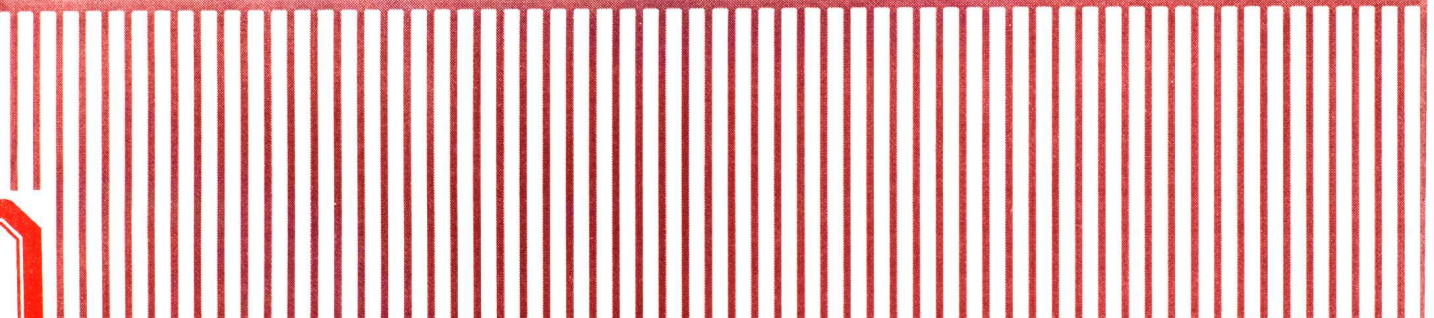
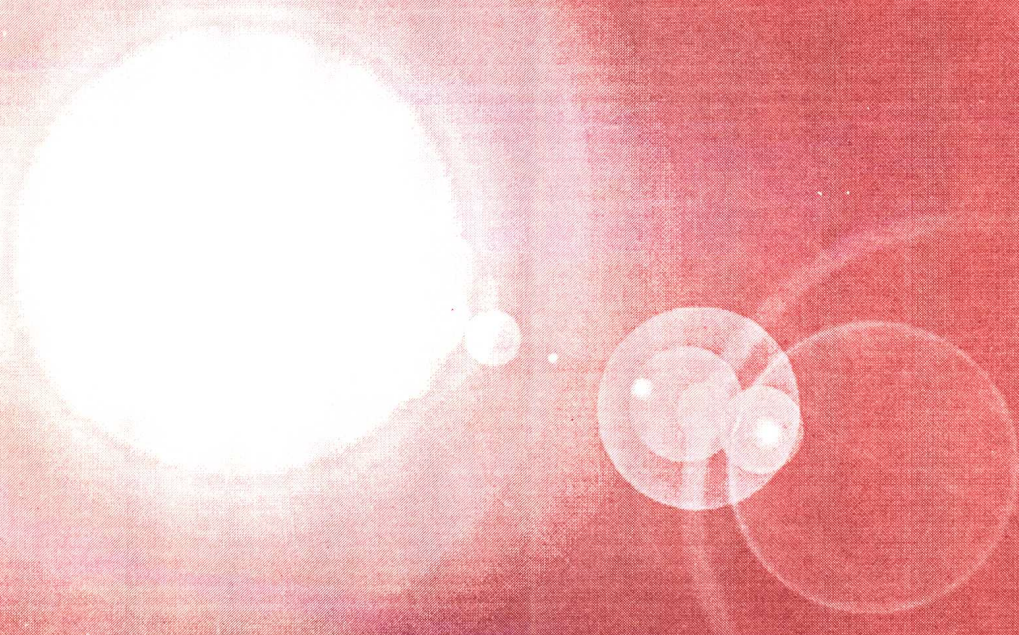


近代光学测试技术

杨国光 主编



浙江大学出版社

近代光学测试技术

杨国光 主编

浙江大学出版社

内容简介

本书是《近代光学测试技术》(1986年)的新版,内容上增加了80年代以后发展的最新光电测试技术,章节从原来的十个方面扩展成十一个方面,即干涉技术;全息技术;散斑技术;莫尔技术;衍射技术;光扫描技术;光纤传感技术;激光多普勒技术;激光光谱技术;信息与图像技术;光学纳米技术。本书选材上既注重基础理论性更着重实用性和先进性,是学习、掌握先进的近代精密测试技术的一本入门书和技术实用书。

本书可供光学、光电仪器、精密仪器、测量与控制专业的大专和本科学生、研究生和教师作为教学参考书,同时也是科研、生产、科技部门的广大科技人员,精密测试工作者学习与参考的实用技术书。

图书在版编目(CIP)数据

近代光学测试技术 / 杨国光主编. —杭州: 浙江大学出版社, 1997. 9 (2002 重印)
ISBN 7-308-01951-9

I. 近... I. 杨... III. 光学—计量—高等学校—教材 IV. TB96
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 095117 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 涂 红
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 德清第二印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 38.25
字 数 979 千
版 次 1997 年 9 月第 1 版 2002 年 6 月第 3 次印刷
印 数 2001—3000
书 号 ISBN 7-308-01951-9/TB·024
定 价 39.00 元

序 言

随着近代科学技术和工业技术的迅速发展,传统的光学机械测试方法已日益不适应近代工业和科学技术提出的高精度,高效率与自动化的测试要求。在精密测试领域中,必须注入新的活力,激光和计算机技术的出现和二者的结合为新的测试技术开辟了一条新的途径。为促进精密测试技术和光学工业本身的现代化和便于各学科之间的相互促进和渗透,我们根据科研与教学工作的需要,从近代光学的角度,系统的编写了这本书。

利用光学进行精密测试,一直是测试技术领域中的主要方法。由于光学测试方法的非接触性,高灵敏度性,高精度性以及光学图像的二维计量性,在应用上十分有意义。但近代对测试技术提出了三维性,相关性及时性,要求更高的灵敏度和精度。传统的普通光学方法已不能适应。为此,70年代以来国内外主要发展以激光为中心的精密测试技术;特别是激光与计算机结合的近代光学测试技术,这种技术是以近代光学为基础来实现精密计量与测试。近代光学测试技术的任务与手段主要是:

(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。

本书则以上述内容为中心,分十章以专题形式从十个方面来综述国内外自70年代以来新发展的各种光学测试新技术。为使篇幅不致太多,本书有选择的略去了一些方面,例如,高速摄影测试技术,散射测试技术,偏振、光度、色度测试技术等。而主要介绍发展比较成熟、技术比较先进而又有一定应用意义的方法。

本书主要是为光学、光学仪器、精密仪器仪表专业的大专和本科学学生、研究生编写的一本专业参考书。为便于其他专业的技术人员学习阅读,在每章中都有适当的入门基础介绍,特别是第一章与第二章。另外,每章附有参考书目与文献,便于读者进一步深入,从中找到有价值的材料。

本书编著者虽都是直接从事这方面技术工作的专业人员,但由于本书在技术上较新,涉及面又广,经验不足,因此在取材和编写上肯定有不妥和错误之处,望读者及时指正。

编著者

1983年12月

于浙江大学

新版序言

本书出版已逾 10 年,随着我国工业与科学技术在这 10 年中的蓬勃发展,现代测试技术已成为一门急需发展的技术学科而得到重视,光学及光电测试由于其非接触性和高精度性而更为广泛的得到应用。因此《近代光学测试技术》一书自出版起,就受到广大科技工作者的青睐,供不应求。为满足我国工业界、科技界、教育界的需求,现特在原书基础上,增加 80 年代以后发展的新的光学及光电测试技术,内容从原来的十个方面扩展成十一个方面,增加光学纳米技术这一章,并在书前增加一个前章,阐明如何使用本书。另外由于第三章的作者龙槐生教授的逝世,第十章作者张浚生的繁重社会事务而未作修改,特此说明。

本书在取材上主要突出一个“新”字和一个“用”字,使原书注重的理论性、实用性和先进性更得到发挥和加强。

本书是对 1997 年浙江大学建校 100 周年的一个祝贺和纪念。

编著者

1996 年 8 月

于浙江大学求是园

目 录

前章 光学测试技术综述.....	1
编著:杨国光	
§ 0-1 领域与特点	1
一、研究领域	1
二、技术特色	2
§ 0-2 技术现状	3
§ 0-3 方法的选择	4
§ 0-4 技术发展的方向	6
本章参考文献.....	8
第一章 光干涉技术.....	9
编著:卓永模	
§ 1-1 光干涉的基础知识	9
一、相干光场的性质	9
二、两个相干波的叠加	10
三、部分相干理论	13
四、干涉仪常用的光源及激光光源	19
五、干涉条纹的间隔和形状	20
§ 1-2 近代干涉测试技术	22
一、泰曼—格林干涉仪测试	22
二、典型的双光束干涉图及其分析	22
三、任意波前的干涉图分析	26
四、共路干涉仪测试	26
§ 1-3 多通道干涉仪测试	55
一、双通道干涉仪	55
二、多通道干涉仪	58
§ 1-4 波面位相的实时检测技术	60
一、条纹扫描波面位相实时检测	61
二、共路错位扫描干涉仪	67
三、实时横向错位干涉仪	71
四、外差干涉位相检测	74
五、锁相干涉技术	76
六、双波长条纹扫描干涉仪	78
七、空间调制的波面位相检测	81
§ 1-5 长度(间隔、高度、振幅)的激光干涉	83
一、激光干涉测长的工作原理及特点	83
二、激光干涉测长应解决的几个问题	85
三、激光干涉测长的应用	99

§ 1-6 激光外差干涉测长与测振	118
一、双频激光外差干涉仪	119
二、双频激光外差干涉的应用	121
三、条纹小数重合法原理	133
四、红外双线氦氖激光绝对干涉测长系统	136
本章参考文献	140
第二章 光全息技术	142
编著: 杨国光	
§ 2-1 全息原理及全息图特性	142
一、概述	142
二、全息原理	142
三、全息图的数学描述	143
四、全息图的类型	146
五、全息图的特性	148
六、全息图的分辨率与衍射效率	163
§ 2-2 全息测试技术	165
一、全息干涉技术	165
二、全息等高线技术	169
三、全息相关技术	173
§ 2-3 全息技术的应用	178
一、缺陷检测	178
二、尺寸和形状检测	183
三、三维测量	186
四、振动的测量与分析	190
五、粒子与流场分布测定	190
六、其他应用	193
§ 2-4 计算全息技术	199
一、概述	199
二、计算全息原理	199
三、制作步骤	202
四、应用前景	202
§ 2-5 全息实用技术	204
一、基本设备	204
二、精密工作台	205
三、激光器	205
四、光学系统	205
五、全息底片	207
六、曝光及暗室处理	207
本章参考文献	208
第三章 散斑技术	210

编著: 龙槐生

§ 3-1 散斑及其性质	210
一、散斑的形成	210
二、散斑的大小	210
三、散斑的光强分布	211
§ 3-2 平移、转动及应变对散斑的影响	213
一、基本关系式	213
二、物体应变对散斑的影响	217
§ 3-3 散斑计量技术	219
一、概述	219
二、聚焦散斑照相法	220
三、离焦散斑照相法	227
四、不用透镜的散斑法——客观散斑法	232
五、散斑干涉术	235
六、散斑剪切干涉术	242
七、白光散斑技术	246
八、测量物体位移与变形的几种方法小结	247
§ 3-4 散斑的应用	248
一、用散斑测量振动	248
二、测量透明物质的一些性质	253
三、电子散斑干涉计量(ESPI)	254
四、其他方面的应用	259
§ 3-5 实用方面的一些考虑	262
一、感光材料	262
二、照明光源	263
三、物体	263
四、照相物镜	263
本章参考文献	264
第四章 莫尔条纹技术	265
编著: 曹向群	
§ 4-1 条纹形成原理	265
一、概述	265
二、序数方程原理	265
三、衍射干涉原理	266
四、频谱分析原理	268
§ 4-2 光栅读数头	272
一、莫尔条纹信号的特点	272
二、光栅读数头组成	274
三、分光读数头	274
四、直接接收式读数头	275

五、镜像式读数头	276
六、反射式读数头	277
§ 4-3 光栅系统参数选择	277
一、照明系统	277
二、准直透镜	279
三、光栅技术指标	280
四、光电转换	285
五、计数概述	286
§ 4-4 莫尔技术的位置检测	288
一、引言	288
二、光电轴角编码器	288
三、线性编码器	292
四、扫描式粗光栅系统	294
五、精密定位系统	294
§ 4-5 莫尔技术的形状检测	298
一、莫尔偏折术原理	298
二、应变测试原理	302
三、莫尔轮廓测定原理	305
四、莫尔轮廓图形应用技巧	309
§ 4-6 变形光栅莫尔轮廓法	311
一、傅里叶变换轮廓法	311
二、空间相位检测法	315
三、编码光栅调制法	317
本章参考文献	319
第五章 光衍射技术	321
编著: 杨国光	
§ 5-1 激光衍射计量原理	321
一、概述	321
二、计量原理	321
三、基本公式	322
四、技术特点	324
§ 5-2 激光衍射计量技术	325
一、基本方案及其分析	325
二、间隙计量法	327
三、反射衍射法	330
四、分离间隙法	330
五、互补测定法	332
六、爱里圆测定法	333
七、测量精度与最大量程	334
八、实际的激光衍射测量系统	336

§ 5-3 实际的应用	340
一、间隙或间隙变化的测量	340
二、位移与间隙的远距测量	341
三、表面缺陷的自动检测	341
四、细丝及薄带尺寸的测量	345
五、角度的精密测量	347
六、全场测量	349
七、波前测量	350
本章参考文献	350
第六章 光扫描技术	352
编著: 杨国光	
§ 6-1 概述	352
§ 6-2 激光扫描计量技术	352
一、计量原理	352
二、 $f-\theta$ 扫描物镜	354
三、光学系统的匹配	356
四、球面镜扫描系统	358
五、扫描器件	362
六、应用	362
§ 6-3 位相调制扫描技术	367
一、光调制扫描法	367
二、外差扫描法	369
§ 6-4 光扫描定位技术	371
一、光电显微镜技术	371
二、激光扫描定位装置	373
§ 6-5 表面特征检测的扫描技术	373
一、反射光检测法	374
二、散射光检测法	374
三、扫描频谱分析法	376
§ 6-6 光扫描技术的其他应用	379
一、三维扫描技术	379
二、激光退火扫描技术	381
三、激光打印技术	382
四、无定向激光扫描	383
五、检查芯片的激光扫描	384
本章参考文献	385
第七章 光纤传感技术	387
编著: 张仲先	
§ 7-1 概述	387
§ 7-2 光纤传光原理及传输特性	388

一、光纤的结构和种类	388
二、光纤的传输模式	389
三、光纤的传输损耗	392
四、光纤的色散	393
§ 7-3 光纤传感器工作原理	394
一、分类	394
二、工作原理	394
§ 7-4 光纤传感器的应用	398
一、功能型光纤传感器的应用	398
二、非功能型光纤传感器的应用	410
§ 7-5 国内外光纤传感器研究动向	420
§ 7-6 光纤实用技术	423
一、光纤的选择	423
二、光纤的处理方法	424
三、光纤中的光耦合	424
四、光纤的分光与合光器	428
本章参考文献	429
第八章 激光多普勒技术	430
编著: 张仲先	
§ 8-1 激光多普勒效应	430
一、概述	430
二、多普勒频移	430
三、差动多普勒技术	432
§ 8-2 激光多普勒测速技术	433
一、激光多普勒测速的特点	433
二、激光多普勒测速原理	434
三、激光多普勒测速仪的基本光路	434
§ 8-3 流速方向判别和多维测量	440
一、方向判别和外差技术	440
二、多维激光多普勒测量技术	446
§ 8-4 激光多普勒信号处理系统	449
一、激光多普勒信号的特点	449
二、频谱分析法	449
三、频率跟踪法	450
四、计数型信号处理法	452
五、滤波器组分析法	453
六、光子计数相关法	454
七、扫描干涉法	455
八、信号处理技术的选择	456
§ 8-5 激光多普勒技术的应用	456

一、管道内水流的测量	457
二、激光测量二相流	457
三、血液流动的研究	459
四、激光多普勒显微镜和生物体研究	459
五、湍流的研究	459
六、丙烷气火焰流速的测量	459
七、转子动叶栅内部气流速度的测量	460
八、大气风速测量	461
九、超音速风洞中激光测速	462
十、固体表面速度的测量	462
十一、振动的测量	462
本章参考文献	464
第九章 激光光谱技术	465
编著: 张浚生、林中	
§ 9-1 激光光谱学和激光光谱技术	465
§ 9-2 可调谐激光器	465
一、可调谐染料激光器	465
二、可调谐半导体激光器	472
§ 9-3 激光喇曼光谱技术	472
一、基本原理	472
二、激光喇曼分光计	475
三、新实验技术	483
四、共振喇曼光谱技术	492
五、相干反斯托克斯喇曼光谱技术(CARS)	493
§ 9-4 激光荧光光谱分析	497
一、基本原理及发展	497
二、检测激光原子荧光的装置	498
§ 9-5 激光原子吸收光谱分析	503
一、分析的原理	503
二、激光原子吸收光谱分析的特点及其装置	504
§ 9-6 激光微区光谱分析	505
一、原理及特点	505
二、激光微区分析的典型装置	506
§ 9-7 其他实用激光光谱技术和应用	510
一、大气污染监测	510
二、激光光声光谱技术	512
三、超短光脉冲光谱技术	513
四、光电流光谱技术	514
本章参考文献	516
第十章 光信息与图像检测技术	518

编著: 杨国光	
§ 10-1 概述	518
§ 10-2 像传感检测技术	519
一、原理	519
二、应用	520
§ 10-3 图像扫描检测技术	523
一、基本型式	523
二、测试上的应用	524
§ 10-4 光信息处理检测技术	529
一、概况	529
二、取样法	530
三、滤波法	533
四、相关测量法	539
§ 10-5 数字图像检测技术	543
一、概述	543
二、数字图像处理基础	545
三、应用实例	558
本章参考文献	574
第十一章 光学纳米测量技术	575
编著: 包正康	
§ 11-1 引言	575
§ 11-2 纳米测量系统	577
一、概述	577
二、纳米传感技术	578
三、扫描测试系统	579
§ 11-3 扫描隧道显微镜 (STM)	580
§ 11-4 原子力显微镜 (AFM)	584
一、AFM 的工作原理	584
二、AFM 微悬臂弯曲的检测方式	585
§ 11-5 激光力显微镜 (LFM)	587
§ 11-6 光子扫描隧道显微镜 (PSTM)	589
§ 11-7 扫描近场光学显微镜 (SNOM)	590
§ 11-8 扫描探针显微镜	592
§ 11-9 纳米测量的几个问题	594
一、纳米计量的技术组成	595
本章参考文献	597

前章 光学测试技术综述

§ 0-1 领域与特点

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(Metorlogy)、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 0-1 所示。

表 0-1 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,切剪干涉技术,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
5	光谱技术	棱镜光谱技术,光栅光谱技术,喇曼光谱技术,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 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,使光学发展成近代光学。以激光为代表的近代光学促使光学测试技术出现更多新方法和新技术,从而开始形成近代光学测试技术。近代光学测试技术研究的领域如表 0-2 所示。

表 0-2 近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,实时剪切干涉
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,散斑剪切法,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

近代光学测试技术的出现适应了近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 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,为此,本书也给予介绍。

二、技术特色

利用光学进行精密测试,一直是计量测试技术领域中的主要方法。由于光学测试方法的非接触性,高灵敏度性和高精度性,而在近代科学研究,现代技术,工业生产,空间技术,国防技术中得到广泛应用,成为一种无法取代的技术。特别是激光技术,微电子技术与计算机技术的发

展,使光学测试技术向近代光学测试技术方向发展。近代光学测试技术的主要特点如表 0-3 所示。

表 0-3 近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
3	高精度	1. 测量精度 $10\mu\text{m} \sim 0.1\mu\text{m}$ 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,近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,促使近代光学测试技术更上一个层次,成为近代科学技术,近代工业生产的眼睛,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。

§ 0-2 技术现状

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近代光学测试技术,其发展现状如图 0-1 所示。图 0-1(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,是近代光学的支撑基础。图 0-1(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^[3]。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。

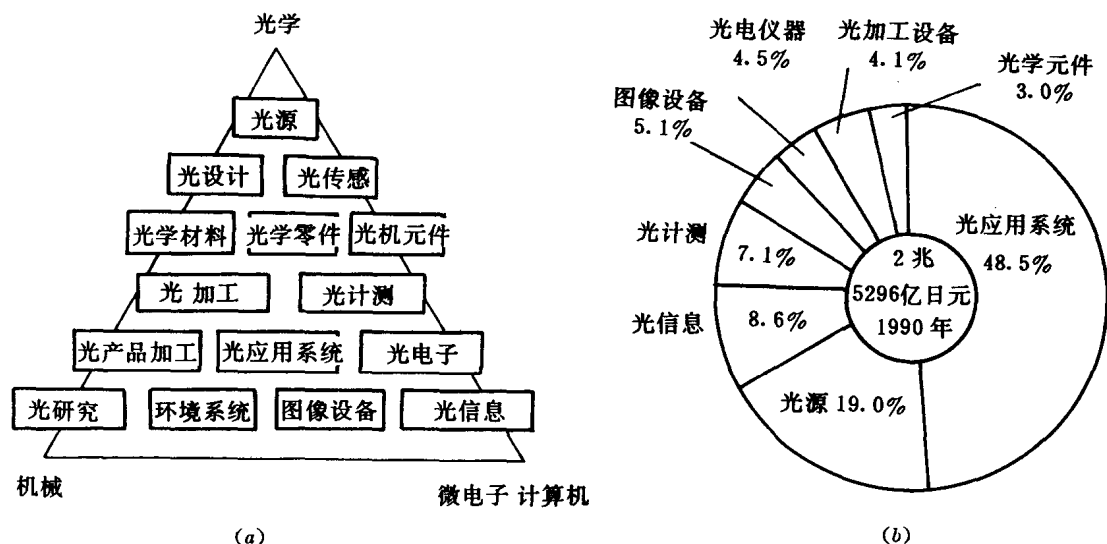


图 0-1 光学产业发展现状

图 0-2 是近代光学测试技术的现状,说明组成近代光学测试技术的学科支撑系统。图(a)是支撑的分学科系统,图(b)是支撑的相关学科。

图 2 可以看出,从原理上说近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,近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,具有存贮、记录功能的测量。

§ 0-3 方法的选择

面对一个计量测试任务,首先碰到的问题是如何合理而可靠地选择一种好的测试原理。对没有经验,特别是初学光学测试技术而又想较快了解能否有方法来解决手头上的测试任务的读者来说,本节的内容是重要的。

合理选择光学测试方法的原则是根据五点:

- 1) 测定对象;
- 2) 测定范围;
- 3) 灵敏度或精度;
- 4) 经济性;
- 5) 测试环境。

测定对象是指被测的类型,例如是测量长度,还是测量角度,是测量速度还是测量位移;是