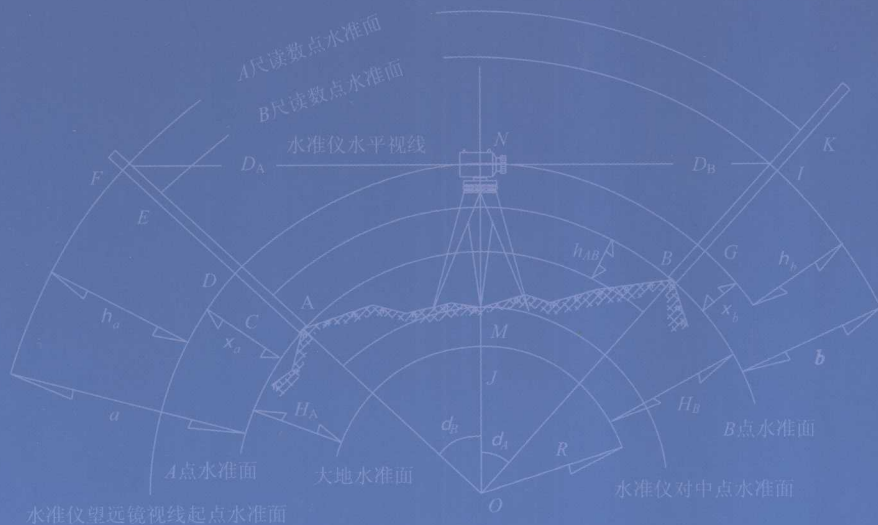


姜晨光 主编

测量技术 与方法

Measurement Techniques
and Methods



化学工业出版社

姜晨光 主编

测量技术 与方法

Measurement Techniques
and Methods



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从实用的角度出发,系统地阐述了测绘科学的基本理论、技术和方法,内容包括测绘科学的基准系统、水准测量、经纬仪测量、距离测量、方位测量与坐标计算测量误差处理、控制测量、大比例尺地形图测绘、地形图的应用,对国家基础测绘工作和各类工程建设活动具有一定的指导意义和参考价值。

本书可供测绘和工程建设领域各级政府主管部门、工程勘测工作者、工程施工人员、工程设计人员、工程建设管理人员工作和学习参考,还可以作为相关专业学生的实践指导教材。

图书在版编目(CIP)数据

测量技术与方法/姜晨光主编.
出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-122-05652-8

I. 测… II. 姜… III. 测量学 IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 079282 号

责任编辑:董琳

文字编辑:孙凤英

责任校对:洪雅姝

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14¼ 字数378千字 2009年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00元

版权所有 违者必究

前言

测绘科学是一门既古老又崭新的科学，它的起源可追溯到原始社会，是人们最早创造的科学体系之一。测绘科学的发展时刻与人类的文明史同步，随着人类文明的历史进程一直发展到了今天，测绘科学对人类社会的发展做出了不可磨灭的重大贡献，成为人类各种活动不可或缺的重要依靠和技术手段。

数学、机械学、光学、电子学、计算机科学、信息科学、自动控制科学的发展是测绘科学发展的助推器，测绘科学与它们相互融合、共同提高。随着现代科技的突飞猛进，现代测绘技术的手段更加先进，现代测绘科学的理论更加进步与不断完善，ETS（电子全站仪）、GPS（卫星定位系统）、RS（遥感技术）、GIS（地理信息系统），以及它们四者之间的集成已经成为当今测绘的主旋律，它们与惯性测量系统（根据惯性原理设计的测定地面点大地元素的系统）、长基线干涉测量技术（独立站射电干涉测量技术）等各种技术为人类文明的发展，为人类社会的进步，为各类工程建设源源不断地发挥着独特的、不可替代的重要作用。

测绘科学是各类工程建设的“眼睛”和“指南针”。城乡规划和建设离不开测绘科学，资源勘察与开发离不开测绘科学，土木工程建设离不开测绘科学，交通工程建设离不开测绘科学，水利水电建设离不开测绘科学，国土资源调查离不开测绘科学，建设现代化农业离不开测绘科学，测绘科学是各种工程建设的重要技术保障。测绘知识已成为国民经济中许多行业从业人员的必备基础知识，掌握与利用好测绘技术是对这些从业人员的基本要求。

本书是编者近30年测绘工作经验的初步总结，也是编者在江南大学从事教学、科研和社会实践活动的经验积累。本书密切结合实际，力求通俗易懂，对传统的测绘基础理论、技术和方法进行了认真的总结与反思，吸收了当今最新的科技成就和技术，接纳了许多前人及当代人的宝贵经验和认识。希望本书的出版能有助于测绘科学的普及、进步和发展，对我国相关行业的技术进步有所帮助和贡献。

全书由江南大学姜晨光主笔完成，无锡市物业管理中心丁立志、张晶、张敏明、贾绪领，山东省莱阳市康平建设监理有限责任公司任忠慧、严立明、张华强、张辉，青岛农业大学贺勇、李少红、盖玉龙、李霞、杨吉民，山东省水利厅石伟南，山东海河流域水利管理局巩亮生，机械工业第四设计研究院宋卫国，中国兵器工业北方勘察设计研究院李增有，河北中核岩土工程有限责任公司闫春茹，中国有色金属工业长沙勘察设计研究院彭四清，无锡市高速公路建设指挥部丁满琪等同志（排名不分先后）参与了部分章节的撰写工作。

初稿完成后，李锦铭、王浩闻、苏文磬、徐至善、黄建文五位教授级高级工程师提出了不少改进意见，为本书的最终定稿做出了重大贡献，谨此致谢！

限于水平、学识和时间关系，书中内容难免粗陋与欠妥之处，敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

编者

2009年3月于江南大学

目 录

第1章 测绘科学的基准系统	1
1.1 测绘科学概述	1
1.2 地球的形状和大小	4
1.3 地面上点位的表示方法	8
1.4 水平面代替水准面的限度	14
1.5 普通测量的工作程序与原则	16
第2章 水准测量	19
2.1 水准测量原理	19
2.2 水准测量仪器与工具	20
2.3 水准测量的常规作业过程	26
2.4 普通微倾式水准仪的使用	28
2.5 水准测量内业计算	32
2.6 自动安平水准仪	37
2.7 精密水准仪	40
2.8 电子水准仪	44
2.9 水准仪的检验和校正	53
2.10 水准测量误差及消减方法	58
第3章 经纬仪测量	61
3.1 经纬仪测角原理	61
3.2 经纬仪的构造	63
3.3 电子经纬仪	71
3.4 经纬仪的安置方法	74
3.5 水平角测量方法	77
3.6 竖直角测量方法	81
3.7 经纬仪的检验与校正	85
3.8 经纬仪测角误差分析	91
第4章 距离测量	95
4.1 距离测量概述	95
4.2 钢尺量距	95
4.3 视距测量	102
4.4 电磁波测距	105

第5章 方位测量与坐标计算	113
5.1 直线定向	113
5.2 测量平面直角坐标计算的基本法则	116
5.3 磁方位角测量	118
5.4 真方位角测量	119
第6章 测量误差处理	125
6.1 测量误差概述	125
6.2 测量精度的评定标准	128
6.3 误差传播定律	129
6.4 等精度多次观测的数据处理	130
6.5 不等精度多次观测的数据处理	131
6.6 误差传播定律的应用	133
第7章 控制测量	136
7.1 控制测量概述	136
7.2 国家平面大地控制网	137
7.3 国家高程控制网	144
7.4 工程测量控制网	147
7.5 导线测量	149
7.6 小三角测量	158
7.7 交会测量	163
7.8 三、四等水准测量	165
7.9 跨河水准测量	168
7.10 高程控制网平差简介	174
第8章 大比例尺地形图测绘	177
8.1 地图类型	177
8.2 地形图的基本架构	178
8.3 地形图测绘方法	187
8.4 地形图的绘制	191
8.5 电子全站仪数字化测图	194
8.6 航空摄影测量成图简介	195
第9章 地形图的应用	199
9.1 地形图的阅读方法	199
9.2 地形图的选择	201
9.3 地形图的应用	203
9.4 地形图的图斑面积量算	209
9.5 利用地形图进行土地整理	214
9.6 地形图在建筑设计中的应用	217
9.7 利用地形图进行城市用地地形分析	217
参考文献	220

第1章

测绘科学的基准系统

1.1 测绘科学概述

“测绘科学”常常被人们称为“测量”，实际上“测量”只是“测绘科学”的一部分内容，为了顺应人们的习惯，本书中也将“测绘科学”简称为“测量”。

测绘科学的起源可以追溯到原始社会，是人们最早创造的科学体系之一。测绘科学的发展时刻与人类的文明史同步，随着人类文明的历史进程一直发展到了今天，对人类社会的发展作出了不可磨灭的重大贡献，成为人类各种活动不可或缺的重要依靠和技术手段。

“逐水而居”是人类诞生以来的一种最朴素、最基本的居住地选择标准，这也就是古老民族都发源于大江、大河流域的原因（中华民族发源于黄河、长江流域；印度民族发源于恒河流域；埃及民族发源于尼罗河流域；古巴比伦民族发源于幼发拉底河和迪格里斯河流域），“逐水而居”面临的重大危险就是雨季的山洪暴发，因此，古人从“水往低处流”的自然现象中发明了最早的测绘名词“高差”。公元前 27 世纪建设的埃及大金字塔，其形状与方向的高度准确性说明当时就已有了解样的工具和方法。随着人类的进步，社会进入了农耕时代，洪水泛滥使人们耕种的土地被淹没，洪水过后部落首领要给每个部落成员重新划定土地范围，因此，就诞生了原始的“测量”，这也是“地籍测绘”的最早雏形（据说在这一事件上古埃及最早）。中华民族最早的测绘记录可以追溯到四千年前，在《史记·夏本纪》中叙述有夏禹治理洪水的情景：“陆行乘车，水行乘船，泥行乘橇，山行乘犂，左准绳，右规矩，载四时，以开九州，通九道，陂九泽，度九山”，准绳和规矩就是当时所用的测量工具（准是可揆平的水准器；绳是丈量距离的工具；规是画圆的器具；矩则是一种可定平，测长度、高度、深度和画圆、画矩形的通用测量仪器），由此可见，在公元前 21 世纪我们的先民已经能够使用简单的测量工具进行测量工作了。

随着原始社会的解体，人类进入奴隶社会，在原始社会向奴隶社会过渡的转型期，部落战争风起云涌，为了赢得战争的胜利，人们首先必须派出探子侦察地形，这就诞生了原始的“军事测绘”，探子对地形的描述就是一种“口授的地图”，因此，也就诞生了原始的“地图学”和“地形学”。历史记载，我国在公元前一千多年前就诞生了地图（见《汉书·郊毅志》、《左传》、《山海经图》等典籍）。世界现存最早的纸质地图是长沙马王堆汉墓出土的公元前 2 世纪的地形图、驻军图和城邑图，是迄今发现的最古老、最翔实的地图。

在人类历史从奴隶社会向封建社会的过渡阶段，战争的规模越打越大，因此，也需要更加强有力的“军事测绘”支撑，于是，在公元前 4 世纪中华民族发明了专门用于指示方向的仪器“司南”（也叫指南车，是一种利用齿轮转动原理制造的固定指向仪器），这样，人们就摆脱了辨向时对太阳、星星和树的年轮的依赖，当人们认识了“磁”现象后，又发明了利用

磁力定南北的工具（比如我国的“磁勺”、外国的“指南针”，当然，这是后话，是公元后的事情了）。公元前7世纪到公元前3世纪的春秋战国时期，我国的测绘技术有了全面的发展，从《周髀算经》、《九章算术》、《管子·地图篇》、《孙子兵法》等书的有关论述中都可以说明当时我国的测量技术、计算技术和军事测绘技术都已经达到了相当高的水平。

人类对地球形状的认识萌芽于人们对天体认识的初期（具体年代已不可考），我们的先民认为“天圆地方”、古希腊人认为“天圆地平”（见《荷马史诗》），后来，古人在静水湖泊中进行渔猎活动时发现两舟相遇最早看到的是船顶，于是认识到地球是圆的，直到公元前6世纪后半叶，毕达哥拉斯提出了地球是圆球的正式说法。公元前3世纪埃拉托色尼首次用子午弧长测量法来估算地球的半径（估算误差为100km）。人类历史上对地球进行的第一次实测是我国科学家在唐朝开元年间（公元713~公元741）进行的，公元827年阿拉伯人也进行了一次有意义的弧度测量（推算出纬度 35° 处子午线 1° 弧长等于111.8km，比正确值只大1%）。在“日、地关系”问题上，人类自诞生之日起一直是习惯地认为“太阳绕着地球转”（即地心说）的，直到1543年哥白尼创立了日心说（即“地球绕着太阳转”）才有了正确的“日、地关系”，布鲁诺的壮烈殉难为“日心说”的科学地位做了奠基。于是，1590年伽利略进行了第一次重力测量，1614年开普勒发表了行星运动遵循的三大定律，1615年斯涅耳（荷兰人）首创了三角测量法，1673年惠更斯提出了用摆进行重力测量的理论，1683年法国科学院组织的两个测量队的观测结果证实地球是椭球，1687年牛顿创立了万有引力定律，随之而来的是“大地测量”理论与技术的逐渐成熟。我国古代有不少科学家在测绘科学领域卓有建树，他们为测绘科学的计算工作奠定了重要的基础，我国印刷术的发明为现代地图制图奠定了基础。

17世纪望远镜的发明和应用对测量技术的发展起到了很大的促进作用，奠定了近代测绘的物质基础，可以说是引领了测绘科学的第一次革命。1806年高斯提出了最小二乘原理，以后又提出了横圆柱投影学说，对测绘科学的发展做出了历史性的不可磨灭的重大贡献（以至于今天我们还在应用他的理论）。19世纪照相机的发明、1903年飞机的发明奠定了航空摄影测量的基础，引发了测绘科学的第二次革命，为航空摄影测量的诞生和发展奠定了基础，航空摄影测量技术的出现大大减轻了测绘工作的劳动强度。1945年第一台电子计算机的出现，引发了测绘科学的第三次革命，电子计算机不仅将测绘从繁重的计算工作中解脱了出来、大大提高了计算速度，而且为现代测绘技术、测绘仪器、测绘方法的改变奠定了重要的技术基础。1957年10月4日世界第一颗人造地球卫星的发射，引发了测绘科学的第四次革命，促使测绘工作有了新的飞跃，诞生了卫星大地测量学这一测绘新学科，多普勒定位是空间技术用于大地测量并得到普遍应用的一种先进技术。1960年世界上第一台红宝石激光器的诞生，引发了测绘科学的第五次革命，使得距离测量摆脱了对尺子的依赖，测绘进入了激光测量的时代。20世纪70年代GPS技术（全球定位系统）的出现，引发了测绘科学的第六次革命，带来了空间测量技术的普及化和高精度。随之而来的是令人应接不暇、眼花缭乱的人类创造的各个领域的新技术的交叉与融合对测绘科学的改造与拉动，测绘科学迎来了一个更加充满朝气的新时代，现代测绘技术的手段更加先进，现代测绘科学的理论更加进步与不断完善，ETS（电子全站仪）、GPS（卫星定位系统）、RS（遥感技术）、GIS（地理信息系统）以及它们四者之间的集成已经成为当今测绘的主旋律，它们与惯性测量系统（根据惯性原理设计的测定地面点大地元素的系统）、长基线干涉测量技术（独立站射电干涉测量技术）等各种技术为人类文明的发展，为人类社会的进步，为各类工程建设源源不断地发挥着独特的、不可替代的重要作用。

从以上论述不难看出，测绘科学是研究与量度地球或其他天体表面高低起伏的自然形态及其四维变化规律的科学。它与地质科学、地理科学、水科学、大气科学、天文科学共同组

成了地球科学（地学）的大家族。测绘科学本身就是一个多学科集成的综合性大学科，其主要分支学科有地形测量、大地测量、测绘遥感（航空摄影测量与遥感）、地图制图、工程测量、海洋测绘、地籍测绘、测绘仪器 8 大学科。

地形测量学是研究地形测绘理论、方法和技术的科学，其成果是各种各样的地形图，这些地形图就是各种建设项目（涵盖工业、农业、国防等各行各业）规划、设计的基础图件，也是各类地图编制的基础图件。

大地测量学是研究大区域（指地理区域）或全球地壳形态及其变化的科学，大地测量的成果是地球空间信息的基础，是地球科学其他五大学科关键性的、不可或缺的基础平台。在西方国家，大地测量与数学、化学学科等并称为构成自然科学体系的 16 大自然科学学科。大地测量学的基本体系包括以研究建立国家大地控制网为中心内容的应用大地测量学；以研究坐标系建立、地球椭球性质、投影数学变换为主的椭球大地测量学；以研究天文经度、天文纬度、天文方位角测量方法为主要内容的大地天文测量学；以研究重力场及测量方法为主要内容的物理大地测量学等。大地测量学研究的基本内容包括地球形状、外部重力场及其随时间的变化；日月行星的形状及重力场；高精度大地控制网的建立；高精度测量仪器和方法；地球表面点位向椭球面或平面的投影变换；大规模、高精度、多类别地面网或空间网的数据处理方法。大地测量可为空间科学、军事科学、地壳形变研究、地震预报等提供重要资料。按照测量手段的不同，大地测量学又分为常规大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学等。

测绘遥感（航空摄影测量与遥感）学是研究利用遥感的手段获取地表形态信息的科学。遥感是指不直接接触被遥感物从而获知遥感物内、外部信息的技术，测绘遥感是通过遥感器（照相机、电磁波发射与接收系统、CCD 等）对地面进行摄影或扫描而获取地面三维地理信息的。其基本任务是通过摄影相片或遥感图像进行处理、量测、解译，以测定物体的形状、大小和位置，进而制作成图。按遥感器搭载工具的不同，测绘遥感分为航空测绘遥感、航天测绘遥感、卫星测绘遥感、地面（近景）测绘遥感、水下测绘遥感。测绘遥感按工作流程分为内业处理和外业调绘两个主要工作内容。

地图制图学是研究地图绘制理论与技术的科学。其主要研究内容包括地图投影、地图符号设计、地图色彩、地图绘制技术、地图编制理论、地图整饰技术、地图印刷技术、地图标准体系等。其成果主要是各类地图产品（比如各类地形图、地理图、行政区划图、交通图、旅游图、专业图、地图册等），这些地图产品服务的领域和对象具有最大的广泛性。

工程测量学是利用测绘科学综合理论与技术为各类工程建设提供测绘保障服务的应用科学，也可称之为应用测绘学。主要研究工程建设在勘察设计、施工放样、竣工验收和管理阶段所需要进行的测量工作的基本理论、技术和方法。其主要工作内容包括为工程规划设计提供必需的地形资料（规划时提供中、小比例尺地形图及有关信息，建筑物设计时要测绘大比例尺地形图）；施工阶段将图上设计好的工程（比如建筑物）按其位置、大小测设在地面上供施工人员正确施工；在施工过程和工程建成后的运行管理中对工程（比如建筑物）的稳定性及变化情况进行监测（安全监测、变形观测等）以确保工程的安全与正常运营。按工程测量服务对象的不同，工程测量可分为土木建筑工程测量、铁路工程测量、公路工程测量、地下工程测量、矿山测量、城市测量、地质工程测量、国防工程测量、水利工程测量等。另外，还有一些特种工程测量工作（比如对大型设备、特种设备进行高精度定位和变形监控的精密工程测量；将摄影测量技术应用于工程建设的工程摄影测量；将电子全站仪或地面摄影仪作为传感器在电子计算机支持下对大型机械部件加工过程进行监控的三维工业测量系统等）。

海洋测绘学是研究海底地形及其四维变化规律的科学，主要为海洋运输、海洋科学考察、航道开拓、航道疏浚、海洋军事活动、海下资源开发、海洋救助等提供测绘保障，为海

洋科学研究（比如潮汐、洋流、海温变化、海平面升降等）提供基础地理信息，是海洋科学研究的关键支持平台。

地籍测绘学是研究地籍管理中地籍图测量与绘制理论与技术的科学，在我国，地籍测绘的服务领域主要是各级政府的国土资源管理部门，其成果主要是各种各样的地籍图、土地规划图、土地地区划图、土地评价图等。在国外，地籍测绘是一种具有法律效力的公共服务活动，它既服务于政府也服务于民众。

测绘仪器学是研究测绘仪器制造理论与技术的科学。测绘仪器属于精密仪器，现代测绘仪器是集光（光学）、机（机械）、电（电子）、算（计算机）于一体的高技术含量设备，其涉及的领域非常广，需要多学科密切协同。

综上所述，测绘科学是各类工程建设的“眼睛”和“指南针”。城市和村镇的建设与发展，迫切 need 加强规划与指导，而搞好城乡建设规划，首先要有现势性好的地图来提供城市和村镇面貌的动态信息。地球蕴藏着丰富的自然资源，需要人们去开发，勘探人员在野外工作离不开地图，从确定勘探地域到最后绘制地质图、地貌图、矿藏分布图等，都需要测绘科学技术手段的支持。铁路和公路的建设从选线、勘测设计到施工建设都离不开测绘科学。大、中水利工程必须先在地形图上选定河流渠道和水库的位置，划定流域面积、储流量，再测出更详细的地图（或平面图）作为河渠布设、水库及坝址选择、库容计算和工程设计的依据。建设现代化的农业，首先要进行土地资源调查，摸清土地“家底”，而且还要充分认识各地区的具体条件，进而制定出切实可行的发展规划，测绘科学可为这些工作提供有效的支持（比如地貌图反映地表的各种形态特征、发育过程、发育程度等，对土地资源的开发利用具有重要的参考价值；土壤图表示各类土壤及其在地表的分布特征，可为土地资源评价和估算、土壤改良、农业区划提供科学依据）。就建筑工程来讲，地面的水平性靠测绘技术的保障、墙体的垂直度靠测绘技术的保障、排水系统的坡度靠测绘技术的保障、各种曲线的形状靠测绘技术的保障等，总之，任何工程建设都离不开测绘科学，测绘科学是各种工程建设不可或缺的重要技术保障。

1.2 地球的形状和大小

测量工作是在地球表面上进行的，许多测量基本理论和数据都涉及地球的形体，因此必须了解地球的形状和大小。地球的自然表面极为复杂，有高山、丘陵、平原和海洋等，因此，地球表面是一个起伏不平的不规则曲面。地面上最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8844.43m（该数据是 2005 年 10 月 9 日经国务院批准并授权，国家测绘局正式公布的 2005 珠峰高程测量新数据，珠穆朗玛峰峰顶岩石面海拔高程为 8844.43m、测量精度为 $\pm 0.21\text{m}$ 、峰顶冰雪深度为 3.50m，我国于 1975 年公布的珠峰高程数据 8848.13m 停止使用），海洋最深处的马里亚纳海沟（太平洋西部）比海平面低 11102m，但因地球的半径约为 6371km，故地球表面的起伏相对与地球庞大的体积来说是极微小的。因此，人们常把地球简化为球体。测绘科学是将地球精确数量化的科学，因此必须对地球的形状有一个尽可能精确的数学描述，1969 年 7 月 20 日，美国登月宇宙飞船“阿波罗”11 号的宇航员登上月球的时候，就看到了带蓝色的浑圆的地球，犹如在地球上观月亮一样。因此，科学家们根据以往资料和宇航员拍下的相片，认为最好把地球看作是一个“不规则的球体”。所以，地球的自然形状是一个表面起伏不平的类似鸭蛋状的球体。地球的这种自然形状无法数学化，因此，为了科学研究和应用的需要，人们必须对地球的形状进行科学的简化。人们对地球形状进行的第一次简化是利用物理学原理进行的，简化后的地球形体称为地球的物理形状，地球的物理形状被

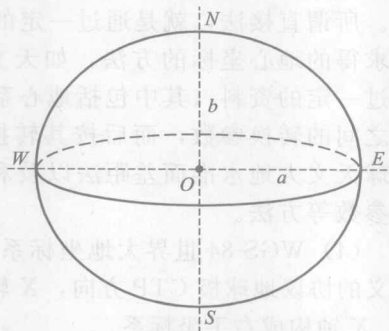
称为大地体，大地体的表面（大地水准面）成为衡量地壳起伏度的基准面。由于地球内部密度各不相同，因此大地水准面并不是一个非常光滑的曲面，而是一个复杂的曲面，如果将地球表面上的图形投影到这个复杂的曲面上，这在测量计算上极为困难且不利于各种工程建设活动，另外，大地水准面本身很难用一个确切的函数式进行表达，于是，人们又用数学方法对大地体进行了简化，构建了地球的数学形状，这个数学形状被称为总地球椭球。

1.2.1 地球的物理形状

要讲清楚地球的物理形状，必须从一个最基本的测量术语谈起，这个术语就是水准面。水准面是重力等位面，可理解为自由静止的水面，是一个类似球状的封闭曲面，水准面有无数多个。由于整个地球表面上海洋面积约占 71%、陆地仅占 29%，所以海水面所包围的形体基本上表示了地球的形状。于是，人们将与平均海水面吻合程度最高的水准面称之为大地水准面，大地水准面所包围的形体称为大地体，大地体即为地球的物理形状。大地水准面只有一个，可理解为自由静止的等密度海水在恒温、恒压、无潮汐、无波浪情况下向陆地内部延伸后所形成的封闭海水面。毋庸置疑，大地水准面是一个极端理想化的曲面，是不可能准确建立起来的，只能随着各方面条件的改善逐步趋近。精确的大地水准面无法建立，只能建立一个接近于它的替代品，这个替代品就是国家水准面。所谓国家水准面就是符合国家基本地理特征和需求的水准面，具有国家惟一性，国家水准面是一个国家统一的高程起算面 [比如珠穆朗玛峰高程（高出海平面）8844.43m，就是指珠穆朗玛峰顶到我国国家水准面的铅直距离是 8844.43m]。我国的国家水准面是青岛验潮站求出的黄海平均海水面。以青岛验潮站 1950~1956 年的潮汐资料推求的平均海水面作为我国的高程基准面（国家水准面）的系统称为“1956 黄海高程系统”。根据 1952~1979 年的验潮站资料确定的平均海水面作为我国新的高程基准面（国家水准面）的系统称为“1985 国家高程基准”（该基准 1987 年经国务院批准，于 1988 年 1 月正式启用）。我国国家水准面的基准体系是建立在青岛的水准原点网，该网由 1 个主点（国家水准原点）、6 个参考点和附点共同组成。“1956 黄海高程系统”的水准原点高程为 72.289m，“1985 国家高程基准”的水准原点高程为 72.260m。目前，“1956 黄海高程系统”已经废止。在利用高程数据时，一定要弄清其归属的“高程系统”，“高程系统”不同时，应根据“水准原点”高程差换算为同一个系统。

1.2.2 地球的数学形状

要讲清楚地球的数学形状，必须从参考椭球谈起，由于地球的自然形状像椭圆形的，因此，人们设想利用双轴椭球作为地球的数学形状，这种双轴椭球的大小与地球物理形状的大小必须尽可能地接近，这种双轴椭球被称为参考椭球，由于人们对地球的大小一直在探索中，因此，不少科学家在不同的历史时期给出过许多种大小不同的参考椭球，这些参考椭球都在不同的历史时期或场合被应用过。参考椭球的定义是椭圆绕短轴旋转 180°所形成的封闭球体（见图 1-2-1），球的表面称为参考椭球面，球的实体称为参考椭球体，到目前为止人们共推出过数十个参考椭球。参考椭球的大小和形状决定于其长半径 a 和短半径 b ，因此，参考椭球的长半径 a 、短半径 b 和扁率 α 就构成了参考椭球的最重要的几何要素。



$$\alpha = (a - b) / a \quad (1-2-1)$$

图 1-2-1 参考椭球

人们将与大地体吻合程度最高的参考椭球作为地球的数学形状,并称为总地球椭球,因此,总地球椭球具有惟一性。由于大地水准面是一个极端理想化的曲面,不可能准确建立,这就意味着总地球椭球也是不可能准确建立的,只能随着各方面条件的改善逐步趋近。精确的总地球椭球无法建立,只能建立一个接近于它的替代品,这个替代品就是国家椭球。所谓国家椭球就是符合国家基本地理特征和需求的参考椭球,具有国家惟一性,国家椭球是一个国家统一坐标系统的基础框架(即经纬度的衡量基准)。

我国在1980年以前采用的国家椭球是前苏联大地测量学家克拉索夫斯基推求的参考椭球(称为克拉索夫斯基椭球),利用克拉索夫斯基椭球建立的大地坐标系统称为“1954年北京坐标系”,该坐标系的大地原点在前苏联的普尔科沃,即我国的“1954年北京坐标系”是前苏联的普尔科沃坐标系在我国境内的延伸,因此,也就带来了一些问题,这些问题包括椭球参数有较大误差(长半轴约大109m)、参考椭球面与我国大地水准面存在着自西向东明显的系统性倾斜、几何大地测量和物理大地测量应用的参考面不统一、定向不明确。为了解决以上问题,1980年我国启用了新的国家大地坐标系统,称为“1980年国家大地坐标系”(也有人称之为“1980年西安坐标系”)。

“1980年国家大地坐标系”采用的国家椭球是IAG-1975椭球。IAG-1975椭球是1975年国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)第16届大会上由国际大地测量协会推荐的一个椭球,该椭球的地球引力常数 $GM=3.986005\times 10^{14}\text{m}^3/\text{s}^2$ 、地球重力场二阶带球谐系数 $J_2=1.08263\times 10^{-8}$ 、地球自转角速度 $\omega=7.292115\times 10^{-5}\text{rad/s}$ 、赤道的正常重力值 $\gamma_0=9.78032\text{m/s}^2$ 。“1980年国家大地坐标系”的特点是参心大地坐标系是在1954年北京坐标系建立基础上建立起来的、椭球面同似大地水准面在我国境内最为密合且是多点定位、定向明确、大地高程基准采用1956年黄海高程系。“1980年国家大地坐标系”的大地原点地处我国中部,位于陕西省西安市以北60km处的泾阳县永乐镇。

由于目前GPS测量在我国比较普及,因此有必要介绍一下GPS采用的参考椭球。GPS采用的参考椭球是WGS-84椭球,建立的坐标系属于地心地固坐标系。地心地固坐标系的建立涉及许多问题,分述如下。

(1) 极移与国际协议原点 地球自转轴相对地球体的位置并不是固定的。地极点的位置是随时间而变化的,这种现象称为地极移动,简称极移。国际天文联合会(IAU)和国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)在1967年于意大利共同召开的第32次讨论会上,建议采用国际上5个纬度服务(ILS)站以1900~1905年的平均纬度所确定的平极作为基准点,通常称为国际协议原点(CIO)。

(2) 协议地球坐标系 以协议地极CIP为指向点的地球坐标系称为协议地球坐标系(CTS)。

(3) 地心地固坐标系的建立方法 建立地心坐标系的方法可分为直接法和间接法两类。所谓直接法,就是通过一定的观测资料(如天文、重力资料、卫星观测资料等),直接求得的地心坐标的方法,如天文重力法和卫星大地测量动力法等。所谓间接法,就是通过一定的资料(其中包括地心系统和参心系统的资料),求得的地心坐标系和参心坐标系之间的转换参数,而后按其转换参数和参心坐标,间接求得地心坐标的方法,如应用全球天文大地水准面差距法以及利用卫星网与地面网重合点的两套坐标建立地心坐标转换参数等方法。

(4) WGS-84世界大地坐标系 该坐标系的原点是地球的质心,Z轴指向BIH1984.0定义的协议地球极CTP方向,X轴指向BIH1984.0零子午面和CTP赤道的交点,Y轴和Z、X轴构成右手坐标系。

(5) 国际地球自转服务(IERS) IERS于1988年由国际大地测量学与地球物理联合会

(IUGG) 和国际天文学联合会 (IAU) 共同建立。主要任务是维持国际天球参考系统 (ICRS) 和框架 (ICRF)、维持国际地球参考系统 (ITRS) 和框架 (ITRF), 为当前应用和长期研究提供及时准确的地球自转参数 (EOP)。

(6) 国际地球参考系统 (ITRS) ITRS 是一种协议地球参考系统, 它的定义是原点为地心 (并且是指包括海洋和大气在内的整个地球的质心); 长度单位为米 (并且是在广义相对论框架下的定义), Z 轴从地心指向 BIH1984.0 定义下的协议地球极 (CTP); X 轴从地心指向格林尼治平均子午面与 CTP 赤道的交点; Y 轴与 XOZ 平面垂直而构成右手坐标系。时间演变基准是使用满足无整体旋转 NNR 条件的板块运动模型来描述地球各块体随时间的变化。

与我国有关的几个参考椭球的主要几何要素见表 1-2-1。

表 1-2-1 与我国有关的几个参考椭球的主要几何要素

椭球名称	长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	计算年代和国家	备 注
克拉索夫斯基	6378245	6356863	1 : 298.3	1940 年前苏联	中国 1954 年北京坐标系采用
IAG-1975 椭球	6378140	6356755	1 : 298.257	1975 年国际第三个推荐值	中国 1980 年国家大地坐标系采用
WGS-84	6378137	6356752	1 : 298.257	1979 年国际第四个推荐值	美国 GPS 采用

参考椭球体是测量成果换算的依据。在要求精度不高的测量中, 为了计算方便, 常把地球近似当作圆球看待, 其平均半径 R 取 6371km。当测区范围较小时, 又常把球面视为平面看待。 R 的计算公式是

$$R = (a + a + b) / 3 \quad (1-2-2)$$

1.2.3 大地定位

国家大地坐标系的构建必须进行大地定位, 大地定位包括椭球定位和定向两项工作。

椭球定位是指确定椭球中心的位置。

椭球定向是指确定椭球旋转轴的方向, 不论是局部定位还是地心定位, 都应满足两个平行条件, 一是椭球短轴平行于地球自转轴; 二是大地起始子午面平行于天文起始子午面。

具有确定参数 (长半轴和扁率) 经过局部定位和定向, 同某一区域大地水准面最佳拟合的地球椭球, 叫做参考椭球。在确定椭球参数时, 能使它在全球范围内与大地体最密合的地球椭球, 叫做总地球椭球。

以参考椭球为基准建立的坐标系叫做参心坐标。以总地球椭球为基准的坐标系叫做地心坐标系, 它们与地球同步运动, 称为地固坐标系, 以地心为原点的地固坐标系则称为地心地固坐标系, 与地球自转无关的坐标系, 称为惯性坐标系或天球坐标系。

地球参心坐标系的建立借助参考椭球定位、定向方法实现。建立地球参心坐标系, 需进行如下几个方面的工作:

(1) 选择或确定椭球的几何参数 (长半径和

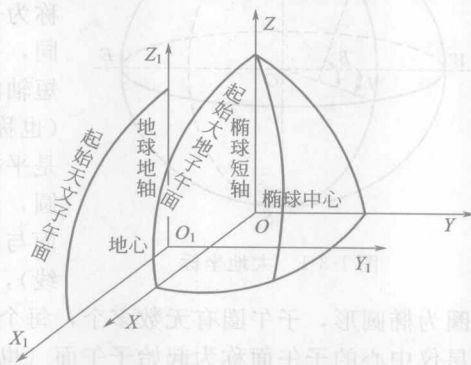


图 1-2-2 椭球定位和定向

扁率); 参和大同国书能星各书要主, 立室同共 (JAL) 会合期学文天测国 (GUG)

- (2) 确定椭球中心的位置 (椭球定位);
- (3) 确定椭球短轴的指向 (椭球定向);
- (4) 建立大地原点。

见图 1-2-2, 对于地球和参考椭球, 分别可建立空间直角坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 和 $OXYZ$, 两者间的相对关系可用三个平移参数 X_0 、 Y_0 、 Z_0 (椭球中心 O 相对于地心 O_1 的平移参数) 和三个旋转参数 ϵ_X 、 ϵ_Y 、 ϵ_Z 来表示。传统的做法是, 首先选定某一适宜的点 K 作为大地原点, 在该点上实施精密的天文大地测量和高程测量, 由此得到该点的天文经度 λ_K 、天文纬度 φ_K 、正高 $H_{正K}$ 以及至某一相邻点的天文方位角 α_K 。再通过令式 (1-2-3) 成立而实现。

$$\begin{cases} L_K = \lambda_K - \eta_K \sec \varphi_K - (\epsilon_Y \sin \lambda_K + \epsilon_X \cos \lambda_K) \tan \varphi_K + \epsilon_Z \\ B_K = \varphi_K - \zeta_K - (\epsilon_Y \cos \lambda_K - \epsilon_X \sin \lambda_K) \tan \varphi_K \\ A_K = \alpha_K - \eta_K \tan \varphi_K - (\epsilon_Y \sin \lambda_K + \epsilon_X \cos \lambda_K) \sec \varphi_K \\ H_K = H_{正K} + N_K + (\epsilon_Y \cos \lambda_K - \epsilon_X \sin \lambda_K) N_K e^2 \sin \varphi_K \cos \varphi_K \end{cases} \quad (1-2-3)$$

1.3 地面上点位的表示方法

地面上的点都是处于三维空间的, 因此, 要表达地面上一点的位置必须采用三维形式, 常用的地面点位表达方式主要有五种, 它们分别是:

- (1) 大地坐标+高程;
- (2) 天文坐标+高程;
- (3) 高斯平面直角坐标+高程;
- (4) 独立平面直角坐标+高程;
- (5) 三维地心坐标。

1.3.1 大地坐标

大地坐标是以参考椭球和法线为依据构建起来的。见图 1-3-1。

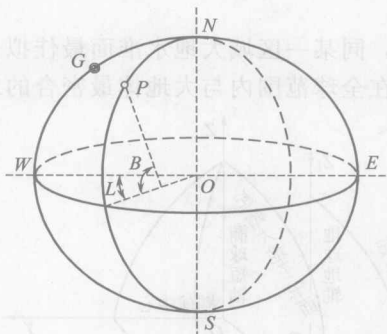


图 1-3-1 大地坐标

在图 1-3-1 所示的参考椭球上, 参考椭球的短轴 (NS) 平行于地球的自转轴, 短轴的中点 (O) 称为球心。垂直于短轴的平面称为平行面, 面与椭球的交线称为平行圈 (也称纬圈、纬线), 平行圈上各点纬度相同, 平行圈为圆形, 平行圈有无数多个。过球心垂直于短轴的平面称为赤道面, 面与椭球的交线称为赤道圈 (也称赤道、赤道线), 赤道圈上各点纬度为 0° , 赤道圈是平行圈中的一个, 也为圆形, 是参考椭球上最大的圆, 赤道圈只有 1 个。过短轴的平面称为子午面, 子午面与椭球的交线称为子午圈 (也称经圈、经线、子午线), 以短轴为界线的半个子午圈上各点经度相同, 子午圈为椭圆形, 子午圈有无数多个, 每个子午圈的大小均相等。过英国伦敦原格林尼治天文台星仪中心的子午面称为起始子午面 (也称本初子午面), 该面与椭球的交线称为起始子午线 (也称本初子午线), 以短轴为界线星仪中心所在的半个子午圈上各点经度均为 0° , 另半

个午子午圈上各点经度均为 180° ，本初子午线是子午圈中的一个，也为椭圆形，本初子午线只有 1 个。

参考椭球上一点 P 的大地坐标用大地经度 (L) 和大地纬度 (B) 表示。过 P 点的子午面称 P 子午面，该面与起始子午面间的二面角 L 称为 P 点的大地经度，大地经度的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，分东经和西经，从 0° 经线向东称东经、向西称西经。过 P 作参考椭球的法线（该线一定位于 P 子午面内但不通过球心，因为参考椭球是椭球而不是圆球），该线与赤道面的夹角 B 称为 P 点的大地纬度，大地纬度的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，分南纬和北纬，从赤道面向北称北纬、向南称南纬。

1.3.2 天文坐标

天文坐标是以大地体和垂线（铅垂线）为依据构建起来的。见图 1-3-2。

在图 1-3-2 所示的大地体上，大地体的短轴 ($N'S'$) 为地球的平自转轴， O' 为大地体的重心。垂直于短轴的平面称为天文平行面，天文平行面与大地体的交线称为天文平行圈（也称天文纬圈、天文纬线），天文平行圈上各点纬度相同，天文平行圈有无数多个。过重心垂直于短轴的平面称为天文赤道面，面与大地体的交线称为天文赤道圈（也称天文赤道、天文赤道线），天文赤道圈上各点纬度为 0° ，天文赤道圈只有 1 个。过短轴的平面称为天文子午面，面与大地体的交线称为天文子午圈（也称天文经圈、天文经线、天文子午线），以短轴为界线的半个天文子午圈上各点经度相同，天文子午圈有无数多个。过英国伦敦原格林尼治天文台星仪中心的天文子午面称为起始天文子午面（也称本初天文子午面），该面与大地体的交线称为起始天文子午线（也称本初天文子午线），以短轴为界线星仪中心所在的半个子午圈上各点经度均为 0° ，另半个子午圈上各点经度均为 180° ，本初天文子午线只有 1 个。

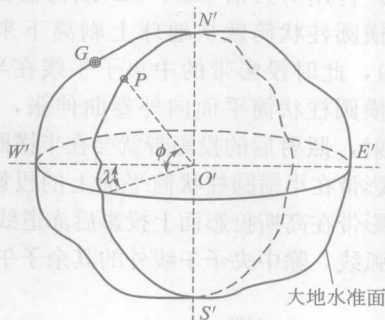


图 1-3-2 天文坐标

大地体上一点 P 的天文坐标用天文经度 (λ) 和天文纬度 (ϕ) 表示。过 P 点的天文子午面称 P 天文子午面，该面与起始天文子午面间的二面角 λ 称为 P 点的天文经度，天文经度的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，分东经和西经，从 0° 经线向东称东经、向西称西经。过 P 作大地体的垂线（该线一定位于 P 天文子午面内并通过重心 O' ），该线与天文赤道面的夹角 ϕ 称为 P 点的天文纬度，天文纬度的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，分南纬和北纬，从天文赤道面向北称北纬、向南称南纬。

1.3.3 高斯平面直角坐标

高斯平面直角坐标是以高斯-克吕格投影为基础建立的平面直角坐标系，高斯-克吕格投影是将椭球面变成平面的一种地图投影方式，属于数学函数投影（正形投影）而不是几何投影，高斯-克吕格投影反映的是球面上一点与高斯平面上一点的对应函数关系。高斯-克吕格投影萌芽于墨卡托投影（1569 年），是由兰波特 1772 年首先提出，50 年后高斯又对其进行了进一步的系统性分析研究，构建起了理论框架体系，但由于时代的限制，高斯没能给出适合计算的投影转换公式，直到 1912 年由德国科学家克吕格研究给出了适合计算的投影转换公式，从而完成了这一系统性科学理论体系的搭建工作，使这一投影方式成为应用最广的一种正形地图投影。

1.3.3.1 高斯-克吕格投影的形象描述

因高斯-克吕格投影属于数学函数投影,用几何法描述是不准确的,故本书将几何法描述称为形象描述。

见图 1-3-3。设想用一直径与地球直径相同的横圆柱状筒套在地球(假设为空心的)外面,使圆柱状筒的轴心通过地球的中心 O ,使地球某一条子午线(称为中央子午线,见图 1-3-3 中为东经 120° 经线)与圆柱状筒相切,在中央子午线处涂布黏合剂将地球与横圆柱状筒固连在一起。然后,从中央子午线向左、向右各找到一根与中央子午线经度差 Q (图 1-3-3 中为 3°) 的子午线(东经 117° 经线和东经 123° 经线),分别称之为左边子午线(东经 117° 经线)和右边子午线(东经 123° 经线)。用刀锯分别沿左边子午线和右边子午线进行切割,这样,左边子午线和右边子午线之间的球表面部分就从地球上切了下来,切下来的这一部分就称为一个投影带,左边子午线和右边子午线之间的经度差($2Q$)就称为投影带带宽。再用剪刀沿 AB 、 CD 线将横圆柱状筒剪开,这样,一个粘有地球投影带(一个带)的半横圆柱状筒就从地球上剥离下来了(见图 1-3-4),将该半横圆柱状筒抻开拉平(变成平面),此时投影带的中央子午线在半横圆柱状筒平面内变成直线,投影带的其余部分则离开半横圆柱状筒平面向外卷曲伸张,假想有与半横圆柱状筒平面垂直的平行光线对投影带进行照射,照射后的投影带就会在半横圆柱状筒平面上产生一个阴影(见图 1-3-5),这个阴影就是该投影带在半横圆柱状筒平面上的投影(即高斯投影),这个半横圆柱状筒平面就是高斯投影面。投影带在高斯投影面上投影后赤道线也变成了直线,其余纬线则以赤道线为界线成为凹向南北极的弧线,除中央子午线外的其余子午线也以中央子午线为界成为凹向中央子午线的弧线。

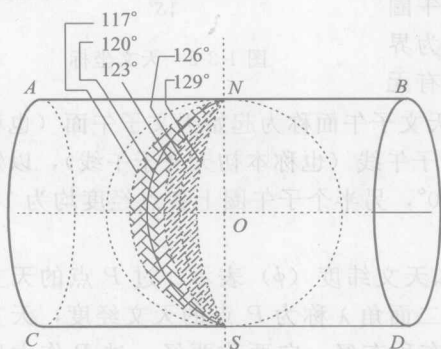


图 1-3-3 高斯投影圆筒与圆球嵌套

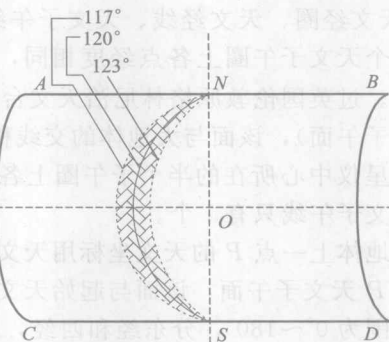


图 1-3-4 高斯投影的投影带从圆球上剥离

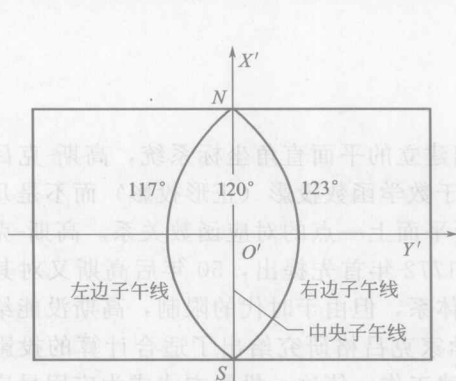


图 1-3-5 高斯投影半圆筒的展平

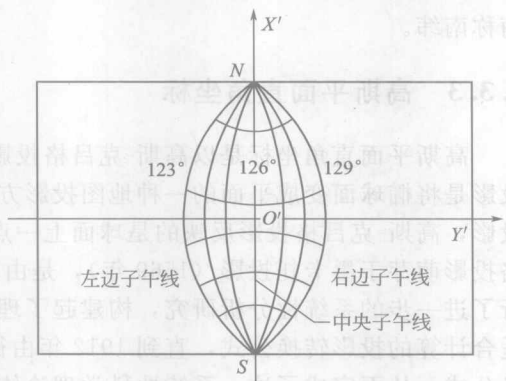


图 1-3-6 高斯投影邻带半圆筒的展平

当投影带带宽为 6° 时, 整个地球可切割 60 个投影带; 当投影带带宽为 3° 时, 整个地球可切割 120 个投影带; 依次类推。常用的投影带带宽有 9° 、 6° 、 3° 、 1.5° , 分别称为 9° 带投影、 6° 带投影、 3° 带投影、 1.5° 带投影 (也叫任意带投影或工程投影)。

投影带的切割顺序是由国际统一规定的,对 6° 带投影,第一个投影带的中央子午线经度为西经 177° ,即从 180° 经线开始由西向东切(先切西经部分到 0° 经线,再切东经部分),投影带的编号依次为第1带、第2带、第3带、……。 3° 带投影第一个投影带的中央子午线经度也为西经 177° 。 1.5° 带投影每个投影带的中央子午线经度可任意假设。 9° 带投影只用于中、小比例尺地图编制,不用于外业测量数据处理。国家层面上的投影一般只有 6° 带投影和 3° 带投影。

每个投影带投影后均可建立一个高斯平面直角坐标系（也就是说有几个投影带就有几个高斯平面直角坐标系），高斯平面直角坐标系的建立方法是以投影后的中央子午线为 X' 轴、向北为正方向；以投影后的赤道线为 Y' 轴、向东为正方向； X' 轴与 Y' 轴的交点 O' 为坐标原点，这样建立的高斯平面直角坐标系称为理论高斯平面直角坐标系。见图 1-3-5、图 1-3-6。

实用高斯平面直角坐标系就是通常所说的高斯平面直角坐标系。由于大多数国家要么在北半球、要么在南半球，因此在理论高斯平面直角坐标系中，这些国家的 X' 坐标要么全为正、要么全为负。许多国家的版图均很大，要跨越多个高斯投影带，这样这些大国的 Y' 坐标将会正、负交错。为了便于测量坐标计算和数据处理，国际上统一将理论高斯平面直角坐标系的 X' 轴移到左边子午线以左（即西移 500km。因为即使对于 9° 带投影来讲，其左边子午线到中央子午线的投影距离也不会超过 500km），这样建立的新平面直角坐标系就称为实用高斯平面直角坐标系（ XOY 坐标系），见图 1-3-7。

Figure 1-3-7 shows two coordinate systems side-by-side. The left system, labeled '理论高斯平面直角坐标系' (Theoretical Gauss Plane Coordinate System), has a vertical axis X' and a horizontal axis Y' with origin O' . A central vertical line represents the central meridian. The right system, labeled '实用高斯平面直角坐标系' (Practical Gauss Plane Coordinate System), has a vertical axis X and a horizontal axis Y with origin O . The origin O is shifted 500km to the left of the central meridian, as indicated by a double-headed arrow labeled '500km'. A red arc connects the top point N and bottom point S of the central meridian in the left system to their corresponding positions in the right system.

图 1-3-7 实用高斯平面直角坐标系

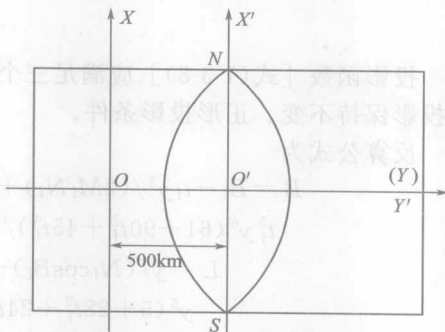


图 1-3-7 实用高斯平面直角坐标系

见图 1-3-7。从以上论述不难看出, 理论高斯平面直角坐标系 ($X'O'Y'$ 坐标系) 与实用高斯平面直角坐标系 (XOY 坐标系) 的关系为

$$Y = (\text{投影带带号}) \text{接} (Y' + 500\text{km}) \quad \text{计算率由的圖面呢式} \quad (1-3-2)$$

高斯-克吕格投影基本公式反映的是大地坐标与理论高斯平面直角坐标之间的转换关系。