



# 基于北斗的国产装备测量精度分析及 工程应用\*

孙洪瑞, 葛金龙, 张登奎

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对测量设备国产化替代的迫切需求, 基于北斗三号导航定位系统, 分别对其静态采集数据和动态 RTK 采集数据进行研究。采用统计分析方法, 结合盐田港东港区工程规划阶段测量进行案例分析。结果表明: 基于北斗导航系统的国产化测量装备不仅可满足常规工程的精度要求, 还可建立高等级平面控制网。在水运工程测量中具有较高的成本优势, 对加快落实北斗系统替代 GPS 系统具有较好的参考意义, 并为类似工程应用提供有益的建议。

**关键词:** 国产替代; 北斗三号; 精度分析; 控制测量

中图分类号: U652.6+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0264-07

## Measurement accuracy analysis and engineering application of domestic equipment based on BDS-3

SUN Hongrui, GE Jinlong, ZHANG Dengkui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** According to the urgent need for domestic substitution of survey equipment, the static acquisition data and dynamic RTK acquisition data are studied respectively based on the Beidou-3 navigation system. This article adopts statistical analysis methods, combined with the case analysis based with the project planning stage measurement of Yantian East Port. The results show that the domestic survey equipment based on the Beidou navigation system can not only meet the accuracy requirements of conventional engineering, but also establish a high-grade plane control network. It has a high cost advantage in the water transport engineering survey, which has good reference significance for accelerating the implementation of the Beidou Navigation System to replace the GPS, and provides beneficial suggestions for similar engineering applications.

**Keywords:** domestic substitution; BDS-3; precision analysis; control measurement

北斗乃国之重器, 是我国历时多年建成的国家基础设施, 需加快在工程建设领域推广使用, 实现相关测量技术的国产替代, 突破美国全球定位系统 (global positioning system, GPS) 的垄断和限制, 具有极其重要的战略意义。随着北斗三号系统在 2020 年 6 月官宣建成<sup>[1]</sup>, 高精度应用需求正在加速释放。得益于近年来国内对于高精度定位

技术的持续投入与研发, 目前国产全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 接收机及其数据处理软件在性能上均显著提升<sup>[2]</sup>, 已经能够实现高精度的定位和数据解算, 逐步实现了从依赖进口到自主研发的转变。针对北斗三号系统 (简称 BDS-3) 在测量精度和可靠性等方面也需要加快评估<sup>[3]</sup>。当前, 众多国内外专家学者及

收稿日期: 2024-09-27

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 孙洪瑞 (1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为港口与航道工程测量数据处理与新技术应用。

科研机构对北斗系统进行了大量的研究和分析, 孙洪瑞等<sup>[4]</sup>对比分析 BDS-3 与 GPS 在可见卫星数量、静态 PPP 定位时间和收敛时间等方面的技术特点; 赵忠海等<sup>[5]</sup>指出 BDS-3 的数据完整率、信噪比、多路径效应、电离层延迟和周跳等方面质量与 GPS 系统一致, 可以满足北斗卫星导航系统全球定位服务的要求; 潘宗鹏等<sup>[6]</sup>基于动态船载数据, BDS-3 在海洋区域的动态导航定位性能和数据质量与 GPS 相当, 且在我国近海 BDS 伪距定位精度优于远海海域 BDS 定位精度。相对于 BDS-2 系统, BDS-3 系统定位, BDS-3 精度明显提高。BDS、GPS 以及多系统组合的精密单点定位精度较 GPS 单系统具有一定的优势<sup>[7-8]</sup>。韩荣荣<sup>[9]</sup>验证了国产北斗系统高精度变形监测技术在水电站大坝安全变形监测中的适用性; 赖金富等<sup>[10]</sup>验证了北斗三号在非洲地区具备与 GPS 相当的控制测量应用性, 基于北斗系统的国产化应用正在加速推进中<sup>[11-12]</sup>。

基于国产 GNSS 接收机采集的数据, 结合相关的国产数据处理软件进行精度分析, 并依托盐田港东港区工程, 验证 BDS-3 在定位精度和可靠性方面的技术特点。图 1 为国产华测五星十六频 T10 接收机实物。



图 1 国产华测 GNSS 接收机 (CHCNAV T10)  
Fig. 1 Domestic GNSS receiver (CHCNAV T10)

### 1 工程概况

深圳港盐田港东作业区集装箱码头一期工程位于已建成的深圳港盐田港和拟建的东港区, 测量目的主要为港池疏浚、水工结构、陆域堆场等工程量计算提供基础资料, 并为东港区施工建立平面和高程控制基准。测量内容包括平面高程控制测量和地形测量两部分, 其中控制测量包括 C 级 GPS 控制网测量和三等水准网测量, 地形测量总面积约 344 万  $m^2$ , 其中水域面积约 150 万  $m^2$ , 测量范围见图 2。



图 2 测量区域  
Fig. 2 Measurement area

## 2 静态测量精度分析

### 2.1 不同数据处理软件的解算精度

静态测量包括软硬件配置、实验方法、数据处理流程、精度评估指标。

软硬件配置：6套华测 T10 型 GNSS 接收机，华测 CGO 2.0 版软件 1 套，进口 TBC 软件和 LGO 软件。

实验方法：1) 选取 3 个已知高等级控制点作为基准点，同步联测 6 个港区控制点和 2 个基准点；2) 同步观测时长不少于 4 h；3) 数据采集完成后，使用后处理软件进行基线解算和平差处理；4) 将解算结果与已知控制点坐标对比，分析测量精度。

数据处理流程：1) 导入观测文件至后处理软件；2) 进行基线解算和网平差计算；3) 输出平差报告，获取测量点的坐标成果。

精度评估指标：1) 基线解算精度：包括单位权中误差、基线向量中误差等；2) 平差精度：包括点位中误差、方向中误差等；3) 与已知控制点坐标对比差异。

港区控制网见图 3。为满足高等级(C 级)静态测量精度的要求，采用一系列提高精度和可靠性的针对性措施，包括延长观测时间、提高重复观测率、选择同品牌同型号的设备，平面坐标系统选用 CGCS2000 系统(不宜选用参数未知的深圳独立坐标系统)。将含有 BDS-3 卫星数据的观测文件分别导入国产华测 CGO 2.0、美国天宝 TBC 3.5、瑞士徕卡 LGO 8.4 软件进行独立基线解算和网平差计算，并将解算成果均与 2017 年成果(基于瑞士 Leica 的 GPS 接收机和 TBC 软件)进行对比，其坐标较差值见表 1，不同软件解算的坐标较差值对比见图 4。

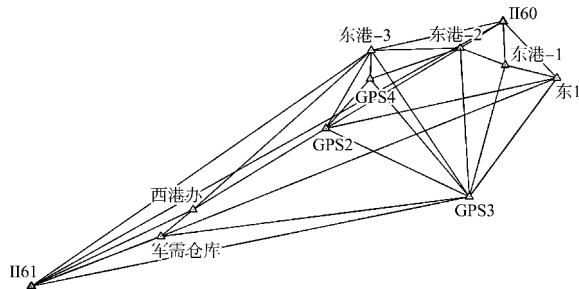


图 3 深圳港盐田港区总控制网

Fig. 3 Master control network of Yantian port area, Shenzhen Port

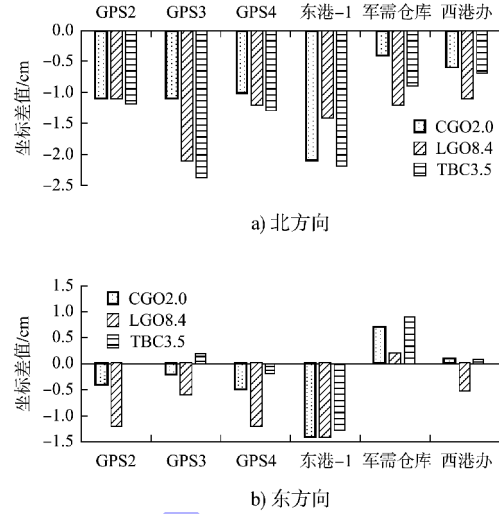


图 4 不同软件解算的坐标较差值对比

Fig. 4 Comparison of coordinate difference values calculated by different softwares

表 1 不同软件解算的坐标较差值

Tab. 1 Coordinate difference values calculated by different softwares

点名	北方向较差 $D_x/cm$			东方向较差 $D_y/cm$		
	华测 CGO	徕卡 LGO	天宝 TBC	华测 CGO	徕卡 LGO	天宝 TBC
GPS2	-1.1	-1.1	-1.2	-0.4	-1.2	0.0
GPS3	-1.1	-2.1	-2.4	-0.2	-0.6	0.2
GPS4	-1.0	-1.2	-1.3	-0.5	-1.2	-0.2
东港-1	-2.1	-1.4	-2.2	-1.4	-1.4	-1.3
军需仓库	-0.4	-1.2	-0.9	0.7	0.2	0.9
西港办	-0.6	-1.1	-0.7	0.1	-0.5	0.1
均值	-1.1	-1.4	-1.5	-0.3	-0.8	-0.1

由图 4 可知：3 种不同软件解算的坐标较差值均在  $\pm 2.5$  cm 以内(北方向和东方向)，其中华测 CGO 软件成果与 2017 年成果数据更为接近(均值为 1.1 cm)，说明国产软件进行处理数据有较高的精度和可靠性，值得推广应用，为保持成果的延续性，推荐采用国产 CGO 解算成果作为最终成果。

### 2.2 不同导航系统的解算精度

为了验证 BDS-3 单系统的静态测量精度，将华测 T10 的原始观测数据全部导入 CGO 软件，再分别转换生成 BDS-3、GPS 及组合系统的 Rinex 格式(3 组原始数据)，然后将这 3 组数据分别导入 CGO 软件进行分别解算，并将解算结果与 2017 年

结果对比, 其统计结果见表 2。各控制点的点位中误差对比分析见图 5。

表 2 静态测量解算成果

Tab. 2 Static measurement calculation results

点名	点位中误差/cm		
	BDS-3	GPS	BDS-3+GPS
GPS2	±1.1	±1.0	±0.9
GPS3	±0.9	±0.7	±0.7
GPS4	±0.8	±0.9	±0.7
东 1	±1.3	±1.3	±1.0
军需仓库	±1.0	±0.9	±0.8
西港办	±1.5	±1.3	±1.1
东港-1	±1.8	±2.9	±1.5
东港-2	±1.5	±1.4	±1.2
东港-3	±1.5	±1.5	±1.1
与 2017 年数值的差值	±1.3	±1.3	±0.9

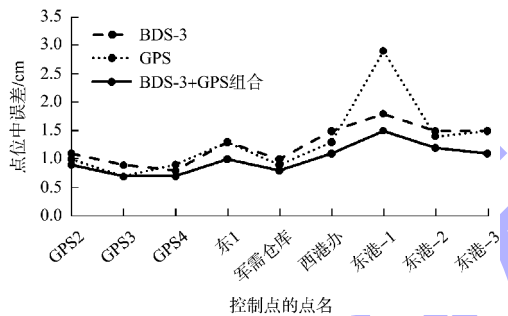


图 5 控制点点位中误差对比

Fig. 5 Comparison of mean square error of control points

由表 2 和图 5 可知, BDS-3 的静态解算精度与 GPS 基本一致, 在小范围内(最大间距不大于 10 km)测量精度在厘米级(本案例为 ±1.3 cm), 精度较高; 此外, 基于国产 GNSS 接收机 BDS-3 可以替代 GPS 的作用, 尤其在 GPS 数据质量较差时(如 DG01 周围有山体和树木遮挡), 由于 BDS-3 可见卫星数量多, 精度质量较 GPS 高。

### 3 动态测量精度和可靠性分析

#### 3.1 动态测量(RTK 定位)精度

动态相位差分定位是基于有基站改正数的高精度实时定位技术, 数据采样率为 1 s, 适用于地

形测量等厘米级服务需求。通过对现场 5 个控制点的动态数据进行分析, 评估国产接收机的动态测量精度, 统计结果见表 3。

表 3 动态测量精度

Tab. 3 Dynamic measurement accuracy

实验地点	观测时长/h	固定解比例/%	平面位置精度/cm	高程精度/cm
GPS2	4	98.5	±2.3	±3.5
GPS3	2	99.2	±1.8	±2.7
GPS4	3	97.8	±2.1	±3.2
东港-1	5	96.7	±2.6	±4.0
军需仓库	4	99.5	±1.5	±2.5

由表 3 可知, BDS-3 动态 RTK 平面定位精度均在 3 cm 以内, 高程精度在 5 cm 以内, 可以满足直接地形测图或高精度勘察钻孔定位需要, 双系统组合定位可以提高精度和稳定性, 但属于同一量级。动态测量精度指标均满足或超过预期要求, 为国产设备的推广应用提供了有力支撑。

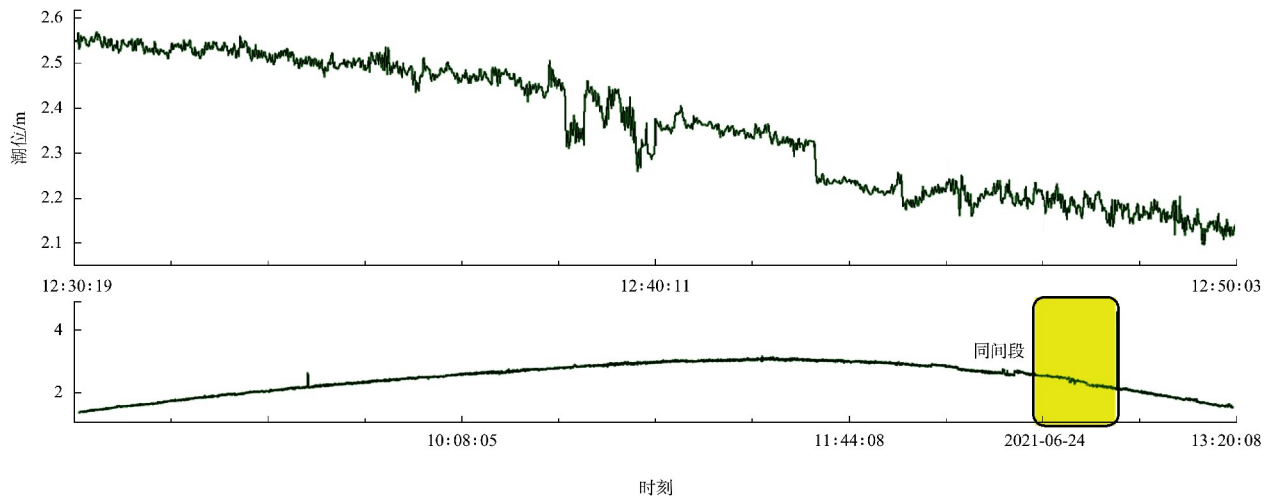
#### 3.2 动态测量可靠性

由于本次测图成果将作为初步设计阶段核算工程量的重要依据, 因此对数据精度要求非常高。此外, 拟建区的海床特别稳定, 前期已有测图成果可作为检核依据, 若有较大偏差, 则将出现重大质量事故。因此水深测量期间, 需严格控制潮位精度和导航定位的精度, 选用无验潮模式(不需要测水位)进行水深测量, 需要 GNSS 信号有较高的连续性和可靠性。

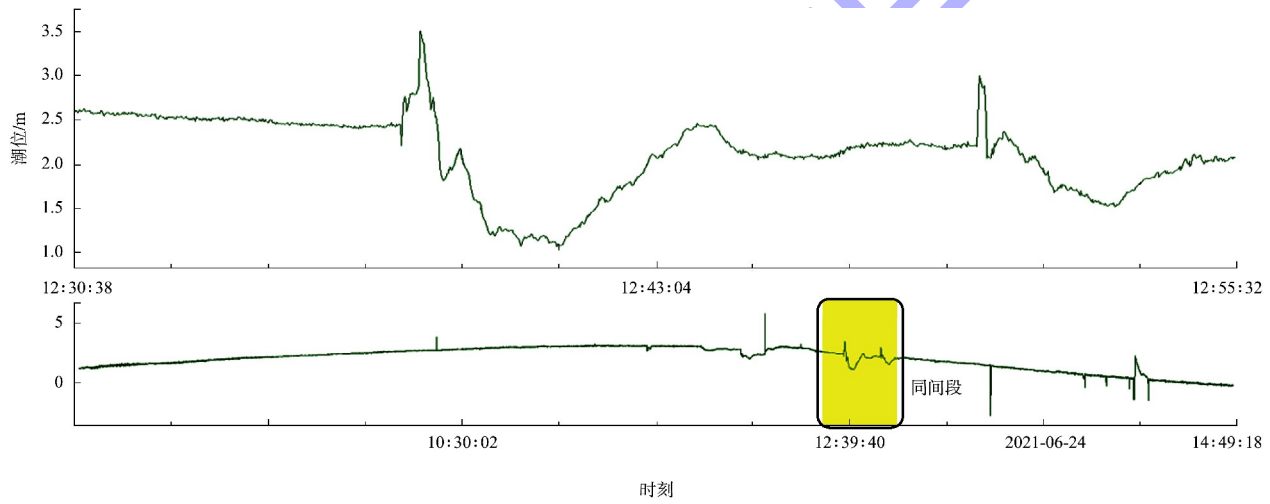
动态测量的可靠性主要表现在高程方面, 选用 2 台同型号华测 T10 接收机、同型号测量船, 同步开始水深测量, 其中一台 T10 仅接收 BDS-3 信号, 另一台 T10 仅接收 GPS 信号, 对水深测量后的数据进行处理和分析。

选择 2 个典型时段作为分析对象, 测量时间同为 2021-06-24 T12:30:00—T12:50:00 和 2021-06-27 T11:40:00—14:45:00, 实测高程趋势见图 6。

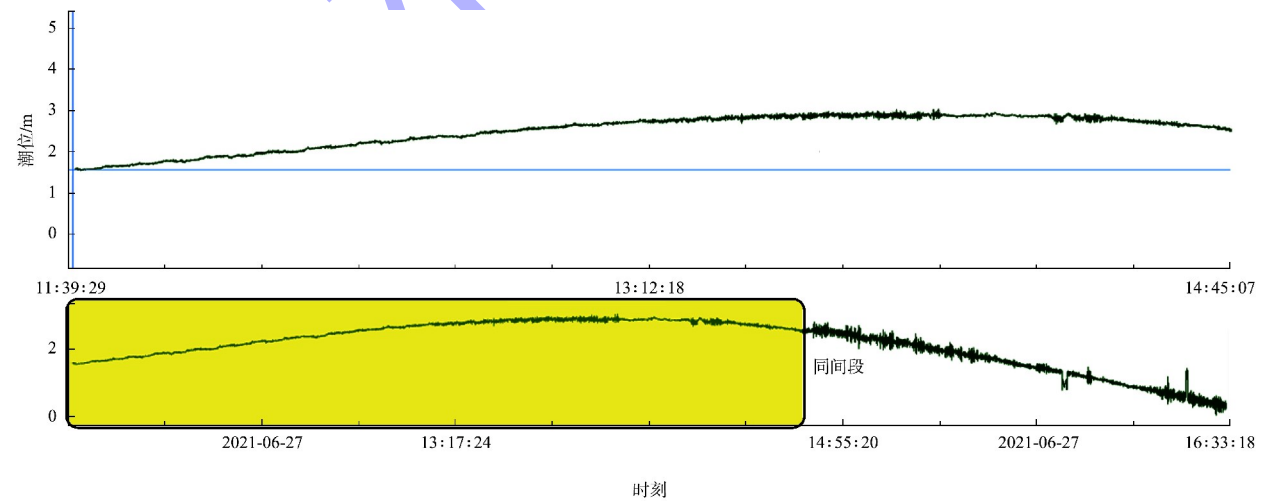




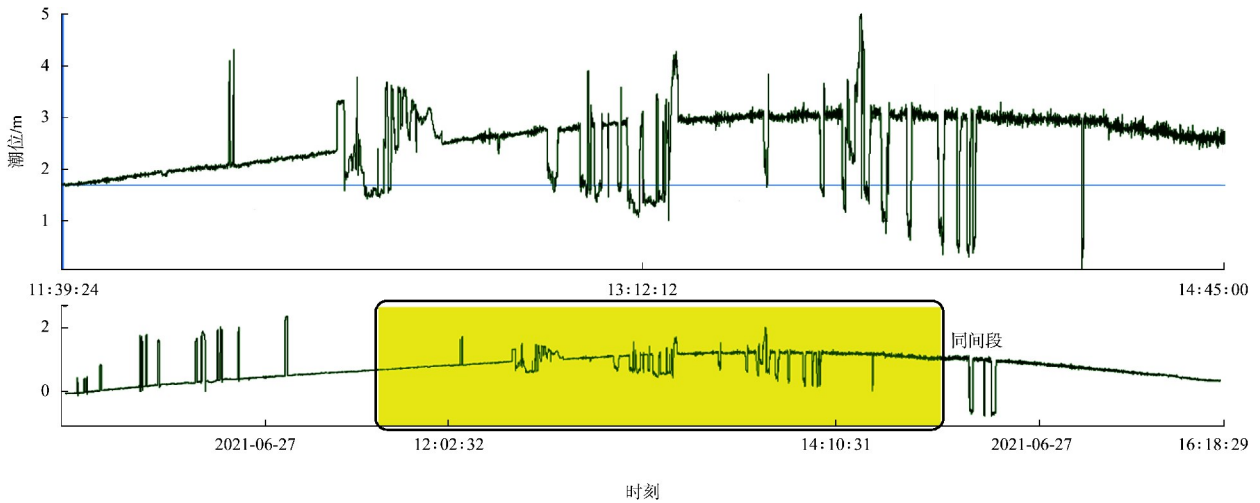
a) BDS-3信号(2021-06-24T12:30:00—T12:50:00)



b) GPS信号(2021-06-24T12:30:00—T12:50:00)



c) BDS-3信号(2021-06-27T11:40:00—14:45:00)



d) GPS信号(2021-06-27T11:40:00—14:45:00)

图6 实测高程趋势

Fig. 6 Trend of measured elevation

由图6可知,在有信号干扰或遮挡的情况下,BDS-3信号可靠性明显优于GPS信号;BDS-3信号的高程动态定位稳定性较高,振幅基本在10cm以内;GPS卫星数量较少,在遮挡或信号受干扰等不利条件下,动态测量精度差,且不稳定,降低了工作效率和工作质量。

#### 4 结论

1) BDS-3在静态测量、动态测量(RTK定位)方面的精度与GPS基本一致,属于同一量级,可替代GPS系统在测量定位中使用。

2) 从单系统角度来看,BDS-3不仅可以实现对GPS系统的完美替代,而且与GPS相比,其数据质量更加稳定可靠,在卫星信号受遮挡严重的地区解算速度更快,作业具有显著效率优势。

3) BDS-3可与GPS组合使用,以提高控制测量的精度、速度和可靠性,减少观测时长,提高作业效率,值得在工程中大力推广。

4) 当采用国产设备建立高等级平面控制网时,需采取一些保障措施,如选用同品牌同型号的GNSS设备,采用精密星历进行基线解算,合理优化控制网型结构,采用参数已知的CGCS2000坐标系统进行约束平差等。

#### 参考文献:

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心. 北斗系统状态[EB/OL]. <http://www.csno-tarc.cn/system/constellation>. (2021-06-08)[2021-08-10].  
Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office. Beidou System Status[EB/OL]. <http://www.csno-tarc.cn/system/constellation>. (2021-06-08)[2021-08-10].
- [2] 苗伟,王潜心,程彤,等. iGMAS跟踪站及BDS-3卫星观测数据质量分析[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集.南昌:[出版者不详],2021:93-102.  
MIAO W, WANG Q X, CHENG T, et al. Quality analysis of iGMAS tracking station and BDS-3 satellite observation data[C]//Proceedings of the 12th China Satellite Navigation Annual Conference. Nanchang: [s. n.], 2021: 93-102.
- [3] 何义磊.北斗三号最简系统卫星信号质量分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(3):394-402.  
HE Y L. Quality analysis of satellite signal for BDS-3 simplest system[J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2020, 45(3): 394-402.
- [4] 孙洪瑞,葛金龙,钮建定,等. BDS-3与GPS及其系统组合定位精度分析[J].港工技术,2022,59(1):117-120.  
SUN H R, GE J L, NIU J D, et al. Positioning precision analysis of BDS-3, GPS and combined system[J]. Port engineering technology, 2022, 59(1): 117-120.

[5] 赵忠海, 张洪文, 马新文. 北斗三号卫星观测数据质量分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(10): 61-64.  
ZHAO Z H, ZHANG H W, MA X W. Quality analysis of Beidou-3 satellite observation data [J]. Geomatics & spatial information technology, 2019, 42(10): 61-64.

[6] 潘宗鹏, 肖云, 明锋, 等. 太平洋海域 BDS-3 性能评估 [C]//第十二届中国卫星导航年会论文集. 南昌: [出版者不详], 2021: 41-45.  
PAN Z P, XIAO Y, MING F, et al. Performance evaluation of BDS-3 in the Pacific Ocean [C]//Proceedings of the 12th China Satellite Navigation Annual Conference. Nanchang: [s. n. ], 2021: 41-45.

[7] 赵保睿, 孟晓赟, 王均浩, 等. 北斗单频标准单点定位精度分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (2): 151-153.  
ZHAO B R, MENG X Y, WANG J H, et al. Analysis of standard single point positioning accuracy of Beidou single frequency[J]. Geomatic & spacial information technology, 2021, 44(2): 151-153.

[8] 程军龙, 王旺, 马立焯, 等. 北斗三号观测数据质量及定位精度初步评估[J]. 测绘通报, 2019(8): 1-7.  
CHENG J L, WANG W, MA L Y, et al. Preliminary analysis of observation quality and positioning precision for BDS-3 satellites [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(8): 1-7.

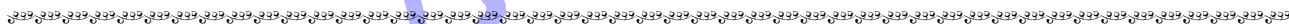
[9] 韩荣荣. 北斗高精度变形监测技术在天荒坪抽水蓄能电站的测试及应用研究 [J]. 大坝与安全, 2024 (4) 40-43.  
HAN R R. Research on the testing and application of Beidou high-precision deformation monitoring technology in Tianhuangping pumped storage power station [J]. Dam and safety, 2024(4)40-43.

[10] 赖金富, 史俊波, 胡翻. 北斗三号卫星导航系统在非洲地区控制测量的应用研究 [J]. 测绘通报, 2023 (9): 25-29, 45.  
LAI J F, SHI J B, HU X, et al. BDS-3 for control surveying application within Africa [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2023(9): 25-29, 45.

[11] 张献志, 周涛, 叶远斌, 等. 惠州市国产北斗化平台实时定位精度测试分析 [J]. 北京测绘, 2024, 38 (5): 763-767.  
ZHANG X Z, ZHOU T, YE Y B, et al. Real-time positioning accuracy testing for domestic Beidou platform in Huizhou City [J]. Beijing surveying and mapping, 2024, 38(5): 763-767.

[12] 杨长风, 杨军, 杨君琳, 等. 北斗卫星导航系统规模应用国际化发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 1-12.  
YANG C F, YANG J, YANG J L, et al. The international development strategy of the large-scale application of Beidou navigation satellite system [J]. Strategic study of CAE, 2023, 25(2): 1-12.

(本文编辑 赵娟)



(上接第 263 页)

[8] 王家磊, 张合青, 余虔, 等. 强夯法加固可液化砂质粉土地基试验研究 [J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 361-369.  
WANG J L, ZHANG H Q, YU Q, et al. Experimental investigation on dynamic compaction for reinforcement of liquefiable sandy silt foundation [J]. Journal of mining science and technology, 2024, 9(3): 361-369.

[9] 翟振乾. 强夯法与分层碾压法在深厚填土中的应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(4): 112-114.  
QU Z Q. Application of strong compaction method and layered rolling method in deep fill [J]. China construction metal structure, 2024, 23(4): 112-114.

[10] 山西省机械施工公司, 山西建筑工程(集团)总公司. 强夯地基处理技术规程: CECS 279: 2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.  
Shanxi Provincial Machinery Construction Company, Shanxi Construction Engineering (Group) Corporation. Technical specification for ground treatment by heavy tamping: CECS 279: 2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[11] 山东大学, 山东省机械施工有限公司. 强夯地基处理技术规程: DB37/T 5136—2019[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.  
Shandong University, Shandong Machinery Construction Co., Ltd. Technical specification of dynamic consolidation to ground treatment: DB37/T 5136-2019 [S]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2019.

(本文编辑 王璁)