

北斗三号卫星在水电站施工测量控制网布设应用与分析

李文杰

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京

收稿日期: 2024年3月25日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月29日

摘要

目前国内水电站施工测量控制网大都基于全球定位系统(global positioning system, GPS)系统建设, 伴随着我国自主建设的北斗三号卫星导航系统(Beidou-3 satellite system, BDS-3)逐步完善, 这为水电站建设行业摆脱GPS系统提供了可能。本文根据某水电站建设重点项目为例, 以GAMIT专业基线解算软件分别处理北斗数据与GPS系统数据, 在基线解算精度, 测站点坐标平差精度进行比较分析。研究表明: 基于北斗卫星系统的控制网解算精度与GPS系统的控制网解算平差精度处于同一水平, 在观测条件优良的情况下甚至优于GPS系统。充分证明了北斗卫星导航系统在水电站施工控制网建设中的适用性与可行性。

关键词

北斗系统, 水电站, 验后单位权中误差, 均方根

Application and Analysis of Beidou-3 Satellite in the Layout of Construction Survey Control Network of Hydropower Stations

Wenjie Li

China Power Construction Group Beijing Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 25th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 29th, 2024

Abstract

At present, the domestic hydropower station construction measurement and control networks are

mainly based on the global positioning system (GPS) system, along with the gradual improvement of China's independently constructed Beidou-3 satellite navigation system (BDS-3), which provides a possibility for the hydropower station construction industry to get rid of the GPS system. This provides a possibility for the hydropower station construction industry to get rid of the GPS system. In this paper, according to a key project of hydropower station construction as an example, GAMIT professional baseline solving software handles BeiDou data and GPS system data respectively, and compares and analyses the baseline solving accuracy and the leveling accuracy of measuring station coordinates. The study shows that the accuracy of control network solving based on the BeiDou satellite system is at the same level as that of the GPS system, and even better than that of the GPS system under excellent observation conditions. It fully proves the applicability and feasibility of the BeiDou satellite navigation system in the construction control network of hydropower station.

Keywords

Beidou System, Hydropower Stations, Mean Square Error of Unit Weight after Verification, Root Mean Square

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 2014 年以来,中国水电装机容量和发电量稳居世界第一,水电资源成为我国第二大能源主体。2022 年,全国水电发电装机容量 41,350 万千瓦,较上年同期增加 2258 万千瓦,同比增长 5.8%。日益增长的水利发电量对水电站建设提供了新的挑战。截止目前国内在水电站勘测设计阶段与建设期间,大都在使用国外的全球定位系统(global positioning system, GPS) [1] [2] [3]。2020 年 7 月 31 日北斗系统正式开通全球服务,标志着我国已经逐步掌握了该领域的技术。随着我国 BDS-3 建设的快速发展, BDS-3 的导航、定位等服务性能已经达到设计要求。近年来,不少研究人员已经基于 BDS-3 开展在应急通讯、建设工程、精密工程等领域的应用研究。在测绘领域,基于卫星导航系统的工程应用案例无处不在,多年前就有将 GPS 系统应用于工程控制网建立的先例。虽然目前基于 BDS-3 观测数据进行相关定位算法的研究已经较为深入,如 BDS-3 基线解算处理研究、BDS-3 单历元基线解算处理研究[4] [5] [6],然而针对水电站施工控制网的 BDS-3 观测数据研究还比较少。

本文根据目前基于北斗系统的水电站施工控制网应用研究较少的情况,结合某新建水电站重点项目。以该工程的施工控制网观测数据为例,通过专业的基线解算软件 GAMIT 为工具,分别处理了 BDS-3 数据与 GPS 数据,并通过观测数据质量情况,基线解算精度、测站点平差精度两方面进行深入研究分析,通过实测数据证明了北斗卫星导航系统定位解算精度与 GPS 处于同一水平,北斗卫星导航系统可独立地完成控制网布设解算。伴随着北斗卫星系统的推广普及,北斗卫星系统在其他领域应用也会随之增加。

2. 基线解算策略及模型

2.1. 基线解算策略

本文在选择基线解算时,考虑到工程项目实际情况,构网时可能形成超长基线。选择一般的商用软件如 LGO, BGO 无法满足高精度解算要求。本文选择开源的科研软件 GAMIT 作为解算的工具,软件设

置如表 1 所示。该软件是由美国麻省理工学院与斯克利斯普海洋研究所共同研发的高精度后处理软件，其运行在 Linux 系统中。软件定期会更新，本文在处理数据时选择了最新 GAMIT10.71 版本。该版本相较于上一版本 10.7 而言除了提高软件的计算稳定性之外，最重要的更新就是在新版本 sel_obtyp.f 文件中增加了北斗三号系统信号，能够满足北斗三号卫星数据处理。

Table 1. baseline solution strategy

表 1. 基线解算策略

参数	方案
处理模式	BASELINE
迭代方式	1-ITER
观测值类型	LC_AUTCLN
天顶延迟参数	25
潮汐模型	FES2004
对流层模型	SAAS
映射函数模型	VMF1
截至高度角	10°
数据采样间隔	15 s
是否载入大气潮格网模型	是
是否载入无潮汐大气负载参数格网模型	是

2.2. 基线处理网解模型

在基线相对定位中，GAMIT 软件采用的是网解模式，该模式具有解算过程严谨、解算精度高、可靠性强的优势。该模式原理为不同时段在独立基线中计算各自数值，解算时优先将一个基站点与多个观测点之间形成多条独立的基线向量，并分别解算。独立基线条数可为异步环闭合差检核提供充足条件。网解模式方法可得到各基线向量如式(1)与式(2)的表达形式：

$$\bar{X}_b = [\bar{b}_1 \cdots \bar{b}_i \cdots \bar{b}_n]^T \quad (1)$$

$$\tilde{\Sigma} b = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{b_1, b_1} & \cdots & \bar{\sigma}_{b_1, b_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{\sigma}_{b_1, b_n} & \cdots & \bar{\sigma}_{b_n, b_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式(2)表示网解模式中基线向量的方差 - 协方差阵。

由上式(2)中与结合实际解算情况可知，若解算出的如式(2)的方差 - 协方差矩阵不为零矩阵，那么可反映出各基线向量中不同向量之间的相关性。

网解模式是一种严密的解算模型，它将基线解算与平差方法有效地结合在一起，有效地解决了在不同时间段基线解算结果闭合差非零的问题。

2.3. 基线网平差模型

GNSS 网解获取基线向量中，独立基线参与网平差计算，网平差模型如下误差方程式所示：

$$\begin{bmatrix} v_{\Delta X} \\ v_{\Delta Y} \\ v_{\Delta Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_i \\ dY_i \\ dZ_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_j \\ dY_j \\ dZ_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} - X_i^0 + X_j^0 \\ \Delta Y_{ij} - Y_i^0 + Y_j^0 \\ \Delta Z_{ij} - Z_i^0 + Z_j^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果 GNSS 网中包含 n 个点, 基线解算得到 m 条独立基线向量, 基线的两个端点分别为第 n_1 点(起点)和第 n_2 点(终点), 误差总方程可表示为:

$$V = B\hat{X} - L \quad (4)$$

式(4)中, B 矩阵是由 $m \times n$ 个 3×3 矩阵组成。其形式如下所示:

$$B_{3m \times 3n} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \underbrace{-E}_{\text{第 } n_1 \text{ 列块}} & \cdots & \underbrace{E}_{\text{第 } n_2 \text{ 列块}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdots & \cdot \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}。$$

GNSS 网中的位置基准为某个地心坐标, 基准方程为:

$$G\hat{X} = 0 \quad (5)$$

式(5)中, 矩阵 G 由 n 个 3×3 子矩阵组, 其形式如下式所示:

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [E_1 \quad E_2 \quad \cdots \quad E_n]。$$

根据基线向量方差-协方差阵, 结合式(4)、式(5), 使用最小二乘原理进行平差计算, 得到结果为:

$$\hat{X} = (B^T P B + G G^T)^{-1} B^T P L \quad (6)$$

式(6)中, P 表示观测值权矩阵。

3. 实验设计与数据分析

3.1. 数据来源

为了验证 BDS-3 应用于水电站工程控制网的可靠性与精度进行分析, 本文选取某水电站施工控制网数据, 观测时间段 2023 年 4 月 2 日至 4 月 3 日, 观测采用徕卡 GS14 双频 GNSS 接收机 10 台, 该接收机标称精度指标为 $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ 。该工程控制网在外业观测中设置接收机数据采样频率为 15 s, 接收机高度角设置为 10 度。观测时段长 60~70 min, 天线高度进行两次量测(测前、测后), 较差不大于 3 mm 取中数。观测文件总数 57 站, 平均设站数 2.76 大于 2 次。该控制网采用静态相对定位模式解算, 并采用同步环边连接形式构网, 测站构成网型如图 1 所示。

本工程控制网中基线最短为 1.8 km, 为 L301_L302 基线, 最长基线长度为 4.28 km, 为 G303_G309 基线, 整个控制网平均基线长度为 2.44 km, 符合规范要求。针对所有站点观测数据进行质量分析, 分别从卫星截至高度角 $>10^\circ$ 时的预期观测值数量(Exp > 10)、卫星截至高度角 $>10^\circ$ 时的实际观测值数量(Hav > 10)、数据利用率(Ratio)、周跳比(o/slps、CSR)、多个路径误差值(mp1、mp2、mp6、mp7)等指标进行统计分析, 各统计如图 2 所示。

某城市地铁5号线GNSS网测量网图

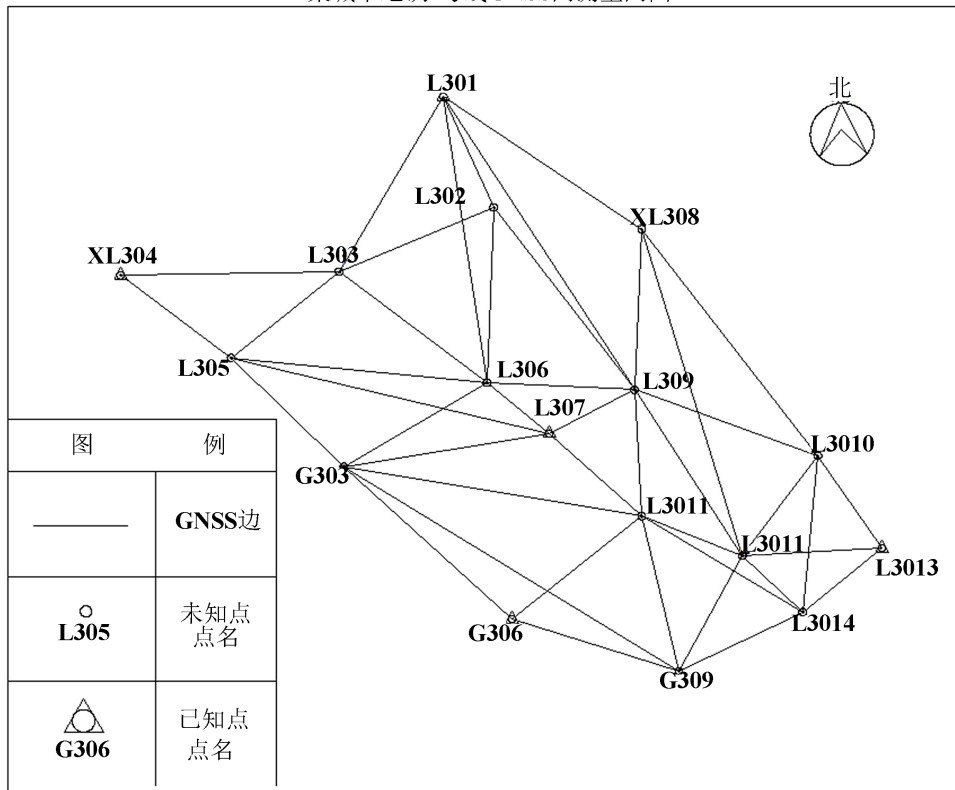
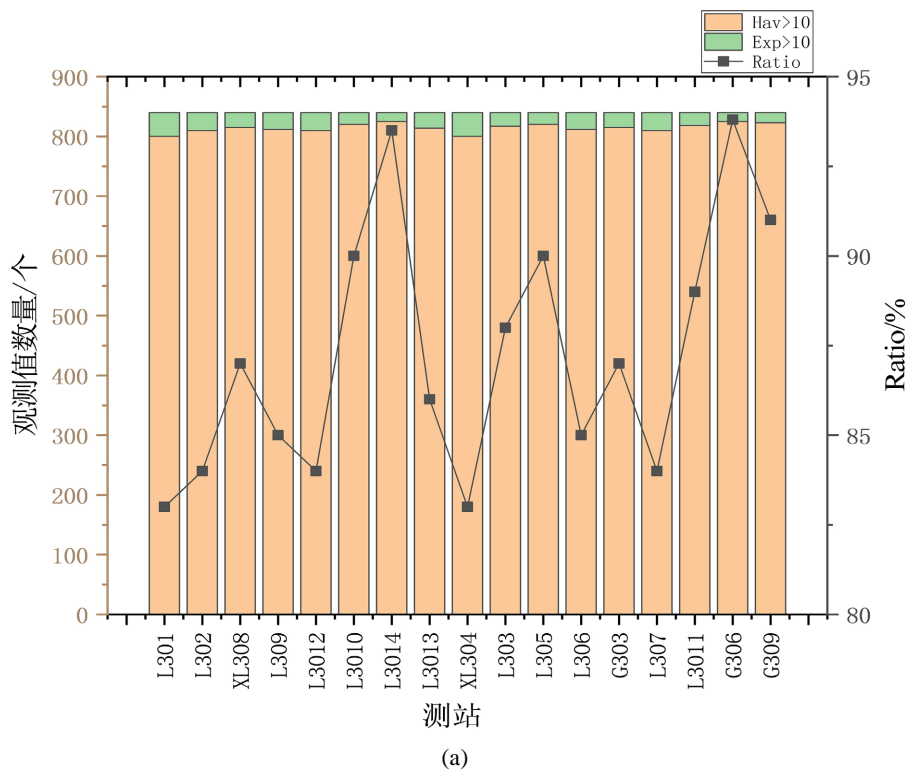


Figure 1. Distribution of observation stations in the construction control network of hydropower stations
图 1. 水电站施工控制网观测站点分布图



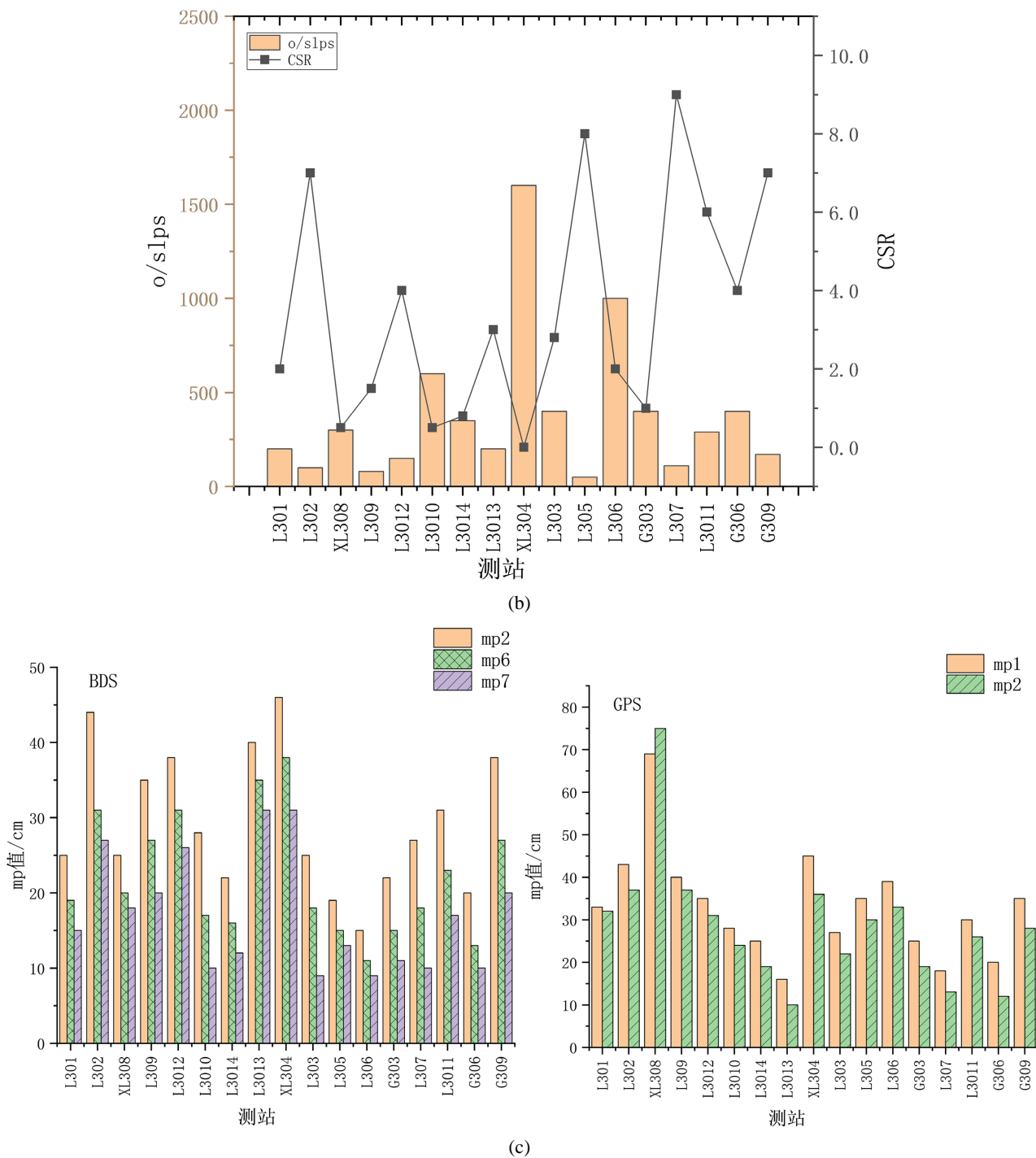


Figure 2. Quality Inspection Statistics; (a) observation quantity and data utilization; (b) cycle to cycle ratio; (c) multipath error value
图 2. 质量检查统计; (a)观测值数量与数据利用率; (b) 跳比情况; (c) 多路径误差值

由图 2(a)可知, 各测站的数据利用率均大于 80%, 满足相关规范要求。由图 2(b)可知, 17 个测站中各测站观测值的周跳比均小于 10, 满足相关规范要求。有图 2(c)可知, 多路径误差值小于 0.5 m 时, 可认为测站周边观测条件良好, 北斗卫星系统多路径频率对应 mp2、mp6、与 mp7, GPS 系统对应频率为 mp1 和 mp2。北斗系统多路径误差均小于 0.5 m, GPS 系统有个别大于 0.5 m, 在处理数据时可将这部分数据删除。

对该工程控制网数据初步进行基线解算，并利用科傻软件平差。对数据剔除率、重复基线较差、坐标方向闭合差进行统计，统计精度结果如表 2 所示。

Table 2. Statistics on quality inspection accuracy of the control network
表 2. 该控制网据质量检核精度统计

基线总数	数据剔除率/%		重复基线/cm		不同方向的闭合差最大差值及其限差/cm					
	剔除率	限差	最大较差	限差	X 分量	限差	Y 分量	限差	Z 分量	限差
49	8.2	10	3.1	28.9	6.10	30.8	8.70	30.8	4.90	30.8

3.2 实验设计

按照国家标准《全球定位系统(GPS)测量规范》(GB/T13814-2009)中明确规定了 GNSS 控制网布设等级，并严格按照不同等级执行不同的观测时长与观测要求。本文选取的水电站工程控制网数据按照 C 级控制网观测要求来进行，利用测站周边 5 个 CORS 站与选取测站观测数据进行联合解算，得到各站点的 CGCS2000 坐标系下的坐标。基线解算采用 GAMTI 软件，输出的各基线向量值与对应的方差 - 协方差矩阵，作为科傻软件(CosaGPS)的输入值参与平差。为验证北斗三号系统的可靠性，与 GPS 对比分析了各基线 RMS 值，水平精度、垂直精度、验后单位权中误差、相邻点最弱边相对中误差以及最弱角中误差等各项指标。

4. 精度分析与比较

4.1. 基线精度分析与比较

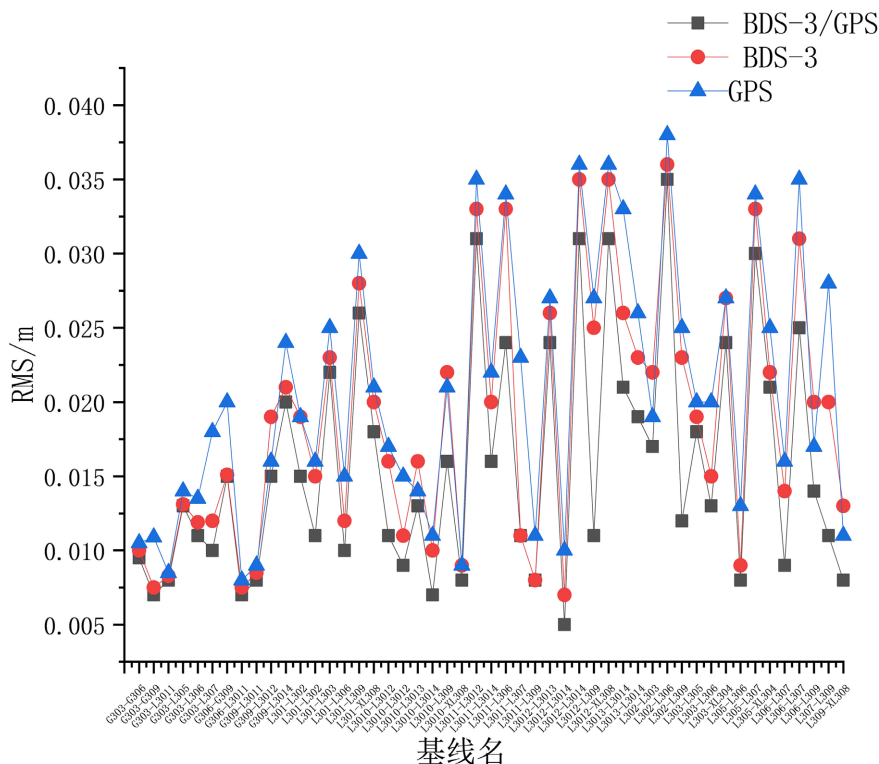
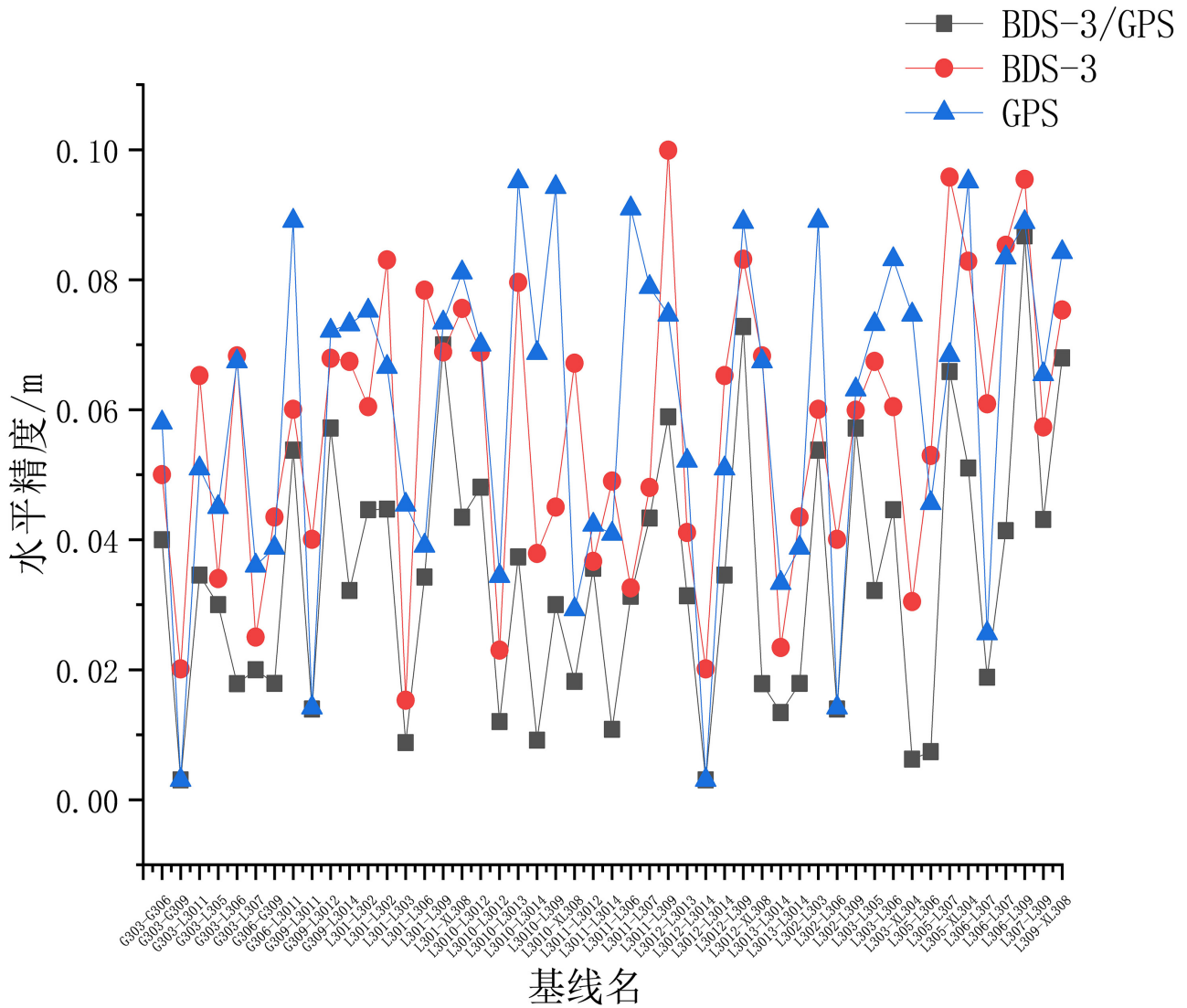


Figure 3. RMS values of different baseline satellite systems
图 3. 不同卫星系统各基线 RMS 值

均方根误差(Root Mean Square, RMS)可直接表现出基线解算质量的优劣程度。该值越小说明解算越优,观测质量越好。图 3 给出了 BDS-3 单系统、GPS 单系统以及 BDS-3 与 GPS 混合系统中各基线解算的 RMS 数值。

由图 3 可知,各基线解算的 RMS 数值中,BDS-3 与 GPS 混合系统的数值最小,其次为 BDS-3 系统,GPS 系统的基线 RMS 数值最大。证明了混合系统的解算基线质量最优,而 BDS-3 系统的基线质量稍优于 GPS 系统的基线质量。BDS-3 系统的加入提高了基线解算的质量,BDS-3 单系统可独立参与基线解算。

在评价各系统的定位精度优劣时,除了分析各基线计算后的 RMS 值外,常常将基线的水平精度与垂直精度作为评价各不同卫星系统的定位精度指标。图 4 展示了 BDS-3、GPS、BDS-3 与 GPS 混合系统中各基线的水平精度与垂直精度比较情况。有图 4 可知,大部分的基线向量的水平精度与垂直精度中 BDS-3 系统优于 GPS 系统。证明了 BDS-3 系统与 GPS 系统精度相当,BDS-3 单系统完全满足工程控制网对卫星星座的要求。



(a)

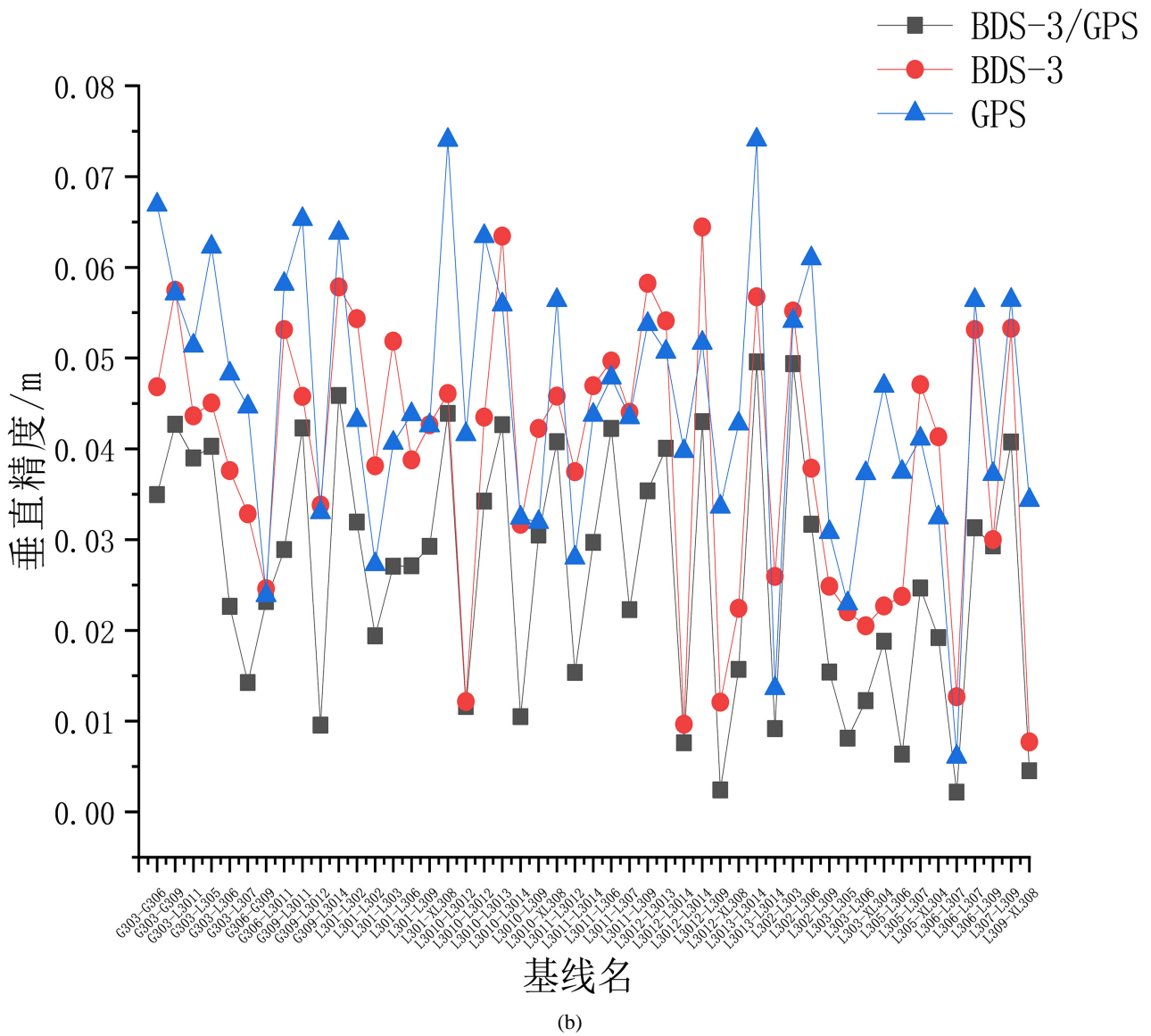


Figure 4. Comparison of baseline horizontal accuracy and vertical accuracy based on different satellite systems; (a) horizontal accuracy; (b) vertical accuracy

图 4. 基于不同卫星系统的基线水平精度与垂直精度比较; (a) 水平精度; (b) 垂直精度

4.2. 控制网平差精度结果比较

Table 3. Statistics on adjustment accuracy of various satellite systems

表 3. 各卫星系统平差精度统计

卫星系统	最弱点点位中误差/cm			验后单位权中误差/cm	最弱边边长相对中误差
	X 分量	Y 分量	Z 分量		
BDS-3/GPS	0.06	0.18	0.12	0.19	1/10,500,000
BDS-3	0.08	0.23	0.15	0.24	1/8,010,000
GPS	0.08	0.34	0.21	0.36	1/6,310,000

除了上文中基线精度作为一个评价指标之外,控制网平差结果精度也可验证各卫星系统质量的优劣情况。利用科傻测量平差软件将北斗三号、GPS 系统、北斗与 GPS 混合系统解算的基线向量数据进行平差,并比较各平差结果。并将控制网中已知点的 CGCS2000 坐标作为起算数据,解算到相关精度指标,如表 3 所示。

从表 3 可以看出, BDS-3/GPS 混合星座精度最高, BDS-3 单星座与 GPS 单星座平差结果同处于一个量级,在水平 y 分量、z 分量上 BDS-3 要优于 GPS。BDS-3 单星座基线解算与平差完全满足工程测量项目中的应用。同时也说明了 BDS-3 单星座与 GPS 单星座混合模式能够优化定位结果。

文中精度分析过程中既要考虑平差之后平面控制网精度,又要考虑分析 BDS-3 单星座解算的该水电站工程控制网中基准点坐标成果的准确性。图 5 为北斗三号系统与 GPS 系统平差结果与混和系统平差结果中平面比较。由图 5 可知,平面坐标中 X 分量差值最大值的绝对值为 5.2 mm; Y 坐标分量中差值最大值的绝对值为 10.9 mm。平面分量中各最大值的绝对值均小于相应规范中规定的“较差小于 15.0 mm”要求。

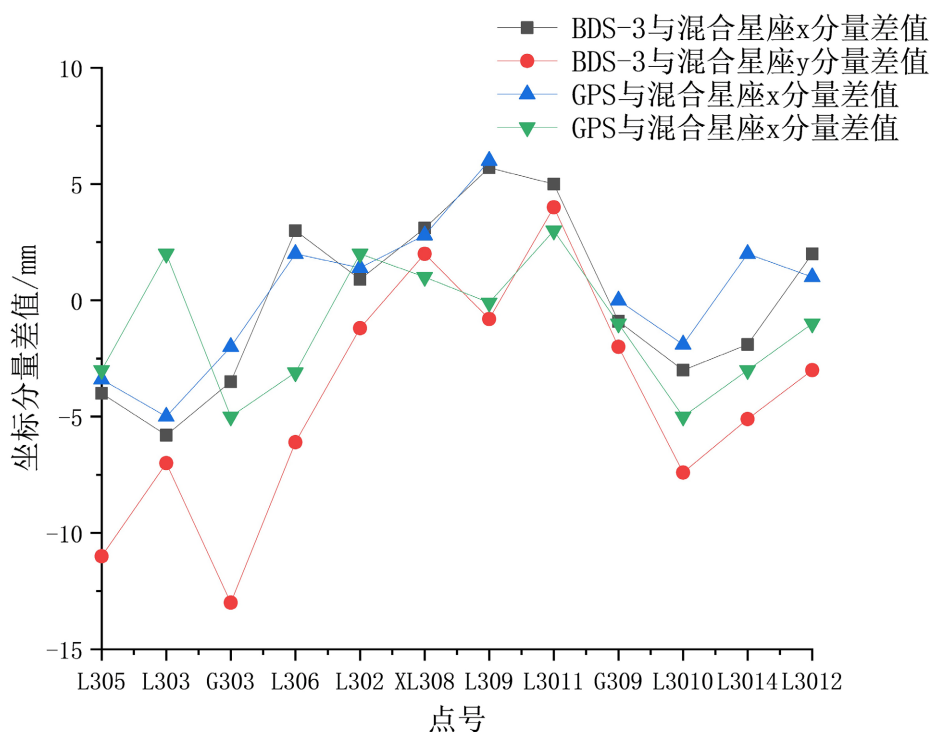


Figure 5. Comparison of differences between components in plane coordinates

图 5. 平面坐标各分量差值比较

5. 结束语

本文利用 GAMIT 软件进行某水电站工程控制网的 BDS-3 与 GPS 观测数据解算,得出的主要结论为:

1) 各大导航定位系统基线解算精度,无论水平方向还是垂直方向。BDS-3 与 GPS 系统处于同一级别,甚至在观测条件良好时, BDS-3 的基线质量优于 GPS 系统。

2) 以 BDS-3/GPS 解算数据为参考, BDS-3 解算坐标数据较混合星座解算在 x、y 分量上较差均小于规范规定 15 mm 的要求,因此将 BDS-3 应用于水电站工程控制网的建立是切实可行的。

本文实验观测数据较少,下一步将利用 BDS-3 的多天甚至多年的观测数据进行分析与研究,并在地

区广度上、范围上、高精度等方面进行相关研究。随着我国北斗系统的组网运营以及成熟稳定，基于北斗导航卫星系统的应用也将不断增加。

参考文献

- [1] 李佳. 水利工程 GPS 静态测量控制网布设与测量精度分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(12): 163-166.
- [2] 罗辑, 杨国兴, 段利君, 等. 长龙山电站 GPS 控制网基线解算及网平差精度分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(S1): 246-247.
- [3] 苏涛, 马全明, 宋超. BDS 在城市轨道交通工程控制网测量中的应用实践[J]. 城市勘测, 2023(3): 128-131.
- [4] 丁学智, 董燕, 谢丰余. 黄登水电站平面变形监测控制网设计研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(3): 76-79.
- [5] 沈尤. 三维施工控制网在抽水蓄能电站中的研究应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [6] 邸国辉, 郭际明, 周国成, 等. 大型调水工程施工控制网关键技术研究[J]. 地理空间信息, 2017, 15(12): 1-5+9.