

航空摄影测量

外业基础教材

中国人民解放军总参谋部测绘局编

一九七四年

前 言

遵照伟大领袖毛主席关于“**军队要严格训练，严格要求，才能打仗**”的教导和中央军委关于办好教导队的指示精神，各军区都注重了加强测绘部队教导队的建设和训练工作。几年来，各测绘大队在教导队的教学方面积累了一定的经验，编写了一些专业教材。为了提高专业技术教学质量，解决教材缺乏的问题，我们采取教材汇稿的办法，组织测绘部队有作业经验的技术人员和测校的教员共同编写了《航空摄影测量》外业基础教材。供测绘大队教导队和在职技术员教学使用。

遵照毛主席“**教材要彻底改革**”的教导，在编写中力求做到：以无产阶级政治统帅业务技术；以实作需要为主，讲述必要的理论；依据现行的规范、图式，吸取各测绘部队的作业实践经验。但由于编者水平限制，时间又较仓促，可能有错漏之处，请给以指正，以便在教材再版时加以改进。

目 录

第一章 地形测量的基本知识	1
第一节 地球形状和大小的概念	1
第二节 地面点的地理坐标和高程	2
第三节 高斯正形投影	4
第四节 平面直角坐标系	7
第五节 比例尺及坡度尺	11
第六节 地形图的分幅与编号	15
第七节 用高斯——克吕格坐标表查取图幅元素	18
第二章 航空摄影及航摄像片的一般特性	22
第一节 航摄像片的取得	22
第二节 航测成图对航摄资料的要求	25
第三节 航摄像片与地形图的差别	28
第四节 航摄像片的主要点、线和内方位元素	30
第五节 航摄像片上象点移位和方向偏差	31
第六节 象对立体观察	34
第七节 用航测方法测制地形图的过程	36
第三章 经纬仪及角度测量	37
第一节 几何光学基本知识	37
第二节 角度测量的概念	44
第三节 J ₆ 光学经纬仪	45
第四节 蔡司 030(020) 经纬仪	51
第五节 水平角和垂直角观测	52
第六节 经纬仪的检验校正	62
第七节 仪器误差对角度测量的影响	68
第八节 磁偏角测量	73
第四章 平面控制测量	82
第一节 坐标计算的基本原理	82
第二节 单三角形	83
第三节 前方交会	88
第四节 侧方交会	91
第五节 后方交会	94
第六节 引点法	105
第七节 锁网形	107
第八节 经纬仪导线	116

第九节	计算中错误的检查	125
第十节	各种图形的比较	129
第十一节	测站点、照准点归心元素的测定及归心计算	130
第五章	高程控制测量	133
第一节	三角高程测量的原理	133
第二节	多角高程导线	138
第三节	独立交会高程点	143
第四节	视距高程导线	146
第五节	经纬仪水准法	158
第六节	经纬仪定角测量	163
第七节	水网测高法	168
第六章	测量误差	170
第一节	误差的来源及分类	170
第二节	偶然误差的规律	171
第三节	中误差及限差	173
第四节	观测值函数的中误差	175
第七章	控制点的分布及要求	179
第一节	航测成图方法的选择原则	179
第二节	控制布点的原则及要求	180
第三节	全能法布点	182
第四节	微分法布点	194
第五节	综合法布点	197
第六节	图边各种布点位置的要求	203
第七节	特殊情况的布点	207
第八节	综合地形条件下的布点	214
第八章	象片判读及调绘	216
第一节	象片的判读	216
第二节	图式符号的运用	225
第三节	综合取舍的一般原则	230
第四节	调绘前的准备及调绘的一般方法	232
第五节	方位物和独立地物的调绘	235
第六节	居民地的调绘	237
第七节	管线、垣栅的调绘	244
第八节	境界的调绘	246
第九节	道路的调绘	248
第十节	水系的调绘	254
第十一节	地貌和土质的调绘	264
第十二节	植被的调绘	278
第十三节	调绘中的补测	283

第十四节	地理名称调查及注记资料的量测注记	286
第十五节	绘图术	300
第十六节	象片调绘的着墨整饰与接边	307
第九章	航测外业的组织与实施	311
第一节	准备工作	311
第二节	组织与实施	317
第三节	结束工作	319
第十章	平板仪测图	328
第一节	平板仪的构造及附件	328
第二节	平板仪的检验校正	334
第三节	计算尺与计算盘	336
第四节	测图板的准备	344
第五节	图解控制测量	347
第六节	测站点的测定	350
第七节	方位物、高程注记点、碎部点的测定	360
第八节	地物的测绘	361
第九节	地貌的测绘	362
第十节	成果的整理与上交	370
第十一章	单张象片及象片图测图	373
第一节	单张象片测图的控制测量	373
第二节	单张象片测图的准备工作	374
第三节	单张象片碎部测图	379
第四节	单张象片测图的着墨整饰	383
第五节	基本比例尺单张象片测图的其他方法	384
第六节	对已有等大或较大比例尺地形图高程资料的利用	384
第七节	特殊情况下的补测	386
第八节	象片图测图	388
附 录		
附录一	坐标邻带换算	392
附录二	四等水准测量	403
附录三	常见的测量标志	422

第一章 地形测量的基本知识

地形是地面形态及地面物体的总称。地面的起伏形态称为地貌，如平原、丘陵、高山、干河床、山洞、陡崖、梯田坎、露岩地等。地面的天然或人为物体称为地物，如河流、森林、房屋、道路、烟囱、高压电线等。

地形图是按照一定的投影方法、比例关系、规定的符号和注记，把现地地形测绘在平面上的图形，分为实测图和编绘图两种。地形图是军队用来研究地形、保障军事训练和组织指挥战斗行动的重要工具，也是研究和规划经济建设的重要资料依据。

地形测量就是采用一定的方法把地形表示在图纸上，制成地形图原图。它的主要工作有控制测量及地物、地貌测量两项。测图工作直接在空白图纸上进行的叫平板仪测图(或称白纸测图)。利用航空摄影所取得的象片进行的叫航空摄影测量。我国目前主要采用航空摄影测量方法测制 1:1 万、1:2.5 万、1:5 万、1:10 万等比例尺地形图。

毛主席教导说：“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”航空摄影测量外业是航空摄影测量的一部分，是测制地形图过程中的重要环节。为了使航空摄影测量外业工作有机地衔接于地形图的全部测制工作，除了熟练掌握本专业的技能外，还应了解与本专业相关的工作和知识。本章介绍地形测量方面的基本知识。

第一节 地球形状和大小的概念

地形测量工作的对象是地球的表面形态，因此应首先了解地球形状和大小的概念。

地球表面的自然起伏是很不规则的，有高山、丘陵、平原、沙漠、戈壁和江、湖、海洋等。从局部的自然表面不能看出地球总的形状。比如在航海的船上看海洋，地球象是一个大水面。站在山顶看山区，地球又似一个连绵不断的起伏面。那么地球总的形状是怎样的呢？人们通过长期实践和科学研究，发现地球是一个椭球体。在地球表面上，海洋面积约占 71%，陆地面积约占 29%，因此可以把地球总的形状看作是被海水包围的球体，也就是设想有一个静止的海水面(即没有潮汐没有波浪的海水面)向陆地延伸，最后包围起来的球体。这个设想的静止海水面测量上叫大地水准面或中等海水面，它包围起来的球体叫大地体。起初人们把大地体当作圆球看待，后来由于大地测量的结果和较精密的研究证明它不是一个真正的圆球，而是一个沿赤道稍微膨大而两极较为扁平的椭球体。

那么大地水准面是不是一个椭圆体面呢？大地水准面有一个特性，就是这个面处处与地面点的铅垂线方向垂直。根据地球物理原理，地面点的铅垂线方向取决于地球的引力，地球的引力又与其内部质量有关。而地球内部质量分布是不均匀的，因此各地面点的铅垂线方向也是不规则的(属重力测量内容)，就是说，大地水准面实际上是一

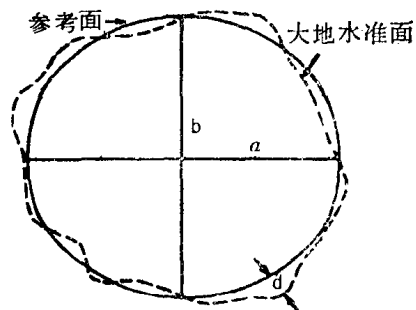


图 1-1 大地水准面与参考面

个不规则的曲面。从测绘的角度来看，如果将地球表面上的形状投影到这个曲面上，则在测量、计算和制图上都是比较困难的，因此，在测量上都是选定一个非常接近大地体的旋转椭圆体(又叫参考椭圆体)作为地球的形状，以旋转椭圆体面做为地球面的参考面。如图 1-1 为大地水准面(虚线)与参考面(实线)的差别示意图。如果这个参考面选的适当，则其与大地水准面差异将很小，一般差值 d 不超过 ± 150 米。

旋转椭圆体，可以看作由椭圆 PQP_1E 绕短轴 PP_1 旋转而成，如图 1-2 所示。 a 为长半径， b 为短半径， $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 为扁率， a 、 b 和 α 称为地球元素。显然，如果知道了这些数据，地球的大小也就知道了。经过广大测量工作者的长期观测和计算，已获得多种地球元素结果，目前我国采用的克拉索夫斯基地球元素值为：

$$a = 6378245 \text{ 米}$$

$$b = 6356863 \text{ 米}$$

$$\alpha = \frac{1}{298.3}$$

测定地球元素是大地测量的任务，在过去它是一项长期而复杂的工作，随着空间技术的发展，卫星测量已应用于大地测量，用卫星测量地球元素可以较迅速地获得精确的结果。

由于地球旋转椭圆体的扁率很小，极接近于圆球，因此在地形测量研究的范围内，可以把它认作圆球，其半径为：

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) = 6371118 \text{ 米}$$

近似值为 6370 公里。

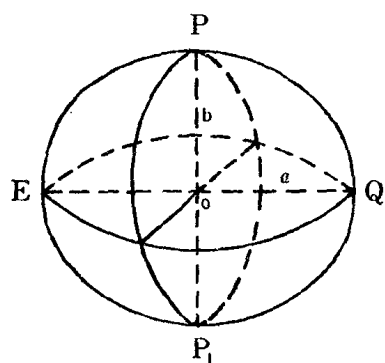


图 1-2 地球元素

第二节 地面点的地理坐标和高程

为了测制和使用地图，测量上对地面点的平面位置采用了统一的坐标系，有地理坐标系与平面直角坐标系。在世界地图、中国地图或军用地形图上，图廓外边都注记有经度和纬度，同时还可以查到某些地面点的高程。任一地面点，知道了它的经度、纬度和高程，便可以确定它的位置。这里说的经度和纬度，称为地面点的地理坐标。那么地理坐标系是怎样建立起来的呢？地面点的经度、纬度和高程又是怎样确定的呢？

一、地面点的地理坐标

第一节我们介绍了地球的形状，它可以看作是一个旋转椭圆体，如图 1-3 所示。图中 PP_1 是旋转椭圆体旋转时所绕的短轴，称

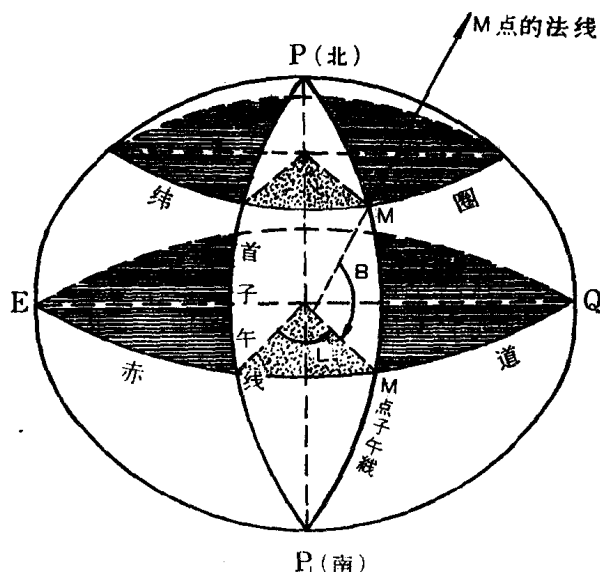


图 1-3 地理坐标

为地轴。地轴与旋转椭圆体面相交的两点 P 、 P_1 称为北极、南极。包含地轴的任一平面称为子午面。子午面与旋转椭圆体面的交线称为子午线或经线，故各经线均相交于两极。过英国格林威治天文台的子午面称为首子午面，它与旋转椭圆体面的交线称为首子午线。垂直于地轴的平面与旋转椭圆体面的交线称为纬圈或纬线，故各纬圈互相平行，亦称平行圈。过地轴中心垂直于地轴的平面称为赤道面。赤道面与旋转椭圆体面的交线称为赤道。

首子午面和赤道面构成了地面点的地理坐标系，是地面点地理坐标——经度和纬度的起算面。过地面任一点 M 的子午面与首子午面的夹角 L ，是 M 点的经度。经度由首子午面向东量为东经，向西量为西经，其值各由 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。 M 点的法线（过 M 点垂直于 M 点切平面的直线）与赤道面的夹角 B ，是 M 点的纬度。纬度由赤道面向北量为北纬，向南量为南纬，其值各由 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。 L 和 B 是 M 点的地理坐标，其值亦可用其对应的弧长即弧度表示。

上面介绍的地面点的地理坐标——经、纬度，是按大地测量方法在地球旋转椭圆体面上推算的，它也可用天文测量方法测得；前者称为大地经纬度（或大地坐标），后者称为天文经纬度（或天文坐标）。同一地面点的大地经、纬度与天文经、纬度一般有微小差异，习惯上以符号 L 、 B 表示地面点的大地经、纬度，以 λ 、 φ 表示天文经、纬度。在军用地形图上使用的经、纬度为大地经、纬度。

由上述可知，建立了地理坐标系，地面上任何一点仅有一个对应的地理坐标（单指大地坐标或天文坐标来说）。它为人们指明地面点在地球上的位置，提供了统一的有利条件，因此地理坐标被广泛应用于绘制地图，以及需要指明其在地球上的位置的各种活动中。例如在中国地图上，可以查到我国台湾省台北市的地理坐标为：北纬 $25^\circ 00' 32''$ ，东经 $121^\circ 30' 36''$ 。反之若知某地的地理坐标为：北纬 $16^\circ 31' 05''$ ，东经 $111^\circ 37' 08''$ 。在地图上即可找到我国南海的永乐群岛。又如每到夏秋之季，我国中央气象台预报台风时，经常用地理坐标指示台风活动的区域，人们就可以预作防范。

测定地面点的地理坐标属大地测量范围，这里不多介绍。

二、地面点的高程

测定了地面点的地理坐标——经度和纬度，即确定了地面点在地球旋转椭圆体面上的位置，还不足以表示地球表面上一个点的位置，因为地球表面高低起伏不同，要表示地面点的实际位置，即空间位置，还需要确定它的高程。从上一个问题的叙述中我们知道，确定地面点的地理坐标的关键在于规定经度和纬度的起算面——首子午面和赤道面，同样确定地面点高程的关键仍在于选择一个起算面。测量上规定，以中等海水面（即大地水准面）作为确定地面点高程的起算面。那么这个中等海水面又是怎样确定的呢？

我们知道，自然海水面是一个受潮汐、风浪等自然现象影响，时刻变动着的曲面。在海边设立验潮站，长期有规则地观测变动着的海水面的高度，取其平均值作为高程零点，设有一个静止的海水面通过高程零点，且穿过陆地形成一个封闭曲面，这个面就定为中等海水面（即大地水准面）。我国目前采用青岛验潮站一九五〇年至一九五六年观测成果推算的黄海中等海水面，作为全国的高程起算面，故称一九五六年黄海高程系。

高程起算面确定后，地面点的高程就可以确定了。自地面点到中等海水面的垂直距离称为地面点的高程，也称海拔或真高。在我国地面点的高程就是地面点至黄海中等海水面的垂直距离，如图 1-4 所示。图中地面点 A 的高程为 1,563 米，这个数值即表示 A 点到黄海中等海

水面的垂直距离。

地面上两点高程之差称为高差或比高。如图 1-4 所示, 若知某地面点 B 的高程为 1,156 米, 则 B 点与 A 点的高差为 $h=1,563 \text{ 米}-1,156 \text{ 米}=407 \text{ 米}$ 。

显然, 高差是相对的, 可为正值 也可为负值。

这里要说明一点, 世界上各个海洋的中等海水面都不是一致的, 就是同一个海洋的不同地方也略有差异。因此作业时, 当利用的大地点或其它资料的高程成果不是一九五六年黄海高程系时, 应当事先化算为一九五六年黄海高程系。一九五七年以前各测绘部门施测的水准成果, 高程起算基准面不统一, 但多数已进行联测和改算。各旧高程系统归化至一九五六年黄海高程系的改正数, 在国家水准成果表中有专表记载, 这里就不列入了。各旧高程系与一九五六年黄海高程系的高程差不是一个常数, 其数值随地区而异, 主要由于水准测量误差的积累所致, 因此利用旧高程系统成果时, 须采用与测区最近的水准点的高程改正数, 作为换算高程的依据。

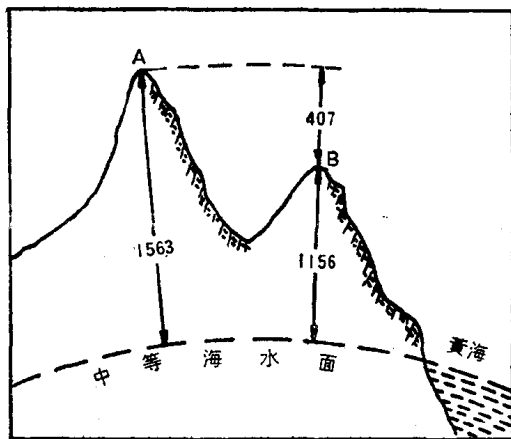


图 1-4 高程和高差

总之, 地面点的位置可用该点的经度(L)、纬度(B)和高程(H)表示; 三者一经确定, 该点的空间位置就确定了。

第三节 高斯正形投影

一、投影的意义

由第一节知道, 测量上是以旋转椭圆体面作为地球的参考面的。显然, 表现在旋转椭圆体面上的地面图形是曲线上的图形。由于地球半径很大, 可以把旋转椭圆体面有限的小范围内的曲面当水平面看待, 而在大范围内把旋转椭圆体面当作平面就不行了。如象一个桔子皮, 取它一小块可以展成平面, 取一大块就不能展成平面了; 如果把它破碎成很多小块, 每小块虽可以展成平面, 但各小块就不能拼在一起成为一大块平面了, 如果硬性拼接必然产生重叠或裂缝。地形测量是把小范围的水准面当作水平面看待, 一块一块地测绘地形图的, 为了使大面积的地形测量成果前后衔接, 且保持地面上图形的一定特性, 就须采用地图投影。地图投影就是将不可展曲面——旋转椭圆体面上的图形, 按照一定条件投影到可展的曲面(如圆锥面、圆柱面等)上, 再展为平面, 成为地形图。

采用地图投影, 并不能保持投影前后图形完全一致, 而总是要产生变形的, 这种变形包括长度、角度及面积三种变形。但对于这种变形可以采用不同的地图投影方法加以控制和限制, 使变形减小到适当程度, 或使其中一种变形消除, 其它变形尽量减小。如保持投影前后图形面积相等, 而使长度和角度变形尽量减小; 或保持投影前后图形角度相等, 而使长度变形成比例, 面积变形尽量减小。前者称等积投影, 后者称正形投影(又称等角投影)。高斯正形投影(简称高斯投影)是正形投影的一种, 它是由高斯创立后经克吕格改进的, 所以也称高

斯——克吕格投影。我国目前除 1:100 万或更小比例尺图外，均采用高斯正形投影。

二、高斯投影的概念

高斯投影是以横椭圆柱面做投影面的分带正形投影。如图 1-5-甲所示，使椭圆柱的轴通过旋转椭球体中心且与旋转椭圆体的长轴重合(即与赤道面重合)，同时使椭圆柱面与旋转椭圆体投影带的中央子午线相切，在保持等角条件下，用数学的方法，将旋转椭圆体投影带上的点、线投影到椭圆柱面上。如旋转椭圆体面上的 A 点投影到椭圆柱面上为 a 点，赤道面与椭圆柱面的交线 EE' 为赤道的投影。投影后，依过极点的母线(平行于椭圆柱轴的椭圆柱面上的直线)将椭圆柱面切开，并展成平面 M，如图 1-5-乙所示，该平面叫高斯投影平面。

综上所述，横椭圆柱投影即高斯投影，有三个条件：

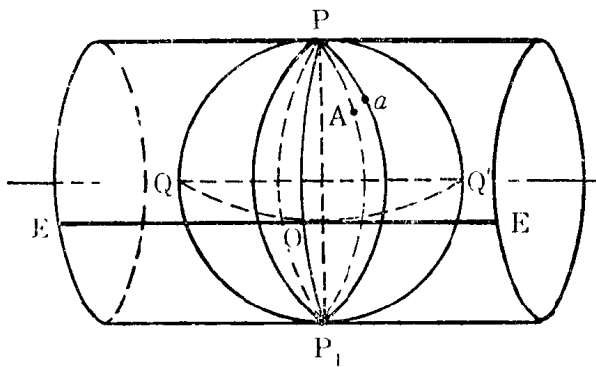


图 1-5-甲 高斯投影

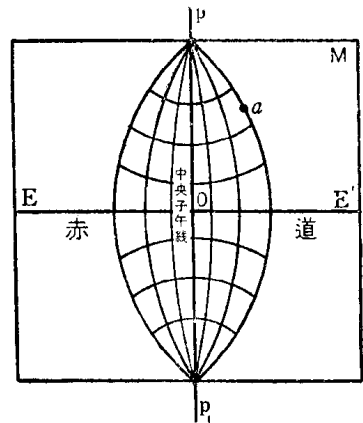


图 1-5-乙 高斯投影平面

(1) 中央子午线投影后无长度变形且为直线。这是因为中央子午线 $\widehat{POP_1}$ 与横椭圆柱面相切，故 $\widehat{POP_1}$ 亦为横椭圆柱面的大圆弧，因此，在高斯投影平面上它长度不变且为直线。

(2) 赤道投影后仍为直线且与中央子午线投影正交。这是因为赤道面为含横椭圆柱轴的平面，故赤道的投影即赤道面与横椭圆柱面的交线 EE'，在高斯投影平面上为直线且与中央子午线投影正交。

(3) 投影后无角度变形，由一点出发各方向变形成比例。这是由高斯投影规定的数学关系决定的，这里不详细说明了。

从上述条件和图上可以看出，高斯投影的投影带图形投影后有以下三个规律：

(1) 旋转椭圆体面上两极间相等的投影带的子午线，除中央子午线投影后长度不变且为直线外，其余子午线投影后为凹向中央子午线的曲线，并以中央子午线为对称轴，其长度大于投影前长度，且离中央子午线愈远变形愈大。因此投影带上的线段除位于中央子午线上者外，其投影后长度均较实地长度增长。

(2) 投影后的纬圈除赤道为直线外，其余均为凸向赤道的曲线，并以赤道为对称轴。

(3) 经线与纬圈投影以后仍然保持正交。

横椭圆柱投影，保持了投影前后图形的等角条件，虽然长度产生了变形，而且离中央子午线愈远这种变形愈大。根据推算，离中央子午线 300 公里时投影长度变形约为 $\frac{1}{900}$ ，而且由一点出发各方向的变形是成比例的。这样的精度，已能满足 1:2.5 万测图的要求，也就是

说，只要将投影带的区域限制在一定范围内，使投影后的长度变形满足测图和用图的精度要求，长度变形的问题就解决了。我国大部分地区经差三度所对应的弧长都小于 300 公里，因此我国测制 1:2.5 万、1:5 万、1:10 万比例尺地形图是采用六度分带的。

当进行 1:1 万或更大比例尺测图时，因投影后长度变形满足不了用图的精度要求，就要采用三度分带法。

三、投影带的划分

采用六度分带，即从首子午线开始，每隔经差 6° 为一带，将旋转椭圆体面，由西向东分为相等的六十个带。即 $0^\circ \sim 6^\circ$ 为第一带， $6^\circ \sim 12^\circ$ 为第二带……依此类推。图 1-6-甲为旋转椭圆体上六度分带的情形，图 1-6-乙为 6° 分带投影到高斯投影平面上的情形。位于各带

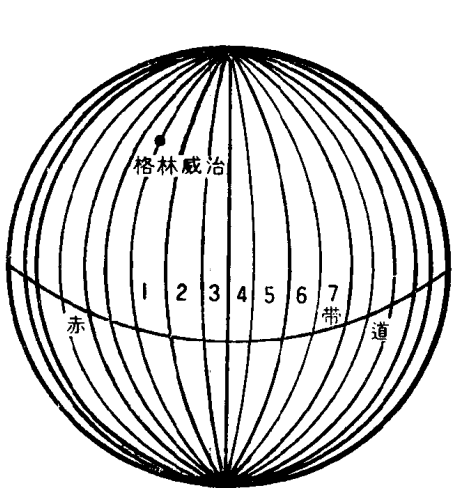


图 1-6-甲 6° 带的划分（椭圆体）

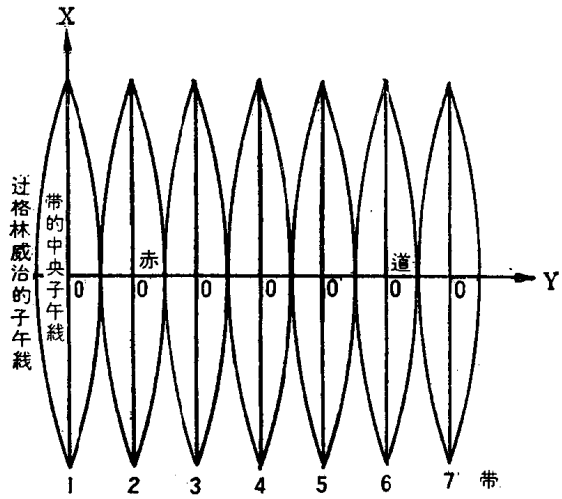


图 1-6-乙 6° 带的划分（高斯投影平面）

中央的子午线称为这个带的中央子午线。六度带第一带的中央子午线是 3° ，第二带的中央子午线是 9° ，……则六度带任意一带中央子午线的经度是： $n \cdot 6^\circ - 3^\circ$ (n 为带号)。

三度分带是在六度带的基础上分成的，它的中央子午线，一部分同六度带的中央子午线

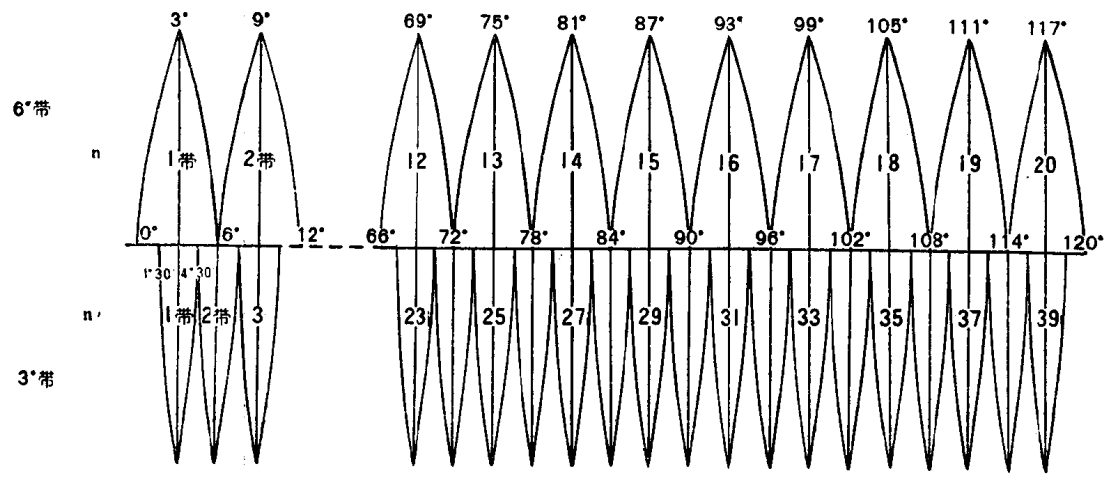


图 1-7 3° 带与 6° 带中央子午线的关系

重合，一部分与六度带的边缘子午线重合，即从 $1^{\circ}30'$ 这条子午线开始， $1^{\circ}30' \sim 4^{\circ}30'$ 为第一带， $4^{\circ}30' \sim 7^{\circ}30'$ 为第二带……依此类推，将旋转椭圆柱体面分成一百二十个带，如图 1-7 所示。第一带的中央子午线是 3° ，第二带的中央子午线是 6° ，……则三度带任意一带的中央子午线的经度是： $n' \cdot 3^{\circ}$ (n' 为带号)。显然，三度带的单数带中央子午线同六度带的中央子午线重合，而三度带的双数带中央子午线和六度带的分带子午线重合。

以上叙述了用横椭圆柱分带投影，即高斯正形投影，将地面图形转化为地形图的概念。至于如何具体完成这个转化，是大地测量的任务，这里就不作介绍了。但是应当知道：大地测量为地形测量提供了地面点的平面坐标和高程，地形测量才得以在平面上进行，并保证了大面积地形测量成果的前后衔接，也就是说，地形测量将地面图形转化为地形图过程中的地图投影工作，是通过大地测量提供的地面点在高斯投影平面上的成果实现的。

第四节 平面直角坐标系

前面说过，为了确定地面点在旋转椭圆柱体面上的相关位置，可在旋转椭圆柱体上建立地理坐标系，确定点的地理坐标。旋转椭圆柱体上任一点的地理坐标，可用横椭圆柱分带投影的方法化算到投影平面上建立一个平面直角坐标系，以确定点的平面坐标。本节要介绍的就是关于平面直角坐标系的建立等方面的一些问题。

一、平面直角坐标系的建立

由第三节可知，投影带的中央子午线和赤道在高斯投影平面上的投影为互相垂直的两直线。以中央子午线的投影为纵轴 X ，以赤道的投影为横轴 Y ，以两线投影的交点 O 为坐标原点，构成了高斯投影平面上的一个直角坐标系，称为高斯平面直角坐标系，如图 1-8 所示。

纵坐标 X 由赤道向北量为正，向南量为负；横坐标 Y 由中央子午线向东量为正，向西量为负。我国领土全部位于赤道以北，所以纵坐标 X 值均为正值，而每个带内的横坐标 Y 值却有正有负。为了避免负值，规定将投影带内点的横坐标值加上 500 公里，即相当于将每带的纵坐标轴西移 500 公里；同时因为横椭圆柱六度带或三度带投影，不论在哪一带里，只要经差（这里指对本带中央子午线的经差）及纬度相等，其平面直角坐标都是一样的。为了指示点在哪带，又规定在点的横坐标 Y 值之前要写上带号。这样的坐标称为通用坐标。例如：在二十带中有 a_1 及 a_2 两点，其横坐标值分别为：

$$Y_{a_1} = +189\ 672.3 \text{ 米 (在中央子午线以东)}$$

$$Y_{a_2} = -105\ 374.8 \text{ 米 (在中央子午线以西)}$$

根据上述原则，将 a_1 、 a_2 两点横坐标值加上 500 公里，并加上带号，即可得到此两点通用坐标的 Y 值为：

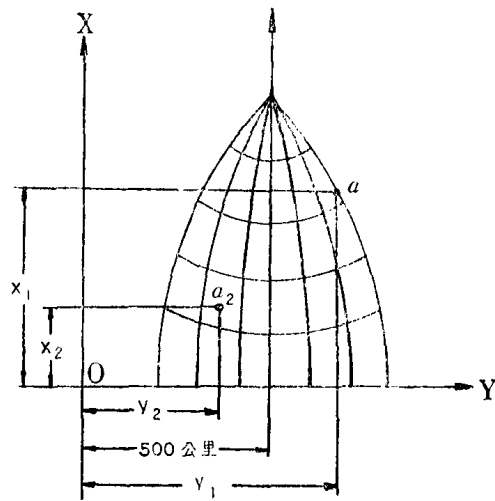


图 1-8 高斯平面直角坐标

$$Y_{a1}=20\ 689\ 672.3\text{ 米}$$

$$Y_{a2}=20\ 394\ 625.2\text{ 米}$$

这里要说明一点，由于横椭圆柱分带投影的特性，在旋转椭圆体面上，具有相同经度的各点化算到平面直角坐标系上的Y值是不同的，具有相同纬度的各点化算到平面直角坐标系上的X值亦是不同的。这一点在用高斯——克吕格坐标表查取图廓点坐标时，看得很清楚。

二、直线定向——方位角

测制和使用地形图经常遇到确定地面上直线方向的问题。地面上的点通过高斯投影可在平面上得到确定，即用其在高斯平面直角坐标系上的纵、横坐标X、Y来确定。那么地面上的直线方向在平面上又怎样确定呢？如果我们能在高斯投影平面上找到一个或几个标准方向，又知道该直线与标准方向之间的夹角——方位角，则该直线在平面上的方向也就确定了。由于选择的标准方向不同，方位角又分为真方位角，坐标方位角及磁方位角三种。

(一)真方位角

在高斯投影平面上，由 P_1 点的真子午线方向即真北方向 P_1N 起算，顺时针量至直线 P_1P_2 的角度 A ，称为直线 P_1P_2 的真方位角，如图1-9所示。由于直线 P_1P_2 上各点的真子午线方向都交于南北两极，它们互不平行，因此同一直线上各处的真方位角也不相等。

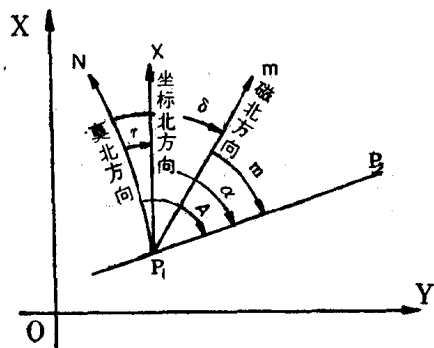


图 1-9 方位角

(二)坐标方位角

在高斯投影平面上，由 P_1 点的坐标北方向(过 P_1 点且平行于纵坐标轴的直线方向) P_1X 起算，顺时针量至 P_1P_2 的角度 α 称为直线 P_1P_2 的坐标方位角，如图1-10所示。

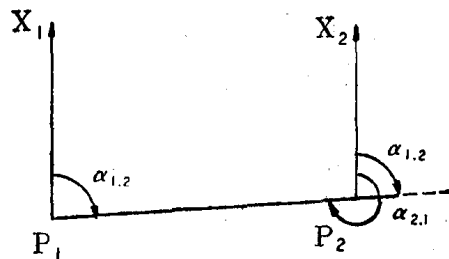


图 1-10 正反坐标方位角

1. 正反坐标方位角

设直线 P_1P_2 的坐标方位角为 $\alpha_{1,2}$ ，直线 P_2P_1 的坐标方位角 $\alpha_{2,1}$ ，如果以 $\alpha_{1,2}$ 为直线 P_1P_2 的正方位角，则 $\alpha_{2,1}$ 就是该直线的反方位角。反之亦然。如图1-10所示。从图中可知它们的关系如下：

$$\begin{cases} \alpha_{2,1} = \alpha_{1,2} + 180^\circ \\ \alpha_{1,2} = \alpha_{2,1} - 180^\circ \end{cases} \quad (1-1)$$

由此式可得出：正反坐标方位角相差 $\pm 180^\circ$ 。如： $\alpha_{1,2} = 15^\circ$ ，则 $\alpha_{2,1} = 195^\circ$ ；若 $\alpha_{2,1} = 300^\circ$ ，则 $\alpha_{1,2} = 120^\circ$ 。这一特点在控制测量计算中经常应用到。

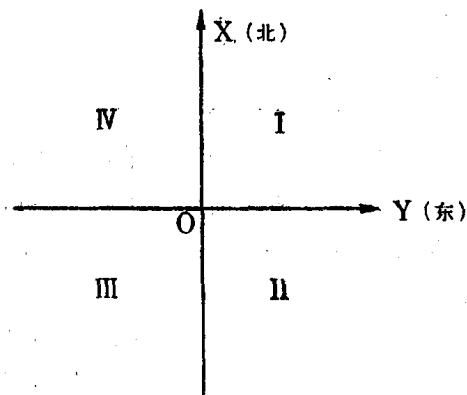


图 1-11 象限

2. 象限角

在测量工作中，由于坐标方位角都是顺时针方向计算的，所以平面直角坐标系的 I、II、III、IV 四个象限也规定为顺时针方向排列，如图 1-11 所示。这和数学上四个象限的排列方向相反，但由于平面直角坐标系的两个坐标轴也和数学上的坐标轴相反，因此数学中的一切函数的解析关系及运算公式，在测量上仍然适用。

象限角为直线与纵坐标轴方向所夹的小于 90° 的角度。图 1-12 所示为四个象限的象限角及其与坐标方位角的关系。

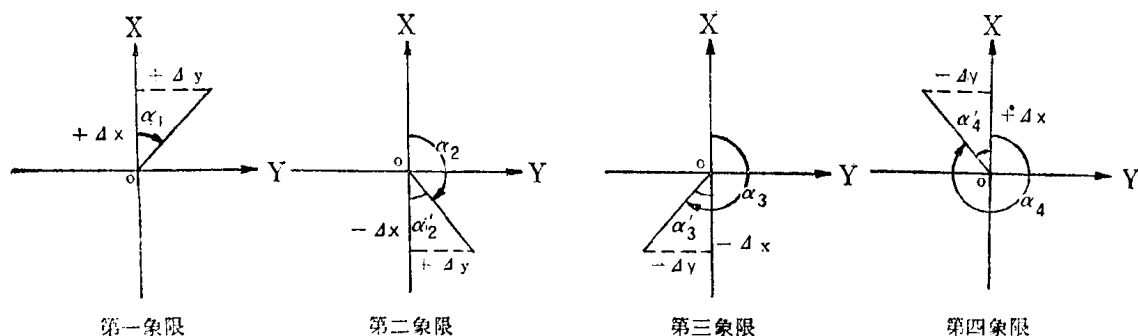


图 1-12 坐标方位角与象限角的关系

设直线在四个象限的坐标方位角及象限角分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 及 α'_1 、 α'_2 、 α'_3 、 α'_4 ，从图中得知它们的关系是：

$$\left. \begin{array}{ll} \text{第 I 象限} & \alpha'_1 = \alpha_1 \\ \text{第 II 象限} & \alpha'_2 = 180^\circ - \alpha_2 \\ \text{第 III 象限} & \alpha'_3 = \alpha_3 - 180^\circ \\ \text{第 IV 象限} & \alpha'_4 = 360^\circ - \alpha_4 \end{array} \right\} \quad (1-2)$$

式(1-2)在控制测量的计算中经常用到，应当搞清并熟记。

(三)磁方位角

当磁针水平静止时，南北两端所指的方向，为磁子午线方向，北端所指为磁北方向。由 P_1 点的磁北方向 P_1m 起算，顺时针量至直线 P_1P_2 的角度 m ，称为直线 P_1P_2 的磁方位角，如图 1-9 所示。

以上三种方位角在实际工作中各有其用途。真方位角可借某些星球测算出来，也可以用计算的方法由坐标方位角及子午线收敛角推算出来〔见式 (1-3)〕，它可以用于控制大地点之间的方位和利用北极星标定地图方位。坐标方位角由于在同一投影带内同一直线上处处相等，对于方位角的传递计算方便，因此在测量计算中被广泛应用。至于磁方位角，由于磁针方向受时间、地点及磁针灵敏度的影响而经常变化，它只能用来概略指示方向，便于标定地图和按磁方位角行进。

确定地面直线方向的三个标准方向——真北方向、坐标北方向及磁北方向。在每幅地形图上，是以东西图廓线、坐标方里网纵线及南北图廓线上磁北、磁南点的连线表示的，三者的

偏角关系在南图廓外用略图和注记表示，在使用地形图时可根据实际情况加以运用。

三、子午线收敛角

从图 1-9 可以看出，在 P_1 点上，其坐标北方向 P_1X 与真北方向 P_1N 是不一致的，它们之间夹角 γ 称为子午线收敛角。 γ 值由真北方向向东量为正，向西量为负，显然位于各带中央子午线以东的点的 γ 值为正，以西的点的 γ 值为负。从图 1-9 中可得出：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= A - \gamma \\ \text{或 } A &= \alpha + \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知：已知某点的真方位角和子午线收敛角，则该点的坐标方位角即可得出；反之若知某点的坐标方位角和子午线收敛角，则该点的真方位角也可得出。

由点的坐标方位角和子午线收敛角推算真方位角，应用于磁偏角的计算中。由图 1-9 可知，磁偏角 δ (由 P_1 点的真北方向 P_1N 至 P_1 点的磁北方向 P_1m 的夹角) $= A - m = \alpha + \gamma - m$ 。这里的 γ 值为图幅平均子午线收敛角，可由高斯——克吕格坐标表中查出的四个图廓点的 γ 值取中数得到。若用点的 γ 值可由该点的纵横坐标经计算得到，其计算公式是：

$$\gamma = K \cdot Y$$

式中：K 值可用该点的纵坐标 X 为引数(以公里为单位)由计算子午线收敛角的系数 K 表中查取；Y 为该点的横坐标，以公里为单位。计算出的 γ 值以分为单位，精度可达 0.1 分。

例如：已知某点的纵坐标 $X = 3\,736\,686.0$ 米，横坐标 $Y = 20\,462\,586.2$ 米，求其子午线收敛角？以 $X = 3\,736.7$ 公里为引数由 K 值表中查得 $K = 0.3599$ ，而 $Y = 462.6$ 公里 $- 500$ 公里 $= -37.4$ 公里，则 $\gamma = 0.36 \times (-37.4) = -13'5$

下面推证 $\gamma = K \cdot Y$ 这个公式。

如图 1-13，设中央子午线为 PEP_1 ，地面上任一点 A 的子午线为 PAP_1 ，A 点的纬度为 B，过 A 作平行圈与中央子午线交于 M 点，再过 M 及 A 分别作两子午线的切线，则必交于自转轴 PP_1 的延长线上 P' 处，此时 MP' 与 AP' 不平行之差 γ 即为 A 点的子午线收敛角。由于 $\widehat{AM}$ 甚小，故可以认为 $\widehat{AM}$ 是以 P' 为圆心，以 $P'M$ 为半径的圆弧，由此可以得到下面的关系：

$$\gamma = \frac{\widehat{AM}}{P'M} \rho' \quad (\rho' = 3438') \quad (1-4)$$

由立体几何定理知， $P'M$ 垂直于 CM ， $P'C$ 垂直于 CE ，故 $\angle CP'M + \angle MCP' = \angle MCP' + B$ ，即 $\angle CP'M = B$ 。由直角三角形 $CP'M$ 知：

$$P'M = R \cdot \operatorname{ctg} B \quad (1-5)$$

以式(1-5)代入式(1-4)，并由于 $\widehat{AM} \approx Y$ (A 点的横坐标)以 Y 代替 $\widehat{AM}$ 进行计算已可满足精度要求。

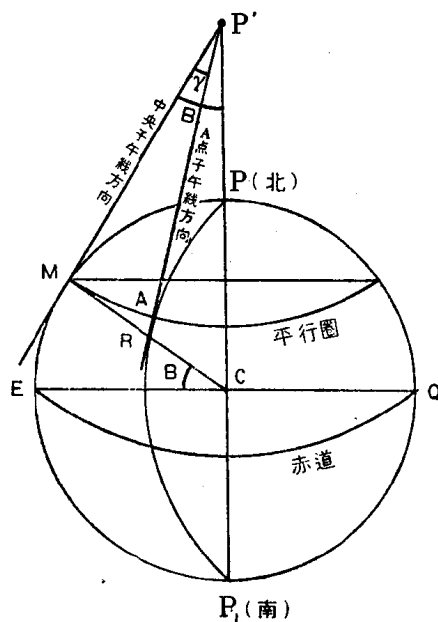


图 1-13 子午线收敛角

$$\gamma = \frac{Y}{R \cdot \operatorname{ctg} B} \rho' = Y \cdot \frac{\rho'}{R} \operatorname{tg} B$$

为了制表和计算方便,把Y化算为公里单位。

$$\text{则} \quad \gamma = Y \cdot \frac{\rho'}{R} \operatorname{tg} B \cdot 1000$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{令} \quad K = \frac{\rho'}{R} \operatorname{tg} B \cdot 1000 \\ \text{则} \quad \gamma = K \cdot Y \end{array} \right\} \quad (1-6)$$

式(1-6)即为地形测量计算点的子午线收敛角的实用公式。

第五节 比例尺及坡度尺

地形图上某一线划的长度与实地水平距离(简称平距)之比称为地图比例尺,即:

$$\text{比例尺} = \frac{\text{图上长}}{\text{实地平距}} = \frac{1}{M} \quad (1-7)$$

式中M为比例尺分母,也是在图上缩绘实地平距的倍数。实用中常使比例尺的分子为1,分母为100的整倍数。例如M=50000时,则比例尺为 $\frac{1}{50000}$,通常写成比例式即为1:5万,或称五万分之一比例尺。在1:5万比例尺的地形图上,当实地平距为50000厘米时,图上长为1厘米。

从式(1-7)可以看出:地图比例尺的大小,是由比例尺分母决定的,分母越小,地图比例尺就越大;分母越大,地图比例尺就越小;地图比例尺越大,图上显示地形就越详细,但一幅图中所表示的实地范围就越小;地图比例尺越小,图上显示地形就越简略,但一幅图中所表示的实际范围就越大。同时,如果知道了地图比例尺,则根据图上直线长度,可以求出实地相应的直线平距;反之,根据实地直线平距,可以求出图上相应的直线长度。这就是比例尺的作用。

比例尺随着测图和用图的需要,在结构形式上可分为数字比例尺、直线比例尺和复比例尺三种。

一、数字比例尺

用数字表示的比例尺,如1:100万、1:10万、1:5万、1:2.5万、1:1万等称为数字比例尺。如果知道了数字比例尺,就可以用计算的方法,将图上长度换算为实地相应平距;反之,也可将实地平距换算为图上相应长度。

例如:当地图比例尺为1:5万时,图上两点间长度 $l=1.2$ 厘米,则地面上相应平距L为:

$$L = l \cdot M = 1.2 \text{ 厘米} \times 50000 = 600 \text{ 米}$$

又如:实地两点间平距 $L=1180$ 米,则化算为1:5万比例尺地图上的相应长度 l 为:

$$l = \frac{L}{M} = \frac{1180 \text{ 米}}{50000} = 2.36 \text{ 厘米}$$

二、直线比例尺

用一定长度的线段表示图上长,并按它所相应的实地平距注记在线段上,这种用线段和

注记表示的比例尺称为直线比例尺。如图 1-14 所示，它是在一直线上截取若干相等的线段，每一段称为比例尺的基本单位，线段长一般为 1 厘米或两厘米，将最左边的一段又等分为 10 小段。对于某种比例尺来说，直线上的每一段或小段都表示地面上一定的平距，所以，以线段

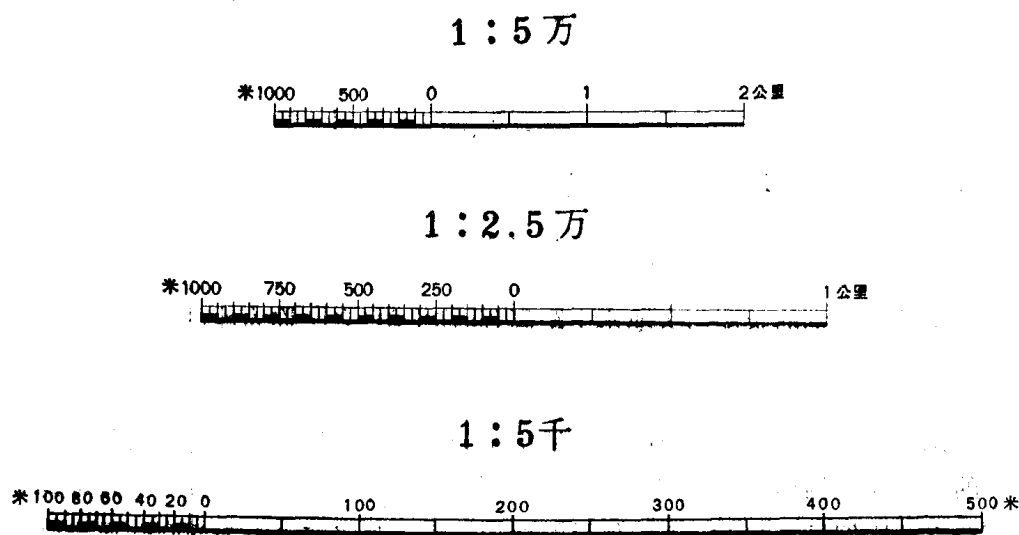


图 1-14 直线比例尺

最左边一段的右端为 0 点，分别按一定比例在每一线段的截取处注记出由 0 点起所表示的实地平距，此时直线比例尺即成。应用直线比例尺量取图上两点间的长度相应于地面上平时时，张开比规，使两针尖对准图上两点，然后移至直线比例尺上，使其一针尖对准右边的适当分划线，从另一针尖读取所对准的左边小分划值，0 点左、右加起来所表示的长度即为图上两点间长度所相应的实地平距。如图 1-15 所示，在直线比例尺上量取的距离为 1850 米。为了用图方便，在出版地形图的正下方均印有直线比例尺。通常使用的三棱尺可作为直线比例尺使用。

直线比例尺虽然解决了在图上量取距离的烦琐计算工作，但它只能在直线比例尺上直接量取基本单位的 $\frac{1}{10}$ ，而基本单位的 $\frac{1}{100}$ 是目估读取的。如果要求准确的读取基本单位的 $\frac{1}{100}$ ，则需要采用复比例尺才能做到。

三、复比例尺

复比例尺，又称斜分比例尺，其形式如图 1-16 所示。制作方法是在直线 KL 上以基本单位为 2 厘米的长度等分该直线，再通过各等分点作 2 厘米长的直线

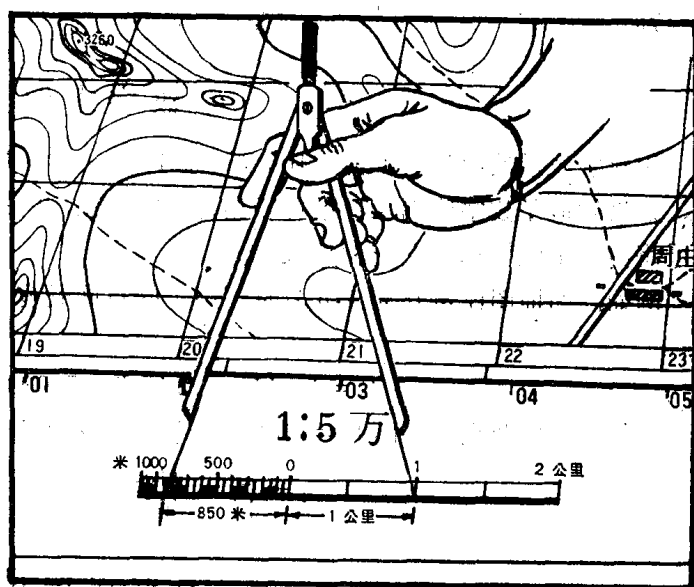


图 1-15 利用直线比例尺量距离