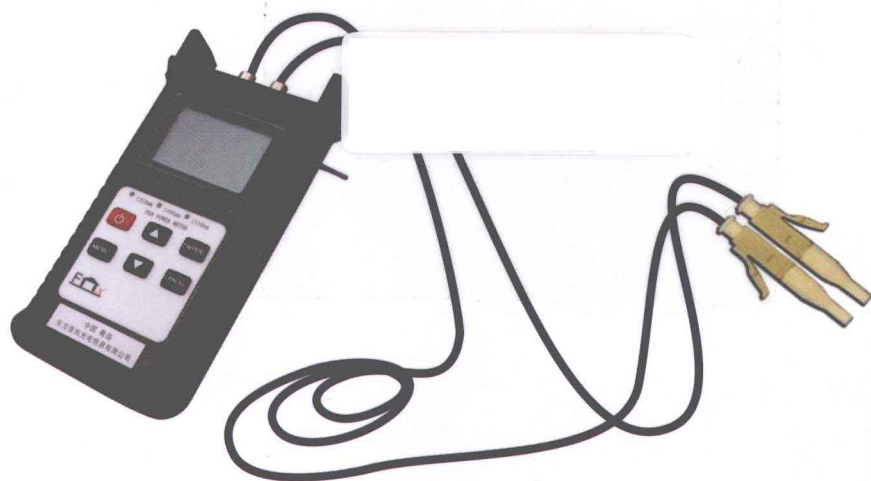


Xiandai Guangxue Ceshi Jishu

现代光学测试技术

苏俊宏 田爱玲 杨利红 编著



 科学出版社

现代光学测试技术

苏俊宏 田爱玲 杨利红 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

现代光学测试技术研究领域包括光干涉技术、光衍射技术、光偏振技术、光全息技术、光扫描技术、光散斑技术、莫尔技术、光谱技术、光纤技术,等等。本书涉及内容除基本光学测量技术外,主要以光干涉测试技术为主,介绍了各种光学量的测试原理及测试方法。全书共 11 章。第一、二章系统地介绍了现代光学测试技术的基本理论及其发展;第三章介绍了光学材料及其基本参数的测试问题;第四章系统介绍了几种常用的典型干涉仪;第五章是光电相位探测技术;第六、七章分别介绍了平面元件与球面元件测试技术;第八章介绍了非球面测试技术的基本知识及测试方法;第九章介绍了干涉测长技术;第十章介绍了莫尔条纹测量技术;第十一章介绍了光学系统成像质量评价方法。

本书具有理论与实践密切结合、论述系统深入的特点,可作为相关专业的研究生教材,也可供相关工程技术人员作为设计光学测试系统的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

现代光学测试技术/苏俊宏,田爱玲,杨利红编著. —北京:科学出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-03-036664-1

I. ①现… II. ①苏…②田…③杨… III. ①光学测量-研究生-教材
IV. ①TB96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 024097 号

责任编辑:刘鹏飞 潘斯斯 / 责任校对:陈丽珠
责任印制:闫 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

化学工业出版社印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 3 月第一次印刷 印张:21 1/2

字数:550000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

采用光学原理进行精密测试,一直是测试计量技术领域中的主要方法之一。由于光学测试方法的非接触性、高灵敏性、高精度性及光学图像的二维计量性,它在信息科学、生命科学、工农业生产和装备制造业、航空航天、国防军事以及科学研究和人们的日常生活等领域得到广泛应用。随着科学技术的不断发展,对现代测试技术提出了三维性、相关性和实时性及更高灵敏度和精度的要求,使得传统的光学方法已不能适应。激光的出现,使测试技术发展成为以激光为中心的精密测试技术,特别是将传统的光学机械测试方法与激光技术、光电技术、光纤技术、数字图像处理技术、计算机技术等相结合,用于检测光学量和非光学量,就形成了现代光学测试技术,这种技术是以现代光学为基础来实现精密计量与测试。随着傅里叶光学理论、现代光学理论、二元光学理论和微光学理论的发展,现代光学测试技术无论在测试方法、原理、准确度、效率,还是适用的领域范围都获得了巨大发展,是上述相关技术发展的综合体现,是当今发展中的一门学科研究方向,已成为一种无法取代的测试技术,也必将成为科学技术和生产实际中不可或缺的高新技术之一。

现代光学测试技术研究领域包括光干涉技术、光衍射技术、光偏振技术、光全息技术、光扫描技术、光散斑技术、莫尔技术、光谱技术、光纤技术等。本书涉及内容除基本光学测量技术外,主要以光干涉测试技术为主,介绍各种光学量的测试原理及测试方法,这是本书的特点之一。全书共 11 章。第一章介绍了现代光学测试技术的研究领域及技术特点、技术发展现状及今后的发展方向;并针对实际测试对象,给出了测试原理及测试方法的选择原则。第二章是基本光学测量技术,介绍了光学测试装置的基本部件及其结构、工作原理;作为光学测试中最基本的测量对象,介绍了透镜焦距及顶焦距的测量原理及方法。第三章介绍了光学材料及其基本参数的测试问题。“干涉测量”历来在光学测试中占有重要地位,第四章是本书的重点,介绍了干涉条纹判读及波面质量评价的两种评判方法;介绍了几种常用的典型干涉仪,系统介绍了干涉图分析方法、波面拟合过程,以及波像差的测量。第五章是光电相位探测技术,分别介绍了波面相位的静态与动态测量技术。第六、七章分别介绍了平面元件与球面元件测试技术,主要介绍了平面及球面元件的基本量测量,以及面形偏差检测。第八章介绍了非球面测试技术的基本知识及测试方法。作为干涉测试的应用,第九章介绍了干涉测长技术。鉴于莫尔测量技术在光学量和非光学量测量中的应用越来越多,且近年来衍生出了许多新技术,为丰富现代光学测试技术,第十章介绍了莫尔条纹测量技术。第十一章介绍了光学系统成像质量评价方法。

本书由苏俊宏主编。第一章至第七章(除第四章第一节)、第十一章由苏俊宏编写,第八章、第十章由田爱玲编写,第四章第一节、第九章由杨利红编写,全书由苏俊宏统稿。

在本书编写过程中,得到了西安工业大学光电工程学院、研究生部等部门领导的大力支持,西安工业大学光电工程学院的田会、王红军老师及研究生丁毅、李浩然、刘弈晨、曾耀等在文档图表整理上付出了辛劳,在此一并表示感谢。

鉴于作者学识疏浅,加之编写时间有限,内容的取舍、文辞的运用、语言的表达等,不妥之处在所难免,书中也可能有不少错误,恳请读者不吝赐教,批评指正。

作者

2012 年 2 月于西安工业大学未央湖校区

目 录

前言

第一章 现代光学测试技术综述	1
第一节 研究领域及技术特征.....	1
第二节 现代光学测试技术的现状与应用.....	4
第三节 光学测试方法的选取原则	12
第四节 现代光学测试技术的发展趋势	14
参考文献	15
第二章 光具座上的综合检测	16
第一节 测量中的对准技术与调焦技术	16
第二节 光学测试装置的基本部件及其组合	28
第三节 焦距和顶焦距的测量	36
参考文献	43
第三章 光学材料测试	44
第一节 光学玻璃材料概述	44
第二节 光学玻璃折射率测量	54
第三节 光学玻璃光学均匀性测量	71
第四节 光学玻璃应力双折射测量	77
参考文献	84
第四章 基本的光干涉测量技术	85
第一节 干涉条纹的分析判读及波面质量评价	86
第二节 几种典型的干涉仪	98
第三节 波面错位干涉测量.....	106
第四节 干涉图分析与波面拟合.....	115
第五节 波像差及其测量.....	129
参考文献.....	139
第五章 光电相位测量技术	140
第一节 相位的静态测试技术.....	141
第二节 相位的动态测试技术.....	163
参考文献.....	185
第六章 平面元件测试技术	186
第一节 平面元件基本量测量.....	186
第二节 平面光学元件面形偏差检测.....	205
第三节 平面光学元件光学平行度测量.....	215
参考文献.....	228

第七章 球面元件测试技术	229
第一节 球面曲率半径测量.....	229
第二节 球面光学元件面形偏差检测.....	245
参考文献.....	252
第八章 非球面测试技术	253
第一节 非球面的基本知识.....	253
第二节 非球面面形测试方法.....	254
参考文献.....	268
第九章 干涉测长技术	270
第一节 高精度量块测量技术.....	270
第二节 激光干涉测长.....	284
参考文献.....	295
第十章 莫尔条纹技术	296
第一节 莫尔条纹形成原理.....	296
第二节 莫尔条纹测量技术.....	302
参考文献.....	309
第十一章 光学系统评价	310
第一节 光学系统成像质量评价方法概述.....	310
第二节 分辨率测试.....	311
第三节 成像质量评价的星点检验法.....	315
第四节 光学传递函数.....	318
第五节 干涉测量.....	328
参考文献.....	335

第一章 现代光学测试技术综述

利用光学原理进行精密测试,一直是计量与测试技术领域中的主要方法。由于光学测试技术具有非接触、高灵敏、高准确度的特点,能够实现三维形貌、相关性和实时性测量,在信息科学、生命科学、工农业生产和制造业、航空航天、国防军事以及科学研究和人们的日常生活等领域得到广泛应用,成为一种无法取代的测试技术,是当代先进测试技术之一。

光学测试技术的发展是随着其他相关技术的发展而发展的。自 20 世纪开始,由于激光技术、光波导技术、光电子技术、光纤技术,计算机技术的发展,以及傅里叶光学理论、现代光学理论、二元光学理论和微光学理论的形成和发展,光学测试技术无论在测试方法、原理、准确度、效率,还是适用的领域范围都获得了巨大发展,是上述相关技术发展的综合体现,是现代科学技术和现代工农业生产快速发展的重要技术支撑和高新技术之一。

回顾光学制造技术及其产业发展史,使从事光学检测的人员形成了一个共识,那就是:现代光学元件与系统的检测比它们的制造更具有挑战性。也就是说,一个能胜任从事光学元件与系统的制造者,一定首先要胜任解决它们的各种检测方法和技术。光学元件与系统的制造过程及一些极端的制造能力就是光学元件与系统的检测过程及一些极端的检测能力的展现。因此,有人说:“如果你不能测量它,那么你就不能制造它”,“如果你能测量它,那么你就能制造它”;也有人说,“只有测量不出来的,没有加工不出来的”。还有人说:“科学要发展,测试计量须先行。”因此可以说,光学测试是一种认识世界的工具和改造世界的手段,是光学科学与工程的重要组成部分。

第一节 研究领域及技术特征

一、研究领域

凡是利用光学原理进行精密测量的技术,都称为光学测试技术。计量(Metrology)、测量(Measurement)、检验(Inspection)与测试(Measuring and Testing)这四个名词对初学者来说,往往相互混淆,特别是光学计量、光学测量、光学检验与光学测试这四个主题词更容易认为是一件事。实际上其研究的目标是不尽相同的,仅在研究领域与研究方法上有一定交叉和重叠而已。一般来说,计量是泛指对物理量的标定、传递与控制;测量是泛指各种物理量与技术参数的获取方法;检验是泛指产品质量的评估技术与方法;而测试则是测量、试验与检验的总称,侧重于方法与技术的研究,而不是产品质量的标定方法研究,因此,光学测试技术的主要研究领域如表 1-1 所示。

表 1-1 光学测试技术的研究领域

序号	领域名称	主要内容
1	光学成像技术	光放大技术、CCD 成像技术、PSD(位置传感器)技术、自准直技术、光扫描技术、图像处理技术
2	光偏振技术	双折射效应、椭圆偏技术、光弹效应、光热效应、Pockels 电光效应、Kerr 电光效应、Faraday 磁光效应
3	光干涉技术	共路干涉技术、错位干涉技术、外差及零差干涉技术、多光束干涉技术
4	光度与色度技术	发光与分光测量、光度与照度测量、颜色评价、色度测量、生理光学

续表

序号	领域名称	主要内容
5	光谱技术	棱镜光谱技术、光栅光谱技术、拉曼光谱技术、原子吸收光谱技术
6	光电技术	光电与光电倍增技术、摄像技术、红外技术、微光技术
7	光散射技术	拉曼散射、米氏散射、布里渊散射、偏振散射
8	其他光物理技术	Talbot 效应、薄膜技术、多普勒技术、频谱技术

自 20 世纪 70 年代开始,由于激光技术、光波导技术、数字技术、计算机技术以及傅里叶光学的出现,使光学发展成现代光学。以激光为代表的现代光学促使光学测试技术出现更多新方法和新技术,从而开始形成现代光学测试技术。现代光学测试技术研究的领域如表 1-2 所示。

表 1-2 现代光学测试研究领域

序号	领域名称	主要内容
1	激光干涉技术	激光光束干涉,激光外差干涉,条纹扫描干涉,实时错位干涉
2	光全息技术	全息干涉,全息等高线技术,多频全息技术,计算机全息,实时全息技术
3	光散斑技术	客观散斑法,散斑干涉法,散斑错位法,白光散斑法,电子散斑法
4	莫尔技术	莫尔条纹法,莫尔等高线法,拓扑技术
5	光衍射技术	间隙法,反射衍射法,互补法,全场衍射测量
6	光扫描技术	激光扫描,外差扫描,扫描定位,扫描频谱法,无定向扫描,三维扫描
7	光纤与波导技术	功能型光纤传感技术,非功能型光纤传感技术,分布式光纤技术,光纤灵巧结构
8	激光光谱技术	激光喇曼光谱,激光荧光光谱,激光原子吸收光谱,微区光谱,光声光谱
9	CCD 成像技术	TV 法,CCD 法,PSD 法,数字图像法,光信息处理法
10	激光多普勒技术	多普勒测速,差动多普勒技术,激光多普勒技术
11	光学诊断与无损检测	光伏效应,切剪术导法,光热偏转法
12	光学纳米技术	扫描激光显微术,光学隧道显微术,激光力显微术,原子力显微术

现代光学测试技术的任务及其实现的主要手段是:

1)静态的三维测量

这主要是静态表面(包括粗糙表面、高温表面、柔性表面、液面)的三维形状与变形测量,这方面发展的新方法主要是:全息法、莫尔法、散斑法、光扫描法、光衍射法以及实时干涉法等。

2)动态的参数测量

这主要指时间变动下对物体的测量。例如:测长、测振、测速、测微小变形等。发展的新方法有光学零差法、外差法以及激光多普勒法、光导纤维法等。

3)实时测量

这主要指空间与时间都变动下的测量,新发展的方法是各种光电实时测试技术,例如,光扫描法、信息处理法、数字图像测试法等。

4)相关测试

从测试比较中找到物体相同点与不同点。这方面主要发展傅里叶频谱分析、激光光谱技术等方法。

现代光学测试技术的出现适应了现代科学和工业技术上提出的高灵敏度、高效率、自动化的

测试要求,实现了计量上的三维性、实时性和相关性。进入 20 世纪 80 年代,又提出了亚微米、纳米级灵敏度的测试要求,产生了无损检测、在线光学诊断等新技术。

二、技术特征

光学测试技术的基本任务是获取那些蕴藏在某些随时间或空间变化反映光特征(如光强、频率、相位、偏振等)的物理量中有用的信息。激光技术,微电子技术与计算机技术的发展,使光学测试技术向现代光学测试技术方向发展。现代光学测量技术代表了当今先进生产力发展的某些重要特征,新型光学材料、激光光源、光电探测器件、计算机技术和网络通信等新物理概念、新材料、新器件以及新设计、新系统的引入,使传统光学测量的情况大为改善,其测量水平显著提高。其主要特征如下:

(1)现代光学测试技术不断应用新的原理、技术和方法,其理论基础得到了不断充实和拓展。打破了传统的以几何光学和物理光学为基础的理论束缚,与其他学科和技术的不断渗透和融合,派生出许多新的学科分支,如以傅里叶变换原理为基础的傅里叶光学。

(2)集光、机、电、算、材为一体,现代光学测量不仅综合了传统的几何光学、物理光学,而且与现代电子学、计算机技术、精密机械技术、自动控制技术和天文学等学科和技术交叉融合,密不可分。光学测量技术与其他领域最新技术结合构成了现代光学测量技术,其测量系统的性能、精度得到了提高,测量范围得到了扩展。

(3)与现代通信和网络技术的结合,可以实现测量的远程操作、无人操作,提高了工作效率、方便可靠。如提出的光学干涉多参数网络计量保证方法,利用了网络技术,而“惠更斯”号登陆土卫六过程中的测量数据传输显然离不开现代通信技术。

(4)对现代光学测量技术及仪器性能评价标准的多样化,更能全面和准确反映出测量情况。比如对传统光学元件表面质量的评价指标主要为峰谷值和均方根值,这些指标所反映的表面误差信息是非常有限的,而现在一些新的评价指标已经被引入,如功率谱密度(PSD)、表面粗糙度、麻点、刮痕等,并且各国也有了具体的国家标准;在极紫外光刻系统和惯性约束聚变装置中对光学元件的质量评价将分为低频面形误差、中频和高频粗糙度误差。

(5)计算机技术的应用不仅体现在测量数据处理、分析软件的建立,也包括初始的计算机辅助设计、性能仿真分析以及误差、容限分析。比如利用补偿器对非球面进行零检验,将利用光学设计软件对补偿器进行设计、包括补偿器在光路中的位置以及容限要求,保证了最终检测精度和测量的可靠性。

基于以上特征,现代光学测试技术的主要特点、表现形式及应用领域如表 1-3 所示。

表 1-3 现代光学测试技术主要特点

序号	主要特点	表现形式	应用领域
1	非接触性	① 液面测量 ② 柔性或弹性表面测量 ③ 高温表面测量 ④ 远距离监测 ⑤ 微深孔等特殊测量	精密计量 遥感测量 远距测量 无接触力测量 图像测量
2	高灵敏度	① 达到波长或亚波长级以下的灵敏度 ② 实时监测微变形、微振动、微位移	超精密测量 在线检测 纳米测量

续表

序号	主要特点	表现形式	应用领域
3	高精度	① 测量精度 $10\sim 0.1\mu\text{m}$ ② 任意形状	精密计量测试 无损检测 参数测定
4	三维性	① 任意距离 ② 任意表面状态	3D 测量
5	快速性	① 光电测量 ② 扫描方式 ③ CCD 图像方式	故障诊断 在线检测
6	实时性	① 数字方式 ② 反馈控制测量	质量监控 生产自动化

因此,现代光学测试技术已成为当代先进技术的表征之一。随着二元光学(Binary Optics)及微光学(Microoptics)的发展,光学系统向微型化、集成化、经济化方向发展,促使现代光学测试技术更上一个层次,成为现代科学技术,现代工业生产的眼睛,是保证科学技术、工业生产日新月异发展的主要高新技术之一。

第二节 现代光学测试技术的现状与应用

一、现代光学测试技术发展现状

人类利用自然界存在的光线进行计量与测试最早用于天文和地理。自从望远镜和显微镜出现,光学与精密机械结合,使许多传统的光学计量与测试仪器广泛用于各级计量部门及大地测量部门。目前随着激光器的出现和傅里叶光学的形成,特别是激光技术与微电子技术、计算机技术的结合,出现了光机电算一体化的现代光学测试技术,其发展现状如图 1-1 所示。图 1-1(a)的光机电算金字塔中,塔顶的三角形顶点是光,即光学是这个基本体系中的原理基础,而精密机械、电子技术与计算机技术构成塔底三角形,是现代光学的支撑基础。图 1-1(b)是光学产业金字塔中各组成产业其产值的大致比例,这是 1990 年日本公布的统计值。实际上在工业中所采用的光学测试技术,远比这个统计值为高。

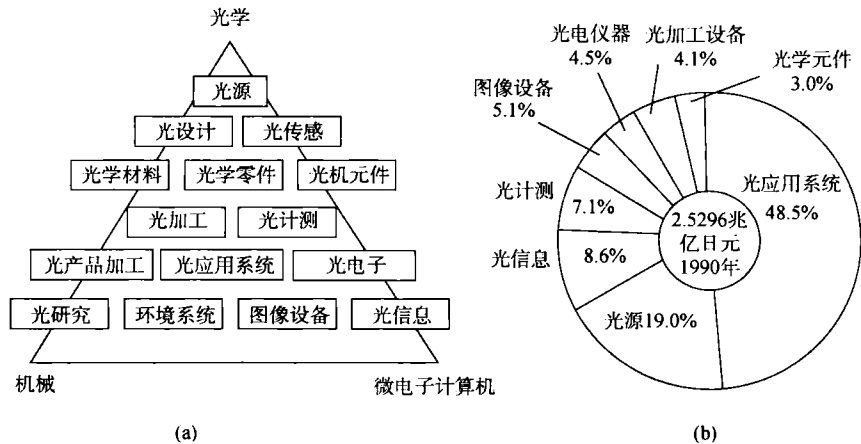


图 1-1 光学产业发展现状

图 1-2 是现代光学测试技术的现状,说明组成现代光学测试技术的学科支撑系统。图 1-2(a)是支撑的分学科系统,图 1-2(b)是支撑的相关学科。

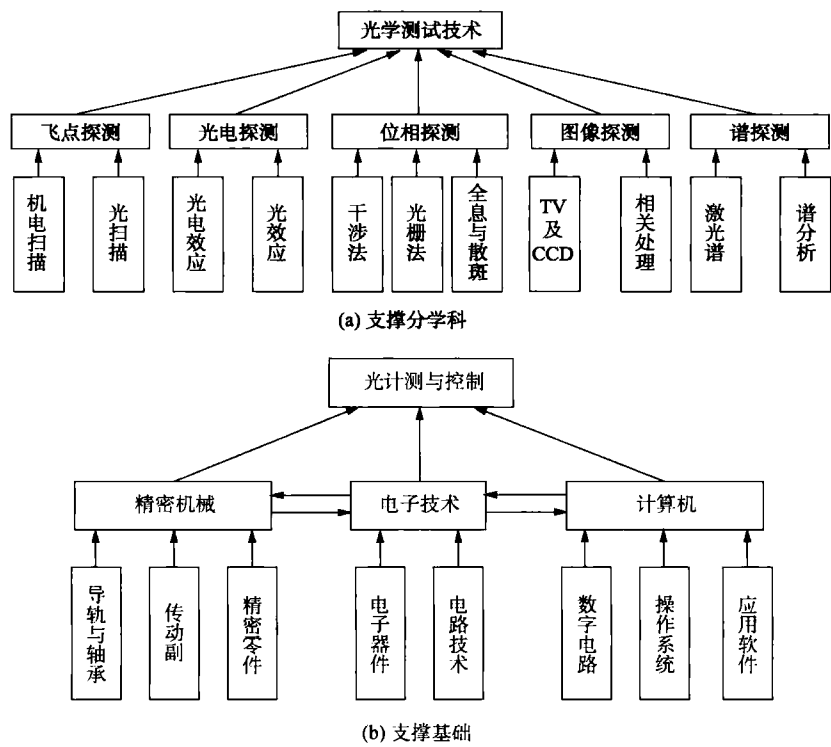


图 1-2 现代光学测试技术的现状

图 1-2 可以看出,从原理上说现代光学测试技术的现状主要是三点:

- (1)从主观光学发展成为客观光学,也就是用光电探测器来取代人眼这个主观探测器,提高了测试精度与测试效率;
 - (2)用激光这个单色性、方向性、相干性、稳定性都极好的光源来取代常规光源,获得方向性极好的实际光线用于各种光学测量上;
 - (3)从光机结合的模式向光机电算一体化的模式转换,实现测量与控制的一体化。
- 从功能上说,现代光学测试技术的现状主要有三点:
- (1)从静态测量发展成为动态测量;
 - (2)从逐点测量发展成为全场测量;
 - (3)从低速度测量发展成快速的、具有存储和记录功能的测量。

二、现代光学测试技术的应用

现代光学测试技术的应用几乎遍及到各个科学技术领域,如教育、文化、建筑、医学、远程通信、运输、能源、材料、环境保护、防灾、农业、生命科学、资源勘探、国防和空间等领域。这里主要介绍现代光学测试技术的几种典型应用,以展示现代光学测试技术强劲的发展势头。

1. 干涉测试技术

光的干涉是光的波动性的主要特征之一,它是许多光学仪器和测量技术的基础。1675 年,

牛顿进行了牛顿环实验,这是光的干涉现象。1881 年,A. A. Michelson 设计制作了闻名于世的迈克尔逊干涉仪。1960 年后期,T. H. Maiman 制成红宝石激光器,随后出现了以激光为光源的干涉仪,对科学技术的进步发挥了重要作用。1960 年 Bell 实验室的研究人员发明了电荷耦合器件 CCD。1945 年莫克利和埃克特设计出第一台电子计算机。20 世纪 70 年代中后期,随着激光技术、电子技术、计算机技术的发展,传统的干涉检测方法与这些技术相结合,产生了相位干涉检测技术;使测量精度由传统的 $\lambda/10$ 提高到一个数量级以上,且具有很高的重复性。近年来,为了适应下一代光刻设备研制需要所发展的点衍射干涉测试技术,将检测精度进一步提升到纳米和亚纳米量级。

与传统干涉仪相比,现代干涉仪的基本特征是采用激光作为光源,而且综合了应用光学、电子学和信息技术等方面的最新成就。数字化的时间移相干涉仪已经成为现代光学加工检验中不可缺少的高精度检测仪器,然而该仪器对测量环境较灵敏,振动和气流容易影响仪器的检测精度,通常需将干涉仪放置在防振平台上。对于大口径或者长焦距镜面来说,目前很难提供足够长度的隔离支撑,难以实现加工现场的实时检测。Phase Shift Technology 公司的 Koliopoulos 于 1991 年提出了采用同步移相干涉技术,利用偏振分光和移相薄膜技术同时获得相互移相 $\pi/2$ 的四幅干涉图,并由四个相同 CCD 同步采集四帧移相干涉图,然而该系统对 CCD 要求极其严格,且系统控制比较复杂。2001 年,J. E. Millerd 等人发明了一种综合应用全息分光、位相掩膜板、偏振器和 CCD 采样的专利技术,如图 1-3 所示,与同步移相干涉技术相比,该技术最大的优点在于 4 个移相干涉图成像在一个 CCD 器件上;该方法中相位掩膜板制作工艺复杂,技术要求较高。图 1-4 为美国 4D 公司最新研制的基于微偏振相移阵列的空间移相干涉仪光路图,其掩膜板的单元结构与 CCD 像素一一对应,上述合在一起的不同偏振态的光透过掩膜板的每个单元后会发生干涉,并且不同像元位置发生干涉的相位是不相同的;这样任意相邻的 4 个像元都发生了固定相位差的干涉,对其进行数据处理就可以获得被测样品的表面面形数据,这种结构的干涉仪将横向分辨率提高了一倍。

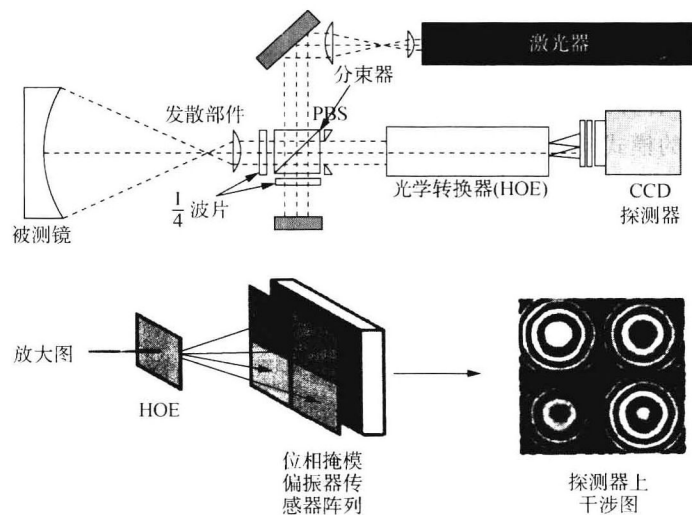


图 1-3 基于偏振分光、全息技术和相位掩膜的空間移相干涉仪及关键部件

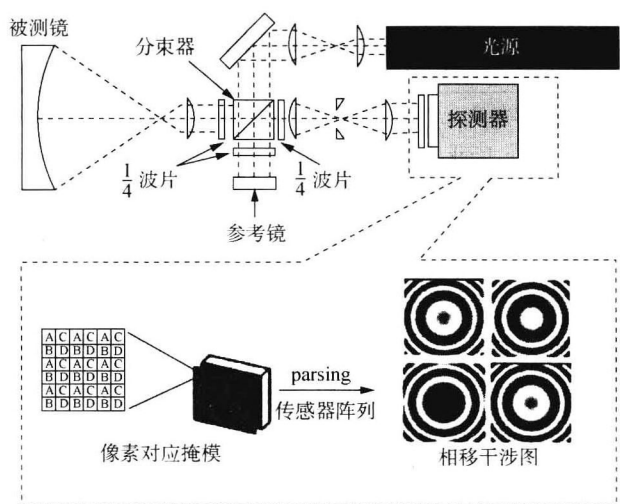


图 1-4 基于微偏振相移阵列的空间移项干涉仪及关键部件

干涉仪所使用的光源除了常用的 He-Ne 可见激光,还可采用红外、紫外、X 射线光源等,以适应不同的测量需求。探测器件的性能、数据处理软件等方面也将不断提高。微小型化的干涉仪随着光学系统的小型化和其他各个部分的集成也将会不断出现。与现代电子学、计算机和软件技术的结合,干涉测试技术和仪器正在不断创新和发展。

2. 表面形貌测试技术

表面形貌是指表面的微观几何形态,它是由于加工过程中刀具和零件的摩擦、切屑分离时的塑性变形和金属撕裂、加工系统的振动等原因在零件表面留下的各种不同形状和尺寸的微观结构。现代高科技的发展对于表面形貌提出了越来越高的要求,硅片表面粗糙度对集成电路的电阻、电容、成品率影响很大;磁盘表面粗糙度影响到耐磨、使用寿命、信号的读出幅度、信噪比等;X 射线元件、激光器的反射镜窗片、同步辐射光学元件等都要求较高的表面质量。1986 年 G. Binnig 和 H. Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (STM),人类第一次观察到了物质表面单个原子的排列状态。之后出现了一系列的新型扫描探针显微镜,如原子力显微镜、激光力显微镜、磁力显微镜、光子扫描隧道显微镜等。现代扫描显微镜技术吸取了光学技术中的精华,光子扫描隧道显微镜利用了光纤探针和全反射时的瞬衰场,横向分辨率达到 $\lambda/10$,垂直分辨率达到纳米量级;扫描近场光学显微镜则使用小孔光天线,分辨率突破了瑞利限制,已经达到 $\lambda/10$ 量级,它们都为表面形貌分析提供了强有力的手段。专著中已经对现有的表面形貌测量技术进行了一个初步划分,如表 1-4 所示。

表 1-4 表面形貌测量方法、特征和分辨率

方法	主要特征	垂直分辨率	横向分辨率
触针式轮廓仪	触针与被测表面接触并沿表面横向移动	0.1mm	0.2 μ m
光切法		1 μ m	20 μ m
全积分散射法	测量散射损失	0.02nm	
离焦误差检测法	检测表面微观起伏对物镜焦点的偏离量	1nm	1 μ m
共焦扫描法	被测表面微观起伏物镜焦点给出误差信号,控制探针扫描,共焦状态	1.5nm	1 μ m

续表

方法	主要特征	垂直分辨率	横向分辨率
外差干涉	光频调制与相位测量	0.1nm	1 μ m
干涉显微镜	Michelson, Mirau, Linik, Nomarski	0.1nm	0.5~1 μ m
原子力显微镜	直流	0.02nm	0.1nm
	交流	0.01nm	0.1nm
光子扫描隧道显微镜		1nm	10nm
扫描近场光学显微镜		20nm	20nm

从表中可以看出,垂直分辨率一般高于横向分辨率;分辨能力不断提高,原子力显微镜的横向分辨率高达 0.1nm。此外还可以看出,表面形貌测量技术与纳米技术、生物技术等交叉融合,在提升自身技术手段的同时也开辟了新的应用领域。

3. 现代光学工程中的光学测试技术

高技术是国际上最活跃的、前沿的应用科学技术,而且是直接影响到国民经济与国力发展的。根据现代的技术发展,真正的技术用到现代的工程技术上面,必然是多方面技术的综合,而不是单纯的某一方面技术。这里我们将重点阐述国际上备受关注的两种现代光学工程中的光学测试技术。融多种高技术于一体的现代大型天文望远镜和惯性约束聚变装置的研制和发展都与现代光学测试技术密不可分,各种先进光学测试技术及仪器的综合应用和集成,构成了现代光学测试工程。

1) 大型天文望远镜

为了能观测到更多的早期宇宙事件,更进一步地研究太阳系外的类地行星,需要建造具备集光能力更强、分辨率更高、口径更大的下一代天文望远镜。下一代望远镜是指目前处于研制中的巨型望远镜,随着各种先进探测仪器和计算机技术不断应用于天文观测上,望远镜口径便成为地面光学观测的主要限制。同时,红外、射电、空间天文学取得许多崭新的观测结果,迫切需要可见光波段观测的有效配合。为了探寻宇宙间古老的星系和类地行星,欧洲南方天文观测台(ESO)计划开发出镜面直径超过 60m 的超大天文望远镜;美国与澳大利亚合作,计划在 2016 年前建成直径为 24.5m 的“大麦哲伦天文望远镜”(GMT);此外,美国与加拿大联合开发的直径为 30m 的天文望远镜,同样计划在 2016 年前建成。日本将建造一架直径为 3.8m,总投资 10 亿日元(约合 873.3 万美元)的下一代天文望远镜,计划 2011 年投入使用,其主要功能是观测黑洞及伽马射线爆发等突发的天体现象。

制造口径超过 10m 的单块反射镜难以实现,所有超大型望远镜(ELT)项目都采用分块主镜技术。一些大型望远镜项目采取分块镜的尺寸为 1~2m,如 Keck I、II 主镜由 36 个六边形的子镜组成,每个子镜直径为 1.83m。基于已经建成的 MMT, LBT 大型望远镜技术,美国正在建造的巨型麦哲伦天文望远镜(GMT)如图 1-5 所示,由 7 块口径为 8.4m 的子镜拼接而成,以组成一个口径约为 25m、 $f/0.7$ 的巨型主镜。其主要的科学任务包括:宽视场多目标光谱测量,高空间和光谱分辨率的光谱测量,高对比度衍射极限成像,与 JWST 互补的中红外探测能力。功能是当前最大光学望远镜的 4.5 倍,成像清晰度将达到“哈勃”太空望远镜的 10 倍;它将使人们能够直接观测遥远星系的行星,以寻找有没有类似太阳系和地球的环境,会不会有智慧生命存在。配套仪器包括一组摄像机和光谱仪,用来探寻宇宙中恒星和行星系的生成、暗物质、暗能量和黑洞

的奥秘,以及银河系的起源等问题。现代光学测量技术和仪器在大型望远镜中不可替代的地位和作用是显而易见的。

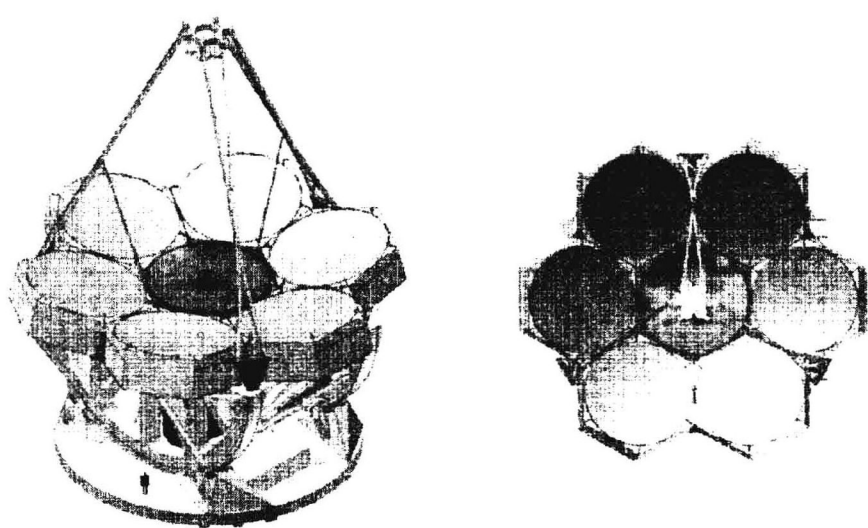


图 1-5 巨型麦哲伦天文望远镜(GMT)示意图

对于制造 GMT 分块主镜来说,其中对于离轴分块反射镜的测量将面临最大的技术挑战,与最佳拟合球面具有 14.5mm 的非球面偏离;在对其进行抛光和最终面形成过程中,在线检测将采取一个 3.75m 的球面镜转折光路并补偿掉大部分非球面像差,用较小口径的透镜组和计算全息片来补偿剩余的像差,以实现零检验。为了验证检测方法的有效性,SOML 首先抛光了一个验证用的 1.7m 的离轴非球面,其口径约为 GMT 分块镜的 1/5;如图 1-6 所示,其检测使用了口径为 150mm 的透镜组和 100mm 的计算全息图为补偿器,通过 500mm 的球面反射镜实现光路转折并补偿一部分非球面像差,所使用的计量仪器为 4D 公司研制的同时移相抗振动干涉仪 (Phase Cam)。测量 1.7m 离轴分块镜的经验和技术将为测量 GMT 中 8.4m 分块镜提供保障。

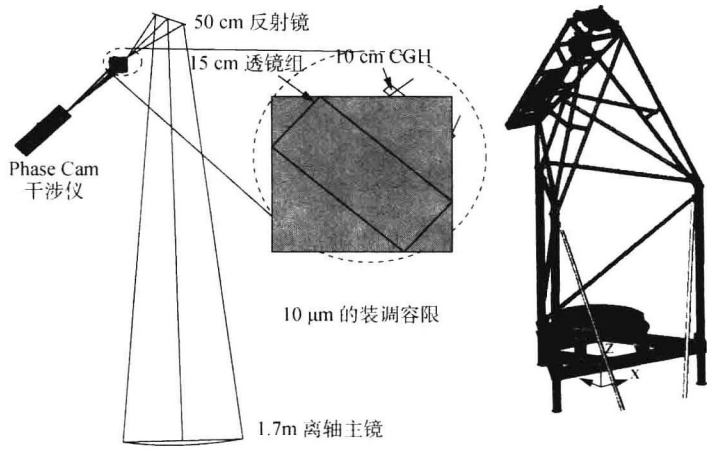


图 1-6 1.7m 离轴反射镜测量示意图

值得指出的是测量 1.7m 非球面镜所用的 CGH 由 10 个图形组成。中间主要部分用于校正

波像差,其余不同图形分别用于调整在干涉仪光路中 CGH、球面镜的位置并准确定位 1.7m 被测镜。在这里一个重大的突破在于使用了可以装调复杂光学系统的组合多像素计算全息图(Coupling Multiplexed,CGHs),同时用了四种不同类型的计算全息图。由此可见,光学零件检验也是一个系统工程,它涉及从方案设计、补偿器的加工到实际测量过程中的装调和容限控制的综合考虑和实现。

2) 惯性约束聚变装置

国际上另一个引人注目的大科学工程是惯性约束聚变装置(ICF),ICF 的目的是通过将高功率激光束聚焦到微米量级的靶丸上,实现可控点火。要获得引爆核聚变的高能量,激光需要多级放大,同时为避免各类非线性效应的产生,必须进行扩束以获得较大的光束截面来减小激光在光学元件局部的能量密度。在激光注入靶室前还必须将其聚焦,来满足聚变所要求的能量密度。世界上科技发达的国家均投入巨大的人力、物力进行这方面的研究,最早进行这方面研究的应属美国,20 世纪 60 年代就开展对这一领域的研究。随后法、俄、日、中等国都开展了这方面的研究。美国 1994 年开始执行“国家点火工程”(National Ignition Facility, NIF)计划,其主光路分为六个主要部分,分别是主激光系统、光束控制系统、激光注入系统、光脉冲发生系统、光开关区域及终端光束会聚系统;每一部分光学元件的特点都是数量多、种类多、口径大、精度要求高,整个 NIF 系统共使用了七千多件各类大口径光学元件。因此,ICF 驱动系统中大口径光学元件加工质量的检测和评价工作是保证整个系统安全、正常、高效运行的关键之一。除此之外,建造如此庞大和复杂的工程必然涉及各种几何量、物理量、系统参量等多方面的测量;从可以检索到的相关资料显示现代光学测量技术在其中扮演着非常重要角色,是该大型系统研制成功,并完成其预期目标的重要保证。

4. 微光学中的现代光学测试技术

微光学是一门正在兴起的学科领域。微光学是研究一维、二维和三维的小型化光学器件和系统的一门高技术。它涉及材料研制、设计、精细加工、器件集成以及用其实现光束发射、聚焦、准直、偏折、分割、复合、开关、耦合、接收等功能和光纤传感、光学信息处理、成像系统、光通信、光计算、光互连、光盘、光学神经网络和生物器件等应用领域。它与“微机械”、“微电子学”、“微加工”、“材料科学”、“信息科学”等学科相互渗透,彼此融合,是现代光学研究前沿的一个重要分支。“一大一小”是先进光学制造技术未来的主要发展方向之一,微光学制造技术支撑微光学的发展,有可能为光学技术带来革命性进展。使传统光学系统实现微型化、阵列化和集成化,发展具有信息处理功能的集成光学组件。

5. 现代光学制造中的现代光学测试技术

随着光学技术的蓬勃发展,以非球面镜为关键部件的大型光学系统在天文、空间光学和惯性约束聚变装置等高技术领域有着越来越广泛的应用。大型非球面的制造仍然存在很多挑战。光学制造过程从本质上是所加工光学元件向理论面形逐步收敛的过程,其加工过程通常可以分为研磨加工和抛光加工阶段,不同的加工阶段需要与之精度相适应的检测方法和仪器。在研磨加工阶段,所加工的光学元件表面较粗糙,非球面偏离量较大,这一阶段主要的测量仪器为三坐标测量机。对于超大口径的非球面加工,相应的大型三坐标测量机造价昂贵,测量精度也会有所降低。法国 Reosc 在研制 VLT 和 Gemini 8m 非球面主镜过程中,发展了一种球径测量技术,该测量装置可以方便地与加工机床连接,大大提高了测量效率。美国 SOML 在研制 GMT 8m 分块主镜过程中,提出了基于激光跟踪仪的坐标测量技术;激光跟踪仪主要由一个激光测距干涉仪

和两个角编码器组成,通过跟踪放置在被测镜面上的合作目标角反射器可以获得其在三维空间中的极坐标,多次测量后进行数据处理就可以获得被测光学元件的面形信息。在大型非球面镜的抛光加工初期,主要采用红外干涉仪($10.6\mu\text{m}$)和补偿器来实现检测,在大型非球面镜的抛光加工中后期,则采用可见光相移干涉仪($0.6328\mu\text{m}$)和补偿器来实现其检测;相移干涉仪是以光波长作为测量尺度的高精度测量仪器,所使用的波长越短,其测量精度越高。相移干涉仪在移相过程中容易受到振动等环境因素的影响,为了解决时间相移干涉测量仪器对振动较灵敏的问题,近几年来开发出了抗振动干涉仪,如美国 ESDI 开发的 3 个 CCD 同时采集移相干涉图的 H1000, H2000 和美国 4D 公司开发的空间相移干涉测量仪 FizCam2000。由此可见,光学制造测试技术体系是由多种不同动态范围和精度的测试技术和仪器组成,它们每种测量仪器和测试技术都可以顺利过渡到后续交叉测试仪器和技术的检测范围内,为光学元件的质量可靠控制提供全流程的有力保障。

对于下一代极大型望远镜(ELT)的研制,如欧洲 42m 极大型望远镜计划(E-ELT),如图 1-7 所示。主镜由 900 多块 1.45m 正六边形分块镜组成,其分块主镜的测量效率问题也将是面临的重要挑战之一。下一代极大型望远镜通常采用卡塞格林光学设计,这样的光学系统的实现需要制造一个大口径的凸面次镜;如 E-ELT 的次镜为 6m ,美国大口径巡天望远镜(LSST),如图 1-8 所示的次镜为 4m ,其非球面度将达到几个 mm ,如何对其进行检测也是拟解决的关键技术之一。

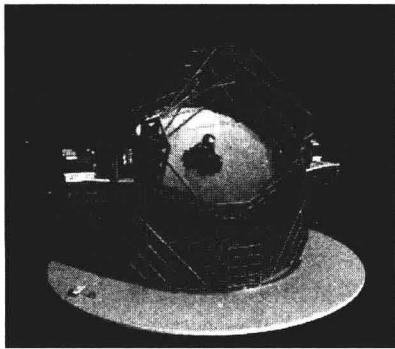


图 1-7 欧洲极大型望远镜(E-ELT)示意图

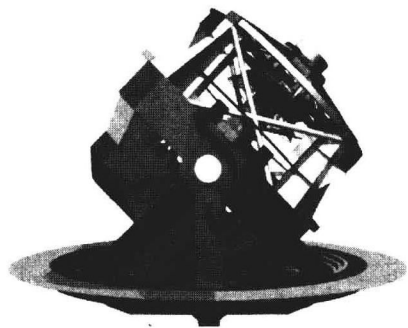


图 1-8 美国大口径巡天望远镜(LSST)示意图

光刻技术的不断进步对集成电路的飞速发展起到了极为关键的作用,它直接决定了单个器件的物理尺寸。在《国际半导体技术蓝图》(2005 版)中,以前列出的可扩展到 45nm 节点的 193nm 浸入式光刻技术已作为 22nm 节点的可能解决方案,是目前各国研究的重要方向之一。在 193nm 浸入式光刻系统中,对光学元件的制造提出了更高的精度要求,通常从低频、中频和高频面形误差进行评价,高精度光学元件的加工需要与之精度相匹配的检测技术来保证。对于中频和高频误差的检测,现有的检测技术比较成熟,且有商品化的检测设备:干涉显微镜和原子力显微镜;低频面形误差的高精度检测技术的建立仍然存在很多挑战。干涉测量技术的基本原理是通过分析参考波前与被测波前产生的干涉条纹而获得被测光学元件表面面形误差信息,其干涉测量精度将主要受到标准镜头所产生的参考波前精度的限制。实现高精度面形检测的解决方法通常有两个:点衍射干涉仪通过产生高精度的参考波前来实现高精度测量;另一个方法是对干涉测量装置进行标定,以减小或消除系统误差的影响,以达到所需要的测量精度要求。国际知名企业 Zeiss, Nikon, Cannon 均建立了满足使用要求的高精度相移干涉仪和点衍射干涉仪,其中 Zeiss 的 DMI100 干涉仪的面形测量精度已达到 $0.2\text{nm}(\text{RMS})$, Nikon 和 Cannon 的点衍射干涉仪也实现了 0.25nm