

[西德]W·托尔格

大地测量学

测绘出版社

[西德]W·托尔格

大地测量学

周慎杰 薄志鹏 译
陈 健 校

测绘出版社

内 容 提 要

本书系统而扼要地介绍了大地测量学的基本理论。全书分六章，分别叙述大地测量的历史、地球重力场、大地测量的参考系统、大地测量的测量方法、全球大地测量和国家控制测量的建立等。本书取材广泛，内容较新，并着重于基本概念的阐述。

本书可供测量专业师生，从事天文大地测量和地球物理学等学科的科技人员参考。

W. Torge

Geodesy

Walter de Gruyter & Co.,

Berlin, 1980

大地测量学

[西德] W·托尔格

周慎杰 薄志鹏 译

陈 健 校

*

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 8 3/8·字数 218 千字

1984 年 3 月第一版·1984 年 3 月第一次印刷

印数 1—7,000 册·定价 1.55 元

统一书号：15039·新 312

译者的话

“大地测量学”(Geodäsie)一书是西德汉诺威大学理论大地测量研究室主任 W.托尔格教授为测量专业高年级学生编写的。全书共分为六章，系统而扼要地介绍了大地测量的历史和组织机构，地球重力场，大地测量的参考系统，大地测量的测量方法，全球大地测量和国家控制测量的建立等基础知识，特别叙述了近二十年来大地测量学的新成就和发展方向。本书取材广泛，图文并茂，内容完整，深入浅出，着重于基本概念的阐述。因此除了可作为测量专业学生的补充教材和参考书外，也可供从事大地测量工作的以及与大地测量学关系密切的地学中各学科的科技人员参考。

本书原先译自 1975 年德文版原著。1980 年出版了经作者修订的、由美国俄亥俄州立大学大地测量科学系硕士 C.耶凯莱翻译的英文版“大地测量学”(Geodesy)。为了能将更新的资料向读者介绍，因此根据英文版又补译了有关卫星测高、海洋测量、月球大地测量和行星大地测量等内容，并对原著中部分修订之处亦作了修改。

本书稿译出后承天津大学陈健教授作了全面的校订，高增吉同志为本书描绘了插图，在此向他们一并致以谢意。

译者

1982.4.

引 言

本书主要是为测量专业高年级学生而编写的。它系统而扼要地介绍了有关全球大地测量和国家控制测量中的参考系统、数据收集和数据处理，可以作为各种专业课程的补充教材和参考书。从事实际工作的测量工程师对本书中所讨论的问题往往只有一些较肤浅的了解，本书为他们就大地测量近二十年来的迅速发展提供一个轮廓。由于这个原因本书也介绍了一些新的成果和富有前途的新发展。

这里特别着重于叙述参考系统、地球表面和重力场等随时间的变化，因为在将来大地测量学必定会更多地对地球动力学的这部份领域进行研究。最后，本书试图将大地测量学作为近来与之相互关系越来越密切的地学中的一门学科来看待，因此这本书也可以给相近专业的地学科技人员就大地测量学的各种问题与工作方法作一简要介绍。

目 录

第一章 绪 论

1-1	大地测量学的定义及其分类	(1)
1-2	大地测量学的任务	(2)
1-3	大地测量学的历史发展	(3)
1-3-1	球形的地球模型	(4)
1-3-2	椭球形的地球模型	(6)
1-3-3	弧度测量	(8)
1-3-4	大地水准面和椭球	(9)
1-4	大地测量的组织和文献	(10)
1-4-1	国家组织	(10)
1-4-2	国际协作	(10)
1-4-3	文献	(11)

第二章 地球重力场

2-1	重力场的组成部分	(14)
2-1-1	引力 引力位	(15)
2-1-2	球状对称地球的引力位	(16)
2-1-3	引力位的性质	(19)
2-1-4	离心加速度 离心力位	(21)
2-1-5	重力加速度 重力位	(22)
2-2	水准面和垂线	(23)
2-2-1	水准面的定义及其性质	(23)
2-2-2	水准面的解析表示法	(24)
2-2-3	水准面的曲率	(25)

2-2-4	垂线的曲率·····	(26)
2-2-5	重力梯度·····	(27)
2-3	引力位的球谐函数展开式·····	(28)
2-3-1	距离倒数的展开式·····	(28)
2-3-2	引力位的展开式·····	(29)
2-3-3	面谐函数的意义·····	(31)
2-3-4	低阶调和系数的物理意义·····	(33)
2-4	重力场随时间的变化·····	(34)
2-4-1	潮汐加速度 潮汐位·····	(35)
2-4-2	固体潮·····	(38)
2-4-3	重力场随时间的其他变化·····	(39)

第三章 大地测量参考系统

3-1	全球空间直角坐标系 极移·····	(41)
3-2	地球重力场中的坐标系·····	(44)
3-2-1	全球天文坐标系·····	(44)
3-2-2	局部天文坐标系 地球重力场内的 计算·····	(45)
3-2-3	局部天文坐标系和全球直角坐标系···	(47)
3-3	大地水准面作为高程参考面·····	(48)
3-3-1	大地水准面的定义·····	(48)
3-3-2	大地位数与正高·····	(49)
3-3-3	平均海平面·····	(50)
3-4	椭球参考系统·····	(51)
3-4-1	旋转椭球的几何参数及其坐标系·····	(51)
3-4-2	旋转椭球的曲率·····	(53)
3-4-3	空间椭球坐标系·····	(55)
3-5	正常重力场·····	(57)
3-5-1	地球的正常体形 水准椭球·····	(57)

3-5-2	水准椭球的正常重力场	(58)
3-5-3	正常重力场的级数展开式	(61)
3-5-4	三轴椭球	(64)
3-5-5	大地测量参考系统	(65)
3-5-6	正常地理坐标 正常高	(68)

第四章 大地测量的测量方法

4-1	天文测量	(70)
4-1-1	球面天文学的坐标系	(70)
4-1-2	恒星坐标的变化 星表	(73)
4-1-3	时间系统	(76)
4-1-4	观测仪器	(78)
4-1-5	位置、时间和方位角的天文测定法	(81)
4-2	重力测量	(84)
4-2-1	绝对重力测量	(84)
4-2-2	相对重力测量	(87)
4-2-3	海洋和航空重力测量	(92)
4-2-4	重力参考系统	(94)
4-2-5	重力位二阶导数的确定	(96)
4-2-6	固体潮的观测	(98)
4-3	地面大地测量	(101)
4-3-1	大气折射	(101)
4-3-2	水平角观测	(105)
4-3-3	距离测量	(107)
4-3-4	天顶距观测 三角高程传递	(114)
4-3-5	水准测量	(117)
4-4	卫星观测	(121)
4-4-1	未受摄动干扰的卫星运动	(121)
4-4-2	受摄动干扰的卫星运动	(123)

4-4-3 人造地球卫星和各种时间测量系统..... (124)

4-4-4 方向测量..... (128)

4-4-5 距离测量..... (131)

4-4-6 多普勒频移测量..... (133)

4-4-7 月球观测 射电天文干涉测量..... (136)

4-4-8 卫星测高..... (139)

第五章 全球大地测量

5-1 天文大地测量方法..... (141)

5-1-1 垂线偏差 大地水准面起伏 高程异常... (141)

5-1-2 三维计算 大地基准..... (144)

5-1-3 天文水准..... (146)

5-1-4 平面坐标系..... (148)

5-1-5 高程系统..... (151)

5-1-6 测定大地水准面和似大地水准面的天文
大地测量方法 (153)

5-1-7 天文大地坐标系的定向 最佳密合椭球... (157)

5-2 重力测量方法..... (159)

5-2-1 大地测量边值问题 扰动位 重力异常... (159)

5-2-2 大地测量边值问题的线性化..... (160)

5-2-3 大地水准面上大地测量边值问题的解算... (161)

5-2-4 重力归算 补偿大地水准面..... (165)

5-2-5 地球自然表面上的大地测量边值问题的解
算..... (170)

5-2-6 地球自然表面和外部重力场..... (172)

5-2-7 重力异常的预测..... (173)

5-2-8 重力参考椭球的位、质量和定位..... (175)

5-3 卫星大地测量方法..... (177)

5-3-1 观测方程式..... (177)

5-3-2	几何法·····	(179)
5-3-3	动力法——带谐函数法·····	(182)
5-3-4	动力法——田谐函数和测站坐标·····	(184)
5-3-5	几何法与动力法的联合应用·····	(186)
5-3-6	人卫测高解析法·····	(187)
5-4	联合处理数据的方法·····	(189)
5-4-1	天文重力水准测量·····	(189)
5-4-2	由重力测量和卫星观测确定重力场·····	(191)
5-4-3	天文大地坐标系的置中和加强·····	(192)
5-4-4	平均地球椭球·····	(195)
5-4-5	配置法在全球大地测量中的应用·····	(197)
5-5	地球体的结构和动力学·····	(198)
5-5-1	地球体的径向结构·····	(198)
5-5-2	作为均衡体的地球·····	(200)
5-5-3	关于重力场、地壳和上地幔的说明·····	(201)
5-5-4	地壳均衡说·····	(203)
5-5-5	大地测量学和地球动力学·····	(205)
5-6	月球大地测量学和行星大地测量学·····	(208)
5-6-1	月球大地测量学(月面测量学)·····	(209)
5-6-2	行星大地测量学·····	(212)

第六章 国家控制测量

6-1	平面控制网·····	(213)
6-1-1	布设 埋石 观测·····	(213)
6-1-2	计算·····	(214)
6-1-3	实例·····	(215)
6-1-4	旋转椭球体面上的大地线·····	(218)
6-1-5	椭球面三角形的解算·····	(220)
6-1-6	大地测量主题·····	(221)

6-1-7 三角网的联结..... (223)

6-1-8 超级平面控制网..... (224)

6-2 高程控制网..... (225)

6-2-1 布设 埋石 观测..... (225)

6-2-2 计算 (226)

6-2-3 示例 (226)

6-3 重力网..... (228)

参考文献..... (231)

第一章 绪 论

1-1 大地测量学的定义及其分类

按照 F.R. 赫尔默特(1880)[II]的经典定义,大地测量学(希腊语 $\gamma\eta$ = 地球, $\delta\alpha\iota\omega$ = 我划分,即表示“我划分地球”)是“测定和描绘地球表面的科学”。这一定义至今仍然适用,它包括测定地球外部重力场和测定海底在内。根据这个定义大地测量学既可属于地学,也可属于工程科学的范畴[159]。

由于宇宙研究的发展,大地测量学也转向与其他科学合作来测定其他天体(月球,其他的行星)的表面,这些相应的学科称为月面测量学和行星大地测量学[207]。

大地测量学可以细分为全球大地测量、国家控制测量和平面测量等领域。全球大地测量的任务是整体地测定包括外部重力场在内的地球形状;国家控制测量是通过足够数量的控制点把一个国家的地表面情况掌握起来,在这种基础工作中必须顾及大范围的地球曲率情况;通过平面测量(地形测量,地籍测量,工程测量)可以测定地球表面的细部,通常将水平面作为参考面已足够了。

全球大地测量、国家控制测量和平面测量之间存在着密切的相互作用。国家控制测量采用全球大地测量所确定的参数,而它本身又把国家控制测量的结果供全球大地测量使用。平面测量又进一步同国家控制测量的控制网连接起来,它主要是用于测绘国家地图集和建立房地产的地籍。

我们按讲英语和法语国家的习惯分法,把大地测量学(赫尔默特称为“高等测量学”)理解为只包括全球大地测量和国家控制测量,而把平面测量概括在测量学(赫尔默特称为“低等测量

学”)中。

本书只限于讨论上面所解释的狭意的大地测量学部份，测量学则在格罗斯曼 (Großmann) 的著作[56]中作了介绍。

1-2 大地测量学的任务

从赫尔默特定义出发并略加补充，大地测量学的任务可以综述如下[113; 125; 355]：

大地测量学的任务是：确定地球和其他天体的随时间而变化的形状和外部重力场，并根据在地球表面和外部空间的观测数据来确定平均地球椭球。

这个大地测量的边值问题包括一个几何(地球形状)的和—个物理(重力场)的问题，二者是互相紧密结合的。

所谓地球形状就是指地球自然表面和数学面。

地球自然表面是地球的固体和液体部份相对于大气的分界面。最近，海底作为固体的地球体和海洋的水体之间的分界面也被包括在大地测量学的任务范围(海洋大地测量)之内。由于固体地球(大陆和海底)表面形状不规则，所以它不能用一个简单的数学关系式来表示，因而要逐点地用控制点的坐标来描述。海洋表面(地球表面的70%)则具有一个较简单的构成规律，在一定的假定之下(3-3-1)，它构成地球重力场水准面(重力位为常数的面)的一部份。我们可以设想这个表面在大陆之下连续延伸并称它为地球的数学体形[11]。利斯廷(Listing, 1872)称这个水准面为大地水准面。

高斯对这个水准面曾经指出：“在几何意义上我们称之为‘地球表面’的面，不外乎是一个处处与重力方向正交的面，而全球海洋的表面就是它的一部份。”(高斯：哥廷根(Göttingen)天文台与阿尔托纳(Altona)天文台之间纬度差的测定，哥廷根，1828)。

大地测量中所应用大部份观测数据是以地球外部重力场为依

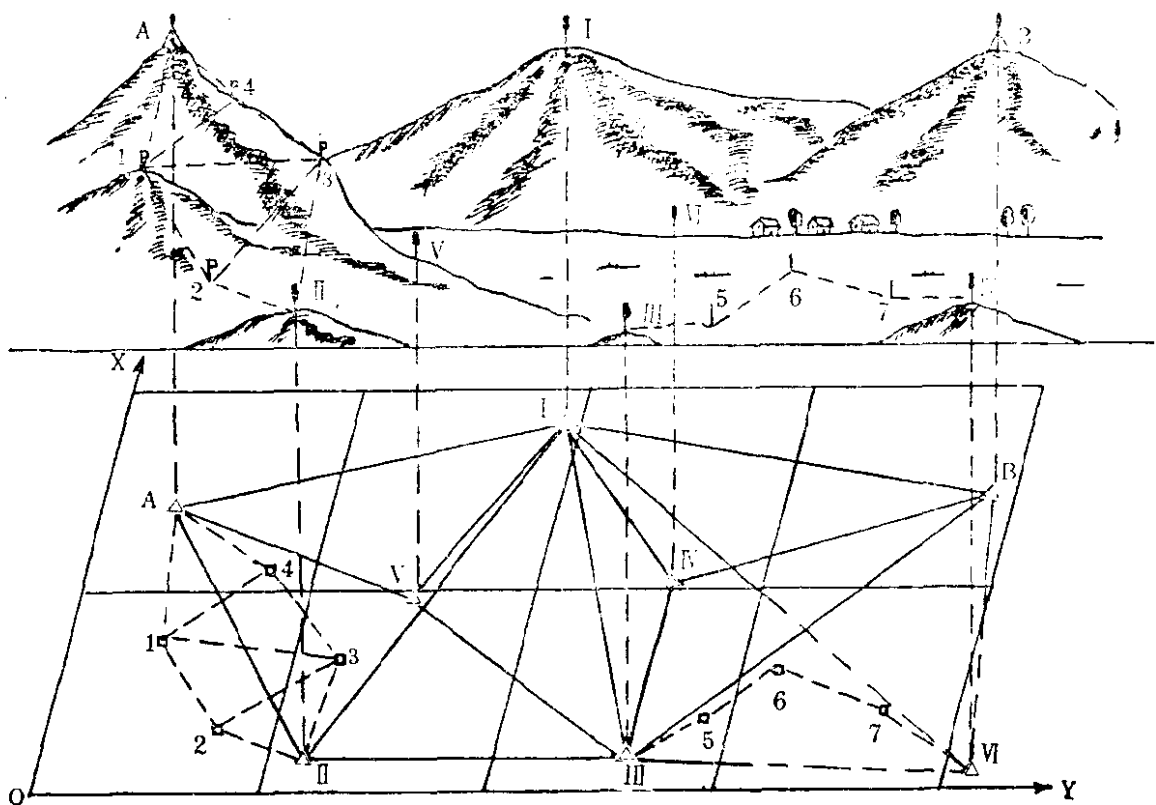


图 1-1

以作为图根控制网(点)的基础。

二、建立图根控制网(点)

首级控制点数量较少,不能满足大比例尺地形测图的需要,还必须加密一次或两次精度较低一级的供地形测图使用的控制点,称为图根控制网(点)(简称为图根点)或地形控制点,如图 1-1 中 1、2、3、4、5……。图根控制网(点)可用经纬仪导线、线形三角锁、测角交会等方法测定其平面位置,用水准测量或三角高程测量的方法测定其高程。图根点的密度应根据地区情况的不同,保证有足够的点数以满足测图的需要。城镇和矿区较一般地区密度大些。

三、地形测图

首先按平面直角坐标系的纵横坐标线和地形图分幅要求,将所测的各级控制点分别展绘在各图幅上,然后根据这些控制点使用一定的仪器工具进行地形测图。在野外测定地物、地貌的特征点对于控制点的相关位置,描绘出地物、地貌的形态。测完后经过检查、修整,将各相邻图幅拼接起来,并清绘、复制,最后提供设计和生产部门使用。

发展起来的。可是地球形状的问题早在古代就已经提出来了。在首先将球形作为地球模型之后，十八世纪前半叶又将稍扁的旋转椭球作为地球体形，请参阅例如佩里埃尔 (Perrier) [23] 的介绍。

1-3-1 球形的地球模型

古代关于地球形状流传着不同的看法，例如俄西阿那斯 (Okeans) (希腊神话中河海之神) 包围着圆盘形大地的说法 (公元前约 800 年荷马的诗, (公元前约 600 年米累特城的希腊哲学家塔累斯 (Thales))。此外毕达哥拉斯 (公元前 582) 和亚理斯多德 (公元前 384~322) 也发表过地球是球形之说。

科学大地测量学的创始人是亚历山大人埃拉托色尼 (Eratosthenes) (公元前 276~195)，他在球形地球模型的假设之下，由观测导出了地球半径的参数。他发明的弧度测量的原理一直沿用到近代：用大地测量方法测定子午弧长度 ΔG ，天文观测提供对应的中心角 γ (图 1.2)。因此得到地球半径 R

$$R = \frac{\Delta G}{\gamma}$$

(1.1)

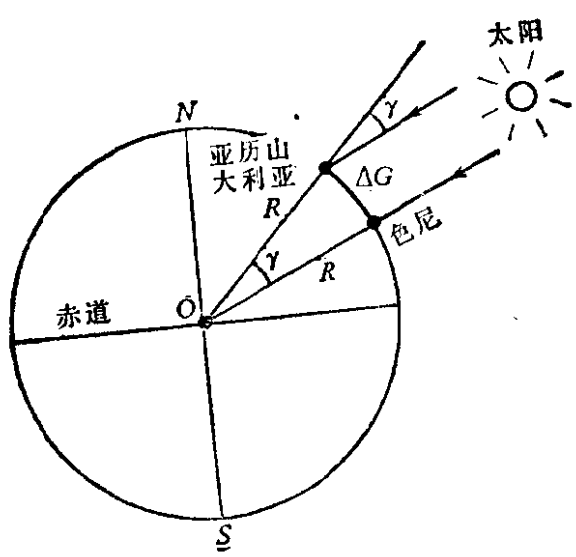


图 1.2 埃拉托色尼的弧度测量

埃拉托色尼发现在色尼（如今的阿斯旺）夏至正午时阳光垂直地射入井内，而在相近的位于同一子午线上的亚历山大，在夏至正午时阳光与垂线构成一个角度，他用立杆的影子测得该角度为 $\gamma = 7^{\circ}12'$ 。色尼和亚历山大之间的距离根据骆驼旅行的时间 50 天和每天行程 100 古希腊长度单位，估计为 $\Delta G = 5000$ 古希腊长度单位。利用古希腊长度单位的长度（1 古希腊长度单位等于 185m）得到地球半径为 7360km，此值与平均地球半径 6371km 的偏差约为 +16%。古代波西多宁斯（Posidonius）（公元前 135~51）作了进一步测定，他根据亚历山大—罗德岛之间的子午弧而导出偏差为 +11% 的地球半径。

中世纪在欧洲对地球形状问题没有进一步研究，阿拉伯人流传在国王阿洛曼孟（al-Māmūn）领导下在巴格达西北进行了弧度测量（约公元 827 年）（偏差为 +10%）。近代初期法国医生费纳（Fernel）于 1525 年在巴黎子午圈上用象限仪观测了巴黎和亚眠的地理纬度，而距离是由车轮的转数算得的（偏差为 +0.1%）。

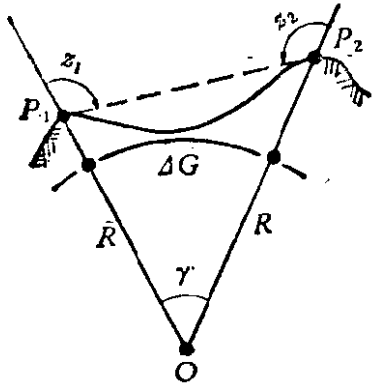
最后几次从地球是圆球出发的弧度测量，标志着在仪器技术（1611 年的克普勒（Kepler）望远镜）和研究方法方面（1589 年丹麦天文学家布腊海（Brahe）提出了三角测量的原理并为荷兰的史耐留（Snellius）所应用）有了重大进步。

1615 年史耐留在荷兰佐姆和阿耳克马尔山之间的弧度测量中第一次应用了三角测量，从而用高精度测量方法代替了以前不精确的弧长估计或直接量测法，这一方法直到二十世纪仍用于弧度测量和基本控制网的建立。史耐留测得的数值相对于平均地球半径的偏差为 3.4%。

在十七到十八世纪，由于 1666 年创建于巴黎的科学院的推动，法国在大地测量学方面取得了领先地位[109]。1669~1670 年法国神父皮卡德（Picard）用三角测量在巴黎子午圈上进行了马耳瓦辛和亚眠之间的弧度测量，当时他第一次应用了带有十字丝的望远镜。牛顿用皮卡德所求得的地球半径值（偏差 +0.1%）检

核了 1665~1666 年所导出的引力定律。

1645 年意大利人格里马尔迪 (Grimaldi) 和 里克奇奥利 (Riccioli) 应用了在原理上与前不同的确定中心角的解法, 就是应用



相对方向的天顶距方法 (图 1.3)。中心角 γ 可以由在 P_1 和 P_2 上测得的天顶距 z_1, z_2 按下式计算

$$\gamma = z_1 + z_2 - \pi \tag{1.2}$$

由于不能足够精确地掌握光线的曲率 (折光异常), 所以这种方法不能获得令人满意的结果。

图 1.3 根据天顶距确定中心角

1-3-2 椭球形的地球模型

在十六和十七世纪, 由天文学和物理学产生的一些新的观测和概念, 对我们关于地球在空间的位置和地球形状的想象起了决定性的影响。哥白尼 (1473~1543) 成功地将托勒密 (Ptole-mäü) 地心系转变为曾经由阿利斯塔布 (Aristarch) (公元前约 320~250)* 提出的日心系 (1543: “天体运行论”); 开普勒 (1571~1630) 发现了行星运动的规律 (1609: “新天文学”, 1619: “宇宙谐和论”); 伽利略发展了现代的力学 (自由落体定律, 摆仪定律)。

1666 年天文学家 J.D. 卡西尼 (Cassini) 观测了木星两极的扁率; 1672 年天文学家瑞薛 (Richer) 在开云岛上一次为测定月球视差的考察中发现, 为了保持每秒的摆动, 必须缩短在巴黎已校正过的秒摆的长度。由这一事实, 根据摆仪定律, 能够得出这样的结论: 重力自赤道向两极增大。牛顿 (1643~1727) 和惠根斯 (1629~1695) 在这些工作和自己工作的基础上, 创造了以物理学的观点为基础的两极稍扁的地球模型。

* 阿利斯塔希系古希腊天文学家, 生于萨摩斯岛。——译者注