



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 全球高程基准研究进展
作者: 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇
DOI: 10.13203/j.whugis20220234
收稿日期: 2022-04-28
网络首发日期: 2022-06-12
引用格式: 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220234>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13203/j.whugis20220234

引用格式：党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220234 (DANG Yaming, JIANG Tao, CHEN Junyong. Review on research progress of the global height datum[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220234)

全球高程基准研究进展

党亚民¹ 蒋涛¹ 陈俊勇¹

¹ 中国测绘科学研究院, 北京, 100830

摘要: 建立统一的全球高程基准是国际大地测量科学界的核心目标之一, 也是全球尺度地球科学研究、跨境工程应用等的必要基础设施。国际大地测量协会 (IAG) 2015 年发布了国际高程参考系统 (IHR) 的定义, 并于 2019 年提出了建立国际高程参考框架 (IHRF) 的目标。本文从全球高程参考系统的理论基础和定义出发, 对国际高程参考系统与框架的理论、方法和实际问题开展论述、研究。主要包括: 1) 全球大地水准面重力位 W_0 的确定; 2) 基于高阶重力场模型的重力位确定; 3) 基于区域重力场建模的重力位确定; 4) 重点论述、分析 2 项典型案例研究: IAG 科罗拉多大地水准面建模试验和 2020 珠峰高程测量实现国际高程参考系统。结果表明: 在平坦地区和一般山区, 重力大地水准面模型精度能达到 1 cm (重力位 $0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$), 即使在珠峰这样的特大山区, 也有望达到 2~3 cm 精度 (重力位 $0.2\sim 0.3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$)。综合典型案例研究结果、观测技术、数据资源和区域分布等因素, 提出了建立国际高程参考框架的初步策略, 包括 IHRF 参考站布设、重力位确定方法、数据要求、应遵循的标准/约定和预期精度指标等。最后, 展望了光学原子钟与相对论大地测量对于全球高程基准统一的潜在贡献。

关键词: 全球高程基准; 国际高程参考系统; 国际高程参考框架; 地球重力场模型; 重力位; 大地水准面

中图分类号: P223

1 引言

大地测量学的主要任务是测量、绘制、监测、研究地球几何形状、重力场、地球自转及地球系统变化, 大地测量参考系统和参考框架是实现以上科学目标的核心基础设施。随着现代观测技术的发展, 全球变化研究、高精度定位导航授时和全球地理信息获取等需要统一、高精度的全球大地测量参考系统作为基础框架。经过 30 多年的持续建设、维护和更新, 国际地球参考系统 (ITRS) 和国际地球参考框架 (ITRF) 日趋成熟完善, 目前已能为地球科学各个领域及应用提供毫米级精度全球几何参考框架^[1-2]。然而, 由于重力观测技术、数据不足等原因, 目前还缺乏一个完善的高精度全球高程参考系统或全球高程基准。

现阶段, 绝大多数国家或地区的法定高程基准是区域性高程基准, 通常以区域内单个或多个验潮站一段时间内观测的局部平均海平面作为高程基准面, 不同国家的高程基准之间存

收稿日期: 2022-04-28

项目来源: 国家重点研发计划 (2021YFB3900200; 2021YFB3900203); 国家自然科学基金 (42074020; 41974010)

第一作者简介: 党亚民, 博士, 研究员, 研究方向为大地测量基准与卫星精密定位。dangym@casm.ac.cn

通讯作者: 蒋涛, 博士, 研究员。jiangtao@casm.ac.cn

在一定差异，最大可达 $\pm 2 \text{ m}^{[3-4]}$ 。基于区域高程基准的大地测量观测数据只能在本区域内使用，无法用于监测、研究地球气候变化、地表质量迁移、海平面变化、全球海洋环流和自然灾害等全球性变化过程。经济全球化要求建立包括地理空间信息在内的信息资源互联互通，由于高程基准差异，不同国家的地理信息成果不能直接对接，开展全球地理信息资源获取与更新、跨境交通和油气管道等大型跨境工程建设，首先需要建立统一的高程基准，否则无法确保工程顺利实施。

自2000年左右开始，建立统一的全球高程基准成为国际大地测量协会（IAG）全球大地测量观测系统（GGOS）的核心目标之一。随着全球导航卫星系统（GNSS）、卫星测高、GRACE和GOCE重力卫星技术的发展和多年观测数据积累，全球平均海平面、地球重力场模型的精度和空间分辨率逐步提升，关于全球高程基准统一的研究取得了显著进展。IAG 2015年发布了关于国际高程参考系统（IHR）定义和实现的决议^[5]，并在2019年决议中提出了建立国际高程参考框架（IHRF）的远景目标^[6]。本文将从全球高程参考系统的理论基础和定义出发，介绍全球大地水准面重力位 W_0 的确定方法和进展，阐述国际高程参考系统的定义和约定，总结、分析国际高程参考框架建立方法，重点介绍中国测绘科学研究院重力场与垂直基准团队参与的2项国际高程参考系统实现典型案例研究：IAG科罗拉多大地水准面建模试验和2020珠峰高程测量实现国际高程参考系统，最后针对国际高程参考框架建设、维护和应用给出结论和建议。

2 全球高程参考系统与大地水准面重力位 W_0

高程参考系统定义了以数学形式表征空间点位高程信息的一整套常数、规范、模型和参数，主要由高程参考面（即零高程面）和垂直坐标（物理高程或地球位数）构成。高程参考系统与地球及其外部空间的重力场密切相关，为确保获取具有物理意义的高程，选定的高程参考面必须是地球重力位等位面。全球高程参考系统是一个与旋转地球相一致的地球重力位参考系统，地球表面及外部空间一点 P 的位置由基于国际地球参考系统的地心直角坐标 \mathbf{X}_P 和重力位值 W_P 给出。全球高程参考框架的作用是全球高程参考系统的最佳、可靠实现，涉及到全球参考站网络的站点布设、站点要求、数据处理模型和计算方案等。全球高程参考框架由全球分布的参考站构成，参考站垂直坐标以该站的重力位值 W_P 或从高程参考面（重力位为 W_0 ）起算的地球位数 C_P 来表示。考虑到地球是一个动态变化的系统，确定高程参考框架点坐标 \mathbf{X}_P 、 W_P 或 C_P 时应包含其时变分量 $\dot{\mathbf{X}}_P$ 、 \dot{W}_P 或 \dot{C}_P 。

地球重力等位面有无数个，理论上可以选择任意一个重力等位面作为高程参考面。对于全球高程参考系统，高程参考面及其重力位约定值 W_0 必须具备唯一性、可靠性和可重复性，大地水准面定义为一个与全球平均海平面最佳吻合的重力等位面，选择大地水准面作为全球高程参考系统的参考面，能够满足上述要求。以大地水准面为高程参考面，地球表面及其外部空间一点 P 的垂直坐标 C_P 定义为该点重力位 W_P 与大地水准面重力位 W_0 的差值^[7]：

$$C_P = -\Delta W_P = W_0 - W_P \quad (1)$$

根据地球重力位数，导出具有物理意义的点位高程 H_P ：

$$H_P = \frac{C_P}{\hat{g}} = \frac{W_0 - W_P}{\hat{g}} \quad (2)$$

$$\hat{g} = \frac{1}{H_P} \int_0^{H_P} g dH_P \quad (3)$$

选取不同的重力值 \hat{g} ，对应不同高程系统的高程值。当 \hat{g} 取 P 点与似大地水准面沿椭球法线方向的平均正常重力值时，得到的高程为正常高 H^* ，由于参考椭球的平均正常重力值可根据解析公式计算，正常高 H^* 是能够严密计算得到的；当 \hat{g} 取 P 点与大地水准面沿铅垂线方向的平均重力值时，得到的高程为正高 H ，平均重力值需要已知地球内部质量分布和垂直重力梯

度等信息才能精确计算，一般采用 Helmert 逼近等方法近似计算，对应的高程为 Helmert 正高^[7]；当 g 取参考椭球对应某一标准纬度（如 45° ）的正常重力值时，得到的高程为力高 H^d 。我国及澳大利亚、俄罗斯和部分欧洲国家等采用的是正常高系统，美国、加拿大、英国和印度等国家采用正高系统。力高系统主要用于局部范围的工程建设，不能作为国家统一高程系统。正是因为根据地球位数 C_p 能方便地推算不同类型的物理高程，选择地球位数作为全球高程参考系统的垂直坐标更为合理。

大地水准面可以理解为海平面延伸至覆盖全球范围的一个重力等位面，大地水准面的重力位 W_0 可以取全球平均海平面上的平均重力位值，其精确值取决于地球重力场、全球平均海平面的定义以及相应的计算方法与模型。为得到一个长期稳定的高程参考面，应设法计算得到与海平面变化无关的重力位 W_0 。根据大地水准面的定义，海平面相对于大地水准面的高度，即海面地形，应满足以下条件^[8-9]：

$$\int_S h_{SSr}^2 dS = \min \quad (4)$$

S 表示占地球表面积约 69%的全球平均海平面。该条件等价于：

$$\int_S (W - W_0)^2 dS = \min \quad (5)$$

W 为平均海平面上的实际重力位，由上式可知重力位为 W_0 的大地水准面是在最小二乘意义上与全球平均海平面最佳拟合的重力等位面。为满足以上条件式，必须有

$$\int_S (W - W_0) dS = 0 \quad (6)$$

则

$$W_0 = \frac{\int_S \frac{W}{\gamma^2} dS}{\int_S \frac{1}{\gamma^2} dS} \quad (7)$$

离散化后：

$$W_0 = \frac{\sum_1^i \frac{W_i}{\gamma_i^2}}{\sum_1^i \frac{1}{\gamma_i^2}} \quad (8)$$

实际计算时，全球海平面由全球分布的规则格网点表示，其位置（纬度、经度和大地高）由卫星测高技术确定的全球平均海平面模型提供，海面格网点处的重力位 W_i 采用地球重力场模型计算，基于 GRS80 参考椭球计算正常重力 γ_i 。大地水准面重力位 W_0 的约定值应尽可能反映真实地球几何形状和重力场，表 1 列出了自 1991 年以来重力位 W_0 的计算值。2000 年后，随着 T/P、Jason 等测高卫星和 GRACE、GOCE 重力卫星任务的实施，全球海平面模型和地球重力场模型的精度和分辨率不断提升， W_0 的确定精度显著提高，逐渐趋于收敛。其中 2013 年的 W_0 值具有重要代表性，由 IAG 垂直基准标准化工作组计算得到，工作组内设 4 个团队，分别采用计算全球海面平均重力位和求解大地测量固定边值问题 2 种方案，使用了 CLS11^[10]、DTU10^[11]及其它多年平均海平面模型，重力场模型包括 EGM2008^[12]、EIGEN-6C2^[13]和 GOCO03S^[14]等。经对比分析，利用包含 GRACE、GOCE 和卫星激光测距（SLR）数据的不同重力场模型计算的 W_0 值具有一致性，最大差异仅为 $0.01 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，对应大地水准面差异约为 1 mm 。200 阶以上重力场模型位系数产生的 W_0 值最大差异仅为 $0.001 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，因此采用纯卫星重力场模型即可满足 W_0 值计算要求。地球重力场季节性变化引起的 W_0 值变化最大为 $0.03 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，可忽略不计。基于 CLS11 和 DTU10 平均海平面模型计算的 W_0 值，差异为 $0.31 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，对应大地水准面差异约 3 cm 。IAG 垂直基准标准化工作组对 1992 至 2013 年期间每年的 W_0 值进行线性回归拟合得到 2010 年历元的 $W_0=62\ 636\ 853.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ ，于 2015 年

被 IAG 采纳为国际高程参考系统的重力位 W_0 约定值。需要指出的是, 少数研究试图引入海面地形模型将平均海平面归算为大地水准面, 再结合地球重力场模型计算大地水准面上的重力位 W_0 值。这种方案存在两个问题: 1) 大地水准面重力位 W_0 值不取全球平均海平面的重力位, 与大地水准面的定义相矛盾; 2) 现有海面地形模型的精度只能达到分米级, 会导致较大的 W_0 值误差和不确定性, 因此引入海面地形模型计算重力位 W_0 的方案并不可取。

表 1 全球大地水准面重力位 W_0 的计算值

Tab. 1 Estimations of gravity potential value W_0 of the global geoid

年份	W_0 (m^2s^{-2})	参考文献
1991	62 636 860	[15-16]
1992	62 636 856.5	[17]
1995	62 636 856.85	[18-19]
1997	62 636 856.88	[20]
1998	62 636 856.0	[8]
2007	62 636 854.6	[21]
2009	62 636 854.3	[22]
2012	62 636 854.2	[23]
2014	62 636 854.0	[24]
2015	62 636 853.4	[5]
2016	62 636 856.55	[25]
2017	62 636 856.04	[4]

3 国际高程参考系统的定义与约定

2015 年, IAG 在捷克布拉格召开的第 26 届国际大地测量与地球物理联合会 (IUGG) 科学大会上发布了关于国际高程参考系统定义和实现的决议, 国际高程参考系统的定义遵循如下公约^[5,26]:

(1) 国际高程参考系统的高程参考面是重力位值为 $W_0=62\ 636\ 853.4\ m^2s^{-2}$ 的地球重力等位面, 即大地水准面。

(2) 国际高程参考系统中一点 P 的垂直位坐标是该点重力位 W_P 与大地水准面重力位 W_0 的差值 $-\Delta W_P$, 即该点的地球位数 C_P (式 1)。

(3) 对于重力位 $W_P = W(\mathbf{X}_P)$ 的点 P , 其空间位置由国际地球参考系统中的坐标矢量 \mathbf{X}_P 给出。

(4) 参数、观测和数据应基于平均潮汐系统/平均地壳。

(5) 长度单位是国际单位制中的米, 时间单位是国际单位制中的秒。

该公约规定了以全球大地水准面作为全球高程基准, 国际高程参考系统中的点位坐标由几何分量和物理分量共同组成, 包括 \mathbf{X}_P 、 W_P (或 C_P) 及其时变分量 $\dot{\mathbf{X}}_P$ 、 \dot{W}_P (或 \dot{C}_P), 目前时变分量只考虑到线性速率 (一阶导数)。在实用中, 地心直角坐标 \mathbf{X}_P 和重力位值 W_P 可转换为大地坐标(纬度、经度和大地高)和地球位数 C_P , 参考椭球通常建议选用 IAG 公布的 GRS80 椭球。

4 国际高程参考框架建立方法

国际高程参考系统建立了地球几何形状与地球重力场(重力、重力位)之间的明确关系, 其具体实现依靠由全球参考站网络及站点坐标和参数构成的国际高程参考框架。与国际地球参考框架类似, 国际高程参考框架的参考站分为全球核心站和区域/国家加密站, 应包含代

表区域高程基准点的验潮站、区域高等级水准网的主要结点、相邻高程基准区域的边界点、ITRF 参考站及其加密站和大地测量长期观测站（GNSS、甚长基线干涉、卫星激光测距和绝对重力等）。对参考站的要求是尽量全球均匀分布、能长期稳定运行、已知站点空间坐标、与区域水准网相连接，站点周边范围（100~200 km 以内）要有密集分布、质量良好的地表重力数据，站点间距为 50~100 km，如果观测条件较差、重力数据稀少，站点间距可适当放宽到 300~500 km，并且各类数据遵循统一标准，包括潮汐系统、站点坐标参考历元和参考重力场等。鉴于目前的观测和数据条件，以 $0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 精度（对应 1 cm 高程精度）确定参考站的重力位（或地球位数）是一个较为现实的目标，主要有 2 种方案：高阶地球重力场模型、区域重力场建模。

4.1 基于高阶地球重力场模型的重力位确定

根据参考站的点位精确坐标，利用地球重力场模型进行球谐综合可直接计算该点的重力位。目前基于 GRACE 和 GOCE 等数据的纯卫星重力场模型能在 100 km 的空间分辨率尺度上达到 $0.2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 重力位精度，对应 2 cm 高程精度，反映的是 200 阶以下的中长波重力场信号^[27-28]。然而 200 阶以上全球重力场对应大地水准面平均截断误差达 30~40 cm，要得到高精度重力位值，卫星重力数据必须与地面、航空、船测和卫星测高等地表重力数据融合以构建高阶重力场模型^[29-30]。自 2012 年美国地理空间情报局公开发布 EGM2008 重力场模型后，国际大地测量科学界先后发布了 12 个展开阶次大于 719 阶的重力场模型，这些模型普遍起源于 EGM2008 模型的地表重力异常数据为基础，融合 LAGEOS 卫星激光测距、GRACE、GOCE 或纯卫星重力场模型、新测地表（陆地、航空和船测）重力和卫星测高海洋重力数据，不同模型采用的数据种类和数量、建模方法有所不同，相应大地水准面在重力数据密集区域可相差 $\pm 10 \text{ cm}$ ，在地形起伏较大、重力数据稀少区域差异达 $\pm 30 \text{ cm}$ 。XGM2019e 模型展开阶数达到了 5540 阶^[31]，代表了高阶重力场模型的最新进展，在融合多源重力数据的基础上，加入利用 EARTH2014 地形模型正演建模得到的合成重力数据，以提高重力场模型分辨率，但因需要假设地壳密度，能在多大程度上代表真实重力场还有待观察。据估计，以上高阶重力场模型的大地水准面误差，在重力数据充足区域为 4~6 cm，在重力数据稀少区域达 20~40 cm、甚至 1 m ^[32-33]。

地球重力场模型的发展方向是更高精度、更高分辨率，这需要更多全球分布高精度重力数据、改进多源数据融合方法和优化误差改正方法或模型。由于高性能计算机的发展，以往制约高阶重力场建模的海量数据处理和大型法方程求解问题已得到解决，现阶段最大问题是全球陆地范围还有许多地表重力数据空白区，主要分布在山区、沙漠、沼泽和丛林等难以到达区域。尽管开展类似美国 GRAV-D 计划的大规模航空重力测量项目，能获取均匀分布的高精度重力数据，但因成本高昂，在欠发达国家或地区难以实施。在可预见的将来，全球陆地范围仍然会存在大量地表重力数据空白区，只有卫星重力数据能覆盖全球陆海范围，利用高阶重力场模型确定参考站的重力位值，只有在重力数据充足区域才能达到 $0.4\sim 0.6 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ （4~6 cm）精度，在重力数据稀少/空白区域精度不会高于 $2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ （20 cm）。

4.2 基于区域重力场建模的重力位确定

以地球重力场模型作为参考重力场，基于移去-计算-恢复方法，利用区域内的地面、航空和卫星测高海洋重力数据精化局部重力场，能够提高参考站重力位值的确定精度。参考站的重力位为：

$$W_p = U_p + T_p = U_p + (T_0 + \sum_{n=2}^{\infty} T_n(P)) \quad (9)$$

式中， U_p 为参考椭球产生的正常重力位，可依据椭球参数严密计算。根据 Bruns 公式，因参考站位于地球表面，其扰动位 T_p 的确定等价于地面点高程异常计算，基于区域重力场建模的重力位确定问题转化为区域重力似大地水准面确定问题。扰动位的零阶项 T_0 表示选定的地心引力常数与 GRS80 参考椭球地心引力常数之间的差异：

$$T_0 = \frac{1}{r_p} (GM_{GGM} - GM_{GRS80}) \quad (10)$$

其中 r_p 为参考站的地心距离。一般假设地球质心与地心坐标系原点相重合，一阶项球谐系数为零，因此扰动位的一阶项 T_1 为零。

为提高区域重力场模型的精度，应尽可能多的利用重力数据，主要包括地球重力场模型和卫星、地面、航空、船测与卫星测高海洋重力以及地形数据，重力场模型的作用是提供一个全球统一的参考面，而地表重力数据则是在全球模型的基础上对局部区域的进一步精化。不同类型的重力数据具有不同的空间分布、信号频谱和误差特性，反映不同波段（或频率）的地球重力场信息。卫星重力数据主要提供长波信息，地表重力数据主要恢复中、短波信号，而地形数据则主要反映超短波重力场信息。如何优化联合类型多样、频谱各异、误差不等和高度不同的多源重力观测数据实现高精度区域重力场建模是一个具有挑战性的课题。

区域重力场建模的基本方法是求解大地测量边值问题，主要分为基于 Stokes 理论的大地测量边值问题和基于 Molodensky 理论的大地测量边值问题，前者对应的是大地水准面确定，后者对应似大地大地水准面确定。无论是求解何种大地测量边值问题，通常采用积分公式方法（Stokes 或 Hotine 积分），可直接单点积分计算得到待求点的扰动位，其它方法还包括最小二乘配置和径向基函数方法等。对于多种类型重力数据的融合处理，难点在于空中和地表重力数据的融合、不同类型重力数据的定权等问题。第一类方法是先将空中重力数据向下延拓至地面或大地水准面，与地面重力数据融合形成格网数据，再采用积分方法或最小二乘配置计算扰动位，这种两步法需要对空中重力数据进行两次处理。第二类方法是最小二乘配置或径向基函数方法，该类方法可一步联合重力场模型、地表和空中重力数据，能够同时容纳不同类型和空间分布的重力数据求解扰动位及其泛函。最小二乘配置涉及到高阶协方差矩阵组建和大型矩阵求逆计算，径向基函数方法涉及到基函数选取、网络设计、基函数深度与数量确定、病态方程求解和各类重力数据定权等。第三类方法是谱组合法，该方法从重力场参量之间的解析关系出发，将重力场参量按阶作谱分解，依据最小二乘原理确定各类重力数据的谱权，利用带谱权的 Stokes 或 Hotine 积分一步联合重力场模型、地表和空中重力数据求解扰动位，引入谱权考虑了不同类型重力数据之间频谱重叠的情况，积分求解避免了大型矩阵求逆计算。

以上求解方法一般都需要结合移去-计算-恢复技术，以参考重力场模型逼近重力场远区贡献，用高分辨率地形数据表征高频重力效应，先从重力异常中移去参考重力异常和高频重力效应，最后计算扰动位时再恢复相应的贡献项。为保证参考重力场模型和区域重力数据在频谱域内的优化组合，降低截断误差，产生了很多截断逼近公式和改化 Stokes、Hotine 积分核函数，上述谱组合法可以理解为这些改化积分核函数的一个概括模型。对于某个具体的研究区域，参考重力场模型及其截断阶数、积分半径和地形效应处理方法的选取都是需要重点考虑的问题。此外，求解基于 Stokes 理论的大地测量边值问题得到的是大地水准面差距，应将其转换为高程异常以得到地面点的扰动位。

自 2015 年关于国际高程参考系统的决议发布以来，国内外大地测量科学界开展了 2 项利用高精度区域重力场建模方法实现国际高程参考系统的代表性研究，一项是 IAG 组织的科罗拉多大地水准面建模试验^[34-35]，另外一项是我国 2020 珠峰高程测量在珠峰地区实现国际高程参考系统^[36]，2 项研究均融合使用了地球重力场模型、地面重力、航空重力和地形等多源数据，下文将详细阐述。

4.2.1 国际大地测量协会科罗拉多大地水准面建模试验

2017 年至 2019 年期间, IAG 工作组 JWG 2.2.2 (The 1 cm geoid experiment) 和工作组 JWG 0.1.2 (Strategy for the Realization of the International Height Reference System) 联合发起了科罗拉多大地水准面建模试验, 全世界共 14 个研究团队参与此次国际合作, 中国测绘科学研究院重力与垂直基准团队是参研团队之一, 试验目的是确定基于国际高程参考系统的区域重力大地水准面、似大地水准面和重力位值, 并对不同的大地水准面计算方法 and 软件进行比较, 以验证大地水准面模型能否达到 1 cm 精度。研究区域位于科罗拉多山区, 覆盖范围为北纬 35°~40°、西经 110°~102°, 地形起伏较大, 平均高程 1733 m, 最大高程 4385 m, 美国大地测量局提供了该区域的地面重力、航空重力、地形和 GNSS 水准数据, 图 1 为航空重力测线、地面重力点和 GNSS 水准点的空间分布。地面重力数据共计 59303 点, 均为历史观测数据, 数据分布密集程度存在一定差异, 因观测年代较早, 点位高程精度不足影响了重力数据精度, 且存在粗差。航空重力数据来源于 GRAV-D 计划, 共计 283716 点, 平均飞行高度为 6186 m (大地高), 形成 269 个交叉点, 交叉点均方根差值为 2.26 mGal。地形数据是 3"×3" SRTM 数据。GNSS 水准数据来源于大地水准面坡度验证测量 2017 项目 (GSVS17), 在一条自西向东、长约 350 km 的路线上, 实施了高精度 GNSS、水准和重力测量, 共计 223 个点, 平均点位间距 1.6 km, 获取的 GNSS 水准数据高程异常精度估计为 1.2 cm, 能对建模结果进行检核评估。

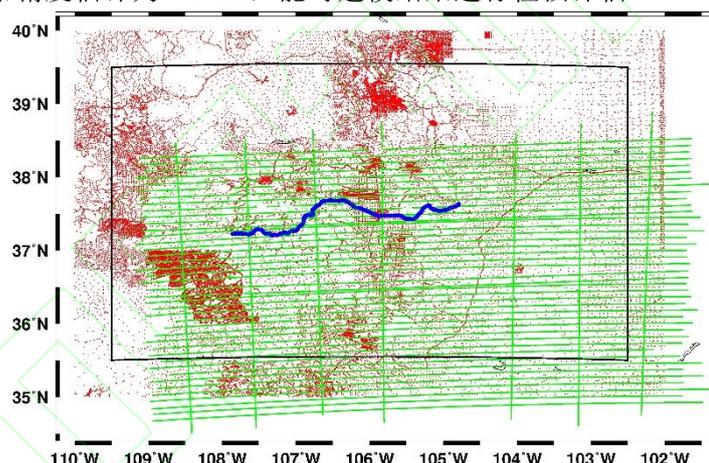


图 1 科罗拉多区域航空重力、地面重力和 GNSS 水准数据分布 (绿色线: 航空重力测线; 红色点: 地面重力点; 蓝色点: GNSS 水准点; 黑色矩形: 建模范围)

Fig. 1 Distribution of airborne, terrestrial gravity and GNSS leveling data in the study area of Colorado (Green Line: airborne gravity survey lines; Red point: terrestrial gravity points; Blue point: GNSS leveling points; Black rectangle: domain of geoid model)

14 个研究团队各自独立计算了科罗拉多区域的 1'×1'重力大地水准面模型、似大地水准面模型和 223 个 GNSS 水准点处的重力位值, 采用的理论和方法基本涵盖了当前区域重力场和大地水准面建模的所有方面, 大地测量边值问题包括基于 Stokes 理论的自由边值问题、基于 Molodensky 理论的自由边值问题和固定边值问题; 地形重力效应处理包括残余地形模型 (RTM)、地形改正 (Faye 异常)、Helmert 凝聚和地形均衡改正等方法; 航空与地面重力数据融合方法有航空数据向下延拓后与地面数据不加权融合, 向下延拓采用最小二乘配置、逆 Possion 积分等方法, 大部分团队利用谱组合、最小二乘配置或径向基函数等方法实现航空和地面重力数据的直接融合, 而不进行显示向下延拓; 大地水准面计算采用了改化积分核函数、谱组合、最小二乘配置或径向基函数等方法, 所有

团队均使用了移去-计算-恢复技术。

表 2 14 个重力（似）大地水准面模型与平均模型和 GSVS17 GNSS 水准数据的差值统计（cm）

Tab. 2 Statistics of the differences of 14 gravimetric (quasi)geoid models with respect to mean model and GSVS17 GNSS leveling data (cm)

模型	与平均模型比较		与 GNSS 水准数据比较
	均方差	均方差中值	标准差
14 个大地水准面模型	2.3~5.6	3	2~4.1
14 个似大地水准面模型	1.6~5.3	2	1.7~3.6
平均大地水准面模型	—	—	2.4
平均似大地水准面模型	—	—	2.6

在 1'×1' 格网点上，将 14 个团队计算的重力大地水准面模型和似大地水准面模型分别与相应的平均模型逐点作差，差值统计信息见表 2（第 2、3 列），差值的均方差代表了大地水准面模型、似大地水准面模型的内符合精度。相对于平均模型，大地水准面模型的均方差为 2.3~5.6 cm，均方差中值为 3 cm，似大地水准面模型的均方差为 1.6~5.3 cm，均方差中值为 2 cm，可以认为这 14 个大地水准面模型和似大地水准面模型的内符合精度分别达到了 3 cm 和 2 cm。

利用重力大地水准面模型和似大地水准面模型内插得到 223 个 GSVS17 GNSS 水准点的大地水准面差距和高程异常，与 GNSS 水准测定的大地水准面差距和高程异常分别作差，差值统计信息见表 2（第 4 列），14 个大地水准面模型和似大地水准面模型相对于 GNSS 水准数据的标准差分别为 2~4.1 cm 和 1.7~3.6 cm，平均大地水准面模型和平均似大地水准面模型的标准差分别为 2.4 cm 和 2.6 cm。应说明的是，GSVS17 GNSS 水准数据未提供给 14 个团队，各团队无法利用 GNSS 水准数据测试、选取参数以调试计算结果，因此 GNSS 水准检核属于“盲检”。据估算，GSVS17 GNSS 水准高程异常的精度约为 1.2 cm，那么根据误差传播定律，扣除 GNSS 水准数据本身的误差，14 个大地水准面模型的外符合精度为 1.6~3.9 cm，平均大地水准面模型的外符合精度 2.1 cm；14 个似大地水准面模型的外符合精度为 1.2~3.4 cm，平均似大地水准面模型的外符合精度 2.3 cm。考虑到 GSVS17 路线没有经过山顶区域，可以认为科罗拉多区域重力大地水准面和似大地水准面模型的外符合精度能达到 2 cm，这相当于重力位值确定精度达到 $0.2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 。

尽管未能实现 1 cm 精度大地水准面的目标，考虑到科罗拉多山区地形复杂、重力场起伏大、所用地面重力数据精度有限等因素，重力（似）大地水准面模型达到 2 cm 精度仍然是一项重要进展。14 个团队的计算结果存在一定的差异，大地水准面和似大地水准面模型精度最高达到了 1.6 cm 和 1.2 cm，这说明在地形复杂区域建立 1 cm 精度大地水准面是可能的。基于不同建模理论方法的大地水准面应具有同等精度，不同团队结果的差异主要来源于数据预处理、插值格网化、多源数据融合、关键参数选取、参考重力场模型及其截断阶数和改化积分核函数等数据处理技术方面的差异，为实现 1 cm 精度大地水准面的目标，需要重点在地形归算、向下延拓和多源重力数据融合等方面开展更深入的研究。此外，寻求亚 cm 级精度的验证观测数据以评估大地水准面是否能达到 1 cm 精度水平，也是一项同等重要、且具有挑战性的任务。

4.2.2 2020 珠峰高程测量国际高程参考系统的实现

2020 珠峰高程测量的总体目标是实现中国和尼泊尔两国共同宣布珠峰高程，但两国各有各的法定高程基准，我国 1985 国家高程基准以黄海多年平均海平面作为基准面，尼泊尔

法定高程则从印度洋孟加拉湾平均海平面起算，为确保珠峰高程的唯一性，双方决定在珠峰地区实现国际高程参考系统，作为珠峰新高程的起算基准。在珠峰地区实现国际高程参考系统，采用的方案是联合地球重力场模型、地面重力、航空重力和地形数据建立珠峰区域高精度重力似大地水准面模型，精密确定基于国际高程参考系统的珠峰峰顶大地水准面差距。

在珠峰及周边区域（北纬 25°~32°、东经 83°~91°），共有 8232 点地面重力数据，其中含新测地面重力数据 210 点，总体上地面重力数据分布很不均匀，特别是在珠峰核心区点位非常稀少。为解决重力数据稀少/空白问题，利用 GT-2A 型航空重力测量系统在珠峰地区成功开展航空重力测量，共施测了东西向数据测线 39 条、南北向检验测线 9 条，形成 264 个交叉点，测线间距 5 km，在珠峰核心区域数据测线间距加密为 2.5 km，共获取 83803 个数据点，平均飞行高度 10249 m(大地高)，航空重力测线网交叉点均方根差值达到 1.1 mGal。地形数据采用 3"×3" SRTM 数据。设立 61 个 GNSS 水准并置点，各点大地高平均精度为 3.5 mm，各点正常高相对于起算点的中误差优于 2 mm，61 个 GNSS 水准点的高程异常用于珠峰地区重力似大地水准面模型精度评估。图 2 为珠峰地区航空重力测线和 GNSS 水准点的空间分布。

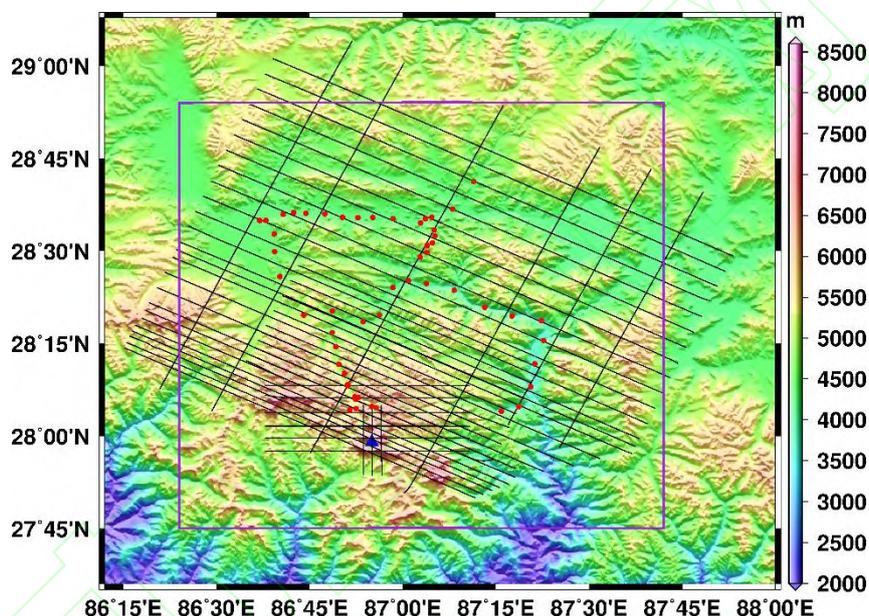


图 2 珠峰地区航空重力测线网与 GNSS 水准并置点(蓝色三角形: 珠峰; 黑色线: 航空重力测线; 红色点: GNSS 水准点; 紫色矩形: 建模范围; 底图: SRTM 地形高程)

Fig. 2 Airborne gravity survey lines and GNSS leveling points in the region of Mount Qomolangma (Blue triangle: Mount Qomolangma; Black Line: airborne gravity survey lines; Red point: GNSS leveling points; Purple rectangle: domain of quasigeoid model; Base map: SRTM topography)

珠峰区域重力似大地水准面模型覆盖范围为北纬 27.75°~28.9°、东经 86.4°~87.7°，空间分辨率 1'×1'，建模采用了 3 种计算方案，选定 EIGEN-6C4 作为参考重力场模型，方案 1 是利用谱组合方法联合 EIGEN-6C4 模型、航空重力扰动和地面重力异常数据计算似大地水准面 (EIGEN-6C4+航空+地面)，地形效应处理采用残余地形模型方法；方案 2 是不使用航空重力数据，采用基于移去-计算-恢复的 Molodensky 方法联合 EIGEN-6C4 模型和地面重力异常数据计算似大地水准面 (EIGEN-6C4+地面)；方案 3 是先将航空重力异常数据向下延拓至地面，与地面重力异常数据融合形成网格平均重力异常后，再结合 EIGEN-6C4 模型，采用基于移去-计算-恢复的 Molodensky 方法计算似大地水准面 (EIGEN-6C4+航空+地面)。

利用珠峰地区 61 点 GNSS 水准高程异常数据对重力似大地水准面模型进行精度评估，表 3 列出了基于 3 种方案的重力似大地水准面模型相对于 GNSS 水准高程异常的差值统计

信息。结果表明，在全球最高海拔、地形极端复杂的珠峰区域，重力似大地水准面模型精度能够达到 3.8 cm，对应重力位精度约 $0.38 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 。加入航空重力数据，使得似大地水准面模型精度提升了 51.3%，这充分证明了航空重力数据在地面重力数据稀少/空白区域对重力场建模的重要性。利用珠峰区域重力似大地水准面模型，顾及高差改正内插得到珠峰峰顶高程异常，采用顾及地形质量影响的严密公式，利用 3"×3" SRTM 数据和峰顶实测重力值将高程异常转换为大地水准面差距，基于国际高程参考系统重力位值 W_0 和 GRS80 参考椭球计算大地水准面差距零阶项，得到与国际高程参考系统对齐的峰顶大地水准面差距。

表 3 珠峰区域重力似大地水准面模型与 GNSS 水准高程异常的差值统计 (cm)

Tab. 3 Statistics of the differences between gravimetric quasigeoid models and GNSS leveling measured height anomalies in the area of Mount Qomolangma (cm)

计算方案	最小值	最大值	平均值	标准差
方案 1	14.8	33.3	27.0	3.8
方案 2	-12.9	27.0	16.9	7.8
方案 3	16.6	37.1	31.4	4.8

4.2.3 区域重力场建模的有关约定

根据科罗拉多和珠峰区域的重力场建模结果，可以认为，在平坦地区和山区，大地水准面精度达到 1 cm 是可行的，即使在珠峰这样的特大自然区，也有可能达到 2~3 cm 精度水平，这无疑是一个令人鼓舞的前景。从科罗拉多大地水准面建模试验可以看出，大地水准面确定涉及到多种建模理论、计算方法、数据处理技术和关键参数等，而且不同区域因重力数据分布、地形条件等原因适用不同的建模方案，很难制定一套标准的大地水准面建模技术路线。尽管如此，为了在全球范围建立国际高程参考框架，有必要对区域重力场建模中涉及到的常数和选项作出以下基本规定：

1) 基本常数：参考椭球：大地测量参考系统 1980(GRS80)；万有引力常数： $G = 6.67428 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ ；地心引力常数： $GM = 3.986004415 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ ；国际高程参考系统定义的大地水准面重力位值： $W_0 = 62636853.4 \text{ m}^2 / \text{s}^2$ ；地壳平均密度： $\rho = 2670 \text{ kg} / \text{m}^3$ 。

2) 永久潮汐：无潮汐系统；重力场模型的 C_{20} 项： $C_{20}^{TF} = C_{20}^{ZT} + 3.11080 \cdot 10^{-8} \times 0.3 / \sqrt{5}$ ， C_{20}^{TF} 属于无潮汐系统， C_{20}^{ZT} 属于零潮汐系统。

3) 一阶项和零阶项：扰动位一阶项： $T_1 = 0$ ；扰动位零阶项： $T_0 = \frac{GM - GM_{GRS80}}{r_P}$ ；高程异常零阶项： $\zeta_0 = \frac{GM - GM_{GRS80}}{r_P \gamma_Q} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma_Q}$ ；大地水准面差距零阶项： $\zeta_0 = \frac{GM - GM_{GRS80}}{r_{P_0} \gamma_{Q_0}} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma_Q}$ ；

P 点为地表计算点， r_P 为该点的地心距离， Q 点为 P 点沿法线方向在似地形面上的投影点， P_0 点为 P 点沿铅垂线方向在大地水准面上的投影点， Q_0 点为 P_0 点在椭球面上的投影点， U_0 为参考椭球面上的正常重力位。

5 讨论与结论

在全球范围建立统一的国际高程参考框架并提供应用服务，一个可行的方案是设立全球均匀分布、长期稳定、能可持续运行的 IHRF 核心站，在局部区域布设国家加密站，全球核心站与国家加密站共同构成 IHRF 参考站网络。全球核心站是国际高程参考框架的基础骨干，国家加密站是区域高程参考框架与国际高程参考框架的接口，其站点数量、空间分布可根据不同区域的具体情况和需求适当调整。国际高程参考框架的建设和推广应用将是一个长期的

过程,对于某个国家而言,仍将沿用现有以局部平均海平面为零高程面的区域高程基准,而在全球性、跨境工程及应用中将使用国际高程参考系统,如2020珠峰高程测量(中尼联合)、全球地理信息资源建设、跨境铁路、公路和管道建设等。

现阶段,全球范围仍存在较大范围地表重力数据空白区域,已有重力数据的精度和现势性也亟需提升、更新,要实现以 $0.1\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ 精度(高程 1 cm)确定IHRF参考站重力位(或地球位数)的目标是一项艰巨的挑战。对于地表重力数据空白或极少区域,只能选择利用高阶重力场模型确定参考站的重力位,可达到的精度为 $2\sim 4\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ (高程 $20\sim 40\text{ cm}$)、甚至更低。对于有一些地表重力数据、但分布不均或数据质量不明的区域(如珠峰地区),可在参考站周边 $100\sim 200\text{ km}$ 内开展地面或航空重力测量,填补重力数据空白,根据地形起伏设置数据分辨率为 $2.5\sim 5\text{ km}$,充分联合高阶重力场模型、已有和新测重力数据,采用区域重力场建模方法确定参考站的重力位。对于有密集分布地表重力数据的区域(如科罗拉多地区),应确保输入数据的精度,通常要求重力值精度优于 0.15 mGal 、平面坐标精度优于 1 m 、高程精度优于 0.3 m ^[37],联合多种类型重力数据构建区域重力场模型,进而确定参考站的重力位。在科罗拉多和珠峰这2个困难地区实现国际高程参考系统的代表性研究表明:在平坦地区和一般山区,重力大地水准面模型精度能达到 1 cm ,即使在珠峰这样的特大山区,有望达到 $2\sim 3\text{ cm}$ 精度。

近年来,国际最先进光学原子钟的稳定性和不确定性正接近 10^{-18} 量级^[38-39],为大地测量学和时间计量学开辟了新兴交叉方向,国际上先后启动了geo-Q、QuGe和TerraQ等光学原子钟与相对论大地测量相关的科学计划。根据广义相对论,由光学原子钟比对测定的时间/频率差异,可推算重力位差和高差, 10^{-18} 的时间/频率测量精度对应于 $0.1\text{ m}^2\text{ s}^{-2}$ 的重力位测量精度(高程 1 cm)^[40-41]。相对于水准测量、全球或区域重力场建模等经典大地测量方法,基于光学原子钟的相对论大地测量,是一种独立于传统大地测量基础设施、技术及数据之外的高程测量新模式,将为长距离高程精密传递、厘米级精度全球高程基准统一提供一种全新选项。

参考文献

- [1] Jiang Weiping, Li Zhao, Liu Wanke, et al. Some Thoughts on Establishment and Maintenance of Terrestrial Reference Frame Considering Non-Linear Variation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 665-669 (姜卫平, 李昭, 刘万科, 等. 顾及非线性变化的地球参考框架建立与维持的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(6): 665-669)
- [2] Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(8): 6109-6131
- [3] Li Jiancheng. Study and Progress in Theories and Crucial Techniques of Modern Height Measurement in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 980-987 (李建成. 我国现代高程测定关键技术若干问题的研究及进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(11): 980-987)
- [4] 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 (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)
- [5] International Association of Geodesy. IAG resolutions adopted by the IAG council at the XXVIth IUGG general assembly [EB/OL]. Prague, Czech Republic:[2015-6-22].

- <https://office.iag-aig.org/iag-and-iugg-resolutions>
- [6] International Association of Geodesy. IAG resolutions adopted by the IAG council at the XXVIIth IUGG general assembly [EB/OL]. Montreal, Canada, [2019-7-8]. <https://office.iag-aig.org/iag-and-iugg-resolutions>
- [7] Hofmann W B, Moritz H. Physical geodesy [M]. *Wien New York: Springer*, 2005
- [8] Burša M, Kouba J, Raděj K, et al. Mean Earth's Equipotential Surface from TOPEX/POSEIDON Altimetry [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1998, 42 (4): 459-466
- [9] Sánchez L, Čunderlík R, Dayoub N, et al. A Conventional Value for the Geoid Reference Potential W_0 [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(9): 815-835
- [10] Schaeffer P, Faugère Y, Legeais J F, et al. The CNES_CLS11 Global Mean Sea Surface Computed from 16 Years of Satellite Altimeter Data [J]. *Marine Geodesy*, 2012, 35(sup1): 3-19
- [11] Andersen O B. The DTU10 Gravity Field and Mean Sea Surface [C]// Second International Symposium Of The Gravity Field Of The Earth, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK, USA, 2010
- [12] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4)
- [13] Förste C, Bruinsma S L, Shako R, et al. EIGEN-6 - A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse [C]// Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-3242-2, EGU General Assembly, 2011
- [14] Mayer-Gürr T, Rieser D, Hoeck E, et al. The New Combined Satellite Only Model GOCO03s [C]// *GGHS2012, Venice*. 2012
- [15] Groten E. Parameters of Common Relevance of Astronomy, Geodesy, and Geodynamics [J]. *Journal of Geodesy*, 2000, 74(1): 134-140
- [16] McCarthy D D. IERS Technical note 13 [R]. *Observatoire de Paris. Central Bureau of IERS. Paris*, 1992
- [17] Burša M, Šíma Z, Kostelecký J. Determination of the Geopotential Scale Factor from Satellite Altimetry [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1992, 36(2): 101-108
- [18] Burša M. Report of Special Commission SC3, Fundamental Constants [R]. *21st General Assembly of the International Association of Geodesy, Boulder, Colorado*, 1995: 2-14
- [19] McCarthy D D. IERS Conventions (1996) [R]. *IERS Technical Note*, 1996, 21: 1-95
- [20] Rapp R H. Use of Potential Coefficient Models for Geoid Undulation Determinations Using a Spherical Harmonic Representation of the Height Anomaly/Geoid Undulation Difference [J]. *Journal of Geodesy*, 1997, 71(5): 282-289
- [21] Burša M, Kenyon S, Kouba J, et al. The Geopotential Value W_0 for Specifying the Relativistic Atomic Time Scale and a Global Vertical Reference System [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(2): 103-110
- [22] Čunderlík R, Mikula K. Numerical Solution of the Fixed Altimetry-Gravimetry BVP Using the Direct BEM Formulation [M]// *Observing our Changing Earth*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 229-236
- [23] Dayoub N, Edwards S J, Moore P. The Gauss–Listing Geopotential Value W_0 and Its Rate from Altimetric Mean Sea Level and GRACE [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86 (9): 681-694

- [24] Sánchez L, Dayoub N, Čunderlík R, et al. W_0 Estimates in the Frame of the GGOS Working Group on Vertical Datum Standardisation [M]// Gravity, Geoid and Height Systems. Springer: Cham, 2014: 203-210
- [25] He Lin, Chu Yonghai, Xu Xinyu, et al. Evaluation of the GRACE/GOCE Global Geopotential Model on Estimation of the Geopotential Value for the China Vertical Datum of 1985[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(6): 2016-2026 (赫林, 褚永海, 徐新禹, 等. GRACE/GOCE 扩展重力场模型确定我国 1985 高程基准重力位的精度分析[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2016-2026)
- [26] Ihde J, Sánchez L, Barzaghi R, et al. Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR5)[J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(3): 549-570
- [27] Rummel R, Balmino G, Johannessen J, et al. Dedicated Gravity Field Missions—Principles and Aims[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 33(1/2): 3-20
- [28] Ning Jinsheng, Wang Zhengtao, Chao Nengfang. Research Status and Progress in International Next-Generation Satellite Gravity Measurement Missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(1): 1-8 (宁津生, 王正涛, 超能芳. 国际新一代卫星重力探测计划研究现状与进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(1): 1-8)
- [29] Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chao Dingbo, et al. The Research of the Earth's Gravity Field Model WDM94 Complete to Degree 360[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping (Wtasm)*, 1994, 19(4): 283-291. (宁津生, 李建成, 晁定波, 等. WDM94 360 阶地球重力场模型研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(4): 283-291.)
- [30] Ning Jinsheng. Following the Developments of the World, Devoting to the Study on the Earth Gravity Field[J]. *Editorial Board of Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6): 471-474 (宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 471-474)
- [31] Zingerle P, Pail R, Gruber T, et al. The Combined Global Gravity Field Model XGM2019e[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(7): 1-12
- [32] Rummel R, Gruber T, Ihde J, et al. STSE-GOCE+, Height System Unification with GOCE, Doc. No(No.1) [R]. *GO-HSU-PL-002*, 2014
- [33] Gruber T, Willberg M. Signal and Error Assessment of GOCE-Based High Resolution Gravity Field Models[J]. *Journal of Geodetic Science*, 2019, 9(1): 71-86
- [34] Jiang T, Dang Y M, Zhang C Y. Gravimetric Geoid Modeling from the Combination of Satellite Gravity Model, Terrestrial and Airborne Gravity Data: A Case Study in the Mountainous Area, Colorado[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72: 189
- [35] Wang Y M, Sánchez L, Ågren J, et al. Colorado Geoid Computation Experiment: Overview and Summary [J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95 (12): 1-21
- [36] Dang Yamin, Guo Chunxi, Jiang Tao, et al. 2020 Height Measurement and Determination of Mount Qomolangma[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4): 556-561 (党亚民, 郭春喜, 蒋涛, 等. 2020 珠峰测量与高程确定[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 556-561)
- [37] Denker H. Regional Gravity Field Modeling: Theory and Practical Results[M]// Sciences of Geodesy - II. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 185-291
- [38] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, et al. Atomic Clock Performance Enabling Geodesy below the Centimetre Level[J]. *Nature*, 2018, 564(7734): 87-90
- [39] Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, et al. Test of General Relativity by a pair of

- Transportable Optical Lattice Clocks [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14 (7): 411-415
- [40] Shen Wenbin, Ning Jinsheng, Li Jiancheng, et al. On the Relativistic Geopotential and Relativistic Geoid[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(10): 897-900 (申文斌, 宁津生, 李建成, 等. 论相对论重力位及相对论大地水准面[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(10): 897-900)
- [41] Lisdat C, Grosche G, Quintin N, et al. A Clock Network for Geodesy and Fundamental Science[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12443

Review on research progress of the global height datum

DANG Yamin¹ JIANG Tao¹ CHEN Junyong¹

¹ Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: Objectives: Establishing a unified global height datum is one of the core objectives of the international geodetic scientific community, and also a necessary infrastructure for geoscience research on a global scale and cross-border engineering applications. The International Association of Geodesy (IAG) released the definition of International Height Reference system (IHRS) in 2015 and then in 2019 set out the goal of establishing the International Height Reference Frame (IHRF). Methods: In this paper, the theory, methods and practical problems related to the IHRS and IHRF are reviewed and studied on the basis of the theoretical foundation and definition of the global height reference system. Four main aspects are considered: 1) determination of gravity potential W_0 of the global geoid; 2) determination of gravity potential based on high degree gravity field model; 3) determination of gravity potential based regional gravity field modeling; 4) investigation of two typical case studies: IAG Colorado geoid model experiment and realization of the IHRS in 2020 Qomolangma Height Survey. Results: The results of two typical case studies demonstrate that: the accuracy of gravimetric geoid model can reach 1 cm ($0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ in gravity potential) in flat areas and general mountainous areas, and it is expected to reach 2~3 cm accuracy ($0.2\sim 0.3 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ in gravity potential) even in very complex mountainous areas such as Mount Qomolangma. Conclusions: Based on the results of two case studies, observation technology, data resources, spatial distribution and other factors, a preliminary strategy for establishing the IHRF is proposed, including layout plan of IHRF reference stations, determination methods of IHRF related gravity potential, data requirements, standards/conventions to be followed and expected accuracy. In addition, we prospect the potential contributions of optical atomic clocks and relativistic geodesy to the unification of global height datum.

Key Words: Global height datum; International Height Reference System; International Height Reference Frame; Earth gravity field model; Gravity potential; Geoid

Foundation support: The National Key Research & Development Program of China (2021YFB3900200; 2021YFB3900203); the National Natural Science Foundation of China(42074020; 41974010).

First author: DANG Yamin, PhD, professor, majors in geodetic datum and geodynamics. E-mail: dangym@casm.ac.cn

Corresponding author: : JIANG Tao, PhD, professor. E-mail: jiangtao@casm.ac.cn

网络首发:

标题: 全球高程基准研究进展

作者: 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇

DOI: 10.13203/j.whugis20220234

收稿日期: 2022-04-28

引用格式:

党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220234 (DANG Yaming, JIANG Tao, CHEN Junyong. Review on research progress of the global height datum[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220234)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望

李振洪, 李鹏, 丁咚, 王厚杰

武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 1927-1942

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180295>