

文章编号: 1001-1595(2007)01-0001-08

中图分类号: P22

文献标识码: A

2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步

陈俊勇¹, 杨元喜², 王 敏³, 张燕平¹, 唐颖哲², 李 辉⁴, 程鹏飞⁵, 孙凤华⁶, 张 鹏¹, 郭春喜⁷

(1. 国家基础地理信息中心, 北京 100044; 2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 3. 地震预测研究所, 北京 100036; 4. 地震研究所, 湖北 武汉 430071; 5. 中国测绘科学研究院, 北京 100039; 6. 西安测绘信息技术总站, 陕西 西安 710054; 7. 大地测量数据处理中心, 陕西 西安 710054)

Establishment of 2000 National Geodetic Control Network of China and It's Technological Progress

CHEN Jun-yong¹, YANG Yuan-xi², WANG Ming³, ZHANG Yan-ping¹,

TANG Ying-zhe², LI Hui⁴, CHENG Peng-fei⁵, SUN Feng-hua⁶, ZHANG Peng¹, GUO Chun-xi⁷

(1. National Geomatics Center of China, Beijing 100044, China; 2. Xian Research Institute of Surveying and Mapping, Shanxi Xian 710054, China; 3. Seismological Prediction Institute, Beijing 100036, China; 4. Seismological Institute, Wuhan 430071, China; 5. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; 6. Xian Information Technique Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 7. Geodetic Data Processing Center, Xi'an 710054, China)

Abstract: 2000' National Geodetic Control Network of China is an important fundamental scientific engineering project in China. It consists of three parts which are establishment of 2000 National GPS Geodetic Network, its combination adjustment with national astro-geodetic network and 2000 National Gravity Fundamental network. There are five characteristics in the project: ① various kinds of scientific branches involved, for example classical geodesy, space geodesy, physical geodesy, astronomy, modern data processing and computer science etc. ② large amount and different sorts data to be processed, ex. 2 600 GPS points, 46 000 geodetic baselines, 259 gravity points, nearly 50 000 geodetic points and 150 000 unknown variables in the combination adjustment of national astro-geodetic network and 2000 national GPS geodetic network. ③ Long time span of the observed data in these geodetic networks, such as 12 years span of GPS observation data in 2000 national GPS geodetic network, and the national astro-geodetic network was completed almost 30 years ago. ④ Large area covered by these geodetic networks, ex. the 2000 national GPS geodetic network and national astro-geodetic network cover most lands and islands of China, while 2000 national gravity fundamental network extends from main land to Hong Kong, Macau and Nansha islands. ⑤ Many factors have to be taken into consideration in the data processing, e. g. the influence of crust movement, internal plate movement, and regional deformation on the geodetic data in the networks, the changes of geodetic datum, astronomy constants and epoch effect on the data reduction and processing of the networks. The major innovation of this project is in 3 parts: ① Horizontal and vertical dimensions in national astro-geodetic network were separated from each other. After the combination adjustment with national 2000 GPS geodetic network a unified geocentric 3D coordinates for it was obtained. ② To improve accuracy of geodetic coordinate frame 15 times which is from ± 5 m to ± 0.3 m and 4 times of gravity points which is from $\pm 25 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ to $\pm 7 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$. ③ To improve processing technique from classic least-square method to which is combination with least-square, robust estimation and variance component evaluation. The accuracy and reliability of results are enhanced.

Key words: geodetic control network; GPS; gravimetry; astronomical determination; astro-geodetic network; robust estimation.

摘 要:“2000 国家大地控制网”是国家大地测量的重大科学工程项目。它主要包括建立 2000 国家 GPS 大地控制网, 2000 国家重力基本网, 以及前者与国家天文大地网的联合平差等, 以实现国家 3 维地心坐标系统的坐

收稿日期: 2006-09-30; 修回日期: 2006-12-30

作者简介: 陈俊勇(1933-), 男, 浙江宁波人, 院士, 博士生导师, 主要研究方向为天文大地测量。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

标框架。这个项目的特点有:①涉及多个学科,如经典和空间大地测量学、天文测量学、重力测量学、近代数据处理理论和技术等;②处理的数据量大、种类多,如 2000 国家 GPS 大地控制网有 2 600 多个测点,46 000 多条独立基线,天文大地网与 2000 国家 GPS 大地控制网联合平差所需解算的未知数多达 15 万个处理的数据几乎包含了三角测量、导线测量、天文测量、重力测量和 GPS 测量等各类测量的成果;③所处理数据的施测时间跨度长,如 2000 国家 GPS 大地控制网中三个子网的施测时间各不相同,前后从 1988 年到 2000 年历时 12 年,而天文大地网的施测时间是在上一世纪的 50 至 70 年代;④处理数据所覆盖的国土面积大,2000 国家 GPS 大地控制网及天文大地网覆盖了我国整个大陆及部分沿海岛屿,而 2000 国家重力基本网则扩展到香港、澳门以及南沙等地区;⑤处理数据需顾及的因素多,如需分析近 70 年来我国大陆板块运动、板内运动、局部地壳运动和新旧大地测量基准、新旧天文系统、和不同历元对上述这些大地测量观测数据的影响及其统一归算。本项目的技术创新点有以下四个方面:①首次将我国不同部门、不同时期施测的多个平面(2 维)和高程(1 维)分离的大地控制网通过空间大地测量和数据处理技术,科学的整合为全国统一的整体的国家 3 维大地控制网,将原来大地测量中所采用分离的几何与物理参数,进行了科学的统一的整合;②首次将我国非地心大地坐标框架整体的科学的转换为地心大地坐标框架;③首次将我国大地坐标框架的地心坐标精度由 $\pm 5\text{ m}$ 提高 15 倍,达到了 $\pm 0.3\text{ m}$;将我国重力基本点的精度由 $\pm 25 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$ 提高近 4 倍,达到了 $\pm 7 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$;④首次将海量数据由原来采用的最小二乘平差经典数据处理技术提高为最小二乘平差,抗差估计和方差分量估计相结合的现代数据处理技术,提高了成果的精度和可靠性。

关键词:大地控制网;GPS;重力测量;天文大地测量;抗差估计。

1 引言

2000 国家 GPS 大地网、与该网联合平差后的全国天文大地网和 2000 国家重力基本网统称为“2000 国家大地控制网”,该网的构建是国家大地测量的重大科学工程项目。2000 国家大地控制网的建立,为全国 3 维地心坐标系统^[1,2]提供了高精度的坐标框架,为全国提供了高精度的重力基准,为国家的经济建设、国防建设和科学研究提供了高精度、3 维、统一协调的几何大地测量与物理大地测量的基础地理信息。

国家测绘局、总参测绘局和中国地震局等部门在 20 世纪 90 年代先后建成了国家高精度 GPS A、B 级网、全国 GPS 一、二级网、和全国 GPS 地壳运动监测网等三个全国性 GPS 网,共计 2 600 多点。这三个 GPS 网由于布设的需求不同,因此它们的布网原则、观测纲要、实施年代和测量仪器都有所不同;这三个 GPS 网在数据处理方面,如所选取的作为平差基准的 IGS(国际全球导航卫星系统服务)站、历元、坐标框架和平差方法也不尽相同。因此这三个 GPS 网的成果及其精度,包括同名点的坐标值之间,也必然存在差异。因此为了充分发挥其整体效益,更好服务于国家和社会,上述三个网必须统一基准,采用先进的数据处理理论和方法^[3,4],统一进行整体平差,从而建立我国统一的、可靠的、高精度的 2000 国家 GPS 大地网,作为实现我国高精度地心 3 维坐标系统的

一个坐标框架。

然而 2000 国家 GPS 大地网的密度远不如全国天文大地网^[5,6],仅为后者的 1/20 左右。所以 2000 国家 GPS 大地网所提供的低密度的 3 维地心坐标框架不能完整实现中国的 3 维地心坐标系。若利用 2000 国家 GPS 大地网的 3 维地心坐标、精度高和现势性好的特点,通过它和具有近 5 万大地点的全国天文大地网进行联合平差,将后者纳入 3 维地心坐标系,并提高它的全国天文大地网的精度和现势性^[1,2]。使我国的大地坐标框架在密度和分布方面实现我国 3 维地心大地坐标系前进了一大步。

在国家重力基准方面,我国在 20 世纪先后建立了 1957 国家重力基本网和 1985 国家重力基本网^[7]。后者的精度为 $\pm 25 \times 10^{-8}\text{ ms}^{-2}$,与前者相比提高了一个数量级,并消除了波斯坦重力起始值的系统差。但 1985 国家重力基本网仍存在如下问题:①对中国国土的覆盖不完整,网点少,网型结构也不理想;②至 20 世纪末,该网点毁损严重,竟达 40%左右;③精度难以满足当代发展的需要。因此有必要建立新的国家重力基准即 2000 国家重力基本网。

2 2000 国家 GPS 大地网的数据处理——三网平差

2.1 三个全国性 GPS 网概况

国家 GPS A、B 级网(以下简称 A、B 级网)共

有 832 个点, 其中 A 级网点 30 个。A, B 级网于 1991 ~ 1995 年间布测。A, B 级网平差中采用的坐标框架和历元分别为国际地面基准框架 1993 (ITRF 93) 和 1996.365。A, B 级网平差后的点位地心坐标精度为 10^{-7} 量级。

全国 GPS 一、二级网 (以下简称一、二级网) 共 553 个点, 其中一级网点 44 个。一、二级网于 1991 ~ 1997 年间布测。一、二级网平差中采用的坐标框架和历元分别为 ITRF96 和 1997.0。一、二级网平差后的点位地心坐标精度为 10^{-8} 量级。

中国地壳运动 GPS 观测网络工程 (以下简称网络工程) 包括基准网、基本网和区域网共 1 222 个点, 其中基准网点 25 个, 基本网点 56 个。网络工程于 1998 ~ 2002 年间布测^[8]。网络工程平差中采用的坐标框架和历元分别为 ITRF96 和 1998.680。网络工程平差后的点位地心坐标精度总体优于 10^{-8} 量级。

参加 2000 国家 GPS 大地网平差的除了上述三个全国性 GPS 网之外, 还有其他地壳形变 GPS 监测网等。所有参加三网平差的上述 GPS 网点, 经过筛选和相邻点合并, 最后选取了 2 666 个 GPS 点 (其中国外点 124 个, 国内点 2 542 个) 参加了 2000 国家 GPS 大地网的数据处理。

2.2 三网平差中的技术进步^[9]

2.2.1 三网平差中对坐标框架和历元的选择

为使三网平差成果严格对应于 3 维地心坐标系, 选用的坐标框架和历元分别为 ITRF97 和 2000.0, 因此采用 IGS 提供的, 具有精确地心坐标和稳定可靠位移速度的 GPS 连续运行站和 GPS 精密星历作为控制, 以通过 2000 国家 GPS 大地网实现上述选定的坐标框架和历元。在三网平差过程中, IGS 站点坐标不进行改正, 在此基础上进行三网的联合平差, 以保证三网平差后的网点坐标相对于同一基准, 即直接纳入到 IGS 所维持的 ITRF。

2.2.2 三网平差中对基准的选择

三网平差选择控制数据, 即数据的基准时, 采用“强基准”与“弱基准”相结合的方法。三网所有 GPS 网点都在这些基准控制下进行平差。三网平差中涉及的 IGS 站和网络工程中的基准网点、基本网点选作为“强基准”, 即在三网平差过程中这些点的有关参数保持不变, 不作改正。网络工程中的区域网点作为“弱基准”, 即在平差过程中这些点的参数根据其误差大小确定权, 其权值一般要比网平差中其他待平差量的大, 平差后只有较小的改正数。

2.2.3 三网平差中对板块运动影响的处理

三网各子网的外业观测持续时间都比较大, 而彼此布测时间的差别也比较大, 因此在这期间三网各子网测站点随板块运动的位移量不容忽视。为此, 在三网平差时对各子网引入了尺度和坐标的旋转因子, 采取这些措施后不但吸收了大部分观测数据中地壳形变的影响, 也减弱了各子网与三网平差采用的坐标框架不一致的影响。

2.2.4 三网平差时采用严密的赫尔默特 (Helmert) 方差分量估计公式^[9]

平差观测量的初始权由各观测向量的方差-协方差矩阵的逆矩阵确定, 平差解算过程中辅以方差分量估计, 以调整各观测量的权。3 网平差时首先用最小二乘原理对各子网进行网平差, 诊断并剔除明显异常的基线数据。这一步骤的主要目的是在保留必要的观测数据的条件下, 抑制部分有显著粗差的观测量的影响, 以保证求得比较可靠的点位参数的近似估计值。其次, 再用双因子抗差估计方法进行处理。由此相关等价权矩阵元素可以随观测误差的大小进行调整, 使之适应于相应观测数据的实际精度。

2.3 三网平差成果的精度评定

三网平差后 2000 国家 GPS 大地网点 (参见图 1) 的 3 维笛卡儿坐标分量 (X, Y, Z) 的中误差分别为: ± 0.90 cm, ± 1.57 cm, ± 1.06 cm; 大地坐标分量 (B, L, H) 的中误差分别为: ± 0.37 cm, ± 0.77 cm, ± 1.92 cm; 点位中误差为 ± 2.13 cm。采用全国 25 个 GPS 基准站坐标与相应的三网平差后相应点坐标进行检核, 其三个笛卡儿坐标分量互差中误差分别为: ± 0.37 cm, ± 0.56 cm, ± 0.53 cm; 点位互差中误差为 ± 0.86 cm。

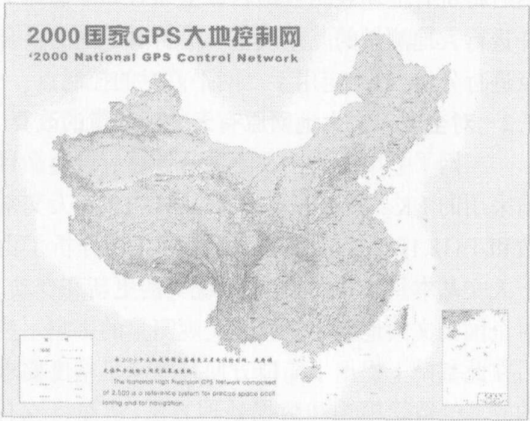


图 1 2000 国家 GPS 大地控制网

根据这些统计数字可以得出结论, 三网平差后得到 2000 国家 GPS 大地网点的地心坐标在 ITRF97 坐标框架内, 历元为 2000.0 时的中误差应在 ± 3 cm 以内。

3 2000 国家 GPS 大地网与全国天文大地网联合平差——二网平差^[10]

2000 国家 GPS 大地网与全国天文大地网联合平差, 即二网平差, 是继 1982 年全国天文大地网整体平差后的又一项更大规模的大地测量数据处理工程。参加二网平差的全国天文大地网数据主要包括: ① 全国天文大地网整体平差后的网点坐标值、方向观测值、边长观测值、天文方位角观测值等; ② 特级导线和在全国天文大地网中为检测所实施的光电测距成果; ③ 全国天文大地网中五个二等网改造区的施测成果 (替代原有相应二等网的施测成果); ④ 垂线偏差成果以及利用中国 2000 似大地水准面 (CQG 2000)^[11] 求得的各点高程异常值。

二网平差的数据处理工作主要包括以下内容: 全国天文大地网数据预处理、影响天文观测量各因素分析研究和改算、陆地板块运动、地壳运动和地形变化对全国天文大地网点产生的影响分析、垂线偏差和高程异常在新坐标系中的精化计算、二网联合平差方法研究和实施、平差成果的精度评估和外部检核等。

3.1 全国天文大地网数据的预处理

在大量分析检验的基础上, 确定用于二网平差的全国天文大地网的待平差数据有 48 919 个大地点的观测数据, 314 962 个方向观测数据, 2 146 导线观测数据, 1 068 个方位角观测数据。然后将所有上述观测数据归算至 WGS 84 椭球上并进行大地测量的三差改正。最后对二网的重合点进行分析, 以确定用于二网平差时的控制点。

3.2 对全国天文大地网原有天文观测量的改算

二网平差中的天文观测量的计算应该遵循目前采用的 FK 5 天文基本星表, IAU 1976 天文常数和 IAU 1980 章动模型, 因此研究和分析了由于天文基本星表、时号改正系统等的更新和变动, 对全国天文大地网中原有天文观测量的影响。然后在此基础上提出了简捷方便且能满足精度要求的改算的数学模型和数据处理方法, 从而将原有天文观测量按现行 (星表, 常数和模型) 要求进行改算, 以代替原来的天文纬度、经度与方位角。

3.3 地壳运动对全国天文大地网点的影响分析

利用我国各种多期施测的 GPS 网点的速度场, 采用双三次样条函数拟合的方法, 从而求出中国大陆地壳运动统一速度场和变形场模型。同时又通过对各个不同区域的地震发生地区及地层断裂系所选样本进行计算和分析, 从理论上对位于这些地区的全国天文大地网点、大地边长和大地方位角等影响的显著性进行检验及分析, 结果表明: 地球板块运动、板内运动和局部运动的影响在二网平差中进行过滤后可以不予顾及^[12]。

3.4 全国天文大地网点垂线偏差和高程异常的精化计算

二网平差时, 对全国天文大地网点的垂线偏差进行了精化计算, 计算的技术路线是: ① 在重力资料稀少的地区, 应用 $30'' \times 30''$ DTM, 经地形均衡归算和恢复, 推算栅格重力平均空间异常, 由此推算垂线偏差; ② 在有重力资料的地区, 应用移去-恢复技术, 在地球重力位模型 EGM 96 和 WDM 94 的基础上, 用数字积分计算重力垂线偏差; ③ 应用 300 多个上述二网中的重合点, 求出 1980 西安坐标系与 WGS 84 的转换参数, 由此将 1980 西安坐标系所相应的 IAG 75 椭球垂线偏差转换为 WGS 84 椭球的相应值; ④ 利用天文点与 GPS 的重合点, 对上述改算后的相应 WGS 84 椭球的垂线偏差进行外部检验。

至于二网平差时大地测量观测数据归算中所需的高程异常值, 则利用 CQG 2000 大地水准面内插求得。

3.5 二网平差及精度统计

3.5.1 二网平差

由于二网之间存在系统误差 (主要是全国天文大地网的系统误差所引起), 因此二网平差采用 2000 国家 GPS 大地网点的坐标及其方差协方差和全国天文大地网的直接观测值组成联合平差的函数模型。

二网的法方程解算采用 Helmert 分区平差法进行, 既能保持与整体平差结果一致, 缩短计算时间, 加快计算进度, 同时又有效地解决了计算机容量不足的困难。观测方程线性化后, 二网平差最终归结为一个规模巨大的线性稀疏矩阵的最小二乘求解问题。我们用 Cholesky 因子分解法求解参数, 而用迭代法来改善解的精度。在精度评定方面, 不用传统求逆方法, 而用 Cholesky 因子分解法求解各点精度。

3.5.2 二网平差成果的精度统计

二网平差成果中, 全国天文大地网点平差后的点位中误差平均为 $\pm 0.08\text{ m}$, 最弱点位中误差为 $\pm 1.45\text{ m}$, 位于新疆塔里木盆地内。二网平差成果中, 2000 国家 GPS 大地网点的点位中误差平均为 $\pm 0.01\text{ m}$ 。

经外部检核, 大地坐标值互差 $|\Delta B|$ 和 $|\Delta L|$ 在 0.05 m 以内的分别占 54% 和 49%, 在 0.10 m 以内的分别占 74% 和 73%。二者总的互差平均值分别为 0.08 m 和 0.09 m 。

3.6 二网平差中的技术进步

在中国甚至在全世界, 二网平差的规模之大是没有先例的, 同时它所处理的技术问题也是缺乏可供遵循的定则。因此二网平差的工作量和技术进步是比较突出的。

1. 在整理、分析和归算了天文大地网的 5 万余个三角点和 30 余万个方向、方位角、边长观测数据以及该网和 2000 国家 GPS 大地网重合点的基础上。二网平差中最终采用的数据有: 314 976 个水平方向观测值; 2 146 条测距边; 1 064 个实测天文方位角三角点 48 919 个; 其中和 2000 国家 GPS 大地网的重合点, 即具有 3 维地心坐标的大地点 338 个作为二网平差中的联系点。

2. 分析了新旧星表系统、天文常数系统、综合时刻系统差异对天文大地网中曾在 20 世纪中叶测定的天文纬度、经度、方位角的影响, 在此基础上对参加联合平差的天文观测数据进行了改化。

3. 编制了改算和精化垂线偏差的软件, 完成了相对于 WGS 84 椭球的天文大地网中近 5 万大地点垂线偏差的改算和精化计算工作。利用我国目前分辨率和精度最高、覆盖我国陆海国土的 CQG 2000 似大地水准面模型, 推算了我国天文大地网近 5 万点的高程异常值。

4. 研究并编制了二网平差软件, 有效地解决了超大规模法方程解算这一关键性问题。并首次将 Helmert 方差分量估计算法成功用于超大规模网的方差分量估计。

二网平差的成果意味着我国获得了近 5 万点的 3 维地心坐标, 是建立我国新的国家 3 维地心大地坐标系的重大进展。

4 2000 国家重力基本网

4.1 概况

2000 国家重力基本网(参见图 2)由 259 点组

成, 其中重力基准点 21 个, 重力基本点 126 个和重力引点 112 个。重力基准点是用绝对重力仪测定了该点的重力值, 作为全国的重力基准, 它的点位力求在全国均匀分布。重力基本点是用相对重力仪和重力基准点联测的重力点, 重力基本点相对于重力基准点而言, 数量多, 密度大, 以便于用户联测。作为重力基本点的备用点, 每个重力基本点原则上还应布设一个重力引点。

在 2000 国家重力基本网中还布设了由哈尔滨、北京、西安、昆明、南宁五个重力基准点和重力基本点组成的国家级重力仪标定基线(长基线)和 8 条国家级重力仪格值标定场(短基线)。为了便于将 1985 国家重力基本网点的重力值换算为 2000 国家重力基本网系统的重力值, 2000 国家重力基本网还联测了 1985 国家重力基本网点共 66 个。

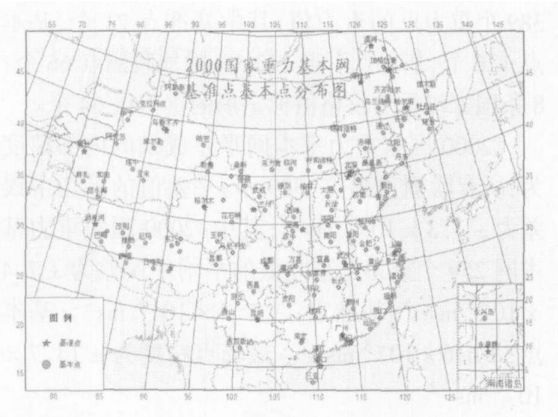


图 2 2000 国家重力基本网

Fig. 2 2000 National Gravity Fundamental Network

4.2 2000 国家重力基本网的数据处理

4.2.1 平差的重力数据

作为独立观测测量参与 2000 国家重力基本网平差的绝对重力观测值为 21 个基准点的 46 个绝对重力测量成果。参与平差的相对重力观测值, 在采用抗差估计剔除粗差后, 为 5 054 个相对重力测量成果, 其中包括 2000 国家重力基本网的基准点、基本点、引点、长基线和短基线等的相对重力测量值。

4.2.2 平差的基准和赋权

根据重力测量技术的特点, 在 2000 国家重力基本网的平差时采用了“弱基准”原则。即该网平差时不固定任何重力点的重力测量数据, 所有绝对重力观测值及相对重力观测值都赋以适当的权, 都作为观测测量参与平差而得到相应的改正数。

因此基准点的重力值经平差后也会获得微小的改正。

根据绝对重力观测值和相对重力观测的施测规范精度,结合观测值的实际精度,确定相应权,因此在2000国家重力基本网中绝对与相对重力观测量的权比确定为23:1。相对重力观测量的赋权则依据交通工具及施测地域的不同,将相对重力测量成果分为采用飞机、一般地区汽车、轮船和困难地区汽车等运输工具进行重力联测的四类,并进行了联测精度统计,求出各自的单仪器、单测回的平均中误差,依据平均中误差确定各自的先验权。在大量试验的基础上,最终确定采用飞机、一般地区汽车及困难地区汽车进行相对重力联测的权比为1:1:0.5。

4.2.3 平差成果及其精度评定

2000国家重力基本网平差后的主要成果为:389个重力点的重力值,其中基准点21个、基本点126个、基本点引点112个;附加联测点66个;8条国家级重力仪格值标定场的重力点64个。

2000国家重力基本网平差成果的内部精度为:所有联测重力点(389个)平差值的平均中误差为 $\pm 7.3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;其中,2000国家重力基本网259个重力点平差值的平均中误差为 $\pm 7.4 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;基准点: $\pm 2.3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$;基本点: $\pm 6.6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。最弱点精度为 $\pm 13.7 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

2000国家重力基本网平差成果的外部精度为:与外部检核点不符值的平均中误差为 $\pm 7.3 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,其中最大不符值为 $10.6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$,最小不符值为 $-10.2 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 。

4.3 建立2000国家重力基本网的技术进步

1. 我国首次独立自主使用当前精度最高的野外绝对重力仪FG5测定我国的重力基准。重力基准点的分布基本均匀、合理、覆盖范围大,特别是在我国绝对重力空白区的西北和东北首次布设了绝对重力点,并联测了香港、澳门以及南海等地区,使我国的重力基准点有效地控制了全网,不仅使2000国家重力基本网的覆盖面更广泛,而且确保了2000国家重力基本网的可靠性与高精度。

2. 2000国家重力基本网相对于1985国家重力基本网,除了所使用的绝对重力仪更先进,扩大了覆盖范围外,网的密度也有了较大改善,总点数由1985国家重力基本网的57点增至259点,基

准点由6点增至21点。

3. 2000国家重力基本网的数据处理相对于1985国家重力基本网也有了全面的改进,采用了方差分量估计、抗差估计、显著性检验确保了整网平差的质量。

4. 2000国家重力基本网的精度($\pm 7.4 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$)与1985国家重力基本网的精度($\pm 15 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$)相比,提高了一倍。

5 结束语

2000国家大地控制网是国家一项重大科学工程项目,是国家经济、国防、社会发展的基础地理信息,是国家空间基础设施的重要框架。

1. 2000国家GPS大地网提供的地心坐标的精度平均优于 $\pm 3 \text{ cm}$,为建立我国3维地心坐标系提供了高精度的坐标框架,与当前国际上相同规模的GPS网的精度相当,它也为我国沿用的天文大地网纳入3维地心坐标框架提供了控制。

2. 2000国家GPS大地网中的各个子网是在不同年代、不同施测方案、不同GPS轨道精度时布测的,因此该网的数据处理必须顾及各个子网在历元、坐标框架、地形变、轨道精度和施测方案等方面的差异,为此建立了顾及上述特点的GPS网数据处理的函数模型:以IGS站和网络工程点为坐标框架,顾及了各子网系统误差和基准不统一的影响,在子网函数模型中分别施加了3个旋转参数和一个尺度;随机模型采用了方差分量估计;解算方法采用了双因子相关观测抗差估计^[13],既保证了平差基准的统一,也部分抵偿了各种系统误差的影响。因此合理调整了各子网的贡献,各子网的方差分量估计值基本不受系统误差影响,控制了各子网精度标定不准对平差成果的影响^[9]。

3. 我国天文大地网在2000国家GPS大地网的控制下进行联合平差,由此获得了我国近5万地面点的3维地心坐标,使我国3维地心大地坐标框架的建设进入了一个新的水平。

4. 二网平差成功解决了超大规模法方程解算这一关键性技术问题,完成了全国天文大地控制网20多万个未知参数和50多万个观测数据的解算。在解算中首次应用了严密方差分量估计算法,从而保证了各类观测量的最佳权匹配。

5. 2000国家重力基本网为我国提供了统一的、高精度的重力基准。该网在我国大陆分布均

匀,建立了西部和东北地区的绝对重力点,并扩展到港澳地区和南海海域。

6. 2000 国家重力基本网采用了方差分量估计、抗差估计、显著性检验确保了整网平差的质量。利用附加模型参数补偿了我国相对重力测量的系统误差和基准误差,利用抗差估计保证了 2000 重力网的可靠性。

7. 2000 国家重力基本网于 1985 国家重力基本网相比,覆盖范围更大,重力点密度更大(总点数由 1985 网的 57 点增至 259 点,基准点由 6 点增至 21 点)。2000 国家重力基本网的精度($\pm 7.4 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$)与 1985 网($\pm 15 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$)相比提高了一倍。

本项目的技术创新可大体归纳如下:

1. 首次将全国各大部门各自完成的全国性的几何大地测量控制网和空间大地测量控制网统一起来,建成国家 3 维地心高精度大地控制网。

2. 建立了具有我国大地测量控制网特点的 GPS 网数据处理的函数模型,以 IGS 站和网络工程点为框架,引入旋转参数和尺度参数,保证了平差基准统一,同时也部分抵消了系统误差的影响。

3. 采用合理的随机模型,将方差分量估计引入到 2000 国家 GPS 大地网,合理调整了各子网的贡献,控制了各子网精度标定不统一对国家大地控制网的影响。

4. 首次将抗差估计、方差分量估计及具有系统误差补偿参数的函数模型同时用于 GPS 网的数据处理,使得各子网的方差分量估计值基本不受系统误差影响,且求得的方差分量和系统误差补偿参数不受异常观测的影响。

5. 对我国于上一世纪施测的天文测量控制网数据进行了统一改化,获得了相应于国际 FK 5 星表的我国的现代天文数据。

6. 通过将我国天文大地控制网数据与 2000 国家 GPS 控制网数据的联合处理,获得了我国近 5 万大地点的 3 维地心坐标。

7. 解决了在微型计算机上快速完成超大规模法方程解算的技术问题,采用 50 多万个观测数据解算了 20 多万个未知参数。

8. 首次将严密方差分量估计算法用于超大规模网,保证了各类观测量的最佳权匹配。

9. 首次将我国重力基本网扩展到南海海域和港澳地区,并加强了西部和东北地区的重力基准建设,建立了覆盖全国范围的基准统一的高精

度重力网。

10. 利用附加模型参数补偿了我国相对重力测量的系统误差和基准误差,利用抗差估计保证了 2000 国家重力基本网的可靠性。

本项目获得 2006 年度国家科技进步二等奖。本文作者对完成上述项目做出贡献的大地测量内外业工作者表示极大的敬意!对主持这些项目的单位表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] CHEN Jun-yong. On Modern Geodetic Datum of China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(5): 441-444. (陈俊勇. 我国现代大地基准的思考[J]. 武汉大学学报(信息技术版), 2002, 27(5): 441-444.)
- [2] CHEN Jun-yong. Necessity and Feasibility for a Geocentric 3D Coordinate System Employed in China[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(4): 283-288. (陈俊勇. 关于中国采用地心 3 维坐标系统的探讨[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 283-288.)
- [3] YANG Yuan-xi. Theory of Robust Estimation and Its Application[M]. Beijing: "August 1st" Publishing House, 1993. (杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.)
- [4] YANG Yuan-xi. Least Square Estimation with Adaptive Robust[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 1996, 25(3): 206-211. (杨元喜. 自适应抗差最小二乘估计[J]. 测绘学报, 1996, 25(3): 206-211.)
- [5] Dept of Surveying and Mapping in Modern China. Surveying and Mapping in Modern China[M]. Beijing: Social Science Publishing House, 1987: 51-71. (当代中国的测绘事业编写组. 当代中国的测绘事业[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1987: 51-71.)
- [6] CHEN Jun-yong(chief editor). Atlas of Geodesy[M]. Beijing: State Bureau of Surveying and Mapping, 1986. (陈俊勇(主编). 大地测量图集[Z]. 北京: 国家测绘局, 1986.)
- [7] CHEN Junyong. Progress of Gravimetry Technology in China[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1985, (3): 3-7. (陈俊勇. 我国重力测量技术进步的新阶段[J]. 测绘通报, 1985, (3): 3-7.)
- [8] NIU Zhi-jun, MA Zong-jin, CHEN Xin-lian, et al. Chinese Crustal Movement Observation Network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(3): 88-93. (牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 88-93.)
- [9] TANG Ying-zha, YANG Yuan-xi, SONG Xiao-yong. Data Processing and Results Analysis of 2000 National GPS Geodetic Control Network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 77-82. (唐颖哲, 杨元喜, 宋小勇. 2000 国家 GPS 大地控制网数据处理方法与结果分析[J]. 大地测

- 量与地球动力学, 2003, 23(3): 77-82.)
- [10] CHENG Ying-yan, CHENG Peng-fei, MI Jin-zhong, *et al.* Data Processing in Combine Adjustment of Spatial and Ground Network [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(2): 57-59. (成英燕, 程鹏飞, 秘金钟, 等. 空间网与地面网联合平差数据处理方法 [J]. 测绘科学, 2004, 29(2): 57-59.)
- [11] CHEN Jun-yong, LI Jian-cheng, NING Jin-sheng, *et al.* Study and Implementation of Qusai Geoid Model with High Precision and Resolution in China and Its some Provinces and Cities [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(4): 283-289. (陈俊勇, 李建成, 宁津生, 等. 中国新一代高精度高分辨率大地水准面的研究和实施. 武汉大学学报(信息技术版), 2001, 26(4): 283-

- 289.)
- [12] XU Cai-jun, WANG Hua, CHENG Peng-fei, *et al.* On The Correction of Crustal Movement in the Combine Adjustment of Astro-geodetic Network and GPS 2000 Network [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(1): P34-37. (许才军, 王 华, 程鹏飞, 等. 天文大地网与 GPS 2000 网联合平差的地壳形变改正研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(1): P34-37.)
- [13] YANG Yuan-xi, SONG Li-jie, XU Tian-he. Theory of Robust Estimation for Geodetic Correlated Observations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(2): 95-99. (杨元喜, 宋力杰, 徐天河. 大地测量相关观测抗差估计理论 [J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 95-99.)

(责任编辑: 张燕燕)

《测绘学报》征稿简则

《测绘学报》由中国测绘学会主办, 测绘出版社编辑出版。Ei 核心期刊, 第四届中国百种杰出学术期刊, 并入选中国科协精品科技期刊工程项目, 是国内外多个数据库收录期刊。

《测绘学报》欢迎国内外作者自由投稿。

征稿范围

本刊主要刊载大地测量、工程测量、摄影测量、遥感、地图学、海洋测量、矿山测量、地籍测绘、地理信息系统、信息传输与处理、测绘仪器、地图印刷等测绘及其相关相邻学科(交叉学科论文须侧重测绘领域)的学术论文。论文要求具有较高学术水平或独创意义或重大应用价值。

本刊也刊登国家有关重大工程的进展及相关测绘技术应用的快报论文, 以及博士论文摘要和博士后研究动态。

撰稿要求

来稿应论点明确, 结构严谨, 文字简洁, 数据可靠, 图表清晰, 不涉及国家政治、经济及技术秘密。论文可任选中、英两种文字之一撰写, 但需附另一文种的详细摘要和关键词。文中图名、表题采用中、英文对照, 采用法定计量单位, 署名符合著作权法规定, 并附第一作者简介。参考文献采用顺序编码制。基金资助项目附基金名称和项目编号。论文字数在 8 000 字以内。

快报论文要求扼要报道创新性显著、具有首报意义的研究成果或阶段性成果, 以及国际会议的邀请报告, 国家自然科学进步奖以及测绘科技进步奖的获奖项目。若以中文撰写, 全文 4 000 字以内; 若

以英文撰写, 全文 2 000 实词以内。投稿时请阐明文章的创新性及需要以测绘快报发表的理由。

博士论文摘要和博士后研究动态要求 2 000 字以内, 投稿时附上导师签名。

注意事项

鉴于本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“Chinainfo 电子期刊”, 向本刊投稿视为同意授权本刊出版印刷版、光盘版和进入因特网。

本刊采用三审制, 使用双盲法审稿, 来稿要求一式两份。本刊登载论文, 适当收取版面费(博士论文摘要和博士后研究动态不收版面费), 稿件一经刊用, 即付稿酬和寄送样刊给作者。如超过半年没有收到修改或退稿通知, 作者有权另行处理, 但请通知本刊编辑部(010—68531322, 68531225, chxb@periodicals.net.cn)。作者切勿一稿多投, 否则造成的经济损失, 作者应予赔偿。

欢迎上网查阅本刊内容, 欢迎通过电子邮件向本刊投稿。

本刊编辑部地址

北京复外三里河路 50 号

邮编: 100045

电话: 010-68531192, 68531322

E-mail: chxb@periodicals.net.cn;

chxb@chinajournal.net.cn

<http://www.sinomaps.com/newInternet/qikan.aspx> (全文免费阅读)

<http://chxb.periodicals.net.cn>

<http://chxb.chinajournal.net.cn>