

基于重力场模型的高程异常拟合精度分析

屈守根

新疆疆海测绘科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年6月8日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月8日

摘要

为探究不同重力场模型在高程异常拟合中的适用性, 本文结合移去恢复法与二次曲面拟合模型, 分别利用EGM96、EGM2008和XGM2019三种重力场模型, 对新疆某水利工程地区的GNSS与三等水准重合点数据进行高程异常拟合实验。通过检核点残差与拟合中误差评价各模型的拟合精度。结果表明, XGM2019模型的拟合残差分布最为平稳, 拟合中误差为0.0354 m, 精度优于EGM2008模型的0.0392 m和EGM96模型的0.0458 m, 在局部地形起伏较多的区域表现出更高的拟合可靠性和稳定性。

关键词

高程异常, EGM96重力场模型, EGM2008重力场模型, XGM2019重力场模型

Accuracy Analysis of Elevation Anomaly Fitting Based on Gravity Field Model

Shougen Qu

Xinjiang Jianghai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: June 8, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 8, 2026

Abstract

In order to explore the applicability of different gravity field models in fitting elevation anomalies, this paper combines the removal recovery method and the quadratic surface fitting model, and uses three gravity field models, namely EGM96, EGM2008, and XGM2019, to conduct elevation anomaly fitting experiments on GNSS and third-order leveling coincidence point data in a water conservancy project area in Xinjiang. Evaluate the fitting accuracy of each model by checking point residuals and fitting mean square errors. The results showed that the residual distribution of the XGM2019 model was the smoothest, with a mean square error of 0.0354 m, and its accuracy was better than that of the EGM2008 model at 0.0392 m and the EGM96 model at 0.0458 m. It exhibited higher fitting

reliability and stability in areas with more local terrain undulations.

Keywords

Elevation Anomaly, EGM96 Gravity Field Model, EGM2008 Gravity Field Model, XGM2019 Gravity Field Model

Copyright © 2026 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

高程异常是确定区域似大地水准面的关键参数，在 GNSS 正常高转换中具有重要意义。传统的高程异常拟合方法依赖于 GNSS/水准重合点，通过曲面拟合建立区域模型，但其精度受限于重合点分布与地形起伏特征。随着重力测量技术进步，利用高阶重力场模型提取高程异常中长波项，再结合局部拟合获取短波项的“移去-恢复”策略，已成为区域似大地水准面精化的主流技术路线[1][2]。在重力场模型选择上，EGM96 模型在全球范围内具有较好宏观精度，但局部区域表现受阶次限制。EGM2008 模型空间分辨率和精度显著提升，能够更精细描述重力场短波特征，在多个地区展现了良好拟合效果。近年来，XGM2019 模型融合了 GRACE、GOCE 卫星重力、卫星测高及地面重力数据，在模型阶次和全球一致性方面进一步优化。已有研究表明，XGM2019 在计算高程异常长波精度上相比 EGM2008 有近 1 倍的提高；王科[3]基于移去恢复法发现，XGM2019 模型与我国似大地水准面符合程度更高，在三个不同地形区域的拟合外符合精度分别为 0.038 m、0.025 m 和 0.008 m；葛步月、李瑞芳等[4]系统比较了三种模型，结果表明 XGM2019 的拟合中误差最小。在拟合方法方面，二次曲面模型因结构简单、参数易求解，在平坦及微丘地区的高程异常拟合中应用广泛。王建成等人[5]在重合点分布合理时，移去恢复法结合高阶重力场模型可使拟合中误差优于厘米级。然而，现有研究仍存在不足：一是 XGM2019 模型研究起步较晚，区域性应用成果尚不丰富，不同地形特征下的适用性缺乏系统比较；二是尽管 EGM2008 在地形平缓与起伏地区的精度差异已被提及，但三种主流模型在同一区域、相同拟合方法下的精度对比仍较少见，尤其是在地形起伏频繁但整体高差不大的过渡性地貌区域，模型间的精度差异尚需验证；三是现有研究对拟合残差空间分布特征及检核点代表性问题关注不足，可能影响模型适用性结论的可靠性[6]。

为此，本文基于新疆某水利工程实测的 22 组 GNSS/水准重合点数据，分别采用 EGM96、EGM2008 和 XGM2019 三种重力场模型，结合二次曲面拟合构建高程异常拟合模型，通过检核点残差与拟合中误差对比分析三种模型的拟合精度。研究区域属平原但局部略有起伏、坑洼较多，有利于评估各模型在复杂小尺度地形条件下的拟合表现，以期为区域似大地水准面精化中重力场模型的合理选取提供参考。

2. 高程异常场逼近方法

2.1. 计算原理

基于 Bruns 公式，地面任意一点由重力场模型确定的高程异常(即中长波成分)可按式(1)求取：

$$\xi_M = \frac{GM}{r_\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a^n}{r} \right) \sum_{m=0}^n \left(\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda \right) \cdot \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

式中， ξ_M 为高程异常的中长波部分； GM 为地心引力常数， r 为向径， θ 为纬度， λ 为经度， γ 为重力异

常, a 为参考椭球的长半径, n 为最高展开阶数, $\bar{C}_{nm}$ 、 $\bar{S}_{nm}$ 为完全归一化的扰动位系数, $\bar{P}_{nm}$ 为完全归一化连带勒让德函数。

采用二次曲面进行局部拟合时, 控制点的平面坐标与高程异常值之间的映射关系由式(2)给出:

$$f(x_i, y_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2 + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, $f(x_i, y_i)$ 为二次曲面拟合模型, a_i 表示拟合系数 ($i = 0, 1, \dots, 5$), x_i , y_i 为控制点坐标值。使用拟合中误差评价精度, 用残差平方和除以拟合点个数, 继而开根号即为拟合中误差。故求取某地区的高程异常二次曲面模型, 实际上即求解 $a_0 \sim a_5$ 6 个未知系数值的过程, 在测区内有 n ($n \geq 6$) 个点坐标及高程异常已知, 则可通过最小二乘原理求解出 6 个系数。

将式(2)表示为矩阵形式, 得到式(3):

$$f_{n \times 1} = B_{n \times 6} \times A_{6 \times 1} + \varepsilon_{n \times 1} \quad (3)$$

其中 $f_{n \times 1} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$, $B_{n \times 6} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 & x_2 y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & y_n^2 & x_n y_n \end{bmatrix}$, $A_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}$, $\varepsilon_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$ 。

欲求系数阵 $A_{6 \times 1}$, 根据最小二乘原理有:

$$A = (B^T P B)^{-1} (B^T P \xi) \quad (4)$$

在求得拟合系数后, 即可为该测区建立高程异常值的二次多项式曲面表达。为避免因点位坐标数值过大导致法方程系数阵接近奇异性、从而损害解算质量, 须对坐标实施中心归算处理: 将各点的原始坐标减去整个区域几何中心的坐标, 用得到的相对坐标参与建模, 以优化数值计算的稳定性。

采用“先移去、后恢复”的策略, 首先依靠全球重力场模型提取高程异常中的中长波分量, 再通过二次曲面拟合求定剩余部分。其操作步骤如下:

- 1) 在拟合区收集控制点的大地高与正常高, 算出各已知点的高程异常量;
- 2) 利用重力场模型分别计算已知点与待求点处的中长波影响项;
- 3) 将已知点的高程异常扣除其中长波分量, 得到仅反映局部短波变化的残差值;
- 4) 以二次多项式曲面为基函数, 对短波残差进行拟合, 反演出拟合参数;
- 5) 根据所得拟合公式推算待求点上的短波改正量;
- 6) 把待求点的短波改正量与其中长波贡献相加, 便获得经曲面拟合精化后的该点高程异常值。

2.2. 重力场模型截断阶数选取

采用 EGM96、EGM2008 和 XGM2019 三个重力场模型计算高程异常的中长波分量时, 模型展开阶数均截断至 2160 阶(对应空间分辨率约为 5')。EGM96 模型完全阶数为 360 阶, 实际计算时也扩展至 2160 阶以保持与高阶模型的一致性; EGM2008 和 XGM2019 模型均完整扩展至 2160 阶。该阶次能够充分反映重力场的中长波特征, 同时避免过高的阶次引入短波噪声。

2.3. 特定点位高程异常值的提取方法

对于 EGM96 模型: 由于该模型以球谐系数形式提供, 采用球谐展开法直接计算各已知点(控制点与检核点)的高程异常值。具体而言, 根据点的地心纬度、经度和大地高, 利用式(1)对完全归一化球谐系数进行累加求和, 计算至截断阶数(2160 阶), 得到该点的中长波高程异常分量。

对于 EGM2008 模型：该模型同时提供球谐系数和 $1' \times 1'$ 格网数据。为便于统一对比，本文采用双二次插值方法从 $1' \times 1'$ 格网模型中提取各点位的高程异常值。即根据已知点的平面坐标(或经纬度)，定位其所在格网单元，对相邻四个格网点的高程异常值进行双二次插值，得到该点的中长波高程异常。

对于 XGM2019 模型：该模型提供最高 2160 阶的球谐系数。本研究采用与 EGM96 相同的球谐展开法，将每个已知点的坐标转换为球坐标后，按式(1)计算至 2160 阶，得到对应的高程异常中长波项。

3. 高程异常拟合实验

本次实例分析共采用 22 组重合点数据，这些数据源自新疆某水利工程项目中的 GNSS 测量成果，并结合三等水准测量获取了正常高与大地高数值。为客观评价不同重力场模型的拟合精度，将其中 18 个点作为控制点(用于建立二次曲面拟合模型)，剩余 4 个点(点号 07、10、16、19)作为检核点(用于独立精度验证)。控制点均匀分布于测区，基本覆盖整个研究范围；检核点则选取在局部地形略有起伏或点位分布较边缘的位置，以检验模型的外推和内插能力。测区整体属平原地区，但外业选点中实际地形略有起伏，并且存在地面坑洼地段，地面不同海拔导致高程存在差异，而局部微小起伏较为频繁，因此可利用这一数据特征，评估多种重力场模型在地形小幅波动条件下的似大地水准面拟合性能。

为分离出高程异常场的中长波成分，本工作引入了 EGM96、EGM2008 和 XGM2019 三组重力场模型。具体操作上，对于 EGM2008 模型，利用双二次插值技术计算出已知测点处高程异常的中长波部分，将其从实测值中扣除，得到剩余残差量，再通过二次曲面对该残差进行拟合逼近。三种模型在检验点处的拟合残差统计汇总见表 1。

Table 1. Residual fitting
表 1. 拟合残差

检核点	EGM96/m	EGM2008/m	XGM2019/m
07	0.0575	0.0392	0.0384
10	-0.0278	-0.0414	-0.0346
16	-0.0329	-0.0321	-0.0320
19	0.0337	-0.0182	0.0078
拟合中误差	0.0458	0.0392	0.03554

由表 1 可知，EGM96 模型：在 07 号点残差达到+5.75 cm，为所有残差中的最大值；在 19 号点残差为+3.37 cm；在 10 号和 16 号点残差绝对值分别为 2.78 cm 和 3.29 cm。四个检核点残差的绝对值均值为 3.80 cm，拟合中误差为 4.58 cm，明显高于其他两种模型，说明 EGM96 在中长波场描述能力上已难以满足厘米级高程异常拟合的需求。EGM2008 模型：在 07 号和 16 号点残差分别为+3.92 cm 和-3.21 cm，在 10 号点残差为-4.14 cm，在 19 号点残差为-1.82 cm。残差绝对值均值为 3.27 cm，拟合中误差为 3.92 cm。相比 EGM96 有所改善，但在 10 号点残差绝对值仍超过 4 cm，表明该模型在局部微小异常场中仍存在一定的不确定性。XGM2019 模型：四个检核点的残差绝对值分别为 3.84 cm、3.46 cm、3.20 cm 和 0.78 cm，均值为 2.82 cm，拟合中误差仅为 3.54 cm。尤其值得注意的是，在 19 号点残差仅 0.78 cm，远优于其他两种模型。残差符号虽有正负交替，但整体幅度最小且无异常尖峰，显示出最优的拟合平稳性和准确性。

从整体上看，EGM96 与 EGM2008 模型虽然在个别点上拟合精度较好，但在部分检核点会出现绝对值偏大的拟合残差，从而对拟合中误差造成较为明显的影响；XGM2019 模型的拟合精度分布较为均匀，未出现残差较大的点位且精度较高。XGM2019 模型的中误差为 0.0354 m，在对比模型中拟合精度最高。依据表 1 数据绘制的曲线图见图 1。

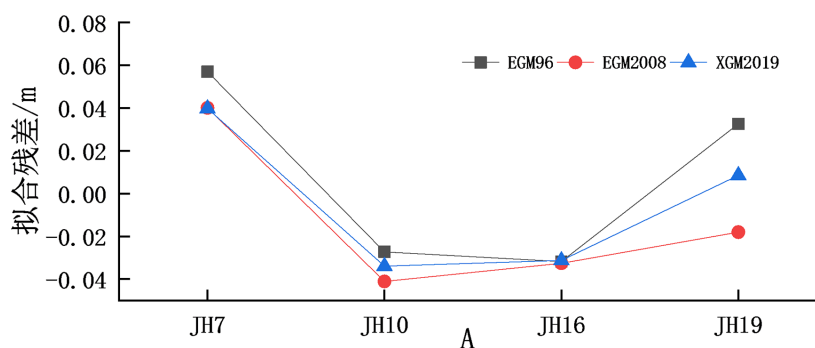


Figure 1. Residual curve of fitting
图 1. 拟合残差曲线图

从图 1 可以看出, EGM96 模型的残差值整体偏大, EGM2008 模型则整体偏小, 而 XGM2019 模型对应的残差曲线具有更高的稳定性和更小的波动幅度, 表现优于另外两种模型。若将该模型与移去恢复法联用, 可获得更优的拟合效果。结合三种重力场模型的背景资料对比分析, XGM2019 模型在本实验中表现更优的原因可以从以下几个方面从机理上加以解释:

(1) 阶次更高、分辨率更细: XGM2019 最高阶次达 5399 阶(空间分辨率约 2'), 远高于 EGM2008 (2159 阶, 约 5')和 EGM96 (360 阶, 约 30'), 能更精细刻画局部短波重力异常。

(2) 数据更丰富、更新: 融合了新一代卫星重力、卫星测高、地面重力及地形模型数据, 尤其在新疆等地面重力稀疏区, 借助卫星与地形信息有效弥补了实测数据不足。

(3) 解算策略优化: 采用分区、分频段的最小二乘解法, 全球精度一致性更高。

4. 结束语

本文基于移去恢复法和二次曲面拟合模型, 利用 EGM96、EGM2008 和 XGM2019 三种重力场模型开展了高程异常拟合实验。结果表明, XGM2019 模型在各检核点上的拟合残差分布最为均衡, 拟合中误差为 0.0354 m, 整体精度优于 EGM2008 和 EGM96 模型, 尤其在局部起伏较多的区域表现出更高的拟合稳定性和可靠性。EGM2008 模型虽然总体精度优于 EGM96 模型, 但在个别检核点上仍存在较大残差, 拟合结果对点位分布较为敏感。因此, 在进行区域似大地水准面精化时, 优先采用 XGM2019 重力场模型有助于提高高程异常拟合的精度和稳健性。

参考文献

- [1] 李晓玲. 区域大地水准面精化的理论与方法研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2024.
- [2] 蒋锋, 张东. 基于高程异常拟合的多项式模型参数方案探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(2): 216-218.
- [3] 王科. XGM2019 重力场模型在 GPS 高程拟合中的精度分析[J]. 测绘, 2020, 43(4): 157-160.
- [4] 葛步月, 李瑞芳. 重力场模型在高程异常拟合中的应用[J]. 测绘技术装备, 2021, 23(4): 23-25.
- [5] 王建成, 许宏燕, 袁树才, 等. 基于重力场模型的 GPS 高程拟合精度分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(12): 68-70.
- [6] 李洪杰, 梁永. EGM2008 重力场模型在铁路 GPS 高程转换中的应用[J]. 铁道勘察, 2015, 41(3): 3-5.