



高等学校土木工程专业“十三五”规划教材  
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

# 土木工程测量

黄显彬 主编

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材  
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

# 土木工程测量

黄显彬 主编

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程测量/黄显彬主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 8  
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材  
ISBN 978-7-112-21052-7

I. ①土… II. ①黄… III. ①土木工程-工程测量-高等学校-教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 182613 号

本书讲述大土木工程专业测量, 涵盖公路、铁路、房屋建筑、市政工程专业测量。全书结合现行规范, 结构合理, 内容新颖, 贴近工程实际, 理论与应用结合紧密, 新内容较多, 与其他教材相比重复率低。本书具有贴近实际、应用性强、适用面广等鲜明特点。

全书共分 15 章, 包括绪论、水准测量基础、角度测量、直线水平距离测量与定向、工程坐标基础知识、地形图基本知识、测量误差的基本知识、高程测量、平面控制测量、地形图测量及其工程应用、平面位置测量、路线中线测量、全站仪测量技术、GPS 测量技术和建筑测量。

本书重点介绍了工程坐标基础知识、高程测量、平面控制测量、路线中线测量等章节, 详细讲述了现代工程测量广泛应用的全站仪和 GPS 测量技术, 一般性介绍了水准测量基础、角度测量、直线水平距离测量、地形图基本知识、地形图测量及工程应用、建筑测量, 层次分明。

本书为高等学校土木工程专业“十三五”规划教材、全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材。本书可作为高等院校土木工程专业、公路工程专业、公路桥梁工程专业、桥梁工程专业、隧道工程专业、市政工程专业教材, 也可作为高职院校土木工程专业教材及自学考试用书。本书还可供从事土木工程测量及相关专业工作的人员参考。

为了更好地支持教学, 本书作者制作了教学课件, 有需要的读者可以发送邮件至: jiangongkejian@163.com 免费索取。

\* \* \*

责任编辑: 聂伟 王跃 吉万旺  
责任校对: 焦乐 刘梦然

高等学校土木工程专业“十三五”规划教材  
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

### 土木工程测量

黄显彬 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京富生印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 23 $\frac{1}{2}$  字数: 572 千字

2017 年 8 月第一版 2017 年 8 月第一次印刷

定价: 45.00 元 (赠课件)

ISBN 978-7-112-21052-7

(30694)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

本书围绕平面测量（包括平面控制测量、平面位置测量、平面位置放样）和高程测量（包括高程控制测量、高程放样）两大核心内容展开。本书试图让读者不仅建立工程测量思维，接触简单的、常规的测量知识，更让读者建立接近工程实际的测量意识，掌握跟上时代步伐的测量技能。全站仪和 GPS 渗透工程测量领域，打破传统工程测量模式，带来了全新的测量方式，领会全站仪和 GPS 测量技术显得十分重要；但是其根基在测量基础理论，掌握基础理论是熟练应用全站仪和 GPS 进行工程测量的前提和基础。本书对平面测量中的坐标进行了全面系统阐述，围绕坐标分别介绍坐标基础知识、平面控制测量、平面位置测量及放样、路线中线测量、全站仪测量、GPS 测量等。这些内容均围绕坐标理念、坐标计算、坐标放样展开，可见坐标知识不仅仅是本书的重点，也是设计和施工中落实平面位置的重点。同时，本书也高度重视高程测量，分别从水准测量基础知识、高程测量进行介绍，从常规高程测量到高精度的二等水准测量，从传统的水准仪到现代的全站仪，全方位多角度理解高程测量。

本书对水准测量基础、角度测量、距离测量等基础内容也做了详细介绍。考虑到教材的系统性，对测量误差基本知识、地形图基本知识、地形图测量及其工程应用、建筑测量也一并进行了介绍。

本书讲述大土木工程测量，涵盖公路、铁路、房屋建筑、市政工程等专业的工程测量。本书提炼传统的工程测量经典知识，容纳现代全站仪和 GPS 测量的先进技术。本书不仅介绍了土木工程测量理论知识，而且结合工程测量实例，大大夯实了土木工程测量应用。

全书共 15 章，由基础、分点分块到整体，由传统到现代测量，由基础理论到工程应用实例，始终围绕平面坐标测量和高程测量两大核心内容，既包括了工程简单测量（距离、角度）场景，又涉及了复杂工程测量（道路平面和高程）难题。

在本书编写过程中，全站仪测量技术和 GPS 测量技术两部分内容，得到中铁五局集团第四工程有限责任公司、四川省洪雅林场瓦屋山建筑公司、贵州建工集团第七建筑工程有限责任公司、成都市温江区规划建筑设计室、四川铮大建筑工程有限公司等单位大力协助，得到王禄斌、肖震、黄建明、高宗荣、叶川、张旭、尹帮建等同志在仪器设备、设计施工资料及测量技术等诸多方面的大力支持。四川农业大学土木工程学院硕士研究生刘晨阳、侯松、陈春阳、李唐勇等参与绘图、制表、计算、编辑和校稿工作；四川农业大学土木工程学院本科生覃国辉、何宗航、廖曼、王任雅弘、吴显杨、肖前丰、韩雨婷等参与绘图、制表和计算工作。本书由黄显彬主编。在此，对为编写本书提供帮助和付出辛劳的所有单位和同志们，表示衷心感谢！

本书在编写中，参阅了多本同类教材、相关规范和标准，在此一并表示感谢。

本书中难免有错误或不妥，恳请广大读者批评指正。

编 者  
2017 年 6 月

# 目 录

第1章 绪论 .....	1	3.1.1 角度测量分类 .....	19
1.1 测绘学与测量学 .....	1	3.1.2 水平角测量原理 .....	19
1.1.1 测量学研究的范围和内容 .....	1	3.1.3 竖直角测量原理 .....	19
1.1.2 测绘学科的组成 .....	1	3.1.4 角度测量仪器 .....	20
1.1.3 测绘学发展历史 .....	1	3.2 光学经纬仪 .....	20
1.1.4 工程测量目的和作用 .....	2	3.2.1 光学经纬仪的功能 .....	20
1.2 测量坐标系统 .....	3	3.2.2 DJ <sub>6</sub> 型光学经纬仪 .....	20
1.2.1 测量坐标系统 .....	3	3.3 经纬仪的使用 .....	23
1.2.2 地面点高程的确定 .....	3	3.4 经纬仪的检验与校正 .....	25
1.3 水平面代替地球曲面的条件 .....	4	3.5 角度测量的误差分析 .....	26
1.3.1 对距离的影响 .....	4	3.6 使用经纬仪进行角度测量 .....	28
1.3.2 对水平角的影响 .....	5	3.6.1 水平角度测量 .....	28
1.3.3 对高程的影响 .....	6	3.6.2 竖直角测量 .....	31
第2章 水准测量基础 .....	7	3.7 全站仪测量水平角角度 .....	34
2.1 水准测量原理 .....	7	思考题 .....	37
2.2 水准测量的仪器及工具 .....	8	第4章 直线水平距离测量与定向 .....	39
2.2.1 水准仪 .....	8	4.1 概述 .....	39
2.2.2 脚架、水准尺和尺垫 .....	11	4.2 全站仪量距 .....	39
2.2.3 水准仪的使用 .....	11	4.2.1 全站仪概述 .....	39
2.3 水准仪的检验与校正 .....	13	4.2.2 全站仪测量水平距离 .....	41
2.3.1 水准仪的主要轴线及其应满足的 条件 .....	13	4.3 皮尺或钢尺量距 .....	42
2.3.2 水准仪的检验与校正 .....	14	4.3.1 钢尺量测水平距离的仪器 工具 .....	42
2.4 水准测量误差 .....	16	4.3.2 钢尺测量水平距离要点 .....	43
2.4.1 仪器误差 .....	16	4.3.3 钢尺量距记录及精度 .....	44
2.4.2 观测误差 .....	16	4.3.4 钢尺量距的相应改正 .....	45
2.4.3 外界条件引起的误差 .....	17	4.4 经纬仪视距测量 .....	46
思考题 .....	18	4.4.1 概述 .....	46
第3章 角度测量 .....	19	4.4.2 经纬仪视距测量公式 .....	46
3.1 角度测量原理 .....	19	4.4.3 经纬仪视距示例及测量 记录表 .....	46
		4.5 直线定向 .....	47

4.5.1 直线定向概念	47	应用	76
4.5.2 直线定向方法	48	7.4 等精度直接观测平差	77
思考题	49	7.4.1 求最或是值	77
<b>第5章 工程坐标基础知识</b>	50	7.4.2 评定精度	77
5.1 方位角	50	7.5 不等精度直接观测平差	78
5.2 工程坐标计算公式	52	7.5.1 权的概念	78
5.3 直线上中桩坐标计算示例	54	7.5.2 加权平均值及其中误差	79
5.4 平曲线上中桩坐标计算示例	54	7.5.3 单位权观测值中误差	80
5.5 坐标法测设中桩	54	思考题	80
思考题	54	<b>第8章 高程测量</b>	81
<b>第6章 地形图基本知识</b>	55	8.1 水准测量方法	81
6.1 比例尺及地形图图示	55	8.1.1 水准点及转点	81
6.1.1 地理空间数据与地图	55	8.1.2 水准测量方法分类	84
6.1.2 地形图的比例尺	55	8.2 高程控制测量	84
6.1.3 地物符号	59	8.2.1 一般规定	84
6.1.4 地貌符号(等高线)	60	8.2.2 水准仪高程控制测量	84
6.1.5 地形图的坐标、高程系统	63	8.2.3 电磁波测距三角高程控制 测量	87
6.2 地形图的分幅与编号	63	8.2.4 GPS拟合高程控制测量	87
6.2.1 梯形分幅法	64	8.3 高程测量应用	88
6.2.2 矩形分幅法	67	8.3.1 基平测量	88
思考题	69	8.3.2 中平测量	91
<b>第7章 测量误差的基本知识</b>	70	8.3.3 全站仪测量两点高差	95
7.1 测量误差概述	70	8.3.4 二等水准测量实例	98
7.1.1 观测与观测值的分类	70	思考题	103
7.1.2 测量误差及其来源	70	<b>第9章 平面控制测量</b>	108
7.1.3 测量误差的种类	71	9.1 概述	108
7.1.4 偶然误差的特性及其概率密度 函数	72	9.1.1 平面控制测量概念	108
7.2 误差观测精度	73	9.1.2 平面控制测量目的意义	108
7.2.1 精度	73	9.1.3 平面控制测量分类	109
7.2.2 中误差	74	9.2 导线测量	111
7.2.3 相对误差	74	9.2.1 导线测量概述	111
7.2.4 极限误差	75	9.2.2 导线测量的外业工作	112
7.3 误差传播定律	75	9.2.3 闭合导线测量内业计算	113
7.3.1 一般函数的中误差	75	9.2.4 附和导线测量内业计算——方位 角法	116
7.3.2 误差传播定律在测量上的 应用	76	9.2.5 附和导线测量内业计算——虚拟	

多边形法 .....	122	<b>第 12 章 路线中线测量</b> .....	178
9.3 三角测量 .....	126	12.1 概述 .....	178
9.3.1 三角测量前的准备工作 .....	126	12.1.1 平面的概念 .....	178
9.3.2 三角网点的设置 .....	127	12.1.2 平面的基本线形 .....	178
9.3.3 三角测量的具体内容 .....	127	12.2 中线里程及平曲线 .....	180
9.4 全站仪控制测量实例 .....	131	12.2.1 平曲线要素计算 .....	180
9.4.1 概述 .....	131	12.2.2 平曲线主点里程计算 .....	180
9.4.2 附和导线工程测量实例 .....	131	12.2.3 中桩设置 .....	183
9.4.3 控制网复测成果报告 .....	135	12.2.4 断链加桩 .....	184
思考题 .....	136	12.3 平曲线上加桩的测设 .....	184
<b>第 10 章 地形图测量及其工程应用</b> .....	138	12.3.1 加桩分类及测设方法分类 .....	184
10.1 概述 .....	138	12.3.2 切线支距法 .....	186
10.1.1 一般规定 .....	138	12.3.3 弦长纵距交会法 .....	187
10.1.2 图根控制测量基本要求 .....	141	12.3.4 偏角法 .....	187
10.1.3 图根平面控制测量 .....	142	12.4 坐标法测设中线上的加桩 .....	192
10.1.4 图根高程控制测量 .....	143	12.4.1 直线上中桩坐标计算示例 .....	192
10.2 大比例尺平面图的测绘 .....	143	12.4.2 平曲线上中桩坐标计算示例 .....	195
10.2.1 传统方法测绘大比例地形图 .....	143	12.4.3 坐标法测设中桩 .....	197
10.2.2 大比例尺数字测图 .....	148	12.5 缓和曲线 .....	201
10.3 地形图的工程应用 .....	163	12.5.1 概述 .....	201
10.3.1 地形图的理论应用 .....	163	12.5.2 缓和曲线的特性、螺旋角及支距公式 .....	201
10.3.2 用地形图测量平面面积 .....	165	12.5.3 带有缓和曲线的曲线要素计算 .....	204
10.3.3 用地形图估算平整场地的土石方 .....	167	12.5.4 缓和曲线主点里程计算 .....	207
思考题 .....	170	12.5.5 带有缓和曲线的整个曲线加桩范畴及测设方法 .....	210
<b>第 11 章 平面位置测量</b> .....	171	12.5.6 支距法测设带有缓和曲线的整个曲线上的加桩 .....	210
11.1 概述 .....	171	12.5.7 偏角法测设带有缓和曲线的整个曲线上的加桩 .....	213
11.2 平面位置测量 .....	171	12.5.8 带有缓和曲线的整个曲线上的加桩的坐标计算 .....	218
11.2.1 相对位置法 .....	171	12.5.9 坐标法测设带有缓和曲线的整个曲线上的加桩 .....	225
11.2.2 坐标法 .....	171	12.5.10 坐标法测量的应用范围 .....	225
11.2.3 极坐标法 .....	172	思考题 .....	226
11.2.4 角度交会法 .....	172		
11.2.5 距离交会法 .....	172		
11.3 全站仪平面图测量 .....	172		
思考题 .....	177		

<b>第 13 章 全站仪测量技术</b> .....	229	14.5 GPS 的时空基准	268
13.1 概述	229	14.5.1 地球坐标系	269
13.2 全站仪的构造及技术参数	233	14.5.2 天球坐标系	275
13.2.1 全站仪的主要技术参数	233	14.5.3 高程系统	276
13.2.2 徕卡全站仪	234	14.5.4 坐标系之间的转换	277
13.2.3 中纬 ZT80MR 全站仪	236	14.5.5 时间系统	277
13.3 全站仪基本操作流程 (以中纬 ZT80MR 系列全站仪为例)	237	14.6 GPS 网及其建立	278
13.4 采用全站仪测量点的坐标	244	14.6.1 GPS 网	279
13.4.1 概述	244	14.6.2 GPS 网的建立	279
13.4.2 中纬全站仪 ZT80MR+测设点位坐标示例	244	14.6.3 GPS 网的质量及质量控制	279
13.5 采用全站仪进行施工放样测量 (使用全站仪程序对道路中边桩放样)	247	14.7 GPS 测量及技术方案设计	280
思考题	256	14.7.1 概述 (含 GPS 网的精度和密度设计)	280
<b>第 14 章 GPS 测量技术</b> .....	257	14.7.2 GPS 网基准设计	281
14.1 概述	257	14.7.3 GPS 测量技术方案设计书的编写	281
14.1.1 传统定位方法及其局限性	257	14.8 GPS 测量的外业	281
14.1.2 卫星导航定位技术简介	258	14.8.1 选点与埋设点	281
14.1.3 我国的 GPS 大地控制网	259	14.8.2 接收机的维护保养和检验	282
14.2 GPS 全球定位系统与 GPS 信号	261	14.8.3 观测方案设计	282
14.2.1 GPS 系统的组成	261	14.8.4 作业调度和观测作业	283
14.2.2 GPS 卫星运行及其轨道	262	14.8.5 GPS 测量成果验收	283
14.2.3 GPS 卫星信号及接收	263	14.9 GPS 测量数据格式、基线解算和网平差	284
14.3 GPS 定位测量基本原理	264	14.9.1 GPS 测量的 RINEX 数据格式	284
14.3.1 GPS 定位测量原理与方法	264	14.9.2 GPS 基线解算	285
14.3.2 伪距相位测量	265	14.9.3 GPS 网平差	286
14.3.3 载波相位测量	266	14.9.4 利用 GPS 建立独立坐标系	287
14.4 GPS 测量误差	266	14.10 GPS 平面控制测量实例	288
14.4.1 GPS 测量误差来源及其分类	266	14.10.1 概述	288
14.4.2 与卫星有关的误差	267	14.10.2 GPS 控制测量实例	288
14.4.3 卫星信号传播误差	267	14.11 利用 GPS 进行道路放样实例	293
14.4.4 与接收机有关的误差	268	14.11.1 概述	293
		14.11.2 GPS 放样实例	294
		思考题	311



第 15 章 建筑测量	312	附录 1 广州市轨道交通十一号线及 中心城区综合管廊项目 控制网复测成果报告	326
15.1 建筑施工测量	312	附录 2 金马镇蓉西新城区域基础地形 图更新工程技术设计书	358
15.1.1 施工测量(放样)的基本 方法	312	参考文献	366
15.1.2 建筑施工控制测量	316		
15.1.3 建筑施工测量	317		
15.2 建筑物变形测量	320		
15.2.1 建筑物的沉降观测	321		
15.2.2 建筑物水平位移观测	322		
思考题	324		

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 测绘学与测量学

测绘学是测量学与制图学的统称。它研究的对象是地球整体及其表面和外层空间中的各种自然物体、人造物体的有关空间信息。它的研究任务是对这些与地理空间有关的信息进行采集、处理、管理、更新和利用。测量学是研究测定地面点的几何位置、地球形状、地球重力场,以及地球表面自然和人工设施的几何形态的科学。制图学是结合社会和自然信息的地理分布,研究绘制全球和局部地区各种比例尺的地形图和专题地图的理论和技术的科学。由此可见,测量学与制图学是测绘学的两个组成部分,其中测量学是它的重要组成部分。

### 1.1.1 测量学研究的范围和内容

传统的测量学研究的对象是地球及其表面,传统测量主要是经纬仪测量。随着科学技术的发展,现代测量学已扩展到地球的外层空间,观测和研究的对象已由静态发展到动态。同时,所获得的观测量,既有宏观量,也有微观量,使用的手段和设备,也已转向自动化、遥测、遥感和数字化。现代测量主要包括全站仪测量、GPS 测量、遥感测量,与传统测量相比,现代测量大大缩短了测量时间,提高了测量精度。

测量学研究的内容分测定和测设两部分。测定是将地面上客观存在的物体,通过测量的手段,将其测成数据或图形;测设是将工程设计通过测量的手段,标定在地面上,以备施工。

### 1.1.2 测绘学科的组成

测绘学科的组成并无统一规定,一般测绘学科由下列学科组成。

(1) 大地测量学:以地球表面上较大的区域甚至整个地球作为研究对象。

(2) 普通测量学:研究地球表面较小区域或范围,可以不考虑地球曲率的影响,把该小区域投影球面直接当作平面看待。

(3) 摄影测量学:研究如何利用摄影相片来测定地物的形状、大小、位置,并获取其他信息的学科。

(4) 工程测量学:研究测量学理论、技术和方法在各类工程中的应用。例如:城市建设以及资源开发各个阶段进行地形和有关信息的采集、施工放样、变形监测等是为工程建设提供测绘保障。

### 1.1.3 测绘学发展历史

测绘学和其他学科一样,是劳动人民在生产实践中创造并随着社会生产及其他学科的进步而发展起来的,它是人类长期以来,在生活和生产方面与自然界斗争的结晶。我国有

着悠久的历史和文化，测绘学发展历史很早，早在公元前 21 世纪夏禹治水时，已使用“准、绳、规、矩”四种测量工具和方法。在国外，埃及尼罗河泛滥后农田的整治也应用了原始的测量技术。

我国古代在天文测量方面一直走在世界前列，公元前 4 世纪战国时期，人们利用磁石制成世界上最早的定向工具“司南”。远在颛顼高阳氏（公元前 2513~公元前 2434 年）便开始观测日、月、五星定一年的长短，战国时期首先创制了世界最早的恒星表。秦代（公元前 246~公元前 207 年）颛顼历定一年的长短为 365.25 天，与罗马人的儒略历相同，但比其早四五百年。宋代的《统天历》定一年为 365.2425 日，与现代值相比，只有十几秒之差，可见天文测量在中国古代已有很大发展，并创制了浑天仪、圭、表和复距等仪器用于天文测量。公元 2 世纪初，后汉张衡制造“浑天仪”，在天文测量方面作出巨大的贡献。公元 3 世纪初，西晋裴秀总结前人制图方法，拟定了世界最早的小比例地图绘图法则，称为“制图六体”。

中国唐代在僧一行主持下，测量河南从白马，经浚仪、扶沟，到上蔡的距离和北极星高度，得出子午线 1 度的弧长为 132.31km。英国科学家牛顿和荷兰科学家惠更斯用力学眼光，提出地球是两极略扁的椭球。1849 年英国科学家斯托克斯利用重力观测资料确定地球形状理论，提出了大地水准面概念。

公元前 20 世纪之前，苏美尔人、巴比伦人已绘制地图于陶片上。最早的地图是夏禹铸九鼎。湖南长沙马王堆发现公元前 168 年的长沙国地图和驻军图，已有标示地物、地貌和军事等要素。公元 2 世纪，古希腊托勒密首先提出用数学方法将地球表象描绘成平面图。以上说明地形图测绘的重要性，人们很早就开始逐步推动地形图测绘工作。

17 世纪开始，望远镜的面世和应用，为测绘学科的发展开拓了光明前景，使测量方法、测绘仪器有了重大的改变；同时，在测量理论方面也有不少创造，最小二乘法理论就是其中的重要一项，一直使用至今。1903 年飞机的发明，使航空摄影测量成为可能，不但提高了成图工作速度，减轻了劳动强度，重要的是改变了测绘地形图的工作现状，由手工业生产方式向自动化转化。

测绘学的发展主要是从测绘仪器发展而来，如 1947 年光电测距仪面世；20 世纪 60 年代电磁波测距出现；氦氖激光光源的应用使测程达到 60km 以上，精度达到  $\pm(5\text{mm}+5\text{ppm}\times D)$ 。固体激光器应用使测程更大，精度更高，在测月、测卫方面得以突破，ME5000 测距仪精度达到  $\pm(0.2\text{mm}+0.1\text{ppm}\times D)$ 。20 世纪 40 年代，自动安平水准仪问世，之后又发展了激光水准仪，近年来还出现了数字水准仪，水准测量正向着自动记录、自动传输、自动储存、自动处理数据方向迈进。20 世纪 80 年代，全球定位系统研制成功，从 2003 年开始我国北斗卫星导航定位系统研制至今，测绘、导航定位、授时、数据传送、通信、静止目标与移动目标的实时监控等已经成为现实。

总之，测绘工作，是由原始的、早期的、落后的，在漫长的社会发展历程中，逐步发展为先进的、现代的、自动的、较为完善的测绘科学。

#### 1.1.4 工程测量目的和作用

##### 一、工程测量的目的

工程测量的目的是基于工程应用，比如国家大地测量的目的是建立国家大地控制点，

城市控制测量目的是建立城市控制测量网。设计单位在测区进行控制测量目的是建立测区控制网。

工程上的测量应用最多的是施工测量，施工测量也包括控制测量（或复核设计给定的控制测量网）和施工放样（依据控制测量网进行施工放样）。建（构）筑物设计之后就要按设计图纸及相应的技术说明进行施工。施工测量的目的是将设计图纸上建（构）筑物的主要点位测设到实地并标出来，作为工程施工的依据。实现这一目的的测量工作又称为工程放样，简称“放样”。这些经过施工测量在实地标出来的点位称为施工点位，将成为施工点或放样点。

## 二、工程测量的作用

测量是国家经济建设和国防建设的一项重要的基础性、先进性的工作，从建设规划设计到每项具体工作、具体工程的建设，都需要有精确的测量成果作为依据。工程测量依据测量目的不同而不同，大致可以有以下几方面作用。

- (1) 建筑用地的选择，道路、管线位置的确定等，都要利用测量所提供的资料和图纸进行规划设计。
- (2) 施工阶段需要通过测量工作来衔接，配合各项工序的施工，才能保证设计意图的正确执行。
- (3) 竣工后的竣工测量，为工程的验收、日后的扩建和维修管理提供资料。
- (4) 在工程管理阶段，对建（构）筑物进行变形观测，确保工程安全使用。
- (5) 依据高级控制网进行测区控制测量。
- (6) 依据测区控制网进行测区施工放样。

# 1.2 测量坐标系统

## 1.2.1 测量坐标系统

详见 14.5 节。

## 1.2.2 地面点高程的确定

一般来说，地面点的高程有绝对高程、相对高程两种确定方法。地面点到大地水准面的铅垂距离，称为该点的绝对高程或海拔，简称高程，用  $H$  表示。如图 1-1 所示，地面点  $A$ 、 $B$  的高程分别为  $H_A$ 、 $H_B$ 。数值越大表示地面点越高，当地面点在大地水准面的上方时，高程为正；反之，当地面点在大地水准面的下方时，高程为负。

如果有些地区引用绝对高程有困难时，可采用相对高程系统。相对高程是采用假定的水准面作为起算高程的基准面。地面点到假定水准面的垂直距离叫该点的相对高程。由于高程基准面是根据实际情况假定的，所以相对高程有时也称为假定高程。

如图 1-1 所示，地面点  $A$ 、 $B$  的相对高程分别为  $H'_A$ 、 $H'_B$ 。地面点到水准面的铅垂距离，称为两点的绝对高程，地面点  $A$ 、 $B$  的高程分别为  $H_A$ 、 $H_B$ 。两个地面点之间的高程称为高差，见式 (1-1)：

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-1)$$

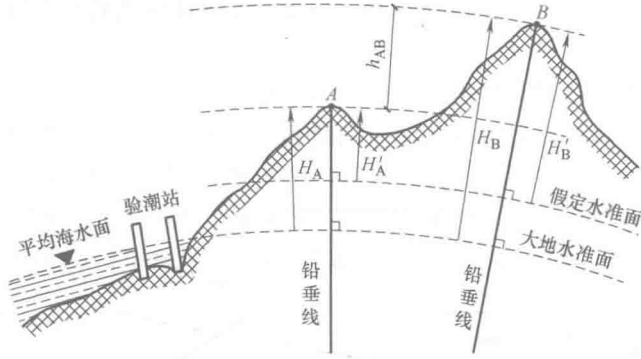


图 1-1 高程和高差

当  $h_{AB}$  为正时, B 点高于 A 点; 当  $h_{AB}$  为负时, B 点低于 A 点。高差的方向相反时, 其绝对值相等而符号相反, 见式 (1-2)。

$$h_{AB} = -h_{BA} \quad (1-2)$$

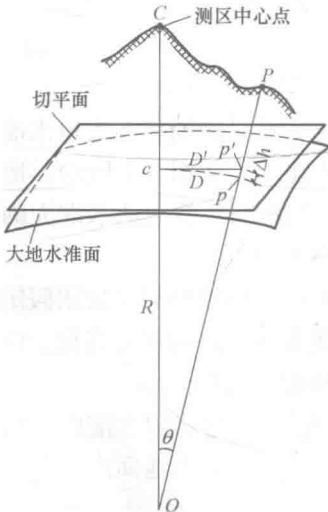
### 1.3 水平面代替地球曲面的条件

确定平面上点的位置比确定地球上点的位置容易, 表示更方便。人们总想将小范围的球面看成平面, 即把水准面看作水平面来简化测算及绘图工作。

当用水平面代替水准面对距离、角度的影响忽略不计时, 就认为水准面可以当作水平面, 这样在地球表面上直接观测即可得到水平距离、水平角, 通过推算得到地面点的坐标表示该点平面位置。

用水平面代替水准面在测量上所产生的误差一般认为有距离误差、高程误差和角度误差三种。

#### 1.3.1 对距离的影响



如图 1-2 所示, 地面上 C、P 两点在大地水准面上的投影点是 c、p, 用过 c 点的水平面代替大地水准面, 则 p 点在水平面上的投影  $p'$ 。设  $cp$  的弧长为  $D$ ,  $cp'$  的长度  $D'$ , 地球半径为  $R$ ,  $D$  所对圆心角为  $\theta$ , 计算以水平长度  $D'$  代替弧长所产生的误差  $\Delta D$  的计算, 见式 (1-3)。

$$\Delta D = D' - D = R(\tan\theta - \theta) \quad (1-3)$$

将  $\tan\theta$  用级数展开可得  $\tan\theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{5}{12}\theta^5 + \dots$ 。因为  $\theta$  角很小, 所以只取前两项代入  $\Delta D$  得到式 (1-4)。

$$\Delta D = R \frac{1}{3}\theta^3 \quad (1-4)$$

又因  $\theta = \frac{D}{R}$ , 代入式 (1-4), 可得式 (1-5)。

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2}, \quad \frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-5)$$

图 1-2 水平面代替水准面的影响

取地球半径  $R=6371\text{km}$ ，并以不同的距离  $D$  值代入  $\Delta D$ 、 $\Delta D/D$ ，则可求出距离误差  $\Delta D$  和相对误差  $\Delta D/D$ ，见表 1-1。

水准面的距离误差和相对误差

表 1-1

距离 $D(\text{km})$	距离误差 $\Delta D(\text{mm})$	相对误差 $\Delta D/D$
10	8	1/1220000
20	128	1/200000
50	1026	1/49000
100	8212	1/12000

从表中可以看出，当地面距离为  $10\text{km}$  时，用水平面代替水准面所产生的距离误差仅为  $0.8\text{cm}$ ，其相对误差为  $1/1220000$ 。而实际测量距离时，大地测量中使用的精密电磁波测距仪的测距精度为  $1/1000000$ ，地形测量中普通钢尺的距离精度约为  $1/2000$ 。所以，只有在大范围内进行精密量距时，才考虑地球曲率的影响，而在一般地形测量中测量距离时，可不必考虑这种误差的影响。

### 1.3.2 对水平角的影响

野外测量的“基准线”和“基准面”是铅垂线和水准面。把水准面近似地看作圆球面，则野外实测的水平角应为球面角，三角测量构成的三角形是球面三角形。这样用水平面代替水准面之后，角度就变成用平面角代替球面角，平面三角形、多边形代替球面三角形、球面多边形的问题。

从球面三角学可知，同一空间多边形在球面上投影的各内角和，比在平面上投影的各内角和大一个球面角超值  $\epsilon$ ， $\epsilon$  的计算见式 (1-6)。

$$\epsilon = \rho \frac{P}{R^2} \quad (1-6)$$

式中  $\epsilon$ ——球面角超值 ( $''$ )；

$P$ ——球面多边形的面积 ( $\text{km}^2$ )；

$R$ ——地球半径 ( $\text{km}$ )；

$\rho$ ——弧度的秒值， $\rho=206265''$ 。

以不同的面积  $P$  代入  $\epsilon$ ，可求出地面角超值。

由表 1-2 可知，当面积  $P$  为  $100\text{km}^2$  时，地面角超引起的水平角闭合差仅有  $0.51''$ ，引起的测角误差远小于  $2''$  级精密经纬仪测角精度； $1000\text{km}^2$  面积因球面角超引起的水平角闭合差仅有  $5.07''$ ，引起的测角误差远小于地形测量中使用  $6''$  级经纬仪测角精度。

水平面代替水准面的水平角的影响

表 1-2

球面多边形面积 $P(\text{km}^2)$	球面角超值 $\epsilon('')$	角度误差 ( $''$ )
10	0.05	0.02
50	0.25	0.08
100	0.51	0.17
300	1.52	0.51
1000	5.07	1.69

### 1.3.3 对高程的影响

如图 1-1 所示, 地面点  $P$  的绝对高程为  $H_p$ , 用水平面代替水准面后,  $P$  点的高程为  $H'_p$ ,  $H_p$  与  $H'_p$  的差值, 即为水平面代替水准面产生的高程误差, 用  $\Delta h$  表示, 其计算见式 (1-7)。

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + D'^2 \quad (1-7)$$

式中:  $\Delta h = \frac{D'^2}{2R + \Delta h}$ 。

可以用  $D$  代替  $D'$ ,  $\Delta h$  相对于  $2R$  很小, 可忽略不计, 则  $\Delta h = \frac{D^2}{2R}$ 。

以不同距离的  $D$  代入  $\Delta h$ , 可求出相应的高程误差  $\Delta h$ , 见表 1-3。

水平面代替水准面的高程误差

表 1-3

距离(km)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	5	10
$\Delta h$ (mm)	0.8	3	7	13	20	78	314	1962	7848

当距离为 1km 时, 高程误差为 7.8cm。随着距离的增大, 高程误差会迅速增大。这说明水平面代替水准面对高程的影响是很大的。因此, 也就是说, 高程测量不得用水平面代替水准面。

## 第 2 章 水准测量基础

测量地面点高程的工作称为高程测量，测量任意两点高程比较容易得到这两点之间的高差，因此高程测量又称为高差测量。按使用的仪器和施测方法的不同，高程测量分为几何水准测量、三角高程测量、气压高程测量和 GPS 卫星测高。几何水准测量（即水准测量）是高程测量中精度最高和最常用的一种方法，被广泛用于高程控制测量和土木工程施工测量中。

本章着重介绍工程中经常采用高程测量相应的仪器工具，即水准仪及其使用。至于具体的高程测量，详见第 8 章。

### 2.1 水准测量原理

水准测量是用水准仪建立一条水平视线，借助水准尺来测定地面两点间的高差。如图 2-1 所示，欲测 A、B 两点间的高差

$h_{AB}$ ，则可安置水准仪于 A、B 之间，并在 A、B 两点上分别竖立水准尺。利用水准仪的水平视线，这里假设水准仪安置水平时视线高度为 MN（视线高度需要根据测量人员根据实际情况而定），按测量的前进方向，高程点 A 为后视点，B 为前视点，分别读出 A 点水准尺上的读数  $a$ （即后视读数或后尺读数）和 B 点水准尺上的读数  $b$ （即前视读数或前尺读数），则 A、B 两点的高差用式 (2-1) 表示。

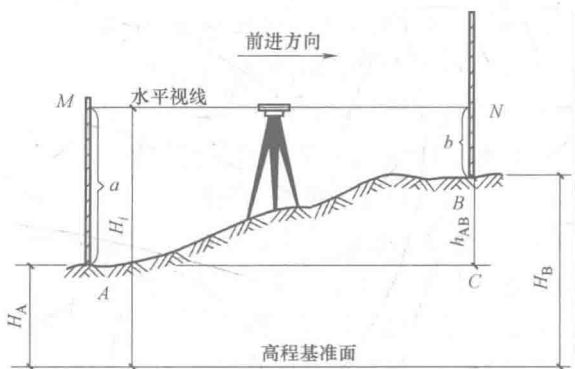


图 2-1 水准测量

$$h_{AB} = a - b \quad (2-1)$$

式 (2-1) 虽然比较简单，但意义重要，所有高差测量可以习惯性地用后视读数减去前视读数表示；需要把握测量路线的前进方向（前进方向指水准测量的大致测量方向），把握后视或后尺方向和前视或前尺方法。

高差有正负号之分，当  $a > b$  时， $h_{AB} > 0$ ，说明 B 点比 A 点高；反之，B 点低于 A 点，若已知 A 点高程为  $H_A$ ，则 B 点的高程为

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

由图 2-1 可看出，B 点高程还可通过仪器的视线高程  $H_i$  来计算，即

$$H_i = H_A + a \quad (2-3)$$



$$\left. \begin{aligned} H_i &= H_A + a \\ H_B &= H_i - b \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

上述直接利用实测高差  $h_{AB}$  计算  $B$  点高程的方法，称为高差法；式 (2-4) 是利用仪器视线高程  $H_i$  计算  $B$  点高程，称为仪高法。在某种情况下，要根据一个后视点的高程同时测定多个前视点的高程，以提高工作效率。

## 2.2 水准测量的仪器及工具

### 2.2.1 水准仪

#### 一、水准仪的分类

进行高程或高差测量的仪器较多，实际工程中，高差或高程最常采用水准仪，本节仅仅介绍水准仪构造及测量原理。

水准仪按精度可分为  $DS_{05}$ 、 $DS_1$ 、 $DS_3$  和  $DS_{10}$  四个等级，其中 D、S 分别为“大地测量”和“水准仪”的汉语拼音的第一个字母，数字表示精度，即每公里往返测高差测量的中误差，单位为 mm，例如  $DS_3$  为大地水准测量水准仪，允许每公里往返测高差测量的中误差 3mm。其中， $DS_{05}$  和  $DS_1$  水准仪精度较高，称为精密水准仪。按其构造可分为微倾式水准仪、自动安平水准仪和数字水准仪等。水准测量还需配套的工具具有脚架、水准尺和尺垫。

— 不仅传统水准仪能够测量高程，经纬仪视距法也可以近似测量高程。随着科技的进步，高程测量仪器也得到较大发展，全站仪也可以测量高程，GPS 也可以测量高程。但是全站仪和 GPS 测量高程精度受到限制，它们不能代替水准仪。因此测量水准点高程需要依靠水准仪。目前水准仪向着高精度、自动化、数字化方向发展。例如美国天宝电子水准仪 DINI 电子水准仪是目前世界上高精度的电子水准仪之一，其各项指标都明显优于其他电子水准仪。其性能卓越、操作方便，使水准测量进入了数字时代，大大提高了生产效率。其已广泛应用于地震、测绘、电力、水利等系统。

#### 二、 $DS_3$ 微倾式水准仪的构造

国产  $DS_3$  微倾式水准仪是土木工程测量中常用的仪器，它主要由望远镜、水准器和基座三个部分构成。 $DS_3$  微倾式水准仪构造如图 2-2 所示。

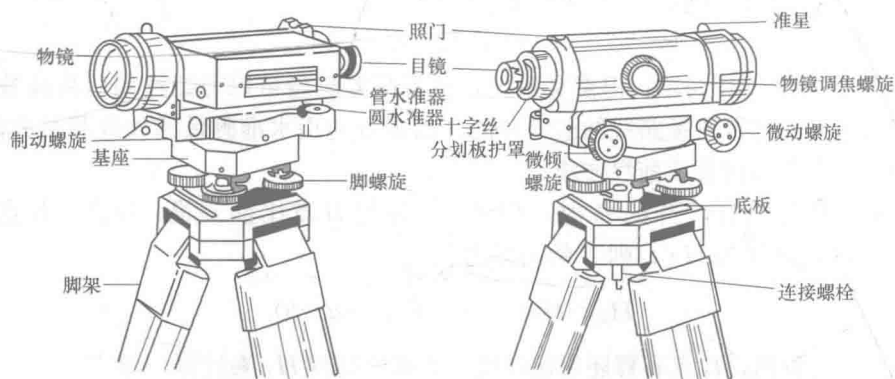


图 2-2  $DS_3$  微倾式水准仪构造