

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程系列教材

工业测量技术与 数据处理

徐进军 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校测绘工程系列教材

工业测量技术与 数据处理

徐进军 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业测量技术与数据处理/徐进军编. —武汉:武汉大学出版社,2014.2
高等学校测绘工程系列教材
ISBN 978-7-307-12812-5

I. 工… II. 徐… III. 工程测量—高等学校—教材 IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 020639 号

责任编辑:李汉保 责任校对:汪欣怡 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:chs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北金海印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:354千字

版次:2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

ISBN 978-7-307-12812-5 定价:30.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

经济和高效是现代工业的重要因素。一个企业的成功很大程度上依赖于产品的质量。而产品的几何特征在质量检验中占有重要地位。90%的质量检验都与几何形状参数有关,几何检验的相对精度都在 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 。对于高精度检测要求和流水线上快速的产品生产,要求测量技术和检验技术能够快速检测产品的质量,记录生产状况,尽快地提供改进生产流程的信息。测量技术除了广泛应用于工业产品的质量检验外,还用于解决大型机械和设备的安装(大型天线、水电站发电机组、核电站设施、离子加速器、吊车轨道、大型飞机等)过程中的技术问题。上述工业设备和部件在制造、安装、放样、质检、质量控制以及变形等方面,精度要求高、测量难度大、数据处理复杂,给测量工程人员都提出了巨大的挑战。要解决这些问题,需要多学科的结合,如机械制造、电子工程、电子技术、计算机技术、工程测量等领域方面的专业技术人员的通力合作,这就从工程测量学中产生了一个新的分支——工业测量。

工业测量的典型特点就是其研究的对象具有范围广、空间小、超常规形状、精度要求极高、自动化和实时性强等。激光技术、精密制造技术、通信技术和电子技术的飞速发展以及大量各种大型特种工程的建设,极大地促进了工业测量技术的进步,出现了一系列精密测量手段(系统),发展了相应的数据处理方法。为此,武汉大学测绘学院于2008年开始对本科生开设《工业测量技术》课程,并编写了此教材。教材的编写重点参考了 Willfried Schwarz *Vermessungsverfahren im Maschinen-und Anlagenbau*, Franz Löffler *Handbuch Ingenieurgeodäsie. Maschinen-und Anlagenbau*、冯文灏《近景摄影测量》、吴翼麟《特种精密工程测量》、李广云《工业测量系统原理与应用》等,同时收集和参考了最新大量的相关文献和研究成果。该教材在近几年的试用过程中,又进行了大量的修改、补充和完善。

本书第1章介绍了工业测量的基础,如工业测量的内容、要求、发展等;第2章给出了工业测量中常用的基本测量技术,包括长度测量、角度测量、高差测量、准直测量、倾斜测量等测量原理与设备;第3章介绍了经纬仪测量系统、全站仪测量系统、工业摄影测量系统、结构光工业测量系统、激光跟踪测量系统、激光扫描测量系统、关节臂式坐标测量系统、室内GPS测量系统和三坐标机测量系统等九类空间三维坐标的测量原理、方法和特点、误差分析及其典型应用领域。第4章紧扣工业测量数据的特点,介绍了机械制造中的形位误差概念、误差理论、曲线拟合理论、曲面拟合理论和坐标变换方法。希望通过此书,一方面可以使测量技术人员了解和熟悉当今用于工业测量领域的现代测量方法;另一方面也可以让其他领域的技术人员了解工程测量中的测量和数据处理方法。

本书的编写得到武汉大学测绘学院领导和同事的关心和支持。非常感谢徐亚明教授、

张正禄教授、潘正风教授等为本教材的内容和结构提出的很好的意见和建议。由于编者知识和水平的限制，书中内容难免会有许多不妥之处，欢迎大家在使用过程中提出宝贵意见和建议。

编 者
2013 年 12 月

目 录

第 1 章 工业测量概述	1
1.1 工业测量的任务与内容	1
1.2 工业测量的技术与方法	3
1.3 工业测量发展概述	5
第 2 章 常用测量方法与测量仪器	7
2.1 长度测量	7
2.2 角度测量	23
2.3 高程测量	29
2.4 准直测量	42
2.5 倾斜测量	51
第 3 章 三维工业测量技术与方法	59
3.1 经纬仪测量系统	59
3.2 全站仪测量系统	71
3.3 工业摄影测量系统	81
3.4 结构光工业测量系统	120
3.5 激光跟踪测量系统	131
3.6 地面三维激光扫描系统	141
3.7 关节臂式坐标测量系统(PCMMS)	159
3.8 室内 GPS 测量系统——Indoor GPS(iGPS)	166
3.9 三坐标测量机测量系统	174
第 4 章 工业测量数据处理	184
4.1 形位误差与公差基础	184
4.2 数据处理的误差理论	189
4.3 曲线(曲面)拟合准则	200
4.4 平面曲线拟合	203
4.5 曲面拟合	210
4.6 坐标变换	215
主要参考文献	221

第1章 工业测量概述

1.1 工业测量的任务与内容

1.1.1 工业测量的任务

工业测量是将各种测量理论、方法和技术应用于精密制造业、精密机械安装工业和精密变形监测等,通过对部件、产品及构筑物的形体进行精密的一维到三维坐标的测量、数据处理与分析来解决设计、仿制(含仿真)、检测、放样、质量控制(含流水线和机器人运动轨迹测定)和动态目标的形状尺寸及运动状态等有关问题。

如在机械制造中,各种生产出来的机械零部件的几何形状误差必须满足设计尺寸才能被使用。一个系统的功能需要大量不同形状和大小的合格零部件共同实现。例如一架飞机有成千上万个零部件,这些零部件在不同的地方由不同的厂家生产出来,最后在总装车间进行装配。出厂时单个零部件的表面都作了封装,装配时,单个零部件是不允许重新加工的。如果这些零部件的实际形状和尺寸与其设计值偏差过大,就会使系统功能大打折扣,甚至使系统无法工作;如果过分追求无偏差,又会造成时间和经济的浪费。因此,只有所有加工零部件的形状和尺寸严格遵守设计要求,才能保证各个零部件的顺利装配。工业测量技术和手段可以求得这类偏差、评判制造质量、进行质量控制。将这些精密制造出来的零部件组成一个系统时,还需要对其精密地准确定位,便于安装,如导轨的直线度、零部件的平整度、垂直度以及零部件之间的相对几何关系(平行、垂直等)。安装后的运营过程中,由于外部温度变化、静载动载作用等,都会产生变形。变形会使零部件之间的相对关系和受力发生变化。如果变形过大,就会严重影响系统的正常运转。因此,还需要精密测量微小变形,便于进行及时校准。

显然,上述任何一项工作都包含了精度和经济性两个方面。以零件的制造工艺为例,如果从使用观点所提出的质量要求,即零件的形状、尺寸精度、表面质量以及物理机械性能满足设计所规定的技术要求。各种机械产品的零件,如轴承、齿轮、螺杆等,都是由不同的材料制成的,并且有一定的结构形状,使之能在系统中起到规定的作用并满足使用要求。这就需要各个环节的产品质量得到保证。而产品的质量是通过几何参数(形状、尺寸、表面粗糙度)、物理—机械参数(强度、硬度、磁性等)以及其他参数(防腐、平衡性、密封性等)来决定。其中几何参数的检验就是工业测量的重要任务之一,也是测量工作者的首要任务。如果从经济的观点提出的效率要求,即要求生产时消耗的物质最少和劳动量最小,生产效率最高。在考虑费用问题时需要注意:费用不能仅仅考虑纯测量费用,还需要估计因为测量过程而中断机器运行或者生产过程所产生的费用。为此,时间因素也是非常重要的。因为许多隐性的费用无法计算,要准确计算合理费用难度很大。但总体原则

是：既要考虑测量费用，还要考虑因为测量造成生产停顿、延期等出现的费用。这里不再深入讨论。

因此，工业对测量技术提出的要求可以主要分为精度和经济性。也就是说，用一种方法进行测量时，需要回答三个问题：

- (1) 该测量方法能做什么？
- (2) 采用该测量方法的费用是多少？
- (3) 相对于其他测量方法可以节约多少成本？

每一种测量方法都有相应的测量精度。不论选用哪种测量方法，其基本出发点是：必要精度而不是尽量高的精度。一般而言，要求的必要精度不应该超过产品规定限差的0.1~0.3倍，许多情况下都是0.1~0.2倍。

评判和选择一种测量方法的步骤可以大致分解为：

- (1) 分析测量任务；
- (2) 选择合适的测量方法(测量精度 $\leq 0.1 \sim 0.3$ 倍限差)；
- (3) 计算测量费用；
- (4) 选定费用最小的测量方法。

在分析测量任务时，既要了解测量方法和测量仪器的性能特点。同时也需要考虑周围环境：机器和交通引起的抖动、测量仪器的稳定性、强温度场、电磁场、放射性、空气紊流、照射、反射、蒸汽、现场空间情况和测量对象的状态等。表 1.1.1 中列出的系列问题可供参考。

表 1.1.1 测量任务分析

问 题	可能情形的问题分析
测量对象归结于哪类基本测量任务？	一维、二维还是三维？
测量对象的尺寸？	大型、中型还是小型？
精度要求？	根据限差取多大比例系数？
测量对象是否可以搬移？	是/否？
重复测量时间间隔是多少？	经常？很少？
如何测量对象上的特征点？	接触式/非接触式？
测量需要的时间？	长/短？
提交什么样的测量成果？	表格/图形/提供决策？
成果实时性要求？	高/低？
周围环境(温度、震动等)对精度的影响？	大/中/无影响？

1.1.2 工业测量的内容与特点

1. 工业测量的内容

工业测量目标繁多，其应用领域也相当广泛。主要有航空航天、汽车、飞机、船舶、离子加速器、大型天线、轨道交通等设备的高精度检测、安装、定位和变形监测等；测量

精度要求至少在毫米级,亚毫米级,或者更高。主要对象包括:

- (1) 外形测量,如飞机外形测量;轿车外形测量;船体外形测量、工程管道等;
- (2) 工业设备、离子加速器、大型天线等的测量、放样、安装、变形测量等;
- (3) 风洞试验室、水工实验室中、汽车碰撞试验等目标的动力学参数测定;
- (4) 油船舱体容积的测定;

(5) 大量人工构筑物内结构测量,如铁路公路隧道、城市地下铁道、海底隧道或水下隧道、矿山大型巷道和采空区、各类地下军事工程、地下防空工程、舰艇洞库、飞机洞库、油库与弹药库、水电站的排水泄水洞、排沙洞、机组叶片和坝内结构、各类运输车船的内结构等;

(6) 文物测量,如窟室、雕塑及亭台楼阁等内外结构;

(7) 质量检测:流水线机器人状态的检查、各类零部件参数检测等。

2. 工业测量的特点

常规工程测量主要以土木建筑工程等露天目标的空间坐标和其他几何尺寸为主要测量目的,以常规测角仪器、测距仪器和 GPS 全球定位系统为主要设备,点位绝对精度较低和测量频率不高,作业距离较长,目标物尺寸较大。

工业测量主要以车间或实验室内的模型、工业产品或其零部件的几何量或其他物理量(如色彩等)及其之间的关系为测量目的,采用多种多样的测量理论、方法和设备,几何点位精度高、作业距离较短,目标几何尺寸较小,测量频率较高。

总之,工业测量具有工作空间小、精度要求高、尺寸差别大、技术手段多,数据处理复杂,成果除了提供坐标外,主要基于产品的几何特征,如长度、直线度等。

3. 工业测量与邻近学科的关系

作为工程测量的一个分支,工业测量不仅与工程测量的理论与方法紧密联系,而且大量应用了大地测量、摄影测量、计算机技术与通讯、图像处理、物理学、数学分析和数据处理等学科的理论与方法。

工业测量中的一维、二维、三维坐标采集原理与方法就直接来自于工程测量、大地测量和摄影测量相关理论与方法;工业测量系统本身也是光学、精密机械、电子、图像分析、计算机处理、数据通讯等技术的集成。在后续数据处理中则用到大量的数学知识。同时,采用工业测量设备进行数据采集和随后的数据处理与分析过程中,了解和掌握仪器本身的结构特点、周围环境的物理特征及其与测量结果的关系等知识,对于工业测量工作者而言,则是非常重要的。

工业测量既是应用技术,又有自己的独特方法。只有在充分掌握了以上学科的基本知识的基础上,结合实际工程的特点,加以灵活运用,才能高效完成实际工业测量任务。

1.2 工业测量的技术与方法

工业测量一个总的特点就是测量对象范围小,精度要求高。因此,在工业测量中,按照几何量维数来分,可以分为一维测量、二维测量和三维测量。

一维测量主要通过相应的技术手段和方法对长度及其变化、高差及其变化以及方向(准直)和倾斜等方面的测量。这里用到的传感器有高精度电子经纬仪、工业型全站仪,准直仪、倾斜仪和位移计等。

二维测量主要通过相关技术与方法对物体的平面进行测量，如像片测量设备、绘图仪，二维激光扫描仪，全站仪角度等。二维测量可以通过一维测量的组合获得，也可以通过三维测量降维获得。

三维测量主要是采用相关的测量系统获取物方点三维坐标。这些测量系统分为经纬仪前方交会测量系统(主要通过至少两台经纬仪进行角度前方交会，并测量天顶距得到目标点的三维坐标)、全站仪测量系统(主要通过测量目标点的空间距离、水平角和垂直角来得到其三维坐标)、工业摄影测量系统(主要通过数字立体像对进行同名点匹配测量和光束法平差计算得到目标点的三维坐标)、结构光测量系统(摄影测量与计算机视觉测量获取投影在物体表面光条的三维坐标)、激光扫描测量系统(获取目标点的三维坐标同于全站仪系统，但测量的方式不一样，全站仪系统一般是配合棱镜或反射膜片的单点测量，扫描仪系统则是无合作目标——物体表面的漫反射的点阵扫描式测量)、激光跟踪测量系统(获得坐标的原理也同于全站仪系统，但激光跟踪仪测距采用的是激光干涉模式。因此，测距精度极高，三维坐标的精度也极高)、三坐标测量系统(主要是测量触头在三个相互垂直的笛卡儿直角坐标系上的移动量确定测点的三维坐标)、关节臂式坐标测量系统(类似于空中支导线获取测点的三维坐标)和 i—GPS 系统(融合了 GPS 定位技术和角度前方交会技术的空间定位方法)。在这些测量系统中，三坐标测量系统是以机械或者光电的方式获取触头在三个相互垂直的轴上移动距离得到空间点的三维坐标，所以有时被称为硬性三坐标测量系统；而另外几种测量方式则是通过其他观测值经数学模型转换成空间三维坐标，如角度—距离的球坐标转换、像点坐标转换等，所以这些方法也被称为柔性三坐标测量系统。表 1.2.1 给出了这些方法的一个简单的对比。

表 1.2.1 三维坐标测量系统的比较

系统	基本组成	单点定位原理	技术特点	精度	适用场合
经纬仪角度前方交会	经纬仪，基准尺	角度前方交会	价格低，灵活、测量速度慢，一般需要标志点	精度较高，分布不均	小空间，少量点人工逐个测量
全站仪测量系统	全站仪，棱镜	空间极坐标	价格较高，灵活，测量速度较快，需要合作棱镜	精度不高，分布均匀	较大空间，少量点逐个自动测量
摄影测量系统	数码相机，基准尺	角度前方交会	价格低，灵活，测量速度快，效率高，一般需要标志点	精度高，分布均匀	小空间，大批点同时测量
结构光测量系统	摄像机，投影器	角度前方交会	价格低，灵活，测量速度快，效率高，无须标志点	精度高，分布均匀	小空间，大批点同时测量
激光跟踪测量系统	跟踪仪，棱镜	空间极坐标	价格高、灵活，测量速度极快，需要合作棱镜	精度极高，分布均匀	小空间，大批点逐个测量

系统	基本组成	单点定位原理	技术特点	精度	适用场合
激光扫描测量系统	三维激光扫描仪	空间极坐标	价格高、灵活；测量速度极快，无标志，无合作棱镜	精度不高，分布均匀	较大空间，大批点准同时自动测量
关节臂坐标机测量系统	关节臂式坐标机	空间极坐标	价格高、灵活、测量速度较快，无标志，无合作目标	精度高，分布均匀	狭小空间内隐蔽点的测量
三坐标量测机	三坐标量测机	直线测长	价格高、灵活性差、测量速度快，无标志，无合作目标	精度高，分布均匀	小空间、多点逐一自动测量
I-GPS 系统	发射器、接收器	角度前方交会	价格高、灵活、测量速度快，无标志，无合作目标	精度高，分布均匀	大范围、大量点同时独立测量

1.3 工业测量发展概述

1980 年美国的 Johnson 首次介绍和应用了经纬仪工业测量系统，最先采用 K&E 公司生产的 DT—1 型电子经纬仪，进行双站系统的工业测量。随后，现代电子经纬仪、全站型电子速测仪及近景摄影测量的发展和应用，改变了以接触方式为主的传统工业三维坐标测量方法，出现了以空间前方交会原理为基础，以电子经纬仪及摄影相机为传感器的光学三维坐标无接触工业测量系统。

高性能电子计算机、电子经纬仪、全站仪、数码相机、激光技术的进步，为以计算机控制为特征的测量、存储、计算一体化的现代测量方法提供了硬件保障。世界上一些测量仪器生产厂家纷纷将电子经纬仪、全站仪、激光扫描仪、激光跟踪仪以及数字摄影测量技术等引入到工业测量领域，形成了对工业测量产生深刻影响的“工业测量系统”。如瑞士 Wild 的遥测系统 RMS；瑞士 Leica 公司的电子坐标测量系统 ECDS3、自动经纬仪测量系统 ATMS；德国 Zeiss 公司的工业测量系统 IMS；美国 K&E 公司的解析工业测量系统 AIMS；日本 Sokkia 公司的三维测量流动工作站 MONMOS，等等，都是比较成熟的商品化大尺寸三坐标测量系统。

瑞士 Leica 公司，将经纬仪测量系统(MTM)、全站仪极坐标测量系统(STM)、激光跟踪测量系统(LTM)及数字摄影测量系统(VGM)等工业测量系统都统一到最新的 Axyz 软件，可以对各种数据采集硬件作统一的管理，测量软件的界面一致，操作灵活方便，代表了工业三维坐标测量系统的最新进展。

目前，工业测量系统已广泛地用于制造业、工程建筑业等领域。如飞机、轮船、汽车制造中的质量检验和安装都用工业测量系统来完成。世界上著名的飞机和汽车生产，都已用工业测量系统成功地保证了质量，提高了生产效率。欧洲空间研究与技术中心于 1986 年使用 RMS2000 系统成功地对卫星通讯地面天线的精度及性能进行了测量；德国为保证水泥转炉滚筒圆心位于同一直线上，采用 Zeiss IMS 工业测量系统进行定线测量；日本采

用三维流动测量工作站 MONMOS 系统，对船舶制造中船体合拢装配进行实时测量。

我国对经纬仪、全站仪工业测量系统的研究最早开始于 20 世纪 80 年代末期。解放军信息工程大学测绘学院 1994 年成功研制出 TSST 经纬仪三维坐标测量系统，推出基于多台经纬仪/全站仪/数码相机等作为传感器的三坐标测量系统 MetroIn。在工业测量系统的应用实践方面也取得大量成功的经验。

武汉大学潘正风教授、冯文灏教授等对工业测量的理论与方法做了非常系统和深入的研究，发展了工业测量系统和理论，在精密工程建设中发挥了重要作用。

西安交通大学经过多年研究，推出了具有自主知识产权的工业摄影测量实用化产品——“XJTUDP 三维光学点测量系统”，并推出了系列产品，用于测量各种静态变形、动态变形，性能指标达到国外同类产品水平。该技术已应用在汽车工业、航空航天工业、船舶工业、建筑业等的质量检测、变形测量、逆向工程等。

近年来，随着科学技术的飞速进步和工业建设事业的迅猛发展，各种复杂的工业工程纷纷涌现。这些工程的兴建，对测量手段、测量精度以及数据处理方法等提出了更高的要求。其重要特点就是高精度、实时性、自动化。不同工业设备具有不同的安装特点和精度要求，如何充分利用现有的仪器和设备，研究有效的工业安装测量与检测技术，开发相应的数据处理和分析软件，或者针对不同的测量任务和对象，研究新的理论与方法，开发新的多用途或者专用的工业测量集成系统(硬件和软件)，都是目前工业测量的发展方向。

第2章 常用测量方法与测量仪器

本章介绍的常用测量方法和测量仪器主要是针对一维测量和二维测量的，主要包括距离及其变化测量、角度测量、倾斜测量、准直测量和高差测量。这些测量技术既可以在实际工作中独立使用，也是进行二维测量和三维测量的基础。

2.1 长度测量

目前在工业测量领域常用的长度测量方法大致分为三类：机械法、电磁波测距法和激光干涉法。

在机械制造业中最早应用的是采用机械原理的测长技术。1631年发明游标细分原理；18世纪中叶，人们已应用螺纹放大原理进行长度测量。机械测长技术能达到很高的精确度，迄今仍是工业测量中的基本测量技术之一。

应用光学原理的测长技术也出现较早。20世纪20年代前后已应用自准直、望远镜、显微镜和光波干涉等原理测长，使工业测量进入不接触测量领域，解决了一些小型复杂形状工件，诸如螺纹的几何参数、样板的轮廓尺寸和大型工件的直线度、同轴度等形状和位置误差的测量问题。

应用电学原理测长技术是在20世纪30年代初期发展起来的。首先出现的是应用电感原理的测微仪。后来由于电子技术的发展，电学原理的测长技术发展很快。这项技术可以把微小误差放大到百万倍，也就是说0.01微米的误差值可以在10毫米的刻度间隔表示出来。电子线路实现了各种演算和自动测量。

20世纪60年代中期以后，随着近代光学、电子学的进步和各种新颖光源（激光、红外光等）相继出现，电磁波测距技术得到迅速的发展，出现了以激光、红外光和其他光源为载波的光电测距仪和以微波为载波的微波测距仪。因为光波和微波均属于电磁波的范畴，故这类仪器又被统称为电磁波测距仪。由于光电测距仪不断地向自动化、数字化和小型轻便化方向发展，大大地减轻了测量工作者的劳动强度，加快了工作速度，所以在各种工程测量中得到广泛使用。

2.1.1 机械法测距

在超短距离测量中，最常用的就是游标卡尺和千分尺等。游标卡尺由主尺和附在主尺上能滑动的游标两部分构成。主尺一般以毫米为单位，而游标上则有10、20或50个分格，根据分格的不同，游标卡尺可以分为十分度游标卡尺、二十分度游标卡尺、五十分度游标卡尺等。游标卡尺的主尺和游标上有两副活动量爪，分别是内测量爪和外测量爪，内测量爪通常用来测量内径，外测量爪通常用来测量长度和外径。如图2.1.1、图2.1.2所示。

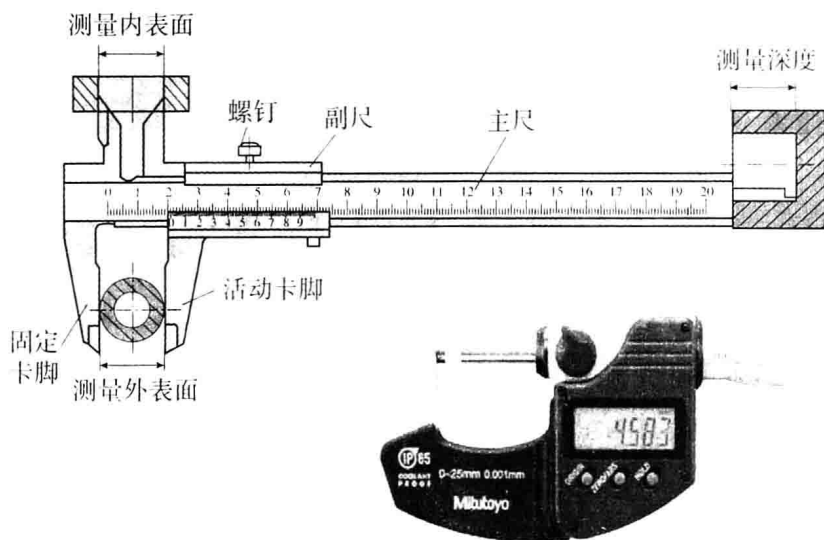


图 2.1.1 游标卡尺和千分尺

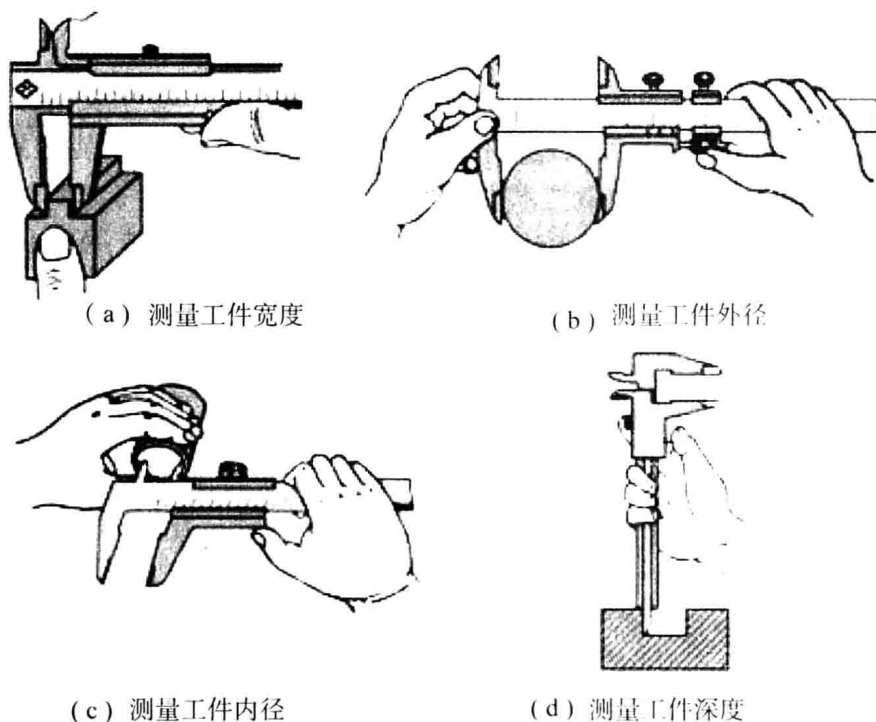


图 2.1.2 游标卡尺的应用

游标卡尺主要用于测量孔、轴的内直径、外直径或者物体的厚度，对于电子读数的分辨率达到几个微米。

对于较长距离测量，CERN 于 1962 年研制的自动化钢瓦测距 Distinvar。如图 2.1.3 所示，该仪器由三部分构成：

- (1) 直径为 1.65mm 带尺夹的钢瓦线尺，该线尺被引张在两个控制点之间；
- (2) 带有标准插销的测距仪；
- (3) 固定插销尾座。

后两者安插于控制点的标准插座内。这些标准插座的几何中心位于控制点中心。如图 2.1.3 所示。

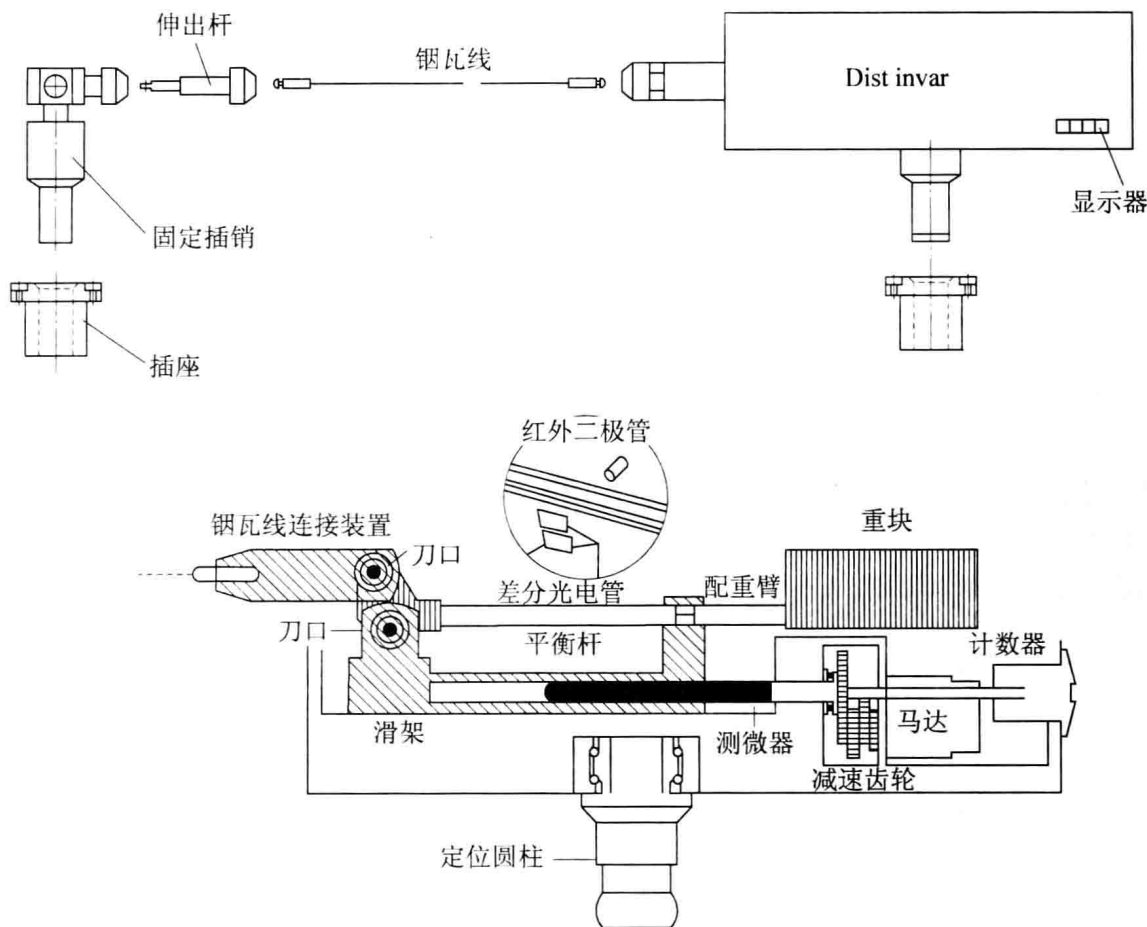


图 2.1.3 Distinvar 组成与工作原理

测量时，设备的第(2)、第(3)部分安装在控制点上的插座内，且将钢瓦丝的夹头塞进尾座和仪器的夹孔中锁定。测距开始后，马达转动带动丝杆转动，同时记数盘开始计数，丝杆的转动带动整个滑架平移，钢瓦丝逐渐被拉紧，当达到预定拉力时，光电传感器使马达停转，待线尺稳定和计数器读数数字微小波动停止以后，在计数盘读数，可以估读到 0.005mm。测量过程中要加入温度改正和尺长改正。

该仪器使用的钢瓦线尺的长度在 0.4 ~ 50m 之间，滑架的总行程是 50mm，读数内符合精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ ，测量中误差在 $\pm 0.03 \sim 0.05\text{mm}$ 。

2.1.2 电磁波测距

1. 基本原理

如图 2.1.4 所示，电磁波测距仪发射电磁波，经过棱镜返回到测距仪的接收系统。电磁波测距是直接(脉冲测距法)或间接(相位测距法)测得电磁波在待测距离两点之间往返一次的传播时间 t 。若实际光速为 v ，可以按式(2.1.1)求得距离 D 。

$$D = \frac{1}{2}v \cdot t = \frac{1}{2} \frac{c}{f} t \quad (2.1.1)$$

(1) 直接法测量时间(脉冲测量法)基本原理

如图 2.1.5 所示，首先瞄准目标，然后接通激光电源，启动激光器，通过发射光学系

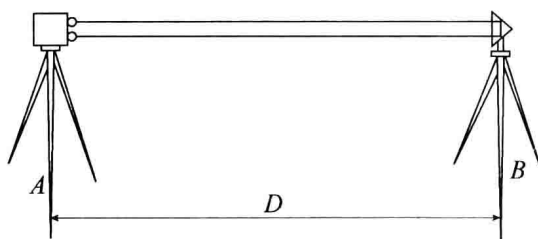


图 2.1.4 电磁波测距仪

统，向瞄准的目标发射激光脉冲信号。同时，采样器采集发射信号，作为计数器开门的脉冲信号，启动计数器，钟频振荡器向计数器有效地输入钟频脉冲，由目标反射回来的激光回波经过大气传输，进入接收光学系统，作用在光电探测器上，转变为电脉冲信号，经过放大器放大，进入计数器，作为计数器的关门信号，计数器停止计数。计数器从开门到关门期间，所进入的钟频脉冲个数，经过运算得到目标距离，在显示器上显示出来。

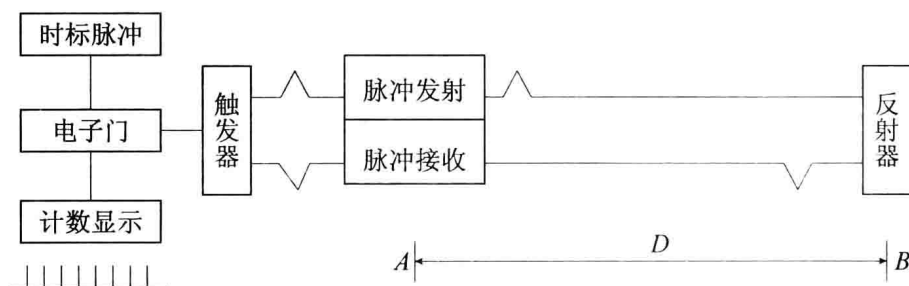


图 2.1.5 脉冲式测量时间

(2)间接法测量时间(相位测量法)基本原理

如图 2.1.6(a)所示，测定 A, B 两点之间的距离 D 。将相位式测距仪置于 A 点，反射器置于 B 点。测距仪发射出连续的调制光波，调制光波通过测线到达反射器，经反射后被仪器接收器接收，如图 2.1.6(b)所示。调制光波在经过往返距离 $2D$ 后，相位延迟了 Φ 。我们将 A, B 两点之间调制光波的往程和返程展开在一直线上，用波形示意图将发射波与接收波的相位差表示出来，如图 2.1.6(c)所示。

设调制光波的调制频率为 f ，其周期 $T = \frac{1}{f}$ ，相应的调制波长 $\lambda = cT = \frac{c}{f}$ 。由图 2.1.6(c)可知，调制光波往返于测线传播过程所产生的总相位变化 Φ 中，包括 N 个整周变化 $N \times 2\pi$ 和不足一周的相位尾数 $\Delta\Phi$ ，即

$$\Phi = N \times 2\pi + \Delta\Phi$$

根据相位 Φ 和时间 t_{2D} 的关系式： $\Phi = \omega t_{2D}$ ，其中 ω 为角频率，则

$$t_{2D} = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{1}{2\pi f}(N \times 2\pi + \Delta\Phi) \quad (2.1.2)$$

将上式代入式(2.1.1)中，得

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{2} \frac{c}{f} \left(N + \frac{\Delta\Phi}{2\pi} \right) = \frac{1}{2} \lambda (N + \Delta N) \\ &= L(N + \Delta N) = LN + \Delta L \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

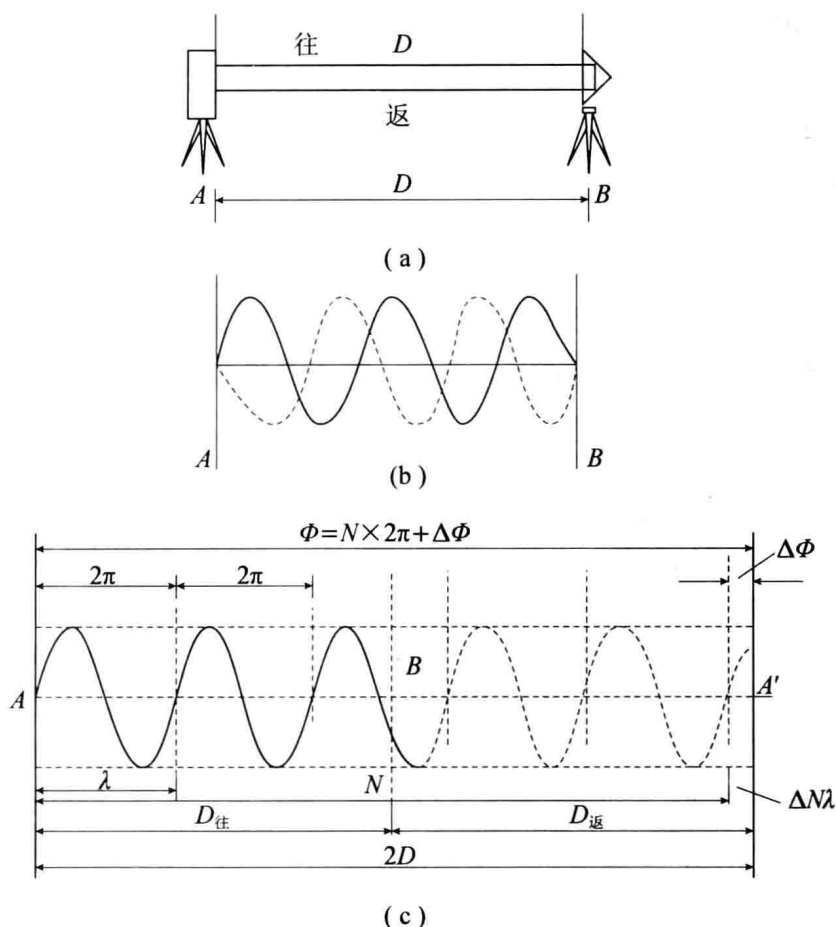


图 2.1.6 相位式测量时间

式中 $L = \frac{c}{2f} = \frac{\lambda}{2}$ ，为测尺长度； N 为整周数； $\Delta N = \frac{\Delta\Phi}{2\pi}$ ，为不足一周的尾数。式(2.1.3)为相位式光电测距的基本公式。由此可以看出，这种测距方法同钢尺量距相类似，用一把长度为 $\frac{\lambda}{2}$ 的“尺子”来丈量距离，式中 N 为整尺段数，而 $\Delta N \times \frac{\lambda}{2}$ 等于 ΔL 为不足一尺段的余长。则

$$D = NL + \Delta L \quad (2.1.4)$$

式中， L 为已知值， ΔL 为测定值。

由于测相器只能测定 $\Delta\Phi$ (或 ΔL)，而不能测出整周数 N ，因此使相位式测距公式式(2.1.3)或式(2.1.4)产生多值解。为此，需借助于若干个调制光波的测量结果 (ΔN_1 , ΔN_2 , $\dots$ 或 ΔL_1 , ΔL_2 , $\dots$) 推算出 N 值，从而计算出待测距离 D 。这种方法也称为小数重合法。就像用不同长度的几把“尺子”去量同一个距离，只要得到各次测量值的尾数，即可推导出实际长度。因此，利用若干单波长组成长度逐级增加的“合成波长链”，根据初测值及各级合成波长对应的尾数，从最高级合成波长开始，逐级求解被测长度使之逼近真值。“尺长”最短的波确定测距精度，“尺长”最长的波确定范围。

为了克服外界大气因素的影响，测量更高精度的距离，比如说亚毫米级，则需在测距仪内部设计上采取许多独特的方法。

目前，Leica TDA5005，在 120m 范围内使用精密角隅棱镜 (CCR) 的测距精度能达到