

2000 国家大地坐标系下三角网平差技术研究

程传录, 王文利, 郭春喜, 马新莹

(国家测绘局 大地测量数据处理中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 原国家大地控制网成果是参心坐标系(1980 西安坐标系)成果, 而 2000 国家大地坐标系是地心坐标系, 参心坐标系下成果需通过各种改正与网平差, 才能得到 2000 国家大地坐标系成果。叙述了 2000 国家大地坐标系下三角网平差的技术方法、空间网数据处理和地面网数据归算, 介绍了平差模型和精度估计的方法, 利用实例进行了平差计算, 对结果进行了对比分析, 并利用实测数据对平差结果进行了验证, 取得了良好的效果, 为 2000 国家大地坐标系统的推广应用提供了良好基础。

关键词: 大地坐标系; 2000 国家大地坐标系; 三角网; 平差技术

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)04-0432-05

Adjustment of Triangulation Technique in China Geodetic Coordinate System 2000

CHENG Chuan-lu, WANG Wen-li, GUO Chun-xi, MA Xin-ying

(Geodetic Data Processing Centre, State Bureau of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The old national geodetic control network results belong to reference-ellipsoid-centric Coordinate System (1980 Xi'an Coordinate System) results, but China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) belongs to a geocentric geodetic coordinate system. In order to obtain results in CGCS2000 results in reference-ellipsoid-centric coordinate system should be added several corrections and joined in network adjustment. This paper describes the adjustment of triangulation technique in CGCS2000, the data processing of space network and the data reduction of ground network, and introduces the adjustment model and the method for accuracy estimation. Using the example, adjustment calculation is carried out, and the results are contrasted and analyzed. The experiment is well-tried, and favourable basis is provided for application of CGCS2000.

Key words: coordinate system; CGCS2000; triangulation net; adjustment

0 引言

20 世纪 80 年代, 通过中国天文大地网整体平差, 建立了由 48 433 个点组成的 1980 西安坐标系。中国天文大地网整体平差后, 在它的控制下陆续对中国 10 余万个在二等全面网的基础上加密的三、四等三角网点进行了平差, 获得了包括中国天文大地网在内约 15 万多个 1980 西安坐标系成果, 基本满足了一个时期国民经济建设和各种大比例尺测图的需要。几十年来, 国家三角网成果在国民经济建设、国防建设和科学研究等领域发挥了重要作用。

随着全球卫星定位技术的普及和精度的进一步提高, 传统大地测量工作发生了质的变化, 使大地坐标系由参心坐标系向地心坐标系转化。大地测量已经由平面控制和高程控制发展成为空间三维大地测量坐标系和动态的空间三维地心坐标系。中国建立了 2000 国家 GPS 大地控制网, 标志着地心坐标系的建立, 同时又完成了“全国天文大地网与 2000 国家 GPS 大地控制网联合平差”, 获得了中国近 50 000 点高精度的地心坐标成果, 已基本建立起了国家空间地心坐标系框架。中国天文大地网大都是一、二等三角点, 这些点密度较小且基本都

收稿日期: 2009-05-31

基金项目: 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室项目(200839)

作者简介: 程传录(1965-), 男, 陕西商洛人, 高级工程师, 从事大地测量数据处理研究。E-mail: cl_cheng@163.com

在大山顶上,使用起来非常困难,且损毁严重,加之受当时的技术水平等条件限制,存在着点位精度较低、现势性差等问题,难以适应国民经济建设及空间技术、信息技术的发展需要。另外,中国自 2008 年 7 月 1 日起,启用 2000 国家大地坐标系^[1-4],从 2008 年 7 月 1 日后新建设的地理信息系统应采用 2000 国家大地坐标系,所以需要获得国家三角点的 2000 国家大地坐标系成果,为各种控制网的建立提供控制基础,确定 1980 西安坐标系与 2000 国家大地坐标系的坐标转换模型^[5-7],获得各种比例尺地图改正量,确保 1980 西安坐标系向 2000 国家大地坐标系顺利过渡。因此,在地心坐标系下对全国的 10 余万三、四等三角点进行严密平差,把成果归算到 2000 国家大地坐标系是十分必要的。

1 参考基准

2000 国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000),属于地心坐标系,满足国际地球自转服务局(International Earth rotation and Reference systems Service, IERS)规定的条件,由 2000 国家 GPS 大地控制网点的地心坐标实现的,其精度优于 3 cm,参考框架为 ITRF97(International Terrestrial Reference Frame 1997),参考历元为 2000.0,椭球参数采用国际大地测量和地球物理联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)推荐的 GRS1980(Geodetic Reference System 1980)椭球。

椭球参数:长半轴 $a=6\,378\,137\text{ m}$;扁率 $f=1/298.257\,222\,101$;地球引力常数(含大气层) $Gm=3.986\,004\,418\times 10^{14}\text{ m}^3/\text{s}^2$;自转角速度 $\omega=7.292\,115\times 10^{-5}\text{ rad/s}$ 。

2 空间网数据处理

2.1 基线解算与网平差

采用 GAMIT/GLOBK 软件进行 GPS 基线计算,采用 IGS 精密星历,估计卫星钟差、接收机钟差、电离层、对流层延迟、卫星和接收机天线相位中心等各种改正。以国内及周边地区 IGS 站为框架点,顾及其坐标和速率,采取整体平差得到 2000 国家大地坐标系成果。

2.2 参考框架与参考历元的转换

已建成的非 ITRF97 参考框架 2000 0 历元的控制网成果,需通过参考框架和参考历元转换的方

法^[8]得到 2000 国家大地坐标系成果。

2.2.1 参考框架的转换

由于章动和极移的影响,引起了国际协定地极原点 CIO 的变化,所以 ITRF 框架每年也都在发生变化。根据不同时间段可定义不同的 ITRF(如:ITRF93、ITRF97 等),因此存在不同参考框架的转换问题。参考框架转换公式

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ITRF97}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ITRF}_{xx}} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_s & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D_s & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ITRF}_{xx}} \quad (1)$$

式中: $[T_1, T_2, T_3]^T$ 为平移参数; D_s 为尺度因子; $[R_1, R_2, R_3]^T$ 为旋转参数; xx 为参考框架代号。

2.2.2 参考历元的转换

在 ITRF 框架固定的前提下,控制点在不同历元下对应的坐标也是不同的,需要将同一框架下不同参考历元的坐标转换为 2000 0 的坐标成果,转换公式如下

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{2000.0} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t + (t-2000.0) \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: t 为原参考历元; $[V_x, V_y, V_z]^T$ 为控制点的速率。

3 地面网数据预处理

3.1 标石中心的方向观测值归算

将标石中心方向观测值加上垂线偏差改正、标高差改正和截面差改正,归算到椭球面上。

3.2 观测边的归算

电磁波测距仪之间的斜距投影到椭球面上(斜距化为平距改正、法截线收敛改正、过测站的平距化为过椭球面上相应的平距改正、弦距化为弧距的改正);基线(扩大边)、电磁波测距边归算到新的椭球面长度。

3.3 天文方位角的归算

根据试验资料可知,新的天文基准对整体平差时所用的天文经度、天文纬度和天文方位角的影响甚小,平差时不需重新计算,只需计算极移改正,化至新地极 CIO(IRP)系统。

3.4 垂线偏差的精细化计算

以现有的重力资料和数字高程模型作为重力

垂线偏差计算的基本数据,采用移去—恢复技术和应用地球重力位模型完成重力垂线偏差的计算。

3.5 高程异常计算

中国已相继完成了华北地区及华东华中地区等大地水准面精化,其精度达到厘米级,而中国新一代似大地水准面模型(CQG2000模型)总体精度达到分米级,这些模型可用于高程异常的计算。实际计算时采用Shepard内插法,就是以计算点为中心,取拟合半径 R 以内已知函数值的权中数,数据点上的权按距中心点的不同范围采用不同的权函数确定,使靠近中心点的权增大,远离中心点的权迅速减少。

3.6 数据检核

为保证平差数据正确性,在平差前应进行三角形闭合差、大地四边形和中点多边形极条件的检验。

三角形闭合差

$$W_{\Delta} = \alpha_A + \alpha_B + \alpha_C - \pi - \epsilon \quad (3)$$

式中: α_A 、 α_B 、 α_C 分别为三角形3个内角; ϵ 为球面角超。

极条件闭合差

$$W = \left[1 - \frac{\prod \sin \alpha}{\prod \sin \beta} \right] \rho'' \quad (4)$$

式中: α 、 β 为极条件的推进角; $\rho'' = 206\,264''$ 。

4 平差模型

4.1 平差函数模型

4.1.1 地面网函数模型

函数模型中的未知参数,取 dB 、 dL 形式,相应的概略大地坐标为 B^0 、 L^0 。地面网与空间网的重合点坐标取自空间网平差得出的结果 B_S 、 L_S ,其他地面网点的坐标近似值取自地面网点经坐标转换后的地心坐标 B_S 、 L_S 。

观测边误差方程

$$V_{sij} = a_{ij}dB_i + b_{ij}dL_i + c_{ij}dB_j + d_{ij}dL_j + S_{ij} \times 10^{-6} \times \Delta S + l_{ij} \quad (5)$$

天文方位角误差方程

$$V_{Aij} = p_{ij}dB_i + q_{ij}dL_i + r_{ij}dB_j + t_{ij}dL_j + \Delta A + l_{Aij} \quad (6)$$

方向观测误差方程

$$V_{ij} = -dz_i + p_{ij}dB_i + q_{ij}dL_i + r_{ij}dB_j + t_{ij}dL_j + l_{ij} \quad (7)$$

式中: a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 、 d_{ij} 、 p_{ij} 、 q_{ij} 、 r_{ij} 、 t_{ij} 为误差方程式系数; S_{ij} 为球面边长; i 、 j 为起止点号; A 为方位角;

dB_i 、 dB_j 、 dL_i 、 dL_j 、 dz_i 、 ΔA 、 ΔS 为未知数; l_{ij} 、 l_{Aij} 为自由项。

4.1.2 空间网函数模型

空间网函数模型为

$$\begin{bmatrix} VB_G \\ VL_G \\ VH_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dB \\ dL \\ dH \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: VB_G 、 VL_G 、 VH_G 分别为纬度、经度和大地高误差改正; dB 、 dL 、 dH 分别为纬度、经度和大地高未知数。

4.2 平差随机模型

平差中,观测量种类较多,若权的确定不合理,即随机模型不恰当,势必影响平差结果的正确性和精度评定的可靠性。

4.2.1 地面网观测值随机模型

地面网观测值指观测方向、方位角、观测边等,各类观测量定权的基本原则为权与中误差的平方成反比。方向观测的权为依据等级越高权越大的原则处理。

观测边的权

$$P_S = \mu^2 / 2m_S^2, m_S = \pm(m_a + m_b \times S) \quad (9)$$

式中: m_a 为仪器的固定误差; m_b 为比例误差; S 为边长; m_S 为观测边长误差。

重合点高程观测值的权

$$P_H = \frac{\mu^2}{2(m_h^2 + m_\zeta^2)} \quad (10)$$

式中: $\mu = \pm 2.113''$; m_ζ 为该重合点高程异常的中误差; m_h 为正常高程中误差; H 为大地高; h 为正常高程。

4.2.2 空间网观测值随机模型

空间网大地坐标(B , L , H)的方差协方差阵为 D_G ,其权值 $P_G = 1/D_G$ 。

4.2.3 空间网数据与地面网数据权比确定

权比确定的原则,即基准坐标应赋足够大的权。为了达到合理的权比,空间数据的协方差可能需要放大或缩小一个因子同空间数据相匹配。权分配的恰当与否,可由验后方差因子与单位权接近的程度来检验。

5 精度估计与平差检核

5.1 精度评定

5.1.1 单位权中误差

单位权中误差为

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V_G^T P_G V_G + V^T P V}{m - t}} \quad (11)$$

式中: $V_G^T P_G V_G$ 为空间网观测值改正数加权平方和; $V^T P V$ 为地面网观测值改正数加权平方和; m 为空间网和地面网观测值个数; t 为全网未知数个数。

5.1.2 点位中误差

点位中误差为

$$M_p = \frac{1}{3} m_0 \times 10^{-2} [Q_x (M/\rho)^2 + Q_y (N \cos B / \rho)^2]^{1/2} \quad (12)$$

式中: Q_x 和 Q_y 为协因数阵主元; m_0 为单位权重误差; M 为椭圆卯西半径; N 为椭球子午半径; B 为纬度。

直接边的边长和方位角中误差可利用误差方程系数及端点之间的协方差得到。

5.1.3 点位误差椭圆

长半轴

$$E^2 = \frac{1}{2} \sigma_0^2 (Q_x + Q_y + K) \quad (13)$$

短半轴

$$F^2 = \frac{1}{2} \sigma_0^2 (Q_x + Q_y - K)$$

$$K = \sqrt{(Q_x - Q_y)^2 + 4Q_{xy}} \quad (14)$$

X 轴与 E 轴的夹角

$$\tan 2\varphi_E = \frac{2Q_{xy}}{Q_x - Q_y}$$

式中: E 和 F 分别为点位误差椭圆长半轴和短半轴; Q_{xy} 为协因数; φ_E 为误差椭圆长半轴与水平方向夹角。

当 Q_{xy} 为正时, E 的方向在 I、III 象限; 当 Q_{xy} 为负时, E 的方向在 II、IV 象限。

5.2 检核

(1) 测站检核: 测站所有方向改正数之和应满足 $\sum_{i=1}^n V_i = 0$, n 为每测站观测方向数。

$$[P V V] = (A^T P L)^T X \quad (15)$$

式中: P 为权; V 为改正数; A 为系数阵; L 为常数阵; X 为变量。

(3) 几何条件检核:

三角形闭合差检验

$$\bar{\alpha}_A + \bar{\alpha}_B + \bar{\alpha}_C = \pi + \epsilon \quad (16)$$

式中: $\bar{\alpha}_A, \bar{\alpha}_B, \bar{\alpha}_C$ 分别为平差后三角形 3 个内角。

极条件检验

$$\left[1 - \frac{\Pi \sin \beta}{\Pi \sin \alpha} \right] = 0 \quad (17)$$

式中: $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ 分别为平差后极条件的推进角。

(4) 粗差探测与假设检验: 平差后通过检验改正数 V 可以检验平差模型的合理性及探测一组观测值中是否含有异常值, 采用经典方法 Baarda 数据探测法。

6 算例

某区 GPS 网由 224 点组成, 其中重合国家一、二等三角点 27 点。三角网资料主要有一、二等三角网、汤河口二等补测网、百花山二等补测网及东南二等补测网等, 全网数据经过分析整理后共有三角点 419 点, 方向 2 563 个, 边长 4 条, 方位角 2 组(图 1)。

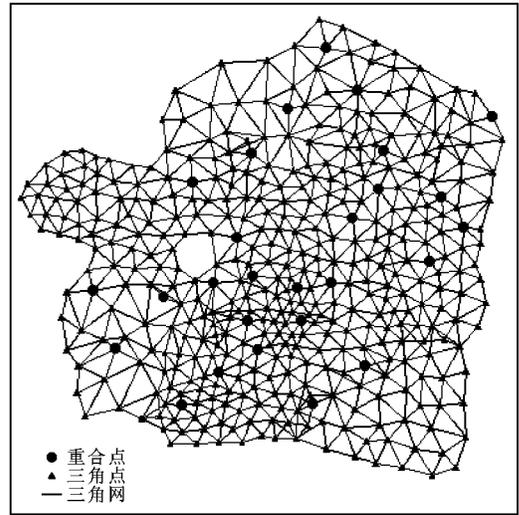


图 1 三角网

Fig. 1 Triangulation Net

GPS 网使用 GAMIT 软件进行精密数据处理, 得到了 ITRF97 框架 2000 0 历元的地心坐标成果。地面网按照 2000 国家大地坐标系的相关参数, 对方向观测值、基线边和方位角进行了归算, 并完成了三角形闭合差与极条件闭合差检验, 检验结果表明, 全网共组成三角形 659 个, 其三角形闭合差与极条件闭合差全部在相应等级限差之内。

平差原则是在空间网坐标/基线的约束下, 在 2000 国家大地坐标系下进行地面网平差。平差采用赫尔默特分区间接平差法, 在椭球面上进行; 区内点及联系点为二维, 地面网与 GPS 重合点采用三维坐标, 位置参数为三维 B、L、H, 即在 GPS 重合点上增加水准高程或三角高程观测误差方程, 与边长、方向、方位角观测误差方程一起组成法方程, 并与 GPS 网相应点的法方程迭加进行联合平差。

(1) 平差改正数检验。从图 2、3 中看出, 所有改正数分布基本符合绝对值小的误差比绝对值大

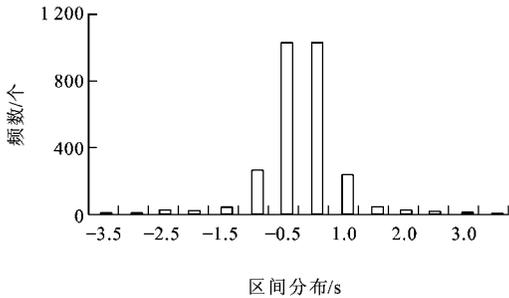


图 2 方向改正数统计

Fig. 2 Correct Direction for Statistics

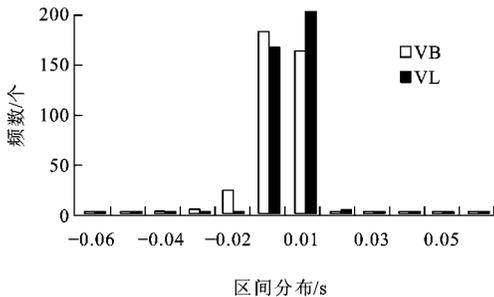


图 3 坐标改正数统计分布

Fig. 3 Correct Coordinate for Statistics

的误差出现的概率大, 绝对值相等的正负误差出现的概率相同, 方向和坐标改正数基本呈正态分布。

(2) 三角形闭合差与极条件闭合差检验。经平差后三角形闭合差与极条件闭合差检验统计结果表明, 全网共构成 659 个三角形, 其闭合差在 $-0.0003 \sim 0.0003$ s 之间; 构成大地四边形 8 个, 极条件闭合差在 $-0.0011 \sim 0.0004$ s 之间; 构成中点多边形 252 个, 其极条件闭合差在 $-0.0007 \sim 0.0008$ s 之间。

(3) 点位精度统计。对全部三角点的精度进行了估计, 点位精度优于 10 cm 的占 93.6%, 平均精度 3 cm, 最弱点的中误差为 16.1 cm, 位于整网西南部边缘地带, 距离控制点较远。

(4) 外部检验。为了检验平差成果的正确性和可靠性, 收集了测区 GPS-D 级网重合三角点 (36 点) 作为外部检验点, 其检验结果如表 1。

表 1 外部检验结果统计

Tab. 1 External Check Results

区间/m	(0, 0.02)	(0.02, 0.04)	(0.04, 0.06)	(0.06, 0.08)	(0.08, 0.10)
纬差/%	38.9	44.4	13.9	2.8	0.0
经差/%	36.1	47.2	8.3	5.6	2.7

从检验结果可以看出, 在 4 cm 以内的占 83.33%, 其他点也在 10 cm 以内, 说明平差结果是正确的, 也是可靠的。

7 结语

目前中国已完成了精化区域(江西、浙江、福建)大地水准面精化试点、华北地区(北京、天津、河北、山西)大地水准面精化、华东华中(陕西、河南、河北、山东、湖南、湖北、安徽、上海)区域大地水准面精化等工作, 完善了这些地区的控制网, 获得了一些既有 1980 西安坐标系成果又有 2000 国家大地坐标系成果的重合点, 而这些重合点基本上都是国家三、四等三角点, 这为“2000 国家大地坐标系下三角网平差”打下了良好的基础。该项目的开展将会建立一套均匀覆盖中国、数量 15 万余点、统一的空间坐标系框架成果, 充分发挥中国三、四等三角点的作用, 更好的满足国民经济建设和基础测绘中广大 GPS 用户对三维、高精度大地基准的需求, 解决现有测量手段 GPS 和现有 1980 西安坐标系成果之间存在的矛盾, 满足用户对三维大地坐标框架的急需。

2000 国家大地坐标系下三角网平差涉及经典大地测量学、天文测量学、重力测量学、空间大地测量学、近代平差理论以及计算机科学等多学科领域, 是一项理论性强、技术复杂、科研与生产紧密结合的大型工程, 把国家三角网与 GPS 大地控制网融为一体, 建立高精度地心坐标系, 将极大改善国家三角网的现势性和质量, 对保持中国大地坐标系的先进性、科学性和适用性具有重要意义, 也是现代大地测量在这一领域的一个重要发展过程。

参考文献:

- [1] 陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 1-8.
- [2] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(6): 1-5.
- [3] 国家测绘局. 国家测绘局公告(2008 年第 2 号)[N]. 中国测绘报, 2008-06-27(1).
- [4] 魏子卿. 我国大地坐标系的换代问题[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(2): 138-143.
- [5] 周忠谟. 地面网与卫星网之间转换的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1984.
- [6] 熊介. 椭圆大地测量学[M]. 北京: 解放军出版社, 1988.
- [7] 国家测绘局大地测量数据处理中心. 全国天文大地网与 GPS 网联合平差技术报告[R]. 西安: 国家测绘档案馆大地测量档案分馆, 2005.
- [8] Dong D, Yunck T, Heflin M. Origin of the International Terrestrial Reference Frame[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B4): 2200.