

珠穆朗玛峰高程测量

郭春喜, 王 斌, 程传录, 庞尚益

(国家测绘局 大地测量数据处理中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 综合利用 GPS 定位、水准测量、三角测量、电磁波测距、重力测量、雷达测地及大地水准面精化等技术, 精确确定了珠峰顶的高程和平面位置, 实现了迄今为止对珠峰高程最为精确的测量。介绍了珠峰高程控制网和 GPS 控制网的测量概况, 阐述了利用常规大地测量和 GPS 技术确定珠峰高程的数据处理方法以及局部重力场精化等技术, 为进一步研究珠峰地区板块运动提供了良好基础。

关键词: 珠穆朗玛峰; 高程测量; GPS 定位; 水准测量; 三角测量; 大地水准面精化

中图分类号: P224 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)01-0106-05

Qomolangma Height Surveying in 2005

GUO Chun-xi, WANG Bin, CHENG Chuan-lu, PANG Shang-yi

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

Abstract During the 2005 height determination of Qomolangma peak, the plane position and geodetic height of Qomolangma peak were determined precisely with the multipurpose use of GPS position-setting, leveling, triangular surveying, distance measurement with electromagnetic wave, gravitation surveying, radar geodesy and precise determination of geoid, which realized the most precise height surveying of Qomolangma peak so far. This paper mainly introduces the general surveying situation by leveling control network and GPS control network in Qomolangma peak, and describe the data processing using general geodesy and GPS as well as the technology of precise determination of local gravity field and so on. Moreover, favourable basis is provided for further study of the plate movement in the Qomolangma region.

Key words: Qomolangma Feng; height surveying; GPS position-setting; leveling; triangular surveying; precise determination of geoid

0 引言

自中国 1975 年发布珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)高程之后, 30 年来由于地壳的运动、覆雪深度变化等因素影响, 珠峰高程的现势性、权威性已相对减弱。因此, 国内外一些部门和组织陆续对珠峰进行了多次考察并对其进行高程进行了测定, 特别是 1998~2000 年美国国家地理学会为纪念其成立 50 周年的纪念活动, 在山顶架设 GPS 接收机, 测定并公布了最新的珠峰高程。在国内外造成了混乱。为维护珠峰高程的权威性和唯一性, 国家测绘局于 2005 年组织有关部门采用多种技术手段对珠峰高程进行了复测, 实现了迄今为止珠峰

高程最为精确的测量。笔者着重从高程控制测量、GPS 测量、局部重力场精化^[1-2]及珠峰高程计算等几个方面阐述珠峰高程测量。

1 高程控制测量

2005 珠峰高程测量时, 水准路线的起算点为 I 萨拉 40 基, 用二等水准测至大本营, 然后用三等水准测至支 1 点, 从支 1 点用测距高程导线和跨河水准测量方法将正常高传至交会峰顶的 6 个交会点。水准路线起算点“ I 萨拉 40 基上”的高程采用国家第二期一等水准网复测数据处理成果, 高程基准为 1985 国家高程基准, 经统计分析, I 萨拉 40 基相对

收稿日期: 2008-09-20

基金项目: 现代工程测量国家测绘局重点实验室项目(ES-SBSM-(07)-11); 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: 郭春喜(1963-), 男, 陕西大荔人, 教授级高级工程师, 工学博士研究生, 从事物理大地测量与数据处理研究。E-mail: sacgdp@

hylin.k.com.cn

于青岛水准原点的高程中误差为 $\pm 47.45\text{ mm}$ 。

1.1 水准观测数据处理

二等水准网平差计算采用间接平差法,三等支线纳入二等水准网内一并推算高程。平差以加过各项改正后的观测高差为元素(考虑到珠峰地区重力与地形变化情况,三等水准路线也加入了重力异常改正),按测站数定权,以待定结点的正常高程为未知数,将路线交叉点作结点,进行平差。

1.2 测距高程导线数据处理

测距高程导线是从三等水准支线上“支1”点起测的。测距高程导线部分的计算:单向高差计算时,先分别算出每光段对向观测的垂直和边长的平均值,再进行对向观测(往返测)高差的计算并取平均值,然后进行高程计算。

中绒—西绒跨越冰塔林,外业采用跨河水准方法布设,观测采用测距高程导线方法进行。

高程计算:以每光段距离的平均值及每光段各测回垂直角计算出每光段的高差(个数为垂直角的测回数),在此基础上计算对向观测的高差值及两者的平均值。跨河水准的四段高差构成一个闭合环:中绒—中绒副—西绒—西绒副—中绒。此后进行平差计算,按高差绝对值进行闭合差的分配,进而算出各点高程。

2 GPS 网数据处理

根据外业观测情况,对青藏地区地壳运动 GPS 监测网、珠峰 GPS 控制网及峰顶 GPS 联测网数据分别处理。在青藏地区地壳运动 GPS 监测网和珠峰 GPS 控制网数据处理时,将周边地区的 GPS 连续运行站纳入其中,青藏地区地壳运动 GPS 监测网以 GPS 连续运行站为框架点,珠峰 GPS 控制网以青藏地区地壳运动 GPS 监测网点为基准,而峰顶 GPS 联测网则以珠峰 GPS 控制网为基准。

2.1 GPS 连续运行站数据收集与采用

根据珠峰地区各 GPS 网的地理位置分布,数据处理时收集了珠峰周边地区的 GPS 连续运行站的数据。

(1)青藏地区地壳运动 GPS 监测网:选取珠峰周边地区的 17 个 GPS 连续运行站点纳入到数据处理中,其中,中国 GPS 连续运行站有拉萨(LHAS)、塔什库尔干(TASH)等 13 个站,国外 GPS 连续运行站有印度(IISC)、中亚(KIT3)、新加坡(NTUS)及巴林(BAHR)4 个站。

(2)珠峰 GPS 控制网:选取靠近珠峰地区的 13 个 GPS 连续运行站点纳入到数据处理中,其中,中国 GPS 连续运行站有拉萨(LHAS)、塔什库尔干(TASH)、WUSH(乌什)、德令哈(DLHA)、乌鲁木齐(URUM)及定日(RS44)等 9 个站,国外 GPS 连续运行站有印度(IISC)、中亚(KIT3)、新加坡(NTUS)及巴林(BAHR)4 个站。

(3)峰顶 GPS 联测网:因为峰顶 GPS 联测网的数据采样间隔为 1 s,而 GPS 连续运行站的采样间隔为 30 s,所以峰顶 GPS 联测网数据处理不加入珠峰周边地区的 GPS 连续运行站,仅将临时 GPS 基准站纳入其中。

2.2 GPS 基线计算

基线解算顾及了卫星轨道、解算模式、卫星截至高度角、对流层延迟参数、大气折射模型、海潮模型、周跳剔除、坐标约束和数据采样间隔等因素。

根据观测情况采用不同的数据采样间隔:青藏地区地壳运动 GPS 监测网采样间隔为 30 s;珠峰 GPS 控制网采样间隔为 15 s;在峰顶 GPS 联测网数据处理时,考虑数据量和大气等因素,不进行天顶方向对流层延迟和大气梯度估计,分别采用 1、2、5 s 采样间隔进行数据处理,其结果变化很小,最终采用精度较好的 2 s 采样静态数据处理结果。

2.3 GPS 网平差

GPS 网平差计算在 WGS-84 椭球上采用逐级控制的原则进行三维整体平差处理。GPS 外业从 2005 年 3 月 16 日(Day075)到 6 月 4 日(Day155)完成,平均观测时间为 Day115,平均瞬时观测历元为 2005.315,根据 GPS 连续运行站的坐标和速度场,将起算点坐标归算为 2005.315 参考历元。

2.3.1 青藏地区地壳运动 GPS 监测网

青藏地区地壳运动 GPS 监测网平差数据采用全球 IGS 站的 H 文件和 GPS 监测网的 H 文件。在 ITRF2000 框架下,选取全球比较稳定的 56 个 IGS 站作为 GPS 监测网的框架点,并给予 2δ 的约束,完成三维约束平差。

2.3.2 珠峰 GPS 控制网

珠峰 GPS 控制网包括珠峰 GPS 控制网、GPS 联测点、峰顶联测交会副点、垂线偏差试验 GPS 网及 GPS 临时基准站等。在 ITRF2000 框架下,将 IGS 站和监测网点给予 1δ 的约束,完成三维约束平差。

2.3.3 峰顶 GPS 联测网

在 ITRF2000 框架下,将临时基准站和珠峰

GPS 控制网点固定, 做三维约束平差。

3 珠峰局部重力场精化

3.1 基础数据整理与处理

珠峰地区局部重力场精化^[1-4]所采用的基础资料, 主要包括以下几个方面:

(1)以珠峰地区 SRTM3(航天雷达测绘任务获得的 3"地形数据)为基础, 结合 1 : 50 000 DEM 和全球 GTOPO30 数据, 综合确定珠峰地区分辨率为 3"×3"的数字地形模型。

(2)收集与采用了 2 501 个重力点成果, 包括中国(尼泊尔)重力剖面成果和中国在珠峰地区施测的重力成果。

(3)采用重力点成果、3"×3" DEM 数据, 完成了 30"×30"和 2.5'×2.5'平均空间异常的计算。

(4)采用 44 个 GPS 水准点作为拟合珠峰地区重力似大地水准面的重控制数据。

3.2 珠峰地区均衡模型及均衡深度确定

由于珠峰地区重力资料较少, 因此在重力归算和推估中应采用合适的均衡模型和抵偿均衡深度。1975 年计算珠峰地区均衡改正时, 因受当时计算条件等限制, 采用的是海福特模板, 均衡抵偿深度采用 113.7 km。本次计算珠峰地区均衡改正时, 拟采用目前运用较为广泛的爱黎模型, 采用快速算法进行积分。为此采用普拉特模型和爱黎模型分别进行了试算, 并对两种模型的计算结果进行了比较, 同时通过试算确定了爱黎模型在珠峰地区应采用的均衡深度。

在两种均衡模型的试算中, 主要采用登山路线上 5 个重力点的地形均衡异常的计算结果进行比较分析。采用普拉特均衡模型计算时, 均衡低偿深度采用 113.7 km, 积分半径采用 166.7 km, 对于爱黎模型, 选择了 34、35、37、40 km 4 个均衡深度分别计算了登山路线上 5 个重力点的地形均衡异常。从两种均衡模型的几种试算结果可以看出, 均衡模型选用爱黎模型, 均衡深度采用 34 km 时, 登山路线上 5 个重力点的均衡异常的数值小且变化均匀, 因此在计算珠峰地区均衡改正时, 均衡模型选择爱黎模型, 均衡深度采用 34 km。

3.3 珠峰地区似大地水准面的确定

利用珠峰地区加密重力点成果、高分辨率数字地形模型、高阶次的地球重力场模型及分布较均匀、现势性较好的 GPS 水准成果, 采用重力法(Moloden-

sky 原理)及移去-恢复技术完成了珠峰地区分辨率为 2.5'×2.5'的高精度似大地水准面精化工作。计算时选择 EGM96、WDM94、IGG05B、DQM2000D 和 CG03C 5 种参考重力场模型进行了试算比较, 确定了最终采用的似大地水准面模型。

(1)选择 EGM96、WDM94、IGG05B、DQM2000D 和 CG03C 作为重力场模型, 分别完成了珠峰地区模型似大地水准面和模型平均空间异常计算。

(2)由实测的平均空间异常、模型平均空间异常以及前面计算的地形改正, 计算剩余法异常, 用剩余法异常计算区域重力似大地水准面。

(3)在采用重力法计算区域重力似大地水准面时, 考虑到地球重力场模型的阶次和积分半径大小对似大地水准面的计算精度有着重要影响, 因此, 采用 Molodensky 公式, 每个地球重力场模型选用 360 阶次, 按 5 km 间隔, 选择从 20 km 到 100 km 的积分半径进行区域重力似大地水准面的试算。经比较分析, 采用 55 km 积分半径, 选择 EGM96、WDM94、IGG05B、DQM2000D 和 CG03C 作为参考重力场模型, 分别完成了珠峰地区区域重力似大地水准面的计算。

(4)区域重力似大地水准面采用的是 GRS80 椭球, 而 GPS 水准网则使用的是 WGS84 椭球, 加上重力基准等因素的影响, 使得 GPS 水准与重力似大地水准面存在一定的差异, 对此利用 44 个 GPS 水准点, 采用二元二次多项式拟合法, 分别将 EGM96、WDM94、IGG05B、DQM2000D 和 CG03C 作为参考重力场模型计算的区域重力似大地水准面拟合适配于该地区 GPS 水准网, 由此获得了相应的拟合似大地水准面成果及有关的精度信息。

(5)利用拟合似大地水准面的格网成果, 通过内插方法求得各 GPS 水准点的内插高程异常值, 然后将内插高程异常值同 GPS 水准点的已知高程异常值进行比较, 从而计算拟合似大地水准面的高程异常残差中误差。从计算结果发现, 分别选择 EGM96、WDM94、IGG05B、DQM2000D 和 CG03C 作为参考重力场模型确定的珠峰地区拟合似大地水准面的精度比较接近, 考虑到 EGM96 地球重力场模型在全球的广泛应用, 并结合该模型在中国的应用实践, 选择 EGM96 作为参考重力场模型确定的珠峰地区拟合似大地水准面作为最终似大地水准面。

利用最终确定的似大地水准面, 根据珠峰峰顶坐标, 采用 Shepard 插值法完成了珠峰顶高程异常

值的推算,求得珠峰顶高程异常值。

3.4 珠峰顶重力值推算

完成登山路线上5个实测重力点及珠峰顶的空间改正、层间改正计算以及局部地形改正、均衡改正计算。根据登山路线上5个重力点的地形均衡重力异常成果推估珠峰顶地形均衡重力异常值($0.5 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$),利用珠峰顶地形均衡重力异常及下述公式完成了珠峰顶重力值的推算

$$g = \Delta g_{is} + \gamma - \xi_1 - \xi_2 - \xi_{te} - \xi_{is} \quad (1)$$

式中: g 为珠峰顶重力值; Δg_{is} 为地形均衡重力异常; γ 为珠峰顶正常重力值; ξ_1 为空间改正; ξ_2 为层间改正; ξ_{te} 为局部地形改正; ξ_{is} 为均衡改正。

3.5 珠峰地区垂线偏差计算

在2005珠峰高程测量实施时,为满足观测数据归算到WGS-84椭球的要求,需要求解各控制点相应于WGS-84椭球的地面垂线偏差和。因此采用珠峰地区 $30'' \times 30''$ 和 $2.5' \times 2.5'$ 格网重力异常数据作为地面重力垂线偏差计算的输入数据,采用国内外广泛应用的移去-恢复技术和应用高阶次地球重力位模型(EGM96)完成珠峰附近大地点地面重力垂线偏差的计算。同时采用珠峰附近实测天文点WGS-84椭球的垂线偏差对地面重力垂线偏差进行系统转换,获得珠峰附近大地点相应于WGS-84椭球的地面垂线偏差。

4 传统大地测量方法确定珠峰平面位置与高程

当峰顶成功竖立测量觇标后,在珠峰脚下6个交会点(大本营基上、III7、西绒、中绒、东绒2、东绒3)上采用传统大地测量技术对珠峰峰顶进行了两个白天的交会观测(垂直角、水平角和测距)。传统大地测量方法确定珠峰平面位置是将交会观测获得的方向观测值和边长观测值归化到WGS-84椭球上,相关参数均采用WGS-84椭球面上的相应值,利用归化后的方向观测值和椭球面边长,在WGS-84椭球面上通过边角网间接平差方法计算珠峰的平面位置。

4.1 传统大地测量方法确定珠峰平面位置

本次高程测量未实测峰顶的气象元素,数据处理时利用探空气象数据计算各个时间段海拔高度在848 m处的气压、干温、湿温。

边角网平差时,起算点为12个,分别为大本营基上、III7、西绒、中绒、东绒2、东绒3六个交会点与

北(微网)、A1、西绒副、中绒副、东绒2副、东绒3副6个水平角观测零方向点,待定点仅珠峰一个。起始点坐标取自珠峰GPS控制网平差结果。通过平差获得了峰顶的点位坐标,与峰顶GPS联测网成果比较,纬向相差 $0.003\,05''$,经向相差 $0.004\,97''$ 。

4.2 传统大地测量方法确定珠峰大地高

利用6个交会点交会珠峰峰顶的大地高时发现西绒交会点有粗差,最终采用5个交会点(大本营基上、III7、中绒、东绒2和东绒3)的测量成果计算珠峰峰顶雪面大地高。

4.2.1 气温垂直梯度和大气垂直折光系数的计算

气温垂直梯度值计算:分别对2005年5月22日探空气象数据的几个时间段,从海拔高度5600~9000 m每隔200 m取温度与气压值的平均值计算一个值,作为200 m高度范围的气温垂直梯度 τ ,然后将该时间段的各个200 m高度范围的气温垂直梯度 τ 取平均值作为该时间段的气温垂直梯度 τ 值。

计算 k 值时 τ 值取用原则:根据垂直角观测时间,12:00以前观测的取8:00、10:00、12:00三个时间段的 τ 值的平均值,12:00以后观测的取12:00、14:00、20:00三个时间段的 τ 值的平均值。

4.2.2 各交会点至珠峰峰顶雪面的大地高差计算

利用5个交会点及传统大地测量方法确定的珠峰的平面位置反解各交会点至珠峰的球面边长(WGS-84椭球),利用珠峰与各交会点的球面边长分别计算峰顶与各交会点的大地高差。

鉴于外业观测时在各交会点 i 上均对珠峰进行了多个测回的观测,因而在每个交会点上形成了多个大地高差,最终采用各交会点至珠峰峰顶雪面大地高差的平均值采用加权平均法推算珠峰峰顶雪面大地高。计算公式为

$$H_Q^H = \sum_{i=1}^n P_i H_{Q_i}^H \bigg/ \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

$$H_{Q_i}^H = H_i^H + \Delta H_{Q_i}, P_i = N_i / S_i^2$$

式中: H_Q^H 为珠峰峰顶雪面的大地高; $H_{Q_i}^H$ 为各交会点得到的珠峰峰顶雪面大地高; H_i^H 为各交会点的大地高; ΔH_{Q_i} 为交会点至珠峰峰顶雪面的大地高差; n 为交会点总数; P_i 为各交会点求得的珠峰峰顶雪面大地高的权函数; N_i 为各交会点垂直角测回数; S_i 为用大地坐标反解获得的椭球面边长。

传统大地测量方法计算珠峰峰顶雪面大地高精度评定公式为

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[P V V]}{[P] (n-1)}} \quad (3)$$

式中: $V = H_Q^H - H_{Q_i}^H$; P 为权函数。

用传统大地测量方法确定的珠峰峰顶雪面大地高的精度为 $\pm 0.0564\text{ m}$ 。

5 珠峰峰顶雪面高程计算

5.1 珠峰峰顶雪面大地高与正常高计算

根据 GPS 技术和传统大地测量技术分别计算的珠峰峰顶雪面大地高^[5], 采用加权平均法综合确定珠峰峰顶雪面大地高。

$$H^H = \frac{P_{\text{GPS}} H_{\text{GPS}}^H + P_Q H_Q^H}{P_{\text{GPS}} + P_Q} \quad (4)$$

式中: H^H 为利用 GPS 技术和传统大地测量技术综合确定的珠峰峰顶雪面大地高; H_Q^H 为传统大地测量技术综合确定的珠峰峰顶雪面大地高; H_{GPS}^H 为 GPS 技术确定的珠峰峰顶雪面大地高; P_{GPS} 、 P_Q 为两种技术确定珠峰峰顶雪面大地高的精度计算的权。

利用珠峰峰顶雪面的大地高和高程异常值, 计算得到珠峰峰顶雪面正常高。

5.2 珠峰峰顶雪面正高(海拔高)计算

珠峰峰顶正常高和正高换算, 也就是珠峰顶似大地水准面和大地水准面差值计算。珠峰顶正常高 H_Q^H 与正高(海拔高) H_Q^ξ 的换算公式为

$$H_Q^\xi = \frac{\gamma_m}{g_m} H_Q^H \quad (5)$$

式中: γ_m 、 g_m 分别为沿相应力线上诸点的正常重力和实测重力的平均值。根据 γ_m 和 g_m 的计算结果, 求得 $H_Q^\xi - H_Q^H$ 的值为 1.267 m 。

6 峰顶冰雪层厚度雷达探测数据处理

珠峰峰顶常年冰雪覆盖, 珠峰峰顶冰雪层厚度与珠峰峰顶岩面的高程及其变化, 一直是学者关注的一个问题。2005 年珠峰测高时, 中国登山测量队员采用雷达探测技术测定珠峰峰顶冰雪覆盖层的厚度, 提高了测峰顶雪深的精度和可靠性。

经过原始数据读取、参数设置、漂移去处、背景去噪、信号增益、滤波处理、去除坏道、时深转换等步骤的处理, 就获得带有深度的层位信息。对觇标处冰雪层厚度探测剖面分层后, 对各采样点统计分析, 其厚度平均值为 3.50 m , 最厚为 3.72 m , 最浅为

3.21 m , 顾及深度分辨误差为 $\pm 0.055\text{ m}$ 和速度标校误差为 $\pm 0.080\text{ m}$, 综合评定其精度为 $\pm 0.097\text{ m}$ 。

7 结语

(1)首次综合利用 GPS 定位、水准测量、三角测量、激光测距、重力测量及雷达等技术精确确定了珠穆朗玛峰的平面位置和高程。

(2)使用珠峰周边地区重力数据以及 SRTM3、1:50 000 DEM、GTOPO30 地形数据, 完成了珠峰地区局部重力场精细结构的确定。选择 EGM96 作为参考重力场模型, 采用移去-恢复技术, 完成了珠峰地区分辨率为 $2'5'' \times 2'5''$ 高精度似大地水准面的确定, 其精度为 $\pm 0.090\text{ m}$; 并据此推算了珠峰峰顶高程异常值。此外, 还使用了 WDM94、IGG05B、DQM2000D、IG03C 参考重力场模型进行了计算和比较, 验证了结果的可靠性。采用重力法完成了垂线偏差计算, 满足了地面观测值归算和大地高计算的要求。

(3)中国首次采用雷达探测技术完成珠峰顶冰雪层厚度的测量。

(4)对珠峰高程测量的各个环节, 除采用先进、实用的计算理论与方法外, 还尽可能采用其他检核方法, 进一步检验计算结果, 从而确保了计算结果的正确、可靠。

(5)2005 珠峰测量完成的 GPS、水准成果以及新收集的重力、DEM 等资料, 大幅度地丰富了珠峰地区基础测绘资料, 对进一步研究珠峰及临近地区地壳水平与垂直运动及峰顶高程变化积累了更加丰富的基础数据。

参考文献:

[1] 管泽霖, 宁津生. 地球形状及外部重力场[M]. 北京: 测绘出版社, 1981.

[2] 陆仲连. 地球重力场理论与方法[M]. 北京: 解放军出版社, 1996.

[3] 郭春喜, 王惠民, 王 斌. 全国高分辨率格网地形和均衡改正的确定[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 201-205.

[4] 郭春喜, 伍寿兵, 王惠民, 等. 区域厘米级大地水准面的确定[J]. 测绘通报, 2000(9): 3-4.

[5] 边少锋, 张赤军. 论大地水准面与似大地水准面的差距[C] // 陈俊勇. 大地测量学论文专集——祝贺陈永龄院士 90 寿辰. 北京: 测绘出版社, 1999: 119-124.