

等高方法及其 在基本天体测量中的应用

李东明 徐家岩 罗定江 编著



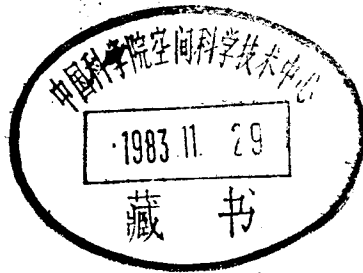
科学出版社

P12
LDW

等高方法及其在基本 天体测量中的应用

李东明 徐家岩 罗定江 编著

7129/17



科学出版社

1983

002584

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了大地测量、实用天文和天体测量等领域内广泛应用的等高方法。首先叙述了等高方法的历史、使用的仪器及有关的基础知识，然后探讨了等高方法在地球自转监测或经纬度测量中的应用。书中还介绍了近二十年来我国在这方面取得的研究成果，并对等高方法今后的发展作了展望。

本书可供天文、大地测量、地球物理和航天工作等方面科技人员、大学有关专业的教师和学生阅读参考。

等高方法及其在基本 天体测量中的应用

李东明 徐家岩 罗定江 编著

责任编辑 夏墨英

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年7月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1983年7月第一次印刷 印张：7 1/4

印数：0001—2,300 字数：163,000

统一书号：13031·2318

本社书号：3171·13—5

定价：1.15 元

前 言

在大地测量、实用天文和天体测量的领域内，等高方法是大家所熟知的。近年来，随着等高仪器的改进和新的特别是电子技术和计算机技术的广泛应用，等高观测方法不但在常规的时纬观测工作中起了重要作用，而且在星表工作的各个方面也显示了很大的潜力。

1970年巴黎天文台的 S. Débarbat 和 B. Guinot 合著“天文学中的等高方法”（有英文译本和俄文译本）一书，主要阐述了他们的工作和观点。这本书在某种程度上，可以说是当容等高仪所取得的成就的一个总结。

自1958年引进当容等高仪以来，我国各天文单位在等高观测方法实践中积累了大量的经验和成果。1971年和1974年，我国先后研制成功了 I 型和 II 型光电等高仪，成为世界上首先在天文台正式使用这种新型仪器的国家。在新的一代等高观测仪器研制和使用过程中，我们对等高观测方法也逐渐有了自己的一系列看法和体会。考虑到近十余年来这方面国内外重大进展，我们感到有必要编著本书，以期总结这方面已有的工作，并提出一些想法或展望。读者们可以看到，本书的取材、编写内容与重点和法文专著是有所不同的。

本书第五、六两章是李东明编著的；第一、七两章是罗定江编著的，第二、三、四章和附录一、二、三是徐家岩编著的。

本书主要供大地测量、天体测量以及有关专业的读者参考，也可供有关专业高年级学生学习参考。考虑到读者都已具有基础的球面天文、实用天文和基本天体测量的知识，所以

某些方面的叙述和论证已予简化，有的则以注释或附录的方式给以必要的介绍和推导，且每章后都附有参考文献。本书最后还列有“主要参考书目”，具有广泛的参考价值，以罗马数字编号在书中各章引用。

本书在编写过程中，曾先后以油印稿分送国内各天文单位有关同志审阅。他们提出了许多宝贵的意见和有益的建议，特在此谨表谢意。

限于我们的水平以及理论上和实践上的局限性，本书肯定还存在不少错误、疏漏和缺陷，欢迎读者批评指正。

著者

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 等高观测方法和仪器的发展 | 1 |
| 1.2 等高观测方法的特点及其应用 | 5 |
| 第二章 现代的等高观测仪器 | 10 |
| 2.1 国外现代等高仪的进展 | 10 |
| 2.2 中国光电等高仪的概况 | 16 |
| 2.3 II型光电等高仪的光学、机械结构 | 22 |
| 1. 仪器的总体结构 | 22 |
| 2. 光学系统 | 22 |
| 3. 机械结构 | 25 |
| 2.4 光电等高仪的光电装置和记录系统 | 26 |
| 1. 交流光电装置 | 26 |
| 2. 记录系统 | 30 |
| 2.5 关于改进光电等高仪的一些讨论 | 34 |
| 1. 仪器口径和密封窗的放置 | 35 |
| 2. 减小天空背景光面积 | 36 |
| 3. 记录方法的现代化 | 37 |
| 4. 实现全自动化观测 | 38 |
| 第三章 等高观测方法 | 41 |
| 3.1 等高观测的一般概念和公式 | 41 |
| 3.2 等高观测的误差方程式 | 45 |
| 3.3 二阶项的影响和三角函数解法 | 50 |
| 3.4 若干系统改正 | 53 |
| 1. 曲率改正和加速度改正 | 53 |
| 2. 蒙气差改正 | 60 |
| 3. 焦平面位移改正 | 62 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 4. 周日光行差改正 | 63 |
| 5. 迟滞差改正 | 64 |
| 第四章 等高观测方法测定时间、纬度 | 71 |
| 4.1 世界时和纬度测定的意义 | 71 |
| 4.2 观测纲要的编选 | 75 |
| 4.3 误差方程式的行列式解法和最佳选星条件 | 80 |
| 4.4 内部平滑改正 | 84 |
| 4.5 组改正及其确定方法 | 87 |
| 1. 连锁法 | 89 |
| 2. 矩阵法 | 93 |
| 3. 观测量的变化用公式表示的确定方法 | 94 |
| 4.6 天文常数的误差的影响 | 95 |
| 1. 岁差和章动常数采用值的误差的影响 | 96 |
| 2. 周年光行差常数采用值的误差的影响 | 100 |
| 4.7 外部符合和长期稳定性 | 104 |
| 第五章 基本参考系和测定恒星位置的方法 | 114 |
| 5.1 基本的概念、子午方法和仪器 | 114 |
| 1. 一般情况 | 114 |
| 2. 星表的系统误差 | 116 |
| 3. 子午方法 | 118 |
| 4. 基本仪器 | 119 |
| 5.2 测定恒星位置的经典方法 | 124 |
| 1. 赤纬的绝对测定和相对测定 | 124 |
| 2. 赤经的绝对测定和相对测定 | 126 |
| 5.3 测定恒星位置的新方法、新技术 | 128 |
| 1. 射电干涉测量 | 128 |
| 2. 空间天体测量 | 130 |
| 3. 光学基本天体测量的进展 | 134 |
| 4. 各种方法的配合 | 136 |
| 5. 基本参考系工作的进展 | 139 |
| 6. 未来的参考系 | 140 |
| 7. 结束语 | 142 |

| | | |
|------------|------------------------------|-----|
| 第六章 | 用等高观测方法建立基本位置系统的原理和方法 | 143 |
| 6.1 | 关于等高观测方法确定恒星坐标的原理 | 143 |
| 1. | 基本公式 | 143 |
| 2. | 特殊情况的应用 | 146 |
| 3. | 观测的系统误差 | 149 |
| 4. | 关于等高星表的性质 | 152 |
| 6.2 | 精度估算,关于含天极等高圈的讨论 | 153 |
| 1. | 观测偶然误差和测定的区界 | 153 |
| 2. | 关于含天极等高圈的讨论 | 156 |
| 6.3 | 初始等高星表的综合 | 161 |
| 1. | 赤经星表的综合 | 161 |
| 2. | 赤纬星表的综合 | 166 |
| 6.4 | 绝对赤纬系统的建立 | 168 |
| 1. | Крейнин 等人的工作 | 168 |
| 2. | 两个实用的测定方法 | 169 |
| 3. | “等高-方位”观测方法 | 172 |
| 6.5 | 关于等高仪星表观测工作的实施 | 175 |
| 1 | 等高仪星表工作的进展 | 175 |
| 2. | 关于星表观测的纲要 | 176 |
| 6.6 | 关于等高观测方法的发展远景 | 180 |
| 第七章 | 太阳系天体的观测 | 189 |
| 7.1 | 观测条件 | 190 |
| 7.2 | 观测方法 | 191 |
| 7.3 | 观测归算 | 193 |
| 7.4 | 观测结果 | 197 |
| 1. | 火星 | 197 |
| 2. | 木星 | 198 |
| 3. | 土星 | 199 |
| 4. | 天王星 | 200 |
| 5. | 伽利略卫星(木卫) | 200 |
| 6. | 小行星 | 201 |

| | |
|-------------------|-----|
| 7. 太阳 | 201 |
| 8. 我国的观测 | 202 |
| 附录 | 204 |
| 一、恒星视位置的计算 | 204 |
| 1. 用电子计算机计算 | 204 |
| 2. 手算 | 207 |
| 二、误差方程的近似解法 | 212 |
| 三、光电等高仪的调整 | 216 |
| 1. 导星系统的调整 | 216 |
| 2. 主光路系统的调整 | 218 |
| 3. 参考信号的调整 | 221 |
| 主要参考书目 | 224 |

第一章 绪 论

1.1 等高观测方法和仪器的发展

观测不同高度的恒星，或者观测几颗相同高度的恒星来确定测点的位置，是很早以前就采用的一种方法^[1]。英文 *astrolabe* 一词原来指的就是古代用来目测天体高度的一种可携带的器件。为了和近代的等高仪器相区别，我们把这样的仪器叫做“星盘”。星盘有一个黄铜或其他金属铸造的圆盘，盘四周有刻度，盘面有指示一些亮星在不同时刻的高度的标记和其他装饰花纹，盘上端有小环，可使盘垂直悬挂在一个支架上，或用手提着。此外，还有一根目测照准杆固定在盘中央，并可随之而转动，用来指向所观测的星。从圆盘上的刻度和标记可直接求得观测时的时刻。这样的仪器相传是阿拉伯人所创造，但也有人认为是由公元前几世纪时希腊天文学家 Hipparchus 等人所发明。15 世纪的德国地理学家 Martin Behaim 把星盘用于航海以测定纬度；直到 18 世纪六分仪问世之前，星盘曾广泛用于航海中。

19 世纪初德国科学家 C. F. Gauss 对近代等高观测方法开始了理论探讨，并奠定了基础。其基本原理是，观测预先选定的三颗不同方位的恒星，记录它们到达某一固定而未知高度的瞬间时刻，从而建立三个条件方程式以求解三个未知量：时间（如测点的经度为已知）、纬度和天顶距改正。如一次观测记录三颗以上或更多的恒星，可用最小二乘法求得各个未知量的最或然值。这一方法从理论上来说是完善的，但要制造出适用的仪器以充分发挥其潜力，却不是轻而易举

的事。

直到 1879 年,美国天文学家 Chandler 才首次提到了一种等高仪。这种仪器有一个可绕水平轴活动的小望远镜,由放在水银面上的浮筒所支撑。水银面决定了垂线方向,望远镜的指向决定了观测的高度,整个装置可绕垂直轴转动。Chandler 在 1887 年的一篇论文里详细谈到了仪器的结构、观测和归算方法,并探讨了观测的精度和有关的几种系统误差。他给出的观测结果在时钟改正、纬度和天顶距改正的测定上的或然误差分别为 $\pm 0^{\circ}.045$, $\pm 0''21$ 和 $\pm 0''40$ 。在那个时候 Chandler 就已指出:用他所研制的等高仪(当时被称为 Almicantar)进行观测,如果已知时钟改正、纬度和天顶距改正,那就可以着手计算恒星位置的改正 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\delta$ 。Chandler 工作的结果表明:他观测得到的星表和当时柏林天文年历中的星表有很大的偏离;但和其他天文观测的结果,特别是格林尼治的子午观测结果有 75% 是符合一致的。可见等高方法和子午方法是可以相互媲美的。遗憾的是 Chandler 本人以后就忙于其他方面的研究,直到 1913 年底他去世以前,没有再在这方面取得更新的进展。

1892 年瑞士天文学家 M. Beck 开始着手 60° 棱镜等高仪的设计。他研制了一台叫做 Nadirinstrument 的等高仪。他在好几篇论文中谈到了如何把双折射棱镜用于等高观测,并考虑了三种可能的仪器结构。他的分析认为:观测结果的或然误差在时间上是 $\pm 0^{\circ}.08$, 在纬度上是 $\pm 0''50$, 而单星精度约为角秒的数量级。

1900 年法国的 A. Claude 和 L. Driencourt 独立地完成了一项研究工作。他们制造了第一架近代样式的棱镜等高仪(prismatic astrolabe)。这仪器在原理上、结构上和观测方法上都已具有现代等高仪的模式。这一类仪器在以后的几十年里

陆续有一些或大或小的新产品问世。根据 Gougenheim 和 Chandon 的研究,其中最大一架仪器的观测精度在时间上是 $\pm 0^s.01$, 在纬度上是 $\pm 0''15 \sim \pm 0''20$ 。

对一台具有方位度盘的经纬仪加配以适当的棱镜和水银盘,就可以进行等高方法的观测。这在天文大地测量作业中有较多的应用。

美国的 Willis 在本世纪初发明了一种叫做摆式等高仪的仪器。他用一面悬挂式的金属镜面表示水平面。这是第一次不用水银面来确定垂线方向的尝试。但他的仪器没有用棱镜,只有一个星象,而且还要用一个秒级水准器作为辅助。这看来不完全适合高精度观测的要求。

上述几种棱镜等高仪在实现等高方法的观测上虽已迈开了一大步,但都还具有一些共同的基本弱点。最主要的是对每颗星的观测只能给出一次时间测量,这不但会加大了偶然误差,而且还不可避免地引进了绝对值相当大的人差。再则,在仪器的调节上,也要特别仔细,尤其是目镜调节的好坏会带来很大的影响。所以,相当长一段时期以来,棱镜等高仪只被应用于一般要求不很高的野外测量作业中。

1930 年英国人 Baker 设计研制了 45° 棱镜等高仪,观测高度为 45° 的恒星。这虽加大了大气折射的可能影响,却增加了一个观测点上可观测的星数。而物镜前的一组小棱镜可使观测者对于每一颗星在规定的 45° 高度上下各 $1'5$, $4'5$ 和 $7'5$ 处共得 6 次观测记录,有助于削弱偶然误差的影响。观测时纬的精度分别为 $\pm 0^s.05$ 和 $\pm 0''30$ 。这个仪器虽还没有根本解决棱镜等高仪的主要问题,却为扩大等高仪观测范围开辟了一条新途径。

法国天文学家当容从本世纪 30 年代后期开始,经过长期的探索和试验,终于就经典的棱镜等高仪的主要问题取得了

针对性的突破。到1950年,在巴黎天文台成功地研制了一台叫做超人差棱镜等高仪的样机,取得很好的时纬观测结果^[1]。后来法国制成了OPL型号的超人差棱镜等高仪(通称当容等高仪)^[2]。有关这仪器的一些情况,将在本书第二章中做进一步的介绍。

这里还应该提到另一种也是应用等高方法原理研制的叫做拱顶仪(circumzenithal)的仪器。这仪器的历史可追溯到1900和1905年。当时,F. Nušl和J. J. Frič在布拉格先后研制了两种类型的拱顶仪,并提出了一些观测和归算的方法。其中一种使用的是棱镜,另一种采用两面交叉的反射镜取代棱镜来决定观测的高度,但观测的高度都不够稳定。1922年他们又研制了新的第三型拱顶仪。Gougenheim和Chandon根据仪器在1925—1927年间的观测,得到其测时测纬的平均误差各约为 $\pm 0^{\circ}03$ 和 $\pm 0''12$ 。1930年Frič成功地在1922年的拱顶仪上装上了超人差测微器。E. Buchar在1949年研制了一种新型的超人差测微器。按作者本人在1954年第5届国际计时学会议上的报告指出:测时测纬的平均误差是 $\pm 0^{\circ}016$ 和 $\pm 0''18$,而高度的测定误差在 $\pm 0''05 \sim \pm 0''22$ 之间。1976年Buchar又提出一种新的拱顶仪及其原理^[3],但还没有看到有关观测结果的报道。目前,在捷克斯洛伐克的布拉格和Penný各有一架拱顶仪在进行时纬观测。此外,1971年德意志民主共和国K. G. Steinert也报道了在德累斯登工业大学研制的90/1350拱顶仪^[4]。1970年的初步观测结果表明:单星精度为 $\pm 0''50$,测时测纬的精度各为 $\pm 0^{\circ}015$ 和 $\pm 0''18$ 。

随着等高仪器的不断改进和提高,使等高方法的特点得到日益充分的发挥。近20多年来,现代的等高仪在时纬等地球自转参数的测定方面已经和光电中星仪、摄影天顶筒一样

成为主要的天文光学观测仪器。在国际时间局 (BIH) 和国际极移服务 (IPMS) 等组织内,近年来一直有 15—20 台棱镜等高仪参加有关的世界时和地极坐标的测定。在我国的时纬工作中,上海天文台的 OPL No. 14,北京天文台的 OPL No. 30 和武汉测量与地球物理研究所的 OPL No. 29 等三架棱镜等高仪也先后自 1957, 1961 和 1962 年起开始投入观测。一、二十年来,这三台仪器测时结果的长期稳定性比较突出;一直是我国综合时号改正数系统中结果最稳定的一批仪器。在我国地极坐标服务工作中,这三台仪器提供的资料也起着重要的作用。

1.2 等高观测方法的特点及其应用

我们先分析一下等高方法及其主要仪器——棱镜等高仪的特点,特别是对等高方法和子午方法作为基本天体测量观测的两种主要方法来加以比较。

子午方法的优点是原理简明:记录恒星中天的时刻,并测量其天顶距,就可以得到一颗星的赤经和赤纬。所得到的赤经值和等高方法的结果一样,还差一常量,这有待于春分点位置的确定;而赤纬则可通过上下中天的观测来绝对测定。后者是子午方法的一个特点,它较适合于高纬度地区的观测。然而也是很费事的,还不得不通过中间步骤——方位标或准直管等来测定某些仪器参数。这往往招致意外的麻烦。

与子午方法比较,等高方法测定星位原理较繁。为了得到一颗星的赤经、赤纬数值,一般需要对它东、西两次过等高圈进行观测。因而扩充星表速度受到一定的限制。但它有一突出的优点,就是特别适合修正全天或大区域性坐标系的不均匀性。一般工作在天顶距 30° 的棱镜等高仪观测两小时就可联系赤经相差 4~6 小时以上恒星。对于工作天顶距为

45°的等高仪其效果更是明显。这种不均匀性要用子午方法在赤经上逐小时地观测来修正是很难奏效的。何况这很可能是过去百年来基本星表是由子午观测所唯一决定的一种后果。

从方法的几何意义上来说，等高观测方法能观测给定等高圈上各个方位的恒星，从而确定这一整圆的极及其半径，这显然有利的。子午方法的观测往往局限于整个子午圈的一小部分弧段。只在良好条件下，中天观测的弧段才可以更长些。

虽然等高方法原理上较繁，但就所用的等高仪器本身来说，却比较简单。它可以采用地平式反射光学系统，这就有可能大大增加仪器口径。而仪器系统的稳定性不那么容易受到环境条件改变的影响。在设计 and 制造良好的棱镜等高仪上只有一个仪器常数，即决定等高圈高度的棱角值。在新型的全瞳孔等高仪和光电等高仪中所采用的角镜系统能更好地保持这一仪器常数的稳定性。而子午仪器的好几项仪器常数都是比较难以控制或测定的。就一颗星的观测来说，子午仪器相对于垂线的位置都是变动的，特别是镜筒暴露在温度多变的情况下，其变形和弯曲往往不对称于子午面，所造成的影响是极难精确估计的。

法国制造的 OPL 型棱镜等高仪虽在时纬的测定上大显身手，但在一旦需要深入到基本星表的工作领域中去的时候，就看到了它的明显不足。对于固定台站的棱镜等高仪，在整个可观测天区内，赤经和赤纬都有一定的限制。此外，目视观测仪器的劳动强度大，一般两组观测需要工作 5 小时，而星表工作常常要求 6 小时以上的连续观测，这在目视观测仪器上是很难做到的。由于这种种原因，国际上建立等高观测链以形成几乎覆盖全天的等高星表的建议，一直没能实现。

为了改进当容等高仪以适合更广泛的用途，60 年代以来，芬兰的 Y. Väisälä^[5]，英国的 D. V. Thomas^[6] 和德意

志民主共和国的 Höpfner^[7] 等先后提出过一些建议，主要都是着眼于用反射式角镜组来代替棱镜。特别值得提到的是，早在 1958 年受到光电记录方法在中星仪上的成功经验的启发，上海天文台^[8] 和巴黎天文台^[11] 各自独立地提出了把光电记录方法应用于等高仪的设想和考虑。

1963 年，北京天文台李东明把星象通过固定视栅的光电记录方法应用于等高方法的双星象情况，讨论了一些有关理论，取得了肯定的结果^[9]，其原理如 18 页所述。这引起了我国天体测量界的极大重视。1968 年底，由上海天文台、北京天文台和南京天文仪器厂等单位抽调部分专业人员联合组成了光电等高仪研制组，并开始在南京天文仪器厂研制具备我国自己特色的光电等高仪。1971 年研制成一台样机，称为 I 型光电等高仪^[10]，经过在上海天文台试测一段时间之后，安装在陕西天文台^[11]，以后又研制了三台 II 型光电等高仪^[12]，先后于 1974，1975 和 1976 年安装在上海、北京和云南三天文台。在上海和北京两天文台^[13,14]，II 型光电等高仪和原有的当容等高仪都曾平行观测过一段时期。在各个精度指标上，光电等高仪都有比较显著的效果。特别是仪器等高圈的稳定性提高了一倍多，同时由于实现了对观测仪器的遥控和观测记录过程的自动化，既避免了观测者和附属设备作为热源的存在，又大大减轻了观测者的劳动强度。这些都特别有利于用等高方法开展星表工作。当然，II 型光电等高仪也还存在一些明显的不足，在使用过程中也发现了一些问题，有待于今后改进。

关于法国和日本的光电棱镜等高仪的研制情况，我们将在第二章中介绍。

不久以前，芬兰的照相等高仪的结构和初步的纬度观测结果发表在欧洲的“天文学与天体物理学”杂志上^[15]。仪器在光学机械结构和记录方法上均有其特点，但要取得更好的结

果,可能还要有一个过程.

* * *

自从从容等高仪问世以来,首先在时纬的测定上起了很好的作用.随着观测精度的提高,研究工作的深入,等高观测结果有了更广泛的应用:在研究光行差和章动等天文常数方面取得了初步的结果;对基本星表的系统改正或个别位置改正做出了较好的成绩;在观测太阳系天体以确定基本参考系的原点方面正在积极开展工作;有计划地观测射电星将在加强射电天体测量和基本天体测量的联系方面做出贡献;研究观测站及其附近的地球物理因素的变化不但与提高观测精度本身有关,还有可能为监测垂线的异常变化提供有用的信息,并探讨它和地震的关系.所有这些都表明等高方法是可以有广泛的应用,而等高仪器本身也必须采用最新的技术成就不断予以改进,才能更好地适应它的使命.

在基本星表方面,等高方法的观测和子午观测一样,必须考虑到目前射电天体测量和空间天体测量的发展来互相配合,并充分发挥自己的长处.为了建立从亮星到暗河外射电源的全天基本参考系,就要首先开展亮射电星的观测,同时要积极研制能和最新的子午环一样观测暗到 11—13 等的天体的等高仪器.如利用适当的自准直方法来监测角镜组水平的变化,就可以更充分地利用物镜的聚光能力,再加上光子计数等终端技术,完全可能利用口径不大(如 20—30 cm)的仪器达到观测暗星的目的.如采用双角镜系统或在含天极在内的等高圈上观测,就可以避免等高方法在赤纬测定上所存在的盲区.设想一架等高圈的天顶距为 30° 和 45° 的新型光电等高仪在北纬和南纬 25° 和 50° 附近各进行两三年的观测,十年之后即可获得一个覆盖全天球、直到 11—13 等暗星的全天等高星表.这对基本天体测量学将是一个不小的贡献.