

普通高等教育“十三五”规划教材

高等测量学

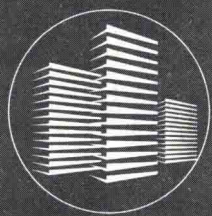
第二版

GAODENG
CELIANGXUE

姜晨光 主编



化学工业出版社



普通高等教育“十三五”规划教材

高等测量学

第二版

GAODENG
CELIANGXUE

姜晨光 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书比较系统、全面地阐述了测绘科学的基本理论、方法和技术,内容涵盖了测绘科学的理论体系、测量误差基础、水准仪使用、距离测量、经纬仪使用、电子全站仪使用、控制测量基础、GPS技术、地形图测绘及应用、测量放样、土木建筑测量、铁路测量、管道测量、桥梁测量、地质测量、地球灾害监测、钻采工程测量等基本教学内容和教学环节。在测绘基础理论的阐述上贯彻了“简明扼要、深浅适中”的写作原则,以实用化为目的强化了对实践环节的详细介绍,并全面介绍了目前国际最新的、最流行的、最成熟的、最具普及性的知识、理论和技术。

本书适用的专业主要包括本科土建类、水利类、地矿类、交通运输类、地理科学类、环境科学类、测绘类、环境与安全类、农林类、农业工程类的各个相关专业;本书不仅适用于普通全日制高等教育,也适用于高职高专、网络高等教育、电视大学、夜大学、高等教育自学考试、职业技能培训、企业在岗培训,还可作为国家执业资格考试用书使用,同时也是各类工程建设行业专业技术人员案头必备的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

高等测量学/姜晨光主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2016.2
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-24339-3

I. ①高… II. ①姜… 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(2015)第129937号

责任编辑:满悦芝
责任校对:宋 玮

文字编辑:刘丽菲
装帧设计:尹琳琳

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:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数425千字 2016年3月北京第2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

《高等测量学》(第二版) 编写人员

主 编: 姜晨光

副 主 编: 方绪华 王尤选 黄奇壁 原嘉祥 张丽萍
李宝林 (排名不分先后)

编写人员: 姜晨光 方绪华 王尤选 黄奇壁 原嘉祥
张丽萍 李宝林 彭桂翰 刘淑荣 范 千
庞 平 刘洪春 姜 勇 张大林 姜忠平
张祖兴 潘吉仁 周 虹 任利军 孙毛南
陈普芳 缪文良 季文达 尤干兴 王焰文
潘月明 张 翼 汪 凯 蔡 峰 沈建耘
王国平 吴 平 赵伯侃 郁凯凯 陶林法
许庆增 王风芹 (排名不分先后)

前 言

党的十八大和十八届三中全会、十八届四中全会对生态文明建设做出了顶层设计和总体部署。党的十八大以来,各地区各部门统一思想、扎实工作、积极推进,在生态文明建设上不断取得新的重大进展。党的十八大和十八届三中全会、十八届四中全会要求各级、各部门按照党中央的决策部署,把生态文明建设融入经济、政治、文化、社会建设各方面和全过程,应协同推进新型工业化、城镇化、信息化、农业现代化和绿色化,应牢固树立“绿水青山就是金山银山”的理念,应坚持把“节约优先、保护优先、自然恢复”作为基本方针,应把绿色发展、循环发展、低碳发展作为基本途径,应把深化改革和创新驱动作为基本动力,应把培育生态文化作为重要支撑,应把重点突破和整体推进作为工作方式,应切实把生态文明建设工作抓紧抓好,应全面推动国土空间开发格局优化、加快技术创新和结构调整、促进资源节约循环高效利用、加大自然生态系统和环境保护力度。良好的生态环境是实现“中国梦”的物质基础,良好生态环境的构建需要现代测绘科学的支持,测绘科学必须适应经济发展新常态、积极抢抓新机遇,普及测绘科学知识、加强测绘教材建设、提高测绘科学教育质量和教育水平。测绘教材建设必须与时俱进、实时更新,因此,教材修订意义重大。沐浴着十八大和十八届三中全会、十八届四中全会的春风,笔者闲暇之余重新审视了几年之前的作品《高等测量学》萌生了修编之念。承蒙大家抬爱,《高等测量学》面世4年重印了多次,但内心仍然非常惶恐,浏览着一封封读者、朋友和业内同仁热情洋溢的邮件颇感压力和责任,为此,决定修编第二版以谢大家。第二版的修编吸收了许多富有教学经验、生产经验且责任心强的优秀教师及业内技术骨干参加并组成了新的编写班子,编写班子本着对读者负责、对我国高等教育教学质量负责的态度通力合作,较为圆满地完成了修编工作。

第二版的修编工作非常全面,以国家现行的各种规范、标准为依据大量删减和淘汰了与时代发展不合拍的知识、理论和技术,全面介绍了目前国际最新的、最流行的、最成熟的、最具普及性的知识、理论和技术(比如最新的电子全站仪和GNSS接收机)。以服务经济建设主战场为着眼点增加了专业工程测量的内容(比如铁路测量、管道测量、桥梁测量、地质测量、地球灾害监测、钻采工程测量等)。因篇幅所限,本教材不可能对所有的知识点面面俱到,疏漏之处在所难免,需要讲授本教材中未出现的知识点的高校可根据实际需要自己编印补充讲义(也可反馈给出版社,以便在再版时增补)。

全书由江南大学姜晨光主笔完成,福州大学彭桂翰、刘淑荣、范千、方绪华;烟台市规划信息中心庞平、刘洪春、李宝林;烟台市住房和城乡建设局原嘉祥;烟台保利置业有限公司张丽萍;烟台大学王尤选;江南大学黄奇壁、姜勇、张大林、张祖兴、潘吉仁、姜忠平、周虹、任利军、孙毛南、陈普芳、缪文良、季文达、尤千兴、王焰文、潘月明、张翼、汪凯、蔡峰、沈建耘、王国平、吴平、赵伯侃、郁凯凯、陶林法、许庆增、王风芹等同志(排名不分先后)参与了相关章节的撰写工作。

限于水平、学识和时间关系,书中内容仍难免粗陋,谬误与欠妥之处敬请读者继续提出批评及宝贵意见。

姜晨光

2015年12月于江南大学

第1版前言

“测量学”是“测绘科学”的简称。测绘科学的起源可以追溯到原始社会早期，是人类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，其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。

测绘科学是各类工程活动的“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，水利水电建设离不开测绘科学，各种交通建设离不开测绘科学，国土资源调查和土地利用与土壤改良离不开测绘科学，建设现代化农业也离不开测绘科学。总之，任何工程建设活动都离不开测绘科学工作，测绘科学是各种工程建设不可或缺的重要技术保障。正因为测绘科学的上述重要作用，因此，世界各国的高等教育都将测绘科学作为高等教育的重要基础课程，据不完全统计，目前我国高等院校开设测绘类课程的专业有数十个（包括本科和高职高专）。测绘科学地位重要、内容浩繁，涉及多学科的知识，如何充分发挥测绘科学在人类进步事业中的作用，是一个值得人们永久认真思考的问题，只有不断地总结与积累经验、不断地推陈出新和与时俱进，才能使测绘科学得到健康发展。基于以上考虑，笔者不揣浅陋编写了本书。

本书是编者30余年测绘科学研究及相关实践活动的初步总结，也是作者在江南大学从事教学、科研和社会实践活动的经验积累与部分心得。本书的撰写以理论与实践紧密结合为基本原则和出发点，对传统的测量理论、技术、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知识的普及、发展和进步，能有助于测绘高等教育质量的提高与进步，对我国的社会主义建设事业和高等教育事业有所帮助、有所贡献。

全书由江南大学姜晨光任主编，烟台大学王尤选；福州大学方绪华、范千；莱阳市规划建设管理局王世周、王秀峰、孙天龙、叶根深、马炜煜、吕振勇、迟万东、张晓勤、钟培良、薛涛涛、尉胜林、卞仁修；山东盛隆集团有限公司宋志波、严立明、任忠慧、于平波、张华强、张辉；中国建设银行股份有限公司文登市支行李传阳；中共莱阳市委郭立众、于京良；青岛鑫江集团有限公司姜文波；无锡市新区房产管理局孙爱民；无锡市惠山区建设局王复元；莱阳市国土资源局姜祖彬、刘华、姜春妍、梁延兴、徐永成、姜霞、李光、李金洲、刘桂芳、陈明、于吉波；山东省莱阳市新华书店孙智诚、张海顺、李海波；江南大学姜勇、张大林、张祖兴、潘吉仁、姜忠平等同志（排名不分先后）参与了部分章节的撰写工作。初稿完成后，苏文磬、徐至善、李锦铭、王浩闻、黄建文五位教授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的贡献，谨此致谢！

限于编者水平、学识和时间关系，书中浅陋之处难免，敬请读者多多提出批评与宝贵意见。

编者

2011年1月于江南大学

目 录

第1章 测绘科学概论	1	3.1 水准仪的测量原理	26
1.1 测绘科学的历史与发展	1	3.2 水准测量仪器与工具	27
1.1.1 测绘科学的定义、学科属性与主要 分支学科	1	3.2.1 微倾式水准仪的构造	27
1.1.2 测绘科学的作用	3	3.2.2 水准尺	29
1.1.3 测绘科学的过去、现在与未来	3	3.2.3 尺垫	30
1.2 地球外表形态的描述方法	5	3.2.4 三脚架	31
1.2.1 地球的物理形状	5	3.3 水准测量的常规作业过程	31
1.2.2 地球的数学形状	6	3.4 普通微倾式水准仪的使用	32
1.3 地球上点位的表示方法	7	3.4.1 安放三脚架	33
1.3.1 大地坐标	8	3.4.2 连接水准仪	33
1.3.2 天文坐标	8	3.4.3 粗平	33
1.3.3 高斯平面直角坐标	9	3.4.4 后尺测量	33
1.3.4 独立平面直角坐标	12	3.4.5 前尺测量	35
1.3.5 三维地心坐标	12	3.5 水准测量内业计算	36
1.3.6 高程	12	3.5.1 水准路线的形式	36
1.3.7 高差	13	3.5.2 水准测量内业计算	37
1.4 测量的基本工作与原则	13	3.5.3 算例	40
1.4.1 水平面与水准面	13	3.6 自动安平水准仪	40
1.4.2 普通测量的工作程序与原则	15	3.7 精密水准仪	41
1.4.3 高等测量学课程的基本任务	16	3.8 电子水准仪	43
思考题与习题	16	3.8.1 电子水准仪的主要特征及原理	43
第2章 测量误差	18	3.8.2 电子水准仪的使用方法与注意 事项	45
2.1 测量误差及特点	18	3.9 激光水准仪	46
2.1.1 观测值与真值	18	3.10 激光扫平仪	46
2.1.2 观测条件	18	3.10.1 激光扫平仪的工作原理	47
2.1.3 观测误差的来源	19	3.10.2 典型的激光扫平仪	47
2.1.4 观测误差的分类	19	3.10.3 激光扫平仪应用示例	47
2.1.5 偶然误差的性质	20	3.11 水准仪的检验和校正	49
2.2 测量精度	21	3.11.1 微倾式水准仪的检验和校正	49
2.2.1 中误差	21	3.11.2 自动安平水准仪的检验和校正	52
2.2.2 相对误差	21	3.12 水准仪测量注意事项	53
2.2.3 允许误差	22	思考题与习题	55
2.3 测量误差的影响规律	22	第4章 距离测量	56
2.4 等精度观测数据处理	23	4.1 钢尺检定与钢尺量距	56
2.5 不等精度观测数据处理	24	4.1.1 钢尺量距设备与工具	56
思考题与习题	25	4.1.2 钢尺的长度检定	56
第3章 水准仪的作用与使用方法	26	4.1.3 钢尺量距的主要工序	57

4.1.4	钢尺丈量的误差分析	60	5.6.1	电子全站仪的构造	88
4.2	电磁波测距	61	5.6.2	电子全站仪的基本使用方法	88
4.2.1	光电测距仪的测距原理	61	5.6.3	电子全站仪的常规检校	92
4.2.2	光电测距仪测距成果的数据 处理	62	5.6.4	电子全站仪的大气改正与软件的 安装	94
4.2.3	光电测距仪的标称精度	63	5.6.5	电子全站仪使用注意事项	95
4.2.4	光电测距气象改正的精密方法	63	思考题与习题	96	
4.2.5	光电测距仪测距值的归算	64	第 6 章 控制测量与 GPS 技术	97	
4.2.6	手持式激光测距仪	64	6.1	控制测量概述	97
4.3	视距测量	65	6.2	国家控制网	97
思考题与习题	66	6.3	工程控制网	99	
第 5 章 经纬仪及电子全站仪的作用与 使用	67	6.4	GPS 测量技术	100	
5.1	经纬仪分类、构造与测角原理	67	6.4.1	卫星测地技术 (GNSS) 概况	100
5.1.1	经纬仪水平角测量原理	67	6.4.2	GPS 技术的特点	101
5.1.2	经纬仪竖直角测量原理	68	6.4.3	GPS 的坐标系基准和坐标系统	104
5.1.3	经纬仪概貌	69	6.4.4	GPS 静态定位方法	106
5.1.4	经纬仪的组成及读数方法	69	6.4.5	GPS 测量技术设计的基本要求	107
5.2	经纬仪及电子全站仪的安置方法	73	6.4.6	GPS 测量布网方法	108
5.2.1	经纬仪安置的基本要求	73	6.4.7	GPS 基线解算原理	111
5.2.2	垂球对中经纬仪的安置方法	74	6.4.8	GPS 基线解算类型与质量控制	112
5.2.3	光学对中经纬仪的安置方法	75	6.4.9	GPS 基线解算应关注的问题	113
5.3	经纬仪角度测量	76	6.4.10	GPS 基线解算的过程	115
5.3.1	测回法测量水平角	76	6.4.11	GPS 基线向量网平差的特点	116
5.3.2	全圆方向观测法 (全圆法) 测量 水平角	78	6.4.12	GPS 网平差的过程及注意 事项	117
5.3.3	水平角观测注意事项	79	6.4.13	GPS 高程的处理方法	118
5.3.4	竖直角测量的目的	80	6.4.14	GPS 测量技术总结的撰写 要求	120
5.3.5	三角高程测量原理	80	6.4.15	GPS 测量软件的特点	121
5.3.6	竖直角的观测方法	82	6.4.16	GPS 测量中的常用术语及其 含义	122
5.3.7	竖直角观测数据的处理	82	6.5	导线测量	124
5.3.8	经纬仪竖盘指标自动补偿装置的 特点	83	6.5.1	导线测量外业	125
5.4	直线定向	83	6.5.2	导线测量内业	126
5.4.1	定向基准方向线	83	6.5.3	算例 (附和导线)	129
5.4.2	三个定向基准方向线间的关系	84	6.6	交会测量	131
5.4.3	直线方向的表示方法	84	6.7	高等水准测量	133
5.4.4	方位角测量方法	86	6.7.1	三、四等水准测量实施要点	133
5.5	测量平面直角坐标计算的基本法则	86	6.7.2	三、四等水准测量的观测方法	134
5.5.1	坐标正算	86	6.8	跨河水准测量	136
5.5.2	坐标反算	87	6.8.1	GPS 高精度跨河水准测量的 基本要求	136
5.5.3	坐标方位角的连续推算	87	6.8.2	GPS 高精度跨河水准测量的	
5.6	电子全站仪的构造与测量原理	88			

基本原理及作业过程	138	10.2.2 铁路新线定测	193
思考题与习题	139	10.2.3 铁路圆曲线放样	195
第7章 地形图测绘及应用	141	10.2.4 铁路缓和曲线的特性与放样	196
7.1 地图概论	141	10.2.5 铁路线路施工测量	197
7.2 地形图的基本架构	142	10.2.6 铁路既有线测量	199
7.2.1 地形图的比例尺	144	10.2.7 铁路既有站场测量	202
7.2.2 地形图的分幅与编号	144	10.2.8 铁路线路的归一化放样	204
7.2.3 地物的表示方法	146	10.2.9 高速铁路精准测量	204
7.2.4 地貌的表示方法	146	思考题与习题	208
7.3 地形图的测绘方法	149	第11章 管道工程测量	209
7.3.1 测图前的准备工作	149	11.1 管道工程的特点	209
7.3.2 控制测量	150	11.2 管道工程测量的基本工作	210
7.3.3 碎部点的选择方法	151	11.2.1 管道工程中线测量与纵横断面 测量	210
7.3.4 碎部测量	151	11.2.2 管道工程施工测量	211
7.3.5 地形图绘制	155	思考题与习题	214
7.4 地形图的阅读与应用	157	第12章 桥梁工程测量	215
7.5 地理信息系统	160	12.1 桥梁工程的特点	215
思考题与习题	161	12.2 桥梁工程测量的基本工作	215
第8章 测量放样	162	12.2.1 桥梁施工测量的基本任务与 要求	215
8.1 点位放样	162	12.2.2 桥梁施工控制测量	216
8.2 高程放样	165	12.2.3 桥梁墩、台中心放样	217
8.3 坡度放样	166	12.2.4 墩台纵、横轴线放样	219
8.4 曲线放样	167	12.2.5 桥梁施工测量与竣工测量	219
思考题与习题	167	12.2.6 中、小桥梁施工控制测量	221
第9章 土木建筑工程测量	168	思考题与习题	222
9.1 土木建筑工程的特点	168	第13章 地质工程测量	223
9.2 土木建筑工程测量的基本工作	169	13.1 地质工程的特点	223
9.2.1 建筑施工测量的准备工作	169	13.2 地质工程测量的基本工作	223
9.2.2 土木建筑施工平面控制测量	170	13.2.1 地质测绘的野外实测工作	224
9.2.3 土木建筑施工的高程控制测量	172	13.2.2 地质工程测量的基本要求	225
9.2.4 建筑定位放线与基础施工测量	173	13.2.3 勘探坑道测量	226
9.2.5 结构施工测量	174	13.2.4 竖井投点及连接测量	227
9.2.6 工业建筑施工测量	176	13.2.5 定位测量与地质填图	229
9.2.7 建筑装饰施工及设备安装测量	177	13.2.6 矿区勘界测量	230
9.2.8 特殊工程施工测量	179	13.2.7 地质测量成果的整理与编写	231
9.2.9 建筑小区市政工程施工测量	181	思考题与习题	231
9.2.10 变形测量	183	第14章 地球灾害监测	232
9.2.11 竣工测量及竣工图的编绘	187	14.1 地球灾害的特点	232
思考题与习题	189	14.2 测量在地球灾害监测中的作用及 基本工作	233
第10章 铁路工程测量	190	14.2.1 滑坡、崩塌监测	233
10.1 铁路工程的特点	190		
10.2 铁路工程测量的基本工作	191		
10.2.1 铁路新线初测	191		

14.2.2 地面沉降监测	237	15.2.2 井位测量的基本要求	246
14.2.3 地震监测	242	15.2.3 预定井位测量	247
思考题与习题	243	15.2.4 完钻井位置测量	248
第 15 章 钻采工程测量	244	15.2.5 海上采油平台定位与测量	248
15.1 钻采工程的特点	244	思考题与习题	252
15.2 钻采工程测量的基本工作	245	参考文献	253
15.2.1 钻采工程测量的基本要求	245		

第 1 章 测绘科学概论

1.1 测绘科学的历史与发展

“测绘科学”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，为顺应人们的习惯，本书中也将“测绘科学”简称为“测量”。

1.1.1 测绘科学的定义、学科属性与主要分支学科

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。测绘科学的研究对象是地球或其他天体的固体表面，因此属于地球科学（简称地学）的研究范畴。地球或其他天体固体表面以下的部分（内部）是地质科学的研究范畴，地球或其他天体固体表面与液体表面之间的区域是水科学的研究范畴，环绕地球或其他天体的气体空间是大气科学的研究范畴，地球与其他天体之间的关系问题是天文科学的研究范畴，从巨（宏）观领域对地球、天体各种问题进行综合集成化分析与研究是地理科学的工作范畴，因此，测绘科学与地质科学、地理科学、水科学、大气科学、天文科学共同组成了地学大家族，是地学领域的 6 朵金花之一。大家知道，地质科学、地理科学、水科学、大气科学、天文科学每个学科自身都是多学科集成的综合性大学科，各自都有自己的分支学科（即所谓的 2 级学科）和独特的科学体系，作为地学领域的 6 朵金花之一的测绘科学本身也是一个多学科集成的综合性大学科，并有着自己的分支学科和独特科学体系。测绘科学的主要分支学科有地形测量、大地测量、测绘遥感（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。与该领域有关的国际性科学组织是国际测绘联合会（International Union of Surveying and Mapping, IUSM）。

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和重力场特征的科学，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，大地测量学与数学、化学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。大地测量学可为空间科学、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。与该领域有关的国际性科学组织是国际大地测量学协会（International Association of Geodesy, IAG），IAG 是国际大地测量学与地球物理学联合会（Inter-

national Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) 的创始者和主要成员之一,也是世界上成立最早的国际性学术团体之一。

测绘遥感(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科学。其基本任务是通过摄影像片或遥感图像的处理,量测与解译测定物体的形状、大小和位置,进而制作成图。按遥感器搭载工具的不同,测绘遥感可分为航空测绘遥感、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2个主要工作内容。与该领域有关的国际性科学组织是国际摄影测量与遥感学会(International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS)。

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。与该领域有关的国际性科学组织是国际地图学协会(International Cartographic Association, ICA)。

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)。与该领域有关的国际性科学组织是国际测量师联合会[Federation Internationale des Geometres(法语), FIG]。

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。与该领域有关的国际性科学组织是国际海道测量组织(International Hydrography Organization, IHO)。

地籍测绘学是研究地籍管理中地籍图测量与绘制理论和技术的科学,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,需要多学科的密切协同。

另外,还有房产测绘学,是研究房产管理中房产面积界定以及房产图测量与绘制理论和技术的科学,也是一种具有法律效力的公共服务活动。

国内广大测绘科学工作者的群众性联合学术团体是中国测绘学会(Chinese Society of Surveying and Mapping, CSSM)。

1.1.2 测绘科学的作用

测绘科学是人类各种活动及各类工程建设的“眼睛”和“指南针”。出门旅行需要测绘科学(要看地图、用指南针、用GPS)。城乡规划和发展也离不开测绘科学,我国城乡面貌正在发生日新月异的变化,城市和村镇的建设与发展迫切需要加强规划与指导,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。资源勘察与开发离不开测绘科学,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。交通建设离不开测绘科学,铁路公路的建设从选线、勘测设计到施工建设都离不开测绘科学。水利建设离不开测绘科学,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。国土资源调查、土地利用和土壤改良离不开测绘科学,建设现代化的农业,首先要进行土地资源调查,而且还要充分认识各地区的具体条件,进而制订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。就与老百姓息息相关的土木建筑工程来讲,地面的水平性靠测绘技术保障、墙体的垂直度靠测绘技术保障、排水系统的坡度靠测绘技术保障、各种曲线的形状靠测绘技术保障,总之,人类的任何活动和任何工程建设都离不开测绘科学,测绘科学是人类活动和各种工程建设不可或缺的重要技术保障。

1.1.3 测绘科学的过去、现在与未来

测绘科学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,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。

“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,“逐水而居”面临的最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放样的工具和方法。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,山行乘撵,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(准是可操平的水准器;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世纪我们的祖先已经能够使用简单的测量工具进行了测量工作了。

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以前就诞生了地图(见《汉书·郊毅

志》、《左传》、《山海经图》等典籍)。后来,为了记事的需要,世界各个古老民族都先后发明了自己的文字(大多是象形文字),这样人类就有了记载历史的手段,人类也就结束了“薪火相传”、“口授历史”的史前时代,进入了新的文明阶段(文字时代)直到今天。文字创造出来后,将字写在哪儿才能长久保存呢?于是,中华民族有了龟甲记事(甲骨文)、古希腊民族有了“羊皮书”……后来,中华民族又发明了“竹简”,再后来,中华民族又发明了“纸”,于是,地图就可以画在纸上了(世界现存的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)。

战争这种最残酷、最血腥的手段总像瘟疫一样与人类社会的发展如影随形,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”,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(比如中国的“磁勺”、外国的“指南针”)。公元前7世纪到公元前3世纪的春秋战国时期,中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》)。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。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,他们是张衡、郭守敬、张遂(僧一行)、南宫说、刘徽、沈括、裴秀、甘德、石申等。祖冲之的“祖率”(即“ π ”)为测绘科学的计算工作奠定了重要的基础,中国印刷术的发明为现代地图印制奠定了基础。

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(德国)提出了最小二乘法原理,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(诞生在美国)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(前苏联),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

术。1960年世界上第一台红宝石激光器的诞生（诞生在美国，美籍瑞典裔科学家梅曼发明），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（全球定位系统）、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（INS，根据惯性原理设计的测定地面点大地元素的系统）、甚长基线干涉测量技术（VLBI，独立站射电干涉测量技术）、激光测月技术（LLR）、激光测卫技术（SLR）、卫星轨道跟踪和定位技术（DORIS）、通信技术、自动化技术、信息技术等各种技术一起构建起了测绘科学的绚丽大花园，为人类文明的发展，为人类社会的进步，为各类工程建设发挥着独特的、不可替代的重要作用。

1.2 地球外表形态的描述方法

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于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态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。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,具有国家唯一性。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年青岛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年国家高程基准”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鸭蛋,鸭蛋又是椭球形的,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。参考椭球的定义是体量与地球大致相当的椭圆绕短轴旋转 180° 所形成的封闭球体,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, $\alpha=(a-b)/a$ 。

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,并称之为总地球椭球,因此,总地球椭球具有唯一性。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,具有国家唯一性。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1940年推出的参考椭球(称为克拉索夫斯基椭球, $a=6378245$ 、 $\alpha=1:298.3$),利用克拉索夫斯基椭球建立的大地坐标系称为“1954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北京坐标系”是前苏联的普尔科沃坐标系在中国境内的延伸,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,称为“1980国家大地坐标系”(也有人称之为“1980西安坐标系”)。

“1980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 (是 1975 年国际第三个推荐值, $a=6378140$ 、 $\alpha=1:298.257$)。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 国家大地坐标系”的特点是参心大地坐标系是在“1954 北京坐标系”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 黄海高程系统”。“1980 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。

面对空间技术、信息技术及其应用技术的迅猛发展, 在创建数字地球、数字中国的过程中, 需要一个以全球参考基准框架为背景的、全国统一的、协调一致的坐标系统来处理国家、区域、海洋与全球化的资源、环境、社会和信息等问题。单纯采用传统的参心、二维、低精度、静态大地坐标系统和相应的基础设施作为中国现行应用的测绘基准, 必然会带来愈来愈多不协调问题并产生众多矛盾从而制约高新技术的应用。若仍采用现行的二维、非地心的坐标系不仅会制约地理空间信息的精确表达和各种先进空间技术的广泛应用, 无法全面满足当今气象、地震、水利、交通等部门对高精度测绘地理信息服务的要求, 而且也不利于与国际上的民航图、海图有效衔接, 因此, 采用地心坐标系势在必行。为此, 我国决定从 2008 年 7 月 1 日起启用“2000 国家大地坐标系”。“2000 国家大地坐标系”与原国家大地坐标系转换、衔接的过渡期为 8~10 年, 原各类测绘成果在过渡期内可沿用原国家大地坐标系, 2008 年 7 月 1 日后新生产的各类测绘成果应采用“2000 国家大地坐标系”, 原地理信息系统在过渡期内应逐步转换到“2000 国家大地坐标系”, 2008 年 7 月 1 日后新建设的地理信息系统应采用“2000 国家大地坐标系”。“2000 国家大地坐标系”是以“2000 国家大地控制网”为基础建立的。它包括“2000 国家 GPS 大地控制网”和“2000 国家重力基本网”, 通过“2000 国家 GPS 大地控制网”与原有“国家天文大地网”的联合平差构建起了国家三维地心坐标系统的坐标框架。“2000 国家大地坐标系”的构建体现了经典大地测量学、空间大地测量学、天文测量学、重力测量学、近代数据处理理论与技术的集成与融合。“2000 国家 GPS 大地网”及与该网联合平差后的“国家天文大地网”和“2000 国家重力基本网”统称为“2000 国家大地控制网”, 三网平差后得到 2000 国家 GPS 大地网点的地心坐标在 ITRF97 坐标框架内, 历元为 2000.0 时的中误差在 $\pm 3\text{cm}$ 以内。“2000 国家大地坐标系”采用 WGS-84 椭球 (即 GPS 采用的参考椭球, $a=6378137$ 、 $\alpha=1:298.257223563$), 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 轴、 X 轴构成右手坐标系, 大地原点与“1980 国家大地坐标系”相同。

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 $R=(a+a+b)/3$ 。

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 2 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。

1.3 地球上点位的表示方法

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。