



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光电测试技术

(第2版)

哈尔滨工业大学 浦昭邦
上海交通大学 赵 辉

主编



免费
电子课件



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

光电测试技术

第2版

主编	浦昭邦	赵辉
参编	蓝天	刘国栋
	庄志涛	陶卫
主审	黄元庆	吕乃光



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”及“光电电子技术”等专业的“光电测试技术”课程的通用教材。

本书首先系统地介绍了光度学的基本理论和光电测量的光学基础，然后深入地讲述了光电测量技术中的光源，光电变换的光子探测器件、热电探测器件和光电摄像器件及基于电子物理学的光学变换器件的基本原理和使用方法。还对常用的光电子探测器件的检测电路静态与动态设计方法和典型电路进行了论述与分析。

本书为了使读者对光电测量系统进行深入了解，对光电测量中的光束调制与扫描、非相干信号的光电变换与检测、相干变换与检测的原理与方法及其设计进行了系统的论述。最后介绍了激光测量、视觉检测和光纤测量技术实用光电测量系统。

本书具有理论和实际密切结合、论述系统深入而又通俗易懂的特点，因此既可以作为相关专业的大学本科教材，也可作为研究生教材和供相关工程技术人员作为设计光电测量系统的参考资料。

为方便教师教学，本书配有免费教学课件，欢迎选用本书作教材的老师索取，索取邮箱：llm7785@sina.com。

图书在版编目 (CIP) 数据

光电测试技术/浦昭邦, 赵辉主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2009. 12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-28643-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 205141 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 蔡家伦

版式设计: 霍永明 封面设计: 张静

责任校对: 申春香 责任印制: 杨曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2010年3月第2版第1次印刷

184mm x 260mm · 20.75 印张 · 510 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-28643-1

定价: 36.00 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

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

销售二部: (010)88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010)68993821 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

普通高等教育测控技术规划教材《光电测试技术》自2005年第一次印刷以来受到许多高等院校的青睐,现作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,为使其在高等教育的相关专业中发挥更好的作用,特进行修订。

根据各高校使用该书的建议,修订后的《光电测试技术》全书仍为九章,分别为光电测试技术概论、光电测量的光学基础、光电测量系统中的光源与光源系统、光电测试常用器件、光电检测电路、光束的调制与扫描技术、非相干信号的光电变换与检测、相干变换与检测方法、现代光电测试技术。本书和第1版比,除了修改了某些错误之外,还将光电测试系统中光源和光源系统作为新的一章来论述。这是因为光源在精密光电测量中的地位越来越重要了。此外,将光束的调制与扫描放到下篇,并相应增加了测量实例。这是因为调制与扫描测量在现在在线测量中有着特殊的地位。同时为了进一步增加该书的使用性,在相应的章节中增加了实例和技术指标。

为了便于组织教学,全书分为上篇和下篇,以便各高校根据自己的特点组织本科生和研究生教学。

本书由哈尔滨工业大学浦昭邦教授和上海交通大学赵辉教授主编,第一、三和第七章由浦昭邦执笔,第二章和第九章第一、二、三节由哈尔滨工业大学刘国栋执笔,第四章由北京理工大学蓝天执笔,第五章和第九章第四节由上海交通大学赵辉执笔,第六章由哈尔滨工业大学庄志涛执笔,第八章由上海交通大学陶卫执笔。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,参加审稿的还有北京理工大学白延柱教授,中国计量学院李东升教授以及厦门大学张建寰教授等。

本书参阅了大量的参考资料,再次向有关作者表示感谢。感谢对书稿提供热情帮助的胡涛、李海燕、吴慧兰和马晶月等同志。

由于我们的学识有限,书中难免存在错误和不当之处,恳请广大读者指正,以便进一步修订和完善。

编者

第1版前言

光电测试技术，作为信息科学的一个分支，具有测量精度高、速度快、非接触、自动化程度高等突出的特点，发展十分迅速。它将光学技术与电子技术相结合，展现出独特的优势。

“光电测试技术”课程在许多高等工科的“测控技术与仪器”、“光电信息工程”和“光学工程”等专业都被选定为主修课程，因此全国高等院校仪器仪表类教学指导委员会建议（提议）编写“光电测试技术”全国统编教材，以满足高等工科大学教学发展的要求。本书是根据2003年于北京召开的仪器仪表教学指导委员会教材研讨会上对该书编写大纲的评审意见和要求编写的。

全书共分为九章，分别为光电测试技术概论，光辐射的光度学基础与光源，光电测试技术中常用光学系统、光电测试常用器件、光电检测电路、光束的调制与扫描、非相干信号的光电变换与检测、相干变换与检测方法及现代光电测试技术。本书在内容上将理论与应用密切结合，论述深入浅出，并荟萃了许多近年来的光电测试技术的相关资料和科研成果，极具使用价值和参考价值。

为了便于组织教学，全书分为上篇与下篇。上篇是该书的前六章，以光电测试的技术基础为主；下篇是该书的第七、第八和第九章，侧重于光电测试的应用技术。各高等院校可根据本校的特点、专业设置和教学要求灵活地选取相应内容组织本门课程教学。一般地，上篇作为本科生教学内容，下篇作为研究生教学内容比较合适。

本书由哈尔滨工业大学浦昭邦教授主编，上海交通大学赵辉教授副主编。第一、二章和第七章由浦昭邦执笔，第三章与第九章的第一~三节由哈尔滨工业大学刘国栋执笔，第四章由北京理工大学蓝天执笔，第五章与第九章第四节由上海交通大学赵辉执笔，第六章由哈尔滨工业大学庄志涛执笔，第八章由上海交通大学陶卫执笔。全书由厦门大学黄元庆教授主审，参加审稿的还有北京理工大学白延柱教授，天津大学王宝光教授和北京机械工业学院吕乃光教授。

本书参阅了大量的参考资料，这些资料的作者的卓越研究成果，使本书内容更加丰满，在此向有关作者表示感谢。

由于我们的学识有限，一定存在许多不足之处，望广大读者不吝指正，以便今后改进。

编者

目 录

第2版前言

第1版前言

上篇 技术基础篇

第一章 光电测试技术概论····· 3	复习思考题 2 ····· 27
第一节 信息技术与光电测试技术····· 3	
第二节 光电测试系统的组成····· 3	
第三节 光电测试技术的展望及其特点····· 4	
复习思考题 1 ····· 6	
第二章 光电测量的光学基础····· 7	
第一节 光谱光视效能和光度的基本物理量····· 7	
一、光谱光视效能····· 7	
二、光度的基本物理量····· 8	
第二节 光度学基本定律 ····· 10	
一、余弦定律 ····· 10	
二、亮度守恒定律 ····· 10	
三、照度与距离的二次方反比定律 ····· 11	
第三节 光辐射在空气中的传播 ····· 12	
一、大气衰减 ····· 12	
二、空气湍流效应 ····· 13	
第四节 光电测试技术中常用的光学系统 ····· 14	
一、显微光学系统 ····· 14	
二、望远光学系统 ····· 20	
三、摄影系统 ····· 24	
四、投影光学系统 ····· 26	
第三章 光电测量系统中的光源与光源系统 ····· 28	
第一节 光源的基本参数 ····· 28	
一、发光效率 ····· 28	
二、寿命 ····· 28	
三、光谱功率谱分布 ····· 28	
四、空间光强分布特性 ····· 29	
五、光源光辐射的稳定性 ····· 29	
六、光源的色温和显色性 ····· 30	
第二节 光电测量的常用光源 ····· 30	
一、热辐射光源 ····· 30	
二、气体放电光源 ····· 32	
三、金属卤化物灯 ····· 33	
四、电致发光光源 ····· 34	
五、激光光源 ····· 37	
第三节 照明系统 ····· 42	
一、照明系统的设计原则 ····· 43	
二、照明的种类 ····· 43	
第四节 光源及照明系统的选择 ····· 46	
复习思考题 3 ····· 47	
第四章 光电测试常用器件 ····· 48	
第一节 光电器件的性能参数 ····· 48	
一、光电器件的探测灵敏度 ····· 48	
二、响应时间和频率响应 ····· 49	
三、噪声等效功率 ····· 50	

四、探测度 D 与比探测度 D^*	51	第八节 光调制器件	122
五、量子效率	51	一、光电器件	122
第二节 光电发射器件	52	二、声光器件	126
一、光电发射效应	52	三、磁光器件	127
二、光电真空器件及其特性	56	复习思考题 4	129
第三节 光电导器件	62	第五章 光电检测电路	131
一、光电导效应	62	第一节 光电检测电路的设计	
二、光敏电阻及其特性	65	要求	131
第四节 光伏器件	69	第二节 光电检测电路的静态	
一、光伏效应	70	设计	131
二、光电池	73	一、光敏电阻电路的静态设计	132
三、光敏二极管	76	二、光电倍增管电路的静态	
四、PIN 光敏二极管	80	设计	136
五、雪崩光敏二极管	81	三、光电池电路的静态设计	138
六、光敏晶体管	82	四、光敏二极管电路的静态	
七、光电位置器件	84	设计	141
八、光伏器件的特性与使用要点	85	五、光敏晶体管电路的静态	
第五节 各种光子探测器件的性能		设计	144
比较和应用选择	87	第三节 光电检测电路的	
一、接收光信号的方式	87	动态设计	145
二、各种光子探测器件的性能		一、光电检测电路的带宽	145
比较	88	二、光电检测电路的频率特性	146
三、光子探测器件的应用选择	88	第四节 光电检测系统的噪声与	
第六节 热电探测器件	89	抑制	151
一、热电探测器的一般原理	90	一、噪声的类型	151
二、温差电偶	92	二、噪声的等效处理	153
三、热敏电阻及其特性	94	三、典型光电检测电路的噪声	
四、热释电器件	96	估算	155
第七节 光电成像器件	99	第五节 前置放大及光电耦合	
一、像管	99	电路	157
二、真空摄像管	102	一、前置放大电路的设计	157
三、固体摄像器件工作原理及其		二、光电耦合电路设计	161
参数	107	三、光电器件与运算放大器的	
四、CMOS 成像器件工作原理		连接	165
及其参数	115	第六节 光电检测电路应用实例	166
五、CID 智能相机	119		

一、光电报警电路·····	166	三、弱光检测电路·····	169
二、光电开关电路·····	168	复习思考题 5 ·····	179

下篇 应用技术篇

第六章 光束的调制与扫描技术 ·····	185	第四节 随空间变化的光电信号	
第一节 光调制的基本概念 ·····	185	变换与检测方法·····	229
一、调制的概念与分类·····	185	一、几何中心检测法·····	229
二、调制的目的·····	187	二、几何位置检测法·····	232
三、调制信息的频谱·····	187	三、亮度中心检测法·····	238
第二节 光信号的调制方法 ·····	187	复习思考题 7 ·····	240
一、振幅调制·····	188	第八章 相干变换与检测方法 ·····	241
二、频率调制与相位调制·····	189	第一节 相干变换与检测原理 ·····	241
三、脉冲调制·····	190	一、光学干涉和干涉测量·····	241
四、编码调制·····	190	二、干涉测量中的调制和解调·····	242
第三节 光调制测量技术 ·····	191	第二节 相干信号的相位调制与	
一、常用外调制技术·····	191	检测·····	243
二、直接调制技术·····	199	一、相位调制的干涉系统·····	243
三、调制信号的解调·····	202	二、干涉条纹的检测方法·····	246
第四节 光束扫描测量技术 ·····	204	三、二次相位调制与干涉图	
一、扫描方法和工作参数·····	204	分析·····	248
二、光束扫描测量·····	211	第三节 相干光外差检测原理与	
复习思考题 6 ·····	218	方法·····	253
第七章 非相干信号的光电变换与		一、光学外差检测原理·····	253
检测 ·····	219	二、外差检测的调频方法·····	258
第一节 光电信号变换与光电		三、外差检测方法·····	262
测量系统概述 ·····	219	复习思考题 8 ·····	268
第二节 直接检测系统的工作		第九章 现代光电测试技术 ·····	269
原理 ·····	220	第一节 概述 ·····	269
第三节 随时间变化的光电信		第二节 激光测量技术 ·····	269
号变换与检测方法 ·····	221	一、激光干涉测长技术·····	270
一、幅值法·····	221	二、共光路激光干涉仪测量	
二、频率法·····	223	技术·····	274
三、相位和时间测量法·····	224	三、激光外差干涉测量技术·····	276
四、光电测距的作用距离·····	227		

四、激光衍射测量技术·····	283	二、强度调制型光纤测量技术·····	308
五、激光测距与跟踪测量技术·····	285	三、相位调制型光纤测量技术·····	311
六、近场光学显微镜·····	291	四、偏振调制型光纤测量技术·····	315
第三节 视觉检测技术·····	292	五、频率调制型光纤测量技术·····	317
一、视觉检测系统的组成·····	293	六、光纤光栅传感技术·····	318
二、典型视觉检测系统·····	293	复习思考题9·····	322
三、视觉检测图像处理基础·····	299	参考文献·····	323
第四节 光纤测量技术·····	305		
一、光纤测量技术概述·····	305		



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、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；从工程应用上研究信息称为信息技术，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。

信息技术包括电子信息技术、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获取、加工、处理、传输、存储和显示的技术，在电子信息技术中目前最热而且影响最广泛的是微电子技术，它通过控制固体内电子的微观运动来实现对信息的加工和处理，即对信号处理与信号传播都在微小尺寸内进行，也就是在微小的芯片上集成出来的。

光学信息技术是用纯光学方法实现信息获取、加工、处理、存储和显示的技术。如光材料技术（光纤材料、激光材料等），光器件技术（激光器、光耦合器、光调制器、光检测器、透镜、棱镜等）和光学系统技术，如光信息检测系统、光信息处理（光数据连接与交换、光联网、光图像处理等）、光计算（光计算机及与外围设备的连接）、光信息传输（远程传输、光空间通信等）和光存储（光盘）与显示技术（液晶显示、等离子显示）等。光学信息传输的快速和大容量使光信息技术颇具潜力。

光电信息技术是使电子学与光学浑然一体的技术，是有关光与电子转换及其应用的技术。广义上讲，光电信息技术就是在光频段的微电子技术，它将光学技术与电子技术相结合，实现信息的获取、加工、传输、控制、处理、存储与显示。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，因而具有许多无可比拟的优点。

光电测试技术是光电信息技术的主要技术之一，它主要包括光电变换技术、光信息获取与光信息测量技术以及测量信息的光电处理技术等。如用光电方法实现各种物理量的测量，微光、弱光测量，红外测量，光扫描、光跟踪测量，激光测量，光纤测量，图像测量等。

第二节 光电测试系统的组成

图 1-1 为激光外径扫描仪原理图。它用半导体激光器 2 作光源，光源发出的光经过旋转多面体进行调制，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，光通量又出现从暗到亮的跳变。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。由主振向第二次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 Δt ，若光扫描工件的线速度 v 不变，则可测出被测工件尺寸 $D = v\Delta t$ 。

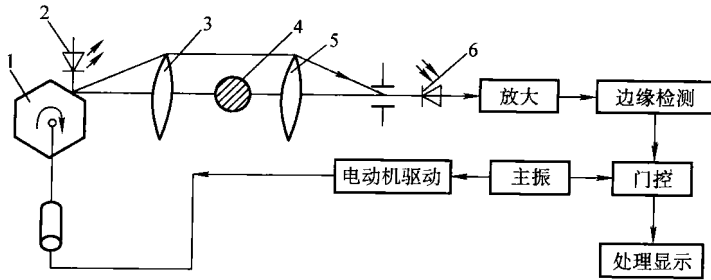


图 1-1 激光外径扫描仪原理图

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，由光源产生。光源与照明用光学系统一起获得测量所需的光载波，如点照明、结构光照明、平行光照明等。光载波与被测对象相互作用，而将被测量载荷到光载波上，称为光学变换。光学变换是用各种调制的方法来实现的。光学变换后的光载波上载荷有各种被测信息，称为光信息。光信息经光电器件实现由光向电的信息转换，称为光电转换。然后被测信息就可用各种电信号处理的方法实现解调、滤波、整形、判向、细分等，或送到计算机进行进一步的运算，直接显示被测量、存储或控制相应的装置。

在图 1-2 中，光学变换与光电转换是光电测量的核心部分。光学变换通常是用各种光学元件和光学系统来实现的，如平面镜、光狭缝、光楔、透镜、角锥棱镜、偏振器、波片、码盘、光栅、调制器、光成像系统、光干涉系统等，实现将被测量转换为光参量

(振幅、频率、相位、偏振态、传播方向变化等)。光电转换是用各种光电变换器件来完成的，如光电检测器件、光电摄像器件、光电热敏器件等。

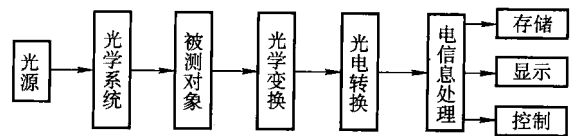


图 1-2 光电系统框图

第三节 光电测试技术的展望及其特点

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，人们只用了很短的时间内就研制出了多种激光干涉仪、激光测距仪、激光准直仪、激光跟踪仪、激光雷达等，大大推动了光电测试技术的发展。从 1970 年贝尔实验室研制出第一个固体摄像器件 (CCD) 以来，由于 CCD 的小

巧、坚固、低功耗、失真小、工作电压低、质量小、抗震性好、动态范围大和光谱范围宽等特点,使得视觉检测进入了一个新的阶段。它不仅可以完成人的视觉触及区域的图像测量,同时可以完成对于人眼无法涉及的红外和紫外波段的图像测量,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,在传递图像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,每一个新的光源、每一个新的光电器件的发明都会大大推动科学技术的发展。

近十几年来工程领域的加工精度已达到 $0.1\mu\text{m}$ 或 $0.01\mu\text{m}$ 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,但缺点是针尖与样品接触易使样品表面划伤。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,相继开发出了激光力显微镜、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。它们的分辨力大都是用驱动探针的压电陶瓷的电压与位移关系得到的,但是压电陶瓷的滞后特性和蠕变使其测量结果并不可信。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。在纳米和亚纳米级精度的光电测量系统中,为保证系统的稳定可靠,对环境的要求是很高的,如环境温度不稳定、振动、光源波动的影响等都会使纳米尺度的测量精度荡然无存。因此系统中机械传动或光学调节往往需要闭环控制,而机械支撑用无间隙、无摩擦的柔性铰链是一个很好的办法。

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要求微系统,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了重要研究方向。

科学技术的进步推动了光电测试技术的发展,而新型光电测试系统的出现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、遥测技术、激光制导、飞行物自动跟踪、复杂形体自动扫描测量等。

光电测试技术将光学技术与电子技术相结合实现对各种量的测量,它具有如下特点:

1) 高精度。光电测量的精度是各种测量技术中, 精度最高的一种。如用激光干涉法测量长度的精度可达 $0.05\mu\text{m}/\text{m}$; 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 1m 。

2) 高速度。光电测量以光为媒介, 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。

3) 远距离、大量程。光是最佳的远距离传播的介质, 尤其适用于遥控和遥测, 如武器制导、光电跟踪、电视遥测等。

4) 非接触测量。光照到被测物体上可以认为是没有测量力的, 因此也无摩擦, 可以实现动态测量, 是各种测量方法中效率最高的一种。

5) 寿命长。理论上, 光波是永不磨损的, 只要复现性做得好, 可以永久地使用。

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。

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并设计光电检测电路、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? 何谓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）形式传播能量，光能量的传播过程称为光辐射。就波长而言，一般认为光波波长在 $10\text{nm} \sim 1\text{mm}$ 之间，光波频率在 $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{16}\text{Hz}$ 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，而不同色光的波长如表 2-1 所示。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。红外波段波长单位一般用 μm ，约在 $0.78 \sim 1000\mu\text{m}$ 之间。通常又分为近红外、中红外和远红外三部分。

表 2-1 光波波长表

颜色	红外	红色	橙色	黄色	绿色	青色	蓝色	紫色	紫外	X 光
波长	$0.78 \sim 1000\mu\text{m}$	$620 \sim 780\text{nm}$	$590 \sim 620\text{nm}$	$560 \sim 590\text{nm}$	$490 \sim 560\text{nm}$	$450 \sim 490\text{nm}$	$420 \sim 450\text{nm}$	$380 \sim 420\text{nm}$	$100 \sim 380\text{nm}$	$10 \sim 100\text{nm}$

第一节 光谱光视效能和光度的基本物理量

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，可见只有在光谱的可见波段才有意义，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。在明视情况下，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 555nm 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 507nm 处，如图 2-1 中虚线所示。

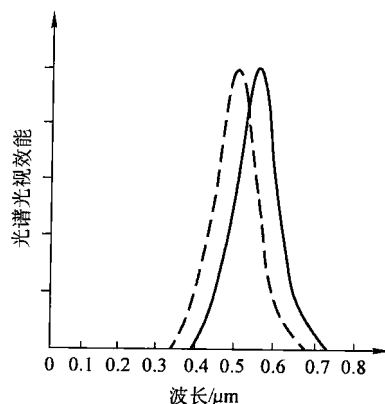


图 2-1 光谱光视效能曲线

二、光度的基本物理量

光波是电磁波的一部分，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. 光量

光量（光谱光能 Q_v ）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 $\text{lm} \cdot \text{s}$ ，而辐射能的单位是 J，光量是光通量 Φ_v 对时间的积分。

$$Q_v = \int_0^t \Phi_v dt \quad (2-1)$$

因此光量是光源在某段时间内发出光的总和。

2. 光通量 (Φ_v)

光通量又称为光功率，单位为 lm ，它与电磁辐射的辐射通量 Φ_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 Φ_e 的单位是 W，所以光通量的单位有时也用 W。光通量与辐射通量之间的关系可以用下式来表示：

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

式中， $V(\lambda)$ 是视见函数， $V(\lambda) = \frac{\Phi_{555}}{\Phi_\lambda}$ ，即波长为 λ 时的光通量与波长为 555nm 时的光通量之比，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 $K_m = 6831 \text{lm/W}$ 。

同样，对其他光度量与辐射量之间的计算也可用式 (2-2) 表示

光通量与光度量中的基本单位发光强度 I_v 之间的关系为

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

即光通量是发光强度为 I_v 的光源在单位立体角内的辐射通量。若光源在所有方向上的发光强度都相同，则光源在立体角 Ω 内的辐射光通量 $\Phi_v = I_v \Omega$ ，那么在所有方向发射的光通量 $\Phi_v = 4\pi I_v$ 。

3. 发光强度 (I_v)

发光强度定义为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。

$$\text{发光强度} \quad I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (2-4)$$

单位为坎德拉 $\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1} = \text{candela} = \text{cd}$ 。1 坎德拉相当于均匀点光源在单位立体角内发出 1lm 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，在单位立体角中发射的光通量，即

$$L_v = \Phi_v / \Omega S \cos\theta \quad (2-5)$$

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