合全站仪测距修正长度变形的办法^[4-6], 然而这两种方法受通视和地面大气折光、棱镜摆放误差等影响。本文基于大量工程实践提出

收稿日期: 2015-06-05

作者简介: 张国平 (1956—), 男, 高级工程师, 从事航道测绘、电子航道图及智能航道建设的研究。

利用快速静态测量中获取的高精度基线信息计算 WGS84 椭球下的两点水平距离来修正投影坐标, 在确保方位不变的条件下, 实现长度变形的修正。

1 投影变形修正新方案原理及适用范围

高斯投影的特性决定, 投影变形表现为两点间距离误差, 而方位能保持一致, 因此, 在水平距离受地球曲率影响可忽略的情况下, 变形修正的关键在于还原两点间的真实水平距离。GPS 快速静态定位能够快速解算确定整周未知数 (模糊度或模糊值), 快速测量较高精度的点位坐标信息和精准的基线信息^[7-8]。新方案利用快速静态测量中获取的高精度基线信息计算 WGS84 椭球下的两点水平距离来修正投影坐标, 在确保方位不变的条件下, 实现长度变形修正。

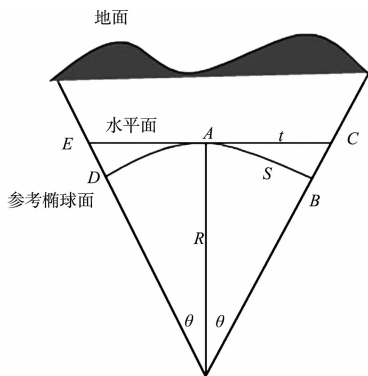


图 1 水平距离与真实距离的关系

如图 1 所示, 水平面代替参考椭球面产生的距离误差为:

$$\Delta S = t - S = R(\tan\theta - \theta) = R\left(\frac{1}{3}\theta^3 + \frac{2}{15}\theta^5 + \dots\right) \quad (1)$$

其中 $\theta = \frac{S}{R}$ (2)

上式近似为: $\Delta S = \frac{S^3}{3R^2}$ (3)

则相对误差为: $\frac{\Delta S}{S} = \frac{S^2}{3R^2}$ (4)

在半径为 10 km (或面积为 100 km²) 范围内, 相对误差小于 0.82 ppm, 因此, 可以不考虑参考椭球曲率 e 对水平距离的影响^[9]。在水平距离受地球曲率影响可忽略的情况下, 真实水平距

离 D 可近似为直角三角形边角计算, 水平距离计算公式如下:

$$D = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2 - (H_1 - H_0)^2} \quad (5)$$

2 投影变形修正新方案原理与流程

新方案算法的计算流程为:

1) 两点 $P_0(x_0, y_0)$ 、 $P_1(x_1, y_1)$ 投影坐标水平距离为:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (6)$$

2) 两点 $P_0(B_0, L_0, H_0)$ 、 $P_1(B_1, L_1, H_1)$ 空间直角坐标系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H) \cos B \cos L \\ (N + H) \cos B \sin L \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 选取区域中高程处于中间值或者能代表工程区平均高程的点 P_0 为基准点, 对另一点 P_1 的坐标修正, 得到修正后的观测值:

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \end{bmatrix} = \frac{D}{d} \begin{bmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4) 相对观测精度计算, 其中 (x_i, y_i) 为单个投影坐标观测值, (\bar{x}, \bar{y}) 为均值。

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \\ \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \end{cases} \quad (9)$$

从上面的修正思路可见, 新方案基于基准控制点通过方位和距离完成新控制点的修正计算, 因此新方案理论上等价于高精度边角控制测量。另外, 为使所有点距满足该法的距离限制, 原则上要选择区域中心点作为控制起算点。

3 软件实现

本文利用 C++ 程序设计语言, 通过 Visual Studio 2010 完成软件实现, 并采用静态 MFC 链接库, 软件无需安装。软件主要功能模块包括数据的导入模块、数据处理模块、数据输出模块。核心计算模块采用面向对象的核心算法设计思路, 设计坐标点类, 并将前文中的处理计算功能设计

为点类的功能函数。

软件输出报告以 *.txt 格式存储, 并分为 3 大部分, 其中第 1 部分为异常提示部分, 用于提示原始导入文件中可能存在数据格式输入异常的行; 第 2 部分为处理结果简单汇总部分, 将处理修正后新坐标信息进行汇总, 用于成果的复制应用; 第 3 部分是处理结果的详细报告部分, 包含每个点的点名、观测次数、原投影坐标、修正后的投影坐标、原投影水平距离、真实水平距离、修正值大小、归化形变量以及观测精度统计。

4 试验及分析

本文所用试验数据来源于碾子湾水道(图 2), 该水道工程区较多, 且处在 37、38 度跨带区域, 投影变形十分明显。算例共采用 7 个控制点数据, 以其中一个作为基站, 采用天宝 R8 GNSS 双频双星 GPS 快速静态模式测量, 测量时段 15 min, 每次测量间隔为 15 s, 水平精度可达 $\pm 5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm RMS}$, 垂直精度达 $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm RMS}$ 。

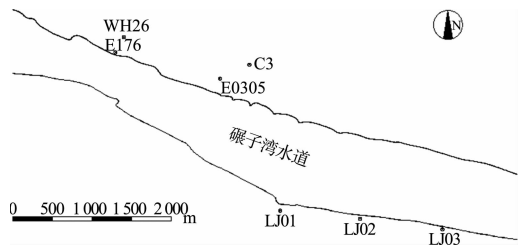


图 2 控制点分布

投影修正的关键在于将真实水平距离修正到原投影坐标上, 用全站仪精密测距对新方案求解出的距离进行验证比对。采用莱卡 TS30 全站仪, 其 IR 模式精度为 $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, 单棱镜测程达 3 500 m, 长测程模式可达 10 000 m, 它将 PinPoint 激光脉冲技术和相位观测法整合在一起, 在保证精度的同时, 测程也大大提高, 能够过滤反射光, 滤除无棱镜测量时反射的杂光, 大大提高了无棱镜测距的可靠性, 保证了测量精度。在基站上架设 TS30 全站仪, 分别对其他 6 个控制点进行 10 次距离测量, 以平均值作为最终结果(表 1)。

表 1 投影变形新方案精度统计

点号	修正前坐标		修正后坐标		原平面距离	修正后平面距离	距离改正值
	x	y	x	y			
C3	**** 056.726	**** 17.563	**** 056.762	**** 17.173	1 699.611	1 699.219	-0.392
E0305	**** 879.172	**** 46.462	**** 879.249	**** 46.156	1 362.650	1 362.334	-0.315
WH26	**** 404.068	**** 31.546	**** 404.023	**** 31.521	219.749	219.699	-0.051
LJ01	**** 209.789	**** 06.792	**** 210.250	**** 06.313	2 888.238	2 887.572	-0.665
LJ02	**** 106.594	**** 17.839	**** 107.075	**** 17.132	3 741.320	3 740.465	-0.855
LJ03	**** 974.408	**** 59.844	**** 974.915	**** 58.906	4 701.351	4 700.285	-1.066

表 2 投影变形新方案修正结果与全站仪测量结果对比

基站	全站仪测距均值	新方案计算值	差值
基站-C3	1 699.213	1 699.219	-0.006
基站-E0305	1 362.341	1 362.334	0.007
基站-WH26	219.696	219.699	-0.003
基站-LJ01	2 887.569	2 887.572	-0.009
基站-LJ02	3 740.454	3 740.465	-0.011
基站-LJ03	4 700.299	4 700.285	0.014

从表 2 中不同距离的统计分析可见, 全站仪测距均值和新方案修正后距离间的差值为厘米级, 最大偏差在距离为 4.7 km 时仅为 1.4 cm, 满足了

工程测量规范^[9-11]的要求, 表明新方案修正距离的正确性以及新方案软件处理结果的可靠性。

5 结论

本文提出的高斯投影长度变形修正新方法, 原理简单, 方法可靠。利用本方法修正了碾子湾水道工程测量控制点数据, 修正后距离与全站仪 H32($0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$)测量的点位距离进行比较, 差值为厘米级, 最大偏差为 1.4 cm, 投影修正误差满足工程测量规范^[9-11]要求。