



基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量

张 琦

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510221)

摘要: 介绍基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量的基本原理、外业采集软件 QINSy 中的关键设置与操作、内业处理软件 Caris 中的 GPS-RTK 潮位的导入与计算方法。通过实地水深数据采集试验与传统验潮的多波束水深测量方式进行比对, 分析其验潮精度、外符合精度以及内符合精度, 指出了 GPS-RTK 三维多波束水深测量在显著提高作业效率以及降低作业成本的同时, 有效提升了多波束测深精度以及测深稳定性。

关键词: GPS-RTK 三维水深测量; HZMB-CORS; 多波束测深系统; QINSy 软件; Caris Hips&Sips 软件; 秒脉冲; 高程异常

中图分类号: P 716⁺. 11; U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0193-06

GPS-RTK three-dimensional multi-beam sounding survey based on HZMB-CORS

ZHANG Qi

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510221, China)

Abstract: This paper introduced the basic principle of GPS-RTK three-dimensional multi-beam sounding survey of HZMB-CORS, and the key setting and operation in sounding data acquisition software QINSy, as well as the exportation and computation method of GPS-RTK tide in data post-processing software Caris. Contrasting with traditional multi-beam bathymetric survey method with tide gauge by sounding data collection experiment at site, we analyze the precision of GPS-RTK tide collected and the internally coincident precision as well as externally coincident precision. The result shows that GPS-RTK three-dimensional multi-beam sounding survey method has obviously improved working efficiency and reduced the work cost, and effectively improved the precision of multi-beam sounding survey and the stability of sounding data.

Keywords: GPS-RTK three-dimensional sounding survey; HZMB-CORS; multi-beam sounding survey system; QINSy software; Caris Hips&Sips software; pulse per second; height anomaly

1 概况

港珠澳大桥岛隧工程是我国首条外海深埋海底沉管隧道工程, 海底沉管隧道总长约 6 km, 埋深从 -15 m 到 -46 m 不等, 总体于东西方向上呈 W 型布置。由于岛隧工程地理位置处于珠江河口

的外伶仃洋, 穿越数条运营中的航道, 水文地质条件复杂, 加上沉管隧道基槽开挖成型后形成纵向“V”字型深槽, 上游携带下来的泥沙沉淀以及水流方向的改变对基槽的冲淤形态以及稳定性有着显著的影响。而基槽的冲淤形态以及稳定性

收稿日期: 2016-03-28

作者简介: 张琦 (1986—), 男, 助理工程师, 从事水深测量、测绘工作。

又对基槽清淤、碎石垫层铺设以及最终的沉管隧道的安装等关键施工工序有着决定性的影响，因而必须采用高精度、高效率的基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量方式来反映施工过程中海底基槽的变化，为施工安排提供及时准确的参考。

2 基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量

2.1 HZMB-CORS 系统

港珠澳大桥跨海距离超过 32 km，为了确保海上工程施工质量和工期目标的顺利实现，建设方建立了专用的 GNSS 连续运行参考站系统(Hongkong-Zhuhai-Macao bridge continuously operating reference stations, 简称为 HZMB-CORS)，为工程建设及运营过程中的勘察设计、施工定位和变形监测提供常规 RTK、网络 RTK 及精密静态定位等多种卫星定位服务^[1]。HZMB-CORS 站址分布见图 1。



图 1 HZMB-CORS 站址分布

HZMB-CORS 由参考站网子系统、数据中心子系统、数据通讯子系统和用户服务子系统共 4 个子系统组成。参考站的 GNSS 观测数据首先通过专线通讯网汇集到数据中心，在中心服务器上使用 GPSNet 软件进行数据统一解算和原始数据存储，并通过 GPRS/CDMA 网络向流动站用户 GNSS 接收机发送差分数据，提供厘米级的实时定位服务。同时，在珠海野狸岛和香港虎山两个参考站上架设无线电台，发送传统的差分信号，作为网络 RTK 的一种辅助方式，为流动站用户提供常规 RTK 定位服务。

相对于其他 CORS 系统，HZMB-CORS 信号覆盖整个工程区域，并且 24 h 全天候、连续不间断地通过 GPRS/CDMA 通讯技术和 UHF 无线电台广播两种方式提供各种精度的 GNSS 差分服务，经过系统测试，基于 VRS(virtual reference station)的实时定位精度：平面 ± 2 cm，高程 ± 3 cm。

2.2 多波束测深系统

多波束系统是一套复杂的综合性测深系统，具备高精度、高效率的优点，相比传统的单波束测深手段在测量范围、测量效率以及精度方面都有着无可比拟的优点，在现代海洋工程中被广泛应用^[2]。

多波束测深系统主要由多波束声学系统、多波束处理单元、外围辅助传感器和数据采集处理系统单元组成。其中，换能器是多波束的声学系统，负责波束的发射和接收；多波束处理单元完成波束的形成和将接收到的声波信号转换为数字信号，并记录声波往返换能器面和海底的时间；外围设备主要包括导航定位传感器、姿态传感器、电罗经、声速剖面仪以及潮位仪等，实现测量船瞬时位置、姿态、艏向、声速剖面以及潮位等信息，计算波束脚印的坐标以及深度，并绘制海底地形图。

2.3 基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量原理

随着 GPS-RTK 测量技术的不断成熟，GPS-RTK 三维水深测量技术正在逐渐普及，在 JTS 131—2012《水运工程测量规范》中，GPS-RTK 三维水深测量技术已经被明确提出并提出了相应的技术要求^[3]。

基于 HZMB-CORS 的 GPS-RTK 三维多波束水深测量是通过接收 HZMB-CORS 播发的网络差分信号或者无线电差分信号，通过布尔莎 7 参数转换模型进行平面坐标系统转换以及高程基准转换，解算出 GPS 天线在当地平面坐标系统以及高程基准下的三维坐标信息，结合多波束测深仪以及其他外围传感器完成水深测量的过程，基本原理见图 2^[4]。

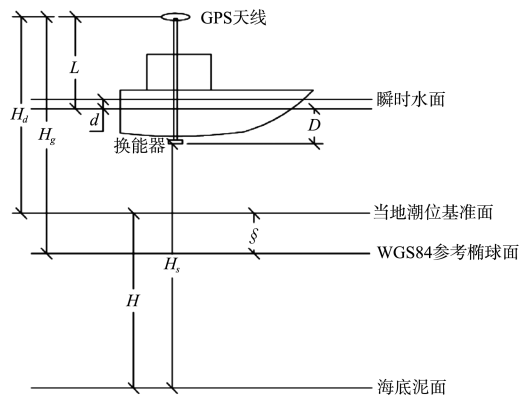


图 2 GPS-RTK 三维水深测量基本原理

由图 2 可得以下 3 个关系式：

$$H=H_s+D+d-T \tag{1}$$

$$T=H_g-\xi-L+d \tag{2}$$

$$H_d=H_g-\xi \tag{3}$$

由式 (1) ~ (3) 可得：

$$H=H_s+D+L-(H_g-\xi)=H_s+D+L-H_d \tag{4}$$

式中： H 为归算当地潮面基准面的水深； H_s 为换能器到海底泥面的距离； D 为换能器静吃水； d 为换能器动吃水； T 为潮位； H_g 为 GPS 天线在 WGS84 参考椭球下的 大地高； L 为静止状态下 GPS 天线到水面的距离； ξ 为当地潮面基准面与 WGS84 参考椭球面的距离； H_d 为 GPS 天线在当地潮位基准面下的高程。

由式(4)可以得出，GPS-RTK 三维水深测量中潮位 T 值被 $H_g-\xi-L+d$ 值所代替，而测深值 H 的计算则已经与换能器的动吃水 d 无关。

2.4 QINSy 软件下的无验潮多波束水深测量^[5]

2.4.1 大地参数以及无验潮测量的设置

港珠澳大桥岛隧工程施工测量导航采用的平面坐标系为隧道工程坐标系，高程系统为 1985 国家高程系统，因而在 QINSy 软件中需设置由港珠澳大桥主体工程测量控制中心发布的布尔莎 7 参数进行 WGS84 椭球到隧道平面坐标系以及 1985 国家高程系统的转换。由于该套参数拟合了由 WGS84 椭球到 1985 国家高程系统高程转换，因此 GPS 天线在 1985 国家高程系统下的高程 H_d 可以由 GPS 大地高 H_g 经布尔莎 7 参数转换计算得来。需要注意的是，启动 Online 测量界面后，需

将 Computation Setup 中的 GPS Height 计算模式设置为 Accurate 模式，即为 RTK 三维水深测量模式。

2.4.2 GPS-RTK 解算状态报警设置

QINSy 软件 Online 测量模块中的报警窗口能够实时显示各传感器与软件之间的通讯情况以及各传感器解算状态等信息，并设置上下门限，超出门限即报警。对于 GPS-RTK 三维水深测量，测量记录的过程中 RTK 是否一直处于固定解直接影响到了数据成果的质量，因为 RTK 一旦失解后，其三维坐标精度不能满足高精度的作业要求，需要在内业处理中对失解的部分数据进行剔除。因此，可以对 RTK 解算状态进行报警设置，由于 GPS 固定解的解算状态标识为“4”，因此可以将 GPS 解算状态上下门限设置为“4”，当解算状态超出该门限，则进行报警并自动暂停记录，当解算状态回到该门限之内，则停止报警并自动恢复记录，如此便可有效解决记录过程中 RTK 失解的问题。

2.4.3 PPS 时间同步

对于由多个传感器组成的多波束测深系统，各传感器之间的精确的时间同步是必不可少的。不同于其他同类测量软件，QINSy 软件使用了基于秒脉冲 PPS(pulses per second)选择的复杂同步回路，通过双频 GPS 接收机输出 PPS 信号，对所有的进/出数据都打上精确的 UTC 时间标签。在内部，QINSy 软件使用“Observation Ring Buffers”技术，然后用精确的事件或 Ping 时刻内插数据。

2.4.4 外业数据的存储方式

QINSy 软件可以将外业测量过程中各传感器的数据存储为任意格式的文件，常用的是 *.qpd 格式以及 *.xtf 格式。其中 *.qpd 格式是可以由 QINSy 软件自行进行数据编辑与处理的格式，而 *.xtf 格式则是声呐影像数据、测深数据、注释和姿态数据常用的一种数据存储格式，可以由 Caris 软件进行数据的后处理。需要注意的是，若输出 *.xtf 格式数据时，在多波束测深仪硬件配置的时候需勾选 Raw Bathymetry Storage 选项，并在 Bathymetry record type 选项中勾选 Caris 软件可以识别的

Original Raw Record 格式，见图 3；而定位数据可以选择以 grid coordinates（当地格网数据）、geographical coordinates（local datum）（当地椭球经纬度）或者 geographical coordinates（WGS84）（WGS84 椭球经纬度）这 3 种格式任意输出（图 4），并在 Caris 软件中选择对应的参数进行后处理即可。



图 3 测深数据导出格式

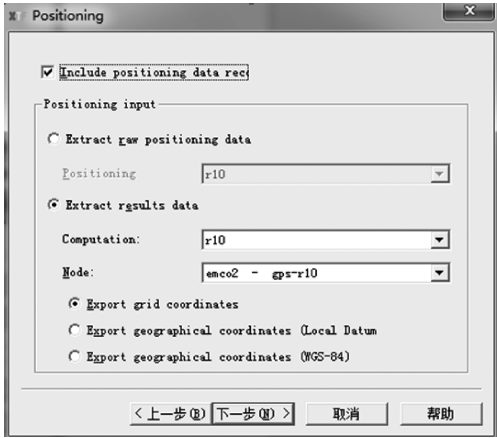


图 4 定位数据导出格式

2.5 Caris 软件中 GPS-RTK 潮位的处理方法

对于传统验潮多波束测量数据在 Caris 软件的后处理已有大量的文章研究说明，在此主要阐述 GPS-RTK 潮位代替传统验潮潮位的导入与计算。

2.5.1 船型文件设置

在 Caris 船型文件 Navigation 设置中，根据导出 xtf 格式数据时选择的定位数据格式，设置定位所用椭球。如果输出当地格网数据或者当地椭球经纬度数据，则选择当地椭球为定位椭球；如果输出 WGS84 椭球经纬度数据，则选择 WGS84 椭球为定位椭球。

球为定位椭球。

2.5.2 数据导入

在选择 XTF 格式数据导入界面导航数据包的格式时，Ship Navigation 格式选择含有 GPS 高程信息的 Raw Navigation Records，其他导入设置与传统的验潮多波束测深数据无异。

2.5.3 GPS-RTK 潮位的计算

在 Process 界面，选择 Compute GPS Tide。如果定位数据选择以当地格网数据或者当地椭球经纬度格式输出，而且 QINSy 软件中设置的大地参数含有高程系统转换，则定位数据内所含的 GPS 高程信息即为 GPS 天线在 1985 国家高程系统下的高程 H_d ，那么只需选择 Single Height 模式，并将值设置为 0；如果定位数据选择以 WGS84 椭球经纬度格式输出，则定位数据内所含的 GPS 高程信息即为 GPS 天线在 WGS84 椭球下的大地高 H_g ，那么根据式(3)，就需要输入已知的高程异常值 ζ 计算 GPS 天线在 1985 国家高程系统下的高程 H_d 。如果测区范围内高程异常值 ζ 为恒定值，则只需选择 Single Height 模式并设置高程异常值 ζ 来计算 H_d ；如果测区范围高程异常变化明显，则需选择 Model 模式设置高程异常模型来计算 H_d 。最后点击 Compute 完成 GPS-RTK 潮位的计算，计算出来的 GPS-RTK 潮位曲线可在姿态编辑器中查看。

事实上，Caris 软件中 GPS-RTK 潮位是由导入的 GPS 高程数据进行高程异常改正计算而得来的，并不是像 QINSy 软件中直接可以由含有高程系统转换的布尔莎 7 参数进行转换计算得来，因此即使 QINSy 软件中设置的布尔莎 7 参数不含有高程系统的转换，将 Computation Setup 中的 GPS Height 计算模式设置为 Unreliable 模式，只要定位数据输出的格式为 WGS84 椭球经纬度，在已知测区高程异常值 ζ 的情况下，也能由 GPS 天线 WGS84 椭球下的大地高 H_g 通过高程异常改正计算得到 GPS 天线在 1985 国家高程系统下的高程 H_d ，进而计算出 GPS-RTK 潮位。

2.5.4 多波束脚印空间归位计算

在进行波束脚印空间归位计算即 Merge 计算

处理时，需勾选 Apply GPS Tide 选项。

至此，已经完成 GPS-RTK 潮位的导入与计算，并代入到多波束脚印空间归位计算中去。后续的内业处理流程与传统验潮多波束测量数据处理方式相同。

3 测深精度比对分析

为了研究 GPS-RTK 三维多波束水深测量的测深精度，笔者分别使用 GPS-RTK 三维多波束水深测量以及传统验潮多波束水深测量方式对沉管隧道 E20-E21 管节水域进行了连续 2 d 的水深采集并对数据进行了处理分析。

3.1 验潮精度比对

从 Caris 软件中将 GPS-RTK 潮位导出，设该潮位为 T_c ，根据 Caris 潮位的计算方法， $T_c = H_g - \xi - L = H_d - L$ ，而 $T = H_g - \xi - L + d = H_d - L + d$ ，因此 $T = T_c + d$ ，经测定测量船在以 5 kn (9.26 km/h) 速度测量时换能器动吃水约为 10 cm，故将 Caris 软件提取出的 GPS-RTK 潮位加上动吃水计算出当时的瞬时潮位，与该测量时段测区内的潮位仪的数据进行比对，绘制潮位比对曲线 (图 5)。由图 5 可以看出，GPS-RTK 潮位与潮位仪潮位极大差值为 10 cm，极小差值为 -4 cm，平均差值 2.4 cm，因而可以认为 GPS-RTK 满足潮位的精度要求。

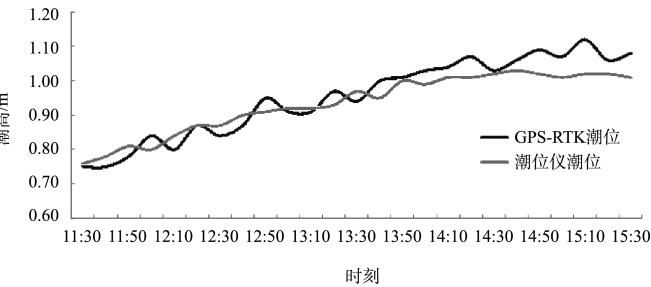


图 5 GPS-RTK 潮位与潮位仪潮位曲线比对

3.2 外符合精度比对

对第一天两种测深方式的 XYZ 水深数据进行统计并作差值计算，统计差值分布见表 1，并生成差值色块图 (图 6)。测区内 RTK 三维水深测量方式测得水深均值为 33.186 m，传统验潮水深测量

方式测得水深均值 33.129 m，其平均差值为 0.057 m，极大差值为 0.99 m，极小差值 -0.58 m。由图 6 以及表 1 可以看出，RTK 三维水深测量与传统验潮水深测量方式测得绝对测深值相差无几，两者的平均水深差值仅为 0.057 m，符合行业测深精度标准要求。

表 1 2 种测深方式测深差值分布

水深差值范围/m	百分比/%	水深差值范围/m	百分比/%
>0.5	0.19	-0.1~≤0	27.84
0.4~≤0.5	0.73	-0.2~≤-0.1	3.97
0.3~≤0.4	2.64	-0.3~≤-0.2	1.08
0.2~≤0.3	6.62	-0.4~≤-0.3	0.24
0.1~≤0.2	16.32	-0.5~≤-0.4	0.04
0~≤0.1	40.34	≤-0.5	0.01

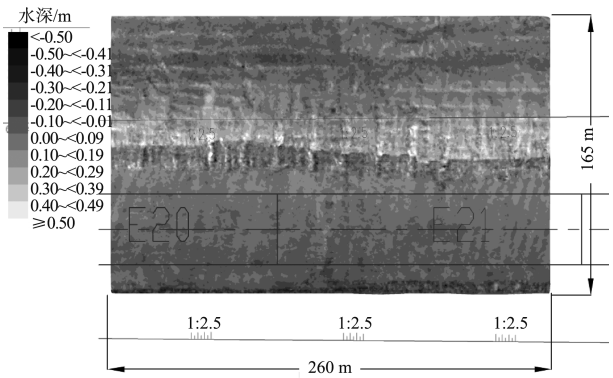


图 6 RTK 三维水深测量与传统验潮测深方式的测深差值色块

3.3 内符合精度比对

对 GPS-RTK 三维水深测量以及传统验潮水深测量方式 2 d 采集的 XYZ 水深数据分别做差值计算并统计，其中 GPS-RTK 三维水深测量方式 2 d 测量水深平均差值为 -0.012 m，极大差值为 0.75 m，极小 -0.73 m，标准偏差值为 0.086 m；而传统验潮水深测量方式 2 d 测量水深平均差值为 -0.040 m，极大差值为 0.78 m，极小 -0.75 m，标准偏差值为 0.123 m。由此可见，GPS-RTK 三维水深测量 2 d 测量的差值分布更加收敛，重复测量精度更高，即内符合精度更高。GPS-RTK 三维水深测量以及传统验潮水深测量方式 2 d 水深差值范围分布比较见表 2。

表 2 2 种测深方式两天测深差值分布比较

水深差值范围/m	RTK 三维水深测量/%	传统水深测量方式/%
>0.5	0.01	0.04
0.4~≤0.5	0.02	0.08
0.3~≤0.4	0.21	0.49
0.2~≤0.3	1.29	3.13
0.1~≤0.2	6.89	10.82
0~≤0.1	29.73	13.32
-0.1~≤0	47.64	40.62
-0.2~≤-0.1	12.90	24.35
-0.3~≤-0.2	1.20	5.64
-0.4~≤-0.3	0.10	1.25
-0.5~≤-0.4	0.02	0.18
≤-0.5	0.01	0.08

4 结 语

与传统验潮多波束测量方法相比，GPS-RTK 三维多波束水深测量主要有以下 4 方面的优势：

1) 传统验潮多波束测量方式通常采用信标机进行平面定位与导航，平面定位精度约为 1~3 m，在测量较为陡峭的水下地形的时候，测深的精度受平面定位影响较大。岛隧工程中沉管隧道基槽边坡的坡比最大达到了 1:2，若两次测量平面定位误差为 1 m，则会造成最大为 0.5 m 的测深偏差。而 GPS-RTK 三维多波束水深测量则采用了 RTK 作为平面定位，接收 HZMB-CORS 播发的差分信号后平面精度可达到±2 cm，对测深精度造成影响完全可以忽略不计。

2) 传统验潮多波束测量方式通常采用潮位站验潮进行水位控制，需要建立潮位站并安排专人或者购买自动潮位计进行水位观测记录或者到相关部门获取测量时段的水位数据；在内业处理中，需要人工输入观测水位进行改正，当单个潮位站无法控制整个测区的时候，还需要进行水位分带内插等计算。无论哪种方法，都耗费一定的时间和人力，增加工作成本。而 RTK 三维多波束水深测量则采用 GPS-RTK 潮位替代传统验潮潮位，接收 HZMB-CORS 播发的差分信号改正后垂直精度可达到±3 cm，符合有关规范要求。

3) 传统多波束水深测量方式除了需要量取换能器静吃水之外，还需要测定测量船在不同速度下的换能器动吃水值，并在内业中进行改正。而根据式(4)，GPS-RTK 三维水深测量测深值 H 的计算已经与换能器的动吃水 d 无关。此外，测量船在不同的水流条件下即使以相同的速度测量动吃水也会有一定的变化，这个变化值则无法准确测定，而 GPS-RTK 三维水深测量测深值 H 的计算亦与此项无关，有效消除了误差项的影响。

4) 传统多波束水深测量方式对于 GPS 延时改正通常做法是测定 GPS 延时并在内业中进行改正，而基于 QINSy 软件的 RTK 三维多波束水深测量则采用 PPS 同步技术消除了 GPS 延时的影响，同步精度可达到毫秒级。

综上所述，RTK 三维多波束水深测量相比于传统验潮的多波束测深方式不仅平面精度高，高程精度亦可靠，提高了各传感器之间时间同步的精度，消除了一些误差项的影响，使得多波束测深的精度及稳定性有了较大的提升，同时节省作业时间以及人力成本，有效简化了工作流程并提高工作效率，为港珠澳大桥岛隧工程生产决策提供了有力的数据支持。

参考文献：

[1] 港珠澳大桥主体工程测量控制中心.HZMB-CORS 及 RTK 施工测量技术[R].珠海: 港珠澳大桥主体工程测量控制中心, 2011.

[2] 李家彪, 王小华, 华祖根, 等.多波束勘测原理技术与方法[M].北京: 海洋出版社, 1999.

[3] JTS 131—2012 水运工程测量规范[S].

[4] 郑伟, 李炜.GPS-RTK 三维水下地形测量的应用与误差分析[J].中国港湾建设, 2015(7): 42-45.

[5] QPS.QINSy 8.10 User manual[R].Holland: QPS, 2015.

[6] 肖付民, 郭立新, 金绍华, 等.CARIS HIPS 多波束测量数据后处理教程[M].北京: 测绘出版社, 2015.

(本文编辑 武亚庆)