

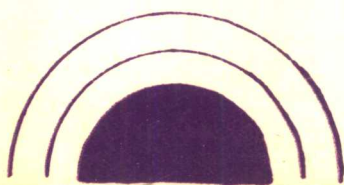
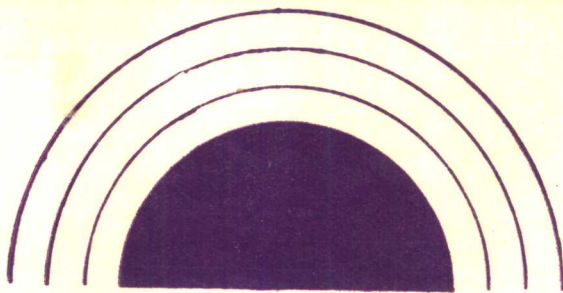
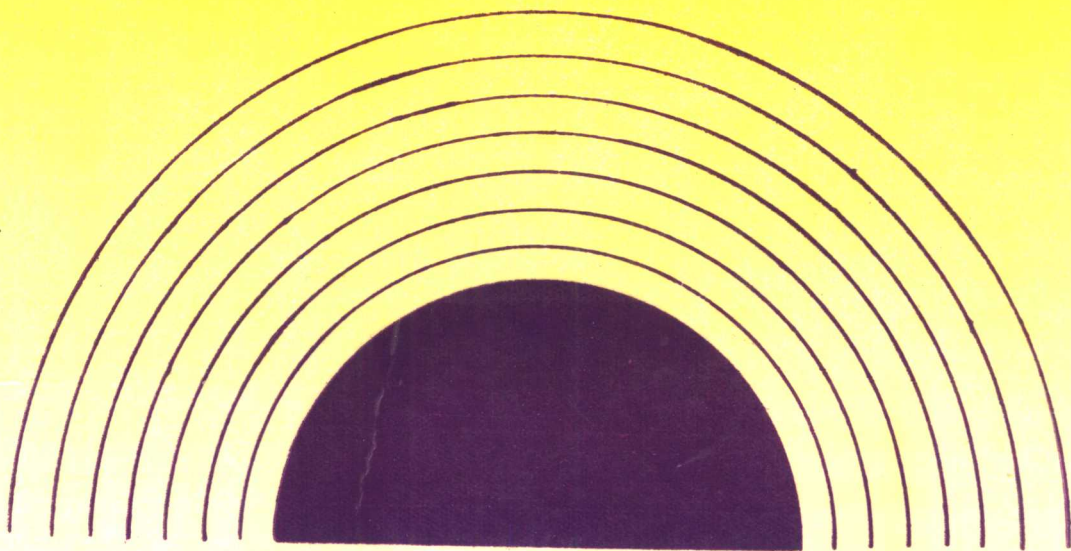
高等学校教学用书

控制测量学

KONGZHI CELIANGXUE

● 肖复何 主编

● 重庆大学出版社



高等学校教学用书

控制测量学

肖复何 熊发元 李满苗 编著

肖复何 主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是根据冶金高等院校工程测量专业控制测量课程教学大纲编写的。全书共分 14 章,主要内容包括精密测距、精密测角、水准测量、三角高程测量、平面及高程控制网的布设与平差、地球椭球和高斯正形投影等,同时介绍了近 20 年来国内外控制测量的最新技术和成果。文字力求简明扼要,着重理论联系工程测量实际,阐述控制测量的基本理论和方法。

本书为高等学校工程测量专业教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

控制测量学

肖复何 主编

责任编辑:时光长流

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 图张:23 字数:574 千
1994 年 2 月第 1 版 1994 年 2 月第 1 次印刷
印数:1-1500

ISBN 7-5624-0720-7/P·14 定价:10.91 元

(川)新登字 020 号

前 言

本书是根据冶金高等院校工程测量专业控制测量课程教学大纲编写的,主要内容包括精密测距、精密测角、水准测量、三角高程测量、平面及高程控制网的布设与平差、地球椭球和高斯正形投影理论等。

本书是在中南工业大学、南方冶金学院和华东地质学院等院校的工程测量专业共同试用过多次的讲义基础上修改而成。由于近 20 年来控制测量的仪器、理论和方法都有许多新的发展,比如,电磁波测距仪、自动安平水准仪、电子经纬仪、GPS 测量接收机和电子计算机等新的仪器设备,以及测边三角网、边角网和三维网等新技术越来越广泛地应用于控制测量实践中,为此,本书尽量反映近 20 年来在这方面的新成果。但因篇幅的限制,文字力求简明扼要,着重联系工程测量实际,阐述控制测量的基本理论和方法,删去陈旧繁琐的内容。

本书由中南工业大学肖复何主编,参加编写的有熊发元和李满苗等。书稿完成后曾由昆明工学院张岷、南方冶金学院郭绍禹、桂林有色冶金地质学院林文介、中南工业大学何瑶民和杨海涛审阅,并提出了许多宝贵意见,在此一并致以衷心的感谢。

参加本书原讲义编写的还有陈道清、王立民、张后苏和王廷述等同志。

编者还要感谢中南工业大学资源开发系工程测量专业和该系资料室的同志曾为本教材作过誊稿、绘图和校阅工作。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

1992 年 3 月

目 录

绪 论	(1)
复习思考题(0)	(2)
第一章 国家平面控制网的布设	(3)
第一节 大地水准面、参考椭球、坐标系	(3)
第二节 建立国家平面控制网的测量方法	(8)
第三节 国家平面控制网建立的方案	(12)
复习思考题(一)	(17)
第二章 工、矿区平面控制网的布设	(18)
第一节 工、矿区平面控制网布设的特点	(18)
第二节 工、矿区平面控制网布设的原则	(18)
第三节 工、矿区平面控制网布设的一般过程	(21)
第四节 工、矿区平面控制网布设方案的选择	(22)
复习思考题(二)	(23)
第三章 平面控制网精度的估算与分析	(24)
第一节 估算控制网精度的一般方法	(25)
第二节 测角单三角形中推算边长的中误差与三角形的最有利形状	(27)
第三节 一端有起算边长的测角三角锁中推算边长的中误差	(31)
第四节 一端有起算方位角的测角三角锁中推算方位角的中误差	(33)
第五节 两端有起算边的测角三角锁中推算边长的中误差	(34)
第六节 测角混合锁中推算边长的权倒数	(36)
第七节 测角三角锁的纵向和横向位差	(37)
第八节 具有一条起算边的测角三角网中推算边长的精度估算	(38)
第九节 具有两条起算边的测角三角网中推算边长的精度估算	(40)
第十节 测角图形插点的精度估算及交会定点的方案选择	(41)
第十一节 光电测距导线的精度估算	(43)
第十二节 用三边测量法布设平面控制网对测边的精度要求	(47)
复习思考题(三)	(49)
第四章 工、矿区平面控制测量的选点、造标和埋石	(50)
第一节 三角点位置的选定	(50)
第二节 水准标高度的确定	(53)
第三节 水准标的类型及其建造方法	(56)
第四节 标石的类型及其埋设方法	(59)
复习思考题(四)	(61)
第五章 因瓦基线测量	(62)
第一节 基线测量概述	(62)
第二节 基线测量所用的主要工具	(62)

第三节	因瓦基线尺的尺长方程式	(64)
第四节	基线丈量的野外工作	(65)
第五节	基线长度的改正及其归算到参考椭球面上的计算	(67)
	复习思考题(五)	(70)
第六章	光电测距	(71)
第一节	光电测距概述	(71)
第二节	相位式光电测距仪的一般工作原理	(71)
第三节	精、粗测尺配合测距	(74)
第四节	差频测相	(76)
第五节	内光路的设置	(77)
第六节	威特 DI4L 红外测距仪简介	(78)
第七节	威特 DI4L 红外测距仪的使用方法	(82)
第八节	光电测距结果的处理	(84)
第九节	光电测距中光束垂直角度的计算	(89)
第十节	光电测距误差的主要来源	(90)
	复习思考题(六)	(95)
第七章	精密光学经纬仪及其检验	(96)
第一节	精密测角仪器概述	(96)
第二节	精密光学经纬仪构造的特点	(96)
第三节	光学测微器的构造原理及其读数方法	(98)
第四节	光学测微器的行差及其检验	(103)
第五节	望远镜的视准轴误差	(105)
第六节	横轴倾斜误差	(106)
第七节	纵轴偏斜误差	(109)
第八节	照准部旋转和垂直微动螺旋作用正确性的检验	(111)
第九节	照准部偏心差和水平度盘偏心差的概念	(113)
	复习思考题(七)	(114)
第八章	水平角观测及平面控制测量概算	(115)
第一节	水平角观测的主要误差来源及其消除或削弱的方法	(115)
第二节	水平角观测的一般操作规则	(126)
第三节	水平角观测的实施	(127)
第四节	方向法及全圆方向法的测站平差	(132)
第五节	分组作方向观测的测站平差	(137)
第六节	全组合测角法及其测站平差概述	(139)
第七节	归心改正及归心元素的测定	(140)
第八节	平面控制测量概算的步骤	(146)
	复习思考题(八)	(151)
第九章	平面控制网条件平差	(152)
第一节	平面控制网平差概述	(152)

第二节	独立三角网条件方程式的类型及其组成	(153)
第三节	独立三角网条件方程式的个数	(161)
第四节	附和三角网条件方程式的类型及个数	(166)
第五节	起算边条件和固定边条件	(170)
第六节	方位角条件和固定角条件	(171)
第七节	纵、横坐标条件	(174)
第八节	三角网条件平差权的确定和精度评定	(182)
第九节	测角三角网条件方程闭合差的限值	(186)
第十节	附和测角三角网条件平差的步骤与示例	(190)
第十一节	导线测量条件平差	(201)
第十二节	测角三角网—导线网联合平差概述	(207)
	复习思考题(九)	(210)
第十章	平面控制网间接平差	(212)
第一节	概述	(212)
第二节	坐标平差原理	(212)
第三节	精度评定	(216)
第四节	方向坐标平差的步骤与示例	(219)
	复习思考题(十)	(230)
第十一章	精密水准测量	(232)
第一节	概述	(232)
第二节	水准路线的布设、选点和埋石	(233)
第三节	精密水准仪及自动安平水准仪	(235)
第四节	因瓦水准标尺	(241)
第五节	精密水准仪和水准标尺的检校	(242)
第六节	精密水准测量的主要误差来源	(250)
第七节	精密水准测量的实施	(254)
第八节	高程系统	(258)
第九节	水准测量外业成果的整理	(262)
第十节	水准测量平差计算	(263)
第十一节	跨越障碍物的水准测量	(266)
	复习思考题(十一)	(268)
第十二章	三角高程测量	(270)
第一节	概 述	(270)
第二节	三角高程测量高差的计算公式	(270)
第三节	垂线偏差改正正高归算	(273)
第四节	垂直角观测	(275)
第五节	三角高程测量的平差计算	(279)
第六节	三角高程测量的精度分析	(284)
第七节	提高三角高程测量精度的途径	(287)

复习思考题(十二).....	(290)
第十三章 地球椭球的基本公式	(292)
第一节 地球椭球的扁率及偏心率.....	(292)
第二节 子午线椭圆上任一点的直角坐标与其大地纬度的关系.....	(293)
第三节 子午线卯酉线的曲率半径.....	(295)
第四节 椭球面上一点处的平均曲率半径和任意方向的曲率半径.....	(298)
第五节 计算子午线弧长的公式.....	(299)
第六节 计算平行圈弧长的公式.....	(302)
第七节 椭球面上的相对法截线.....	(302)
第八节 大地线的概念.....	(304)
第九节 将观测结果归算到椭球面上的改正.....	(306)
复习思考题(十三).....	(308)
第十四章 高斯正形投影平面直角坐标系	(309)
第一节 高斯正形投影概述.....	(309)
第二节 将椭球面上的三角网投影到高斯平面上的概念.....	(313)
第三节 正形投影的一般公式.....	(315)
第四节 高斯正形投影的基本公式.....	(317)
第五节 由大地坐标 B 和 L 推算平面坐标 x 和 y 的公式.....	(313)
第六节 由平面坐标 x 和 y 计算大地坐标 B 和 L 的公式.....	(321)
第七节 计算平面子午线收敛角的公式.....	(325)
第八节 抛物线内插法.....	(328)
第九节 由大地坐标推算平面坐标及平面子午线收敛角的算例.....	(331)
第十节 由平面坐标计算大地坐标的算例.....	(335)
第十一节 方向改化.....	(337)
第十二节 高斯正形投影的长度比.....	(340)
第十三节 距离改化.....	(342)
第十四节 将三角网归算到高斯平面上的算例.....	(345)
第十五节 换带计算.....	(349)
复习思考题(十四).....	(359)

绪 论

控制测量一般是指在工程建设地区的地面布设一系列的控制网点,并精确地确定这些点的位置,以便作为后期地形测图和各种工程建设测量的基础。控制测量学是研究建立工程测量控制网(包括布设、观测、数据处理和精度评估等)的原理和方法的一门科学。它与大地测量学不同,大地测量学主要研究一个国家或一个大面积地区建立控制网的原理与方法,以及地球的形状、大小及其变化规律。

数学、物理学和计算机科学是现代控制测量学的基础。天文学、地质学、大气科学、空间科学、海洋学及地球物理学等均与现代控制测量学有着密切的关系。

在国民经济建设和国际建设的各个领域,测量工作占有十分重要的地位。例如,地质勘探工程、采矿工程、土建工程、水利工程、农业区划工程、城市规划、森林工程、海港工程和军事工程建设等都必须以测量工作为先导。工程建设的规模愈大,对测量工作的依赖性愈突出。控制测量是一切后续测量工作的基础,没有控制测量,往后的测图和施工放样等工作是不可想像的。

控制网把测区各部分的测量工作联系起来,既起骨架的作用,又起限制误差传递和累积的作用。控制网在工程建设及其投入使用各阶段的作用是:

(1) 各种经济和国防建设项目的规划和设计阶段需要适当比例尺的地形图作依据,而地形图的测绘又必须依靠控制网点来确定地形图中各部分地貌地物之间的相对位置和保证测图的精度。

(2) 继工程建设项目设计之后的施工阶段,必须以控制网为基础将各种建筑物设计的位置、形状、大小和高程精确地标定在地面上,作为施工人员进行施工的依据。在施工的整个过程中,测量人员还要利用控制点检查施工工作的正确性。

(3) 工程建设项目竣工以后,还要使用控制网将各种建筑物(包括地下管线)精确地测绘在地形图上,作为后续建设和维修时的依据。

(4) 有些建筑物(例如桥梁、水坝和高层房屋等)建成以后,还要利用控制网定期对建筑物及其周围地面进行变形观测,考察建筑物变形的情况及周围地面所受的影响,以便在变形超过容许范围时采取加固措施,保证建筑物的安全和延长建筑物的使用年限。

控制测量学作为测量学的一个组成部分远在太古时代就已经产生。例如,早在公元前18世纪古埃及就进行过土地丈量工作;公元前10世纪我国编制了地图和地形图;公元前6世纪修通了尼罗河和红海之间的运河,并修建了尼罗河的灌溉系统。所有这些工程,没有测量工作是不可能建成的。不过,古时的大地测量学(包括控制测量学)未能形成自身的科学体系,量距导线是当时测量控制网的唯一形式。

公元1589年第谷(Tycho Brahe)提出了三角测量法。1615年荷兰人奈斯(Willebrod Snell)采用三角测量法进行了弧度测量,成为第一个实施三角测量的人。此后,随着望远镜、水准器、游标和测微器的相继发明,大地测量学的科学体系逐渐形成。

我国在清朝康熙年间(公元1708年),为了测绘“皇舆全图”进行过大规模的三角测量和天

文测量。从18世纪开始,英、德、法、俄、美和非洲一些国家完成了大量的三角测量工作。与此同时,克莱劳(Clairaut)提出了地球形体学理论,勒让德(Legendre)和高斯(Gauss)发表了最小二乘法平差理论,使三角测量中的数据处理问题得到了初步解决。此后,许多大地测量学家根据本地区的测量结果提出了自己的参考椭球,例如海福特(Hayford)椭球和克拉索夫斯基(Красовский)椭球等。

从本世纪40年代末开始,光电测距仪和微波测距仪相继问世,使导线和边角网的布设方法得到广泛的应用。60年代以来,人造卫星定位系统、射电干涉测量系统、卫星激光测距系统和惯性测量系统不断发展,使建立全球性控制网的理想变为现实。

我国在建国前只是零星地布设过一些大地控制网,没有颁布完善的作业细则,而且坐标系紊乱,精度低。我国近代的国家控制网测量工作实际上是新中国成立以后才开始的。1956年国家测绘总局成立以后,颁布了大地测量法规和作业细则,在全面范围内布设了统一的国家控制网。60年代以后,又对其中部分精度较差网采用光电测距和卫星定位系统进行一些改造和统一平差,使其精度进一步提高。目前我国这种精度较高的国家控制网正在国防和经济建设中发挥重要的作用。

控制测量学是一门理论性和实践性都比较强的课程,也是工程测量专业的一门主干课程。本课程学习的好坏对于学生的培养质量影响很大,所以要求学生在认真学习本课程时,既要认真学习理论知识,充分理解有关基本概念,弄清公式的逻辑推演过程及其适用条件,又要重视实践环节的锻炼,通过实验和习题课加深对理论知识的理解,并培养操作仪器的能力和计算技术,通过课程设计和生产实习提高综合运用理论知识分析问题和解决问题的能力。一句话,要坚持理论学习与实践锻炼并重,二者不可偏废。

复习思考题(0)

1. 控制测量学与大地测量学有何联系?有何区别?
2. 哪些科学是现代控制测量学的基础?
3. 试述控制网在工程建设测量中的作用。
4. 为什么说古时就产生了控制测量学?
5. 三角测量是何时开始发展的?边角网又是从什么时候发展的?
6. 概述我国的测绘发展史。

第一章 国家平面控制网的布设

国家大地控制测量的主要任务是在全国领土上建立全国统一的大地控制网(其中包括平面控制网和高程控制网),一方面为研究地球的形状和大小提供资料,另一方面为测绘各种比例尺的地形图和各种经济和国防工程建设测量建立控制基础。工程建设测量控制网是在国家大地控制网的基础上建立的,因此,工程测量人员应该对国家大地控制网有所了解,以便正确地利用国家大地控制网的资料,并经常力求把工程控制网纳入国家大地控制网中,作为国家大地控制网的一部分,从而更好地为社会主义建设服务。下面简单地介绍国家平面控制网建立中的有关知识。

第一节 大地水准面、参考椭球、坐标系

国家大地测量和工程控制测量工作都是在地面上进行的,而地球的自然表面又是一个有山、谷、江、湖、海洋等等起伏的复杂曲面。它是一个不规则的、不能用简单的数学公式来表达的曲面,不能在这个曲面上来解算测量学中所产生的几何问题。为便于计算控制网点的位置和测绘地形,应该选择一个形状和大小都很接近于地球而其数学运算又很方便的体形,来代替地球的形体,以便把观测结果归化到此体形的表面上进行计算。为此,首先必须了解地球的形状和大小。

一、大地水准面和大地体

由力学知识可知,地球上任何一个质点都同时受到两个力的作用:一个是地球质心对该质点的吸引力 F ,另一个是由地球自转所产生的离心力 P 。这两个力的合力,就是作用于该质点的重力 G 。重力的方向就是众所周知的铅垂线的方向(如图 1-1-1 所示),亦即

$$\vec{G} = \vec{P} + \vec{F} \quad (1-1-1)$$

安置经纬仪时,用以对中的垂球线应与铅垂线重合。铅垂线又叫垂线。

在地形测量中已经讲过,曲面上每一点均与垂线方向垂直的曲面叫做水准面。显然这种水准面有无穷多个。人们是从这无穷多个水准面中找出一个最接近于地球表面的水准面来代替地球表面,作为研究地球形状的基础。

在地球上,海洋占地球总面积的 71%,大陆仅占 29%。地球上最高的山峰也不过高出海水面约 9km,最低的马里亚纳海沟也不低于海水面约 11km,这和地球的半径 6000 余千米相比,不算显著的起伏。因此,可以选择一个与平静的海水面相重合的水准面(平均海水面)来代替地球的实际表面。通常把这个与平均海水面相重合的水准面叫做大地水准面。设想将大地水准面延伸到大陆的内部,使它形成一个连续而闭合的曲面,则将这个曲面所围成的体形叫做大地体。因为大地体最能够代表地球的实际体形,所以大地水准面和大地体是大地测量学中研究地球形状的对象。

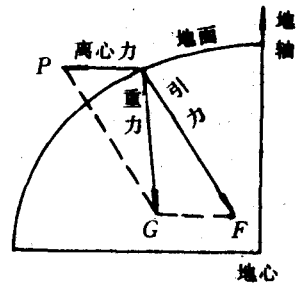


图 1-1-1

虽然大地水准面最接近于地球的自然表面,但它仍是一个不规则的曲面,仍然不能用简单的数学式来表示,因而以大地水准面为基础解算测量上的问题仍然是不方便的。

二、总地球椭球

既然大地水准面是一个不规则的曲面,不便于将测量成果归化到大地水准面上进行计算,因而有必要选择一个形状和大小都与大地体接近,而且能用简单的数学式表示的体形来代替大地体。

根据“地球起源于一个旋转着的灼热的液体”的假说,牛顿应用万有引力理论研究了地球的形状。他认为地球必然接近于一个两极稍扁的旋转椭球。经过大地测量工作者的实践,证明这一论述是正确的。所以,后来人们就选择适当大小和扁率的旋转椭球来代替大地体,并把这种旋转椭球叫做地球椭球(有时简称为椭球)。

最近人造卫星大地测量的结果,证明大地水准面是一个“梨形”,北极略有凸起,南极略有凹陷,但就整个大地体来说,还是接近于一个旋转椭球。

能与大地体符合得最好的地球椭球叫做总地球椭球。总地球椭球必须满足下列五个条件:

- (1) 总地球椭球的中心与地球的质心相重合,总地球椭球的旋转轴与地球的自转轴相重合,两者的赤道面也相重合;
- (2) 总地球椭球的体积与大地体的体积相等;
- (3) 总地球椭球面上各点与大地水准面上各相应点之间的高差的平方和为最小;
- (4) 总地球椭球的总质量应等于地球的总质量;
- (5) 总地球椭球自转的角速度应等于地球自转的角速度。

总地球椭球虽然是最理想的地球椭球,但必须在全地球上布满全球统一的天文大地网并进行重力测量或卫星大地测量的条件下才能求得。目前,总地球椭球元素的求得正日趋精密。

三、参考椭球

过去,在地球上还有许多地区没有布设全球统一的天文大地网和没有进行重力测量时,不能求得总地球椭球元素。那时每个国家为了进行测量结果的处理,都各自采用最适合于本国领土范围的、但不完全满足上述五个条件的地球椭球来代替大地体,这种椭球叫做参考椭球。很明显,参考椭球可以有许许多多,而总地球椭球只有一个。

有了参考椭球,就可以将测量成果沿着参考椭球面的法线投影到参考椭球面上进行处理。

参考椭球的形状和大小是用长半径 a 和短半径 b 表示的,有时也用长半径 a 和扁率 α 来表示,即

$$\alpha = \frac{a - b}{a} \quad (1-1-2)$$

长半径 a 和扁率 α 称为参考椭球元素。

建国后,我国采用的克拉索夫斯基椭球的元素为

$$\begin{aligned} a &= 6378245 \text{ m} \\ \alpha &= \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.3} \end{aligned}$$

我国 1980 年大地坐标系参考椭球的元素为

$$\begin{aligned} a &= 6378140 \text{ m} \\ \alpha &= \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.257} \end{aligned}$$

四、参考椭球定位的概念

如上所述,参考椭球面是某一国家(或者某一区域)大地测量计算的参考面,这就要求把参考椭球和大地体的相对位置固定下来,然后才把地面上的点沿着参考椭球面的法线投影到参考椭球面上进行计算。这种确定参考椭球与大地体的相对位置的工作叫做参考椭球定位。

为了说明参考椭球定位的方法,必须首先说明表示地球椭球面上点的位置的三种坐标系,即大地坐标系、天文坐标系和地心直角坐标系。

1. 大地坐标系

把地面上的点沿着法线投影到椭球面上表示其位置的坐标系,叫做大地坐标系。

如图 1-1-2 所示确定椭圆体面上一点 m 的坐标,要根据两个基本平面:一个是椭球的赤道平面 WRE ,它是通过椭球中心并与旋转轴 PP' 正交的平面;另一个是点 m 的大地子午面 $PmRP'$,它是通过点 m 的法线并包含旋转轴 PP' 的平面。这个平面与椭球面相割而成的曲线 $PmRP'$ 叫做点 m 的子午椭圆。

点 m 的大地子午面与格林威治天文台大地子午面(起始子午面)间的夹角 L ,称为点 m 的大地经度。点 m 的法线与赤道平面间的夹角 B ,称为点 m 的大地纬度。大地经度 L 和大地纬度 B 就是点 m 的大地坐标。过点 m 的法线和椭球面上另一点 $q(Q$ 的投影)所作的平面 qmn 与点 m 的大地子午面间的夹角 A ,称为 m 至 q 的大地方位角。大地方位角是从点 m 的大地子午面北端顺时针方向计算的。

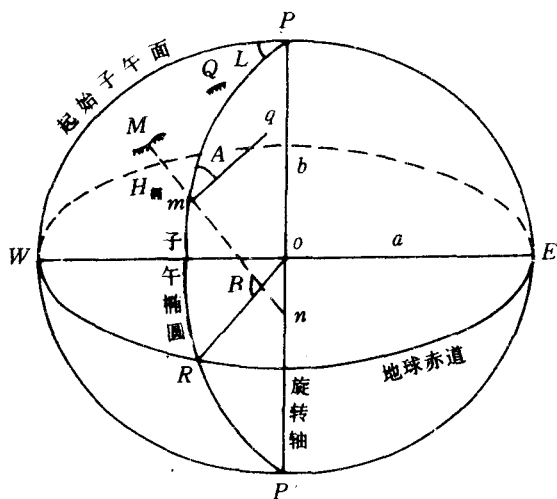


图 1-1-2

由上可知:大地经度、大地纬度和大地方位角都是以法线为依据的,即大地坐标系是以法线为依据的,或者说是以椭球面为依据的。

2. 天文坐标系

如图 1-1-3 所示,把地面上的点 M 沿着垂线投影到大地水准面上表示其位置的坐标系,叫做天文坐标系。包含点 M 的垂线并与地球旋转轴相平行的平面,叫做点 M 的天文子午面。天文子午面与起始子午面间的夹角 λ ,叫做点 M 的天文经度;点 M 的垂线与地球赤道平面间的夹角 φ ,叫做点 M 的天文纬度。天文经度 λ 和天文纬度 φ 就是该点的天文坐标。通过点 M 的垂线和地面上另一点 Q 所作的平面(竖直面)与点 M 的天文子午面间的夹角 α ,叫做点 M 到点 Q 的天文方位角。天文方位角是从天文子午面的北端顺时针方向计算的。

由此可知:天文经度、天文纬度和天文方位角都是以垂线作为依据的,即天文坐标系是以垂线为依据的,或者说是以大地水准面为依据的。

天文观测时是利用水准器和垂球线使仪器的竖轴与测站 M 的铅垂线重合来安置仪器,直接测得天文经度 λ 、纬度 φ 和方位角 α ,所以它是属于天文坐标系。

严格说来,通常直接测得的水平角(或方向)、竖直角、高差和距离都是属于天文坐标系。因为,(如果仪器已经校正的话)安置仪器时水准气泡居中,即意味着水准管的轴线位于测站水

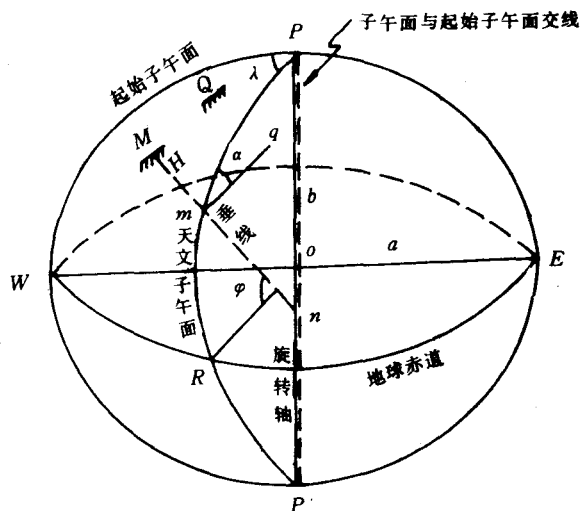


图 1-1-3

准面的切面内,而仪器的竖轴则位于铅垂线内,也就是说,它是以垂线为依据的。

参考椭球初步定位的方法是:在国家大地控制网的主干三角系中选择一个三角点 M_0 作为起始点,在这个起始点上,用天文测量的方法精确地测定该点的天文坐标 λ_0 和 φ_0 ,以及由该点至另一个三角点的天文方位角 α_0 ,并假定 λ_0 、 φ_0 和 α_0 就是起始点 M_0 投影在参考椭球面上的大地坐标 L_0 、 B_0 和大地方位角 A_0 ,即

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= L_0 \\ \varphi_0 &= B_0 \\ \alpha_0 &= A_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-3)$$

通常称起始点 M_0 为基准点, L_0 、 B_0 和 A_0 为大地基准数据。国家大地控制网中其他各点的大地坐标都根据大地基准数据来推算。

另外,还用水准测量方法测定点 M_0 高出平均海水面(大地水准面)的高程 $H_{0(\text{海})}$,并把它作为点 M_0 高出椭球面的高程 $H_{0(\text{椭})}$,即

$$H_{0(\text{海})} = H_{0(\text{椭})} \quad (1-1-4)$$

以使大地水准面和参考椭球面相切于 m_0 点。这就是初步定位的方法。

经过大地测量获得了大量的大地测量资料之后,如果发现初步定位不适当,还可以用更完备的方法改善这个定位。

3. 地心直角坐标系

从发展空间技术着眼,不同地区采用不同的坐标系是不容许的,必须要求各个地区都用全球统一的高精度地心直角坐标系。所谓地心直角坐标系,就是以总地球椭球为依据的坐标系(如图 1-1-4 所示),它是一个三维的空间直角坐标系。取地球的质心为坐标原点,总地球椭球的旋转轴(目前国际上都统一取 1900 年到 1905 年测定的地球平均自转轴)作为 Z 轴,X 轴位于英国格林威治天文台子午面内,Y 轴垂直于 X 轴和 Z 轴,Y 坐标向东为正。这就是所谓的“右手坐标系”。在此坐标系内,空间任意一点的位置都以 x 、 y 和 z 坐标值来表示。地心直角坐标系是理想的国际统一坐标系,天文坐标系是地心球面坐标系,而大地坐标系是以参考椭球中心为原点的参心坐标系

五、垂线偏差及大地水准面差距的概念

由于地球内部的物质分布不均匀和地面起伏的影响,大地体的形状不与总地球椭球相同,亦即大地水准面上各点的垂线一般都不与总地球椭球面上相应点的法线重合(如图 1-1-5 所示),二者之间的夹角叫做绝对垂线偏差。

显然,参考椭球的形状也不可能与大地体相同,即使参考椭球的定位非常准确,也无法使参考椭球面与大地水准面处处相合,何况参考椭球定位时总难免使参考椭球面与大地水准面之间产生一定的倾斜。所以参考椭球面上一点的法线与大地水准面上相应点的垂线也是不相合的,这时的法线与垂线之间的夹角叫做相对垂线偏差。不言而喻,相对垂线偏

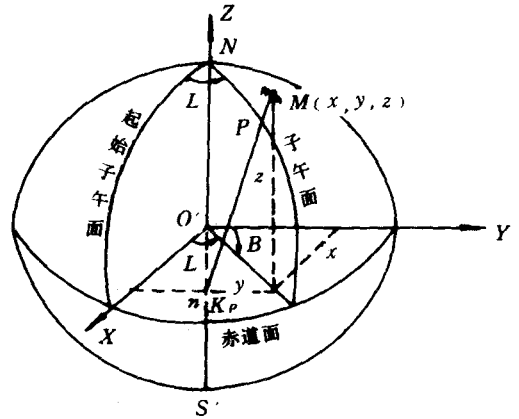


图 1-1-4

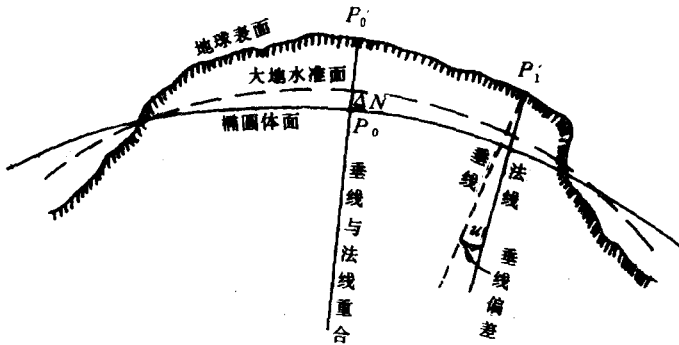


图 1-1-5

差不但与地球内部物质分布不均匀及地面起伏有关,而且与参考椭球的大小、形状及其定位有关。选取不同形状和大小的参考椭球,就会有不同的相对垂线偏差;用同一套参考椭球元素而采用不同的定位,也会有不同的相对垂线偏差。

通常把相对垂线偏差 u 分解为南北和东西两个分量来表示,并把南北方向的分量叫做子午分量 ξ ,东西方向的分量叫做卯酉分量 η ,如图 1-1-6 所示。设 u 为垂线偏差, Q 为垂线偏差向量的方位角,则有

$$\left. \begin{aligned} \xi &= u \cos \theta = \varphi - B \\ \eta &= u \sin \theta = (\lambda - L) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-1-5)$$

式中 φ, B ——天文纬度和大地纬度;
 λ, L ——天文经度和大地经度。

由公式(1-1-5)可知,当地面上某一点 i 的天文经、纬度和大地经、纬度已知时,可以求出该点的垂线偏差分量 ξ_i 和 η_i 。

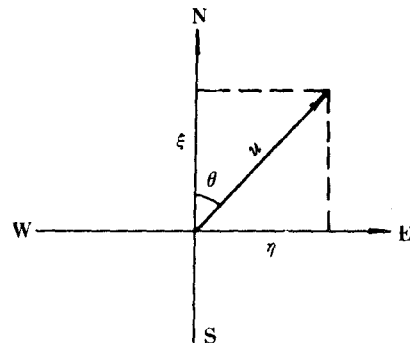


图 1-1-6

由于相对垂线偏差的影响,使得根据大地基准点(投影到参考椭球面上)求得某点的大地坐标与其直接用天文测量法测得的天文坐标有所不同,因而天文坐标必须通过垂线偏差改正[如公式(1-1-5)]才能换算成大地坐标。同样,通常直接测得的水平角和垂直角也要进行垂线偏差改正。总而言之,人们在野外测得的一切数据,严格说来,都应该经过垂线偏差改正,才能换算成大地坐标系的数据。

如果参考椭球的大小、形状和定位选择得当,则相对垂线偏差一般是一个很小的角度,平均为 $3 \sim 4''$ 。但有些地壳构造异常的地区达到 $10 \sim 20''$,最大可达 $1'$ 左右。低精度测量工作中一般不加此项改正,但对于精密工程控制测量来说,还必须考虑垂线偏差的影响。在地壳构造异常的地区,即使是低精度测量也不能不考虑垂线偏差的影响。

大地水准面高出总地球椭球面或参考椭球面的高度(如图1-1-5中的 ΔN)叫做大地水准面的差距。当大地水准面高于参考椭球面或总地球椭球面时,差距 ΔN 为正,反之则为负。

控制测量中都是以参考椭球面作为基准面进行计算的,而通常测得的海拔高程是以大地水准面为基准的,测得的高程必须加入大地水准面差距 ΔN 改正后,才能换算为以参考椭球面为基准的高程,即所谓的大地高程。

第二节 建立国家平面控制网的测量方法

国家控制网的建立是国家的一项极为重要的基本建设。国家控制网包括两个主要的组成部分:平面控制网和高程控制网。此外,国家重力测量与国家控制网有着密切的关系,但因重力测量点本身并不起控制作用,故不列入国家控制网内。

建立平面控制网的方法可以分为天文测量法、常规大地测量法、人卫大地测量法、惯性定位法和摄影测量法五种。下面简单地介绍这些测量方法。

一、天文测量法

天文测量法是在选定的地面点上架设仪器,通过观测天体(主要是恒星)并记录观测瞬间的时刻来确定该地面点的地理位置——天文经、纬度及由该点至另一地面点的天文方位角。这种方法是各点单独进行观测的,彼此之间没有任何依赖关系。其优点是工作组织简单和测量误差不会累积。但因天文法测定点位的精度不高($\pm 5 \sim 9\text{m}$),而且受垂线偏差的影响很大,如果地面上某点的垂线偏差达到 $\pm 3 \sim 4''$,则表现在地面上的点位误差将达到 $\pm 90 \sim 120\text{m}$,即使经过垂线偏差改正,其剩余误差仍有 $1.0 \sim 1.5''$ 左右,这在地面上表现为 $30 \sim 50\text{m}$ 的点位误差。所以一般不用天文测量法建立国家平面控制网。

然而,在建立国家平面控制网时,为了控制水平角观测误差累积对推算方位角的影响,仍需每隔一定的距离观测天文点,以推算大地方位角(即所谓拉伯拉斯方位角),即

$$A = a + (L - \lambda)\sin\varphi \quad (1-2-1)$$

式中 A ——大地方位角; a ——天文方位角;
 L ——大地经度; λ ——天文经度;
 φ ——天文纬度。

所以通常称这种国家控制网为天文大地网。

二、常规大地测量法

常规大地测量法是根据大地基准点的起算数据(坐标和方位角),借助于地面测得的水平

距离和水平角,推算出控制点的坐标。这种方法要求各点间互相联系,彼此通视,因此组织工作比较复杂,而且在推算过程中,测量误差不断累积。但由于它是利用几何图形关系推算各点的坐标,能够达到很高的精度,所以到目前为止,它是建立平面控制网的主要方法之一。

大地测量法按其构成控制网的形式和直接观测元素的不同,可以分为三角测量、精密导线测量和三边测量三种。下面简单地说明这三种方法的特点。

1. 三角测量

在地面上选择和标出一系列的点,并使各相邻点间彼此通视而组成许多三角形,而且各三角形相互连接起来,成为一个三角网(如图 1-2-1)。在地面上标出的这些点叫做三角点。在三角网中测定一条边(例如 AB 边)的长度及所有三角形的内角,就可以根据三角学中的正弦公式计算所有三角形的边长。如果已知某一三角点(例如 A 或 B)的坐标和某一条三角边(例如 AB)的方位角,就可以推算全部三角点的坐标。通常把这种测量工作和计算工作统称为三角测量。

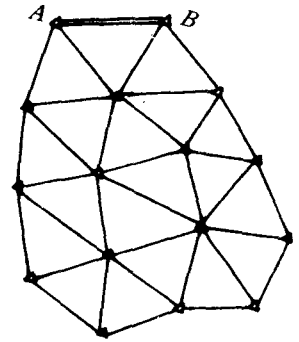


图 1-2-1

用三角测量法建立控制网的优点是:减少了量边工作,检核测量成果的条件多,推算三角点坐标的精度高,控制的范围广。因此,它是目前布设平面控制网的主要方法。其缺点是:测量误差累积对推算三角网边长的影响很显著,而且由于要求通视的方向多,在隐蔽地区(如建筑区、森林地区等)扩展三角网比较困难。

2. 精密导线测量

在地势平坦的地区,特别是在隐蔽地区,若布设三角网,则难以达到多方向通视的要求。这时可采用测角与量边同时并用的精密导线测量法布设控制网。过去,由于直接丈量导线边长对受地形条件的限制,而且量边工作繁重,所测角度又缺乏有效的检核,能够控制的范围也比较窄,所以,过去布设平面控制网时,精密导线测量法用得很少。

但自从电磁波测距(如光电测距和微波测距)方法发展以来,为量边工作开辟了新的途径,同时电磁波测距工作比直接丈量边长简单而且经济得多,所以,目前精密导线测量已成为布设国家平面控制网的主要方法之一。

3. 三边测量

如果在上述三角网中不测角度,而采用电磁波测距法测定各个三角形的边长,再利用三角学中的余弦公式算出各个三角形的顶角,由此也可以推算出各边的方位角和各点的坐标。这是建立控制网的一种新方法。但由于目前电磁波测距的设备比较昂贵,测距的经费开支也比测角要大,检核观测成果的条件又较少,所以,用纯粹的三边测量法建立平面控制网在目前条件下还是不适宜的。

值得注意的是电磁波测距比过去基线测量受地形的限制小得多。这样可以灵活运用电磁波测距法测定三角网中若干条边的边长,一方面用作起算边长,另一方面用来限制边长误差的累积。这是当前建立平面控制网中行之有效的新技术。我国在布设国家平面控制网时已广泛使用这种方法。在工程控制网布设中也较普遍地应用这种方法,避免了耗费大量的人力物力勘选基线场地和丈量基线等繁重工作。