




普通高校“十一五”规划教材

张广军 主编

光电测试技术与系统

 北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

光电测试技术与系统

张广军 主编

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书系统介绍了光电测试的基本原理、方法及系统。主要内容包括光电测试用光源、光电探测器件、激光干涉测量、激光衍射测量、典型光电测试系统、视觉测量、激光雷达及探测和光电导航与制导。

本书可作为高等院校光电信息工程、测控技术与仪器等专业本科生和研究生的教材,也可供相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光电测试技术与系统/张广军主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-5124-0022-1

I. ①光… II. ①张… III. ①光电检测 IV.
①TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 022835 号

光电测试技术与系统

张广军 主编

责任编辑 张冀青 刘晓明 王 实 宋淑娟

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:24.75 字数:554 千字

2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-0022-1 定价:45.00 元

前 言

随着光学、光电子技术、电子及微电子学、计算机技术和信号处理理论等相关技术的发展,光电测试技术得到了迅速发展,并以其非接触、高精度和快速性等特点广泛应用于工业、农业、医学、军事、国防和空间科学等领域,受到了各行业的高度重视。

本书是在张广军教授2003年主编出版的本科生教材《光电测试技术》的基础上重新编写的,调整了章节结构和内容,融入了近年来光电测试的新技术和新成果,并由北京航空航天大学教材出版基金资助出版。本书涉及光电测试技术与系统中的主要内容,力求具有基础性、系统性、先进性和实用性,并具有国防专业特色。全书共8章,第1章介绍光电测试用光源,第2章介绍光电探测器件,第3章介绍激光干涉测量,第4章介绍激光衍射测量,第5章介绍典型光电测试系统,第6章介绍视觉测量,第7章介绍激光雷达及探测,第8章介绍光电导航与制导。

本书由北京航空航天大学张广军教授任主编,并编写第1、2、5、6章及第8章部分内容,魏振忠副教授编写第3、4、7章及第8章部分内容。全书完稿后,由张广军教授统稿并完成修改工作。

本书引用和参考的主要参考文献已在各章后列出,供感兴趣的读者查阅。

本书可作为高等院校光电信息工程、测控技术与仪器等专业本科生和研究生的教材,也可供相关专业的技术人员参考。

光电测试技术应用十分广泛,而且发展较快,内容较新,涉及诸多学科领域。由于作者水平有限,经验不足,书中不妥之处敬请广大读者、同行及专家批评指正。

作 者

2009年8月

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 光电测试用光源 | 1 |
| 1.1 辐射度学和光度学基本概念 | 1 |
| 1.1.1 辐射度学基本物理量 | 1 |
| 1.1.2 光度学基本物理量 | 2 |
| 1.1.3 其他基本概念 | 5 |
| 1.2 光的产生 | 7 |
| 1.2.1 光的辐射 | 7 |
| 1.2.2 光的产生方法 | 8 |
| 1.2.3 光源选择的基本要求 | 9 |
| 1.3 发光二极管..... | 10 |
| 1.3.1 概 况..... | 10 |
| 1.3.2 外形和结构..... | 11 |
| 1.3.3 LED 发光机理 | 12 |
| 1.3.4 LED 的特性及参数 | 13 |
| 1.3.5 LED 驱动电路 | 16 |
| 1.3.6 LED 的应用 | 18 |
| 1.4 激光光源 | 19 |
| 1.4.1 激光的特点..... | 20 |
| 1.4.2 激光的形成..... | 21 |
| 1.4.3 激光的模式..... | 24 |
| 1.4.4 激光器的类型..... | 26 |
| 1.5 其他光源 | 29 |
| 1.5.1 热辐射光源..... | 29 |
| 1.5.2 气体放电光源..... | 31 |
| 思考题与习题 | 35 |
| 参考文献 | 35 |
| 第 2 章 光电探测器 | 36 |
| 2.1 光电探测器的原理及特性..... | 36 |
| 2.1.1 光电探测器的种类..... | 36 |

| | | |
|-------|---------------------|-----|
| 2.1.2 | 光电探测器的原理 | 37 |
| 2.1.3 | 光电探测器的特性参数 | 39 |
| 2.1.4 | 光电探测器的噪声 | 41 |
| 2.2 | 光电子发射器件 | 42 |
| 2.2.1 | 光电管 | 42 |
| 2.2.2 | 光电倍增管 | 46 |
| 2.3 | 光电导探测器件 | 53 |
| 2.3.1 | 光敏电阻的结构与原理 | 53 |
| 2.3.2 | 光敏电阻的偏置电路与噪声 | 56 |
| 2.3.3 | 典型光敏电阻与应用 | 58 |
| 2.4 | 光伏探测器件 | 59 |
| 2.4.1 | 硅光电池 | 60 |
| 2.4.2 | 光电二极管 | 61 |
| 2.4.3 | 其他类型的光电二极管 | 64 |
| 2.4.4 | 光电三极管 | 66 |
| 2.5 | PSD 位置探测器 | 69 |
| 2.5.1 | PSD 工作原理 | 69 |
| 2.5.2 | PSD 的特性 | 74 |
| 2.5.3 | PSD 的应用 | 76 |
| 2.6 | 电荷耦合器件 | 80 |
| 2.6.1 | CCD 工作原理 | 80 |
| 2.6.2 | CCD 摄像原理 | 85 |
| 2.6.3 | 面阵 CCD 摄像器件的特性 | 89 |
| 2.6.4 | 面阵 CCD 的电荷积累时间与电子快门 | 93 |
| 2.6.5 | CCD 摄像机的分类 | 96 |
| 2.7 | 自扫描光电二极管阵列 | 103 |
| 2.7.1 | 光电二极管阵列的结构与原理 | 103 |
| 2.7.2 | SSPA 线阵 | 106 |
| 2.7.3 | SSPA 面阵 | 106 |
| 2.7.4 | SSPA 的主要特性参数 | 107 |
| 2.7.5 | SSPA 的信号输出与放大电路 | 109 |
| 2.8 | CMOS 图像传感器 | 110 |
| 2.8.1 | CMOS 图像传感器的结构 | 110 |
| 2.8.2 | CMOS 图像传感器的特点 | 112 |



| | |
|---|------------|
| 2.8.3 CMOS 图像传感器的性能参数 | 114 |
| 思考题与习题 | 121 |
| 参考文献 | 121 |
| 第 3 章 激光干涉测量 | 122 |
| 3.1 光干涉基本原理 | 122 |
| 3.2 激光干涉测量长度和位移 | 123 |
| 3.2.1 激光干涉测量长度、位移的基本原理 | 123 |
| 3.2.2 干涉条纹的信号处理 | 125 |
| 3.2.3 典型测量系统 | 129 |
| 3.3 激光外差干涉测量 | 141 |
| 3.3.1 测量原理 | 141 |
| 3.3.2 外差干涉测量应用 | 142 |
| 3.4 激光多波长干涉测量 | 147 |
| 3.4.1 多波长测量原理 | 147 |
| 3.4.2 3.39 μm 多波长激光干涉仪 | 151 |
| 3.5 激光全息干涉测量 | 155 |
| 3.5.1 全息基本原理 | 155 |
| 3.5.2 全息干涉测试技术 | 161 |
| 3.5.3 全息干涉测试技术的应用 | 165 |
| 3.6 激光散斑干涉测量 | 170 |
| 3.6.1 散斑的性质 | 171 |
| 3.6.2 激光散斑干涉测量技术及应用 | 174 |
| 思考题与习题 | 180 |
| 参考文献 | 181 |
| 第 4 章 激光衍射测量 | 182 |
| 4.1 激光衍射测量原理 | 182 |
| 4.1.1 惠更斯-菲涅尔原理 | 182 |
| 4.1.2 菲涅尔-基尔霍夫公式 | 183 |
| 4.1.3 近场衍射与远场衍射 | 185 |
| 4.1.4 巴俾涅原理 | 187 |
| 4.1.5 衍射测量技术特点 | 189 |
| 4.2 激光衍射测量方法 | 189 |
| 4.2.1 夫琅和费单缝衍射和圆孔衍射 | 189 |
| 4.2.2 基本方案——测量输入参数的选择和分析 | 195 |



| | | |
|------------|-----------------------|------------|
| 4.2.3 | 典型衍射测量方法 | 198 |
| 4.2.4 | 测量精度与最大量程 | 202 |
| 4.3 | 激光衍射测量的实际应用 | 204 |
| 4.3.1 | 应变测量 | 204 |
| 4.3.2 | 刀刃表面质量检测 and 磁盘系统间隙测量 | 205 |
| 4.3.3 | 薄膜涂层厚度测量 | 205 |
| 4.3.4 | 漆包线激光动态测径仪 | 207 |
| 4.3.5 | 喷丝头孔径测量 | 209 |
| 4.3.6 | 角度精密测量 | 210 |
| | 思考题与习题 | 212 |
| | 参考文献 | 212 |
| 第5章 | 典型光电测试系统 | 213 |
| 5.1 | 光电开关与光电转速计 | 213 |
| 5.1.1 | 光电开关 | 213 |
| 5.1.2 | 光电转速计 | 216 |
| 5.2 | 莫尔条纹测长仪 | 217 |
| 5.2.1 | 莫尔条纹 | 218 |
| 5.2.2 | 莫尔条纹测长原理 | 221 |
| 5.2.3 | 细分判向原理 | 221 |
| 5.2.4 | 置零信号的产生 | 225 |
| 5.3 | 激光测距仪 | 225 |
| 5.3.1 | 脉冲激光测距仪 | 225 |
| 5.3.2 | 相位激光测距仪 | 228 |
| 5.4 | 激光准直仪 | 231 |
| 5.4.1 | 激光准直仪原理 | 231 |
| 5.4.2 | 准直激光器 | 232 |
| 5.4.3 | 准直光束的抖动和折射 | 233 |
| 5.5 | 光弹效应测力计 | 235 |
| 5.5.1 | 光弹效应 | 235 |
| 5.5.2 | 光弹效应测力计的结构与原理 | 236 |
| 5.6 | 激光多普勒测速仪 | 237 |
| 5.6.1 | 光学多普勒频移 | 238 |
| 5.6.2 | 频率检测 | 239 |
| 5.6.3 | 激光多普勒测速仪的组成 | 239 |

| | | |
|------------|-----------------|------------|
| 5.6.4 | 激光多普勒测速技术的特点和应用 | 243 |
| 5.7 | 红外线气体分析仪 | 243 |
| 5.7.1 | 朗伯-比尔吸收定律 | 244 |
| 5.7.2 | 空间双光路气体分析仪 | 245 |
| 5.7.3 | 时间双光路气体分析仪 | 248 |
| | 思考题与习题 | 249 |
| | 参考文献 | 250 |
| 第6章 | 视觉测量 | 251 |
| 6.1 | 视觉测量概述 | 251 |
| 6.1.1 | 视觉测量系统的组成 | 251 |
| 6.1.2 | 视觉测量关键技术 | 253 |
| 6.1.3 | 针孔成像模型 | 255 |
| 6.2 | 双目立体视觉测量 | 258 |
| 6.2.1 | 测量原理与数学模型 | 258 |
| 6.2.2 | 两幅图像对应点匹配 | 261 |
| 6.3 | 结构光三维视觉测量 | 263 |
| 6.3.1 | 测量原理与数学模型 | 263 |
| 6.3.2 | 光条信息提取方法 | 267 |
| 6.4 | 视觉测量标定 | 270 |
| 6.4.1 | 摄像机标定 | 270 |
| 6.4.2 | 双目立体视觉测量标定 | 274 |
| 6.4.3 | 结构光三维视觉测量标定 | 276 |
| 6.5 | 典型视觉测量系统 | 277 |
| 6.5.1 | 轿车白车身视觉测量系统 | 277 |
| 6.5.2 | 无缝钢管直线度视觉测量系统 | 278 |
| 6.5.3 | 车轮视觉测量定位系统 | 279 |
| 6.5.4 | 光笔式三坐标测量机 | 281 |
| 6.5.5 | 钢轨磨耗车载动态视觉测量系统 | 282 |
| | 思考题与习题 | 283 |
| | 参考文献 | 284 |
| 第7章 | 激光雷达及探测 | 285 |
| 7.1 | 概 述 | 285 |
| 7.1.1 | 激光雷达的基本原理及构成 | 285 |
| 7.1.2 | 激光雷达的分类及特点 | 291 |



| | | |
|--------------|------------------|------------|
| 7.2 | 激光雷达方程 | 292 |
| 7.2.1 | 激光雷达方程的标准形式 | 292 |
| 7.2.2 | 激光雷达方程的能量形式 | 293 |
| 7.3 | 激光雷达的性能 | 294 |
| 7.3.1 | 信噪比 SNR | 294 |
| 7.3.2 | 探测概率 | 296 |
| 7.4 | 激光雷达目标的特性 | 297 |
| 7.4.1 | 目标激光横截面 | 297 |
| 7.4.2 | 两类目标的激光横截面 | 297 |
| 7.5 | 激光雷达的发射系统和接收系统 | 299 |
| 7.5.1 | 激光雷达的发射系统 | 300 |
| 7.5.2 | 激光雷达的接收系统 | 305 |
| 7.6 | 典型激光雷达系统 | 309 |
| 7.6.1 | 非相干激光雷达系统 | 309 |
| 7.6.2 | 相干激光雷达系统 | 316 |
| 7.6.3 | 相干激光多普勒测速雷达 | 318 |
| 7.6.4 | 合成孔径激光雷达 | 320 |
| 7.6.5 | 相控阵激光雷达 | 320 |
| 7.6.6 | 激光雷达的应用 | 323 |
| | 思考题与习题 | 329 |
| | 参考文献 | 329 |
| 第 8 章 | 光电导航与制导 | 330 |
| 8.1 | 红外方位探测系统 | 330 |
| 8.1.1 | 基于调制盘的方位探测原理 | 330 |
| 8.1.2 | 基于调制盘的红外方位探测系统结构 | 333 |
| 8.1.3 | 基于多元点源探测的红外导引系统 | 335 |
| 8.2 | 光电成像制导 | 337 |
| 8.2.1 | 红外成像制导 | 337 |
| 8.2.2 | 激光成像制导 | 342 |
| 8.2.3 | 电视制导 | 344 |
| 8.2.4 | 复合成像制导 | 346 |
| 8.3 | 光学陀螺技术 | 348 |
| 8.3.1 | Sagnac 效应 | 348 |
| 8.3.2 | 激光陀螺 | 350 |



| | |
|----------------------------|-----|
| 8.3.3 光纤陀螺 | 353 |
| 8.4 图像匹配导航 | 359 |
| 8.4.1 景象匹配导航 | 359 |
| 8.4.2 地形匹配导航 | 366 |
| 8.5 天文导航 | 374 |
| 8.5.1 天文导航的基本原理 | 374 |
| 8.5.2 天文导航系统的组成 | 376 |
| 8.5.3 基于径向和环向特征的星图识别 | 378 |
| 思考题与习题 | 382 |
| 参考文献 | 383 |

第 1 章 光电测试用光源

光电测试是采用光电的方法对带有待测信息的光辐射的测试,因此,在任何光电测试系统中,都离不开一定形式的光源。在解决某些具体光电测试问题时,正确合理地选择光源,往往是成功的保证。

本章讨论光产生的基本原理及方法。首先介绍辐射度学和光度学基本概念,在此基础上,重点介绍光电测试技术中常用的几种光源:发光二极管、激光光源、热辐射光源及气体放电光源。

1.1 辐射度学和光度学基本概念

辐射度学研究各种电磁辐射的传播和量度,包括可见光区域。辐射度学单位是纯粹物理量的单位,例如,熟悉的物理学单位焦耳(J)和瓦特(W)就是辐射能和辐射功率的单位。光度学所讨论的内容仅是可见光波的传播和量度,因此光度学的单位必须考虑人眼的响应,包含了生理因素。例如,光度学中光功率的单位不用瓦特(W)而用流明(lm)。虽然光度学采用另一套单位制,但是各物理量的定义及其物理意义与辐射度学是一致的。为了区分辐射度学和光度学,各物理量分别用下标“e”和“v”表示。

1.1.1 辐射度学基本物理量

1. 辐[射]功率(或称辐[射能]通量) Φ_e 。

对辐射源来说,辐功率定义为单位时间内向所有方向发射的能量;对于电磁波的传播来说,辐功率 Φ_e (e为辐射 emission 的首字母)的定义是单位时间内通过某一截面的辐射能,单位为 W(瓦[特])。

2. 辐[射]强度 I_e 。

点状辐射体在不同方向上的辐射特性用辐强度 I_e 表示。若在某方向上,一个小立体角 $d\Omega$ 内的辐通量为 $d\Phi_e$,则点光源在该方向的辐强度 I_e 为

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-1)$$

辐强度 I_e 的单位为 W/sr(瓦每球面度)。对于均匀辐射的点光源,若辐通量为 Φ_e ,则其辐强度为

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1-2)$$

3. 辐[射]亮度(或称辐射度) L_e

对于小面积的面辐射源,以辐亮度 L_e 来表示其表面不同位置在不同方向上的辐射特性。如图 1-1 所示,一小平面辐射源的面积为 dS ,与 dS 的法线 N 夹角 θ 的方向上有一面元 dA 。若 dA 所对应的立体角 $d\Omega$ 内的辐通量为 $d\Phi_e$,则面源在此方向上的辐亮度为

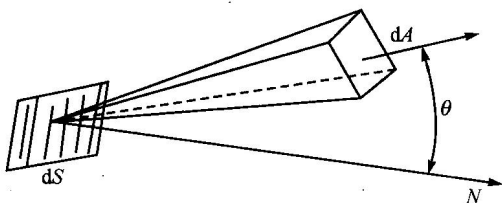


图 1-1 辐射源的辐亮度

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{\cos \theta dS d\Omega} \quad (1-3)$$

式中: $\cos \theta dS$ ——面辐射源正对 dA 的有效面积。

辐亮度 L_e 就是该面源在某方向上单位投影面积辐射到单位立体角的辐通量,单位为 $W/(sr \cdot m^2)$ (瓦每球面度平方米)。

4. 辐[射]出[射]度 M_e

辐出度只表示面辐射源表面不同位置的辐射特性,而不考虑辐射方向。其定义为面辐射源的单位面积上辐射的辐通量,也就是对辐亮度 L_e 作所有可能方向的角积分,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} = \int_{\Omega} L_e d\Omega \quad (1-4)$$

其单位为 W/m^2 (瓦每平方米)。

5. 辐[射]照度 E_e

辐照度表示每单位受照面接受的辐通量,即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

这里,无须考虑面元 dA 所接受的辐通量来自何方,故与该面的取向无关。辐照度的单位为 W/m^2 (瓦每平方米)。

此外,还有一些物理量,如辐射能 Q (单位是 J)、辐射能密度 ω (单位是 J/m^3),等等。

如果辐亮度和辐强度与辐射方向有关,则可用带下标的 $L_{e\alpha}$ 和 $I_{e\alpha}$ 表示;如果仅仅考虑在波长 λ 附近的辐射情况,则可用 $L_{e\lambda}$ 和 $I_{e\lambda}$ 表示。例如, $I_{e\lambda}$ 称为光谱辐强度,表示在波长 λ 附近每单位波长间隔的辐强度。辐强度与光谱辐强度的关系为

$$I_e = \int_0^{\infty} I_{e\lambda} d\lambda \quad (1-6)$$

其余物理量,如 $M_{e\alpha}$ 、 $L_{e\alpha}$ 等意义与 $I_{e\alpha}$ 相仿,在此不一一叙述。

1.1.2 光度学基本物理量

人眼是最常用也是最重要的可见光接受器。它对不同波长的电磁辐射有不同的灵敏度,



而且不同人的眼睛,其灵敏度也有差异。为了从数量上描述人眼对各种波长辐射能的相对敏感度,引入视见函数。国际照明委员会从许多人的大量观察结果中取其平均值,得出视见函数 $V_{\lambda}-\lambda$ 的曲线,如图1-2所示,虚线是暗视觉视见函数,实线是明视觉视见函数。人眼对于波长为555 nm的绿色光最敏感,取其视见函数值为1。其他波长的 $V(\lambda) < 1$,而在可见光谱以外的波段 $V(\lambda) = 0$ 。在380~780 nm的区域里,各种波长处的视见函数值如表1-1所列。从表1-1所列数值可见,波长为740 nm的红光,其功率必须大于波长为555 nm的绿光的 4×10^3 倍,才能引起相同强度的视觉感受。

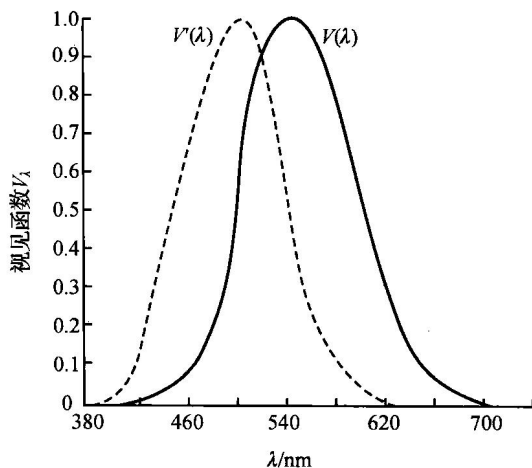
图1-2 视见函数 $V_{\lambda}-\lambda$ 的曲线

表1-1 各种波长处的视见函数值

| 光 色 | λ/nm | 视见函数 V_{λ} | 光 色 | λ/nm | 视见函数 V_{λ} | 光 色 | λ/nm | 视见函数 V_{λ} |
|-----|---------------------|----------------------|-----|---------------------|--------------------|-----|---------------------|----------------------|
| 紫 | 380 | 4×10^{-5} | 绿 | 530 | 0.862 | 橙 | 620 | 0.381 |
| 紫 | 390 | 1.2×10^{-4} | 绿 | 540 | 0.954 | 红 | 640 | 0.175 |
| 紫 | 400 | 4×10^{-4} | 绿 | 550 | 0.995 | 红 | 660 | 0.061 |
| 紫 | 420 | 4×10^{-3} | 绿 | 555 | 1.000 | 红 | 680 | 0.017 |
| 蓝 | 440 | 2.3×10^{-2} | 绿 | 560 | 0.995 | 红 | 700 | 4×10^{-3} |
| 青 | 460 | 6×10^{-2} | 黄 | 570 | 0.952 | 红 | 720 | 1×10^{-3} |
| 青 | 480 | 0.139 | 黄 | 580 | 0.870 | 红 | 740 | 2.5×10^{-4} |
| 绿 | 500 | 0.323 | 黄 | 590 | 0.757 | 红 | 760 | 6×10^{-5} |
| 绿 | 520 | 0.710 | 橙 | 600 | 0.631 | 红 | 780 | 1.5×10^{-5} |

1. 光通量 Φ_v

为了从数量上描述电磁辐射对视觉的刺激强度,引入一个新的物理量,称为光通量 Φ_v (v 为可见度 visibility 的首字母),也称为光功率。光通量的定义为

$$\Phi_v = C V_{\lambda} \Phi_e \quad (1-7)$$

式中: Φ_v ——光通量(lm);

C ——比例系数, $C=683 \text{ lm/W}$;

Φ_e ——辐通量(W)。

由定义可知,辐通量为1 W,波长等于555 nm的绿光的光通量(即视觉感受)为683 lm,



即 1 lm 的光通量所相当的瓦特数为 1/683(对于波长为 555 nm 而言)。对于其他波长, 1 lm 光通量所相当的瓦特数都大于 1/683。

2. 发光强度 I_v

这是从光通量导出的光度学的量, 与辐射度学的辐强度很相似。点光源的发光强度定义为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1-8)$$

发光强度的单位应该是 lm/sr(流明每球面度), 但是国际单位制规定发光强度为 7 个基本量之一, 其单位 cd(坎[德拉])为基本单位。国家标准 GB 3100~3102-86 规定, 坎[德拉]是光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射, 且在此方向上的辐强度为 (1/683) W/sr。

其他光度学单位从发光强度单位导出。例如, 1 lm 是发光强度为 1 cd 的点光源在 1 sr 立体角内的光通量。

3. 亮度 L_v

面光源的亮度定义为

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{\cos \theta dS d\Omega} \quad (1-9)$$

L_v 的单位为 cd/m²(坎[德拉]每平方米)。这个单位曾称为 nt(尼特), 但在国际标准 ISO 中已废除。

4. 光出射度 M_v

光出射度过去也称为面发光度。其定义为面光源从单位面积上辐射的光通量, 即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS} = \int_{\Omega} L_v d\Omega \quad (1-10)$$

M_v 的单位为 lm/m²(流明每平方米)。从量纲上看, 光出射度 M 和照度 E 单位应一样, 但照度专门命名了一个单位 lx(勒[克斯])。

5. 照度 E_v

入射到单位面积上的光通量称为照度, 即

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-11)$$

E_v 的单位为 lx。1 lm 的光通量均匀分布在 1 m² 的平面上所产生的照度为 1 lx。

表 1-2 列出主要辐射度学量和相应的光度学量及其单位。当需要区分时, 辐射度学和光度学各物理量分别加下标“e”和“v”, 若不会引起混淆则可省去。根据眼睛的视见函数 V_λ , 可从辐射度学单位表示的量值换算为以光度学单位表示的相应值。例如, 已知某一波长 λ 的光谱辐照度 $E_{e\lambda}$ 时, 与之相当的光谱照度 E_λ 为

$$E_\lambda = 683V_\lambda E_{e\lambda} \quad (1-12)$$



如果照明光源不是单色的,则总的照度可用积分求出。公式如下:

$$E_{\lambda} = 683 \int V_{\lambda} E_{\omega} d\lambda \quad (1-13)$$

式中的积分限应按照光源的辐射波长范围确定。对于白光光源,一般取 380~780 nm。

表 1-2 辐射度量学和光度学量对照表

| 符 号 | 光度学量及单位 | 辐射度量学及单位 | 定 义 |
|--------|------------------------|----------------------------|--|
| Φ | 光通量(光功率)lm | 辐通量(辐功率)W | 单位时间内通过某截面的能量 |
| I | 发光强度 cd | 辐强度 W/sr | $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ |
| E | 照度 lx | 辐照度 W/m ² | $E = \frac{d\Phi}{dA}$ |
| L | 亮度 cd/m ² | 辐射度 W/(sr·m ²) | $L = \frac{d\Phi}{\cos\theta dS d\Omega}$ |
| M | 光出射度 lm/m ² | 辐出度 W/m ² | $M = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{\Omega} L d\Omega$ |
| Q | 光量 lm·s 或 lm·h | 辐射能 J | $Q = \int \Phi dt$ |

1.1.3 其他基本概念

1. 点 源

从强度为 I 的点源辐射到立体角 $d\Omega$ 的通量为

$$d\Phi = Id\Omega \quad (1-14)$$

若点源沿各方向均匀辐射,则总通量为

$$\Phi = 4\pi I \quad (1-15)$$

当点源照射一个小面元 dA 时,若面元 dA 的法线与 dA 到点源连线 r 的夹角为 θ ,则照到 dA 上的通量为

$$d\Phi = I \frac{\cos\theta dA}{r^2} \quad (1-16)$$

根据照度的定义,得该面元上的照度为

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I}{r^2} \cos\theta \quad (1-17)$$

这就是照度与距离 r 之间的平方反比定律。仅当光源极小或极远时,平方反比定律才能成立,这时才能把辐射源看作点源。

2. 扩展源

一个理想化的扩展源,称之为朗伯源。朗伯源的亮度不随方向而改变,即其上单位投影面

积辐射到单位立体角内的功率,不随此立体角在空间的取向而改变,因而从任何角度观察朗伯源都应该是一样明亮的。朗伯源又称为余弦辐射体。因为亮度 L 与 θ 无关,则该面元在 $d\Omega$ 内辐射的通量与方向角 θ 的余弦成正比。

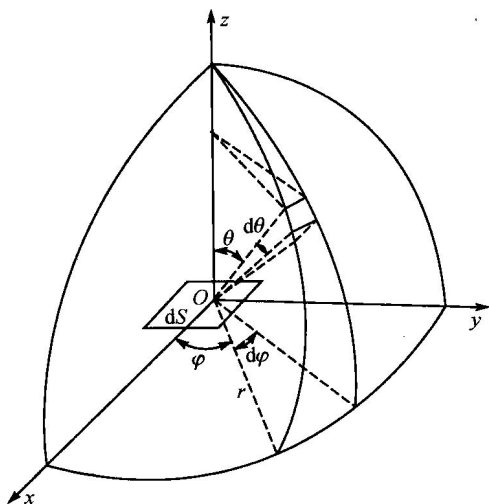


图 1-3 某一方向上的发光强度

一个面积为 dS 的朗伯源,在立体角 $d\Omega$ 内辐射的通量为

$$d\Phi = L \cos \theta dS d\Omega \quad (1-18)$$

假设此朗伯源为不透明物质,其辐射通量仅仅分布在半球空间内,则

$$d\Omega = \frac{rd\theta \cdot r \sin \theta d\varphi}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1-19)$$

如图 1-3 所示,所以此面源的总辐射通量为

$$\Phi = LdS \int_0^\pi \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = \pi LdS \quad (1-20)$$

根据辐出度的定义,可得朗伯源的辐出度与辐亮度的关系,即

$$M = \frac{\Phi}{dS} = \pi L \quad (1-21)$$

3. 漫反射面

用 MgO 或 $BaSO_4$ 粉末压制成的表面、积雪、牛奶和无光白纸等,都可以把入射光向各方向均匀地散射出去。这种反射表面称为漫反射表面或散射面。假设投射到表面积 dS 的漫反射表面上的照度为 E ,则该面所接受的光通量为

$$d\Phi_i = EdS \quad (1-22)$$

设该表面的漫反射系数为 K ,则该表面散射的光通量为

$$d\Phi_s = Kd\Phi_i \quad (1-23)$$

因为漫反射面把入射光沿所有方向散射出去,所以可当作朗伯反射面处理,于是有

$$d\Phi_s = \pi L_s dS \quad (1-24)$$

式中: L_s ——该表面的视亮度。

由式(1-22)~式(1-24)可得

$$L_s = \frac{KE}{\pi} \quad (1-25)$$

良好的朗伯反射面不论从任何角度去观察,都具有大致相同的亮度。当漫射系数 $K \approx 1$ 时,在白光照射下,朗伯反射体看起来仍是白色的。乳白玻璃可以把入射光向空间各方向散射,而不是仅仅向半球空间散射,所以其视亮度为