

引文格式:章传银,马旭,章磊,等.基于 GNSS 水准和重力场误差特性的大地水准面精度评估方法[J].测绘学报,2021,50(1):12-17.
DOI:10.11947/j.AGCS.2021.20200211.
ZHANG Chuanyin, MA Xu, ZHANG Lei, et al. Accuracy assessment method of geoid based on GNSS-leveling and gravity field error characteristics[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 12-17. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200211.

基于 GNSS 水准和重力场误差特性的大地水准面精度评估方法

章传银¹, 马旭², 章磊², 丁剑¹

1. 中国测绘科学研究院, 北京 100036; 2. 国家测绘产品质量检验检测中心, 北京 100036

Accuracy assessment method of geoid based on GNSS-leveling and gravity field error characteristics

ZHANG Chuanyin¹, MA Xu², ZHANG Lei², DING Jian¹

1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China; 2. National Quality Inspection and Testing Center for Surveying and Mapping Products, Beijing 100036, China

Abstract: The lack of an effective accuracy assessment method of geoid is a key problem in the modernization of height datum and its application. In this paper, according to the error characteristics of GNSS-leveling height anomaly and gravity field in frequency domain, the technical requirements for the fusion of GNSS-leveling and gravity height anomaly are studied. Furthermore, a method of error expression and accuracy evaluation of geoid is proposed. Through the example test and analysis, the main conclusions are as follows: ①The accuracy of the fused height anomaly should be expressed by the error curve of height anomaly difference varying with the distance. ②For accuracy assessment of quasigeoid, two error indicators and two error curves are recommended, namely, the error of gravity height anomaly difference, the internal error of the fused height anomaly, the error curve of the fused height anomaly difference and the error curve of GNSS-leveling height anomaly difference. ③When the distance between two terrestrial points is close to or less than the average distance between GNSS leveling points, GNSS-leveling height anomaly plays a major role in the contribution of the fused height anomaly. ④The accuracy of the fused height anomaly in large scale is mainly controlled by gravity height anomaly.

Key words: GNSS leveling; terrestrial height anomaly; error characteristics; accuracy assessment

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB0505700)

摘 要: 缺乏有效的大地水准面成果精度评估方法, 是高程基准现代化及其成果应用面临的关键问题。本文基于 GNSS 水准高程异常与重力场频域误差特性, 研究 GNSS 水准与重力地面高程异常融合的技术要求, 进而提出一种大地水准面成果的误差表达与精度评估方法。经示例测试分析, 得出主要结论如下: ①实用地面高程异常(即融合后的似大地水准面)精度, 应采用随距离非线性变化的高程异常差误差曲线表达; ②似大地水准面的精度评估, 推荐采用两项误差指标和两条误差曲线共 4 个要素完整表达, 即重力地面高程异常差误差、实用地面高程异常内部误差、实用地面高程异常差误差曲线与 GNSS 水准高程异常差误差曲线; ③当两个 GNSS 水准点间距离接近或小于所有 GNSS 水准点平均间距时, GNSS 水准高程异常对实用地面高程异常的贡献起主要作用; ④较大空间尺度的实用地面高程异常精度主要依靠重力地面高程异常控制。

关键词: GNSS 水准; 地面高程异常; 误差特性; 精度评估

中图分类号: P223

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2021)01-0012-06

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0505700)

目前, 大地水准面精度评估普遍采用实测 GNSS 水准数据, 主要方法可归纳为两类: 一类通

过统计 GNSS 水准高程异常与重力地面高程异常之间的差异,来评价重力大地水准面成果的质量^[1-6];另一类是所谓的 GNSS 水准外部检核方法,以未参与融合或外业实测的 GNSS 水准点为检核点,通过比较检核点实测高程异常与融合后的地面高程异常之间差异,来评估大地水准面成果的精度^[7-8]。

先来分析第一类评估方法的合理性。重力地面高程异常,按全球积分确定或精化,中长波精度高,短波超短波精度低。GNSS 水准点的正常高,按水准方法传递,误差沿水准路线累积,导致 GNSS 水准高程异常的中长波误差大。显然,中长波误差大的 GNSS 水准高程异常,无法有效评估中长波精度高的重力地面高程异常。

再分析 GNSS 水准外部检核方法的有效性。由于检核点正常高无可避免地要以参与融合的 GNSS 水准点起算(或误差强相关),因此,检核点高程异常与融合后的地面高程异常之差,只是检核点与其距离最近 GNSS 水准点之间的高程异常差,所得精度指标,显然不能代表实用地面高程异常精度。本文将采用距离等于 GNSS 水准点平均间距的两点实用高程异常差的标准差(简称实用地面高程异常内部误差)来表达这种精度。

可见,已有方法难以有效评价大地水准面的精度,这已成为高程基准现代化及其成果应用面临的关键问题^[6]。本文基于 GNSS 水准高程异常与重力场频域误差特性,分析 GNSS 水准与重力地面高程异常融合的技术要求,研究大地水准面成果的误差表达与精度评估方法。

1 GNSS 水准与重力地面高程异常误差特性及其融合要求

区域似大地水准面精化计算一般分两步进行^[1,5]:第 1 步,由重力场数据,按边值问题解的积分方法,精化重力地面高程异常;第 2 步,将 GNSS 水准高程异常与重力地面高程异常融合,生成实际应用的实用地面高程异常(简称实用地面高程异常)。

1.1 GNSS 水准与重力地面高程异常的频域误差特性

GNSS 水准点的正常高,按水准高差逐站传递方法测定。由于水准视线直接置于当地水准面中,因而距离较近的两点间正常高差一般具有很高的精度。但是,水准传递误差沿路线累积,势必

导致长距离两点间的正常高差误差较大。忽略 GNSS 大地高差误差,两点间 GNSS 水准高程异常差的精度一般随两点间距离的增大而降低。这表明,短距离两点间 GNSS 水准高程异常差的精度高,长距离的误差大。

重力地面高程异常,是地球重力场外部边值问题解,由重力数据经全球积分间接确定或精化,中长波精度高、短波超短波误差大,即空间尺度越小,相对误差越大。在局部地区一般表现为两点间重力地面高程异常差的误差不随距离增大而出现明显变化。

1.2 GNSS 水准与重力地面高程异常融合的技术要求

由上述 GNSS 水准与重力地面高程异常的频域误差特性,不难理解,有效合理的 GNSS 水准与重力地面高程异常融合方法应满足如下技术要求:

(1) 融合算法能有效整合重力地面高程异常的高精度中长波成分与实测 GNSS 水准高程异常高精度短波成分。

(2) 实测 GNSS 水准高程异常的贡献,随空间距离增大逐渐减弱;重力地面高程异常的贡献,不随空间距离增大发生明显变化。

(3) 在误差处理方面,能同时有效抑制短波重力地面高程异常误差,控制长距离实测 GNSS 水准高程异常误差的累积。

已有的大地水准面精度评估和 GNSS 水准融合方法,还未能顾及 GNSS 水准和重力地面高程异常误差在频域上的互补性质及融合的技术要求。关于 GNSS 水准与重力地面高程异常有效融合算法研究,已超出本文的讨论范畴。

2 似大地水准面成果的误差估计与精度评估方法

2.1 似大地水准面成果的误差估计方法

为有效利用 GNSS 水准和重力地面高程异常误差在频域中的性质,需要采用统计分析技术,构造似大地水准面成果误差估计的一般方法^[8-9]。

对于相距 L 的两个 GNSS 水准点,令两点间 GNSS 水准高程异常差为 $\Delta\zeta_{\text{GNSS}_i}$,误差为 σ_{GNSS_i} ,重力地面高程异常差为 $\Delta\zeta_{\text{Grav}}$,误差为 σ_{Grav} ;GNSS 水准残差高程异常差(即 GNSS 水准高程异常差与重力地面高程异常差之差) $d = \Delta\zeta_{\text{GNSS}_i} - \Delta\zeta_{\text{Grav}}$,误差为 σ_d 。文中的误差一般用 1 倍标准

差(RMS)表示,下同。按误差传播定律有

$$\sigma_d^2 = \sigma_{\text{GNSS}_i}^2 + \sigma_{\text{Grav}}^2 \quad (1)$$

依据两点间 GNSS 水准高程异常差的误差随距离增加而增大的一般特点,可知 σ_{GNSS_i} 是随距离 L 递增的非负函数,即 $\sigma_{\text{GNSS}_i} = \Psi(L) \geq 0$ 。两点间 GNSS 水准高程异常差的误差由两项构成,即 GNSS 基线大地高差误差和水准路线正常高差误差。其中,GNSS 基线大地高差的误差为 $\sigma_{\Delta H} = \sqrt{a^2 + b^2 L^2}$,令正常高差误差 $\sigma_{\Delta h} = \sigma L$ 或 $\sigma_{\Delta h} = \sigma L^x$,则 GNSS 水准高程异常差的误差可表示为

$$\sigma_{\text{GNSS}_i} = \Psi(L) = \sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \sigma^2 L^2} \geq 0 \quad (2)$$

式中, a 为 GNSS 基线大地高差的固定误差, b 为比例误差系数,由 GNSS 定位结果给出,视为已知量; σ 为每千米正常高差的误差,为待估参数; L 以千米为单位。

这里的每千米正常高差误差 σ ,与两地面点的距离相乘,用于表示两点间正常高差的误差;而水准网中的每千米水准高差中误差,用于描述沿水准路线长度累积的水准高差误差。两者有些差别。

将式(2)代入式(1),则 GNSS 水准残差高程异常差误差满足

$$\sigma_d^2 = a^2 + b^2 L^2 + \sigma^2 L^2 + \sigma_{\text{Grav}}^2 \quad (3)$$

按照两点间重力地面高程异常差的误差不随距离明显变化的一般特点,对于选定的成果区域, σ_{Grav} 可视为待估计的常数。

设成果区域内有 n 个 GNSS 水准点,两两组合构成 $N = C_n^2 = n(n-1)/2$ 条边,计算每条边的 GNSS 水准残差高程异常差 $d^k (k=1,2,\dots,N)$ 。将全部 $\{d^k\}$ 按边长大小排序,再大致等分成 $M (5 \leq M < n)$ 组。

令 $\bar{L}_i (i=1,2,\dots,M)$ 为第 i 组的平均边长, σ_i 为第 i 组 $\{d^k\}_i$ 的标准差,代入式(3),得到由 M 个非线性方程构成的方程组

$$\sigma_i^2 = a^2 + b^2 \bar{L}_i^2 + \sigma^2 \bar{L}_i^2 + \sigma_{\text{Grav}}^2 \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (4)$$

利用 M 个标准差 σ_i 及对应的平均边长 \bar{L}_i ,以 $\sigma^2, \sigma_{\text{Grav}}^2$ 为未知参数, ($\sigma^2 > 0, \sigma_{\text{Grav}}^2 > 0$) 为约束条件,按约束最小二乘法,确定每千米正常高差误差估值 $\hat{\sigma}$ 和重力地面高程异常差误差估值 $\hat{\sigma}_{\text{Grav}}$ 。

当 GNSS 水准融合算法满足 1.2 节技术要求时,则区域范围内,间距为 L 的任意两点间实用

地面高程异常差的误差估值 $\hat{\sigma}_L$,可按加权方法计算,从而得到实用地面高程异常差误差估值 $\hat{\sigma}_L$ 随两点间距离 L 变化的通用公式

$$\hat{\sigma}_L = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2 + \hat{\sigma}_{\text{Grav}}^2}} \hat{\sigma}_{\text{Grav}} \quad (5)$$

2.2 似大地水准面成果误差估计算法的性能

由 GNSS 水准和重力地面高程异常误差频域特性可知,当两点间距离足够大时,GNSS 水准高程异常差的误差远大于重力地面高程异常差的误差,此时式(5)中 $\sigma_{\text{GNSS}_i} = \sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2} \gg \hat{\sigma}_{\text{Grav}}$,实用地面高程异常差误差估值 $\hat{\sigma}_L$ 近似为

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_L &= \frac{\sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2 + \hat{\sigma}_{\text{Grav}}^2}} \hat{\sigma}_{\text{Grav}} \approx \\ & \frac{\sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 L^2 + \hat{\sigma}^2 L^2}} \hat{\sigma}_{\text{Grav}} = \hat{\sigma}_{\text{Grav}} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知,实用地面高程异常差的精度,不低于重力地面高程异常差的精度,即 $\hat{\sigma}_L \leq \hat{\sigma}_{\text{Grav}}$ 。进一步分析可知,短距离实用高程异常差的精度,也不低于 GNSS 水准高程异常差的精度。

可见,按式(5)评估似大地水准面精度,能有效体现经 GNSS 水准融合后的实用地面高程异常误差特性,即中长波精度依靠重力地面高程异常控制,短波精度用实测 GNSS 水准高程异常改善。

由于水准测量误差随线路长度累积而增大,因此科学合理的水准网精度评估,一般用每千米水准路线高差中误差表示,而不用水准点高程误差表示。同理,式(5)指出,两点间实用地面高程异常差的误差 $\hat{\sigma}_L$ 是其距离 L 的非线性递增函数,可见,区域似大地水准面成果精度评估,采用随距离非线性变化的实用地面高程异常差误差曲线表达,显然要比用地面高程异常误差表示,更为科学准确。

若确需延续当前的习惯,可将 GNSS 水准点的平均间距 \bar{D} ,代入式(5),计算距离等于 GNSS 水准点平均间距的两点间实用高程异常差的误差 Θ ,用于表达实用地面高程异常的内部误差。这项误差指标一般远小于 GNSS 水准残差高程异常的标准差。

2.3 似大地水准面成果精度评估流程

按上述方法进行似大地水准面成果精度评估的一般计算流程如下:

(1) 设 GNSS 水准点总数为 n , 分别将其实测 GNSS 水准高程异常减去重力地面高程异常, 得到 n 个 GNSS 水准残差高程异常, 进行统计分析。

(2) 将全部 n 个 GNSS 水准点进行两两组合, 构成 $N=C_n^2=n(n-1)/2$ 条边, 计算每条边的长度和 GNSS 水准残差高程异常差。

(3) 将 N 条边按长度递增排序, 并将其大致等分成 $M(5 \leq M < n)$ 组, 统计每组的平均长度 \bar{L}_i 和 GNSS 水准残差高程异常差的标准差 σ_i 。

(4) 以式(4)为数学模型, σ^2 、 σ_{Grav}^2 为未知参数, ($\sigma^2 > 0$, $\sigma_{\text{Grav}}^2 > 0$) 为约束条件, 按约束最小二乘法, 估计 $\hat{\sigma}$ 和 $\hat{\sigma}_{\text{Grav}}$ 。

(5) 将 $\hat{\sigma}$ 代入式(2), 就是 GNSS 水准高程异常差的误差估计算法; 将 $\hat{\sigma}$ 和 $\hat{\sigma}_{\text{Grav}}$ 代入式(5), 就是实用地面高程异常差的误差估计算法。

(6) 将区域 GNSS 水准点的平均间距 $L = \bar{D}$ 代入式(5), 计算实用地面高程异常内部误差 Θ 。

2.4 区域似大地水准面成果的精度表达

本文重点推荐, 区域似大地水准面成果的精度评估, 用如下两项误差指标和两条误差曲线完整表达:

(1) 误差指标 1: 重力地面高程异常差误差 $\hat{\sigma}_{\text{Grav}}$ 。此误差指标一般会明显大于 GNSS 水准残差高程异常的标准差。

(2) 误差指标 2: 实用地面高程异常内部误差 Θ 。此误差指标可代替当前 GNSS 水准外部检核方法得到的标准差, 两者性质相似。

(3) 误差曲线 1: 按式(5)计算, 以两点间距离 L 为自变量的实用地面高程异常差误差曲线。

(4) 误差曲线 2: 按式(2)计算, 以两点间距离 L 为自变量的 GNSS 水准高程异常差误差曲线。

3 似大地水准面精度评估示例及分析

以某地区似大地水准面成果为例, 计算似大地水准面成果的误差指标, 绘制误差曲线, 评价似大地水准面成果的精度。

本例中, 参与计算的 GNSS 水准点 $n=104$ 个, GNSS 水准点平均间距约 $\bar{D}=24$ km, 104 个 GNSS 水准点两两组合形成 $N=5356$ 条边, 按距离递增排列后, 分成 $M=90$ 组, 每组有 60 条或 59 条边。

计算 104 个 GNSS 水准残差高程异常值和

5356 条边 GNSS 水准残差高程异常差值, 进行统计分析, 结果见表 1。

表 1 GNSS 水准残差高程异常(差)

项目	标准差	平均值	最小值	最大值	统计数量
GNSS 水准残差高程异常	3.83	-12.282	-18.56	-2.26	104
GNSS 水准残差高程异常差	5.43	-0.252	-15.31	16.0	5356

根据 GNSS 定位结果, 取 $a=1.5$ cm, $b=0.02$ cm/km, 按 2.3 节流程, 计算得到每千米正常高差误差估值 $\hat{\sigma}=0.0307$ cm/km, 重力地面高程异常差的误差估值 $\hat{\sigma}_{\text{Grav}}=4.159$ cm。将这两项误差指标代入式(5), 得到以两点间距离 L 为自变量的实用地面高程异常差误差曲线算法表达式

$$\hat{\sigma}_L = \frac{\sqrt{2.25+0.0049425L^2}}{\sqrt{2.25+0.0049425L^2+17.297}} \times 4.159 \quad (7)$$

将误差指标 $\hat{\sigma}$ 代入式(2), 得到以两点间距离 L 为自变量的 GNSS 水准高程异常差误差曲线算法表达式

$$\hat{\sigma}_{\text{GNSS}_L} = \sqrt{2.25+0.0049425L^2} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中, L 单位为 km; $\hat{\sigma}_L$ 、 $\hat{\sigma}_{\text{GNSS}_L}$ 单位为 cm。

将区域内 GNSS 水准点平均间距约 $\bar{D}=24$ km, 代入式(7), 求得实用地面高程异常内部误差 $\Theta=1.6045$ cm。

利用上面估计的两项误差指标和给出的算法公式, 绘制该区域大地水准面成果的 3 项误差曲线, 如图 1 所示。由图 1 可直观地得出以下结论:

(1) 实用地面高程异常差误差(实线), 既不大于重力地面高程异常差误差, 也不大于 GNSS 水准高程异常差误差。实用地面高程异常差的误差曲线总是在其余两个误差曲线的下方。

(2) 在距离 $L^*=105.8$ km 处, GNSS 水准高程异常和重力地面高程异常, 对实用地面高程异常的精度贡献相当。小于 L^* 时, GNSS 水准高程异常的贡献大, 大于 L^* 时, 重力地面高程异常的贡献大。

(3) 实用高程异常差误差曲线的斜率, 随距离增大而减小, 且不大于 GNSS 水准高程异常差误差曲线的斜率。当斜率接近零时, 实用地面高

程异常差的误差逼近重力地面高程异常差的误差。

(4) 当距离 L 接近或小于 GNSS 水准点平

均间距 $\bar{D} = 24$ km 时, GNSS 水准高程异常差对实用地面高程异常差的贡献起主导控制作用。

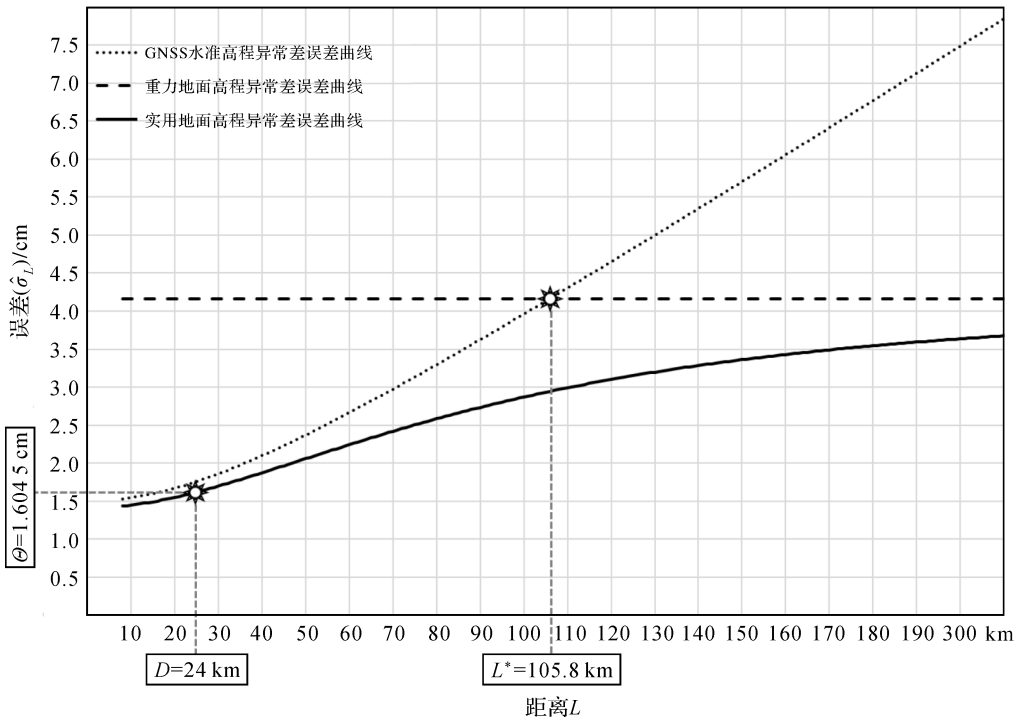


图1 某区域似大地水准面成果的3项误差曲线对比

Fig.1 Three kinds of error curves of quasigeoid results

值得注意的是,受实际 GNSS 水准点数量和空间分布限制,当距离远小于 GNSS 水准点平均间距 $L \ll \bar{D}$ 时,对应的实用地面高程异常差的误差估值结果不可靠。本例中,当 $L < 10$ km 时,实用地面高程异常差误差的可靠性会显著降低。

为方便实际应用,可将实用地面高程异常差误差曲线的最大最小值,作为似大地水准面成果的精度范围(1倍标准差)。本例中,最小值 1.42 cm ($L = 10$ km),最大值 3.64 cm ($L = 210$ km),即似大地水准面成果的精度范围(1倍标准差)为 1.42~3.64 cm。

4 结 语

本文基于 GNSS 水准高程异常与重力场的频域误差特性,研究 GNSS 水准与重力地面高程异常融合算法的技术要求,采用统计分析技术,提出一种大地水准面成果的误差表达与精度评估方法。经示例测试,得出主要结论如下:

(1) 两点间实用地面高程异常差的误差是其距离的非线性递增函数,区域似大地水准面精度,

应采用随距离非线性变化的实用地面高程异常差误差曲线表达。

(2) 实用地面高程异常差的误差,既不大于重力地面高程异常差的误差,也不大于实测 GNSS 水准高程异常差的误差。

(3) 当两点间距离接近或小于 GNSS 水准点平均间距时,GNSS 水准高程异常对实用地面高程异常的贡献起主要作用。

(4) 较大空间尺度的实用地面高程异常精度,主要依靠重力地面高程异常控制。这说明本文提出的误差表达和估计方法,符合地球重力场性质。

(5) 区域大地水准面成果的精度评估,由本文 2.4 节给出的两项误差指标和两条误差曲线共 4 个要素完整表达。

参考文献:

- [1] ZHANG Chuanyin, DANG Yamin, JIANG Tao, et al. Heterogeneous gravity data fusion and gravimetric quasigeoid computation in the coastal area of China[J]. Marine

- Geodesy, 2017, 40(2-3): 142-159.
- [2] 晁定波, 申文斌, 王正涛. 确定全球厘米级精度大地水准面的可能性和方法探讨[J]. 测绘学报, 2007, 36(4): 370-376. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.04.003.
CHAO Dingbo, SHEN Wenbin, WANG Zhengtao. Investigations of the possibility and method of determining global centimeter-level geoid[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(4): 370-376. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.04.003.
- [3] 丁剑, 许厚泽, 章传银. 利用重力等位面特性进行地球重力场模型评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 832-839.
DING Jian, XU Houze, ZHANG Chuanyin. To evaluate earth gravitational model using equigeopotential character[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(6): 832-839.
- [4] 李建成, 褚永海, 徐新禹. 区域与全球高程基准差异的确定[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1262-1273. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170538.
LI Jiancheng, CHU Yonghai, XU Xinyu. Determination of vertical datum offset between the regional and the global height datum[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1262-1273. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170538.
- [5] 李姗姗, 吴晓平, 张传定, 等. 顾及地形与完全球面布格异常梯度项改正的区域似大地水准面精化[J]. 测绘学报, 2012, 41(4): 510-516.
LI Shanshan, WU Xiaoping, ZHANG Chuanding, et al. Regional quasigeoid refining considering corrections of terrain and complete spherical Bouguer anomaly's gradient term[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(4): 510-516.
- [6] 许厚泽. 全球高程系统的统一问题[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 939-944. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170406.
XU Houze. Global unification problem of the height system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(8): 939-944. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170406.
- [7] 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM 2008 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. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.001.
ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong, et al. EGM 2008 and its application analysis in Chinese mainland[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 283-289. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.001.
- [8] 章传银, 党亚民, 晁定波, 等. 似大地水准面的误差分析与抑制技术[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 26-29.
ZHANG Chuanyin, DANG Yamin, CHAO Dingbo, et al. Error analysis and prevention technique of quasigeoid[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(6): 26-29.
- [9] 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170058.
ZHANG Chuanyin, JIANG Tao, KE Baogui, 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170058.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2020-05-29

修回日期: 2020-10-12

第一作者简介: 章传银(1968—),男,博士,研究员,研究方向为地球重力场与垂直基准。

First author: ZHANG Chuanyin(1968—), male, PhD, research fellow, majors in earth gravity field and vertical geodetic datum.

E-mail: zhangchy@casm.ac.cn

通信作者: 马旭

Corresponding author: MA Xu

E-mail: 52202002@qq.com