

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.010

考虑地球曲率的重力地形改正方法研究

冯凡¹, 郭文波¹, 王宏宇^{1,2}, 王伟¹, 徐毅¹, 朱恩¹, 罗姣¹, 冯治汉^{3,*}

(1. 西安西北有色物化探总队有限公司, 陕西 西安 710068; 2. 中南大学, 湖南 长沙 410083;
3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:以球壳模型重力地形改正计算理论为依据,探索了地平线偏差和未考虑地球曲率的平板模型对重力地改的影响;研究了平板模型重力地改精度与地改内半径、工作区整体海拔和测点间高差的关系。通过理论模型试验和实测资料计算,发现工作区整体海拔和测点间高差对重力地形改正有较大影响,提出使用高分辨率DEM数据计算重力地形改正值时,参考工作区海拔高程和测点间高差,从中区即采用球壳模型计算,并给出了建议参数,可较大程度地提高重力地形改正精度。

关键词:球坐标系;高精度重力测量;平板模型;球壳模型;地改精度

中图分类号:P312.9

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)04-0115-09

Research on Gravity Terrain Correction Method Considering Earth's Curvature

FENG Fan¹, GUO Wenbo¹, WANG Hongyu^{1,2}, WANG Wei¹, XU Yi¹, ZHU En¹,
LUO Jiao¹, FENG Zhihan^{3,*}

(1. Xi'an Northwest Nonferrous Geophysical and Geochemical Exploration Corps Co. Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China;
2. Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Xi'an China Geological Survey
Geological Survey Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the calculation theory of gravity terrain correction of spherical shell model, explored the effect of horizon deviation and flat-plate model not accounting for Earth's curvature on gravitational ground modification, studied the relationship between the accuracy of gravity ground modification of the slab model and the inner radius of the ground modification, the overall altitude of the work area and the height difference between the measuring points. Through the test of the theoretical model and the calculation of the measured data, it is found that the overall altitude of the working area and the height difference between the measuring points have a great impact on the gravity terrain correction. The spherical shell model should be used for calculation, and the suggested parameters are given, which can greatly improve the accuracy of gravity terrain correction.

Keywords: spherical coordinate system; high precision gravimetric measurement; flat model; spherical shell model; terrain correction accuracy

收稿日期:2022-01-26;修回日期:2022-06-17;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:贾晓丹

基金项目:国家重点研发计划课题“北秦岭华阳川地区隐伏铀矿空-地-井协同勘查技术示范研究”(2017YFC0602205)资助。

作者简介:冯凡(1992-),男,助理工程师,主要从事重磁数据处理及方法技术研究。E-mail:759646821@qq.com。

* 通讯作者:冯治汉(1964-),男,教授级高工,长期从事重磁数据处理及综合地质解释工作。E-mail:xafzh@163.com。

山区深部找矿一直是矿产勘查的主要工作领域。随着重力仪精度的不断提高、计算技术和测地技术的实质性进步,以及各项改正方法的不断完善,使得重力测量精度得到大幅度提高,重力勘探的应用领域也得到较大程度的拓展,重力勘探甚至可直接寻找埋深较大、规模较小、干扰背景较强的微弱重力异常矿体(刘根友,1993)。加之重力勘探的低成本、高效率、大深度等优势,使得高精度重力勘探成为未来山区深部矿产勘查的主要手段之一。当前影响山区重力异常精度的主要因素是重力地形改正误差,诸多学者对影响重力地形改正精度的主要因素进行了探讨(李东汉,1984;赵海涛等,2012;杜小平等,2013;张俊等,2014;刘生荣等,2019),认为重力地形改正误差取决于数字高程模型(DEM)对真实地形、地貌的模拟程度,DEM网格距越小、高程精度越高,重力地形改正值的计算误差就越小。

重力地形改正按照近区(0~20 m)、中区(20~2 000 m)、远一区(2~20 km)和远二区(20~166.7 km)(区域重力调查规范,2006;重力调查技术规范,2015)分别进行。近区一般采用野外实测或大比例尺地形 DEM 计算;中区采用 1:1 万~1:5 万 DEM(分辨率 5~25 m)计算;远一区采用 1:5 万(分辨率 25 m)或 1 km×1 km 节点高程数据库计算;远二区采用 5'×5'高程数据库计算。在这些计算中,近区、中区及远一区基于平板模型计算,远二区基于球冠模型计算。但就地球曲率变化的平板模型对重力地形改正的精度影响,重力地形改正误差与测区整体海拔高程、测点间高差等因素的相关性等问题研究未见公开报道。

笔者以平板模型和球壳模型重力地形改正理论为依据,在研究球坐标系坐标重构、椭球体地心距等计算方法的基础上,设计出计算速度快、精度高的球壳扇形块模型重力地形改正计算方法;探索了地平线偏差和平板模型对重力地形改正精度的影响,并对山区重力地形改正精度与改正范围、地形高程、测点高差间关系进行了研究;提出使用高分辨率 DEM 数据计算重力地形改正值时,应考虑工作区整体海拔高程和测点间高差,实现山区高精度重力测量精度的大幅度提高。

为了便于讨论球坐标系下的重力地形改正方法,将传统意义上的重力地形改正称为狭义重力地

形改正;狭义重力地形改正和中间层改正一并考虑时称为广义重力地形改正。

1 重力地形改正基本原理

重力地形改正计算根据计算范围不同采用不同的理论模型公式。由于平板模型改正方法不是本文的研究重点,故采用计算方法简单、计算速度较快、理论模型严谨的平板扇形块模型计算平板模型重力地形改正值,以便与球壳模型对比。这里着重讨论地球曲率的球壳模型重力地形改正计算方法,从不同角度推导出相同的计算广义重力地形改正解析公式(周雪娟等,2008;安玉林等,2010;杜劲松等,2012;张伟等,2015;荣敏等,2015;孙文珂等,2017)。

1.1 球壳扇形块重力影响值计算

假设以球心 O 为坐标原点,计算点 P 位于极轴 OZ 上(图 1),计算点 P 距球面的高差为 z ,球壳扇形块 $M(i, j, k)$ 的范围为经度 $\alpha_i \sim \alpha_{i+1}$ 、余纬度 $\theta_j \sim \theta_{j+1}$,扇形块 M 的底面和顶面高程分别为 h_1 和 h_2 (球面高程),其地形影响值由下列球坐标积分公式(周雪娟等,2008;安玉林等,2010;杜劲松等,2012;杜小平等,2013;张伟等,2015;荣敏等,2015;孙文珂等,2017)表示。

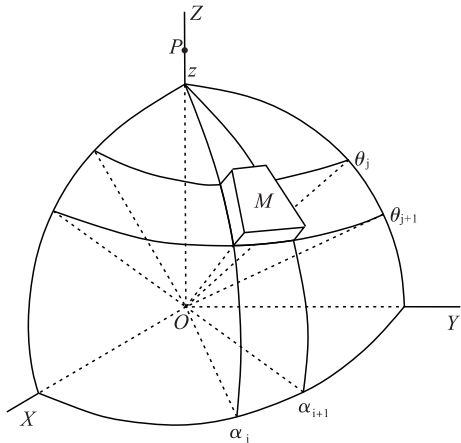


图 1 球壳扇形块模型及参数示意图

Fig. 1 Model and parameter schematic diagram of the crust sector block

$$\Delta g_{i,j} = G\sigma \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} d\alpha \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \frac{[(R+z) - r\cos\theta] \sin\theta d\theta}{[(R+z)^2 + r^2 - 2r(R+z)\cos\theta]^{\frac{3}{2}}} \cdot \quad (1)$$

式中, G 为万有引力常数 $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$; σ 为扇形块的密度, 一般取 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; R 为地球平均半径, 可取 $6\,371\,025 \text{ m}$; 考虑到球壳模型底面是椭球面, 可能与近似大地水准面不重合 ($h_1 \neq 0$), 同时为了表述方便, 令 $r_1 = \frac{R+h_1}{R+z}$,

$$r_2 = \frac{R+h_2}{R+z}。$$

对式(1)积分, 并简化后得到(周雪娟等, 2008):

$$\Delta g_{i,j} = \frac{1}{3} G \sigma (R+z) (\alpha_{i+1} - \alpha_i) E(\theta, r) \Big|_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} \Big|_{r_1}^{r_2} \quad (2)$$

式中, $E(\theta, r) = (2 - r^2 - r \cos \theta - 3 \cos^2 \theta) \sqrt{1+r^2-2r \cos \theta} + 3(\cos \theta - \cos^3 \theta) \ln(r - \cos \theta + \sqrt{1+r^2-2r \cos \theta})$

1.2 球坐标系坐标点重构

式(2)适用于重力测点 P 位于极轴上的特定球坐标系, 地形 DEM 位置也应是该坐标系下的相对坐标。在实际计算中, 需要对重力测点由非极轴旋转至极轴上, 同时对应改正范围内的地形 DEM 点 M (图 2)也要相应地进行旋转。

理论上地球表面上任意点的坐标计算应采用椭球面三角形解算, 但椭球面三角形解算十分困难。考虑近似计算, 当边长小于 200 km 时椭球面三角形可以近似为球面三角形解算, 此时椭球面三角形与球面三角形对应角的差异小于 $0.001''$, 边长的差异小于 1 mm (熊介, 1998; 施一民, 2003), 完全能满足重力地形改正的要求。因此, 采用球面三角公式对地形 DEM 点 M 进行旋转, 将原来的经纬度坐标换算成重力测点 P 位于极轴上的新球坐标系下的经度和余纬度(江丽, 2014)。假设单位球坐标系下有重力测点 $P(\lambda_o, \varphi_o)$ 、地形 DEM 点 $M(\lambda, \varphi)$ (λ 表示纬度, φ 表示经度), 将测点 P 旋转到极轴时地形 DEM 点 M 在新坐标系下对应的位置为经度 α 和余纬度 θ (周雪娟等, 2008; 安玉林等, 2010; 杜劲松等, 2012; 张伟等, 2015), 可理解为测点和地形点的相对位置和高度保持不变, 但具体的经纬度坐标需要重新计算。根据球面三角理论, 过北极点 N 和测点 P 、北极点 N 和地形点 M 、测点 P 和地形点 M 分别构建 3 个大圆, 均过球心 O , 半径均等于球半径, 依据球面三角形正弦定理、角的余弦定理和边的余弦定理可求得(周雪娟等, 2008; 江丽, 2014):

$$\tan \alpha = \frac{\cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_o)}{\sin \varphi \cos \varphi_o - \cos \varphi \sin \varphi_o \cos(\lambda - \lambda_o)} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \sin \varphi \sin \varphi_o + \cos \varphi \cos \varphi_o \cos(\lambda - \lambda_o) \quad (4)$$

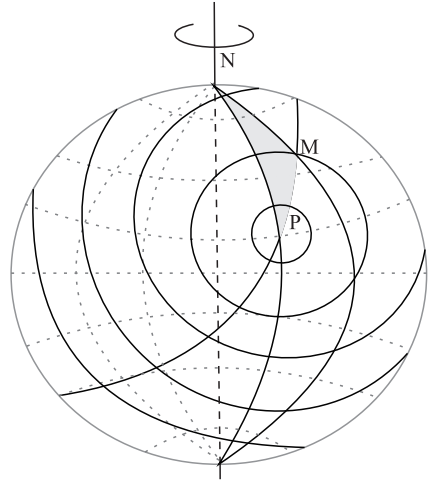


图 2 球面三角形坐标分布示意图

Fig. 2 Distribution schematic diagram of the spherical triangular coordinate

1.3 地形 DEM 数据截取

在实际计算时需要截取测点计算范围内的地形 DEM 数据, 判断地形 DEM 数据所在扇形块的方位和环带。理论上已知椭球面上的点 $P(\lambda_o, \varphi_o)$ 、点 P 至 M 的大地线长度 S 和大地方位 A_{12} , 可通过大地主题正算的方法计算点 M 的坐标 (λ, φ) 和反方位角 A_{21} (施一民, 1998)。但为了计算方便, 提高计算速度, 采用球面大圆上两点的弧长公式迭代计算点 M 的坐标 (λ, φ) (λ 代表纬度, φ 代表经度)。球面上两点的弧长 S 为:

$$S = R \cdot \cos^{-1} [\cos \lambda_o \cos \lambda \cos(\varphi - \varphi_o) + \sin \lambda_o \sin \lambda] \quad (5)$$

式中, R 为计算点的地球近似半径。

1.4 地心坐标和地心距的计算

上述公式推导过程中使用的经度 φ 和纬度 λ 都默认是地心坐标(图 3), 但实际工作中所拥有的测点和地形 DEM 的坐标都是地理坐标, 需要进行坐标换算。2 个坐标系的经度是一致的, 但地理纬度 B 与地心纬度 λ 有换算关系(施一民, 1998)。

$$a^2 \tan \lambda = b^2 \tan B \quad (6)$$

式中, a 为地球长半轴, b 为地球短半轴, 具体可根据使用的参考椭球体确定, 如 WGS-84 坐标系 $a = 6\,378\,137 \text{ m}$, $b = 6\,356\,752.314\,2 \text{ m}$ 。

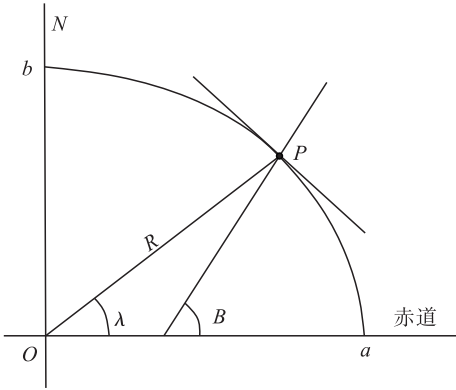


图3 地理纬度与地心纬度关系示意图

Fig. 3 Relationship schematic diagram between geographic latitude and geocentric latitude

地心距 R 相当于地心纬度 λ 处的地球近似半径(图3),采用下列公式计算(施一民,1998):

$$R = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \lambda + b^2 \cos^2 \lambda}} \quad (7)$$

式中各符号意义同式(6)。

1.5 平板模型重力地形改正计算

不考虑地球曲率影响时的重力地形改正计算方法研究较多,均基于平板模型,众多学者提出了不同的理论模型和计算方法,常用的有棱柱体(冯治汉,2007)、扇形块、铅垂物质线(冯治汉,2002)、共点法、梯形法等计算方法。近年来,球函数、快速傅立叶变换等数学手段也已应用到重力地形改正计算中(徐璐平等,2015)。笔者采用相对简单的平板扇形块模型计算重力地形改正值,具体计算方法是:以计算点为圆心制作圆形量板,将其分成若干方位和环带,使测点周围一定范围内的地形起伏由许多扇形柱近似模拟,通过求取各扇形柱的高程,再用下式求取地形改正值(冯治汉,2002):

$$\Delta G = 2\pi G \sigma \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} (R_{m+1} - R_m + \sqrt{R_m^2 - \Delta H_{mn}^2} - \sqrt{R_{m+1}^2 - \Delta H_{mn}^2}) \quad (8)$$

式中: G 为万有引力常数 $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$; σ 为扇形块的密度,一般取 $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; R_m 为第 m 环的内半径, R_{m+1} 为第 m 环的外半径, ΔH_{mn} 为第 m 环第 n 方位扇形块与测点的高差, N_m 为第 m 环方位数, M 为重力地形改正范围划分的环数。

2 球壳模型重力地形改正实现

在实际计算时采用球坐标系下的理论模型和坐标变换公式。因此,测点坐标和数字高程模型位置、网格距等都以经度和纬度表示,单位统一使用十进制度。

2.1 环带划分

在经过坐标重构的新球坐标系中,将计算范围按不同的余纬度增量划分为 $\theta_j \sim \theta_{j+1}$ ($j=0,1,\dots,n$)共 n 环,余纬度 θ_0 距离北极的球面大圆距离为重力地形改正内半径(以圆心角为单位),余纬度 θ_n 距离北极的球面大圆距离为重力地形改正外半径(以圆心角为单位);在保证计算精度的前提下为提高计算速度,余纬度增量从 θ_0 开始逐渐增大;将经度从 0 到 2π 按相同经度差共划分为 m 个方位,即 $\alpha_{i+1} - \alpha_i = \text{常数}$,其中 $i=0,1,\dots,m, \alpha_0=0, \alpha_m=2\pi$ 。

2.2 计算过程

(1)利用式(6)将测点和 DEM 中心位置的地理纬度转换为地心纬度;由式(7)计算测点的地心距,此地心距即为地球的近似半径 R 和球壳扇形块的底面高 $h_1=0$ 。

(2)利用式(3)和式(4)计算测点及其计算范围内 DEM 中点在新球坐标系下的经度 α 和余纬度 θ ,并通过式(5)协助判断地形点所在的球壳扇形块 M 的编号 i 和 j 。

(3)搜索球壳扇形块 $M(i,j)$ 中所有地形 DEM 数据,并将其平均高程定义为球壳扇形块的顶面高程 h_2 。

(4)利用式(2)计算各扇形块的重力影响值。

(5)搜索测点周围计算范围内的所有区域,累加所有扇形块的重力影响值。

3 重力地形改正的范围及误差探讨

本次研究以提高山区高精度重力测量的精度为目的,旨在改善重力地形改正方法和提高重力地形改正精度。因此,从理论模型入手,对平板模型受地平线偏差的影响、平板模型和球冠模型各自的适应范围及其重力地形改正的精度进行探讨。

3.1 地平线偏差及对重力地改的影响

假设重力测点位于 P 点,平板模型的重力地形

改正范围为 r , 过 P 点的地平线和地面(球面)的高程偏差为 DH (图 4), 分别计算厚度 DH 随半径 r 变化的球冠模型和平板模型(图 5)的重力差值 DG , 模拟平板模型因地球曲率变化引起的重力地形改正误差(图 6、表 1)。

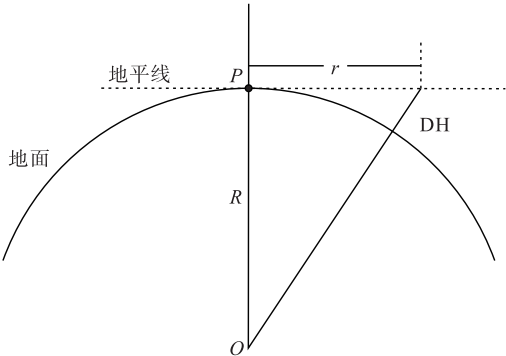


图 4 地平线偏离地面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the horizon off the ground

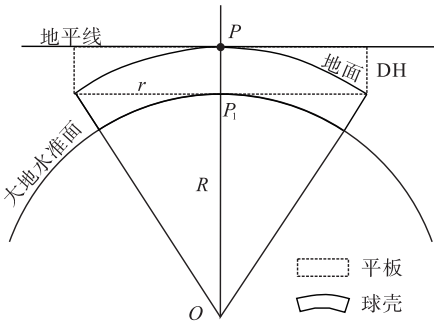


图 5 地平线偏差对应的球冠和平板模型示意图

Fig. 5 Groud crown and flat model schematic diagram of horizon bias

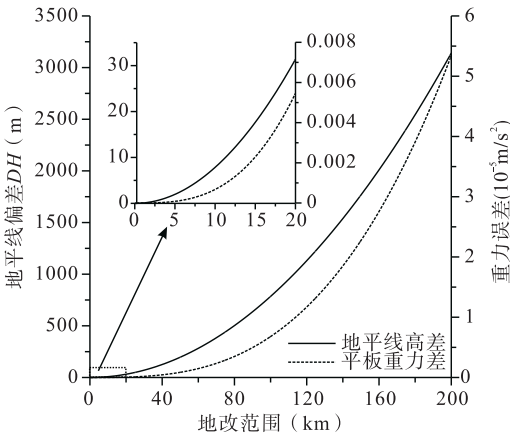


图 6 地平线偏差及其重力值误差曲线图

Fig. 6 Horizon bias and gravity value error curve

表 1 地平线偏差及重力值误差表
Tab. 1 Error table of horizon bias and gravity value

地面距离 (km)	地平线偏差 (m)	模型重力值		平板重 力误差
		球冠	平板	
5	1.962	0.001	0.001	0.000
10	7.848	0.018	0.017	0.001
20	31.392	0.277	0.271	0.005
50	196.206	9.016	8.931	0.086
100	784.884	68.608	67.929	0.679
150	1 766.215	177.679	175.406	2.273
200	3 140.502	332.425	327.083	5.342

注:重力值和误差的单位为 10^{-5} m/s^2 。

由图 6 和表 1 可以看出,在不考虑地球曲率的情况下,地平线和地面(球面)的高程偏差 DH 、球冠模型和平板模型的重力差值 DG 都随重力地形改正范围 r 的增大而增大;当重力地形改正范围为 10 km 时地平线高程偏差就已超过一般地形图的高程误差,但单纯由地平线高程偏差引起的重力地形改正误差不大,如范围 r 为 20 km 时平板模型计算的重力值偏差 DG 仅为 $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,可满足山区高精度重力勘查的要求。

3.2 平板模型重力地改范围确定

1 : 5 万重力调查的中区(20~2 000 m)重力地形改正精度为 $\pm 0.035 \times 10^{-5} \sim \pm 0.150 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、远一区(2~20 km)为 $\pm 0.040 \times 10^{-5} \sim \pm 0.180 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;大比例尺重力勘查的中区(20~500 m)重力地形改正精度为 $\pm 0.012 \times 10^{-5} \sim \pm 0.085 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 、远区(500 m 以远)重力地形改正精度为 $\pm 0.010 \times 10^{-5} \sim \pm 0.075 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。上述重力地形改正范围内的重力地形改正值都采用平板模型计算。影响重力地形改正精度的主要因素是测点坐标和高程误差、数字高程模型的分辨率及其高程误差、重力地形改正选取密度的误差、计算方法舍入误差等。其中,计算方法及其误差已有较多的研究,这里不再赘述。在考虑地球曲率时平板模型引起的计算误差、工作区高程及测点高差变化引起的误差等较少有人研究。笔者以球壳模型为基准,对平板模型随重力地形改正范围变化的计算误差进行探讨。

前面所述,在不考虑工作区测点间的高差变化时,单纯由地球曲率变化引起的重力地形改正误差可忽略(20 km 范围仅 $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$),但在山区开展高精度重力测量时,工作区整体海拔较高、测

点间高差较大,这些都将引起较大的重力地形改正误差,严重时可能影响异常形态。假设重力测点位于地面、海拔高程为 DH (图 5),使用高度为 DH 的球壳模型和平板模型分别计算不同地改范围 r 对应的重力值和重力差值 DG (图 7、表 2),模拟不同海拔高程的重力点采用不同地改范围时的重力地形改正值受地球曲率变化的影响。

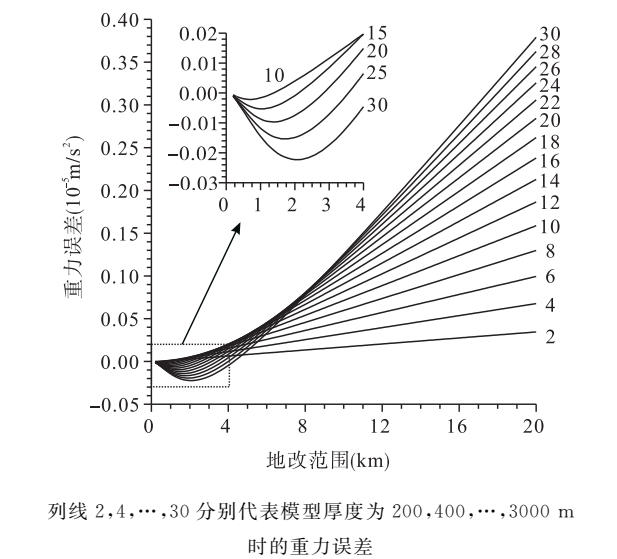


图 7 不同厚度平板模型重力误差列线图
Fig. 7 Gravity error nomogram of plate model with different thickness

表 2 不同厚度平板模型计算的地改误差表
Tab. 2 Error table of terrain correction for calculation of plate models with different thicknesses

地改范围 (km)	模型厚度(m)								
	200	400	600	800	1000	1500	2000	2500	3000
1	1.2	1.4	0.8	0.3	1.6	5.3	8.7	11.8	14.5
2	2.9	4.6	5.3	5.0	4.0	0.9	7.5	14.9	22.3
5	8.2	15.0	20.6	24.9	28.2	31.7	29.6	23.1	12.9
10	17.0	32.6	46.8	59.7	71.3	95.1	111.7	121.6	125.5
15	25.7	50.1	73.1	94.7	115.0	160.1	197.5	227.6	250.6
20	34.5	67.7	99.4	129.8	158.8	225.6	284.3	335.4	379.0

注:地改误差的单位为 10^{-5} m/s^2 。

显然,平板模型计算的重力地形改正误差与改正范围、模型厚度相关,随着改正范围和模型厚度的增大,重力地形改正误差急剧增大(图 7、图 8、表 2)。当测点高程 DH 为 1 000 m、重力地形改正范围 r 为 2 km 时,平板模型的计算误差 DG 为 $0.004 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;当 r 为 20 km 时,单纯由地球曲率变

化引起的误差 DG 可达 $0.1588 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,再加上数字高程模型和测点坐标、测点高程等误差,已不满足 1:5 万重力调查规范要求(荣敏等,2015)。如果工作区测点最低海拔为 1 000 m、最高海拔为 2 000 m,当改正范围为 10 km 时,平板模型计算的重力地形改正误差 DG 分别为 $0.0713 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 和 $0.1117 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,测点本身的重力地形改正计算误差已接近规范要求,测点间的改正误差也达到了 $0.0404 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,可影响到异常形态的变化。

山区高精度重力测量平板模型在地形改正范围取 20 km 时,将造成较大的计算误差,应根据工作区的测点最小和最大海拔参考图 7 和表 2 给出的推荐值,具体确定平板模型的重力地形改正计算范围。为了尽量减小重力地形改正计算误差,建议平板模型的最大改正范围小于 2 km。

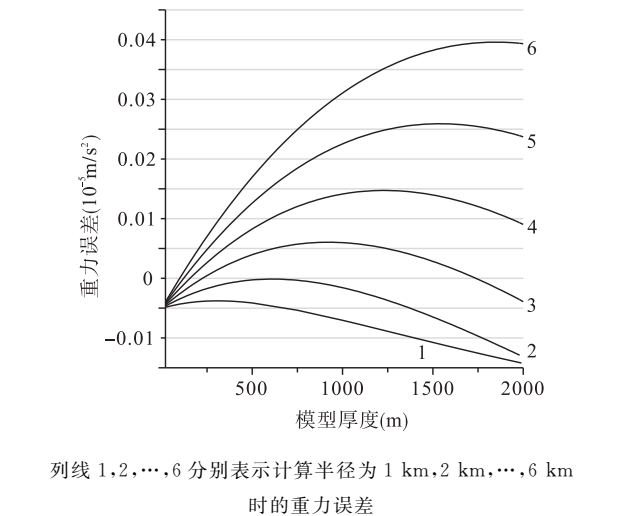


图 8 不同半径平板模型重力误差列线图
Fig. 8 Gravity error nomogram of plate models with different radius

4 实测资料计算

为了验证上述平板模型和球冠模型计算范围及重力地形改正精度,选择陕西秦岭某地面积约 500 km^2 范围的 1:5 万重力实测数据进行试算。工作区北部有华山,西北部有少华山,中部有老牛山等高山,地貌山高坡陡、谷地深邃狭窄、石峰林立、山势峥嵘;工作区平均坡度约 37.6° ,最大达 84° ,为典型的高山地貌景观。测点海拔最高 2 383 m、最低 463 m,测点最大高差达 1 920 m。

使用 1 : 1 万数字高程模型(分辨率 5 m)同时计算所有测点的平板模型和球壳模型广义重力地形改正值,计算范围为中区和远一区(20~20 000 m),划分计算环带为 20~100~200~500~1 000~2 000~5 000~10 000~20 000 m,改正基准面高程为 0,地改密度为 $2.67\times10^3\text{ kg/m}^3$ 。将相同范围平板模型和球壳模型重力地形改正值之差(图 9)作为平板模型未考虑地球曲率影响的计算误差,借以确定平板模型的重力地形改正范围。

由图 9 可以看出,随着地改范围的不断扩大,未考虑地球曲率的平板模型引起的重力地形改正误差也相应变大。地改范围为 20~1 000 m 的 4 个环带中(图 9,1~4)计算的重力地形改正差值最大达

$0.006\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,平均为 $0.001\,3\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,说明地改范围为 20~1 000 m 时该区地球曲率引起的重力地形改正误差小于 $\pm0.006\times10^{-5}\text{ m/s}^2$;地改范围为 1~2 km(图 9,5)时平板模型计算的地形改正差值最大为 $0.024\,5\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,平均为 $0.010\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,剔除异常值后最大为 $0.016\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,平均为 $0.010\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,说明 1~2 km 范围该区未考虑地球曲率引起的计算误差小于 $\pm0.010\times10^{-5}\text{ m/s}^2$;地改范围为 10~20 km(图 9,8)时平板模型计算的重力地形改正差值最大为 $0.132\,2\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,平均为 $0.114\,6\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,说明在地改范围为 10~20 km 使用平板模型进行重力地形改正时地球曲率引起的计算误差可达到 $\pm0.115\times10^{-5}\text{ m/s}^2$ 。如果从 20 m 开始累积计算误差,则可以肯定平板模型计算的重力地形改正更大。

综上所述,试验区高精度重力测量平板模型地形改正范围不应超过 1 km,此时未考虑地球曲率引起的计算误差小于 $\pm0.006\times10^{-5}\text{ m/s}^2$,从 1 km 起应使用球壳模型计算重力地形改正。

以上述计算结果为重力地形改正值,编制最大地形改正半径为 20 km,分别使用平板模型(图 10a)和球壳模型(图 10b)进行地形改正获得布格重力异常图(图 10)。可以看出,球壳模型计算重力地形改正值的布格异常等值线相对于平板模型计算重力地形改正值的布格异常等值线平滑程度更好,不合理等值线扭曲较少,反映出更多的异常细节,更加合理地表达了试验区的地质特征,说明采用球壳模型计算重力地形改正具有更高精度。

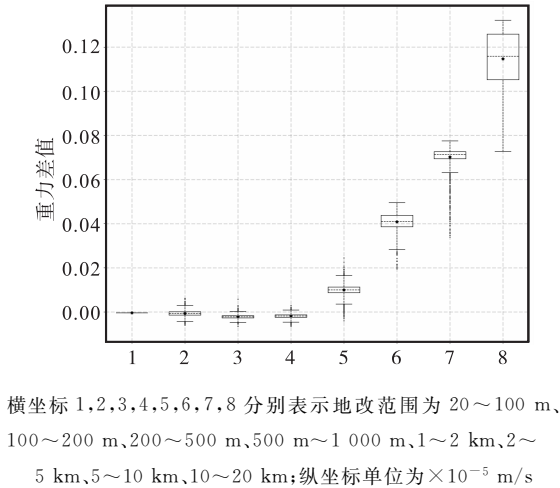


图 9 不同地改范围平板模型误差分布箱型图

Fig. 9 Error distribution boxplot of flat model with different terrain correction range

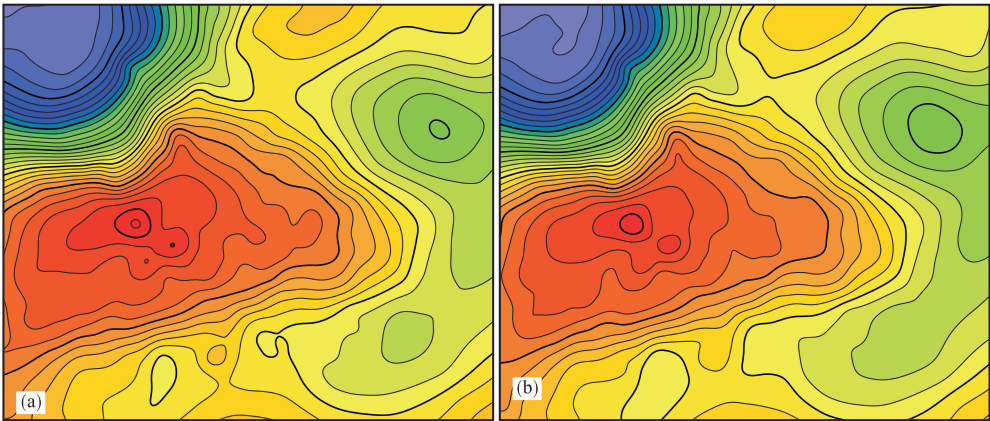


图 10 (a)地改用平板模型和(b)球壳模型的布格重力异常对比图

Fig. 10 (a)Bouguer gravity anomaly of flat model and (b)spherical shell model for terrain correction

5 结论

(1) 基于球壳模型重力场计算理论, 梳理了球壳扇形块重力地形改正及相关配套计算公式, 设计了计算过程, 实现采用球壳模型计算任意范围、任意分辨率 DEM 的重力地形改正。

(2) 随着重力地形改正范围的增大, 地平线高程偏差也在不断增大, 但单纯由地平线偏差引起的重力地形改正误差不大, 即在测区地形平坦、测点间高差不大的情况下, 地球曲率对重力地形改正误差影响不大。

(3) 工作区整体海拔和测点间高差对重力地形改正有较大的影响, 在山区开展高精度重力测量时, 根据给出的计算建议范围, 用平板模型计算重力地形改正的建议最大半径 ≤ 2 km。该结论与现行规范规定(20 km)存在较大差异, 技术工作者应加以注意, 并期待同行的进一步研究。

致谢: 在撰写过程中参考了发明专利“考虑地球曲率的高精度 DEM 航空重力远区地形改正方法”(专利号 ZL 201910746283.7)的部分成果, 感谢专利权人中国地质调查局西安地质调查中心及发明人冯治汉、郭培红、熊盛青; 同时感谢国家重点研发计划课题“北秦岭华阳川地区隐伏铀矿空-地-井协同勘查技术示范研究”(2017YFC0602205)提供的测试数据及所有成员的大力支持。感谢审稿老师提出的宝贵意见。

参考文献(References):

刘根友. 微重力测量地形改正的精度及其实现[J]. 物探化探计算技术, 1993, 15(1): 60-63.

LIU Genyou. Accuracy of topographic correction in micro-gravity survey and its realization[J]. Computing Techniques For Geophysical And Geochemical Exploration, 1993, 15(1): 60-63.

李东汉. 试论区域重力测量远区地改的精度[J]. 物探与化探, 1984, 8(2): 99-104.

LI Donghan. A discussion on the accuracy of far sector topographic correction in regional gravity survey[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1984, 8(2): 99-104.

张俊, 张宝松, 邸兵叶, 等. 高程数据网格间距对重力中区地形

改正精度的影响[J]. 物探与化探, 2014, 38(1): 157-161.

ZHANG Jun, ZHANG Baosong, DI Bingye, et al. The effect of then grid spacing of elevation on the accuracy of median region terrain correction of gravity[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2014, 38(1): 157-161.

刘生荣, 高鹏, 耿涛, 等. 不同源 DEM 数据在高山区重力中区地形改正中的适用性[J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1111-1118.

LIU Shengrong, GAO Peng, GENG Tao, et al. The applicability of different sources DEM data in median region terrain correction of gravity in high mountain areas[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1111-1118.

赵海涛, 张兵, 左正立, 等. 中国及周边区域 ASTER GDEM 与 SRTM DEM 高程对比分析及互补修复[J]. 测绘科学, 2012, 37(1): 8-11.

ZHAO Haitao, ZHANG Bing, ZUO Zhengli, et al. Elevation comparison and complementary repair of ASTER GDEM and SRTM DEM in China and surrounding areas[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 8-11.

杜小平, 郭华东, 范湘涛, 等. 基于 ICE Sat/GLAS 数据的中国典型区域 SRTM 与 ASTER GDEM 高程精度评价[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(4): 887-897.

DU Xiaoping, GUO Huadong, FAN Xiangtao, et al. Vertical accuracy assesment of SRTM and ASTER GDEM over typical regions of china using ice sat/GLAA[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(4): 887-897.

DZ/T0082-2006. 区域重力调查规范[S]. 中华人民共和国国土资源部, 2006.

DZ/T0082-2006. The standard for regional gravity survey [S]. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2006.

DZ/T0004-2015. 重力调查技术规范(1:50000)[S]. 中华人民共和国国土资源部, 2015.

DZ/T0004-2015. The technical specification for gravity survey(1:50000) [S]. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2015.

张伟, 廖国忠, 张秋冬, 等. 球坐标系下基于全球 DEM 数据的重力远二区高精度地改算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(4): 632-635.

ZHANG Wei, LIAO Guozhong, ZHANG Qiudong, et al. High Accuracy algorithm of calculating far zone II's terrain correction based on global DEM data in spherical coodinate system[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(4): 632-635.

- 杜劲松,陈超,梁青,等.球壳体积分的重力异常正演方法及其与 Tesseroid 单元体泰勒级数展开方法的比较[J].测绘学报,2012,41(3):339-346.
- DU Jinsong, CHEN Chao, LIANG Qing, et al. Gravity anomaly calculation based on volume integral in spherical cap and comparison with the Tesseroid-taylor series expansion approach[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 339-346.
- 安玉林,张明华,黄金明,等.纯球坐标系内各项重力校正值计算方案和计算过程[J].物探与化探,2010,34(6):697-705.
- AN Yulin, ZHANG Minghua, HUANG Jinming, et al. The Computation Scheme and Computation Process for Gravity Correction Values within the Pure Spherical Coordinate System[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(6): 697-705.
- 周雪娟,褚善东.球面三角形公式及其应用[J].浙江国际海运职业技术学院学报,2008,4(1):59-62.
- ZHOU Xuejuan, CHU Shandong. Formula of spherical triangle and its application[J]. Journal of Zhejiang International Maritime College, 2008, 4(1): 59-62.
- 荣敏,周巍.球近似地形改正的研究分析[J].大地测量与地球动力学,2015,35(1):58-61.
- RONG Min, ZHOU Wei. Study on topography correction based on spherical approximation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(1): 58-61.
- 孙文珂,乔计花,许德树,等.重力勘查资料解释手册[M].北京:地质出版社,2017:23-24.
- SUN Wenke, QIAO Jihua, XU Shude, et al. Interpretation Manual of Gravity Exploration Data[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 23-24.
- 施一民.现代大地控制测量[M].北京:测绘出版社,2003.
- SHI Yimin. Modern Geodetic Control Survey[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2003.
- 熊介.椭圆大地测量学[M].北京:解放军出版社,1998.
- XIONG Jie. Ellipsoidal Geodesy[M]. Beijing: PLA Publishing House, 1998.
- 江丽.球坐标系下基于扇形柱体的地形改正研究与实现[D].北京:中国地质大学(北京).
- JIANG Li. Research and implementation of terrain correction using sector cylinder models in spherical coordinate[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).
- 数学手册编写组.《数学手册》[M].北京:高等教育出版社,1997年.
- Mathematics Handbook Writing Group. Mathematical Handbook[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997.
- 冯治汉.区域重力调查中的中区地形改正方法及精度[J].物探与化探,2007,31(5):455-458.
- FENG Zhihan. A tentative discussion on the median region gravity terrain correction method in regional gravity survey[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(5): 455-458.
- 冯治汉.重力中区地形改正系统的研制[J].物探与化探,2002,26(6):467-469.
- FENG Zhihan. The development of the gravity intermediate area topographic correction system[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2002, 26(6): 467-469.
- 徐璐平,张贵宾,李皎皎,等.航空重力地改最大半径的研究及地改快速计算方法比较[J].物探与化探,2015,39(S1):113-118.
- XU Luping, ZHANG Guibin, LI Jiaojiao, et al. A study of the maximum radius in the terrain correction calculation of airborne gravity and a comparison of various calculation methods[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2015, 39(S1): 113-118.
- DZ/T0171-2017.大比例尺重力勘查规范[S].中华人民共和国国土资源部,2017.
- DZ/T0171-2017. Specification for Large-Scale Gravity Survey[S]. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2017.
- 田庆水,王孟霞,郑燕.太要断裂东段覆盖区地球物理特征及推断解释[J].西北地质,2019,52(03):253-264.
- TIAN Qingshui, WANG Mengxia, ZHENG Yan. Geophysical characteristics of loess-covered area in the eastern segment of Taiyao fault, Xiaolinling Mountains [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(03): 253-264.