



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

# 光电测试技术

## 第3版

PHOTOELECTRIC MEASUREMENT TECHNOLOGY

主编 ◎ 哈尔滨工业大学 刘国栋  
◎ 上海交通大学 赵 辉  
◎ 哈尔滨工业大学 浦昭邦



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

# 光电测试技术

第3版

主编 刘国栋 赵 辉 浦昭邦  
参编 蓝 天 庄志涛 陶 卫 胡 涛 屈玉福



机械工业出版社

本书为高等工科院校“测控技术与仪器”“光电信息工程”“光电子技术”等专业的“光电测试技术”课程通用教材。

本书首先系统地介绍了光电测量所必需的基础理论，即光度学的基本理论和常用的光学系统，然后深入、重点地讲述了光电测量的三大基本要素：光源、光电检测器件和光电检测电路。

在本书的下篇（应用技术篇），重点讲述了光电测量的核心技术：光学变换与光电变换技术及其测量系统，包括光载波的调制变换技术、非相干信号的光电变换与检测技术、相干信号调制变换与检测技术。介绍了现代三大热门测试技术，即激光测量技术、视觉检测技术和光纤测量技术，使读者对光电测试系统及其应用有了更深入的了解。

为了方便教学，本书配有免费教学课件。欢迎选用本书作为教材的教师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

## 图书在版编目（CIP）数据

光电测试技术/刘国栋，赵辉，浦昭邦主编. —3版. —北京：机械工业出版社，2018.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育光电信息科学与工程规划教材

ISBN 978-7-111-58564-0

I. ①光… II. ①刘… ②赵… ③浦… III. ①光电检测—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 291133 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：刘丽敏 责任编辑：刘丽敏 陈文龙 张利萍

责任校对：肖琳 封面设计：张静

责任印制：张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22.75 印张 · 552 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-58564-0

定价：49.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-88379649

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

## 刘国栋

教授，工学博士。现任哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院副院长，光电测控与智能化研究所所长。

长期从事精密仪器设计、精密激光测量、机器视觉测量、光电传感、人工智能等



领域研究。完成神光III靶场光电等多项重大、重点科研项目，获国防技术发明特等奖1项，全国高校十大科技进展1项，军队科技进步一等奖1项。近年来发表SCI、EI收录学术论文30余篇，授权发明专利20余项。

## 赵辉

教授，工学博士，现任上海交通大学仪器科学与工程系自动检测研究所所长。

一直从事新型传感器、视觉检测、生物感知等方面的研究工作，先后主持国家级与省部级科研项目50余项，发表学术论文150余篇，申请国家发明专利50余项，获得省部级科技进步奖励8项。



## 浦昭邦

哈尔滨工业大学教授，博导。

先后承担九门课程教学，完成科研项目25项，其中获部级科技进步一等奖2项、二等奖3项、三等奖3项。如国家重大项目北京正负电子对



撞机子项目“定位子自动分选仪”；航天测试项目“惯性仪表零件超精测试方法与装置”；省科技攻关项目“微电子产品视觉检测系统”等均达到国际先进水平。

主编全国统编教材《测控仪器设计》《光电测试技术》，编著《计量光栅技术》，参编《长度计量手册》《精密仪器结构设计手册》等共八部，在国内外高水平期刊和国际会议上发表论文百余篇。

## 前 言

《光电测试技术》一书自出版以来,已得到许多使用本书的高等院校的好评。尤其是本书的光电器件与光电测试的一体化结构,不仅具有很好的系统性,更有利于读者的学习和应用。

光电测试技术的核心是“两个变换”,即测量信息对光信息的变换和光信息对电信息的变换。

光电探测器件是实现光信息对电信号变换(光电变换)的核心器件,在本书第2版强调光电器件基础理论(光电效应和光电特性)的基础上,第3版则加强了其实用性,尤其对应用越来越广泛的光电成像器件进行了内容扩展和使用举例。光电检测电路是光电器件应用的重要方面,第3版中以实用为准则,对内容重新编排,并增加了光电发光器件的电路内容。

测量信息对光信息的变换是光电测量的关键,本书将这部分内容统一在下篇论述。光载波的调制与变换是基础,非相干光与相干光信号的变换与测量是其主要方法,这种编排力求使光电测试技术的内容更加通俗易懂和实用。

本书由哈尔滨工业大学刘国栋教授、浦昭邦教授和上海交通大学赵辉教授主编。浦昭邦教授虽年事已高,但对本书的再版提出了许多宝贵意见,对本书体系的建立做了许多工作。参加编写的有哈尔滨工业大学刘国栋(第一~三章,第九章第一、二节),北京理工大学蓝天(第四章第一~五节),北京航空航天大学屈玉福(第四章第六~七节,第九章第三节),上海交通大学赵辉(第五章、第九章第四节),哈尔滨工业大学庄志涛(第六章),哈尔滨工业大学胡涛(第七章)和上海交通大学陶卫(第八章)。

全书由厦门大学黄元庆教授和北京信息科技大学吕乃光教授主审,由哈尔滨工业大学马晶月完成本书的统稿整理。

本书参阅了大量的参考资料,在此谨向有关作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,难免有疏漏和错误。恳请广大读者指正,以便进一步修订和完善。

编 者  
2017年6月

# 目 录

## 前言

## 上篇 技术基础篇

第一章 光电测试技术概论	3	三、光谱功率谱分布	26
第一节 信息技术与光电测试技术	3	四、空间发光强度分布特性	27
第二节 光电测试系统的组成	3	五、光源光辐射的稳定性	27
第三节 光电测试技术的特点 及其展望	4	六、光源的色温和显色性	28
复习思考题 1	6	第二节 光电测量的常用光源	28
第二章 光电测量的光学基础	7	一、热辐射光源	28
第一节 光度的基本物理量	7	二、气体放电光源	31
一、光谱光视效能	7	三、金属卤化物灯	31
二、光度的基本物理量	8	四、半导体发光器件	32
第二节 光度学基本定律	9	五、激光光源	37
一、余弦定律	10	第三节 照明系统	42
二、亮度守恒定律	10	一、照明系统的设计原则	42
三、照度与距离二次方反比定律	11	二、照明的种类	43
第三节 光辐射在空气中的传播	12	第四节 光源及照明系统的选择	46
一、大气衰减	12	复习思考题 3	47
二、空气湍流效应	13	第四章 光电器件	48
第四节 光电测试技术中常用的 光学系统	14	第一节 光电探测器件的性能参数	48
一、显微光学系统	14	一、光电器件的探测灵敏度 (响应度)	48
二、摄影光学系统	19	二、响应时间和频率响应	49
三、投影光学系统	21	三、噪声等效功率 (NEP)	50
四、反射式与折反式光学系统	22	四、探测度 $D$ 与比探测度 $D^*$	51
五、自准直光学系统	24	五、量子效率	51
复习思考题 2	25	六、光电流	51
第三章 光电测量系统中的光源与 光源系统	26	第二节 光电发射器件	52
第一节 光源的基本参数	26	一、光电发射效应	52
一、发光效率	26	二、光电真空器件及其特性	56
二、寿命	26	第三节 光电导器件	62
		一、光电导效应	62
		二、光敏电阻及其特性	65

第四节 光伏器件 .....	69	设计要求 .....	122
一、PN 结及光伏效应 .....	70	二、光敏电阻输入电路的	
二、光电池 .....	73	静态设计 .....	123
三、光敏二极管 .....	76	三、光电倍增管电路的	
四、PIN 光敏二极管 .....	81	静态设计 .....	127
五、雪崩光敏二极管 (APD) .....	81	四、光电池输入电路的	
六、光敏晶体管 .....	83	静态设计 .....	129
七、光电位置器件 (PSD) .....	84	五、光敏二极管与光敏晶体管输入	
八、光伏器件的特性与使用要点 .....	85	电路设计 .....	132
第五节 各种光电器件的性能比较和		第三节 光电检测器件电路的动态	
应用选择 .....	88	参数设计 .....	136
一、接收光信号的方式 .....	88	一、光电检测电路的高频特性 .....	137
二、各种光电探测器件的		二、光电检测电路的综合	
性能比较 .....	88	频率特性 .....	138
三、光电探测器件的应用选择 .....	89	第四节 光电发光器件的	
第六节 热电探测器件 .....	90	驱动电路 .....	141
一、热电探测器件的一般原理 .....	91	一、光电发光电路的设计要求 .....	142
二、温差电偶及其特性 .....	93	二、发光二极管驱动电路 .....	142
三、热敏电阻及其主要参数 .....	95	三、半导体激光器驱动电路 .....	144
四、热释电器件 .....	97	第五节 光电成像器件电路 .....	147
第七节 光电成像器件 .....	100	一、CCD 光电成像器件的	
一、光电成像器件的		驱动电路 .....	147
类型和特点 .....	100	二、CMOS 器件电路 .....	154
二、固体摄像器件 .....	101	第六节 热电器件电路 .....	156
复习思考题 4 .....	119	一、热电偶器件电路 .....	157
第五章 光电器件电路 .....	121	二、热敏电阻器件电路 .....	160
第一节 光电器件电路的		三、热释电器件电路 .....	160
作用和种类 .....	121	第七节 光电器件电路应用实例 .....	161
一、光电器件电路的作用 .....	121	一、光电报警电路 .....	161
二、光电器件电路的种类 .....	121	二、光电开关电路 .....	162
第二节 光子探测器件的		三、弱光检测电路 .....	163
输入电路 .....	122	复习思考题 5 .....	175
一、光子探测输入电路的			

## 下篇 应用技术篇

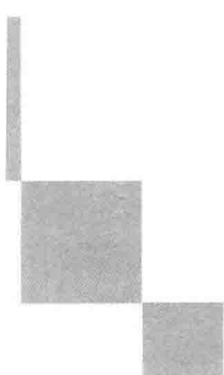
第六章 光载波的调制变换 .....	181	一、光载波调制变换的	
第一节 光载波调制变换的		概念与目的 .....	181
概念及方法 .....	181	二、光载波调制变换的方法 .....	181

三、光学变换信息的频谱·····	187	三、差频测相技术·····	252
第二节 光载波的调制变换技术·····	188	第六节 随空间变化的光电信号	
一、振动镜或旋转多面体法·····	188	变换与检测方法·····	254
二、调制盘法·····	190	一、几何中心检测法·····	254
三、光栅莫尔条纹调制变换法·····	201	二、几何位置检测法·····	257
四、声光调制变换法·····	203	三、亮度中心检测法·····	264
五、电光调制变换法·····	207	复习思考题7·····	266
六、磁光调制变换法·····	213	第八章 相干信号的变换与检测·····	267
七、直接调制(内调制)		第一节 相干变换与检测的原理·····	267
变换法·····	216	一、光学干涉和干涉测量·····	267
第三节 光束扫描测量技术·····	219	二、干涉测量中的调制和解调·····	268
一、扫描系统分类、工作参数		第二节 相干信号的发光	
及方法·····	219	强度检测·····	269
二、光束扫描测量·····	226	一、干涉条纹发光强度检测法·····	269
复习思考题6·····	232	二、干涉条纹比较测量法·····	271
第七章 非相干信号的光电变换与		三、干涉条纹跟踪测量法·····	272
检测·····	233	第三节 相干信号的相位调制变换与	
第一节 光电信号变换与光电测量		检测·····	273
系统概述·····	233	一、相位调制变换的方法·····	273
第二节 直接检测系统的		二、相干调相信号的检测方法·····	279
工作原理·····	234	第四节 相干信号的频率调制变换与	
一、直接检测系统的		外差检测·····	282
组成和原理·····	234	一、相干信号的频率调制变换·····	282
二、直接检测系统的主要参数·····	235	二、光学外差检测·····	286
第三节 直流或缓变光电信号的变换		复习思考题8·····	297
与检测方法·····	240	第九章 现代光电测试技术·····	298
一、直读法·····	240	第一节 概述·····	298
二、指零法·····	241	第二节 激光测量技术·····	298
三、差动法·····	242	一、激光干涉测长技术·····	298
四、补偿法·····	242	二、共光路激光干涉	
第四节 脉冲信号的时间检测法·····	243	测量技术·····	303
一、脉冲式激光测距的原理·····	243	三、激光外差干涉测量技术·····	305
二、时刻鉴别方法·····	244	四、激光衍射测量技术·····	312
三、高精度时间间隔测量·····	245	五、激光测距与跟踪测量技术·····	314
四、脉冲激光测距动态		六、近场光学显微技术·····	318
范围分析·····	248	七、激光共聚焦显微技术·····	320
第五节 相位信号检测法·····	249	第三节 视觉检测技术·····	321
一、相位法激光测距原理·····	249	一、视觉检测系统的组成·····	321
二、测尺的选择·····	251	二、典型视觉检测系统·····	322



---

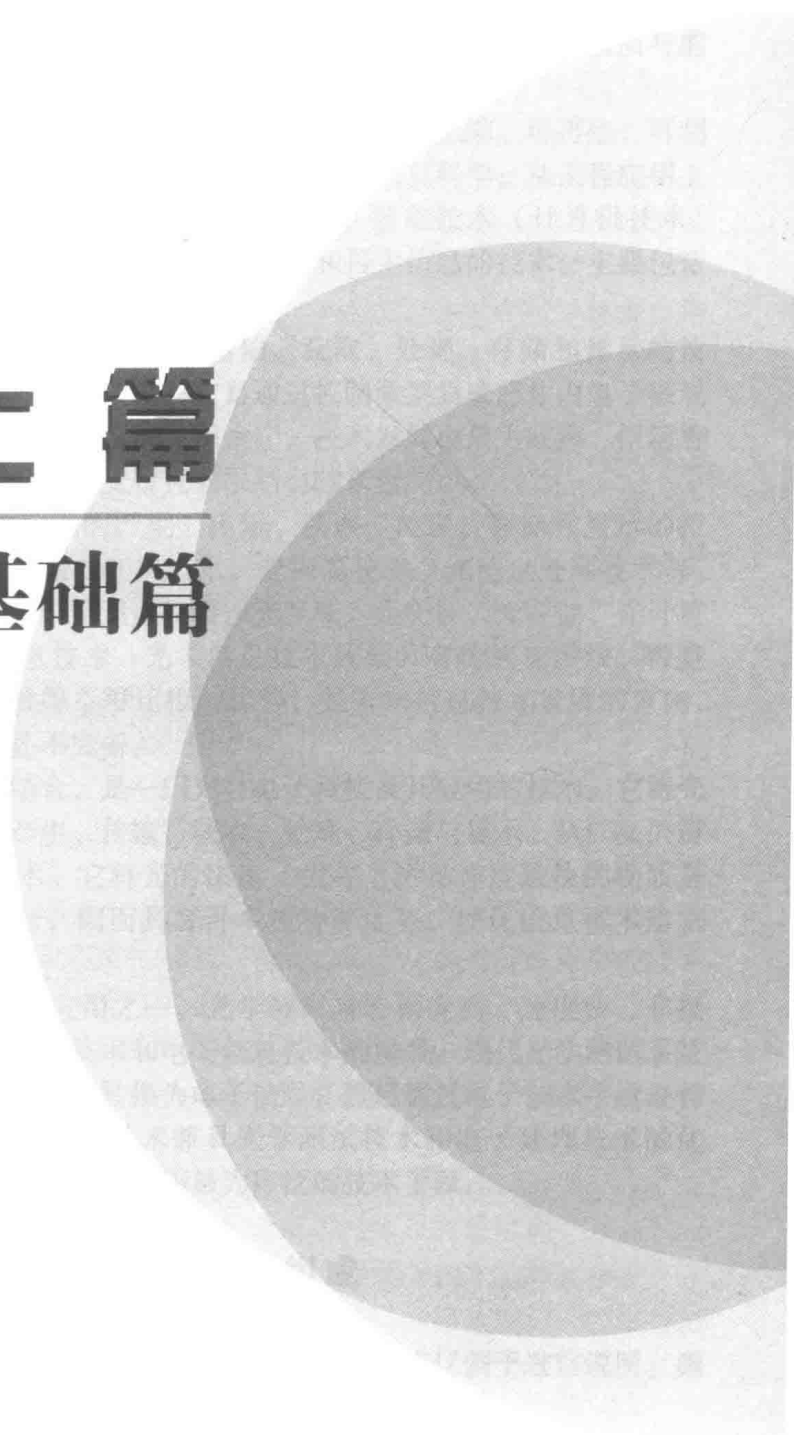
三、医学和生物学中的视觉 检测技术·····	330	一、光纤测量技术概述·····	335
四、半导体检测中的视觉 检测技术·····	333	二、强度调制型光纤测量技术·····	339
五、交通领域中的视觉 检测技术·····	333	三、相位调制型光纤测量技术·····	342
六、光电跟踪与光电制导中的 视觉技术·····	335	四、偏振调制型光纤测量技术·····	345
第四节 光纤测量技术·····	335	五、频率调制型光纤测量技术·····	347
		六、光纤光栅传感技术·····	348
		复习思考题9·····	352
		参考文献·····	353



# 上篇

---

## 技术基础篇





# 第一章 光电测试技术概论

## 第一节 信息技术与光电测试技术

人类社会赖以生存的三大基础要素是物质、能量和信息。物质是基础，能量是物质运动的动力，而信息作用于物质和能量并与人的主观认识相结合，使人们能很好地认识物质与能量，并推动物质的发展和能量的运动。

信息具有可度量、可转换、可处理、可控制、可存储、可传递、可压缩、可再生、可利用和可共享等特征。从理论上研究信息及其运动规律的科学称为信息科学；从工程应用上来研究信息的技术称为信息技术，它包括感测技术、通信技术、智能技术（计算机技术）和控制技术。因此信息技术是获取信息、传递信息、加工信息和再生信息的技术，主要包括电子信息技术、光学信息技术和光电信息技术等。

电子信息技术是以电子学方法来实现信息产生、传输、获取、处理、存储和显示的技术，在电子信息技术中应用最广泛的是微电子技术，它是通过控制微型集成芯片内电子微观运动来实现对信息的加工和处理，信号处理速度快、用途广，技术发展也最为成熟。但随着现代信息技术数据量越来越大，电子信息技术受带宽的限制也越来越明显。

光学信息技术是用纯光学方法实现信息的产生、传输、获取、处理、存储和显示的技术。它包括发光技术、光调制技术、光传输与变换技术、光探测技术、光信息处理技术等。自从激光和光纤发明以后，光信息技术得到了飞速发展。光互联、光交换、光存储、光计算等技术不断进步和完善。相对于电子信息技术，光学信息技术数据具有传输速度快、带宽宽、存储量大、处理速度快、无电磁干扰等不可比拟的优势，是未来信息技术发展的方向，但目前全光器件、全光计算技术的发展还不完备。

光电信息技术将电子学与光学有机结合，是一门光与电子转换及其应用的技术。它将光学技术与电子技术相结合以实现信息的产生、传输、获取、处理、存储与显示。从广义上讲光电信息技术就是在光频段的微电子技术。它将光的快速（世界上运动速度最快的物质是光）与电子信息处理的方便、快速相结合，因而具有许多独特的优势，现代信息技术越来越多地采用光电信息技术。

光电测试技术是光电信息技术的主要应用之一。光学测试具有精度高、速度快、非接触、信息量大等优点，而随着光电转换器件技术和电子信息技术的发展，现代光学测试系统中越来越多地采用光电转换器件，将光学信号转换为电子信号，然后通过电子技术手段进行信号处理、存储、传输与显示。由于光电测试技术兼具光学测试技术和电子处理技术的优势，因此它已经成为现代测试技术中最为重要、应用最为广泛的技术手段。

## 第二节 光电测试系统的组成

为了具体地阐述光电测试系统的原理，我们通过一个激光外径扫描仪例子进行说明。激

光外径扫描仪的功能是通过光学方法实现圆柱目标的外径测量。图 1-1 所示是激光外径扫描仪原理图。采用半导体激光器 2 作光源，光源发出的光经过旋转多面体 1 进行调制，而形成交变的光载波，该扫描光束经过  $f(\theta)$  透镜 3 后形成平行光，扫描被测工件 4。当光扫描至工件边缘时光通量发生变化，该变化的光通量被光电器件 6 转换为电信号，经过放大器和边缘检测而获得一个跳变的脉冲信号。当光继续扫描至被测工件 4 的另一个边缘时，光通量又出现一次跳变，该光通量变化又被光电器件转换为跳变的电信号，同样经过边缘检测而获得另一跳变脉冲，向两个跳变脉冲间填充测量脉冲便可测出光扫描工件上下边缘的时间  $\Delta t$ ，若光扫描工件的线速度  $v$  不变，则可测出被测工件尺寸  $D = v\Delta t$ 。

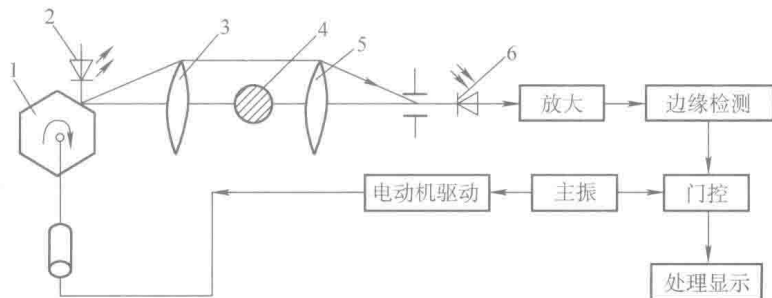


图 1-1 激光外径扫描仪原理图

1—旋转多面体 2—半导体激光器 3— $f(\theta)$ 透镜 4—被测工件 5—物镜 6—光电器件

上述工作过程可用一个系统框图表示出来，如图 1-2 所示，在该系统中，光是信息传递的媒介，它由光源产生。光源与照明用光学系统一起产生测量所需的光载波，如各种形式的照明光、结构光、准直光、振幅调制光、频率调制光等。光载波与被测对象相互作用而将被测量加载到光载波上，通过接收光学系统接收光信号，称为光学变换。光学变换后的光载波上加载的被测信息，称为光信息。光信息经光电探测器件接收实现由光向电的信息转换，称为光电转换。然后通过电信号处理的方法提取被测信息，进行显示、存储及控制。

如图 1-2 所示，光学变换与光电转换是光电测量的核心部分。光学变换通常采用各种光学元件或光学系统来实现被测量向光参量的转换，常见的光学变换器件或系统有光学镜片、波片、光纤、码盘、光栅、调制器、成像系统、准直系统、投影系统、干涉系统、衍射系统等，光学变换常见的物理量如长度、位移、振动、面型、空间坐标、温度、压力、流量、成分等，变换成的光参量有发光强度、振幅、频率、相位、偏振态、光谱、传播方向变化等。光电转换是通过各种光电转换器件来完成的，如光伏器件、光电流器件、热敏器件、光电成像器件、光电倍增管、光电位置探测器件等。

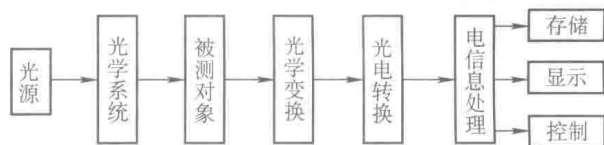


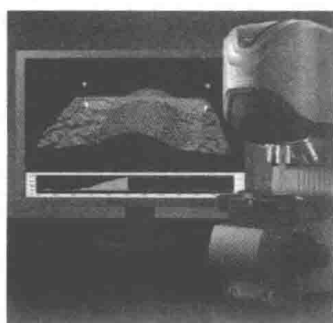
图 1-2 光电系统框图

### 第三节 光电测试技术的特点及其展望

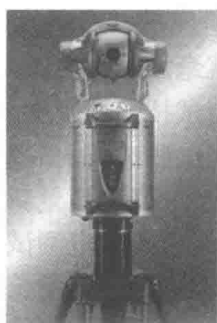
光电测试技术的发展与新型光源、新型光电器件、新型光学系统以及微电子技术、计算机技术的发展密不可分。自从 1960 年第一台红宝石激光器与氦-氖激光器问世以来，由于激光光源的单色性、方向性、相干性和稳定性极好，人们在很短时间内就研制出各种激光干

涉仪、激光测距仪、激光准直仪、激光跟踪仪、激光雷达等精密仪器，大大推动了光电测试技术的发展。1970年贝尔实验室研制出第一个固体摄像器件（CCD），由于 CCD 的小巧、坚固、低功耗、失真小、工作电压低、重量轻、抗振性好、动态范围大和光谱范围宽等特点，使得视觉检测进入一个新的阶段，它不仅可以完成人的视觉触及区域的图像测量，而且使得人眼无法涉及的红外和紫外波段的成像与检测也变成了现实，从而把光学测量的主观性（靠人眼瞄准与测量）发展成客观的光电图像测量。光导纤维从 20 世纪 60 年代问世以来，在传递信息和检测技术方面又发展出一个新的天地，光纤通信已经风靡全球，而光纤传感几乎可以测量各种物理量，尤其在一些强电磁干扰、危及人的生命安全的场合可以安全地工作，而且具有高精度、高速度、非接触测量等特点。可以说，一个新的光源、一个新的光电器件的发明都大大推动了科学技术的发展。

光电测试技术用途十分广泛，既广泛存在于我们日常生活中，又在工业、农业、国防、医学生物等各个领域发挥着重要的作用。日常生活中如光电鼠标、电视遥控器、计算机光驱、超市条码扫描器、交通超速监测等都是光电测试技术的应用。工业中如零件的显微精密检测、激光三维检测、工业 CT、光谱分析等，农业中如种子和果实的外观检测、含水量检测、淀粉量检测，航天领域如激光制导、激光雷达、空间目标追踪、高分辨率对地观测、光电对抗，医学生物领域如 X 光成像、分子显微成像等。以上所列举只是光电测试技术应用的一部分，可以说，绝大多数的检测领域，都有光电检测的应用。图 1-3 所示为光电测试系统的应用案例。



激光共聚焦显微镜



激光跟踪仪



激光制导炸弹

图 1-3 光电测试系统的应用案例

光电测试技术具有以下特点：

1) 精度高。因为光波是长度测量精度最高的基准，因此光电测量是各种测量技术中精度最高的一种。如用激光干涉法测量长度的精度可达  $0.05\mu\text{m}/\text{m}$ ；用光栅莫尔条纹法测角可达到  $0.04''$ ；用激光测距法测量地球与月球之间距离的分辨力可达到  $1\text{m}$ 。

2) 速度快。光电测试以光为媒介，而光是各种物质中传播速度最快的，无疑用光学的方法获取和传递信息是最快的，目前飞秒激光的脉冲可以达到  $10^{-15}\text{s}$ ，光电探测器件响应速度可以达到  $10^{-7}\text{s}$ ，响应速度非常快，是各种测量方法中效率最高的一种。

3) 既能实现超微观测量，又能实现超宏观测量。无论是微纳米尺度的探测，还是深空宇宙的探测，光电测试都发挥了极其重要的作用。

4) 适应性强。长度、热、力学、电学等大多数的物理量都可以变换成光学量，然后进行光电转换，再通过电学量进行测量。

5) 非接触测量。通过光学手段进行测试通常不需要与被测目标有机械接触,因此对被测目标无附加力,因此精度高、速度快,尤其适合对脆弱、易损目标(如半导体晶片)进行测量。

6) 具有很强的信息处理和运算能力,可将复杂信息并行处理。用光电方法还便于信息的控制和存储,易于实现自动化,易于与计算机连接,易于实现智能化等。

7) 寿命长。光波是永不磨损的,可以永久地使用。

近十几年来工程领域的加工精度已达到纳米级的水平,这对测量技术提出了更高的要求,迫切需要开拓新的手段,因此先后出现了各种纳米测量显微镜,如1982年隧道显微镜问世,它用测量电荷密度的方法测量分子和原子级的微小尺寸,但它只能用于测量导体表面。1986年原子力显微镜研制成功,它用测量触针与被测器件之间的原子力和离子力的方法来测量微小尺寸,因此它可用于导体或非导体的测量。根据原子力显微镜的思路,利用被测表面的不同物理性质对受迫振动悬臂梁的影响,通过测量其共振频率的变化测量被测表面,相继开发出激光力显微镜、静电力显微镜等。这些仪器都可以达到纳米甚至亚纳米级的分辨力。为了准确测出这些纳米尺度测量显微镜的精度,还必须溯源到光的波长上,因此迫切需要研制精度达到纳米和亚纳米级的干涉仪来实现纳米尺度的测量和校准,因而又相继出现了精度可达到0.1nm的激光外差干涉仪和精度可达0.01nm的X光干涉仪。

微电子技术的问世,不仅使计算机技术突飞猛进,也使光电测量技术有了更为广阔的应用空间。当前人们在生物、医学、航天、灵巧武器、数字通信等许多领域越来越多地需求微系统,因此微机电系统成为当前研究的一个热点。而微机电系统要求有微型测量装置,这样,微型光、机、电测试系统也就毫无疑问地成为重要研究方向。

科学技术的进步推动了光电测试技术的发展,而光电测试技术的发展无疑又给科学技术的发展注入了新鲜血液。因此,光电测试技术的发展趋势是:

- 1) 发展纳米、亚纳米级高精度的光电测量新技术。
- 2) 发展小型的、快速的微型光、机、电测试系统。
- 3) 非接触、快速在线测量,以满足快速增长的商品经济的需要。
- 4) 向微空间三维测量技术和大空间三维测量技术发展。
- 5) 发展闭环控制的光电测试系统,实现光电测量与光电控制一体化。
- 6) 向人们无法触及的领域发展。

7) 发展光电跟踪与光电扫描技术,如远距离的遥控技术、遥测技术、激光制导、飞行器自动跟踪、复杂形体自动扫描测量等。

光电测试技术是现代科学、国家现代化建设和人民生活中不可缺少的新技术,是光、机、电、计算机相结合的新技术,是最具有潜力的信息技术之一。

由于光电测试技术的特点,本门课程的学习要求如下:

- 1) 了解并掌握典型的光电器件的原理和特点,会正确选用光电器件。
- 2) 学会根据光电器件的特点选择和设计光电检测电路和有关参数。
- 3) 能根据被测对象的要求,设计光电检测系统。

## 复习思考题1

1. 试述光电测试技术与信息技术的关系。
2. 光电测试系统由哪几部分组成?何为光学变换与光电转换?

## 第二章 光电测量的光学基础

光是人们最熟知的物质，光以电磁波或粒子（光子）的形式传播能量，光能量的传播过程称为光辐射。就波长而言，一般认为光的波长在  $10\text{nm} \sim 1\text{mm}$  之间，光波频率在  $3 \times (10^{11} \sim 10^{16}) \text{Hz}$  范围内。按辐射波长和人眼的生理视觉效应又把光辐射分为 X 光、紫外光、可见光和红外光。而人们常说的“光”一般指的是可见光，即能对人眼刺激而产生“光亮”的电磁辐射，可见光的波长在  $380 \sim 780\text{nm}$  之间。当可见光进入人眼时，人眼的主观感觉有红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等颜色，而不同色光波波长见表 2-1。紫外光波段在  $100 \sim 380\text{nm}$  之间，而  $10 \sim 100\text{nm}$  之间波段称 X 光。红外波段波长在  $0.78 \sim 1000\mu\text{m}$  之间，通常又分为近红外、中红外和远红外三部分。

表 2-1 光波波长

颜色	红外	红色	橙色	黄色	绿色	青色	蓝色	紫色	紫外	X 光
波长	$0.78 \sim 1000\mu\text{m}$	$640 \sim 780\text{nm}$	$600 \sim 640\text{nm}$	$540 \sim 600\text{nm}$	$495 \sim 540\text{nm}$	$460 \sim 495\text{nm}$	$440 \sim 460\text{nm}$	$380 \sim 440\text{nm}$	$100 \sim 380\text{nm}$	$10 \sim 100\text{nm}$

### 第一节 光度的基本物理量

光度学是研究光度测量的一门科学，而光度学量是电磁辐射能引起人眼刺激大小的度量，它在物理量上与电磁辐射的辐射度量是类似的。

光度学量既然是电磁辐射对人眼刺激大小的感觉，可见波段才有意义，为此先研究人眼对光的视觉效能（或称视见函数）。

#### 一、光谱光视效能

人眼的视网膜上布满了大量的感官细胞，即杆状细胞和锥状细胞。杆状细胞灵敏度高，它能感受微弱光刺激；锥状细胞感光灵敏度低，但它有三种分别对红、绿、蓝主色产生响应的细胞，因而能很好地区别颜色和辨别被视物的细节。

视觉神经对不同波长光的感光灵敏度是不一样的，对绿光最灵敏，而对红、蓝光灵敏度最低。国际照明委员会（CIE）根据实验结果，确定了人眼对各种波长光的相对灵敏度，称为“光谱光视效能”，如图 2-1 所示。在明视情况，即光亮度大于  $3\text{cd}/\text{m}^2$  时，人眼的敏感波长（即光谱光视效能峰值对应的波长）在  $555\text{nm}$  处，如图 2-1 中实线所示。在暗视情况下，即光亮度小于  $0.001\text{cd}/\text{m}^2$  时，人眼的敏感波长在  $507\text{nm}$  处，如图 2-1 中虚线所示。

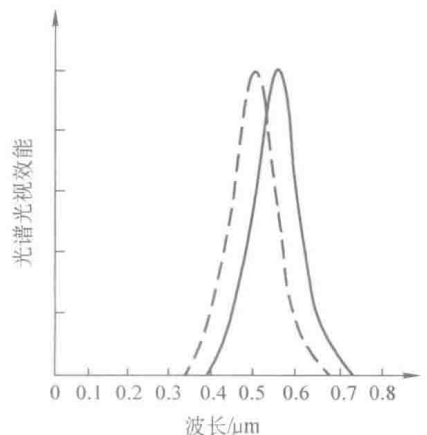


图 2-1 光谱光视效能曲线



## 二、光度的基本物理量

光波是电磁波的一种，因此光辐射的度量与电磁辐射的度量是类似的，为了研究光源辐射现象的规律，常用下面的一些基本参量来衡量光的辐射特性。

### 1. 光通量 ( $\Phi_v$ )

光通量又称为光功率，单位为流明 (lm)，它与电磁辐射的辐射通量  $\Phi_e$  相对应，也可以说它是电磁辐射在可见光范围内的辐射通量，而  $\Phi_e$  的单位是瓦 (W)，所以光通量的单位有时也用瓦。光通量与辐射通量之间的关系可以用式 (2-1) 来表示：

$$\Phi_v = K_m \int_{0.38}^{0.78} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2-1)$$

式中， $V(\lambda)$  是视见函数，其特征如图 2-1 所示； $K_m$  是光功当量，它表示人眼在明视条件下，在波长为 555nm 时，光辐射所产生的光感觉效能，按照国际温标 IPTS - 68 理论计算值  $K_m = 680 \text{lm/W}$ 。

### 2. 光量 (光谱光能 $Q_v$ )

光量是指光的能量，又称光能，它是与辐射能  $Q_e$  相对应的物理量。光量的单位是流明·秒 (lm·s)，而辐射能的单位是焦耳 (J)，光量是光源在某段时间内发出光的总和，是光通量  $\Phi_v$  对时间的积分。

$$Q_v = \int_0^t \Phi_v dt \quad (2-2)$$

### 3. 发光强度 ( $I_v$ )

发光强度定义：点辐射源在给定方向上的单位立体角内辐射的光通量，如图 2-2 所示。发光强度为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (2-3)$$

单位为坎德拉 (cd，即  $\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$ )。1 坎德拉相当于均匀点光源在单位立体角内发出 1 流明的光通量。

### 4. 光亮度 ( $L_v$ )

光源在某方向的光亮度  $L_v$  是光源在该方向的单位投影面积上、单位立体角中发射的光通量，即

$$L_v = \Phi_v / (\Omega S \cos\theta) \quad (2-4)$$

由于光源在不同面元上，在各个方向上发光亮度不等，因而取微小面元  $ds$  和微小立体角  $d\Omega$ ，如图 2-3 所示，光源上某点处的面元在给定方向的发光强度为  $I_v$ ，那么光亮度  $L_v$  定义为发光强度  $dI_v$  与面元  $dS$  在垂直于发光强度方向平面上的投影面积之比，即

$$L_v = \frac{dI_v}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (2-5)$$

光亮度的单位： $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$  或者  $\text{lm}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$ 。

### 5. 光出射度 ( $M_v$ )

光出射度是指单位面积光源所辐射的光通量，即

$$M_v = d\Phi_v / dS \quad (2-6)$$