

应用型本科院校工程类专业精品教材

测量学

■ 胡晓斌 编著

中国科学技术大学出版社

应用型本科院校工程类专业精品教材

测量学

■ 胡晓斌 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书依据我国现代化基准测绘体系内容,介绍了由平面测量确定地理空间点位置的理论、技术、方法及应用案例,并介绍了 CGCS2000 坐标系、北斗卫星导航系统、RTK 测量系统等现代化测绘基准的相关内容。

本书适合本科及专科院校测绘工程、遥感科学与技术、地理信息科学、地质工程、土木工程、交通工程、建筑工程、水利工程等专业作为教材使用,也可供从事相关专业工作的科学技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测量学/胡晓斌编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2019.2
ISBN 978-7-312-04587-5

I. 测… II. 胡… III. 测量学 IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 022167 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://www.press.ustc.edu.cn>
<https://zgkxjsdxcs.tmall.com>
印刷 合肥华苑印刷包装有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 787 mm×1092 mm 1/16
印张 10.75
字数 275 千
版次 2019 年 2 月第 1 版
印次 2019 年 2 月第 1 次印刷
定价 32.00 元

前 言

本书是面向教育部应用型高等学校测绘工程、遥感科学与技术、地理信息科学、地质工程、土木工程、交通工程、建筑工程和水利工程等专业学生编写的教材,可作为相关专业本科和专科教学用书,也可供从事测绘工程、遥感科学与技术、地理信息科学、地质工程、土木工程、交通工程、建筑工程和水利工程等相关专业工作的科学技术人员参考。

本书统筹大地测量学和平面测量学内容,删减了经典测量学理论中的过时内容,融入了现代化基准测绘体系中的实践应用理论,力争做到现代和经典、基础和应用、实践和创新多位一体的有机融合。

本书依据我国现代化基准测绘体系内容,介绍了由平面测量确定地理空间点位置的理论、技术、方法及应用案例,并介绍了 CGCS2000 坐标系、北斗卫星导航系统、RTK 测量系统等现代化测绘基准的相关内容。

本书的出版得到了宿州学院教授(博士)科研启动基金(项目编号:2014jb03)的资助;在编写过程中,得到了单位领导和同事的大力支持和帮助,特别是主讲“测量学”课程的教学团队;在出版过程中,得到了中国科学技术大学出版社相关编辑的热情帮助,他们提出了很多宝贵的意见和建议,在此一并致以衷心的感谢。最后,要特别感谢我的妻子和家人,没有她们在背后的默默付出,我是不可能完成此书的。

对于书中存在的错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2018 年 4 月于武汉

目 录

前言	(i)
第 1 章 测量学概述	(1)
1.1 测绘科学与技术学科	(1)
1.2 从大地测量学到平面测量学	(5)
1.3 测量学发展简史	(5)
1.4 测量学的分类	(6)
思考题	(8)
第 2 章 地球基础理论	(9)
2.1 地球形状和大小	(9)
2.2 地球参考椭球	(9)
2.3 用水平面代替大地水准面	(11)
2.4 测量工作基本原则	(12)
思考题	(14)
第 3 章 水准测量	(15)
3.1 水准测量原理	(15)
3.2 水准测量仪器	(16)
3.3 水准仪的使用	(18)
3.4 水准测量外业实施	(20)
3.5 水准测量内业计算	(23)
3.6 水准仪检验与校正	(29)
3.7 水准测量误差分析	(31)
3.8 其他水准仪	(32)
思考题	(34)
第 4 章 角度测量	(36)
4.1 水平角和竖直角测量原理	(36)
4.2 认识经纬仪	(37)
4.3 经纬仪的使用	(40)
4.4 角度测量内业计算	(41)

4.5 经纬仪的检验与校正	(46)
4.6 角度测量误差分析	(49)
4.7 其他经纬仪	(50)
思考题	(52)
第 5 章 距离测量	(54)
5.1 直线定线	(54)
5.2 钢尺量距	(54)
5.3 普通视距测量	(56)
5.4 光电测距	(58)
思考题	(61)
第 6 章 坐标测量	(62)
6.1 平面理论	(62)
6.2 全站仪	(67)
6.3 全站仪程序	(70)
6.4 全站仪的检验与校正	(76)
6.5 卫星定位原理	(78)
6.6 卫星定位方法	(79)
6.7 RTK 测量系统	(82)
6.8 RTK 测量作业	(88)
思考题	(93)
第 7 章 控制测量	(95)
7.1 平面控制测量	(95)
7.2 平面控制测量方法	(96)
7.3 高程控制测量	(104)
7.4 卫星导航定位控制网	(105)
思考题	(106)
第 8 章 碎部测量	(107)
8.1 碎部测图概述	(107)
8.2 碎部测图方法	(108)
8.3 测量碎部点方法	(111)
8.4 地物测绘	(112)
8.5 地貌在地形图上的表示	(115)
8.6 地貌测绘	(119)
8.7 地形图修测	(126)

思考题	(127)
第 9 章 测量误差基本知识	(128)
9.1 测量误差	(128)
9.2 准确度和精确度	(130)
9.3 误差传播定律	(133)
9.4 广义算术平均值及权	(134)
思考题	(138)
第 10 章 测绘工程应用	(140)
10.1 线路纵断面测量	(140)
10.2 线路横断面测量	(144)
10.3 建筑物倾斜测量	(146)
10.4 地形测量综合实习	(149)
思考题	(162)
参考文献	(163)

第 1 章 测量学概述

测量学是大地测量学的重要组成部分,而大地测量学是测绘科学与技术学科的重要分支。

1.1 测绘科学与技术学科

测绘科学与技术学科是研究测定和推算地面的几何位置、地球形状及地球重力场,据此测量地球表面自然形态和人工设施的几何分布,并结合某些社会信息和自然信息的地球分布,编制全球和局部地区各种比例尺的地图和专题地图的理论和技术的学科。测绘科学与技术学科是地球科学的重要组成部分。根据《中华人民共和国学科分类与代码国家标准》(GB/T 13745—2009),测绘科学与技术是一级学科,编号为 0816,分为大地测量学、摄影测量与遥感、地图制图技术、工程测量、海洋测绘、测绘仪器和测绘科学技术其他学科 7 个二级学科。

1.1.1 大地测量学

大地测量学是研究和确定地球的形状、大小、重力场、整体与局部运动和地表面点的几何位置以及它们的变化理论和技术的学科。现代大地测量学科可以分成 3 个由以下基本分支为主所构成的基本体系:几何大地测量学、物理大地测量学和空间大地测量学。

1. 几何大地测量学

几何大地测量学也称为天文大地测量学。它的基本任务是确定地球的形状、大小和确定地面点的几何位置。主要内容包括国家大地测量控制网,即平面控制网和高程控制网建立的基本原理和方法,精密角度、距离和水准的测量,地球椭球数学性质、椭球面上测量计算、椭球数学投影变换和地球椭球几何参数的数学模型等。

2. 物理大地测量学

物理大地测量学也称为理论大地测量学。它的基本任务是用物理方法(重力测量)确定地球形状及其外部重力场。主要内容包括位理论、地球重力场、重力测量及其归算,推求地球形状及外部重力场的理论和技术等。图 1-1 示意了利用地球重力场认知真实地球形状的过程,从早期的圆球到椭球,再到现在的类似梨状的不规则球体。

3. 空间大地测量学

空间大地测量学主要研究以人造卫星和其他空间探测器为代表的空间大地测量的理论、技术和方法。它的基本任务是用空间定位理论确定空间探测器在宇宙中的位置。主要



图 1-1 地球形状认知过程



图 1-2 65 m 射电望远镜

内容包括空间定位、卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, 简称 SLR)、甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, 简称 VLBI) 等技术, 利用这些技术可以推求出探测器在宇宙坐标系中的位置。图 1-2 给出的是中国科学院上海天文台用于 VLBI 观测的 65 m 射电望远镜。

随着科学理论和技术的不断发展, 大地测量学科的研究内容 and 应用范围发生了革命性的变化。现代大地测量技术已经超越了过去传统的局限, 从区域性大地测量发展为全球性大地测量, 从地球表面研究延伸至地球内部研究, 从静态大地测量发展为动态大地测量, 由测绘地球发展为测绘月球和太阳系其他行星, 在地学领域及航天探测等空间技术领域发挥着重要的作用。

1.1.2 摄影测量与遥感

摄影测量与遥感学科是研究摄影影像与被摄物体之间的内在几何和物理关系, 进行分析、处理和解释, 以确定被摄物体的形状、大小和空间位置, 并判定其性质的一门学科。按照摄影距离的远近, 摄影测量与遥感可以分为航天摄影测量、航空摄影测量、低空摄影测量、地面近景摄影测量和显微摄影测量。根据摄影平台的高低, 摄影测量还可以进一步细分, 如表 1-1 所示。

表 1-1 摄影测量平台

遥感平台	高度	目的、用途	其他
航天飞机	240~350 km	不定期地球观测、空间试验	
无线电探空仪	100 m~100 km	各种调查(气象等)	
超高度喷气机	10000~12000 m	侦查、大范围调查	
中低高度飞机	500~8000 m	各种调查、航空摄影测量	
飞艇	500~3000 m	各种侦查、各种调查	
直升机	100~2000 m	各种调查、航空摄影测量	
无线遥控飞机	500 m 以下	各种调查、航空摄影测量	飞机、直升机
牵引飞机	50~500 m	各种调查、航空摄影测量	牵引滑翔机

续表

遥感平台	高度	目的、用途	其他
系留飞机	50~500 m	各种调查	
系留气球	800 m 以下	各种调查	
索道	10~40 m	遗址调查	
吊车	5~50 m	地面实况调查	
地面测量车	0~30 m	地面实况调查	车载升降台

1.1.3 地图制图技术

航天、航空遥感技术和导航定位技术的发展和应⤵用,为地图制作提供了快速、丰富、真实、源源不断的信息来源,同时也为解决大范围、全球高精度定位难题提供了基本理论和方⤵法。数字摄影测量和数字图像处理技术的成熟和完善,突破了时空的限制,改变了传统地图制图的模式,可以直接编制大范围的小比例尺地图,极大地丰富了专题地图的内容,从而形成了新的地图成图技术。我国测绘地理信息局,依托测绘科学与技术,研发了切合我国测绘专业特色的天地图门户网站。

1.1.4 工程测量

工程测量通常是指在工程建设的勘测设计、施工和管理阶段中运用的各种测量理论、方⤵法和技术的总称。传统的工程测量技术涵盖的应用领域包括建筑、水利、交通、矿山等部门,其基本内容有测绘和测设两部分。现代工程测量已经远远突破了仅仅为工程建设服务的概⤵念,它不仅涉及工程的静态、动态以及几何和物理特性的测定,还包括对测量结果的分析,甚至对物体发展变化的趋势预测。图 1-3 示意了利用全站仪进行桥梁梁部偏心测量的应用。



图 1-3 桥梁梁部偏心测量

1.1.5 海洋测绘

海洋测绘学是以海洋水体和海底为对象,研究海洋定位,测定海洋大地水准面和平均海面、海底和海面地形、海洋重力、海洋磁力、海洋环境等自然和社会信息的地理分布,以及编制各种海图的理论和技术的学科。图 1-4 为利用多波束进行海底地形测绘的示意图。

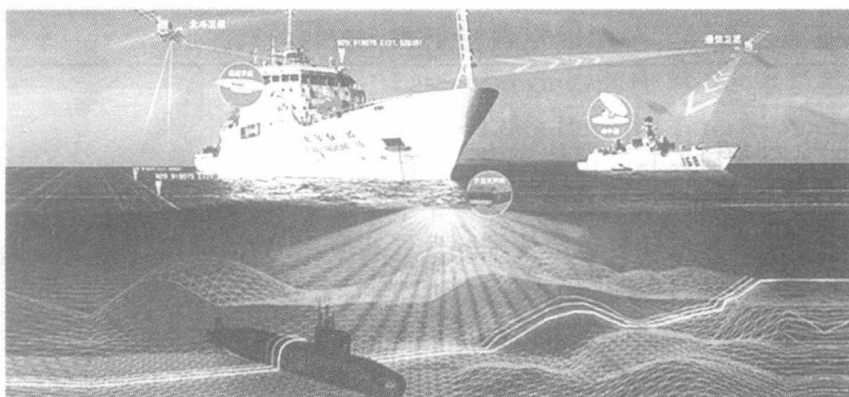


图 1-4 多波束海底地形测绘

1.1.6 测绘仪器

测绘仪器是研究测量仪器的制造、改进和创新的学科。测绘科学与技术的发展,离不开测绘仪器的不断革新。从传统的平板测图仪到全站仪再到现在的集成测量系统,测绘仪器都发挥着重要的作用。图 1-5 给出的是武汉大学研发的低成本、高精度无人机激光扫描测量系统珞珈麒麟云-I。



图 1-5 珞珈麒麟云-I

1.1.7 测绘科学技术其他学科

测绘科学技术的其他学科是指与测绘科学技术相关的交叉学科。1962年, Tomlinson提出利用计算机处理和分析大量的土地利用地图数据, 并建议加拿大土地调查局建立加拿大地理信息系统, 以实现专题地图的叠加、面积量算等。1972年, 加拿大地理信息系统全面投入运行与使用, 成为世界上第一个运行型的地理信息系统。发展到现在理论、技术和应用都非常完整的地理信息系统, 就是计算机科学技术和测绘科学与技术交叉衍生出来的新兴学科。

1.2 从大地测量学到平面测量学

一般情况下, 测量学可以分成两个分支: 大地测量学和平面测量学。平面测量学的研究范围是测区面积不大的地球表面, 以至于在这个范围内地球表面被认为是平面且不损害测量精度, 计算时也认为在该范围内的铅垂线是彼此平行的。大地测量学研究的则是全球或相当大范围内的地球, 在该范围内, 铅垂线被认为彼此不平行, 同时必须考虑地球的形状及重力场, 之所以需要考虑地球重力场是因为地球重力对研究地球形状、对高精度测量及数据处理都有不可忽略的重要作用。

大地测量学经过不断的发展和完善, 已形成了完整的体系。主要包括: 以研究建立国家大地测量控制网为中心内容的应用大地测量学; 以研究坐标系建立、地球椭球性质以及投影数学变换为主要内容的大地椭球测量学; 以研究测量天文经度、纬度及天文方位角为中心内容的大地天文测量学; 以研究重力场及重力测量方法为中心内容的大地重力测量学; 以研究大地测量控制网平差为主要内容的测量平差等。

大地测量学的发展还与一系列相关学科的发展有着紧密的关系, 特别是电子学和空间科学的发展, 电子计算机、人造地球卫星以及声呐等科学技术的出现和发展, 使得大地测量学同其他学科相结合, 出现了许多新的研究方向和分支, 极大地发展和丰富了常规大地测量学的内容和体系。

1.3 测量学发展简史

测量学是研究对地球整体及其表面和外层空间中各种自然和人造物体上与地理空间分布有关的信息进行采集、处理、管理、更新和应用的科学和技术。广义上讲, 测量学是根据一定的原理模型, 获取描述目标对象特性的观测值, 经过数据处理, 对观测目标进行定量化描述的过程。学科专业上讲, 更多的是指测绘科学与技术下的测量学课程。

测量的出现源于人类认识世界与改造世界的需要。早在公元前4000年的古埃及, 由于尼罗河水的泛滥, 两岸大量的农田土地被淹没, 在洪水退去后, 为了重新划定农田的边界, 就

出现了丈量土地的早期测量。为了测定时间,古埃及人通过天文观测的方法,确定了一年内有 365 天,这是当时古埃及王国通用的历法。金字塔作为这个时期的科技成果,体现出当时人们对于距离和角度的测量方法和测量仪器都达到了很高的水平。公元前 6 世纪,古希腊的毕达哥拉斯(Pythagoras)提出了地球形状的概念,使得人类对于地球的认识从局部扩展到了整体;公元前 3 世纪,古希腊著名学者亚里士多德(Aristotle)在其著作 *On the Heavens* 中,通过在不同地理位置上观测北极星位置的变化,推算出地球大圆的周长为 $4 \times$ 斯特迪亚(“斯特迪亚”是古埃及以及古希腊通用的长度单位),并明确提出了地球的形状是圆的,且对于地球形状做了进一步的论证;公元前 3 世纪,古罗马帝国将从事基础测量的人员独立出来,出现了测量员这一职业;公元前 263 年,我国数学家刘辉在《海岛算经》中论述了远距离测量的方法;公元前 2 世纪,埃拉托斯特尼(Eratosthenes)利用在南北两地同时观测日影的方法首次推算出地球子午圈的周长。在人类认识地球的过程中,测量理论和技术方法得到了飞速的发展。1551 年,Foullon 系统地描述了平板仪的测图原理;1569 年,荷兰地图学家墨卡托(Mercator)创立了墨卡托投影,即正轴等角圆柱投影法,是至今仍然常用的海图投影法;1571 年,Digges 在其著作 *A Geometric Practice Named Pantometria* 中描述了用于测量水平角的经纬仪;1576 年,Habermel 利用指南针和三脚架制作了经纬仪;1725 年,Sission 首次将望远镜整合到经纬仪上;1615 年,德国数学家 Snellius 提出了三角测量理论,为控制测量奠定了理论基础;1617 年,荷兰的斯涅耳(Snell)创立了三角测量方法,它是几何大地测量学中建立国家大地网和工程测量控制网的基本理论;1733 至 1740 年间,Cassini 父子重新测定了子午线弧长,并在 1745 年出版了法国的第一张地图;1787 年,Ramsden 制作了第一台精准的经纬仪;1784 年,英国开始使用三角测量理论进行地形测量,直至 1853 年完成;1808 年,Bonaparte 开创了地籍测量,主要包含土地的价格、用途和名称;20 世纪 50 年代,Wadley 使用微波发射器和接收器进行远距离高精度测量;20 世纪 50 年代末,出现了电磁测距仪;1960 年,美国第一代卫星定位系统 TRANSIT 发射成功,主要用于军事定位,之后,美国空军发射了 Global Positioning System(GPS)试验卫星;20 世纪 70 年代,整合了角度和距离测量的全站仪出现。

在普通测量学领域,水准仪、经纬仪、全站仪的测量理论和方法仍然是基础。同时,空间导航定位技术、摄影测量与遥感、三维扫描技术、无人机技术和雷达技术成为测量领域中的生力军。

1.4 测量学的分类

1.4.1 发展阶段分类

通过上述发展简史可以看出,测量学可以分为普通测量和现代测量。普通测量主要是利用传统的水准仪、经纬仪和全站仪进行地形测图。现代测量开始于 20 世纪 90 年代以后,以空间导航定位、摄影测量与遥感以及地理空间信息技术为代表的现代测量技术应用于传统的测绘工程或者项目时,在满足同等精度要求前提下,无论是劳动强度还是作业时间都大

大缩减。本书将两者结合起来进行论述,并删去普通测量教学中的过时理论,适当加入现代测量阶段中的新理论和新方法。

1.4.2 测量内容分类

测量学是伴随着人类认识世界和改造世界的过程而产生的,相应地测量学可以分为测定和测设。

测定是使用测量仪器和设备,通过测量和计算,得到一系列测量数据,在软件中将地球表面的地貌和地物缩制图综合成地形图,供经济建设、规划设计、科学研究和国防建设使用。图1-6示意了利用全站仪测定地形图的过程。



图 1-6 测定示意图

相反,把图上设计好的建筑物和构筑物的位置标定到实地中,叫作测设,也叫作放样。图1-7示意了利用北斗导航定位系统进行放样的过程。



图 1-7 北斗导航施工放样

思 考 题

1. 什么是测绘科学与技术？它可以分成哪些学科？
2. 什么是测量学和大地测量学？两者之间关系如何？
3. 简述测量学发展历史。
4. 测量学分类标准有哪些？如何分类？
5. 什么是测定？试举例说明。
6. 什么是测设？试举例说明。
7. 地球曲率对测绘成果有何影响？
8. 现代测量技术有哪些？试举例说明。
9. 测绘技术在各相关领域中有哪些具体应用？

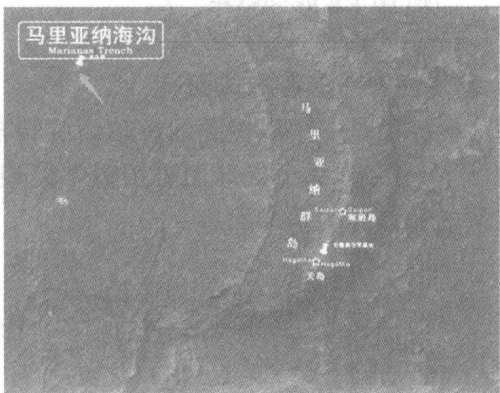
第 2 章 地球基础理论

2.1 地球形状和大小

地球的自然表面高低起伏不平,其形状十分复杂。如图 2-1 所示,地球上最高点位于珠穆朗玛峰顶岩石面,2005 年国家测绘地理信息局(原国家测绘局)精确测定的海拔高程为 8844.43 m;地球上最低点位于马里亚纳群岛附近海沟的斐查兹海渊,在海平面以下 11034 m。在地球上,海洋的面积占 71%,陆地的面积占 29%。



(a) 珠穆朗玛峰测绘标志点



(b) 马里亚纳海沟地形

图 2-1 地球上最高和最低处

由于地球是一个不规则的复杂体,为了能够量化地物在地球上的空间位置等信息,通常用规则的球体来表达真实的地球。利用空间技术理论,结合天文测量方法,可以用椭球来表示真实地球。在测量中,为了表示地物在地球上的高低起伏状态,引入大地水准面概念。大地水准面是指在重力作用下,与静止的平均海水面相重合穿过陆地而形成的封闭曲面。同时,大地水准面包围的地球形体,叫作大地体。

2.2 地球参考椭球

由于大地水准面是不规则的曲面,无法准确描述和计算,也难以在其面上处理测量成果,因此,用一非常接近大地水准面的数学面即旋转椭球面代替大地水准面,用旋转椭球体描述真实地球,作为描述地球表面空间位置的基准,称为地球参考椭球。

2.2.1 地球参考椭球

地球参考椭球可以分为总地球椭球和局部参考椭球。与全球范围内的大地水准面最佳拟合构成的椭球,称为总地球椭球;与某个区域的大地水准面最佳拟合构成的椭球,称为局部参考椭球。

2.2.2 测量外业基准

在测量工程中,一般可以分为外业测量和内业数据处理两个过程。外业测量主要完成数据采集工作,内业是对外业采集到的数据进行处理,以满足工程项目的规范要求。

外业测量的基准面是大地水准面,外业测量的基准线是重力铅垂线。在测量过程中,小范围测绘区域内,可以近似认为重力线是相互平行的,把大地水准面作为水平面进行处理。

2.2.3 测量内业基准

1. 基准面——参考椭球面

参考椭球面是一个以椭圆的短轴为旋转轴的旋转椭球体的表面,参考椭球体的大小和真实地球十分接近,参考椭球面可用数学模型表示,其几何示意如图 2-2 所示。参考椭球面是测量内业计算的基准面。

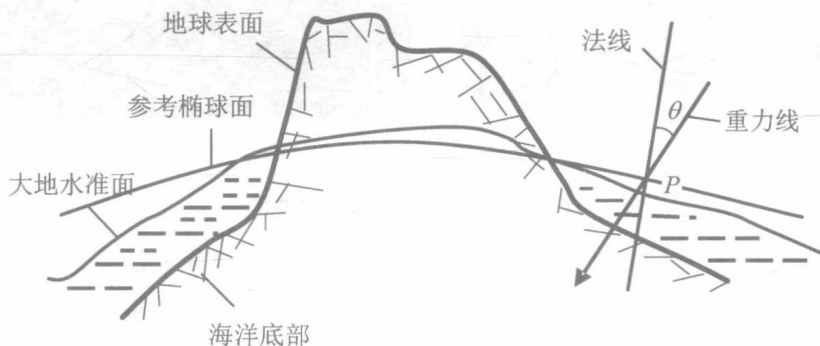


图 2-2 参考椭球面和法线

参考椭球面具有以下 4 点特性:

- (1) 代表地球的数学表面。
- (2) 大地测量计算的基准面。
- (3) 研究大地水准面的参考面。
- (4) 地图投影的参考面。

2. 基准线——法线

在进行内业数据处理时,其理论计算的基准线是法线,如图 2-2 中与地球上任意一点 P 的切线相垂直的直线。