引文格式：陈景涛,孙文亮,程彬,等. 线状狭长区域水下地形测量中高程转换问题探讨[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 106-108. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.03.024

线状狭长区域水下地形测量中高程转换问题探讨

陈景涛[1]，孙文亮[1]，程　彬[1]，张伟琪[1]，刘胜震[1*]
（1. 自然资源部第一大地测量队，陕西 西安 710054）

摘　要：河流、部分湖泊水库等水域曲折狭长，周边控制点布设受到诸多限制，控制点分布网形不佳。针对GNSS三维水深测量的高程转换问题，构建了结合XGM2019e地球重力场模型的高程转换方法，并通过工程实例进行高程转换实验和精度评估。结果表明，XGM2019e—二次曲面拟合方法的转换精度优于常规二次曲面拟合方法；但当控制点较少时，XGM2019e—平面拟合方法的精度低于常规平面方法。另外，可通过增加多余控制点、调整控制点分布的方式提高转换精度。

关键词：水下地形测量；高程异常；XGM2019e；移去—恢复
中图分类号：P223　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0106-03

Discussion on Elevation Conversion of Underwater Topographic Survey in Linear Areas

CHEN Jingtao[1], SUN Wenliang[1], CHENG Bin[1], ZHANG Weiqi[1], LIU Shengzhen[1]
(1. The First Geodetic Surveying Brigade of MNR, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the area of rivers, some lakes and reservoirs with the features of meander and narrow, the distribution of control points around the water area is restricted, and the distribution network of control points is not good. Aiming at the elevation conversion problem of GNSS 3D bathymetry in this area, we constructed some elevation conversion methods combined with the XGM2019e earth gravity field model, and carried out conversion experiment through engineering examples and evaluated the accuracy. The results show that the conversion accuracy of XGM2019e-quadric surface fitting method is better than that of conventional quadric surface fitting method. However, when the number of control points is small, the accuracy of XGM2019e-plane fitting method is lower than that of conventional plane method. In addition, the conversion accuracy can be improved by adding redundant control points and adjusting the distribution of control points.

Key words: underwater topographic survey, elevation anomaly, XGM2019e, remove-restore

河流、湖泊水库等内陆水域的水下地形测量成果大多数要求为正常高，而基于CGCS2000椭球的GNSS三维水深测量获取的是水下地形点的大地高，因此需要进行高程转换。部分水下地形测量规范中规定需建立高程转换模型，但没有明确具体转换方法，也未规定转换应达到的精度[1-2]。高程转换即确定目标点的高程异常，主要方法包括几何解析法、重力法和混合法[3-5]。几何解析法的精度较高，但需布设足够数量的GNSS/水准点成果，在地形变化较大的山区工作量较大；重力法需要大量的重力观测资料，在工程应用中实施难度较大；混合法则是将二者相结合求取高程异常[6-8]。河流、部分湖泊水库等水域曲折狭长，水域周边控制点布设受到诸多限制，控制点分布网形不佳。鉴于此，本文构建了融合全球重力场模型的高程转换模型，结合工程实例数据对其精度进行了评估，并与平面模型、二次曲面模型等常规拟合方法进行了对比，还对拟合控制点的选取问题进行了探讨。

1　原理与方法

1.1　高程异常计算模型

依据物理大地测量学理论，高程异常ζ由长波部分ζ_{EGM}、短波分量ζ_{DEM}和残余高程异常ζ_{res}组成，可由GNSS/水准观测精确获得[9-11]。ζ_{DEM}一般通过重力引力位法、棱柱积分法等方法进行计算，但在海拔较低且高程变化不剧烈的区域适用性不强，甚至可能会引入由地形模型本身精度导致的计算误差[11]。考虑到工程应用的实用性与便利性，不单独计算，将其与ζ_{res}合并为一项，称为剩余高程异常，然后利用移去—恢复模型进行高程转换。首先利用GNSS/水准点计算已知点的ζ；再利用重力场模型计算所有点的ζ_{EGM}；然

项目来源：国家重点研发计划资助项目（2016YFC0803109）；陕西测绘地理信息局科技创新资助项目（SCK2023-01）。
第一作者简介：陈景涛（1991—），硕士，工程师，从事大地测量、海洋测绘等相关应用工作，E-mail：472451171@qq.com。
通信作者：刘胜震（1987—），硕士，高级工程师，从事大地测量、海洋测绘等应用研究与技术管理工作，E-mail：429523793@qq.com。

后在已知点重力异常中移除 ζ_{EGM}，并对已知点的剩余高程异常进行拟合，计算得到待求点上的数值；最后在待求点上恢复 ζ_{EGM} 作为该点最终的高程异常值[12]。

1.2　ζ_{EGM} 计算

地球重力场模型表示地球重力位的一组已知系数，被广泛应用于似大地水准面求解中。国内外学者和研究机构已发布多种不同阶次的重力场模型，常用的全球重力场模型包括EGM2008、EIGEN-6C4、XGM2019e、SGG-UGM-2等，其中XGM2019e模型阶次最高可达5 400阶，是目前阶次最高的重力场模型，对应的空间分辨率为2′（约为4 km）。已有研究表明，在中国大陆区域XGM2019e、EIGEN-6C4、SGG-UGM-2模型均优于EGM2008模型，在重力数据覆盖不足的区域，XGM2019e优于其他模型，且其性能在全球范围内更加一致。同时，与其他2 000阶以上的重力场模型相比，XGM2019e未使用EGM2008重力场模型作为数据源，具有更好的独立性[13-14]。因此，本文利用XGM2019e重力场模型构建高程转换模型。利用重力场模型计算得到重力扰动位 T，再利用布隆斯公式计算得到 ζ_{EGM}，即[12]

$$\zeta_{EGM}=\frac{G\times M}{\rho\times\gamma}\sum_{n=2}^{N}\left(\frac{a}{\rho}\right)^{n}\sum_{m=0}^{n}\left(\bar{C}_{nm}\cos m\lambda+\bar{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\times \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \tag{1}$$

式中，λ、φ 为点位经度和纬度；G为地球引力常数；M为地球总质量；ρ 为地心向径；γ 为点位的正常重力值；N 为重力场模型的最高阶数；a 为地球长半轴；$\bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$ 为完全规格化缔合函数；$\bar{C}_{nm}$、$\bar{S}_{nm}$ 为完全规格化位系数。

1.3　残余高程异常拟合方法

移去 ζ_{EGM} 后的高程异常主要包括由地形变化造成的高程异常和残余高程异常两部分，可通过平面函数、曲面函数、多面函数、Shepard拟合法等[15-16]常规数学函数进行拟合。小范围、平坦地区可采用平面拟合或二次曲面拟合；大范围或地形起伏较大地区通常选用二次曲面或三次曲面；范围特别大或地形特别复杂的地区可采用多面函数进行拟合。二次曲面函数是一种局部逼近方法，在实际工程中应用广泛，函数表达式为：

$$\zeta(x,y)=a_0+a_1\Delta x+a_2\Delta y+a_3\Delta x^2+a_4\Delta y^2+a_5\Delta x\Delta y \tag{2}$$

式中，a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5 为二次曲面拟合模型的系数；Δx、Δy 为改化后坐标，$\Delta x=x-x_0$，$\Delta y=y-y_0$；(x_0,y_0) 为中心点坐标。

二次曲面函数参数求解使用的已知点个数应不少于6个，通过最小二乘平差求解。若去掉式（2）中的后3项，则为平面拟合函数，求解平面拟合参数使用的已知点数应不少于3个。

2　实验分析

本文以陕西省某狭长湖泊周边布设的控制网成果为研究数据，对上述高程转换方法进行实例验证。测区南北长约12 km，受制于地形条件，只能在湖泊一侧沿途布设13个控制点，且控制点基本呈线状分布，图形条件较差。每个点均有GNSS大地高和水准正常高成果，测区点位高程范围为600~700 m。实验选取其中若干点作为已知点，其余点作为检验点，分别采用常规平面拟合模型、常规二次曲面模型、XGM2019e—平面拟合、XGM2019e—曲面拟合4种方法进行高程转换计算，并进行精度评价；同时选择不同位置的已知点进行参数计算和分析检验点精度，以评估选点位置对转换精度的影响。采用检验点拟合高程与水准结果的差值和均方根误差（RMSE）两个指标进行精度评价。

2.1　结合重力场模型的平面高程拟合精度分析

本文设计了4种高程转换方案进行实验，每种方案选取4个已知点分别采用常规平面拟合模型和XGM2019e—平面拟合模型进行高程转换，但方案1、2与方案3、4选取的已知点位置不同。为保证精度评价的合理性，4种方案均选取3、4、5、7、8、10、11、12共8个点作为检验点进行精度评价。实验方案设计见表1，4种方案的检验点误差分布见图1，检验点精度见表2。方案1~4的转换精度均在厘米级，选取4个相同已知点进行高程转换时，常规平面拟合方法的高程精度优于XGM2019e—平面拟合方法，说明在控制点网形条件不佳时，采用平面拟合方法推算的剩余高程异常值精度较低。在已知点数量相同的情况下调整已知点的位置，可以看出，方案3、4比方案1、2更均匀且包围了更多的检验点，精度分别提升了51.1%和60.2%，说明高程转换精度与选取的已知点位置分布有直接关系，因此选择已知点进行参数计算时，应尽量使已知点包围整个测区。

表1　平面高程转换方案

方案	已知点	转换方法
1	1、2、6、13	常规平面拟合
2	1、2、6、13	XGM2019e—平面拟合
3	1、6、9、13	常规平面拟合
4	1、6、9、13	XGM2019e—平面拟合

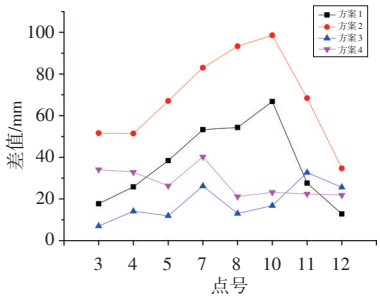


图1 平面高程检验点误差分布图

表2 平面高程检验点精度统计表/mm

方案	最小差值	最大差值	RMSE
1	12.8	66.8	41.3
2	34.7	98.6	71.6
3	7.0	32.7	20.2
4	21.1	40.2	28.5

2.2 结合重力场模型的曲面高程拟合精度分析

本文设计了6种高程转换方案进行实验，方案5~8选取6个已知点，方案9、10选取7个已知点，分别采用常规平面拟合、XGM2019e—平面拟合、常规二次曲面拟合和XGM2019e—二次曲面拟合方法进行高程转换。6种方案均选取3、4、7、8、9、13共6个点作为检验点进行精度评价。实验方案设计见表3，6种方案的检验点误差分布见图2，检验点精度见表4。

表3 曲面高程转换方案

方案	已知点	转换方法
5	1、2、5、6、11、12	常规平面拟合
6	1、2、5、6、11、12	XGM2019e—平面拟合
7	1、2、5、6、11、12	常规二次曲面拟合
8	1、2、5、6、11、12	XGM2019e—二次曲面拟合
9	1、2、5、6、10、11、12	常规二次曲面拟合
10	1、2、5、6、10、11、12	XGM2019e—二次曲面拟合

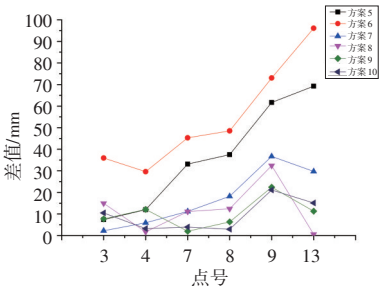


图2 曲面高程检验点误差分布图

表4 曲面高程检验点精度统计表/mm

方案	最小差值	最大差值	RMSE
5	7.4	69.2	43.4
6	29.6	96.1	59.3
7	2.2	36.7	21.3
8	0.6	32.4	16.1
9	2.0	22.4	12.1
10	2.9	21.1	11.7

方案5、6虽然增加了多余的已知点，但平面拟合模型的精度并未明显改善；方案7、8则利用同一套已知点进行了二次曲面拟合，精度比方案5、6有较大提升，说明在控制点网形条件不佳时，采用二次曲面拟合方法可显著提高精度。方案7、8的结果表明，选取同样数量的已知点进行高程转换时，XGM2019e—二次曲面拟合方法的精度优于常规二次曲面拟合方法，说明采用二次曲面拟合方法推算的剩余高程异常值精度较高。同时，方案9、10比方案7、8的精度分别提升了43.2%和27.3%，说明增加一个已知点可进一步提升二次曲面高程拟合的精度。

3 结 论

结合线状狭长水域水下地形测量中高程转换的工程需求，通过分析高程异常的计算模型，本文构建了结合XGM2019e模型的高程转换方法，分别采用平面模型、二次曲面模型对剩余高程异常值进行拟合推算，并利用移去—恢复模型求解正常高。通过工程实例进行高程转换实验，并进行精度评估，主要结论为：①在线状狭长水域进行高程转换时，若已知控制点数量足够多，XGM2019e—二次曲面拟合方法的转换精度优于常规二次曲面拟合模型优于平面拟合模型，可优先考虑使用该方法，但若控制点数量较少，则常规平面拟合模型的精度优于XGM2019e—平面拟合方法，需要注意的是平面模型不宜在大范围或高差变化剧烈的区域使用；②条件允许时，应尽量使控制点位覆盖整个测区，同时通过增加多余控制点和调整控制点分布的方式也可提高二次曲面拟合模型的精度。

参考文献

[1] 内陆水域水下地形测量技术规程:CH/T 7003-2021[S].

[2] 水运工程测量规范:JTS 131-2012[S].

[3] 陈俊勇,李建成,宁津生,等. 全国及部分省市地区高精度、高分辨率大地水准面的研究及其实施[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(4):283-288

[4] 郭辉. 组合模型的GPS高程转换及精度分析[J]. 测绘科学,2018,43(2):34-38

[5] 乔仰文,辛久志,王晓辉,等. GPS高程转换的若干问题的研究[J]. 测绘通报,1999(11):17-19

[6] 董明旭,李建成,华亮春,等. 湖南省似大地水准面2017模型及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(1):66-71

[7] 成兵,张熙,石鑫,等. 复杂地形多源数据融合GNSS高程转

(下转第117页)