

研究论文

格罗夫山冰原岛峰高程测定

王泽民 艾松涛 张胜凯 杜玉军

(武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉 430079)

提要 南极内陆格罗夫山地区冰原上坐落着 64 座冰原岛峰, 它们绝大多数的高程都未被直接测定。2010 年中国第 26 次南极科学考察格罗夫山分队, 通过精密测绘方法测定了梅森峰、威尔逊岭的高程, 并发现梅森峰是格罗夫山地区的最高峰。由于梅森峰、威尔逊岭四壁陡峭, 难以攀登, 为确保测量的精确性, 首先在梅森峰附近的冰面上选取了 3 个基准点, 采用 GPS 技术测定其精确地理位置, 然后在这 3 个基准点上架设精密经纬仪, 通过测角前方交会和三角高程测量的方法, 从 3 个方向确定了梅森峰、威尔逊岭的准确高程, 解决了地理学上一直存疑的梅森峰、威尔逊岭的大地高程问题。该结果不仅是南极地学考察的重要依据, 也可作为南极测绘高精度控制点, 并为南极遥感成图提供高精度位置标定。同时还对影响三角高程测量精度的主要因素, 如折光系数 k 值的确定, 观测图形、观测距离等对测量精度的影响进行深入探讨。

关键词 南极格罗夫山 梅森峰 威尔逊岭 三角高程测定 GPS 测角前方交会

doi:10.3724/SP.J.1084.2011.00077

0 引言

东南极内陆格罗夫山 (Grove Mountains) 地区海拔 2000 多米高的万古冰原上坐落着 64 座冰原岛峰, 其中梅森峰 (Mason Peaks) 和威尔逊岭 (Wilson Ridge) 是相对较高的冰原岛峰。但究竟哪座岛峰是格罗夫山地区的最高峰, 学界对此一直未有定论。中国第 26 次南极科学考察格罗夫山分队 (2009—2010), 通过精密测绘方法测定了梅森峰和威尔逊岭的高程, 确定梅森峰是格罗夫山地区的最高峰, 海拔 2362.9 m, 而威尔逊岭的高程是海拔 2325.1 m。

在中国此前开展的 4 次格罗夫山地区综合考察中, 测绘学者通过艰苦的工作, 对格罗夫山地区冰面地形和众多裸露岛峰进行了实地测绘, 但受南极地形和恶劣气候等条件影响, 对梅森峰和威尔逊岭的

高程一直未予精确测定。尽管其他一些国家通过卫星遥感资料, 对梅森峰的高程进行了初步测定, 但误差较大, 例如, 仅在澳大利亚南极局出版的两幅地图上, 所标梅森峰的高程差异即达 200 多米。

由于梅森峰、威尔逊岭四壁陡峭, 难以攀登, 为确保测量的精确性, 首先在梅森峰附近的冰面上选取了 3 个基准点, 采用 GPS 技术测定其精确地理位置, 然后在这 3 个基准点上架设精密经纬仪, 通过测角前方交会和三角高程测量的方法, 确定了梅森峰、威尔逊岭的准确高程。

1 基准点测量及计算

为了精确传递高程信息, 并确定山峰的精确平面位置, 首先采用高精度 GPS 观测在梅森峰脚下适当位置建立了一个高精度坐标基准点 MS1, 并在该

[收稿日期] 2010 年 10 月收到来稿, 2010 年 12 月收到修改稿

[基金项目] 中国极地科学战略研究基金项目“南极冰原裂隙及冰盖运动信息提取与定量分析 (20080102)”、国家 863 计划课题“基于多源遥感数据的东南极 PANDA 断面冰貌环境信息提取及监测研究 (2009AA12Z133)”资助

[作者简介] 王泽民, 男, 1965 年生。教授, 博士生导师, 主要从事极地测绘遥感学研究

点上连续进行 GPS 观测 12 h。然后以 MS1 为基准点,用 GPS RTK 技术又建立了 2 个 GPS 控制点

MS2、MS3(图 1)。MS1 的精确坐标计算采用 GAMIT 软件和

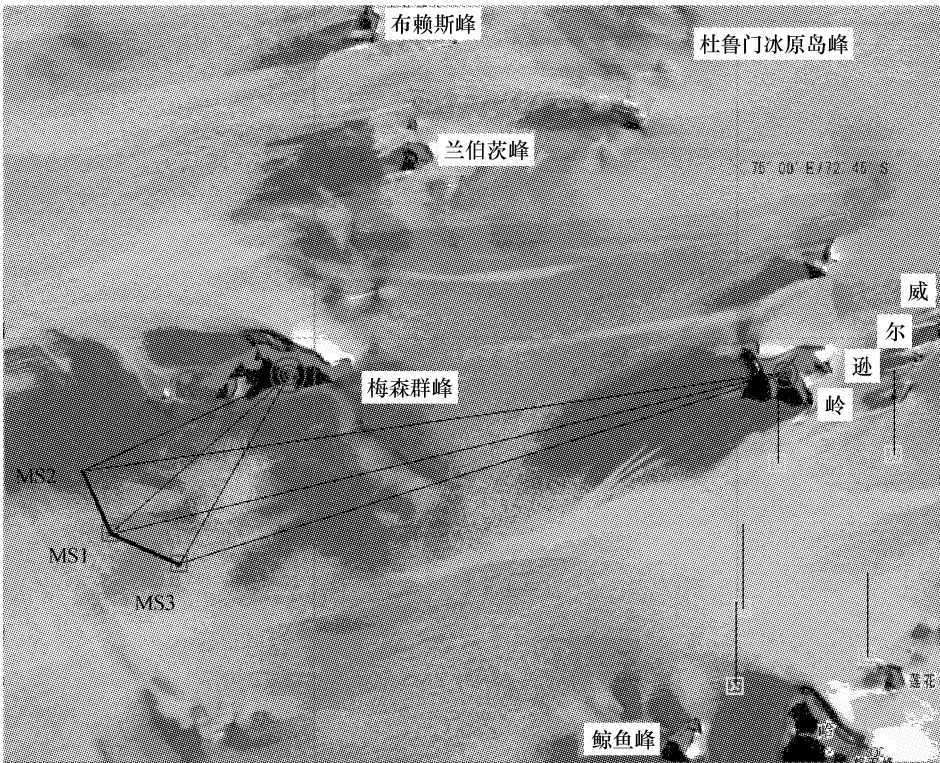


图 1 格罗夫山区的山峰高程测定示意图
Fig. 1. Sketch map of elevation determination of nunataks in Grove Mountains

GLOBK 软件解算。首先是已知站点的选取,选定了 2 个靠近中山站的 IGS 站,分别为戴维斯 (Davis) DAV1 和莫森 (Mawson) MAW1,以及 1 个 GPS 跟踪站中山站 ZHON。作为基准起算点,联合解算需要求解的未知 GPS 观测点 MS1 的坐标。

以上三个已知站点在 ITRF2000 框架、2010.001 历元下的坐标如表 1 所示。

表 1 已知站点坐标 (ITRF2000 框架、2010.001 历元)
Table 1. Known stations and coordinates (ITRF2000、2010.001 Epoch)

点号	站点属性	X	Y	Z
DAV1	IGS 站	486854.566	2285099.237	-5914955.733
MAW1	IGS 站	1111287.188	2168911.229	-5874493.633
ZHON	GPS 跟踪站	531375.205	2190320.319	-5946671.112

其中 2 个 IGS 站的坐标是在 SOPAC 网站所查询得到^[4]。中山站是采取了联合南极的 DAV1, MAW1, SYOG 等 4 个站点解算,并参与全球 IGS 站平差所得 2010 年 001 天的坐标。

以 DAV1、MAW1 以及中山站 ZHON 作为已知基站点,首先解算出到 MS1 点的基线,再解算出

MS1 的 WGS84 坐标;顾及起算点坐标精度,给出了点 MS1 的坐标和精度(表 3)。

表 2 基线解算精度
Table 2. Precision of GPS baseline

基线名称	基线长度 L/m	中误差 σ /m
MS1-ZHON	391203.8320	0.0031

表 3 基准点 MS1 的坐标及精度
Table 3. Coordinate and precision of MS1

点号	$(X/\sigma_x)/m$	$(Y/\sigma_y)/m$	$(Z/\sigma_z)/m$
MS1	503359.259 0.007	1821231.114 0.007	-6073275.652 0.016

2 前方交会法确定山峰平面位置

为了测定山峰的高程,首先需要测定山峰的平面位置。在 3 个基准点 MS1、MS2、MS3 上分别架设经纬仪,对梅森峰、威尔逊岭进行水平角观测,从而实现用经纬仪前方交会定位技术,精确测定梅森峰、威尔逊岭的平面位置。角度观测采用 WILD T2 经

纬仪,观测两个测回,得到最后测角精度优于 $\pm 2''$ 。

测角前方交会法的计算公式为^[6]:

$$x_P = \frac{x_A \cot \beta + x_B \cot \alpha - y_A + y_B}{\cot \alpha + \cot \beta}$$
$$y_P = \frac{y_A \cot \beta + y_B \cot \alpha + x_A - x_B}{\cot \alpha + \cot \beta}$$

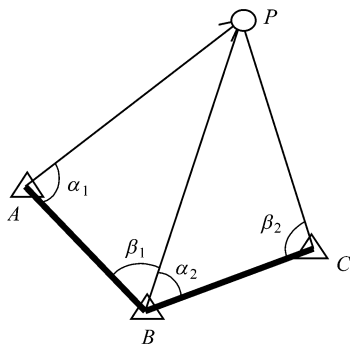


图2 测角前方交会示意图

Fig. 2. Sketch map of angular forward intersection

为了便于利用上述公式计算,特将 MS1、MS2、MS3 这 3 个控制点的大地坐标投影到高斯平面坐标系;为了尽量减少投影变形,选取该测区的平均经度作为投影中央子午线 $L_0 = 75^\circ$,选取该测区的平均高程 2 100 m 作为投影高程基准面。最后计算出梅森峰、威尔逊岭的精确平面位置及精度指标(表 4)。

表 4 梅森峰、威尔逊岭平面位置及精度

Table 4. Coordinates and precision of Mason Peak and Wilson Ridge

点名	纬度	精度/m	经度	精度/m
梅森峰	$-72^\circ 48' 59.76''\text{S}$	± 0.219	$74^\circ 40' 40.41''\text{W}$	± 0.189
威尔逊岭	$-72^\circ 48' 51.22''\text{S}$	± 1.808	$75^\circ 02' 35.73''\text{W}$	± 0.450

交会出的梅森峰平面位置精度较好,威尔逊岭的精度较差,原因是基准点 MS1、MS2、MS3 对交会梅森峰构成的图形很好,有利于交会定位。而基准点 MS1、MS2、MS3 对交会威尔逊岭距离较远,构成的图形较差;还有就是威尔逊岭山顶平缓,没有突起的山峰,观测时不利于照准,瞄准精度较差。

3 三角高程测量山峰高度

3.1 三角高程测量的基本公式

关于三角高程测量的基本原理和计算高差的基本公式,在测量学中已有详细讨论^[5]。

如图 3 所示。设 s_0 为 A、B 两点间的实测水平

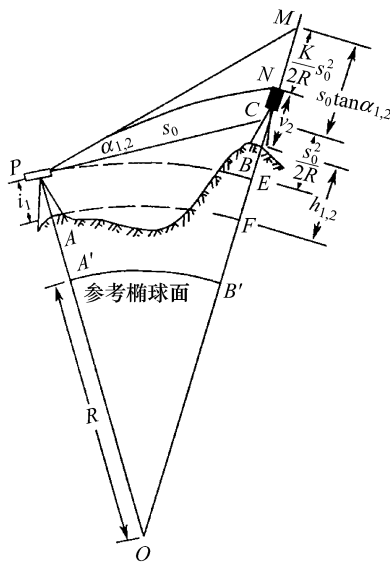


图3 三角高程测量的基本原理

Fig. 3. Principles of trigonometry leveling

距离。仪器置于 A 点,仪器高度为 i_1 。B 为照准点,站标高度为 v_2 , R 为参考椭球面上 $A'B'$ 的曲率半径。 PE 、 AF 分别为过 P 点和 A 点的水准面。 PC 是 PE 在 P 点的切线, PN 为光程曲线。当位于 P 点的望远镜指向与 PN 相切的 PM 方向时,由于大气折光的影响,由 N 点射出的光线正好落在望远镜的横丝上。这就是说,仪器置于 A 点测得 P、M 间的垂直角为 $\alpha_{1,2}$ 。

由图 3 可明显地看出, A、B 两地面点间的高差为

$$h_{1,2} = BF = MC + CE + EF - MN - NB \quad (1)$$

式中, EF 为仪器高 i_1 ; NB 为照准点的觇标高度 v_2 ; 而 CE 和 MN 分别为地球曲率和折光影响。由

$$CE = \frac{1}{2R}s_0^2, \quad MN = \frac{1}{2R'}s_0^2$$

式中 R' 为光程曲线 PN 在 N 点的曲率半径。设 $\frac{R}{R'} = k$, 则

$$MN = \frac{1}{2R'} \cdot \frac{R}{R} s_0^2 = \frac{k}{2R} s_0^2$$

k 称为大气垂直折光系数。

由于 A、B 两点之间的水平距离 s_0 与曲率半径 R 之比值很小,故可认为 PC 近似垂直于 OM , 即认为 $PCM \approx 90^\circ$, 这样 $\triangle PCM$ 可视为直角三角形。则(1)式中的 MC 为

$$MC = s_0 \tan \alpha_{1,2}$$

则 A、B 两地面点的高差为

$$\begin{aligned} h_{1,2} &= s_0 \tan \alpha_{1,2} + \frac{1}{2R} s_0^2 + i_1 - \frac{k}{2R} s_0^2 - v_2 \\ &= s_0 \tan \alpha_{1,2} + \frac{1-k}{2R} s_0^2 + i_1 - v_2 \end{aligned} \quad (2)$$

从上式可以看出影响三角高程测量精度的因素主要是垂直角的观测精度和折光系数 k 值的确定精度。

3.2 大气垂直折光系数 k 的确定

垂直折光是因为视线通过不同密度的大气层所引起的,而决定大气垂直密度梯度的主要因素就是大气温度的垂直梯度 τ 。因此,要取得良好的三角高程测量成果,对垂直折光问题,特别是大气温度垂直梯度的测定和处理是很重要的。大气垂直折光系数 k ,是随地区、气候、季节、地面覆盖物和视线超出地面高度等条件不同而变化的,要精确测定它的数值,目前尚不可能。通过在我国境内的实验发现, k 值在一天内的变化,大致在中午前后数值最小,也较稳定;日出、日落时数值最大,变化也快。因而垂直角的观测时间最好在地方时 10 时至 16 时之间,此时 k 值约在 0.08—0.14 之间。但在南极茫茫雪原上的情况有所不同,雪面吸热很少,再加上极地下降风的风力很强,极昼天气,使大气更趋均匀稳定,有利于全天垂直角观测。

Brocks^[3] 根据大气物理原理并结合大量气象观测统计归纳出了如下折光系数 k 值计算公式

$$\begin{aligned} k &= 6.706 \frac{p}{T^2} (3.42 + \tau) \\ &\left[1 - \frac{1}{3} (3.42 + 2\tau) \frac{\Delta H}{T} \right] \sin Z \end{aligned} \quad (3)$$

式中 p 为气压,以汞柱毫米(mm)高为单位; T 为地面测站处的绝对温度(K); τ 为气温垂直梯度,以 $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 为单位; ΔH 为低测站至高测站的高差,以 100 m 为单位; Z 为两者间的观测天顶距。Brocks 公式是假定视线通过“自由”大气层的条件下导出的,因此它适用于观测视线绝大部分超出地面很高的折光系数 k 的计算。该公式在珠穆朗玛峰高程测定中多次使用并被证明是可靠的^[1-2]。同样该公式也适用于平均高程在 2 000 m 以上的格罗夫山区。

由于条件所限,本次格罗夫山考察期间无法释放气球来测定该地区的温度梯度,为了计算该地区的折光系数,我们采用对流层中平均温度垂直梯度

$$\tau = -0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m} \quad (4)$$

通过测定气压、气温,并观测天顶距,应用(3)、

(4)两式计算出格罗夫山区的折光系数

$$k = 0.15 \quad (5)$$

考虑到基准点 MS1、MS2、MS3 距离梅森峰大约 5.1 至 5.6 km,当折光系数 k 有 0.01 的误差时会引起梅森峰高程误差 0.02 m,因此折光系数的误差对测定梅森峰高程的影响可以忽略不计。

基准点 MS1、MS2、MS3 距离威尔逊岭较远,大约 15.4 至 17.1 km,当折光系数 k 有 0.01 的误差时会引起威尔逊岭高程误差 0.20 m,因此折光系数的误差对测定威尔逊岭高程的影响较大。

3.3 梅森峰、威尔逊岭高程测定及计算

梅森峰、威尔逊岭高程测定同样采用 WILD T2 经纬仪,在三个基准点 MS1、MS2、MS3 上分别架设仪器,对梅森峰、威尔逊岭进行垂直角观测,从而实现用三角高程测量方法精确测定梅森峰、威尔逊岭的高程。高度角观测两个测回,得到最后测角精度 $\pm 2''$ 。

对于 $\pm 2''$ 的测角误差,会引起梅森峰的高程误差 $\pm 0.05\text{ m}$,会引起威尔逊岭的高程误差 $\pm 0.16\text{ m}$ 。

表 5 垂直角观测成果

Table 5. Result of vertical angle observation

测站 照准方向	MS1	MS2	MS3
梅森峰	5 48 18	6 09 51	6 09 06
威尔逊岭	1 45 59	1 45 19	1 52 00

将表 5 中垂直角观测值代入公式(2)得到梅森峰、威尔逊岭的高程计算结果。综合考虑观测误差、大气垂直折光误差,并根据多余观测平差后,给出了精度评定指标。

表 6 高程计算成果

Table 6. Elevation results of Mason Peaks and Wilson Ridge

点名	大地高程/m	精度/m
梅森峰	2362.869	± 0.179
威尔逊岭	2325.078	± 0.418

4 结论

利用 GPS 技术结合经纬仪测角三角高程法,精确测定了梅森峰、威尔逊岭的大地高程;解决了地理学上一直存疑的梅森峰、威尔逊岭的大地高程问题,该结果不仅是南极地学考察的重要依据,也可作为南极测绘高精度控制点,并为南极遥感成图提供高精度位置标定。

梅森峰大地高程为 2 363 m, 比此前测得的格罗夫山核心区的哈丁山高出 20 m^[7], 是目前新测定的格罗夫山地区的最高峰。

为了提高测定梅森峰、威尔逊岭高程的精度, 在 3 个基准点上分别架设仪器对梅森峰、威尔逊岭进行垂直角观测, 在 3 个不同方向实现三角高程测量, 增加了多余观测, 从而既提高了高程测定的精度, 也提高了测量结果的可靠性。

影响三角高程测量精度的因素主要是折光系数 k 值的确定精度。格罗夫山区地处南极茫茫雪原

上, 雪面对太阳光反射强烈, 地面吸热很少, 再加上风力很强, 极昼天气, 使大气更趋均匀; 这不仅有利于全天垂直角观测, 更为以自由大气为基础获得的经验理论公式计算大气折光奠定了可靠基础, 从而在不测定温度梯度的情况下也获得了较高精度的大气折光系数。此外, 为了减少大气折光的影响, 适当缩短测站到目标点的距离也是一个有效的途径。

致谢 对第 26 次中国南极科学考察格罗夫山队全体队员的大力协助表示衷心感谢, 感谢国家海洋局极地考察办公室对此次格罗夫山考察的支持。

参考文献

- 1 陈俊勇. 珠穆朗玛峰高程测定. 测绘通报, 1975(4).
- 2 陈俊勇. 论珠峰地区垂直折光问题. 测绘学报, 1993, 22(2).
- 3 Brocks K. Meteorologische Hilfsmittel für die geodätische Höhenmessung. ZfV, 1950.
- 4 <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/sector.cgi>.
- 5 陈健, 薄志鹏. 应用大地测量学. 北京: 测绘出版社, 1989.
- 6 潘正风, 等. 数字测图原理与方法. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- 7 彭文钧, 等. 后处理差分 GPS 在南极格罗夫山中小比例尺地形图测图中的应用, 极地研究, 2001, 13(4).

DETERMINATION OF THE ELEVATION OF NUNATAKS IN THE GROVE MOUNTAINS

Wang Zemin, Ai Songtao, Zhang Shengkai, Du Yujun

(Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract

There are many exposed nunataks in the Grove Mountains of inland Antarctica, and the majority of those elevations have not been measured yet. The elevations of Mason Peak and Wilson Ridge were precisely determined by the Grove Team of CHINARE - 26 in 2010. The Mason Peak turned out to be the highest point of the Grove Mountains. Considering that the Mason Peak and Wilson Ridge are difficult to climb because of their craggy, we firstly selected three control points on the ice surface near the Mason Peak and positioned them with GPS. Thus, the accurate elevations of Mason Peak and Wilson Ridge were calculated from three directions using forward intersection and trigonometric leveling by setting a precision theodolite on the chosen control points. It has solved the puzzle of their geodetic heights in geography. The result provides highly precise control points for Antarctic surveying and mapping. This paper elaborates how to measure and calculate the elevation of the mountains, and analyzes the principal elements that influence the accuracy of trigonometric leveling such as determination of the refraction coefficient k , the observing structure and distance.

Key words Grove Mountains, Mason Peak, Wilson Ridge, trigonometric leveling, GPS, forward intersection