

大地测量学

上册

[英] G. 庞福德

测绘出版社

大地测量学

上册

张睿文 单文暄 译

测绘出版社

全书共七章十个附录。前四章论述传统的天文大地测量；后三章主要阐述人卫三角测量、重力和地震测量、物理大地测量；附录中按大地测量观点阐述了必要的数学知识，如矩阵、向量、复数……等。可供国民经济各部门的测量人员参考。

中译本分上、下册出版，上册包括前四章，下册包括后三章和全部附录。

G. Bomford
GEODESY
third edition
Oxford University Press 1971

大地测量学

上册

〔英〕G·庞福德

张睿文 单文暄 译

*

测绘出版社出版

一二〇一印刷厂印刷

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 13 $\frac{1}{4}$ ·字数 344 千字

1980 年 10 月第一版·1980 年 10 月第一次印刷

印数 1-5,500 册·定价 1.65 元

统一书号：15039·新 163

第三版序言

在第二版中(1962)叙述过电磁波测距、电子计算机以及人造卫星这样一些新成就对大地测量的影响;在当时,要充分估价这些新成就的影响还为时过早。现在,由于这些新成就取作为现代大地测量作业可能的基础,所以这一版对原文几乎全部都要重写。

在第一章里,导线已被采纳取代三角测量,而成为新的大地控制网,但是我们仍对三角测量、使用因瓦尺的基线测量以及(在第二章第二节)传统的计算方法作了简单的叙述。这些方法仍然是大多数现存的大地控制网的基础,我们必须有所了解,直到老的观测完全为新的所代替为止。气象条件对电磁波传递速度的影响是这一章的重要部分。

在第二章里,电子计算机的主要影响,是坐标变化法可望取代较老的方法。现在,大规模控制网的真正同时平差已成为可能,这些方法在本章第三节和第五节中讲述。电子计算又使得对未知数及其函数(象任意两点间的对向方位角和距离)的精度估算成为可能,并达到以前想象不到的程度。见附录D及§2-27。

在大地天文测量方面,自1960年以来,改革了守时和记时的方法,并引进了新的仪器。天顶仪与子午仪虽然已经过时了,但对它们进行简要的叙述,我们认为仍然是必要的。

人造卫星大地测量是一个如此巨大而又正在发展的科目,以至不可能对它进行详尽的论述。第五章和第七章的第七节只原则性地讲述了当前所使用的仪器和方法。

在第六章的第二节中简短地讲述了在海面船舶上进行重力强度观测的方法,但由于仪器在发展,观测方法正在迅速改变中。在位的理论方面,新的方法(第七章的第六节)提供了比旧方法更

完善的理论，但是迫切需要的是更多的和分布更好的重力强度和方向的观测结果。

磁力测量部分被省略了，而且第二版所论及的许多次要意义的内容也没有全部重复。这一版还简要地编入了陀螺经纬仪和固体潮等部分。

和以前两版一样，本书的重点在于一般原理的阐述，而不详述各种实际仪器的结构和操作，不过我们对经纬仪和水准仪的使用，以及大地天文测量的各种方法，还是作了相当充分的叙述。现在，大地测量各科目论文的作者，都倾向于采用矩阵、向量和复数方面的知识，因而在附录中包含了这些题材，是按大地测量的观点写的。我想，未曾使用过这些方法的大地测量工作者将会发现，在他们自己的科目范围内是容易学会的。特别是矩阵，它是一门重要的大地测量工具。没有矩阵，就不能理解大规模联立方程组的解法 (§ B-14—B-15) 和误差分析 (§ D-15—D-20)。

纵然误差不得不让位给标准误差。由于作为方差伙伴的协方差的重要性不断增加，终于被迫发生了这样的变化。

大约有 200 种老文献已从参考文献目录中删去，增加了 300 种新的。

章的编号由一到七，而附录的编号由 A 到 J。在各章与各附录中所有的节、公式、图和表都顺序地编了号，冠以相应的章数或附录字母。

我要感谢曾经以提供资料和给予评论的形式帮助过我的许多朋友们，特别是 A · R · 洛宾士博士 (大地天文学和许多其他内容)，A · G · 庞福德先生 (微波测距导线、坐标变换和其他内容) 和 V · 阿斯肯拉齐博士 (矩阵和误差理论)。还有 M · Q · 巴尔力先生 (附录 B、C 和 E)，S · G · 伯尔优艾士先生 (相关观测)，J · F · 贝尔先生 (平差方法 § 2-35)，Q · V · 达伟士先生 (激光)，E · W · 德力森准将 (微波，附录 G)，G · W · 勒朗先生 (固体潮)，D · F · 蒙塞先生 (陀螺经纬仪，水准测量和笛卡尔坐

标计算方面), S · K · 沙尔马先生(误差理论与笛卡尔计算), 和 T · V · 文生泰先生(椭球的变化)。J · 克勒雪准将和 J · K · 何勒托先生曾做了大量的校对工作, 并作了许多有益的改正和评论。

G · 庞福德

第一版序言摘录

“大地测量学”的字面意义是“划分地球”，而它的首要目的是为地形测量提供精确的控制网。有些作者曾把各类三角测量几乎都包括在本学科中，但现在更常见的是只把主要控制网称为大地控制网，而把相隔很远的各大地点之间的补充控制网称为地形测量三角网。关于这种区分是没有必要精确的，但我们这里是假定读者知道怎样使用 5 英寸的测微器经纬仪或 $3\frac{3}{4}$ 英寸的威特经纬仪，并且测量角度能达到 $5''$ 或 $10''$ 的精度。我认为大地测量应包括：

(a) 一等三角测量，并有可能用雷达测量来代替。

(b) 用拉普拉斯点作方位控制，用基线测量作尺度控制，和用严密关联的一等导线测量代替三角测量。

(c) 用一等三角测量或水准测量测定海拔高程。然而，这不是本学科的终结。形势促使大地测量学与地学的某些部分有某种程度的重叠，这些部分称为地球物理学可能是合理的。没有地球形状的知识，就不可能进行三角测量的计算，而且很久以前，大地测量学就包括了经度和纬度的天文测定，它不仅仅是为了给独立的测量系统定位，而且还为了使三角测量能够给出地球上不同部分经度或纬度的每度弧长，并由此来确定地球的形状。另一个处理同一问题的途径，是通过记录重力摆的摆动时间来测定赤道与地极之间的重力变化。但是这两种测量工作，即重力强度和方向的测定，就不限于确定椭球形地球的轴长了。它们揭示地球形状与引力存在着不规则性，这种不规则性成为了解地球内部构造的少数有效指南之一。在大地测量学与地球物理学之间是不可能存在一条精确的分界线的，但就现在的目的来说，我认为大地测

量还应包括:

(d) 通过经度和纬度的天文测定来测定重力的方向。

(e) 用摆仪或其他仪器测定重力的强度。

(f) 应用上述的测量成果确定地球形状, 并对据此可能得出的一些地球物理学推论进行某些探讨。

大地测量学的这个定义与国际大地测量协会的活动范围十分符合。对于磁力测量、潮汐分析、纬度变化等有关联的学科以及地球物理勘探的地震法也都简要地提到了, 这虽然是一些独立的学科, 但常常要求大地测量工作者从事它们技术方面的工作。固体潮已经删除了。

附注: 各节的编号, 第一章为 1-00 至 1-32, 第二章为 2-00 至 2-38 等等, 提到它们时应在前面冠以符号 §。公式的编号, 第二章为 (2-1) 至 (2-20) 等等, 在引用时或加“公式”二字或者不加。涉及的参考文献都按 [1] 至 [438] 列出, 有时采用 “[10]P-4” 的形式, 表明所涉及的内容在文献 [10] 的第 4 页。

译 者 的 话

G. Bomford 所著的大地测量学，从 1952 年出版以来已出了三版。这第三版几乎是全部重写的，它的前四章论述传统的天文大地测量，后三章主要阐述人卫三角测量和物理大地测量。这一版也和前两版一样，着重于一般原理的阐述。对大地测量所需要的数学知识，如矩阵、向量和复数等也作了介绍。并列有大量的参考文献。我们认为这是一本比较好的参考书，因此，决定予以译出。在翻译的过程中得到许多同志的支持和帮助：余植同志协助译了序言，并对全部附录译稿进行了校阅。曾威同志描绘了全部插图。朱洪清、王惠民、章爱贞和彭玉辉等同志分别对某些章节进行了校阅。

胡明城同志对全部译稿作了校订，对此深致谢意，并希读者指正。

一九八〇年元月

目 录

第一章 三角测量、导线测量和三边测量(野外作业)	1
第一节 作业方法、布设方案和技术规定	1
第二节 角度测量	18
第三节 因瓦尺基线测量	37
第四节 距离测量、电磁波测距法	50
第二章 三角测量、导线测量和三边测量的计算	120
第一节 大地参考椭球	120
第二节 单三角锁或导线的计算	137
第三节 用坐标变化法计算	160
第四节 条件平差	181
第五节 大规模大地控制网平差	194
第六节 精度估计	208
第七节 椭球变换	224
第八节 平面直角坐标计算	232
第三章 海拔高程	256
第一节 绪 论	256
第二节 水准测量	263
第三节 三角高程和折光差	288
第四节 平均海水面和潮汐	306
第四章 大地天文测量	317
第一节 绪 论	317
第二节 纬 度	343
第三节 经度、中天法	356
第四节 时间和纬度、同时观测法	378

第五节 方位角	393
第六节 大地水准面的断面	406

第一章 三角测量、导线测量和 三边测量(野外作业)

第一节 作业方法、布设方案 和技术规定

1-00 大地测量控制网

1957 年以前,大地控制网是由若干条基线和天文方位角控制的三角测量系组成。但在电磁波测距仪(EDM)出现之后,形成了用大量导线测量代替三角测量。将来,布设大范围的大地三角测量系,很可能只是少量的。可是,现有的绝大多数测量控制网,仍由三角测量系组成,一般并不急需更替。大陆上的现有三角测量系统还须平差。可以说,虽然已观测了大量的高精度三角测量系,但没有多少已满意地计算过。因此,了解过去使用的三角测量方法,对于大地测量工作者来说,仍然是有必要的。本章第一、二、三节,对此作了一些叙述*。

1-01 目的和定义

布设大地控制网的目的如下:

(a) 建立基本控制网,在此基础上进行较低精度的观测,而这些低精度的观测又形成了测绘地形图和地籍图的控制网。

(b) 与经度、纬度及重力观测结果相结合,确定地球形状和大小,地球内部密度变化,并且决定地球外部等位面的形状。

* 按道理说,大地三角测量的选点和观测以及用因瓦尺测量基线的方法,应该用过去时态叙述。例如:“三角测量的观测曾经进行如下……”,但是仅仅为了清楚地表达含义,写成“三角测量的观测进行如下……”更方便一些,好象这种方法仍在使用一样。

第一个目的是实用目的。几百平方公里的小岛，没有大地控制网，也能精确地测图。”但较大区域内的全面测图，如没有大地控制网，将会产生紊乱现象。大量经费用于大地测量纯科学方面，往往难于证明是正当的，幸而耗费最大的大地测量工作的必要性已经在测量员中认为是无可非议的了。

一个国家的主要控制网，如果附合于通常的标准时，就认为是基本控制网，或一等控制网。为了碎部测量的需要，用于测定一系列点的一些三角形或导线，构成三等控制网，或地形控制网。一、三等网之间可能布设二等网。有些比传统三角测量精度更高的近代方法，例如 § 1-10 的特级导线，或 § 5-00 的人卫三角测量，将来可称为零级控制，用于控制一等网。也有可能用求定经、纬度的天文观测结合求定垂线偏差的重力测量，来提供点距遥远的零级控制。见 § 7-15，§ 7-26 和 § 7-27。

零级网、基本控制网以及适于扩展主要控制网或能增进主要控制网强度的那种二等网，统称为大地控制网。全球有居民的陆地上，约有一半地区现在已经布设了质量良好的大地控制网。

1-02 精 度

布设大地控制网的精度，通常总是以在合理的可能条件下所能达到者为度。测绘地形图及地籍测量时，尺度误差容许达到五千分之一。但在控制网中，若要使任一局部地方都不超过这一误差界限，其总精度就要高得多，当控制网在整体平差之前就要提供测图使用时，更要作到这一点。根据这一要求，我们规定所有主三角形的边长和导线边长的测定误差，一般不得超过五万分之一或百万分之二十(20ppm)，超出此限者属于少见的情况，这应当是合理的。

大地测量的主要科学目的，是测量大地水准面对于椭球面的差距，此差距可能达到 ± 60 米，或者最大相当于地球半径的百万分之十。为了近似地描出这些差距，要求大陆范围内的测量总精度达到百万分之二，这就要求每一三角边或导线边的偶然误差

(比如说)在百万分之二十以内。这与测图要求的精度相同,从现在的测量手段来说,这是可以达到的目标。所存在的困难,在于避免许多相邻边所共有的误差。

一等三角测量中,平均三角形闭合差一般在 $0''3$ 到 $1''0$ 之间。相距 S 公里的两大地点,平差后相对位置可希望的标准误差(均方根误差),普遍采用的公式为 $100\,000\sqrt{S/30}$ 分之一。见文献[51]的第53页。

1-03 大地控制网的布设

大地控制网的布设可采取下列几种形式:

(a) 传统三角测量 (§1-04 — §1-08 和图 1-1, 1-2, 1-3);

(b) 微波测距仪* 测距导线 (§1-09 和图 1-4);

(c) 零级光电测距导线 (§1-10 和图 1-5);

(d) 三边测量 (§1-11 和图 1-6);

(e) 绍兰三边测量 (§1-53);

(f) 人卫三角测量或人卫三边测量(第五章)。

工程测量的布设方案见 §1-16, 洲际连测方案见 §1-12, 二等补充网方案见 §1-13。

1-04 传统三角测量

三角测量系的布设,可采用图 1-1 的连续网,或者采用图 1-2 的锁系。网的优点是对地形测量中的图根控制测量员的要求较少,而且只要能完满地进行平差,即可得出较精确的结果。

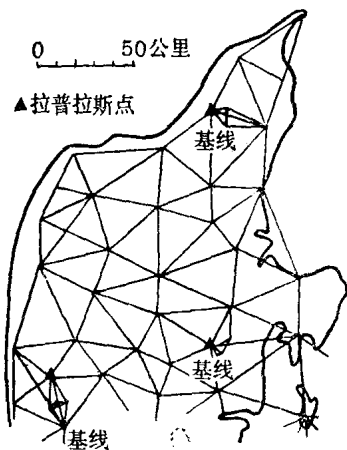


图 1-1 丹麦的部分三角网

* 微波测距仪(Tellurometer)是最早采用10厘米到8毫米波长的一些电磁波测距仪器的商标名称,这里使用这个词,是泛指一切类似的仪器。文献[158]载有1967年使用的仪器一览表。

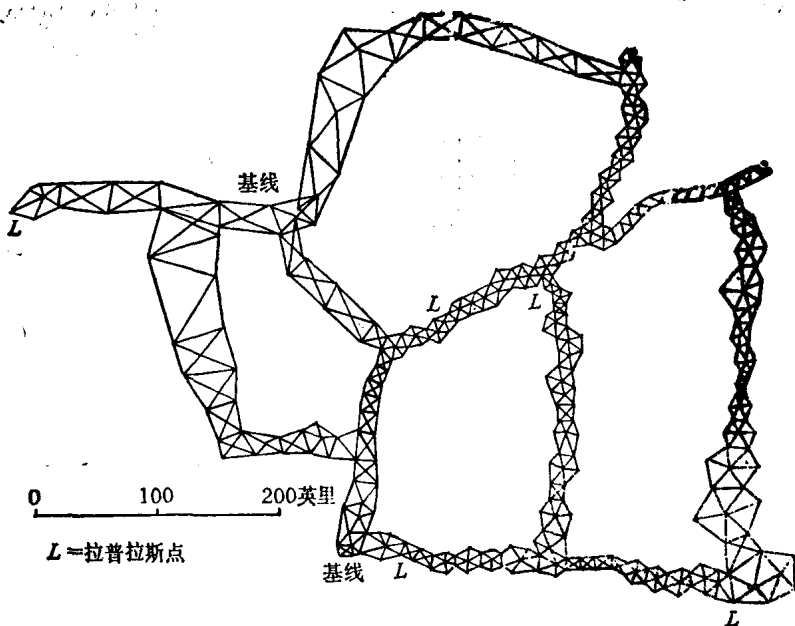


图 1-2 印度和巴基斯坦的部分三角锁

锁系的优点是费用较少，平差容易，只是小区域例外。锁系的观测和计算都较快，这样，就可以在采用临时基准的大量地形测量开始之前，得出平差结果。对于电磁波测距导线，这些优点更为显著。

在各种三角系中，由于每条边的尺度和方位角都是从前一条边推导而来，故其弱点是尺度误差和方位误差有积累的趋势。因此，虽然在原理上用一条基线就能满足计算的要求，但是，还必须用另外的基线来控制尺度误差的积累，方位误差必须观测天文方位角*（及经度）来控制。用这种方法控制方位角的点，称为拉普

* 由于赖以整平仪器的本地垂线不与作为计算基础的参考椭球面法线一致，使得单有的天文方位角出现偏差。天文经度观测可以决定本地垂线与椭球面法线之间的夹角，所以就能改正方位角观测值（见 §2-05 和 §4-40）。经过如此改正后的方位角称为拉普拉斯方位角。

拉斯点(见 §2-05)。

1-05 锁距、基线间距和拉普拉斯点间距

在锁系中，相邻两锁间的正常间隔，取决于下列条件：

(a) 同时平差的可能性。一等观测如果由于不能及时完成，或者由于把它包括到平差中会使平差过于复杂，以致不能合并进行同时平差时，则其精度有所损失。

(b) 二等补充网或三等补充网的经济效果。

(c) 测区的地理状况。

(d) 用因瓦尺测量基线(过去)的适当场地的位置。

印度是以测绘 1 : 63360 的地图为目的，三角锁由一些长方形的锁环组成，锁环横距 150~200 公里，纵长 250~500 公里。在其包围的区域内，一般布满误差不大于 15 米的三等三角网，而不布设精密二等锁系。美国原来布设的一等锁，东部的锁距较小，西部较大，但后来把一等锁距减小到 100×100 公里。

在十九世纪，测量基线和拉普拉斯方位角都有困难。基线间距和方位角间距都比较大，因而对其间的三角测量曾给予了密切的注意。在印度，基线间距为 700~1200 公里，而 1880 年的平差中并没有采用拉普拉斯点。美国的平差推迟到 1925~1930 年间才进行，基线的平均间距为 400 公里，拉普拉斯点的平均间距为 250 公里。当时鉴于选定基线场地的困难，丈量基线和基线扩展花费较大，因而那样的间距是合理的，但以现代的标准来衡量，就过于稀疏了。

电磁波测距仪使得三角系长边的测量简而易行，而且边数不受限制。新布设的任何三角系，自然应该利用这种优点来进行观测。已测设的三角锁网，原则上可以加测一定数量的电磁波测距边来加强，但加测的数量要多，而更主要的是要证明旧点标志的稳固性，变动量只能在少数几厘米以内，因为端点已经变动的单独一条边的测量结果，会给大片旧三角锁网强加上共有的尺度误差，见 § 1-14(e)。为了可靠地证明或反证旧点上标志的稳固性，

可在一中心点上，测量由该点出发的三条或更多的边，或测量一个旧图形的所有各条边。若要全面检测，则较好的而又较经济的办法是，选择一条或两条贯穿旧三角系的路线，布设电磁波测距导线。

用这种方法改进尺度时，同时也要按相等间隔测定新的拉普拉斯点，否则，改进尺度将是徒劳的，这时也要检查旧点标志的稳固性。

1-06 三角锁

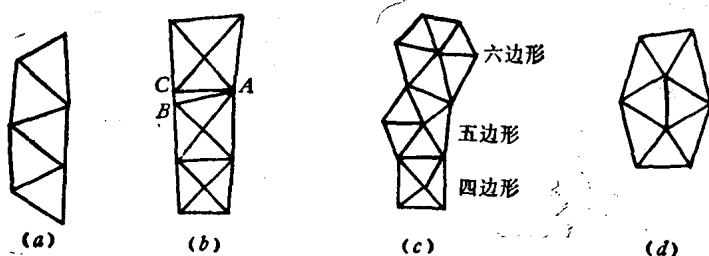


图 1-3

(a)单三角形 (b)大地四边形 (c)中点多边形 (d)双中点多边形

一条三角锁可用许多不同类型的图形组成*。例如：单三角形(图 1-3(a))，大地四边形(图 1-3(b))，中点四边形，中点五边形等(图 1-3(c))，或更复杂的图形(图 1-3(d))。在两锁结合处，或基线扩大网内，会出现更加复杂的图形，如图 1-2，1-14 和 2-18。一般是在选点中使设计适应实地情况，来决定采用的图形类型。但在决定图形类型时，要考虑以下的因素：

(a) 采用的图形，一般都应能够经过图形中的两条独立路线来解算三角形。上述图形中，除单三角形外，均可满足这一要求。

(b) 至少应有一条路线是“条件良好”的，两条路线都“条件良好”则更为可取。¹ 见(1-1)。

* 一个图形是一组三角形，任一图形与其前一图形和后一图形各有一条公共边，也只是各有一条公共边。