



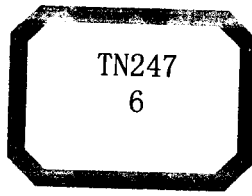
普通高等教育测控信息技术规划教材

光电测试技术

*Photoelectric Measuring and
Testing Technique*

浦昭邦 主编





普通高等教育测控信息技术规划教材

光电测试技术

主 编 浦昭邦
副主编 赵 辉
参 编 蓝 天 刘国栋
 庄志涛 陶 卫
主 审 黄元庆



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”等专业的“光电测试技术”课程通用教材。

本书首先系统地论述了光度学的基本理论，然后深入地讲述了光电测试技术中的光源、光电变换和光学变换的基本原理和方法，以及常用光电测量系统的原理和设计方法，最后介绍了应用最为广泛的几种现代光电测量系统。

本书具有理论与实践密切结合、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。

图书在版编目 (CIP) 数据

光电测试技术/浦昭邦主编. —北京: 机械工业出版社, 2004.10

普通高等教育测控信息技术规划教材

ISBN 7-111-15348-0

I. 光… II. 浦… 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 (2004) 第 099823 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: 贡克勤 王保家

责任编辑: 刘丽敏 版式设计: 冉晓华 责任校对: 魏俊云

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·19.25 印张·471 千字

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

测控信息技术规划教材编审委员会

主任委员	陈光禡	电子科技大学
副主任委员	裘祖荣	天津大学
	蔡 萍	上海交通大学
	王 祁	哈尔滨工业大学
	梅杓春	南京邮电学院
	韩雪清	机械工业出版社
	童 玲	(兼秘书长) 电子科技大学
委 员	王寿荣	东南大学
	林 君	吉林大学
	潘英俊	重庆大学
	赵跃进	北京理工大学
	黄元庆	厦门大学
	吕乃光	北京机械工业学院
	石照耀	北京工业大学
	杨理践	沈阳工业大学
	何 涛	湖北工学院
	梁清华	辽宁工学院
	赵 建	西安电子科技大学
	刘 娜	北京石油化工学院
	王保家	机械工业出版社

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院校的“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,以满足高等工科院校教学发展的要求。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。一般地说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

前言

上 篇 (技术基础篇)

第一章 光电测试技术概论 3	一、摄影系统的主要技术参数 35
第一节 信息技术与光电测试技术..... 3	二、摄影物镜 36
第二节 光电测试系统的组成..... 3	第四节 投影光学系统 38
第三节 光电测试技术的展望及其特点..... 4	一、投影光学系统原理 38
第二章 光辐射的光度学基础与光源 7	二、投影系统的主要技术参数 38
第一节 光度的基本物理量..... 7	第五节 照明系统 39
一、光谱光视效率..... 7	一、照明系统的设计原则 39
二、光度的基本物理量..... 8	二、照明的种类 40
第二节 光度学基本定律..... 9	第四章 光电测试常用器件 42
一、余弦定律..... 9	第一节 光电器件的性能参数 42
二、亮度守恒定律 10	一、光电器件的探测灵敏度(响应度) 42
三、照度与距离平方反比定律 11	二、响应时间和频率响应 43
第三节 光辐射在空气中的传播 11	三、噪声等效功率(NEP) 44
一、大气衰减 12	四、探测度 D 与比探测度 D^* 44
二、空气湍流效应 13	五、量子效率 45
第四节 光电测量系统中的常用光源 13	第二节 光电发射器件 45
一、光源的基本参数 14	一、光电发射效应 45
二、光电测量中的常用光源 15	二、光电真空器件及其特性 49
第三章 光电测试技术中常用光学系统 25	第三节 光电导器件 56
第一节 显微光学系统 25	一、光电导效应 56
一、放大镜及放大率 25	二、光敏电阻及其特性 58
二、显微光学系统 26	第四节 光伏器件 63
第二节 望远光学系统 31	一、光伏效应 63
一、望远光学系统的原理和性质 31	二、光电池 67
二、望远镜的主要光学性能 32	三、光敏二极管 70
三、准直、自准直望远镜 33	四、PIN光敏二极管 74
四、反射式与折反式望远镜 34	五、雪崩光敏二极管 75
第三节 摄影系统 35	六、光敏晶体管 76
	七、光电位置器件 78
	八、光伏器件的特性与使用要点 79
	第五节 各种光子探测器件的性能比较和应用选择 81
	一、接收光信号的方式 81

二、各种光子探测器件的性能比较	82	频率特性	148
三、应用选择	82	一、光电检测电路的带宽	149
第六节 热电探测器件	84	二、光电检测电路的频率特性	150
一、热电探测器的一般原理	84	第四节 光电检测系统的噪声与抑制	155
二、温差电偶	87	一、噪声的类型	155
三、热敏电阻及其特性	88	二、噪声的等效处理	157
四、热释电器件	90	三、典型光电检测电路的噪声估算	159
第七节 光电成像器件	93	第五节 前置放大及光耦合电路	161
一、像管	94	一、前置放大电路的设计	161
二、摄像管	97	二、光耦合电路的设计	164
三、固体摄像器件工作原理及其参数	103	第六节 光电检测电路应用实例	169
第八节 光调制器件	112	一、光电报警电路	169
一、电光器件	112	二、光电开关电路	171
二、声光器件	115	三、其他光电应用电路	172
三、磁光器件	117	第六章 光束的调制与扫描	174
第五章 光电检测电路	120	第一节 光调制的基本概念	174
第一节 光电检测电路的设计要求	120	一、调制的概念与分类	174
第二节 典型光电输入电路	120	二、调制信息的频谱	175
一、光敏电阻输入电路	121	第二节 光信号的调制方法	176
二、光电倍增管输入电路	125	一、光信号的调制原理	176
三、光电池输入电路	127	二、调制方法	179
四、光敏二极管输入电路	130	三、调制信号的解调	190
五、光敏晶体管输入电路	134	第三节 光束扫描	192
六、光电器件与运算放大器的连接	135	一、扫描方法和工作参数	192
七、弱光检测电路	137	二、光束扫描测量	198
第三节 光电检测电路的带宽和			

下 篇 (应用技术篇)

第七章 非相干信号的光电变换与检测	203	第四节 随空间变化的光电信号变换与检测方法	211
第一节 光电信号变换与光电测量系统概述	203	一、几何中心检测法	211
第二节 直接检测系统的工作原理	204	二、几何位置检测法	215
第三节 随时间变化的光电信号变换与检测方法	205	三、亮度中心检测法	219
一、幅值法	205	第八章 相干变换与检测方法	222
二、频率法	207	第一节 相干变换与检测的原理	222
三、相位和时间测量法	208	一、光学干涉和干涉测量	222
四、光电测距的作用距离	210	二、干涉测量中的调制和解调	223
		第二节 相干信号的相位调制与检测	224
		一、相位调制的干涉系统	224

二、干涉条纹的检测方法	226	扫描跟踪	263
三、二次相位调制与干涉图分析	229	第三节 视觉检测技术	270
第三节 相干光外差检测原理 与方法	233	一、视觉检测系统的组成	270
一、光学外差检测原理	234	二、典型视觉检测系统	271
二、外差检测的调频方法	238	三、视觉检测的标定方法	277
三、外差检测方法	243	四、视觉检测图像处理基础	277
第九章 现代光电测试技术	249	第四节 光纤测量技术	284
第一节 概述	249	一、光纤测量技术概述	284
第二节 激光测量技术	249	二、光纤位移测量技术	288
一、激光干涉测长技术	250	三、光纤温度测量技术	292
二、共光路激光干涉仪测量技术	254	四、光纤压力测量技术	294
三、激光外差干涉测量技术	256	五、光纤电流测量技术	296
四、激光扫描测量、扫描定位与 参考文献			298

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；从工程应用上来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，它是通过控制固体内电子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，但现在还仍处于前期研究阶段。

光电信息技术是将电子学与光学浑然一体的技术，是光与电子转换及其应用技术。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

如图 1-1 所示，是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, 由主振向二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 $D = v\Delta t$ 。

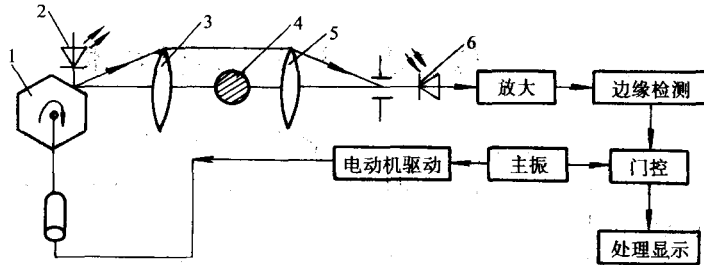


图 1-1 激光外径扫描仪原理图

1—旋转多面体 2—半导体激光器 3— $f(\theta)$ 镜
4—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获得测量所需的光载波, 如点照明、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, 直接显示被测量或者存储或者去控制相应的装置。

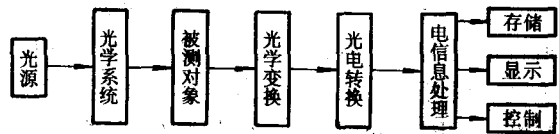


图 1-2 光电系统框图

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。

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、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, 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) 以来, 由于 CCD 的小巧、坚固、低功耗、失真小、

工作电压低、重量轻、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,而且对于人眼无法涉及的红外和紫外波段的图像测量也变成了现实,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。

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,它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,但它的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,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标定,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。光是最便于远距离传播的介质，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。在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，是机、光、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。

第二章 光辐射的光度学基础与光源

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 $3 \times (10^{11} \sim 10^{16}) \text{Hz}$ 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。红外波段波长一般用 μm 表示，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 可见光波长表

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

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。

在光电系统中能产生光辐射的系统称为光源，它的质量好坏对光电系统测量精度有很大影响。

第一节 光度的基本物理量

光度学量既然是电磁辐射对人眼刺激大小的感觉，因此光度的基本物理量只是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率或称视见函数。

一、光谱光视效率

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“光谱光视效率或视见函数”，如图 2-1 所示。在明视情况，即光亮度大于 $3\text{cd}/\text{m}^2$

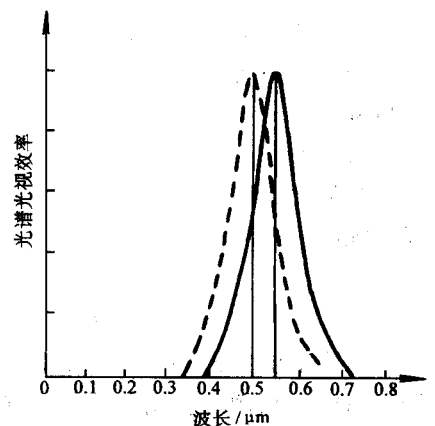


图 2-1 光谱光视效率曲线

时,人眼的敏感波长,即光谱光视效率峰值对应的波长在 555nm 处。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,其光谱光视效率曲线如图 2-1 中虚线所示。

二、光度的基本物理量

光具有波动性和粒子性。光的波动性可以圆满地解释光的干涉、衍射和偏振等现象,光的粒子性可以圆满的解释物质相互作用的光电效应。按照光的粒子性,认为光由光子组成,每个光子的能量为

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (2-1)$$

式中, h 是普朗克常数; c 是光速; ν 是光的频率; λ 是光的波长。

式 (2-1) 表明,每个光子的能量仅与光频率有关。

1. 光量 (光谱光能 Q_V)

光量是指光的能量,它是与辐射能 Q_e 相对应的物理量。光量的单位是流明·秒 ($\text{lm}\cdot\text{s}$),而辐射能的单位是焦耳 (J),光量是光通量 Φ_V 对时间的积分。

$$Q_V = \int_0^t \Phi_V dt \quad (2-2)$$

2. 光通量 (Φ_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 Φ_e 相对应,而 Φ_e 的单位是瓦 (W)。光通量与辐射通量之间的关系可以用下式来表示:

$$\Phi_V = K_m \int_{0.38}^{0.78} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2-3)$$

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 $K_m = 680\text{lm}/\text{W}$ 。

同样,对其他光度量与辐射量之间的计算也可用类似关系。

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:

$$d\Phi_V = I_V d\Omega \quad (2-4)$$

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. 光强度 (I_V)

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。发光强度:

$$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega} \quad (2-5)$$

单位为坎德拉 $\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1} = \text{candela} = \text{cd}$

即 (cd)。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)

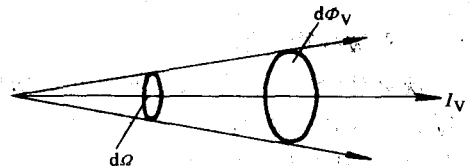


图 2-2 某方向的发光强度

如图 2-3 所示,光源上某点处的面元 (ds) 在给定方向的光强度为 I_V ,那么光亮度 L_V 定义为: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

$$L_V = \frac{dI_V}{ds \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_V}{d\Omega ds \cos \theta} \quad (2-6)$$

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

5. 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 $M_V = \frac{d\Phi_V}{ds}$ 单位

为 $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ (每平方米流明) 以上五个光度参数都是光源向外发射光的特性参量。

6. 照度 (E_V)

照度是投射到单位面积上的光通量,或者说接受光的面元上单位面积被辐射的光通量。若辐射光通量为 $d\Phi_V$,接收面元的面积是 dA ,那么照度 $E_V = d\Phi_V/dA$,单位为勒克斯 $I_x = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

7. 曝光量 (H_V)

曝光量即为照度对时间的积分,即 $H_V = \int_0^t E_V dt$,单位为 $I_x \cdot s$

应该说明的是以上光度参量大都与光源所辐射的波长有关,如白炽灯光源所辐射的光含有红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等不同色光,即由不同波长的光所组成,因此其光谱辐射通量 $\Phi_V = \int_{0.38}^{0.78} \Phi_V(\lambda) d\lambda$,光谱辐射照度 $E_V = \int_{0.38}^{0.78} E_V(\lambda) d\lambda$ 等,即光谱的辐射参量是光波长的函数。对于波长不连续的光源,具有线光谱和带光谱的特征,其总辐射光通量为 $\Phi_V = \sum \Phi_V(\lambda) d\lambda$ 。

第二节 光度学基本定律

光电测量以光为传输信息的媒介,因此了解光辐射参量传输过程中的规律是很重要的。

一、余弦定律

余弦定律又称朗伯余弦定律,它描述光辐射在半球空间内照度的变化规律。具体描述为:任意表面上的照度随该表面法线与辐射能传播方向之间的夹角余弦变化。

如图 2-4 所示,点光源 O 发出的光以立体角 Ω 向外辐射光通量,在面积 A 上的照度为 E ,而与 A 夹角为 θ 的面元 A' 上的照度为 E' ,则

$$E = \frac{\Phi_V}{A} \quad E' = \frac{\Phi_V}{A'}$$

由于在该立体角内点光源发出的光通量不随传输距离而变化,因而面元 A 与 A' 上有相同的光

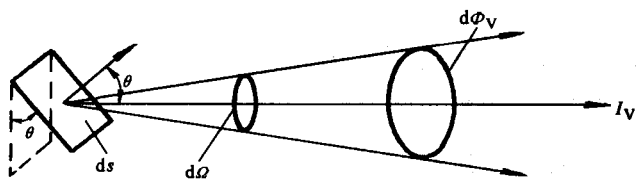


图 2-3 发光亮度

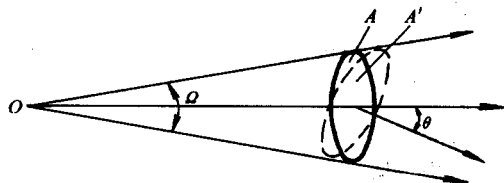


图 2-4 余弦定律示意图