

基于 EGM2008 模型的近海高程传递方法研究

于 甲^{1,2}, 曹立华¹, 冯义楷^{2*}

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛, 266100; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛, 266061)

摘 要:研究了基于 EGM2008 大地水准面模型的高程传递原理,通过青岛地区已知控制点数据计算得到 EGM2008 大地水准面模型与我国大地水准面差距,利用 EGM2008 模型计算高程异常的方法,结合 GNSS 技术实现高程传递。利用青岛市 C 级 GNSS 控制网数据,基于 EGM2008 模型,采用 3 种不同的拟合方法,建立了区域高程异常残差场,反演高程异常值与已知控制点高程异常值进行比对。利用青岛市 D 级 GNSS 点的数据对构建的格网模型的精度进行检核。结果表明:EGM2008 大地水准面模型与我国的大地水准面存在 22 cm 左右的偏差;基于 EGM2008 模型的高程传递精度可达厘米级,可用于近海高程传递,几种拟合方法精度相当。

关键词:EGM2008 模型;正常高;GNSS;大地高;高程异常

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2019)04-0310-06

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.04.007

引用格式:YU J, CAO L H, FENG Y K. Research on method for offshore elevation transmission based on EGM2008 model[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(4): 310-315. 于甲, 曹立华, 冯义楷. 基于 EGM2008 模型的近海高程传递方法研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(4): 310-315.

海洋开发与管理活动离不开海洋测绘^[1]的支撑,但在近海区域海洋测绘活动存在基准不统一,其中近海区域的高程基准转换与传递问题是一个研究热点。常用的高程基准面为大地水准面、似大地水准面和参考椭球面,对应的高程分别为正高、正常高和大地高,其中正常高是我国目前采用的高程系统^[2]。常规大地测量方法^[3]受地形、天气等影响大,不适宜大面积及长距离的高程传递工作;静力水准法^[4]采用连通管进行高程传递,对连通管的质量和填充物的状态均有极高的要求,同时需考虑气压差、密度差等因素对平衡状态的影响;动力水准法即同步验潮法^[5],需长时间连续的潮位观测资料,观测周期长且作用范围有限。鉴于上述 4 种方法的弊端,它们均不能有效解决近海高程传递的问题。利用 GNSS 技术可方便快捷地在全球任意地方获取厘米级精度的三维空间位置信息^[6],但它测量的高程是参考椭球框架内的大地高,与我国采用的水准高程系统之间存在一定的差异,即高程异常。

利用地球重力模型可以计算全球任意位置的高程异常,将其与 GNSS 定位结果结合便可获取正常高资料^[7],完成近海的高程传递目标。作为目前精度最高的全球重力场模型,EGM2008 模型由美国国家地理空间情报局于 2008-04 发布,它在我国大陆地区高程异常的总体精度为 20 cm,其中华东华中地区为 12 cm,华北地区为 9 cm,西部地区为 24 cm^[8-12]。由于 EGM2008 大地水准面模型与我国的区域大地水准面模型之间存在系统性的偏差,因此在使用过程中需要细致的考虑两者的差异。原国家测绘地理信息局和沿海省市测绘管理部门在中国沿海布设了大量 C 级与 D 级 GNSS 网点,并在实地施测了部分水准。利用这些 GNSS 控制网点的 GNSS/水准资料,结合 EGM2008 模型,计算出试验区域高程异常残差场;然后计算出未知点位的正常高,同样也能按照格网要求计算出格网点上的高程异常。为探究基于 EGM2008 模型在我国进行近海

收稿日期:2019-08-30

资助项目:国家重点研发计划项目——可延展艇体新概念海底目标搜寻潜航器—海上搜寻演示验证技术与评估(2017YFC0306003);国家自然科学基金青年基金项目——基于 GNSS、长期验潮站与卫星测高联合观测的中国沿海绝对海平面变化研究(41706115)

作者简介:于 甲(1985-),男,工程师,硕士研究生,主要从事海洋测绘方面研究. E-mail: zfcg@fio.org.cn

*** 通讯作者:**冯义楷(1979-),男,高级工程师,博士,主要从事大地测量、海洋测绘等方面研究. E-mail: ykfeng@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

高程传递的效果,本文基于青岛市 C 级 GNSS 网的数据,对比了 EGM2008 计算的高程异常与实际值间的偏差,并对高程异常的残差进行拟合建立残差场模型,用于计算准确的高程异常值。最后,利用青岛市 D 级 GNSS 网的数据对上述的模型结果进行检核。

1 基于 EGM2008 模型的高程传递的原理

由于全球重力场模型受到地形等因素的影响,直接计算的高程异常精度很低,故基于 EGM2008 利用“移去—恢复”技术计算高程异常,其基本原理是将重力场模型得到中波成分用作区域残余重力异常代入 Stokes 进行积分式计算:首先,分别利用全球重力场参考模型和数字地形模型模型消除长波和短波部分的重力异常值;其次,进行内插计算得到格网数据;最后,将该格网数据代入 Stokes 公式计算得到高程异常。

GNSS 技术测量的大地高与正常高之间的关系表达为

$$H = H_r + \xi, \quad (1)$$

式中, H 为大地高, H_r 为正常高, ξ 为高程异常。

所以准确地计算高程异常是实现大地高向正常高转换的关键。其中,高程异常可表示为

$$\xi = \xi_M + \Delta\xi, \quad (2)$$

式中, ξ_M 为由地球重力场模型 EGM2008 计算的模型高程异常对应的中、长波部分, $\Delta\xi$ 为高程异常残差。

在高程异常变化率较低的区域,待定点的高程异常可直接由离散点内插得到;在高程异常变化较大的区域则难以实现,因为这样得到的结果误差很大。因此,要获得正常高 H_r ,则需要把模型与 GNSS/水准点相结合。具体步骤如下:1)利用拟合方法求高程异常残差场(实测高程异常值—EGM2008 模型计算的高程异常);2)利用内插方法得到待定点的高程异常残差值 $\Delta\xi$;3)根据 EGM2008 模型计算待定点的高程异常值 ξ_M ;4)将 $\Delta\xi$ 和 ξ_M 代入式(2)求得待定点精确的高程异常值 ξ ;5)结合待定点实测的大地高 H ,利用式(1)求的待定点正常高 H_r 。

本文分别采用了 3 种不同的拟合方法用于构建高程异常残差场,包括:平面拟合法、二次曲面拟合法和反距离加权法。平面拟合法的数学表达式见式(3),该方法需 3 个或以上的已知点拟合测取内高程异常残差表达式的待定系数,以求出各点处的高程异常残差值。二次曲面拟合法可表达为式(4),该方法至少需要 6 个或以上的已知点。反距离加权法是在二次曲面拟合法基础上,根据已知点与待拟合点间的距离为各起算数据赋予不同的权值 p ,本文所选权函数如式(5)所示。

$$\Delta\xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i, \quad (3)$$

式中, x_i, y_i 为目标点的平面坐标; a_0, a_1 和 a_2 为待定系数。

$$\Delta\xi_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4y_i^2 + a_5x_iy_i, \quad (4)$$

$$p_i = \begin{cases} 1/r & 0 < r \leq R/3 \\ \frac{27}{4R(r/R-1)^2} & \frac{R}{3} < r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases}, \quad (5)$$

式中, r 为已知点与待拟合点之间的距离, R 为最大拟合半径。

2 实例分析

目前,GNSS 技术测得的大地高的精度可达到厘米级甚至毫米级,所以只要能基于 EGM2008 模型获取高精度的高程异常值,便可以实现近海的高精度高程传递目标,满足海洋测量的需要。为此,本文收集了青岛市 C 级及 D 级 GNSS 网的数据(部分网点包含正常高结果),以建立青岛区域的高程异常残差场,并对其反演的高程异常进行精度的检核。

2.1 建立区域高程异常残差场

在 C 级 GNSS 点中均匀选取 59 个点作为控制点,分布图 1 所示。利用 EGM2008 模型计算各选取的控制点的高程异常值,同时利用已知数据计算真高程异常值,将已知值与模型计算值进行求差,得到区域内控制点的高程异常残差,具体数据如表 1 所示。比较实际计算的真值与模型计算的高程异常值,互差平均值为 20 cm 左右。综合考虑文献资料和离水准原点近点的计算结果,本文认为我国的大地水准面与全球大地水准面存在 22 cm 系统差。因此应在后续的数据处理过程中将该系统误差减掉,以得到真实的高程异常残差值。



图 1 参与计算的 C 级控制点分布

Fig.1 Distribution of C-level control points involved in the calculation

表 1 C 级 GNSS 点高程异常残差计算结果 (m)

Table 1 Residual error of elevation anomaly at C-level GNSS points (m)

点 号	高程异常	模型计算值	残 差	除掉系统差后的残差	点 号	高程异常	模型计算值	残 差	除掉系统差后的残差
C011	5.665	5.360	0.305	0.085	C026	6.363	6.059	0.304	0.084
C012	5.995	5.655	0.340	0.120	C027	5.741	5.489	0.252	0.032
C013	6.444	6.206	0.238	0.018	C031	5.694	5.444	0.250	0.030
C016	5.971	5.615	0.356	0.136	C032	6.299	6.096	0.203	-0.017
C017	6.821	6.494	0.327	0.107	C033	6.752	6.481	0.271	0.051
C019	5.960	5.616	0.344	0.124	C037	5.735	5.445	0.290	0.070
C020	6.719	6.356	0.363	0.143	C038	6.180	5.877	0.302	0.082
C025	6.027	5.731	0.296	0.076	C039	6.871	6.689	0.182	-0.038

续表									
点 号	高程异常	模型计算值	残 差	除掉系统差后的残差	点 号	高程异常	模型计算值	残 差	除掉系统差后的残差
C040	7.283	7.099	0.184	-0.036	C071	4.325	4.057	0.268	0.048
C041	7.605	7.472	0.133	-0.087	C072	4.662	4.403	0.259	0.039
C042	6.469	6.190	0.279	0.059	C073	5.038	4.792	0.246	0.026
C044	5.459	5.080	0.379	0.159	C074	5.671	5.479	0.192	-0.028
C045	6.151	5.852	0.299	0.079	C075	6.157	6.074	0.083	-0.137
C046	6.651	6.432	0.219	-0.001	C078	4.473	4.206	0.267	0.047
C047	7.141	6.954	0.187	-0.033	C080	5.451	5.081	0.370	0.150
C048	7.404	7.262	0.142	-0.078	C082	3.853	3.668	0.185	-0.035
C049	7.765	7.638	0.127	-0.093	C083	4.176	3.899	0.277	0.057
C050	6.446	6.217	0.229	0.009	C087	3.911	3.725	0.186	-0.034
C052	5.334	5.049	0.285	0.064	C089	5.102	4.571	0.531	0.311
C053	5.751	5.385	0.366	0.146	C090	4.368	4.077	0.291	0.071
C054	5.983	5.673	0.310	0.090	C091	3.591	3.410	0.181	-0.039
C056	7.081	6.935	0.146	-0.074	C092	4.198	3.896	0.302	0.082
C060	5.135	4.884	0.250	0.030	C093	3.750	3.550	0.200	-0.020
C061	5.611	5.360	0.251	0.031	C094	3.460	3.269	0.191	-0.029
C062	5.896	5.790	0.106	-0.114	C095	4.058	3.758	0.300	0.080
C064	5.252	5.054	0.198	-0.022	C096	4.552	4.105	0.447	0.227
C065	6.872	6.838	0.034	-0.186	C097	3.693	3.457	0.236	0.016
C066	4.933	4.721	0.212	-0.008	C098	3.144	2.946	0.198	-0.022
C067	5.514	5.361	0.153	-0.067	C099	3.474	3.268	0.206	-0.014
C068	5.784	5.690	0.094	-0.126	C100	3.843	3.577	0.266	0.046

根据控制点的平面位置及其高程异常残差,分别用平面拟合、二次曲面拟合和反距离加权拟合三种方法拟合构建青岛地区的高程异常值残差场(图 2)。

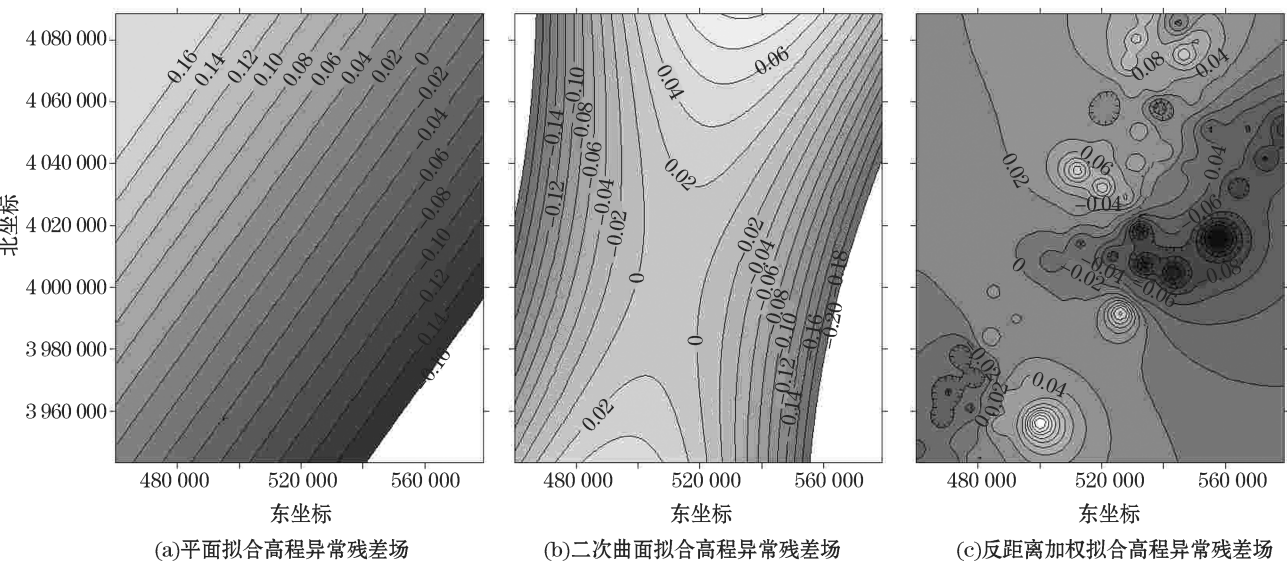


图 2 3 种高程异常残差场

Fig.2 A diagram of three kinds of elevation anomaly residual fields

2.2 高程异常模型精度的检核

利用青岛市 D 级 GNSS 点的数据对构建的格网模型的精度进行检核。选取 6 个已知大地高和正常高的 D 级 GNSS 点作为检核点。根据各残差场格网点水平坐标及其高程异常残差值,内插计算各检核点的高程异常残差值。将各点的高程异常残差值与其 EGM2008 模型计算的高程异常值相加,并进行系统误差改正,便可得到检核点高程异常的拟计算值。同时,将各 C 级 GNSS 点已知的高程异常值(大地高与正常高的差值)作为起算数据,拟合内插各检核点的高程异常,以确认起算数据的内符合度。

表 2 汇总了各检核点的实测高程异常值(ϵ)、C 级网直接拟合的高程异常值(ϵ_c)、平面拟合的高程异常值(ϵ_p)、二次曲面拟合的高程异常值(ϵ_r)以及反距离加权拟合的高程异常值(ϵ_j),并将拟合内插的结果分别与实测高程异常值作差,进行精度的检核。结果表明,控制点的高程异常已知值具有很好的内符合度,验证了起算数据的有效性;基于 EGM2008 模型的拟合法计算的高程异常具有较高的精度,计算结果与控制点处已知的高程异常的差值的 RMS 较小(3~9 cm),符合工程建设的精度要求;其中,平面拟合法效果最优,说明青岛地区 EGM2008 模型计算的高程异常与真实值的差异主要是低频信息的差异。

表 2 各高程异常值互差的比较

Table 2 Comparison of the differences between the abnormal values of each elevation

点 名	ϵ	ϵ_c	ϵ_p	ϵ_r	ϵ_j	$\epsilon - \epsilon_c$	$\epsilon - \epsilon_p$	$\epsilon - \epsilon_r$	$\epsilon - \epsilon_j$
D136	7.007	6.974	7.055	7.040	7.092	0.033	-0.048	-0.033	-0.085
D137	7.251	7.202	7.243	7.203	7.278	0.049	0.008	0.048	-0.027
D149	6.958	6.923	7.002	6.988	7.047	0.035	-0.044	-0.030	-0.089
D158	6.908	6.872	6.962	6.949	7.013	0.036	-0.054	-0.041	-0.105
D207	6.713	6.667	6.746	6.736	6.831	0.046	-0.033	-0.023	-0.118
C049	7.765	7.840	7.774	7.634	7.808	-0.075	-0.009	0.131	-0.043

3 结 论

本研究基于 EGM2008 模型的近海高程传递方法开展了分析计算,结果表明,利用 EGM2008 模型及少量已知控制点,结合 GNSS 技术可实现厘米级精度的高程传递。该方法特别适用于沿海及岛屿等控制点稀少区域,可代替传统三、四等及等外水准测量工作,大大提高工作效率。本研究还可得出以下结论:

1) EGM2008 大地水准面模型与我国区域大地水准面间存在系统性偏差,青岛地区的偏差大小约 22 cm。

2) 利用 EGM2008 模型结合测区内的少量控制点,可构建区域的精化大地水准面模型,结合 GNSS 技术测得的高精度大地高,可实现区域内厘米级正常高的解算。

3) 在青岛地区,平面拟合、二次曲面拟合及反距离加权拟合的精度相当;3 种方法中平面拟合效果略好,该结论与青岛地区地势平坦的情况向吻合。

4) 考虑 EGM2008 模型精度在小范围内一致性,可用上述方法实现近海高程传递。

参考文献(References):

- [1] ZHAI G J, HUANG M T. The review of development of marine surveying technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1752-1759. 翟国君, 黄谟涛. 海洋测量技术研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1752-1759
- [2] KONG X Y, GUO J M, LIU Z Q. Foundation of geodesy[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010. 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [3] ZHANG Z L, DENG Y, LUO C L, et al. Research on precise triangulated height surveying in place of first order leveling[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006(1): 5-8. 张正禄, 邓勇, 罗长林, 等. 精密三角高程代替一等水准测量的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006(1): 5-8.
- [4] ZHANG J K, CHEN C Y, BAI C X, et al. Study on the key technical problems related to accuracy of HLS[J]. Geotechnical Investigation

- and Surveying, 2012, 40(9): 73-77, 82. 张建坤, 陈昌彦, 白朝旭, 等. 影响静力水准监测质量的关键技术问题探讨[J]. 工程勘察, 2012, 40(9): 73-77, 82.
- [5] HUANG J S. Study of Elevation benchmark transfer technology based on dynamic level method[J]. Wuhan: Guangxi Water Resources and Hydro-power Engineering, 2019(3): 1-4, 14. 黄军胜. 基于动力水准法的高程基准传递技术研究[J]. 广西水利水电, 2019(3): 1-4, 14.
- [6] LI X X. Rapid ambiguity resolution in gnss precise point positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. 李星星. GNSS精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [7] ZHANG C Y, JIANG T, KE B G, et al. The analysis of height system definition and the high precision GNSS replacing leveling method [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(8): 945-951. 章传银, 蒋涛, 柯宝贵, 等. 高程系统定义分析与高精度 GNSS 代替水准算法[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 945-951.
- [8] ZHANG C Y, GUO C X, CHEN J Y, et al. EGM 2008 and its application analysis in chinese mainland[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.
- [9] LIU B, GUO J M, SHI J B, et al. A GPS height fitting method based on the EGM2008 model and terrain correction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(4): 554-558. 刘斌, 郭际明, 史俊波, 等. 利用 EGM2008 模型与地形改正进行 GPS 高程拟合[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2016, 41(4): 554-558.
- [10] SHU C F, LI F, HAO W F. Evaluation of EGM2008 and its application analysis over a particular region of China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(8): 919-922. 束蝉方, 李斐, 郝卫峰. EGM2008 模型在中国某地区的检核及适用性分析[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2011, 36(8): 919-922.
- [11] ZHANG X F, LIU C, WANG G H, et al The methods and accuracy analysis of GPS height transformation based on EGM2008 earth gravity field mode[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 38-44. 张兴福, 刘成, 王国辉, 等. 基于 EGM2008 重力场模型的 GPS 高程转换方法及精度分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 38-44.
- [12] WU F M, WEI Z Q. Height transfer from land to island based on GNSS and EGM2008 model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(5): 698-703. 吴富梅, 魏子卿. 利用 GNSS 和 EGM2008 模型进行跨海高程传递[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2016, 41(5): 698-703.

Research on Method for Offshore Elevation Transmission Based on EGM2008 Model

YU Jia^{1,2}, CAO Li-hua¹, FENG Yi-kai²

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Principle of elevation transmission based on EGM2008 geoid model is studied. The difference between the EGM2008 geoid model and the geoid in China is obtained by calculating the data acquired from the known control points in Qingdao region. By using the EGM2008 model to calculate the elevation anomalies and combining with GNSS technology, the offshore elevation transmission is realized. Based on the EGM2008 model, the GNSS control network data of C level in Qingdao City are applied to construct the regional elevation anomaly residual field using three different fitting methods, and the inversed elevation anomaly values are compared with those from known control points. The accuracy of the constructed grid model is checked by using the data of D-level GNSS points in Qingdao City. The results show that there is a deviation of about 22 cm between the EGM2008 geoid model and the geoid in China. The elevation transmission based on the EGM2008 model can reach to a level of centimeter in accuracy and can be applied to the offshore elevation transmission. The elevation transmission accuracy obtained by different fitting methods can be comparable.

Key words: EGM2008 model; normal height; GNSS; geodetic height; elevation anomaly

Received: August 30, 2019