

测 量 学

(第 4 版)

主编 李玉宝 (西南科技大学)

编委 (以姓氏拼音为序)

陈绍杰 (福建龙岩学院)

戴小军 (西南石油大学)

兰济昀 (西南科技大学)

刘福臻 (西南石油大学)

青 盛 (西南科技大学)

宋怀庆 (西南科技大学)

唐益平 (西南科技大学)

唐 文 (西安石油大学)

王卫红 (西南科技大学)

王志岗 (四川科技职工大学)

徐 兵 (西南科技大学)

肖荣健 (西南科技大学)

杨国强 (西南科技大学)

张文君 (西南科技大学)

周 波 (西南科技大学)

莫才健 (西南科技大学)

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容提要

本书系统介绍了测量学的基本概念、理论、技术与方法,侧重当前技术条件下的工程应用。全书分 12 章,内容包括角度、长度、高差测量,测量误差基础理论,工程控制测量,大比例尺地形测量等测量学基础内容。在保证测量学基础理论系统性、完整性的基础上,力图用通俗易懂的语言,与当前工程实践符合的测量技术方法,详细地阐述测量学的工程应用问题。

本书内容宽厚,体系完整,用较多的篇幅介绍了测量新技术在工程实践中的应用,内容详尽,不仅适合作为测绘专业基础课程或非测绘测量专业教材使用,也可供从事测绘工程专业工作的人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

测量学 / 李玉宝主编. —4 版. —成都: 西南交通大学出版社, 2016.10
ISBN 978-7-5643-5077-2

I. ①测… II. ①李… III. ①测量学—高等学校—教材 IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 242409 号

测量学

(第 4 版)

主编 李玉宝

责任编辑	张波
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	18.5
字 数	460 千
版 次	2016 年 10 月第 4 版
印 次	2016 年 10 月第 10 次
书 号	ISBN 978-7-5643-5077-2
定 价	39.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第 1 版前言

自 20 世纪 80 年代以来,随着计算机、光电测距、空间卫星定位、遥感等高新技术的广泛应用,测绘理论与技术产生了很大的变革,测量仪器也由单纯的光学设备转变为综合了光学、机械、电子和计算机技术的数字化测绘设备。测量技术的进步不仅使得设备操作更方便、成果精度更高,也降低了劳动强度、提高了作业效率,从根本上改变了测绘工作的面貌,使得许多传统的测量方法已不再适用。在这一背景下,根据全国测绘教学指导委员会对本课程教学大纲提出的指导性意见,本着面向测绘工程实践,充分反映测绘新技术应用的原则,本教材编写力图做到基础理论的系统性和技术方法的先进性、实用性的统一,侧重于测量技术在各类工程建设中的应用,使之成为一本有利于能力培养和知识面拓展,符合目前高等教育改革潮流,不仅能用于测绘工程专业基础课程,也可作为地质工程、采矿工程、交通工程、土木工程等诸多专业使用的测量学专业课程教材。

本教材由西南科技大学测绘工程教研室集体编写。其中第一章、第三章、第十二章由王卫红编写,第二章、第四章、第八章由唐益平编写,第五章、第六章由李玉宝编写,第九章、第十章由徐兵编写,第七章、第十一章由张文君编写。李玉宝担任主编,并完成了书稿的统校工作。

本教材在编写过程中,参阅了大量的文献,并引用了其中的一些资料,为此谨向有关的作者表示衷心的感谢!

为本教材的出版,各位编写者虽然倾注了极大的热情,付出了艰辛的劳动,但是受学识水平局限,错误在所难免,在此恳请广大读者及专家学者不吝指正,以便修订时更正。

编 者

2006 年 7 月 8 日

第2版前言

《测量学》第1版于2006年8月出版，2008年1月第2次印刷。3年多来，《测量学》被多所高校的测绘工程、地质工程、采矿工程、城市规划、土木工程等专业选作测绘学教材，迄今已发行了6000册。读者在对其内容系统完整、贴近工程实际的特点予以充分肯定的同时，也指出了许多不足和错误，这需要增补和修改。借此机会，编者深表谢意。另外，随着近年来测绘科技的迅猛发展，书中的部分内容已与生产实践不相适应，也需要调整。基于以上两点考虑，本书编者修订出版了第二版。

第2版对全书作了系统全面的修订、增补。纠正了读者指出及编者在教学实践中发现的一些错误，删除了部分已经不再适用的内容，并针对重要的内容，在表述上作了较多的修改。

西南科技大学测绘工程教研室全体教师参与了第二版的修订工作，具体分工如下：第一章：李玉宝；第二章：杨国强、肖荣健；第三章：周波；第四章：青盛、宋怀庆；第五、六、七章：兰济昀；第八章：青盛；第九章：杨国强、李玉宝；第十章：宋怀庆、李玉宝；第十一章：肖荣健；第十二章：宋怀庆。全书由李玉宝校对定稿。

在本书编写及修订过程中，编者查阅了大量的参考文献，并引述了其中部分资料，在此谨向有关作者表示衷心的感谢！

尽管在第二版出版过程中，编者对全书内容做了系统修订，并为此付出了艰辛的劳动，但受专业水平局限，书中不当之处在所难免，在此恳请广大读者批评指正。

编者

2010年1月

第3版前言

本教材自2006年8月首次出版以来，迄今已经多次重印。编者在此过程中，接受读者批评，历次重印皆对内容做了大幅度修订，纠正错误及概念不清、阐述不准确的语句，删除已经不再适应当前测绘工程实践的技术方法，使得全书的质量得到很大提升。借此机会，编者对本书的读者，所有使用本书的教师、学生表示深深的谢意。

近年来测绘科学技术得到了突飞猛进的发展，数字化测绘仪器已基本完成了取代光学仪器的过程。《测量学》中仍以光学经纬仪、光学水准仪为基础的测量方法，已经和当前的工程实践脱节。《测量学》（第3版）修订，主要目的就是进一步增加数字化测绘设备及其应用方法的内容。但是考虑到目前许多学校的实际情况，本书暂时仍保留了传统的光学仪器及其应用方法。另外考虑到修订后篇幅有较大增加及内容过于专业，删除了原书中的第十一章“工程变形测量”、第十二章“测绘新技术及其发展趋势”。

除了内容上作了上述更新外，第3版在全书的措词上，做了更加细致的斟酌、修改，力图做到概念清晰，阐述精准。

本次参加《测量学》（第3版）修订工作的人员，除了原编者外，还邀请西南石油大学刘福臻、戴小军，西安石油大学唐文，东华理工大学刘向铜，四川科技职工大学王志岗，福建龙岩学院陈绍杰，绵阳师范学院刘泉，河北省职业技术学院鲍艳卫，四川建筑职业技术学院张恒，重庆交通大学曹智翔，成都理工大学余代俊等老师，参与了全书的修订工作，他们分工校阅、非常细致地修订了全部书稿，其辛勤劳动和渊博的专业知识，在本书中得到了充分的体现。

在《测量学》（第3版）编辑及修订过程中，编者参阅了众多的参考文献，引述或使用了其中的部分内容。在此，编者谨向有关的作者表示衷心感谢和深深的敬意。

受专业水平和视野的局限，虽然编者花费了大量的心血和时间，但是，错误和不足仍然难以避免。编者热忱期望得到广大读者及同行教师、学者的批评指正，以期在以后修订时更正。

编者

2012年1月

第 4 版前言

《测量学》自 2006 年首次出版至今已整整 10 年。10 年来通过广泛征求读者反馈意见，不断地修改完善，全书质量与初稿相比，已经有了极大的提升，因而被多所高校采用。这一切都得益于使用本教材之教师 and 学生的包容和不吝指教，编者借此对他们表示衷心的感谢。

在本书编写及修订过程中，编者参阅了大量的参考文献和同类教材，并引用了部分内容。由于参考文献众多，部分可能没有列入书后参考文献，编者为此深表歉意，并对所有参考文献作者表示深切的谢意。

第 4 版在第 3 版的基础上做了全面修订，内容上保持了原来的框架结构，但是在内容阐述上，做了更加细致地的斟酌、修改，力求文字流畅、概念清晰、表述精准。

第 4 版的编写修订工作由莫才健、李玉宝完成。虽然编者在编写过程中，不辞劳苦地付出了辛勤的劳动，但是受专业水平局限，错误和不足依然不可避免。在此编者一如既往地恳请使用本教材的教师和学生批评指正，以便重印时改正。

编 者

2016 年 9 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 测量学概述.....	(1)
第二节 测绘学的发展历史.....	(3)
第三节 地球的形状和大小.....	(4)
第四节 测量坐标系的建立.....	(7)
第五节 测量工作的主要内容和基本原则.....	(9)
第六节 用水平面代替参考椭球面的限度.....	(11)
第二章 角度测量	(14)
第一节 角度测量的原理.....	(14)
第二节 光学经纬仪.....	(15)
第三节 经纬仪的检验与校正.....	(24)
第四节 经纬仪水平角测量.....	(32)
第五节 经纬仪竖直角测量.....	(35)
第六节 全站仪角度测量.....	(38)
第七节 影响测角精度的因素.....	(46)
第三章 距离测量与直线定向	(49)
第一节 概 述.....	(49)
第二节 钢尺量距.....	(49)
第三节 视距法测距.....	(56)
第四节 电磁波测距.....	(58)
第五节 直线定向.....	(67)
第四章 高程测量	(70)
第一节 水准测量原理.....	(70)
第二节 水准测量的仪器和工具.....	(71)
第三节 水准仪的使用.....	(76)
第四节 水准观测及数据处理.....	(84)
第五节 水准仪的检验与校正.....	(96)
第六节 水准尺的检验.....	(100)
第七节 水准测量误差来源及削弱措施.....	(100)
第八节 三角高程测量.....	(103)

第五章 测量误差理论基础	(107)
第一节 测量误差的概念.....	(107)
第二节 偶然误差的统计规律性.....	(109)
第三节 偶然误差的分布.....	(110)
第四节 衡量精度的数字指标.....	(112)
第五节 精度数字指标的实际计算方法.....	(113)
第六节 误差传播定律.....	(114)
第七节 误差传播定律应用.....	(116)
第八节 相对精度指标——权.....	(118)
第九节 单位权中误差.....	(120)
第十节 测量平差原理.....	(121)
第十一节 误差理论基础应用实例.....	(123)
第六章 高斯投影简介	(126)
第一节 概述.....	(126)
第二节 地球椭圆的基本元素及其相互关系.....	(126)
第三节 椭圆面上的坐标系统——大地坐标系统.....	(127)
第四节 高斯投影概述.....	(128)
第五节 高斯投影原理.....	(129)
第六节 观测值的归算投影及处理.....	(133)
第七章 工程控制测量	(135)
第一节 控制测量概述.....	(135)
第二节 导线测量.....	(138)
第三节 交会定点测量.....	(150)
第四节 高程控制测量.....	(153)
第五节 GPS 控制测量.....	(156)
第八章 地形图的测绘和应用	(164)
第一节 地形图基本知识.....	(164)
第二节 大比例尺地形图测绘.....	(181)
第三节 大比例尺数字化地形图测绘.....	(196)
第四节 航空摄影测量简介.....	(209)
第五节 地形图的应用.....	(213)
第九章 建筑工程施工测量	(228)
第一节 概述.....	(228)
第二节 施工控制网的建立.....	(228)
第三节 施工放样测量.....	(231)
第四节 民用建筑施工测量.....	(240)
第五节 工业厂房施工测量.....	(244)
第六节 高层建筑施工测量.....	(247)

第七节	竣工总平面图编绘	(251)
第八节	建筑限差和施工放样精度	(252)
第十章	道路工程测量	(255)
第一节	道路工程测量概述	(255)
第二节	道路中线及其测量工作	(255)
第三节	常用道路曲线及其测设数据计算	(260)
第四节	道路纵横断面测绘	(268)
第五节	道路施工测量	(278)
第六节	桥梁工程测量	(281)
参考文献		(285)

第一章 绪 论

第一节 测量学概述

一、测量学的定义

从远古时期开始，人类一直在不断地问自己：“我在哪里？”“我要去哪里？我要去的地方有多远？在哪个方向？”“我去过哪里？”“我怎样才能找到回家的路？”人类文明从认识自然发展到改造自然，要建造房屋、拦河筑坝、修路架桥等，又必须弄清楚：“在哪里进行？”所有这些问题，都可以归结为“定位”。测量学就是研究定位——确定地面点位在某一参照系中的位置的科学。

人类在从事生产活动的过程中必然要涉及测量科学。原始人在外出打猎时用树枝和石头作标记来确保自己不会迷路；距今大约 5 000 年前，古巴比伦人开始用地图来描绘周围的地理环境；古埃及法老通过测量土地面积确定征税数额；我国《夏本纪》记载了大禹治水时的详细过程，称禹“左准绳，右规矩，载四时，以开九洲，通九道，陂九泽，度九山”。“准”“绳”分别是取平和取直的工具，“规矩”即测量高低远近的工具，“四时”可能指确定方向的仪器。

由于测量定位成果用图形表示既形象又直观，因而常常通过绘制地形图来表示，测量学又因此被称为测绘学。随着科学技术的不断发展，测绘学已经成为一门根深叶茂的大学科，其应用范围由建立定位参照系统（各类地理坐标系统）及为国防建设、城市规划与建设、矿产开发、交通建设等部门提供精确定位服务，扩展到为人们出行提供实时导航定位服务，服务对象也由专业人士扩展为广大人民群众。测绘学的现代定义是：研究与地球有关的基础空间信息的采集、处理、显示、管理、利用的科学与技术。要特别指出的是，在建设“数字地球”“数字中国”“数字省区”等项目中首先要构建一个用于集成各类自然、社会、经济、人文、环境等方面信息的统一地理空间载体，即建立国家空间数据基础设施。当前，测绘学的主要任务之一是为建立国家空间数据基础设施服务。

二、测绘学的分支学科

1. 大地测量学

如果研究对象是地球表面上的一个较大的区域甚至整个地球，就必须考虑地球的曲率，这种测绘工作属于大地测量学的范畴。传统大地测量的任务就是建立国家大地控制网，测定地球的形状、大小，研究关于地球重力场的理论、技术和方法。大地控制网是为研究地球有关的各种科学服务的，其作为大范围空间定位的统一参照系统，也是施测地形图的重要依

据。现今大地测量被赋予了更广泛的任 务，它不仅研究地球几何形状和重力场，以及它们的时 间性变化和地球动力学现象（极运动、潮汐、板块运动、平均海水面升降等），而且也研究月球和太阳系其他行星表面和重力场，研究人造卫星的轨道运动。大地测量学可以分为数 学大地测量学、物理大地测量学、卫星大地测量学、大地动力学、大地天文学、惯性测量和 导航学等。数学大地测量学研究地球上点、线、面和空间的数学表示，以几何及微分几何为 基础研究大地测量；物理大地测量学研究位（potential）理论、地球重力场、大地水准面的 确定、大地边界值问题，以及地球内部结构的推定；卫星大地测量学主要利用人造卫星研究 地球形状及重力场，人造卫星轨道的确定，以及全球性海水面的监测；大地动力学研究地壳 变动、板块运动、地球旋转和潮汐变化等；大地天文学主要研究天文经纬度和方位角的测 定，以及时间系统；惯性测量和导航学利用陀螺仪、加速度计等惯性敏感元件，实时测量运 载体相对于地面运动的加速度，获得运载体的位置和地球重力场参数。

2. 遥 感

遥感是指以人造卫星、宇宙飞船、飞机、热气球、车、船、活动高架等为遥感平台，不 直接接触物体本身，根据不同物体对波谱产生不同响应的原理，用传感器收集地面数据资 料，经处理、分析后，识别目标物，并揭示其几何、物理性质，相互关系及其变化规律的现 代科学技术。根据遥感平台的不同可分为地面遥感、航空遥感、航天遥感、航宇遥感；根据 传感器探测波段的不同可分为紫外遥感、可见光遥感、红外遥感、微波遥感、多波段遥感。遥感 技术具有下列特点：① 大面积的同步观测。如一张美国的 Landsat 卫星影像，覆盖面积为 $34\ 225\ \text{km}^2$ ，在 5~6 min 内即可扫描完成。② 时效性。遥感探测，尤其是空间遥感探测， 可以在短时间内对同一地区进行重复探测，发现地球上许多事物的动态变化。③ 数据的综 合性和可比性。遥感获得的地物电磁波特性数据综合反映了地球上许多自然、人文信息，同 时由于遥感的探测波段、成像方式、成像时间、数据记录等均可按要求设计，因此其获得的 数据具有同一性和可比性。④ 经济性。与传统的方法相比，遥感可以大大地节省人力、物 力、财力和时间。由于上述特点，遥感技术在资源调查与应用、环境监测评价、全球宏观研 究等领域得到了广泛的应用。随着遥感处理软件的进一步普及和高分辨率遥感影像价格的下 降，遥感也日益成为中、小比例尺地形图成图的主要方法之一。

3. 工程测量学

在测绘界，人们把工程建设中的所有测绘工作统称为工程测量。工程测量包括在工程建 设勘测、设计、施工和管理阶段所进行的各种测量工作，它是直接为各类工程项目的建设及 其运营管理中一系列工作服务的。可以这样说，没有测量工作为工程建设提供数据和图纸， 并在施工过程中实现定位测量，任何工程建设都无法顺利进行并完成。工程测量按其工作顺 序和性质分为：勘测设计阶段的工程控制测量和地形测量；施工阶段的施工测量和设备安 装测量；竣工和管理阶段的竣工测量、变形观测及维修养护测量等。按工程建设的对象分为： 建筑工程测量、水利工程测量、铁路测量、公路测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、矿山 测量、城市市政工程测量、工厂建设测量以及军事工程测量、海洋工程测量等。因此，工程 测量工作遍布国民经济建设和国防建设的各个部门和各个方面。

4. 地图制图学

地图是测量成果的主要表现手段之一。地图制图学主要研究模拟地图和数字地图的基本

理论、设计、测绘和印制，包括地图的基本特征、表示内容、地图投影的理论与方法、地图数据和地图符号、地图图形、色彩和注记的设计、制图综合、地图的编辑与编绘、地图的出版印刷与分析应用等。

三、测量学的重要性和课程性质

测量学是一门涉及面较广，极具应用价值的科学技术。在各类工程的规划、勘察设计、施工建设、管理运营阶段都离不开测量学。现代社会中，城市化及交通网络的建设，均要按规划进行。任何重大建设工程项目，都必须依据测量学提供的地形图和有关的地理信息精心规划设计，并报主管部门审批。地形图和有关的地理信息是优化城市建设规划、有效利用土地、提高规划建设效益、促进现代化建设必不可少的重要资料。所有重要建设项目的规划设计，都必须对所在区域的地势高低平斜、河流的宽窄深浅、已有建筑物的性质与分布做详细测绘，获取大量基本地理信息，才能顺利进行。在工程建设施工阶段，测量工作在设计公路中心线的标定，设计建筑物实际位置的确定，大型建筑构件的精确安装，地下隧道的准确贯通等项目中发挥着不可替代的作用。测量工作也是房产、地产管理的重要手段，是检验工程质量和监视重要交通、土木工程设施安全营运的重要措施。

本课程是测绘专业学生重要的专业基础课，也是地理信息系统、地质、采矿、环境、土木、交通等工程建设专业重要的专业课程之一。

第二节 测绘学的发展历史

测绘学是长期以来人类在认识自然、改造自然的生产实践中，创造、发展起来的最古老的科学技术之一。历代王朝的统治者，在战事运筹、疆域划分、水利建设、交通运输等有关国家兴亡的大计筹划中，都靠测绘资料了解国情和认识世界，为其实施决策提供技术保证。不少古代杰出科学家们的光辉业绩和伟大的发明创造都与测绘有关，中国古代第一部数学专著《九章算术》中就有一章专门介绍测绘理论。《墨经》、《周髀》、张衡地动说、祖冲之的“密率”等奠定了我国古代测绘学的理论基础。2 000 多年前，随着黄河流域堤防和灌溉工程的兴建，产生了原始的农田水利地图测绘。

保存至今的地图，在埃及和巴比伦已经有 5 500 年，在中国也有 2 200 年。我国西晋的裴秀和古希腊的托勒密奠定了古代地图学的基石，《郑和航海图》（郑和，1371—1433）、《广域图》（罗洪先，1504—1564）、《世界地图集》（墨卡托，荷兰，1512—1594），都反映了 16 世纪前东西方地图学的成就。其后，采用经纬度制图法的《海国图志》和《历代舆地沿革险要图》等，是我国近代地图的代表作。这些成果都建立在测量学、地理学、数学、天文学等学科的成就之上。

现代测绘科学的发展主要是从 17 世纪初逐步开始的。当时资产阶级革命兴起，使生产力得到解放，促进了科学技术的快速发展。17 世纪初，望远镜发明并应用于天象观测，不久即被普遍应用于各种测量仪器，成为测绘科技发展史上一次重大的技术进步。1617 年三角测量方法开始应用，1683 年法国进行了弧度测量，证明地球确实是两极略扁的椭球体。此后，测绘科学在测量理论、测量方法及测绘仪器各方面都有不少创造发明。其中德国著名

的数学家、天文学家、物理学家高斯于 1794 年提出了最小二乘理论，对测量数据的处理理论产生了深远的影响，至今仍然是处理测绘数据最重要的理论基础；以后又提出了横椭圆柱投影学说，利用该投影方法建立的高斯直角坐标系是目前最常用的测绘坐标系。1899 年摄影测量的理论研究得到发展，1903 年飞机的发明，促进了航空摄影测量的发展，从而使测图工作很大一部分可以由野外转移到室内利用仪器描绘成图，极大地提高了地形图测绘效率，使得摄影测量成为迄今为止大范围中小比例尺地形图测绘的主要技术方法。

20 世纪 50 年代前后开始，不少新的科学技术迅速发展，如电子学、信息论、相干光理论、电子计算机、空间科学技术等。测绘工作者密切关注相关科学的发展，并及时地将它们应用到测绘科学中，推动了测绘科学的发展。如 1947 年开始研究利用光波进行测距，60 年代利用氦氖激光器作为光源的电磁波测距仪问世；20 世纪 40 年代出现了自动安平水准仪，1990 年研制出的数字水准仪，实现了读数与记录的全自动化；1968 年生产了电子经纬仪，它采用光栅、光学编码来代替刻度分划线，以电信号方式获得测量数据，并可自动记录在存储载体上，若接通电子计算机还可立即根据观测数据算出所需成果；随后又在此基础上推出了测距、测角一体化的全能型测量仪器——全站仪。1957 年第一颗人造卫星上天后，人们开始了航天技术在测量中应用的研究。由于人造卫星运行的高度数十倍乃至数百倍于飞机，因此以卫星为遥感平台，具有覆盖范围大、获取资料速度快，可以周期性地获取同一区域遥感数据的优势，因而迅速应用于资源勘探、环境监测、农作物估产、土地利用分类、灾害预报和评估等工作，使遥感技术得到了更广泛的发展和应用。20 世纪 90 年代，美国全球卫星导航定位系统（GPS）建成，由于卫星定位技术具有全天候观测、无需通视、观测速度快、精度高、劳动强度低等巨大经济技术优势，很快被应用于控制测量和各类工程测量，引发了一场深刻的测绘技术革命。目前，各类 GPS 卫星定位仪精度越来越高、价格越来越低。利用卫星定位仪，人们可以实时地获取所在位置信息，从此定位不再仅仅是测量人员的工作，而是已经深入到普通群众的日常生活，卫星导航仪成为了人们出行的常用工具。

人类大约用了 2 000 年的时间，才大体搞清楚地球上海陆的轮廓，又花费了 300 年的时间才测绘出陆地的 30%。20 世纪上半叶，航空摄影测量只用了 50 年的时间就测绘了陆地的 70%，而 20 世纪下半叶，卫星遥感、全球定位系统、地理信息系统和卫星通讯网络等一系列高新技术的进步，已经彻底改变了地图的生产过程。“奋进号”载人航天飞船只用了 11 天的时间就获取了覆盖全球 80% 的图像数据，现代测绘科学技术的巨大进步因此可见一斑。

“经天纬地，开路先锋”是对测绘工作者的真实写照，可以肯定，在信息化的 21 世纪里，测绘科学会扮演越来越重要的角色。

第三节 地球的形状和大小

一、大地水准面和大地体

测量工作在地球表面上进行，学习本课程，必须先了解地球的形状和大小。

最初由于人的视野非常有限，无法看到地球的真实表面，认为地球是方的或者扁平的。

经历了若干世纪艰难的认识过程，公元前 450 年，古希腊学者费罗劳斯，第一个提出大地是一个球。直到公元 1522 年，葡萄牙航海家麦哲伦第一次成功地环绕地球一周，证实了地球是球形的假说。

地球的自然表面是不规则的，分布着高山、高原、洼地、盆地、平原等千姿百态的地貌。世界上最高的山峰是位于我国境内的珠穆朗玛峰，2005 年 5 月我国大地测量工作者测得其高程为 8 844.43 m；而在太平洋西部的马里亚纳海沟是世界最深的海沟，深达 11 022 m。但是地球表面的高低起伏，相对于地球平均半径 6 371 km 是很小的。由于地球表面除了大约 29% 的面积是陆地外，大约 71% 的面积是海洋，所以在研究地球的形状和大小时，我们可以把地球看做是一个被海水包围的球体，即假想有一个静止的海水面，向陆地延伸而形成一个封闭的曲面，以此静止海水面包围的地球体作为地球的形状。

地球上的任一质点，受地球引力影响而不脱离地球。同时，地球又在不停地自转，使质点受到离心力的作用，因此，一个质点实际上所受到的力是地球引力和离心力的合力，即重力（见图 1.1）。在测量外业观测中，我们很容易得到重力线方向：用一根细绳系一个垂球，细绳在垂球的重力作用下下垂形成的方向线就是该点的重力线方向。

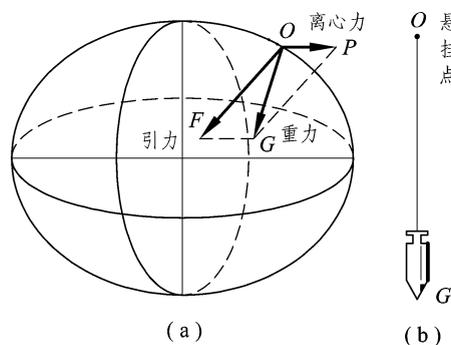


图 1.1 重力与重力线

根据物理学知识可知，等位面处处与产生势能的作用力方向垂直。静止的水面因为处处都与重力方向（也叫做铅垂线方向，简称垂线方向）垂直，水不会流动，所以是等位面，也称为水准面。水准面有无穷多个，设想其中一个与假设静止的平均海水面重合，并延伸到大陆内部形成封闭曲面，这个特殊的水准面称之为大地水准面。大地水准面所包裹的形体叫做大地体。

大地水准面的确定是一件非常复杂的工作，地球形状不规则，内部的质量分布不均匀，引起地面上各点的重力线方向产生不规则的变化。例如：在山岳附近，引力方向偏向山岳；在湖海附近，引力方向偏离湖海；在金属矿藏附近，引力方向偏向矿藏（见图 1.2）。由于水准面都是处处与重力线方向正交的，所以水准面是不规则的曲面。长期以来，各国的大地测量工作者进行了大量的重力测量工作和海水面的观测工作（后者称为验潮），但是到目前为止，还没有得到一个被全球所公认的大地水准面。各国所采用的大地水准面，实际上只是最接近其所在区域平均海水面的水准面。

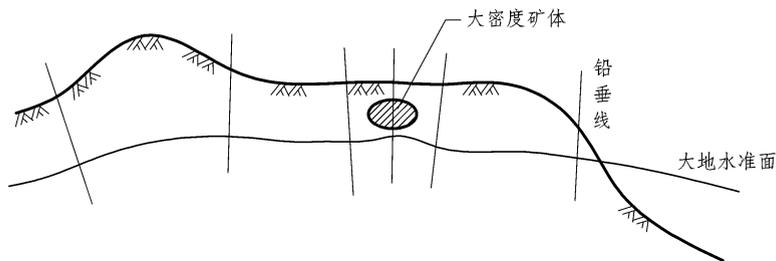


图 1.2 重力线方向的不规则变化

二、总椭球体与 WGS84 椭球体

大地水准面是不规则的曲面，无法在这个表面上进行测量结果的计算，因此必须寻找一个与大地体非常接近的，能用简单的数学模型表示的规则形体来代替大地体。

长期的测量实践证明，地球的形体与一个旋转椭球体极为接近。旋转椭球体是一个椭圆绕其短轴 NS 旋转而成的（见图 1.3），也就是说包含旋转轴 NS 的平面与椭球面相截的线是一个椭圆，而垂直于旋转轴的平面与椭球面相截的线是一个圆。椭球体的基本元素是：长半轴 a ，短半轴 b ，扁率 $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。

与大地体最接近的地球椭球，叫做总地球椭球体，简称总椭球体或总椭球，其表面叫做总椭球面。总椭球体必须满足以下几个几何条件：

- (1) 总椭球体的中心应与地球质心重合；
- (2) 总椭球体的旋转轴应与地球自转轴重合，过椭球中心垂直于旋转轴的平面应与地球赤道面重合；
- (3) 总椭球体的体积应与大地体的体积相等，大地水准面与总椭球面之间的距离平方和最小；
- (4) 总椭球体的总质量应等于地球的总质量；
- (5) 总椭球体的旋转角速度应等于地球的旋转角速度。

1984 年，国际大地测量与地球物理联合会通过的模拟地球的椭球体——WGS84 椭球体，是目前应用比较广泛的总椭球体，全球定位系统 GPS 观测采用的就是该椭球体。

三、参考椭球体

推求在全球范围内与大地水准面符合最好的总椭球体，需要运用全球范围内的观测资料，这是很难做到的。200 多年来，世界上主要大国的测量学者，都是各自采用与本国或本地区的大地水准面符合较好的椭球面，作为测量计算的基准面。这种椭球体仅采用本国或本地区的天文、大地和重力测量资料推算，因而只能做到椭球面与所用资料区域的局部大地水准面密切符合，测量学上称这样的椭球体为参考椭球体，简称参考椭球。

显而易见，理论上总椭球只有一个，而参考椭球可有无数个，它们都不尽相同。如果各个国家或地区的测量成果需要进行交流、互用，应该统一采用总椭球面作为测量计算的参考面。但是，一方面，各个国家和地区为了保证原有测量成果的延续利用；另一方面，一般来说总椭球面与所在国家或地区的大地水准面符合程度不如参考椭球面好，所以许多国家和地区仍继续沿用参考椭球面。

我国 1952 年前采用海福特椭球，1953 年起改用克拉索夫斯基椭球，1978 年后开始采用 1975 年由国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）颁布的椭球体（椭球元素见表 1.1），并以此建立了我国新的大地坐标系——1980 年国家大地坐标系（C80）。

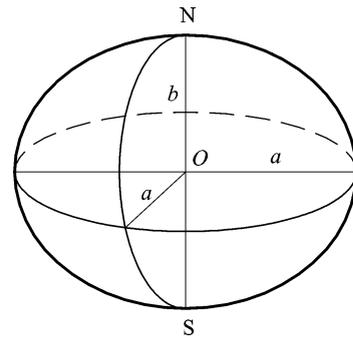


图 1.3 旋转椭球体

表 1.1 几种椭球体的椭球元素比较

椭球体	年代	国家或机构	长半轴	短半轴	1/扁率
海福特	1909	美国	6 378 388	6 356 912	298.3
克拉索夫斯基	1940	苏联	6 378 245	6 356 863	298.3
1975 国际椭球	1975	国际大地测量与地球物理联合会	6 378 140	6 356 755	298.257 221 01
WGS84	1984	国际大地测量与地球物理联合会	6 378 137.000	6 356 752.314	298.257 223 563

第四节 测量坐标系的建立

测量工作的本质是定位，定位需要一个基准，即需要一个特定的坐标系统。在不同的国家和地区，对于不同精度、等级、范围的测量，可能采用不同的坐标系。

一、测量工作的基准面和基准线

要确定一个点的空间位置，可以通过确定这个点在某个基准面上的投影以及该点沿基准线到该基准面的距离来进行。

上节已经提到，在野外进行测量时，很容易得到重力线方向，因此，测量外业工作采用的基准面和基准线分别是水准面和与之垂直的重力线。但是由于大地水准面形状不规则，不能作为内业计算的基准面，所以内业计算是采用总椭球面或参考椭球面作为基准面，采用与椭球面处处垂直的法线作为基准线。

采用不同的基准面和基准线，可以建立不同的坐标系来对地面点进行定位。在测量工作中，一般确定某点在基准面上的投影位置可以采用大地坐标、天文坐标和高斯平面直角坐标，而确定某点沿基准线到基准面的距离可以采用大地高和正高。大地坐标、天文坐标和平面直角坐标可以统称为坐标，而大地高和正高可以统称为高程。要确定一个空间点的位置，实际上就是要确定其坐标和高程。

二、大地坐标和大地高

在图 1.4 中，NS 为椭球的旋转轴，N 表示北极，S 表示南极。包含椭球旋转轴的平面称为子午面，而通过原英国伦敦格林尼治天文台的子午面称为起始子午面或首子午面。子午面与椭球面的交线称为子午圈、子午线或经线。通过椭球中心且与椭球旋转轴正交的平面称为赤道面，它与椭球面相截得到的曲线称为赤道。其他与椭球旋转轴正交，而不通过球心的平面与椭球面相截所得曲线称为平行圈、纬圈或纬线。起始子午面和赤道面，是在椭球面上确定某一点投影位置的两个基本平面。在

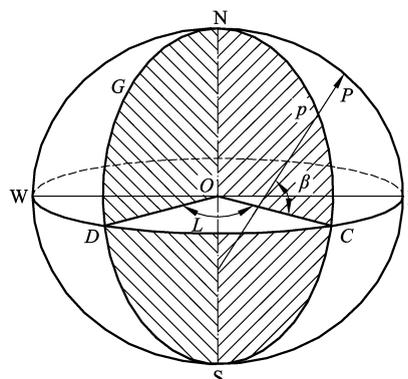


图 1.4 大地坐标

测量工作中，点在椭球面上的位置用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。所谓某点（如 P 点）的大地经度，就是通过该点的子午面与起始子午面的夹角；如果在椭球面上的 P 点作一条法线（该法线与通过 P 点所作的椭球体的切平面垂直），大地纬度就是这条法线与赤道面的交角。由此可见，大地经度和大地纬度以椭球面作为基准面，以法线作为基准线，它们统称作大地坐标，表示了空间点在椭球面上的投影位置。

一般地面点不在椭球面上，则地面点沿过该点的法线到椭球面的距离，即以椭球面为基准面的高程，叫做大地高。

由于椭球面并不是物理曲面，而是抽象的数学曲面，在测量中无法实际得到某点的法线，因此，大地坐标和大地高都不能直接测量，而只能通过观测数据计算得到。

三、天文坐标和正高

用经度、纬度、大地高表示一点位置的大地坐标系是在球面上建立的，所以称为球面坐标系，也称为地理坐标，属于曲面坐标系统。

如前所述，大地坐标是不能直接测定的，实践中是以大地水准面和重力线代替椭球面和法线，采用天文测量的方法测定一个点的天文经度和天文纬度，然后借助于重力测量等资料，计算转化为大地经度和大地纬度。

天文经度和天文纬度定义与大地经度、纬度类似，不同的是基准面为大地水准面，基准线为重力线（铅垂线）。

地面点沿该点的重力线到大地水准面的距离，即以大地水准面为基准面的高程，叫做正高，也叫做绝对高程或海拔高度，简称海拔。如果不特别指出，我们通常所说的高程，都是指绝对高程。

在新中国成立之前，我国曾在不同时期以不同方式建立吴淞口、青岛和大连等地验潮站，得到不同的高程基准面。在新中国成立之后的 1956 年，我国根据基本验潮站应具备的条件，对以上各验潮站进行了实地调查和分析，于 1957 年确定青岛验潮站为我国基本验潮站。青岛验潮站建在地质结构稳定的花岗石上，以 1950 年至 1956 年 7 年间的潮汐资料所求的平均海水水面作为我国的高程基准面，称之为“1956 年黄海高程系统”。此后由于观测数据的积累，黄海平均海水水面发生了微小的变化，因此启用了新的高程系，即“1985 年国家高程基准”。青岛水准原点的高程，在 1956 年黄海高程系统中为 72.289 m，在 1985 国家高程基准中为 72.260 m。

如果某个测区无法与按国家高程点推算的已知高程联测，则只能求得地面点到某假定水准面的垂直距离，这样的垂直距离叫相对高程或假定高程。

四、平面直角坐标

大地坐标的基准面是椭球面，用大地坐标表示点位，不便于表示小范围内点的相对关系，加之椭球面上的计算工作非常复杂，所以大地坐标对于工程应用而言十分不便。实际上对于大多数工程项目而言，由于建设范围较小，完全可以不考虑地球曲率影响，而直接将参考椭球面视为平面，定位参照系统采用平面直角坐标系统。由于相对于曲面坐标系统，平面直角坐标中绘图、工程设计与计算更加方便简单，因此在城市与工程建设中，平面直角坐标系统，是测绘工作采用的主要定位参照系统。

测量工作中采用的平面直角坐标系，与数学上的笛卡儿坐标系不同，是以 X 轴为纵轴，表示南北方向， Y 轴为横轴，表示东西方向，除坐标轴方向不同外，两者的象限顺序也相反（图 1.5）。这样定义测量直角坐标系，是要在测量工作中方位角（相对于数学中的象限角）规定从北方向顺时针量算，与笛卡儿坐标系（从横轴逆时针量算）不同的情况下，保持按数学中计算坐标增量的三角函数公式不变。

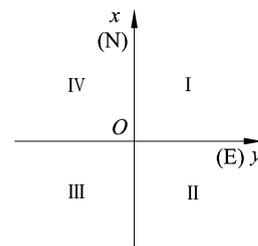


图 1.5

对于地球曲率影响不能忽略的较大区域，采用平面坐标会产生不能忽视的长度变形。为工程应用方便而又能控制长度变形，实践中采用分区域建立相互联系的平面直角坐标系的方法，而两平面坐标系相互联系的纽带，就是大地坐标系。大地坐标系与分区域建立的平面坐标系可以相互转换，我国采用高斯投影方法实现转换，因此平面坐标系又称高斯平面坐标系，由于高斯投影的概念在第六章中有专门论述，在此不再赘述。

五、空间直角坐标

由于卫星大地测量日益发展，现在也常用球心空间直角坐标系来表示空间一点的位置。这种坐标系的原点设在椭球的中心 O ， Z 轴与椭球旋转轴重合， X 轴通过起始子午面， X 轴逆时针旋转 90° 方向为 Y 轴。由于是原点在地球质心的空间直角坐标系，所以这种坐标系又称为地心空间直角坐标系。

GPS 测量成果属于 WGS84 坐标系，是一种以 WGS84 椭球为基准建立的地心坐标系。其坐标系的几何定义是：原点在地球质心， Z 轴指向 BIH 1984.0 定义的协议地球极 (CTP) 方向， X 轴指向 BIH 1984.0 的零子午面和 CTP 赤道的交点； Y 轴与 Z 、 X 轴构成右手坐标系，如图 1.6 所示。

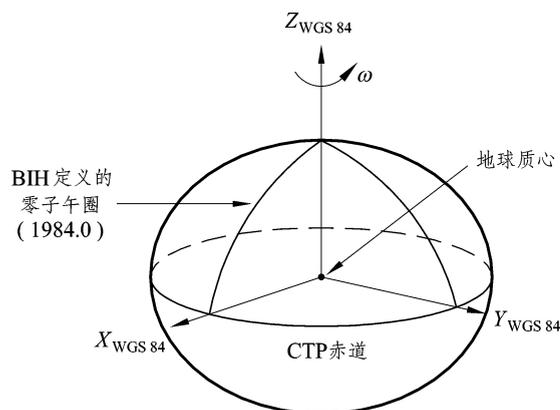


图 1.6 WGS84 坐标系

第五节 测量工作的主要内容和基本原则

一、确定地面点位的三个基本要素

确定地面点在定位参照系（坐标系）中的位置，可以将观测值归算到参考椭球面上，在椭球面上计算待定点的大地坐标。若采用平面直角坐标系，则还要通过高斯投影方法将椭球面上的点投影到高斯平面上，或者直接将观测值投影到高斯平面上，在平面上计算。对于范围较小的区域，参考椭球面可近似视为平面（即在此范围内将参考椭球面看做一个平面）。如图 1.7 所示，图中 A 、 B 、 C 、 D 和 E 是地面上高低不等的一系列点，构成一个空间多边形；下图 P 是个水平面，从 A 、 B 、 C 、 D 、 E 各点向这个水平面作铅垂线，这些铅垂线的垂足在 P 平面

上构成多边形 $A'B'C'D'E'$ ，平面上各点就是空间各点的正射投影。从图中可以看到多边形 $ABCDE$ 与 $A'B'C'D'E'$ 并不完全相似，平面上多边形的各边一般都短于空间的相应边，至多相等。投影平面上的角是两倾斜边构成的空间角在水平面上的投影（水平角）。

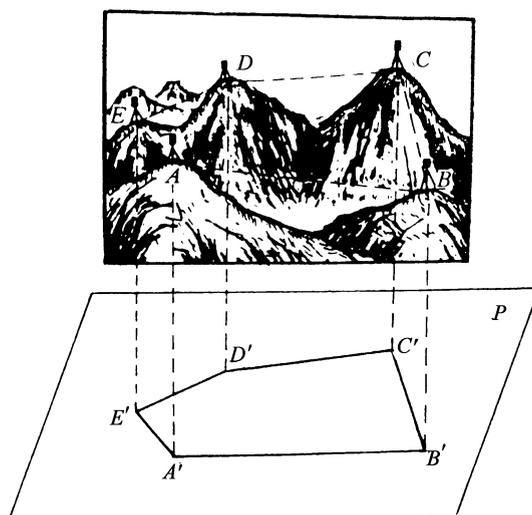


图 1.7 地图与地面实际情况的关系

根据数学知识，如果测定了多边形 $A'B'C'D'E'$ 各边的边长（即两点之间的水平距离）和各内角（水平角），就可以确定各点的相对位置。如果在平面 P 上建立了一个平面直角坐标系，并已知某点如 A' 的坐标，则通过确定 $A'B'$ 的方位角和水平距离，可以确定 B' 点的坐标。

为反映两点在铅垂线方向的差异，采用独立于平面坐标系的一维坐标系统——高程系统来表示。但如图 1.8 所示，地面点的高程 H_B 不能直接测量得到。

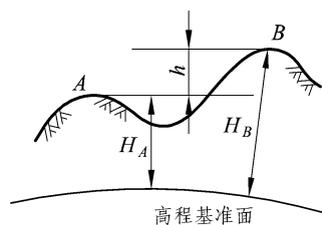


图 1.8 高差与高程

高差是指地面上两点高程之差， A 、 B 两点之间高差的定义为：

$$h_{AB} = H_B - H_A \quad (1-1)$$

假设 A 点为已知点， B 点为未知点，只要测量了 A 至 B 的高差 h_{AB} ，便可以确定 B 点的高程，即

$$H_B = H_A + h_{AB} \quad (1-2)$$

由此可见，我们最终所要得到的高程和平面坐标不能通过直接测量得到，而是测量水平距离、水平角和高差后，通过几何关系计算而得。所以测量上把水平角、距离、高差称为确定地面点位的三个基本要素。

二、测量工作的基本原则

定位工作实际上是确定点在设定参照系统中的位置。因此，建立定位参照系统（坐标系）是测量的首要工作。定位参照系统是通过确定一系列点的坐标和高程来确定的，这一项工作称为控制测量。确定点的坐标和高程，需要由几何元素（边长、夹角、高差等观测值）将离散的点联系起来，这些由点和观测值所构成的图形就称为控制网。在建立了控制网（点）后，就可以依据控制点，以相对较低的精度和更大的密度，测定其他点的坐标和高程，这称为细部测量。由于任何测量工作都会存在误差，为保障测量成果质量，测量工作需要严格遵循一定的原则和作业程序。“从整体到局部”、“先控制后细部”是测量工作控制测量误差积累和传播的基本原则。

对于全国性测量工作，由于幅员广阔，必须采取分等布置控制网的办法，才能达到既符合精度要求又合乎经济的原则。根据国家基本控制的精度不同一般分为一、二、三、四等，由高级向低级逐步建立。

国家基本高程控制是用水准测量方法建立的，也分成一、二、三、四等。

测量工作一般可分为两个部分，即野外数据采集和室内计算绘图，习惯上将前者称为外业工作，将后者称为内业工作。测量工作是直接服务于城市、国防、水利、电力、道路、桥梁等工程建设的基础性、先行性的工作，在内外业测量过程中，如果测量成果出现错误，可能给后续建设工程项目带来重大损失。因此，为了提高测量成果的精度和可靠性，测量工作的各个环节都有完善的技术规范，其中详尽规定了测量作业的程序和要求。例如：外业观测数据采集，必须保证有足够的多余观测，并对因多余观测产生的各项检核条件均规定了限差（容许值），以检验观测值是否合乎要求；采集数据时有规定的观测程序，来消除或削弱仪器不完善带来的系统性误差等。总之，只要严格执行测量技术规范规定的观测程序和限差要求，做到严谨细致、一丝不苟，就一定能取得高质量的测量成果。

第六节 用水平面代替参考椭球面的限度

测量外业工作的基准面是水准面，基准线是铅垂线，测量数据处理首先要归算到参考椭球面上，然后再投影到高斯平面上，这是一个相当复杂的过程。在实际工作中，若测区面积不大，往往用水平面代替参考椭球面，即将测区范围内的参考椭球面视为平面。那么多大的范围内，可不考虑地球曲率影响，直接用水平面来代替参考椭球面呢？下面对测定地面点位的基本要素——水平距离、水平角和高差分别加以讨论。

一、地球曲率对水平距离的影响

如图 1.9 所示，设 DAE 为参考椭球面， AB 为其上的一段圆弧，长度为 S ，其所对应的圆心角为 θ ，地球平均半径为 R ；另在 A 点作切线 AC ，如果将切于 A 点的平面代替参考椭球面，即以相应的切线段 AC 代替圆弧 AB ，则在距离上产生误差 ΔS ，由图 1.9 可得：

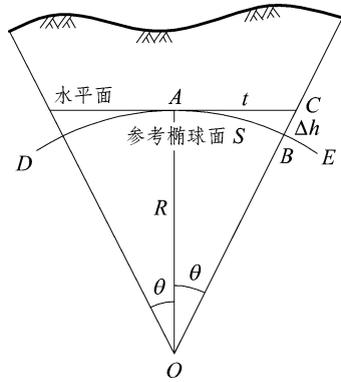


图 1.9 地球曲率对水平距离和高差的影响

其中
$$\Delta S = AC - \widehat{AB},$$

则
$$AC = R \cdot \tan \theta, \quad \widehat{AB} = R \cdot \theta,$$

$$\Delta S = R \left(\frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots \right)$$

因 θ 角值很小，故略去五次方以上各项，并以 $\theta = S/R$ 代入，有

$$\Delta S = \frac{1}{3} \cdot \frac{S^3}{R^2} \quad (1-3)$$

即
$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{3} \left(\frac{S}{R} \right)^2$$

当 $S = 10 \text{ km}$ 时， $\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{1\,217\,700}$ ；

当 $S = 20 \text{ km}$ 时， $\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{304\,400}$ ；

当 $S = 50 \text{ km}$ 时， $\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{48\,710}$ 。

在普通测量中，距离丈量时的误差为其长度的 1/100 万时，是可以忽略不计的。由此可见，当在半径为 10 km 的圆面积内进行距离的测量工作时，一般情况下可以不考虑地球曲率。

二、地球曲率对水平角度的影响

由球面三角学知道，同一个空间多边形在球面上投影的各内角之和，较其在平面上投影的各内角之和大一个球面角超 ϵ 的数值，其公式为：

$$\epsilon'' = \rho'' \frac{P}{R^2} \quad (1-4)$$

式中 ρ'' ——1 弧度所对应的秒数；

P ——球面多边形面积；

R ——地球平均半径。

根据式 (1-4) 可知，当 $P = 10 \text{ km}^2$ 时， $\epsilon'' = 0.05''$ ；当 $P = 100 \text{ km}^2$ 时， $\epsilon'' = 0.51''$ ；当 $P = 400 \text{ km}^2$ 时， $\epsilon'' = 2.03''$ ；当 $P = 2\,500 \text{ km}^2$ 时， $\epsilon'' = 12.70''$ 。

对于面积在 100 km^2 以内的多边形，地球曲率对水平角度的影响只有在很精密的测量中

才需要考虑。

三、地球曲率对高差的影响

根据图 1.9 有：

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + t^2, \quad 2R \times \Delta h + (\Delta h)^2 = t^2$$

即
$$\Delta h = \frac{t^2}{2R + \Delta h} \approx \frac{S^2}{2R} \quad (1-5)$$

当 $S=10$ km 时， $\Delta h=7.8$ m；当 $S=100$ m 时， $\Delta h=0.78$ mm。

上述计算表明：地球曲率的影响对高差而言，即使在很短的距离内也必须加以考虑。