

文章编号: 1671-8860(2003)06-0675-04

文献标识码: A

# 珠峰高程测定中的有关问题及思考

张赤军<sup>1</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉市徐东路 174 号, 430077)

**摘要:** 对珠峰高程的精度、雪层的厚度、高程基准——大地水准面的精度、地壳的垂直运动以及如何将似大地水准面转换到大地水准面进行了讨论。结果显示,采用正常高加转换公式中的重力或地形资料求取珠峰正高比较合适。

**关键词:** 珠穆朗玛峰; 高程精度; 大地水准面

中图法分类号: P223; P216

## 1 历次珠峰测量结果及精度评估<sup>[1~7]</sup>

大地测量中的高程测量实际上是重力位差的测量, 它涉及几何和物理量的测量, 但在 1966 年以前的珠峰测量中都未作过重力测量。随着测量方法和手段的改进以及理论与实践的发展, 其精度也日益改进。对珠峰作的第一次测量, 是在 1843~1850 年期间距珠峰很远的地方进行的, 因未详细顾及折光和垂线偏差, 又缺少大地水准面知识, 故误差很大, Waugh 的计算结果为 8 840 m。1880~1883 年和 1902 年印度测量局再次测量, Burrard 计算的结果为 8 882 m。由于同样的原因, 其误差亦大, 在 20 世纪 70 年代前, 我国一直沿用此值。1922 年 Graff-Hunter 在对折光系数充分研究的基础上, 并粗略地作了大地水准面的估算, 得到珠峰高程为 8 862 m。1929 年 Bomford 改进了前人的大地水准面的结果, 求得珠峰的高程为 8 854 m。1952~1954 年 Gulatee 的结果为 8 846.2 m, 由于测站距峰顶较近, 该值比以往有所改善。1999 年美国人用 GPS 测量的结果为 8 850 m, 由于手段先进, 估计误差较小。我国于 1966~1972 年、1975 年、1993 年、1997 年、1998 年、1999 年对珠峰作了观测和研究, 并从 1966 年率先进行了重力测量, 高程的结果分别为 8 849 m(雪面), 8 848.13 m(基岩), 8 848.82 m

(雪面)与 8 847.82 m(基岩), 8 848.58 m(雪面), 8 848.45 m(雪面), 这些精度均高于国外的结果。

在 1966~1972 年期间, 我国共用 34 个方向对珠峰进行交会, 并顾及垂线偏差和重力异常及大地水准面的影响, 故精度较高, 但在山顶未立觇标, 这会引起一些误差。在 1975 年的观测中, 不仅树立了觇标, 同时又测得冰雪厚度, 故精度有所改善。1993 年的结果是根据 GPS 和激光测距两种方法求得的, 其精度更有改善。1997 年的结果是在前人的基础上进行的, 在将正常高换为海拔高时, 顾及了重力垂直梯度的影响以及更为合理的峰顶重力的估值, 其精度也是相当高的。1998 年的结果是交会山头所得, 其精度较低, 而 1999 年的结果则要高些。

## 2 4 种影响不可忽视

### 2.1 地壳的垂直运动

上述多个高程结果是在不同年代推求的, 由于喜马拉雅是印度板块与欧亚板块碰撞的聚集处, 板块的相互挤压, 导致喜马拉雅一带在南北方向上的缩短, 以及在垂直方向上的隆升, 这已为国内外大地测量观测结果所证实。中国科学院测地所根据 1992~1996 年藏南 GPS 的数据, 推求了珠峰北侧的喜马拉雅块体的隆升率为 5.3 mm/a。近数 10 年来, 国内外在喜马拉雅及其附近作了若干形变观测, 其结果见表 2<sup>[7]</sup>。

表 1 历次珠峰高程的观测计算结果及误差估计

Tab. 1 Observation Heights and Error Estimations in Qomolangma Peak

观测年代	观测手段	观测结果/m	误差估计	备注
1843~1852	三角高程	8 840(雪面)	大	由 6 个距珠峰 175~191 km 的点交会, 初步考虑了折光影响。
1902	三角高程	8 882(雪面)	大	作了折光改正, 意识到垂线偏差、大地水准面的重要性。
1922	三角高程	8 862(雪面)	较大	详细地研究折光, 粗略地考虑了大地水准面的影响。
1929	在前人基础上作计算	8 854(雪面)	较大	改善了大地水准面的结果。
1952~1954	三角高程	8 846.2(雪面)	±1.5 m	距珠峰较近(48~76 km), 顾及了折光、垂线偏差及大地水准面影响。
1966~1972	常规多种手段 由正常高求正高	8 848.98(雪面)	±0.22 m <sup>[3]</sup> ±2.0 m <sup>[11]</sup>	作天文、三角、水准、重力测量, 进行折光、垂线偏差、大地水准面改正。
1975	常规多种手段 由正常高求正高	8 849.05(雪面)	±0.35 m ±0.5 m	测点更接近珠峰且在峰顶设立了觇标, 增加了重力测点。
1992	GPS	8 848.91(雪面)	±0.3 m	黄海 85 高程系统。
1993	三角高程加 GPS	8 848.82(雪面)	±0.29 m	常规加现代 GPS, 更为精确, 用 WGS84 系、EGM-96 模型。
1997	由正常高求正高 的一种新计算	8 847.82(基岩) 8 848.76(雪面)	±0.28 m	采用下式计算: $H_0 - H_n = -\frac{\Delta g_b}{r_m} H + \frac{1}{2r_m} \frac{\partial g}{\partial n} H^2$
1998	三角高程	8 848.58(雪面)	±1.5 m	交会山头, 黄海高程(85)系
1999	GPS	8 848.45(雪面)	±0.7 m	WGS84 系

注: 以上结果由文献 [1~7] 统计得到。

表 2 历年来喜马拉雅一带地壳形变的观测结果

Tab. 2 Observation Results of Crust Deformation in Himalaya Area

地区范围	年 代	方 法	结 果 mm/a	备 注
喀喇昆仑	1913~1980	三角测量	发现地壳有运动	精度差
喜山山前	1974(12 年)	水准	4±1	测区范围小
青 藏	1959~1982	水准	4~20	范围大, 由北向南增大
尼泊尔	1982(15 年)	水准	2~3, 4~6	低海拔地区
印、帮乌地区	1973~1986	三角、水准	6~10(—), 2~15(⊥)	精度不高
印、帮乌地区	1978~1986	三角、水准	1~14(⊥)	精度不高
尼泊尔	1991~1992	GPS、重力	11(—)	仅有水平高程
拉萨-格木尔	1991~1993	GPS、重力	12~17(—)	仅有水平高程
安多-拉萨	1980~1991	水准	3.3	高程变化
定日-绒布寺	1966~1975	水准	1.5	高程变化
珠 峰	1966~1992	测距高程	37(⊥)183(—)	珠峰顶上
帕米尔-天山	1992~1993	GPS	25	塔里木-欧亚
喜山-西藏	1993~1995	GPS	28.5 46.0(NE28°)	相对于西伯利亚
青藏(L-W-G)	1992~1994	GPS	39.2, 18.4, 14.3(N)	分别为 L、W、G 点
喜山-拉萨	1992~1996	GPS、重力	12(—), 5.3(⊥)	既有(—)又有(⊥)
珠峰以北	1966~1975	水准	平均约为 4mm/a	由北向南在升高
珠峰以北	1998~1992	水准	平均约为 2mm/a	由北向南在升高
叶城-珠峰北缘	1960~1980	水准	14	距离约 2 000km
叶城-珠峰北缘	1980~1994	水准	5	隆升的非平稳性

注: (—)表示水平方向, (⊥)表示垂直方向, L、W、G 分别为拉萨、温泉、格木尔。此外, 成都-拉萨与拉萨点上重力观测, 检测到喜马拉雅山北侧-拉萨地块也在隆升之中<sup>[7,8]</sup>。

由表 3(包括相关文献)所示的结果可以看出, 印度板块和欧亚板块在高原南部地区的会聚主要体现在南北缩短上, 其平均会聚速率约为 17mm/a, 其中大部分集中在南北向宽为 120km 的狭长地带, 约占印度和欧亚之间 50mm 会聚率的 1/3。这与一些学者从地震矩张量数据得出的印度板块插入欧亚大陆的速率为  $18 \pm 9 \text{mm/a}$  的结果一致。

## 2.2 冰雪覆盖厚度的测算差异

珠峰高程应是其顶处基岩的海拔高(度), 无

论是常规的天文大地测量中对照准目标的交会, 还是现今的 GPS 测量, 都是在基岩顶部的冰雪覆盖层上进行的, 而冰雪层厚度受季节、温度、降雪、风力及冰冻风化、峰顶脱片等因素影响较大, 它是一个变量, 不同时间所测的珠峰高程不易进行比较。近 20 年以来, 采取在峰顶设置觇标和安置仪器测定珠峰高程, 这些方法的关键是要找出冰雪层以下基岩的最高位置, 并量得觇标顶端至基岩顶的距离。

表3 西藏南部网 GPS 站运动速率监测结果

Tab. 3 GPS Observation Results of Crust Movement Monitored by IGG in South Tibet

点名	纬度	经度	相对于拉萨的运动速率 /mm·a <sup>-1</sup>		相对于欧亚板块的运动 速率/mm·a <sup>-1</sup>		观测年代
			东向	北向	东向	北向	
拉萨	29°39'	91°06'	0±2.4	0±2.6	20.8	22.8	1992, 1996
江孜	28°55'	89°36'	-3.4±1.8	5.4±1.7	17.4	28.2	1992, 1996
帕里	29°45'	90°48'	-7.2±1.5	12.1±1.5	13.6	34.9	1992, 1996
定结	28°30'	87°42'	-4.4±1.9	9.0±1.8	16.4	31.8	1992, 1996
昂仁	29°18'	87°10'	-1.7±1.8	19.6±2.8	19.1	42.4	1992, 1996
聂拉木	28°18'	86°01'	-6.3±2.3	21.5±2.0	14.5	44.3	1992, 1996

注: 拉萨点相对于欧亚板块的运动速率取自文献[7]中一篇引文的平均结果。

1975年我国首次在珠峰峰顶安置了一个3.5m高的觇标, 并于标心处量得冰雪层厚度为0.92m。根据1980年德国人麦斯那(Messner)只身登上珠峰的照片可知原来建立的钢标露出地面已不多了, 人们根据照片中站在标旁的照片中人像长和实际高度及露出地面的觇标的像长, 可求得钢标露头仅为0.46m。而1992年在美国布莱德华士本(Brad Washburn)博士的指导下, 用金属钻杆在峰顶钻至近3m时还未见基岩, 而取出来的仍然是硬雪块<sup>[10]</sup>。1992年意大利人用较细的探杆, 经多点探测其最小深度为2.55m, 这显然比1975年中国公布的不足1m的积雪要大得多。所以在精确测定珠峰高程时, 必须研究与精确测量冰雪覆盖厚度。

### 2.3 大地水准面的误差

如果已知珠峰下面的大地水准面高, 则很容易由GPS的结果求取珠峰的高程。从理论上讲, 高程基准面-大地水准面的问题, 实际上就是解大地测量边值问题。

近20年来, 大地测量边值问题的理论虽然得到很大的发展, 但其基本框架仍然以Molodensky理论为基础。由于边界条件是在地球表面上, 故确定的是似大地水准面, 可根据国内外建立的重力场模型DQM-94、WGM-94、EGM-96、IGG-97、DQM000、CQG2000计算出来, 经转换后方可求得大地水准面。目前, 我国已完成的CQG2000似大地水准面的精度比20世纪80年代要高一个数量级, 其标准差达±0.36 m<sup>[11]</sup>, 在边远山区的误差可能比它要大1~2倍, 它与GPS的观测误差相比, 前者居于主部。在不顾及两者转换误差的情况下, 以2×(±0.36m)=±0.72m来表示珠峰大地水准面的误差还是比较恰当的, 该结果也与2160阶的DQM精度<sup>[12]</sup>相吻合。由此可知, 这一因素是制约珠峰高程精度的又一个重要方面。

### 2.4 高程基准的误差

由我国青岛水准原点构成的黄海56与85高程系统, 其间之差约为cm级, 如略去其影响是可

以的, 然而这一高程系统与全球系统相比还存在着较显著的差别, 这主要是由于海面地形引起的。据研究, 在青岛存在着的海面地形近26cm, 如果顾及海平面上升的年变化, 青岛原点相对于大地水准面可能超过50cm<sup>[13]</sup>。文献[1]认为, 珠峰的GPS结果与黄海85高程之差达1.32±0.8m, 这是中国黄海高程基准与全球高程基准在珠峰的反映。该值已超过1m, 人们对此也应该认真研究和重视。

## 3 由正常高转换到正高及其误差

文献[14~16]已经推导了正高与正常高(大地水准面与似大地水准面)的转换公式(还以另一种简便方法推得了柱体内一点的引力垂直梯度的公式):

$$H_n - H_0 = N - \zeta = \frac{\Delta g_b}{\gamma} H - \frac{1}{2} \frac{\partial \Delta g}{\partial H} H^2 \quad (1)$$

如此可根据高程异常与重力及其梯度资料推求正高。还可以从正高的定义出发, 利用地壳内部重力梯度确定其间平均重力值, 最终能以同样的精度获得正高。该研究还表明, 如不顾及梯度项的影响, 在海拔5000m的高山, 一般可引起62cm的误差, 这对当今要求达到cm级精度的正高或大地水准面而言是不容忽视的。若将式(1)与GPS相结合, 在无需正常高、只需有高程异常的情况下, 亦可求得正高, 从而可以在珠峰高程的测定中加以应用。据估算, 珠峰 $\Delta g_b$ 的误差为20mGal, 重力梯度的误差为 $\pm 1 \times 10^{-7} \text{s}^{-2}$ , 式(1)得到 $H_n - H_0$ 的误差则为±0.41m。

前面已介绍, CQG2000的精度在珠峰附近已经达到0.72m, 随着地面重力资料的增加, 该精度仍可提高。在目前已知正常高的情况下, 可以取珠峰正常高的误差(包括高程基准误差在内)为: $m_{H_n} = \pm 0.55 \text{m}$ , 在顾及 $m_{(H_n - H_0)} = \pm 0.41 \text{m}$ 的误差后, 则珠峰正高的误差为:

$$m_{H_n} = \sqrt{m_{H_n}^2 + m_{(H_n - H_0)}^2} = \pm 0.70 \text{m} \quad (2)$$

目前在已知高程异常情况下,由大地高求取珠峰正高时,可取  $m_{\zeta}=0.72m$ ,  $m_{N-\zeta}=\pm 0.41m$ , 大地高的误差  $m_H=\pm 0.30m$ 。这时珠峰正高的误差为:

$$m_{H_0} = \sqrt{m_H^2 + m_{\zeta}^2 + m_{(N-\zeta)}^2} = \pm 0.86m \quad (3)$$

从上面的分析可以看出,两种方法求取珠峰正高的精度比较接近且均优于1m,严格而言,前者略高于后者,这也说明当前在地球重力场模型还不够精细的情况下,用正常高求取珠峰正高是有较大优势的。

至于如何推估珠峰顶上的重力值及其垂直梯度,文献[17, 18]已作了叙述。需补充的是,在高海拔山地的局部重力场(点值)推估中,无需顾及地形补偿的影响,其理由已在文献[19]中作了论证,这里不再赘述。

## 参考文献

- 1 陈俊勇, 张骥, 刘允诺, 等. 我国对世界最高峰高程的第三次测量. 地球科学进展, 1994, 9(4): 91~93
- 2 张赤军. 珠穆朗玛峰的大地水准面与高程的确定. 科学通报, 1997, 42(23): 2 543~2 545
- 3 陈俊勇. 我国卅五年来珠峰高程测定的思考. 测绘学报, 2001, 30(1): 1~5
- 4 陈俊勇. 珠峰地区地壳运动厚度、张性冰川的探讨. 测绘学报, 1994, 23(3): 178~183
- 5 王泽民, 陈俊勇, 庞尚益, 等. 珠峰地区及青藏高原地壳垂直运动特征研究. 见: 马宗晋, 汪一鹏编. 青藏高原现今变动与动力学. 北京: 地震出版社, 2001. 36~43
- 6 陈俊勇, 庞尚益, 张强. 珠峰雪面高程与全球变暖. 地球科学进展, 2001, 16(1): 12~14
- 7 许厚泽. 青藏高原大地测量的研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2001

- 8 许厚泽, 蒋福珍, 张赤军. 重力变化与青藏高原隆起. 见: 中国科学院测量与地球物理研究所编. 祝方俊院士九十寿辰文集. 北京: 测绘出版社, 1994. 27~32
- 9 张为民, 王勇, 许厚泽, 等. 用FG5绝对重力仪检测青藏高原拉萨点的隆升. 科学通报, 2000, 45(20): 2 213~2 216
- 10 杨志强, 王文颖. 珠穆朗玛峰高程与板块运动问题. 西安地质学院学报, 1993, 15(4): 194~197
- 11 李建成, 陈俊勇, 宁津生, 等. 地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定. 武汉: 武汉大学出版社, 2003
- 12 夏哲仁, 石磐, 李迎春. 高分辨率区域重力场模型DQM 2000. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(特刊): 124~128
- 13 魏子卿. 论我国大地测量基础建设. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(特刊): 14~17
- 14 张赤军, 边少锋. 似大地水准面与大地水准面的精密转换. 自然科学进展, 2001, 11(2): 153~156
- 15 张赤军, 边少锋. 似大地水准面与大地水准面之差及其模型显示. 成都理工学院学报, 2002, 29(1): 103~109
- 16 张赤军. 论珠穆朗玛峰重力值的推估. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6): 544~549
- 17 张赤军. 用GPS、重力、地形确定山区正高. 云南大学学报, 2001, 23(4): 258~261
- 18 张赤军. 用地形数据确定重力异常垂直梯度. 科学通报, 1990, 44(6): 656~660.
- 19 张赤军. 地壳对不同波长地形的重力响应. 地球物理进展, 2003, 18(2): 342~347

第一作者简介: 张赤军, 研究员。长期从事重力场及其在大地测量和地球物理中应用的研究, 参加过多项国家和部门重点科研任务的研究, 并获国家和省部门奖多项, 已发表文章近一百篇。

E-mail: iggzhangCJ@sohu.com

## Relative Problems and Thoughts on Qomolangma Elevation Determination

ZHANG Chijun<sup>1</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan, China 430077)

**Abstract:** The Qumolangma elevation has been determined for 160 whole years. This paper discusses which is of higher precision in many Qomolangma elevations. Such problems as methods observing for elevation, crust vertical movement, thick covered snow, transform from quasigeoid to geoid etc. are discussed.

**Key words:** Qomolangma; elevation precision; geoid

**About the author:** ZHANG Chijun, researcher. He has engaged in the research on geodesy and gravimetry for forty years and written almost 100 papers.

E-mail: iggzhangCJ@sohu.com

(责任编辑: 光阳)