

光斑

定位技术

GUANGBAN DINGWEI JISHU

易亚星 李忠科 著
白东颖 何 鸣



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光斑定位技术

易亚星 李忠科 白东颖 何鸣 著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书围绕基于光斑位置检测的激光检测技术展开,详细论述了光电测量的分支——光斑定位技术及其应用。全书共分为两篇:第一篇重点阐述光斑位置检测技术的原理及相关器件;第二篇详细论述了光斑定位技术在同轴度测量、倾角测量、表面三维形态监测、牙颌局部变形及咬合运动虚拟再现等方面的应用。

本书内容涉及光学、机械、电子、计算机等诸多学科的交叉渗透,以军事、医学和水电领域的实际需求为背景,以光斑位置测量技术为基础,是光电测量技术理论与实践的统一体。本书可以作为计算机测量、激光检测等专业的高校学生理论联系实践的辅导教材,还可作为相关领域科研人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

光斑定位技术/易亚星等著. —北京:国防工业出版社,2017.11

ISBN 978-7-118-11400-3

I. ①光… II. ①易… III. ①光电检测—研究 IV. ①TN2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第288837号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 223千字
2017年11月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 56.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

没有现代的测量技术，就没有现代的工业。随着计算机、激光器、光电传感器技术的飞速发展，光电测量技术已经成为许多科技工作者的重点关注对象和研究热点。光斑定位技术作为光电测量技术的一个分支，相关理论的研究与实践应用也在不断的充实与完善。本书旨在将笔者多年在工程实践中，所利用的光斑定位技术理论、器件、作法作一系统论述，为这一领域的研究人员及工程人员提供参考与借鉴，同时抛砖引玉，期待后来学者将光电测量领域的研究不断丰富、不断深入、不断创新。

本书以光斑位置测量及相关的数据处理技术为基础，以多种工程与医学应用的实际需求为牵引，重点阐述了光斑定位技术在军事工程、水利工程、建筑测量、口腔医学中的一些理论和技术问题。本书的特点是理论知识与实际应用紧密结合，尤其注重理论对于实践的指引作用以及理论在实践中的合理运用。可以说，本书的研究成果是光电测量技术理论与实践的统一体，凡是本书所提出的方法，都经过了实际验证。本书可以作为计算机测量、激光检测等专业的高校学生理论联系实践的拓展与延伸读本，还可作为相关领域科研人员的参考资料。

本书共分为两篇。第一篇从光电测量技术的特点入手，主要探讨了光斑位置测量技术的理论基础及其相关器件的特点特性，详细阐述了光斑定位技术的原理及特点、光斑位置传感器件、半导体激光准直光源、光斑位置测量中的数据处理，重点分析了 PSD 器件应用于光斑定位技术中存在的问题及解决方法。第二篇着重从原理、方法和实现三个方面介绍了光斑定位技术在工程与医学等领域的应用，对同轴度测量、倾角测量、表面三维形态测量、牙颌局部变形及咬合运动虚拟再现等实际问题提出了可行性方案与实验验证，多项研究成果已获国家专利，并制造出可供实际应用的测量装置或仪器。

本书编者长期从事光电测量技术的教学、实践及科研学术研究，具有丰富的理论及实践经验，为本书奠定了良好基础。第 1 章和第 2 章由白东颖编写；第 3 章由何鸣编写；第 4、5 章由易亚星编写；第 6、7、8、9 章由李忠科编写。全书由白东颖统稿，由易亚星主审。

另外，本书还有许多地方有待深入和拓展。例如，本书仅讨论了轴—轴同轴度测量问题，更困难的孔—孔同轴度测量问题尚未涉及，在安装调试过程中不能转动的特大型轴系的测量也尚未进行研究，在拱坝变形观测、激光扫描技术等领域还有很大的研究空间。

本书是编者多年的研究工作和工程实践的系统总结。限于编者水平，错误、疏漏之处不可避免。之所以效野人献曝，实为抛砖引玉，若能为同行诸君提供一点借鉴，则不胜欣喜；若能得到专家指导，则感激不尽。

作者

2017.5

目 录

第一篇 光斑定位技术

第 1 章 光电测量技术	2
1.1 引言	2
1.2 光电测量技术特点与分类	5
1.2.1 光电测量技术特点	5
1.2.2 光电测量技术分类	5
第 2 章 光斑位置检测技术	7
2.1 光斑位置测量技术	7
2.1.1 光斑位置测量概述	7
2.1.2 光斑位置测量技术	7
2.2 光斑位置测量技术应用	8
2.2.1 同轴度测量技术	8
2.2.2 建筑变形测量技术	8
2.2.3 光学三维面形测量技术	9
2.2.4 激光三维面形测量技术	10
2.2.5 运动测量技术	12
2.3 光斑位置测量中的数据处理	13
第 3 章 光斑位置检测器件	14
3.1 实现光斑位置检测的器件	14
3.1.1 CCD 器件	15
3.1.2 CMOS 图像传感器	16
3.1.3 PSD 器件	17
3.2 半导体激光准直光源	18
3.2.1 激光二极管 (LD)	18
3.2.2 准直透镜	18
3.2.3 整形棱镜	19

3.2.4	驱动电路	19
3.3	PSD 器件	19
3.3.1	横向光电效应简介	19
3.3.2	PSD 性能指标	20
3.3.3	影响 PSD 测量精度的因素	22
3.4	PSD 光斑定位技术	22
3.4.1	PSD 应用的原则	22
3.4.2	光斑定位算法	22
3.4.3	与光斑定位有关的二维表快速检索算法	25
3.4.4	PSD 器件非线性误差的神经网络修正方法	28
3.4.5	一维光斑位置传感器非线性误差修正	31
3.5	环境光的影响与消除	33
3.5.1	环境光的影响模式	33
3.5.2	消除环境光影响的方法	34
3.5.3	试验结果	36
3.6	用一维 PSD 实现二维检测	36
3.6.1	扩大 PSD 量程的方法	36
3.6.2	用一维 PSD 实现二维检测	37
3.7	光线定位技术	38
3.8	CMOS 图像传感器用作光斑位置传感器的研究	39
3.8.1	结构形式及物镜几何畸变的校正	39
3.8.2	基于 OV9120 的光斑位置传感器设计	40
3.9	大相对孔径半导体激光准直镜的设计	44
3.9.1	半导体激光束经圆孔的耦合效率	45
3.9.2	三片式大相对孔径激光准直物镜的设计	46

第二篇 光斑定位技术应用

第 4 章	PSD 同轴度测量	50
4.1	概述	50
4.1.1	同轴度测量问题	50
4.1.2	同轴度的表述	50
4.1.3	传统的测量方法	51
4.2	同轴度测量系统	52
4.2.1	单光源同轴度测量仪	52

4.2.2	双光源同轴度测量仪	52
4.2.3	同轴度测量系统组成	53
4.3	测量原理	53
4.3.1	数学模型	54
4.3.2	测量模型	59
4.3.3	计算机仿真试验	60
4.4	测量方法	61
4.4.1	四点测量法	61
4.4.2	任意角度测量法	63
4.5	单光源同轴度测量仪原理	65
4.6	测量结果	66
4.7	两轴分离式同轴度测量方法	68
第5章	激光倾角测量与自动水准、垂线仪	70
5.1	概述	70
5.2	平面倾斜的表述	71
5.3	二维数字水平仪的组成与工作原理	71
5.4	计算机仿真试验	76
5.5	性能指标	78
5.6	自动安平激光水准仪	79
5.6.1	激光自动安平机理	79
5.6.2	自动安平激光水准仪的结构	80
5.7	自动铅垂激光垂线仪	80
5.7.1	井式垂线仪	80
5.7.2	塔式垂线仪	81
5.8	自动安平水准仪的改进	81
第6章	激光拱坝变形监测	83
6.1	概述	83
6.2	分布式互联测点六自由度运动—变形观测方法	83
6.2.1	测点设置的原则	84
6.2.2	六自由度相对位移测量	84
6.3	拱坝变形激光观测方法	85
6.3.1	测量坐标系	85
6.3.2	测量系统结构	85
6.3.3	测量数学模型	87
6.3.4	误差分析	88

6.3.5	测量数据滤波处理	89
6.3.6	计算值与计算机仿真结果对照	90
6.3.7	重力修正	90
6.4	拱坝变形观测的实现	91
6.4.1	测台电路设计与实现	91
6.4.2	上位机软件设计与实现	95
第7章	牙模激光三维扫描	100
7.1	概述	100
7.2	低盲区线光源牙模激光三维扫描系统	101
7.2.1	系统结构与原理	102
7.2.2	神经网络结构设计与学习算法选择	103
7.2.3	处理过程与效果	104
7.3	点光源牙模激光三维扫描系统	107
7.3.1	点光源牙模激光三维扫描仪结构	107
7.3.2	坐标计算	109
7.3.3	误差分析	110
7.3.4	调整与标定	111
7.4	点光源牙模激光三维扫描仪的电路设计	114
7.4.1	CCD 元件	115
7.4.2	A/D 变换器	116
7.4.3	微处理器	117
7.5	点光源牙模激光三维扫描系统的软件设计	118
7.5.1	控制命令与数据格式	118
7.5.2	扫描仪微处理器软件	118
7.5.3	扫描控制软件	120
第8章	牙颌模型三维数据处理技术	122
8.1	概述	122
8.2	模型三维数据集合的生成	123
8.2.1	双路采样数据的融合	123
8.2.2	数据的修补与三维坐标的生成	124
8.3	模型的三维变换与显示	128
8.3.1	矢量的齐次坐标表示与坐标变换	128
8.3.2	牙颌模型整体三维坐标变换与真实感图形生成	130
8.4	基于小波变换的数据降噪与压缩	131
8.4.1	深度数据的小波降噪处理	131

8.4.2	数据基于 EZW 的小波压缩处理	134
8.5	基于伪三维显示的牙颌模型交互测量	140
8.5.1	三维坐标交互测量的基本方法	141
8.5.2	模型的伪三维图形显示	142
8.5.3	牙颌模型三维测量功能的实现	142
8.6	三维数据分离与咬合接触分析	145
8.6.1	牙龈与牙龈的边界分离	145
8.6.2	牙列咬合分析	148
8.7	牙颌模型立体像对的生成与显示	151
8.8	牙颌模型上局部牙齿的移动与显示	153
第 9 章	牙颌局部变形及咬合运动虚拟再现	156
9.1	概述	156
9.2	局部变形技术综述	157
9.2.1	模型表达方式相关的变形技术	157
9.2.2	独立于模型表达方式的变形技术	158
9.3	数字牙冠变形技术研究	160
9.3.1	基于过渡矩阵的数字牙冠局部变形方法	161
9.3.2	基于人工神经网络的牙颌三维变形方法	163
9.4	咬合运动虚拟再现研究	164
9.4.1	咬合运动过程测量原理	165
9.4.2	咬合运动过程测量方法	165
9.4.3	误差分析与实验	166
9.4.4	激光发射装置	169
参考文献		171

第一篇

光斑定位技术

第1章 光电测量技术

1.1 引言

光斑位置测量技术 (Beam Spot Location Measuring Technique) 意为通过对光斑的几何中心或能量中心位置的检测实现对其他物理量间接测量的技术。回顾人类社会的文明历史,人们在光与影的世界中感受着、认识着我们身边的三维世界。诗人用如画的诗句描绘光与影,如“半亩方塘一鉴开,天光云影共徘徊”,而画家则用光与影表达如诗的画面。从文艺复兴时期的巨匠达·芬奇 (Leonardo Da Vinci) 到梵高 (Vincent Van Gogh, 1853—1809)、毕加索 (Pablo Picasso, 1881—1973),大师们运用光与影表达着对社会和自然的观察和理解。科技与艺术的发展是和谐的,在远古时代人们在制作陶器的同时也创作了陶器上精美的艺术图案。艺术家用心灵感受的事物往往是科学家所关注和思考的事物。人们很早以前就懂得利用光斑或阴影进行测量,日晷是利用太阳光进行时间测量的最古老的专用仪器,而卡文迪许扭称则是现代光斑测量技术的开端,它被用来进行万有引力的测量。尽管在卡文迪许扭称时代的光源技术和光斑位置检测手段还比较原始,但有一点是肯定的,那就是这种技术一开始就是作为精密测量技术出现的。因为光波的波长极短,因此能得到很高的测量精度。此外,光斑测量具有非接触性,对被测对象几乎没有力的作用,因而不会改变对象的运动状态。

光斑位置测量技术属于光电非接触测量的技术范畴。光电非接触测量技术的含义是:用光学和电子学方法为手段,不与被测对象有机械接触,获取被测对象的某方面属性数据,对数据加以分析处理,从而掌握对象的性质。其他的非接触测量技术有声学测量技术、电磁测量技术等。在20世纪科学技术飞速发展的背景下,以光学为基础的实用技术渗透到技术领域的方方面面,如光通信、光计算、光医疗、光存储、光学信息处理,凡此种种,光学测量技术正是丰富多彩的光学实用技术之一。而构成该技术基础的学科则包括了半导体 (Semiconductor)、光学 (Optics)、电子学 (Electronics)、应用数学 (Applied Mathematics)、人工智能 (Artificial Intelligence) 等诸多学科。描述电子电路的线性系统理论,被用来分析光学系统的行为;傅里叶变换理论为光学信息处理铺设了坚实基础;人工智能的方法被用来指导光学系统的优化设计;正是由于半导体激光器的出现,才有了精巧的激光测距仪。多学科的交叉融合促进了光

电测量技术的进步，而光电测量技术的进步又会为其他学科的成长提供营养。技术进步的历史证明了辩证唯物论的观点：世界上各事物之间是相互联系的。

当今光电测量技术获得飞速发展的一个重要因素是计算机技术的进步。一方面，计算机被直接用于光学系统和光学元件的设计与加工，为光电测量技术创新提供了基础；另一方面，计算机在各个领域的应用又为光电测量技术的应用提供了新的舞台、新的空间。新的空间产生了新的需求，新的需求意味着新的利润增长点，在市场经济社会中，利润刺激着技术进步的脚步永不休止。此外，计算机强大的数据处理能力担负着光电测量所获数据的深加工任务，成为光电测量技术效能的倍增器。

光电测量技术获得飞速发展的另外两个重要因素是激光器和光电传感器。1916年爱因斯坦(A.Einstein)发表《关于辐射的量子理论》一文，首次提出受激辐射概念，为激光器的发明奠定了理论基础。1960年7月，美国休斯研究所实验室的年轻科学家梅曼(T.H.Malman)成功研制并运转了第一台红宝石激光器。激光器的问世是20世纪物理学的重大进展之一，是光学领域具有革命意义的重大突破，其对科技、社会、经济、军事、文化和人民生活产生了长远而深刻的影响。在测量领域，“激光测量所取得的成就蔚为大观，其应用价值及科学意义不可估量”(王大珩)。光电传感器将光信号转变为电信号，从而实现对物理量的测量。光电传感器的种类在不断丰富，性能在不断提高，价格则在不断下降，为普及光电测量技术铺平了道路。

计算机、激光器和光电传感器构成了光电测量技术的物质基础。以三者为核心，光电测量技术已形成完整而开放的知识理论体系。就完整性而言，从光电测量方法的数学物理原理，到测量装置的标定与误差评价，再到测量数据的存储与信息处理，均有丰富的研究成果。开放性则体现为：在层出不穷的需求与新技术的推动下，光电测量技术的理论与实践在不断充实与丰富。

激光测量技术是一门综合性实用技术，能记录、分析激光与被研究对象相互作用而发生变化的光波场参数，以便测出被研究对象的动力学参数、声学参数、重力场参数、热力学参数、电磁学参数、光学参数和微观信息等^[1]。激光测量学研究内容十分丰富，涉及激光测量的原理、方法、应用以及激光和半导体器件，其中：测量原理有波面干涉、全息术、散斑测量、莫尔原理、多普勒原理、相位共轭、受激散射、光纤传导、光斑定位等；测量应用有距离、位移和角度测量，几何形状误差测量，表面微观形貌测量，激光定位和激光雷达，速度和加速度测量，三维形态测量，激光CT与三维温度场测量，流场测量，弱磁场测量，瞬变现象测量，时间探针等。激光测量学所研究的内容可归纳为四大部分：激光测量原理、测量领域/测量对象、元器件及相关技术、测量与误差理论。激光测量学的学科体系结构如图1-1所示。

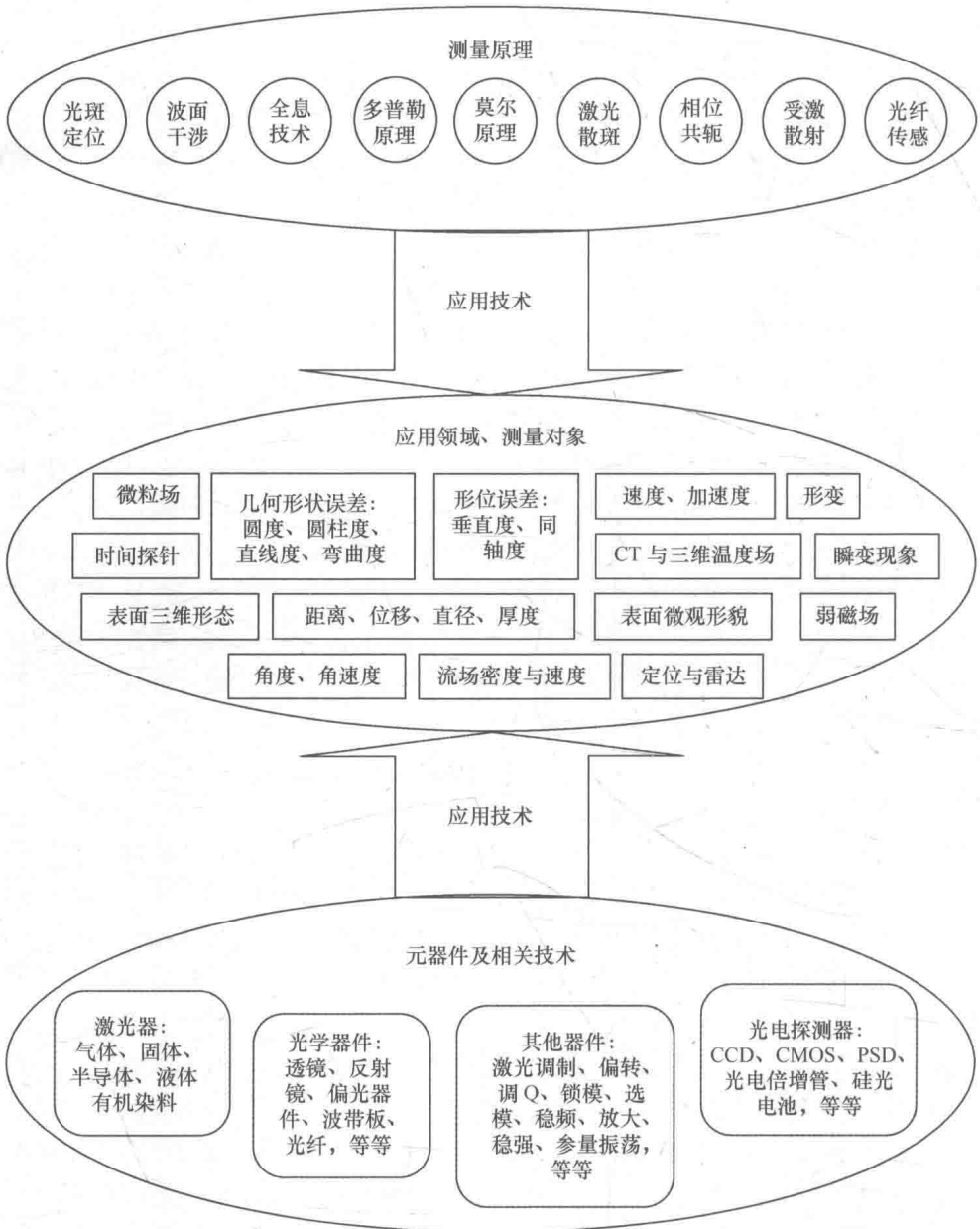


图 1-1 激光测量学的学科体系结构

本书专门论述光斑定位技术，内容包括所涉及的元器件和多个测量领域的应用。本书内容及在激光测量学中的位置如图 1-2 所示。

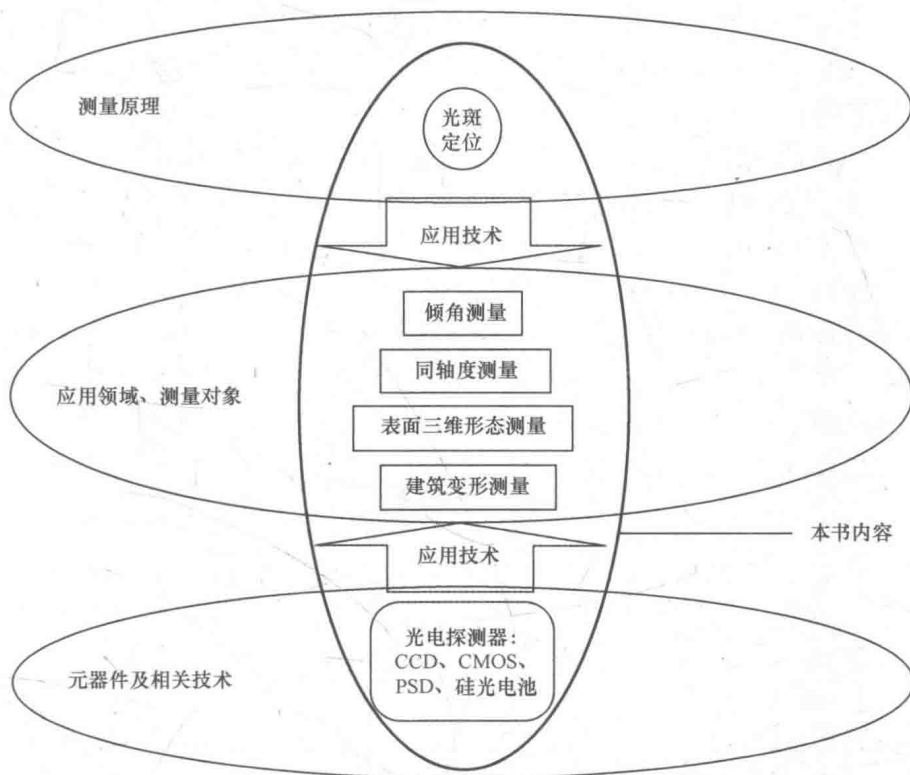


图 1-2 本书的内容及在激光测量学中的位置

1.2 光电测量技术特点与分类

1.2.1 光电测量技术特点

光电测量技术有许多特点：①具有非接触性、非破坏性，可以在对被测对象没有干扰的情况下获得被测对象的各种信息；②光具有直线和高速传播性；③光波的振幅、相位、频率（或波长）以及偏振态的时空变化特性可用于多种测量目的；④利用光载信息可以进行遥控和遥测；⑤可以进行高分辨率的测量；⑥可以进行多普勒测量；⑦可以进行外差法测量；⑧对于激光，射向目标的能量集中，使仪器的小型化易于实现。由于激光的高单色性、高相关性、高平行性、方向性、能量随时间和空间的可会聚性等独特的优点，以及小型半导体激光器的低电压、小体积和易调制性，在光电测量技术中大量采用激光光源。

1.2.2 光电测量技术分类

光电测量技术是一个很大的范畴，包含的内容十分丰富。

(1) 按测量方法分类。光电测量有时间测量、干涉测量、全息干涉测量、多普勒测量、莫尔条纹测量、激光散斑测量、光纤传感测量、散射测量、光斑定位测量等。

(2) 按被测对象分类。光电测量有形位误差测量(平行度、垂直度、同轴度、圆度、直线度、圆柱度等),位移测量(横向位移、纵向位移、角位移、直径、厚度等),速度测量(线速度、角速度、线加速度、角加速度),场测量(磁场、温度场、燃烧场、流场等),颗粒度测量,以及表面三维形态测量等。

光电测量技术采用的测量方法,与测量精度和范围的要求以及被测对象的性质密切相关。例如:对于大的空间距离(大于几十米),一般采用时间测量方法;对于微米以下的位移和形态测量,一般采用干涉测量方法;而对于一般尺度的位移测量,可采用光斑定位测量方法。

第2章 光斑位置检测技术

2.1 光斑位置测量技术

2.1.1 光斑位置测量概述

测量技术的进步程度是社会文明进步程度的标志。没有现代的测量技术，就没有现代的工业。测量技术是如此之重要，以至于其自身成为许多科技工作者的研究对象。本书研究的内容为光斑位置测量及相关的数据处理技术，具体地说，是以激光准直光束为测量光源，以光斑位置传感器为传感元件，以计算机为测量数据的采集、存储与加工设备，对常规测量尺度和三维空间范围内的实体进行测量和数据处理的技術。这一类技术的内容非常丰富，应用十分广泛。依托几个与军事工程、医学工程、水电工程有关的课题，笔者希望在一些具有理论与应用价值的领域，对一些具有普遍性和特殊性且仍存在研究空间的问题，开展相关的研究工作，希望能填补一些空白，丰富相关的理论与实践，为光电测量这棵本已根深叶茂的大树增添几片绿叶。

2.1.2 光斑位置测量技术

测量光斑位置的办法有多种，从简单的目测到精密的光电仪器测量。这种测量光斑位置的技术称为光斑位置检测技术，或简称为光斑定位技术。通过对光斑位置变化量的测量来实现对位移、角度等物理量的测量，这在精密测量中应用十分广泛。用于测量万有引力的卡文迪许扭秤，就是利用光斑定位技术来测量悬挂重锤的扭转角度。光斑定位技术在测量领域中的应用有以下显著优点：

- (1) 具有非接触性，可利用光来测量位移、转角等物理量。由于采用光接触方式，测量工具不会对待测物理量本身产生影响，而接触式测量则不能保证。
- (2) 可利用光杠杆原理将微小的物理量放大，从而实现高精度测量。
- (3) 光信号可调制，本身可携带丰富的信息，又可方便地用透镜、反射镜、光阑等进行处理。
- (4) 光信号不受电磁场影响，不需考虑电磁兼容问题。
- (5) 光信号响应速度快、实时性好，能测量快速变化的物理量。