

光 辐 射 测 量

刘世才 周建勋 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书集国内外有关资料、成果，对辐射理论、目标与背景特性、辐射测量的原理与方法、测量系统的仪器结构与标定、测量标准与误差分析等各个方面进行了全面系统的阐述。

内容取材先进，概念清楚，不仅可作高等学校光电子技术专业、光电转换技术专业以及光电成像技术专业的教材，同时也可供红外技术专业、光学专业和其他相关专业领域工作的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话 68912824

各地新华书店经售

印刷厂印刷

787 × 1092 毫米 16 开本 印张 千字

1997 年 11 月第一版 1997 年 11 月第一次印刷

印数：1— 册 定价： 元

图书印装有误，可随时与我社退换

ISBN：7-80090-672-8/0432

出版说明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神，中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下；在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务。共出版教材211种。这批教材出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革、提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、建立质量标准、明确岗位职责，制订了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件，并根据兵工类专业的特点，成立了十个专业教学指导委员会，以更好地编制兵工类专业教材建设规划，加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系统配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针，兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划，共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的。专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将为兵工专业教材的系列配套，为教学质量的提高、培养国防现代人才，为促进兵工类专业科学技术的发展，都将起到积极的作用。

本教材由李汉斌教授主审，经中国兵器工业总公司夜视及激光技术专业教学指导委员会复查，兵总教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位 and 广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

序

光电成像是适应信息社会的需要而迅速发展的一门新技术分支学科。这一先进的技术为人类有效地扩展了自身的视觉能力。利用光电成像技术，可在全黑的夜空不用照明能像白天一样看清周围景物；可利用景物本身在常温下的辐射能获得可见的图像信息；可通过视频信号的转换能完成图像的传输，存贮以及处理等功能。由于光电成像技首先在军事领域中得到了应用，因此这一技术已成为国防科技中至关重要的专业技术。

中国兵器工业总公司教材编审室最近组织编写了光电成像技术专业的系列教材，这是做了一件很有意义的工作。通过这套教材，读者可以全面了解军事及民用领域中光电成像技术的主要内容及其进展。

光电成像技术，一可以扩展人眼对微光图像的探测能力；二可以将超快速现象记下来；三可以开拓人眼对不可见辐射的接收能力。正是由于光电技术的这些作用，才逐步发展成为现在的各类光电成像器件及系统，并由此建立并发展了这一技术学科。

光电成像是以微光图像的增强和红外、紫外、X射线、亚毫米波等非可见辐射图像的探测与处理为基本内容的高新技术分支学科。由于军事工程的迫切需求，这一技术取得了迅猛的发展。当前光电技术已达到接近光子探测的极限水平。其主要标志是：具有高量子效率的负电子亲和势光电阴极的第三代微光像增强已走出实验室进入商品化市场；以超大规模的电荷耦合器件（CCD）面阵为核心的高性能固态摄像机已在国防和民用领域获得广泛应用；热成像中引入了焦平面技术，多元探测器的光机扫描热成像系统的噪声等效温差已可优于0.01K；辐射探测的长波限已延伸到30 μm 的波段；40 μm 以上波段的开拓工作也有所进展；以红外电荷耦合器件（IRCCD）为核心的凝视热成像系统的发展正方兴未艾，并已开始开始在体积、重量要求严格的应用场合取代了光机扫描式热像仪。利用光电成像器件，可以将超快速（例如核爆炸、高压放电的形成）在纳秒、皮秒以至飞秒级变化现象记录下来。

由30年代至今，光电成像技术的发展历程已走过了60年。当前光电成像技术已渗透到许多科学领域中。这一技术开拓了二维高密度以及随时间变化的三维信息源，促成了人类视觉探测域的光谱延伸、阈值扩展和时间暂留。根据当代社会对发展图像信息技术的迫切需要、国防上对夜战和图像制导等技术的重视，可以预计光电成像技术定会有更为迅速的发展前景。为此我深信这套教材的出版将会促进这一新兴分支学科的发展。

王大珩

目 录

第一章 辐射理论	()
1.1 辐射的描述	()
1.2 热辐射	()
1.3 黑体辐射定律	()
1.4 实际物体的辐射	()
习题	()
第二章 辐射源	()
2.1 辐射源的分类与描述	()
2.2 人工辐射源	()
2.3 天然辐射源	()
习题	()
第三章 辐射量的测量	()
3.1 辐射测量基础	()
3.2 绝对辐射计	()
3.3 辐射的测量	()
3.4 辐射测量的标定	()
习题	()
第四章 光度量的测量	()
4.1 光度量与辐射量之间的关系	()
4.2 光照度与光强度的测量	()
4.3 光通量的测量	()
4.4 光亮度的测量	()
习题	()
第五章 辐射的光谱量测量	()
5.1 光谱辐射量测量基础	()
5.2 辐射的光谱分解	()
5.3 光谱滤光器在光谱辐射测量中的作用	()
5.4 光电比较光谱法	()
习题	()
第六章 颜色的测量	()
6.1 颜色的基本概念	()
6.2 CIE 标准色度学	()
6.3 颜色的测量	()
6.4 色度标准	()
习题	()
第七章 辐射测量	()
7.1 辐射测量原理	()

7.2	辐射温度计	()
7.3	发射率的测量和消除影响测量准确性的方法	()
7.4	辐射测量系统	()
7.5	测温仪工作波长的选择和确定	()
7.6	辐射温度计的标定	()
	习题	()
	参考文献	()

第一章 辐射理论

1.1 辐射的描述

以电磁波或光子形式传递能量的过程称为辐射，所传递的能量称为辐射能。现在已经知道，电磁波辐射波谱是由宇宙射线、微波、红外光、可见光、紫外光、X射线、γ射线和宇宙射线组成，如图1-1所示。所有这些电磁波都具有下列共同点：它们都作为横向电磁波在空间传播；它们在真空中的传播速度都等于光在真空中的传播速度。

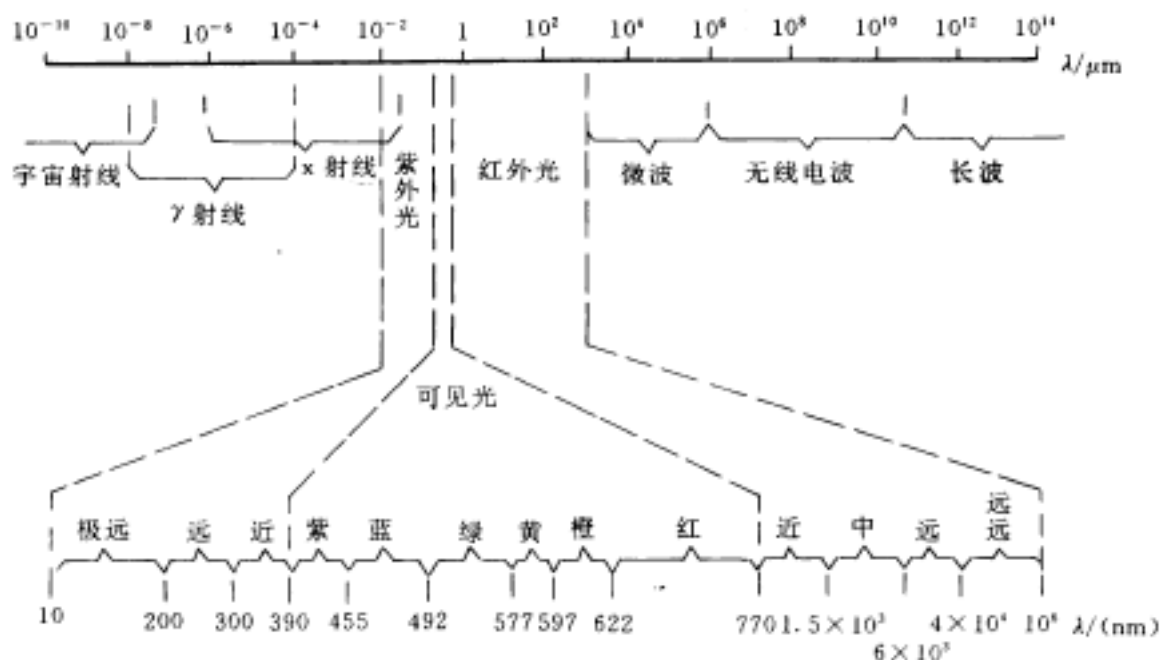


图 1-1 电磁波谱

在物理学中可以用波长 λ 和频率 ν 来描述，对于电磁波在真空中有

$$c = \lambda \nu \quad (1-1)$$

式中 λ ——波长； ν ——频率； c ——电磁波在真空中的传播速度 ($c = 2.99792458 \times 10^8$ ms)。

1.1.1 光辐射

1. 电磁波分类

现代物理学认为辐射能具有波动性和粒子性，对于不同波长的电磁波，按其产生或与物质相互作用形式的差别，可分为

(1) 短波端 ($\lambda < 1\text{mm}$)

它在原子核及基本粒子间的相互作用过程中产生，对外主要显示粒子性。

(2) 长波端 ($\lambda > 100\mu\text{m}$)

它在扩展电路结构中产生，对外主要显示波动性。

(3) 中间区 ($1\text{nm} < \lambda < 100\mu\text{m}$)

它由外层电子在原子场中的跃迁或分子的振动和转动所产生，常称为光辐射。它具有明显的波粒二相性，故又称光波或光子。

2．光辐射

本书所述的光辐射指波长在 $1\text{nm} \sim 100\mu\text{m}$ 的电磁波，又常简称为辐射或光波。

光辐射按其波长又可分为

(1) 紫外区 $1\text{nm} < \lambda < 380\text{nm}$

(2) 可见区 $380\text{nm} < \lambda < 780\text{nm}$

(3) 红外区 $780\text{nm} < \lambda < 1000\mu\text{m}$

其中紫外和红外区又习惯分为“近”、“中”、“远”，不同专业对其分法不尽相同。

在光谱学中，为使用与理解方便又常引入波数 σ 的概念。它表示在真空中 1cm 路程中包含的波的个数。波长与波数的关系为

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (1\text{cm}) \quad (1-2)$$

表 1-1 给出了光辐射的波长 λ 、 ν 频率和波数 σ 的典型值。

表 1-1 光辐射光谱的典型值

		真空紫外	近紫外	可见光	近红外	远红外	
λ	A	1	2000	4000	7000	10000	
	(nm)	0.1	200	400	700	1000	
	(μm)		0.2	0.4	0.7	1.0	50 500
ν	(Hz)		1.5×10^{15}	7.5×10^{14}		3×10^{14}	6×10^{12} 6×10^{11}
σ	(cm^{-1})		50,000	25,000	14,300	10,000	200 20

1.1.2 基本辐射量

为了对辐射的产生、传输和与物体的相互作用，如反射、折射、散射、吸收等进行描述，必须引入描述辐射现象的基本辐射量。完整的辐射参量集合反应应该包括辐射随时间、空间、光谱等变化形式。

1．辐射能

辐射能是以辐射的形式发射、传输或接收的能量，常用符号 Q_e 表示，单位为 J(焦耳)，其中脚标“e”表示辐射量，为叙述简单，脚标“e”常省略。

2．辐射能通量(简称辐射通量)

辐射通量是单位时间内以辐射的形式发射、传输或接收的能量，常用符号 Φ 表示，单位为 W(瓦特)，即

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1-3)$$

辐射通量又常称为辐射功率。对于辐射源则辐射通量是描述该辐射源在单位时间内向全空间发射的全部辐射能的集总参数。

3．辐射出射度(简称辐出度)

对于面辐射源，为了描述面辐射源表面上各微面源所发出的辐射通量差异，可引入辐射出射度概念。辐射出射度是辐射源上任一微面源向该微面源所对应的半球空间所发出的辐射

通量与该微面源的面积之比。即

$$M = \frac{d\Phi}{dA_s} \quad (\text{W/ m}^2) \quad (1-4)$$

辐射出射度是描述面源所辐射的通量按其表面分布的参数，通常它是辐射源表面位置的函数。对于辐射源某一部分 A_s 所发射的总辐射通量则可通过对辐射源表面的积分得到。即

$$\Phi = \int_s^A M(x, y) dA_s \quad (1-5)$$

4. 辐射强度

为了解辐射源发射的辐射通量在空间不同方向的分布，引入参数辐射强度。辐射强度指辐射源在任一空间方向上单位立体角 $d\Omega$ 内所发射的辐射通量。即

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{W/ sr}) \quad (1-6)$$

辐射强度常用于描述点辐射源或可近似点辐射源的辐射空间分布，它是辐射源空间坐标的函数。如果已知辐射源的空间分布 $I(\theta, \varphi)$ ，则可通过空间积分计算出该辐射源在某个空间立体范围 Ω 内的辐射通量。即

$$\Phi = \int_I^\Omega I(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1-7)$$

对于各向同性点辐射源，有

$$I(\theta, \varphi) = I_0 \quad (1-8)$$

它所发出的辐射通量为

$$\Phi = \int_I^\Omega d\Omega = 4\pi I_0 \quad (1-9)$$

应该指出，在定义中“点辐射源”是指尺寸很小甚至为一点的辐射源。实际中，真正的点辐射源不可能实现。通常是将辐射源的最大线尺寸与它到观测者(探测器)之间的距离相比，其值很小时，即称该辐射源为点辐射源；否则应为面辐射。这意味着，同一辐射源在不同情况下，既可能是点辐射源又可能是面辐射源，这完全取决于辐射源相对于观测者的距离。一般讲，当探测装置不带成像的光学系统时，探测装置到辐射源之间的距离是辐射源最大尺寸的10倍以上，该辐射源就可认为是点辐射源，反之认为是面辐射源。如果探测装置带有成像光学系统，那么由辐射源像的尺寸与探测器尺寸相比较，若像尺寸小于探测器尺寸，则可认为是点辐射源，反之认为是面辐射源。或者说，光线充满成像光学系统视场的为面辐射源，未充满视场的为点辐射源。

5. 辐射亮度 (简称辐亮度)

为了描述面辐射源的辐射通量在空间和源表面上的分布特征，可引入辐射亮度的概念。面辐射源上某微面源在某方向的辐射亮度就是该面源在该方向上的单位表观面积向单位立体角发射的辐射通量。即

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_s \cos\theta} \quad (\text{W/ m}^2 \text{ sr})$$

通常，面源的辐射亮度是面源表面位置坐标和空间方向的函数。对于 L 是面源表面坐标函数的概念比较容易理解，这里需要指出的是与 L 相关的方向是以微面源的法线方向为参照。对于非平面辐射源，不同

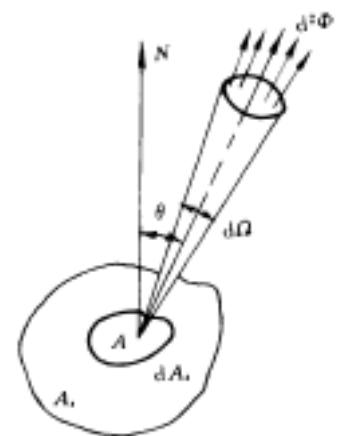


图 1-2 辐射亮度定义的几何图示

微源表面的法线方向不尽相同。故即使两个不同微源在辐射亮度表达式上的 θ 、 φ 相同，它们也对应着不同的物理含义。对于平面辐射源，则辐射源上各点的 θ 、 φ 相同，它们也对应着不同的物理含义。对于平面辐射源，则辐射源上各点的 θ 、 φ 方向统一为一个。

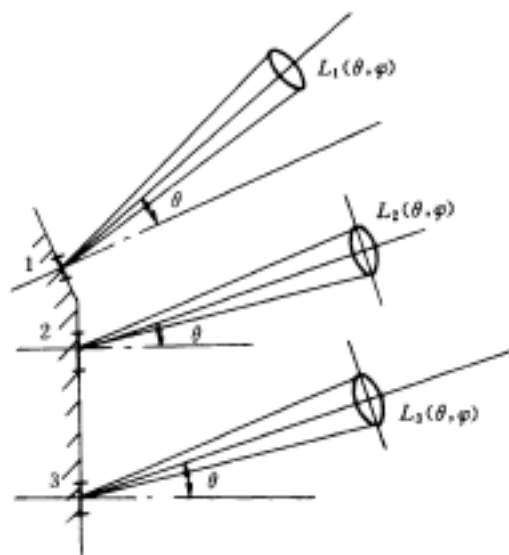


图 1-3 不同位置上相同方向的亮度物理意义示意

对某一已知辐射亮度 $L = L(x, y; \theta, \varphi)$ 分布的辐射源可以通过积分计算出该辐射源上某部分 (A_s) 向某空间 (Ω) 发射的辐射通量。即

$$\Phi = \iint_{\Omega}^A L \cos \theta dA_s d\Omega \quad (1-11)$$

注意：在利用该式计算辐射通量时，必须认真理解 θ 、 Ω 的物理意义，它们可能是空间坐标的函数。

6. 辐射照度 (简称辐照度)

辐射出射度、辐射强度和辐射亮度是描述辐射源辐射性能的参量，从描述辐射与媒质相互作用以及能量探测角度看，需要引入一个描述受照表面和辐射通量随受照面分布的量，这就是辐射照度。物体表面的辐照度定义为单位面积上接受到的辐射通量。即

$$E = \frac{d\Phi}{dA_s} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-12)$$

一般，辐照度是受照表面坐标的函数，对于整个受照度所接受辐射通量可以通过 E 对受照面的积分获得。

$$\Phi = \int_s^A E dA_s \quad (1-13)$$

1.1.3 光谱辐射量和光子辐射量

基本辐射量仅考虑了辐射能随时间、位置、空间、方向变化的特性，并默认辐射能或辐射通量包含了波长从 $0 \sim \infty$ 的全部，因而常把它们称为全辐射量。然而任何一个辐射源发射的辐射能或辐射通量均有一定的光谱分布特性，也就说在不同的波长上基本辐射量的值是不同的，因而需要定义相应的光谱特性量。

1. 光谱辐射量

若需了解辐射源在某波长 λ 附近的辐射特性，可在该波长 λ 附近取一微小的波长间隔 $d\lambda$ ，并设在此波长间隔内的辐射量 X (泛指 Φ 、 M 、 I 和 E) 的增量为 dX ，则 dX 与 $d\lambda$ 比定义为该波长 λ 的光谱辐射量，以符号 $X(\lambda)$ 表示。

$$X(\lambda) = \frac{dX}{d\lambda} \quad (1-14)$$

它表示在波长 λ 附近单位波长间隔内的辐射量。若将 (1-14) 式中 X 代以具体一辐射量时，则有：

$$\text{光谱辐射通量} \quad \Phi(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (\text{W}/\mu\text{m}) \quad (1-15)$$

$$\text{光谱辐出度} \quad M(\lambda) = \frac{dM}{d\lambda} \quad (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}) \quad (1-16)$$

$$\text{光谱辐射强度} \quad I(\lambda) = \frac{dI}{d\lambda} \quad (\text{W/ sr} \cdot \mu\text{m}) \quad (1-17)$$

$$\text{光谱辐亮度} \quad L(\lambda) = \frac{dL}{d\lambda} \quad (\text{W/ m}^2 \text{ sr} \cdot \mu\text{m}) \quad (1-18)$$

$$\text{光谱辐照度} \quad E(\lambda) = \frac{dE}{d\lambda} \quad (\text{W/ m}^2 \cdot \mu\text{m}) \quad (1-19)$$

光谱辐射量与光谱波段或全辐射量之间可由式(1-14)导出 $dX = X(\lambda)d\lambda$ 关系式。

若波长在 λ_1 到 λ_2 的波段内, 则由上式得

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda) d\lambda \quad (1-20)$$

在全辐射情况时, 则有

$$X = \int_{\lambda_1}^{\infty} X(\lambda) d\lambda \quad (1-21)$$

应用式(1-20)和式(1-21)可列出光谱波段和全辐射量的具体形式, 在此不一一列出了。

2. 光子辐射量

由于辐射能具有量子性, 而每一个光子具有的能量值为

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-22)$$

式中 h —普朗克常数; ν —频率。

这样, 辐射源发射出的辐通量, 也可用每秒发射的光子数来代替, 并由此定义出其余的辐射量就叫光子辐射量, 用符号 X_q 表示。

$$X_q = \frac{X}{h\nu} \quad (1-23)$$

如光子辐射出射度 M_q

$$M_q = \frac{M}{h\nu} \quad (\text{Phot/ m}^2 \text{ s}) \quad (1-24)$$

它表示在单位时间内, 从辐射源单位表面上向半球空间发射的光子数。

同样, 可定义出光谱光子辐射量

$$X_q(\lambda) = \frac{dX_q}{d\lambda} = \frac{X(\lambda)}{h\nu} \quad (1-25)$$

如光谱子辐出度 $M(\lambda)$

$$M_q(\lambda) = \frac{M(\lambda)}{h\nu} \quad (\text{Phot/ m}^2 \text{ s}) \quad (1-26)$$

它表示在指定波长 λ 附近的单位波长间隔内的光子辐出度。类似地, 可以定义出其他各光子辐射和光谱子辐射量。

1.1.4 光度量

1. 光度量的定义

光度量是描述辐射能中人眼可见的那一部分辐射能的量, 它是光谱波段辐射的一种特殊加权积分形式。光度量中最基本的是光能和光通量。

光能是人眼可见的那一部分辐射能,以符号 Q 表示,单位为 $1\text{m} \cdot \text{s}$ (流明·秒)。

光通量是单位时间内发射(传输或接收)的光能,以符号 Φ 表示。

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1\text{m}) \quad (1-27)$$

由此看出,光通量是光能随时间的变化率。

从光能量 Φ 出发,用和辐射量相同的定义方法,可得出其它的光度量如光出射度

$$M = \frac{d\Phi}{dA_s} \quad (1\text{mm}^2) \quad (1-28)$$

光强 $I_v = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{cd}) \quad (1-29)$

光亮度 $L_v = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_s \cos\theta} \quad (\text{cd/m}^2) \quad (1-30)$

光照度 $E_v = \frac{d\Phi}{dA_c} \quad (1\text{x}) \quad (1-31)$

单色光通量 $\Phi_v(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (1\text{X}) \quad (1-32)$

其中脚标“v”表示光度量,它与脚标“e”以区分光度量与辐射量,因此,仅在有必要区别时就注上脚标“v”或“e”。

2. 光度量与辐射量之间的关系

由于光度量是人眼对相应辐射度量所受到的视觉刺激值,而评定此刺激值的基础是辐射光谱光视效能 $K(\lambda)$,即人眼对不同波长的光能量产生感觉的效率,因此,光谱辐通量 $\Phi_e(\lambda)$ 与光谱光通量 $\Phi_v(\lambda)$ 之间有

$$\Phi_v = (\lambda) K(\lambda) \Phi_e(\lambda) \quad (1-33)$$

由上式不难理解,光谱光视效能 $K(\lambda)$ 表示波长为 λ 的单色辐通量,即每瓦可产生多少流明的单色光通量,因而 $K(\lambda)$ 的单位为流明/瓦(1lm/W)。

$K(\lambda)$ 是波长 λ 的函数,它在可见光区波长从 380nm 到 780nm 范围内不为零,并具有一峰值 $K_m \text{ lx}$ (简称为 K_m)。若以峰值 K_m 归一化为 1,使得辐射的光谱光视效率 $V(\lambda)$

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (1-34)$$

实验证明,在白天和夜间人眼的光谱光视效率是不同的。在白天(即在亮适应条件下观察)光谱光视效率满足式(1-34),通常称为明视觉,其峰值在 $\lambda = 555\text{nm}$ 处。在夜间(即完全暗适应条件下观察)光谱光视效率以 $V'(\lambda)$ 表示,称为暗视觉,其峰值在 $\lambda = 507\text{nm}$ 处。介于明视觉和暗视觉之间的称为中介视觉。图 1-4 表示明视觉和暗视觉的光谱光视效率曲线。

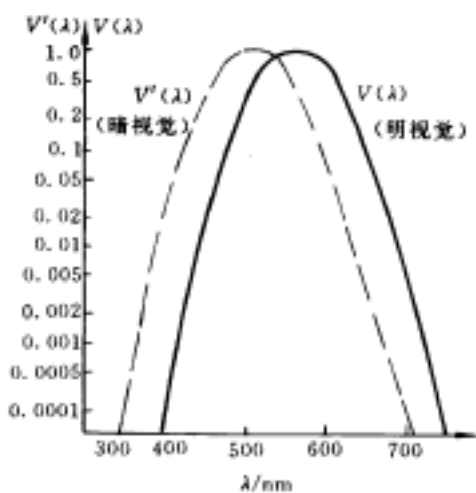


图 1-4 光谱光视效率曲线

由式(1-33)(1-34)式可得总光通量 Φ_v 与辐通量 Φ_e 之间的关系为:

明视觉 $\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1-35)$

暗视觉

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \tag{1-36}$$

式中 K_m ——明觉最大光谱光视效能，其值为 6831m/ W； K'_m ——暗视觉最大光谱光视效能，其值为 17551m/ W。

1. 1. 5 辐射量间的相互关系

1 . 描述辐射源参量间的相互关系

对于同一个辐源，可以分别采用不同的辐射量给予描述。从这些参量的定义式可以导出它们间的相互关系。

表 1 - 2 给出了辐射源参量间的相互关系

Q	—	$\int \Phi dt$	$\iint M dA_s dt$	$\iint I d\Omega dt$	$\iiint L \cos\theta dA_s d\Omega dt$
φ	$\frac{dQ}{dt}$	—	$\int M dA_s$	$\int I d\Omega$	$\iint L \cos\theta dA_s d\Omega$
M	$\frac{d^2 Q}{dtdA_s}$	$\frac{d\Phi}{dA_s}$	—	$\frac{d}{dA_s} \int I d\Omega$	$\int L \cos\theta d\Omega$
I	$\frac{d^2 Q}{dtd\Omega}$	$\frac{d\Phi}{d\Omega}$	$\frac{d\Phi}{d\Omega} \int M dA_s$	—	$\int L \cos\theta dA_s$
L	$\frac{d^3 Q}{\cos\theta dtdA_s d\Omega}$	$\frac{d^2 \Phi}{\cos\theta dA_s d\Omega}$	$\frac{dM}{\cos\theta d\Omega}$	$\frac{dI}{\cos\theta dA_s}$	—

要实际利用表中的公式计算，必须对其中各参量的物理意义有明确的了解。如利用(1 - 5)式计算出的辐射通量是指用 $M(x, y)$ 描述的辐射源 A_s 向外发射的全部辐射通量。而用(1 - 11)式计算出的辐射通量则表示用 $L(x, y)$ 描述的辐射源 A_s 向立体角 Ω 内发射的辐射通量。如令(1 - 5)(1 - 11)式计算的 Φ 相等即计算同一个辐射源向半球空间发射的辐射通量，那么(1 - 11)式中 Ω 值应该取为半球空间，注意这里所说的半球空间是指对面辐射源上各微面源所对应半球空间。对于辐射源上不同点，该 Ω 值并不一定相同，如果对面辐射源上任意一点的半球空间 Ω 相同，则该面辐射源是平面辐射源。如果辐射源非平面形式则(1 - 11)式中的 Ω 、 θ 确定是利用(1 - 11)式计算 Φ 的难点。

2 . 辐射源参量与受照物参量间的相互关系

(1) 对于点源辐射

点辐射源常用 I 描述。如图 1 - 5 所示点辐射源 S 在点 A 处产生的辐照度，由(1 - 12)和(1 - 16)可得

$$E = \frac{d\Phi}{dA_c} = \frac{Id\Omega}{dA_c} \tag{1-37}$$

从几何关系看出 $d\Omega = dA_c \frac{\cos\alpha}{l^2}$ ，那么

$$E = \frac{I \cos\alpha}{l^2}$$

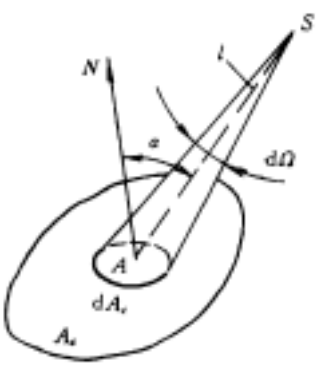


图 1 - 5 点辐射源对
(1 - 38) 平面上一点处的照射

此式常称为距离平方反比定律，即点辐射源在某点处所形成的辐照度与该方向上辐射源的辐射强度成正比，与辐射源到该点的距离平方成反比，与辐射方向及该点所处的平面法线间的夹角的余弦成正比。

利用平方反比定律，可以很方便的计算出点辐射源在受照表面上产生的辐照度。多个点辐射源在同一点产生的辐照度计算，可以很方便的从辐照度定义和平方反比定律中导出，但必须注意当某一辐射源与 dA_s 的法线夹角大于 90° 时的辐照度物理意义。

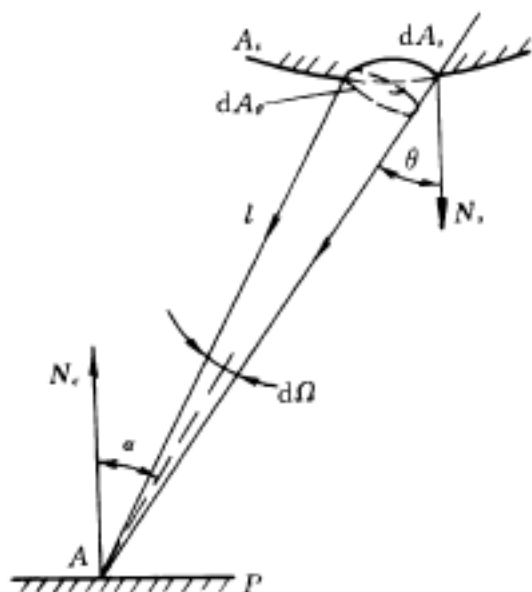


图 1-6 面辐射源对平面上一点处的照度

(2) 对于面辐射源

如图 1-6 所示，求面辐射源 S 在点 A 处所产生的辐照度。

设面辐射源面积为 A_s 受照面为 P 。若要求 P 上点 A 处的辐照度时，首先把辐射源 S 分成许多微小面元 dA_s ，使其满足点辐射源的条件，那么每个小面元在点 A 处的辐照度用式(1-38)求得。

$$dE = \frac{dI \cos \alpha}{l^2} \quad (1-39)$$

式中 dI —微小面元 dA_s 在与 dA_s 的法线成 θ 角方向上的辐射强度。

由表 1-2 可行 $dI = L \cos \theta dA_s$ ，并代入上式，则得

$$dE = \frac{L \cos \alpha \cos \theta}{l^2} dA_s = L \cos \alpha d\Omega \quad (1-40)$$

式中 $d\Omega'$ —辐射源 dA_s 对受照点 A 张的立体角， $d\Omega' = \frac{dA_s \cos \theta}{l^2}$

对整个辐射源在 A 点处产生的辐照度为

$$E = \int_{L \cos \alpha}^{\Omega'} \alpha d\Omega' \quad (1-41)$$

此式常称为立体角投影定律。

通常辐射亮度 L 常用辐射源表面坐标描述，而立体角投影定律中的 α 与 Ω 则是受照面坐标，在实际应用立体角投影定律计算受照面上某点上的辐照度时必须注意加以区别。

(3) 受照面所接收到的辐射通量计算某一受照面积内所接收到的辐射通量

是实际工作中常遇到的问题，由于受照面上各点的辐射照度 $E(x)$ 可以用平方反比的立体角投影定律计算，对受照面 A 内的 $E(x)$ 积分即可计算出所接收到的辐射通量。即

$$\Phi = \int_{A_c} E(x, y) dA_c \quad (1-42)$$

1.1.6 辐射量的理论计算

1. 朗伯(Lambert)辐射源的辐射计算

(1) 朗伯辐射源

一般讲，自然界辐射源的辐通量角分布是很复杂的，因而对它进行辐射量的计算也是复杂的，有时甚至是不可能的。但在实际中经常遇到一类特殊的辐射源——朗伯辐射源(或称

为漫射辐射源), 可以使辐射特性的计算变得十分简单。

凡一个辐射源在任意方向的辐射强度随该方向与表面法线夹角的余弦而变化, 则该辐射源叫朗伯辐射源(或余弦辐射源, 漫射辐射源)。它满足下列关系

$$I(\theta, \varphi) = I_0 \cos \theta \quad (1-43)$$

式中 I_0 ——表面法线方向的辐射强度; θ ——辐射方向与表面法线方向夹角。

朗伯辐射源的辐射强度分布如图 1-7 所示。人们常把式(1-43)称为朗伯余弦定律, 把朗伯辐射源称为朗伯源。严格地说, 只有绝对黑体才是真正的朗伯源。但实际工作中, 常常把自身发光荧屏、受照射的毛玻璃和涂有氧化镁、硫酸钡、硫酸钙表面以及极为粗糙的无光泽表面都近似看作朗伯源。

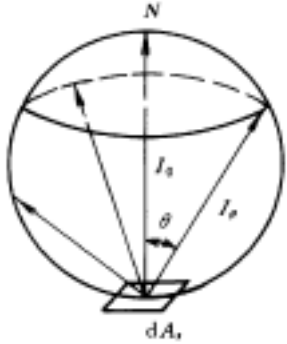


图 1-7 朗伯辐射源的辐射强度分布

(2) 朗伯源向空间发射的辐射通量

对于朗伯源, $I(\theta, \varphi) = I_0 \cos \theta$, 代入(1-7)式

$$\Phi = \int_{\Omega} I(\theta, \varphi) d\Omega = \int_{\Omega} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1-44)$$

特例一: 令 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 即计算朗伯源向全空间(半球)发射的总辐射通量

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi I_0 \quad (1-45)$$

即朗伯源向全空间(半球)发射总辐射通量是辐射源法线方向辐射强度的 π 倍。

特例二: 朗伯源向某一立体角 Ω 内发射总辐射通量。朗伯源向某一立体 Ω 内发射的辐射通量, 即是由辐射源为顶点, r 为半径的圆盘所对应的立体角内 Ω 的辐射通量, 如图 1-8 所示。利用图 1-8 得 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq \theta \leq \arctg(r/l_0)$, 在立体角 Ω 内有辐射通量

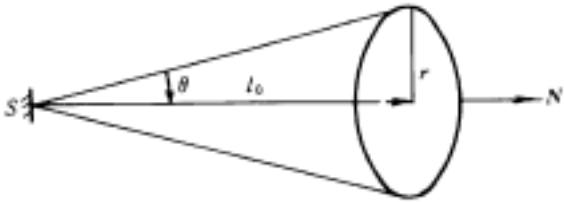


图 1-8 在一个直圆锥型立体角内的辐射

$$\Phi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\arctg(r/l_0)} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{\pi I_0 r^2}{r^2 + l_0^2} \quad (1-46)$$

当 $l_0 \gg r$ 时, 则有

$$\Phi = \frac{\pi I_0 r^2}{l_0^2} \quad (1-47)$$

在 $l_0 \geq 10r$ 时, 式(1-46)与式(1-47)的相对误差 $\leq 1\%$ 。

(3) 朗伯源的辐射亮度

朗伯源 $I(\theta, \varphi) = I_0 \cos \theta$, 由表 1-2 有

$$L = \frac{dI}{\cos \theta dA_s} = I_0 \quad (1-48)$$

即朗伯源的辐射亮度 L 是一个与方向无关的常数。

(4) 朗伯源的辐射出射度

由表 1-2 可得

$$M = \int L \cos \theta d\Omega$$

而 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq \theta \leq \pi/2$, $L = I_0$ 则有

$$M = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi I_0 \quad (1-49)$$

即朗伯源的辐射出射度 M 是其亮度的 π 倍。

2. 辐射面源所产生的辐照度

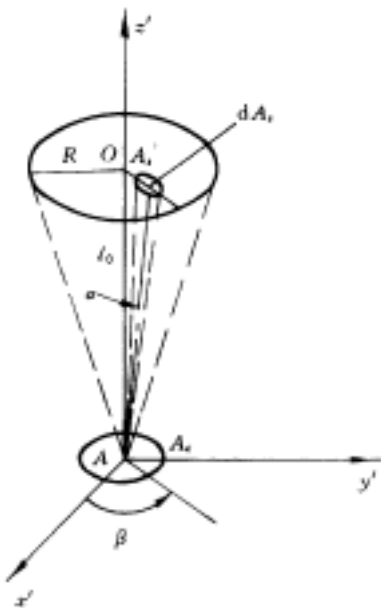
当辐射源是点辐射源时，在某处小面元 dA_c 上的照度由距离平方反比定律决定。如果辐射源是面辐射源，在某处小面元 dA_c 上的照度立体角投影定律决定，见式 (1-41)。值得注意的是立体角 $d\Omega$ 是面辐射源的微小面积对受照点 A 处张的立体角。

现以辐射源上某点定出球坐标系，它的方向由纬度 θ 和经度 φ 决定。再以接收面上某点 A 定出球坐标系，而它的纬度为 α ，经度为 β ，那么

$$E = \iint_{\beta, \alpha} L_o \cos \alpha \sin \alpha d\alpha d\beta \quad (1-50)$$

特例一：现假设面辐射源是半径为 R 的圆盘，如图 1-9 所示。从图中可看出， $0 \leq \beta \leq 2\pi$ ， $0 \leq \alpha \leq \arctg(R/l_o)$ 。此时平面上 A 点的辐照度

$$E = \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{\arctg(R/l_o)} L \cos \alpha \sin \alpha d\alpha \quad (1-51)$$



注意：一般情况下，面辐射圆盘上的 L 是圆盘上点和方位的函数(与 α, β 不属同一坐标)，作为特例进一步设 $L = L_o$ 。则

图 1-9 圆盘面辐射源对平面上一点处的照度

$$E = \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{\arctg(R/l_o)} L_o \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{\pi L_o R^2}{R^2 + l_o^2} = \frac{L_o A_s}{R^2 + l_o^2} \quad (1-52)$$

此式表明，面辐射源在距离 l_o 处小面元 dA_c 上所产生的辐照度与面辐射源辐亮度成正比，与面辐射源的表面积参受照点 A 所张的平面角一半的正弦平方成正比。或者说，面辐射源在某处所产生的辐照度与该面源辐亮度和面源的面积成正比，与面源到受照点的距离的平方和面源半径的平方之和成反比。

因朗伯源有 $I_o = L_o A_s$ ，故(1-52)可改写成

$$E = \frac{I_o}{R^2 + l_o^2} \quad (1-53)$$

当 $l_o \gg R$ 时，则有

$$E = \frac{I_o}{l_o^2} \quad (1-54)$$

此式表明，面朗伯源在距离 l_o (远大于面源的最大尺寸) 处小面元 dA_c 上所产生的辐照度，可看成点辐射源垂直入射到小面元 dA_c 上所产生的辐照度。在 $l_o \geq 10R$ 时，式(1-53)与式(1-54)的相对误差在 1% 以内。

若考虑到受照面是半径为 r 的圆盘时，满足 $l_o \gg r$ 条件。这时半径为 R 的圆盘朗伯源在受照圆盘面上的辐通量由式(1-47)所决定

$$\Phi = \frac{\pi I_o r^2}{l_o^2} = \frac{L_o A_s A_c}{l_o^2} = E A_c \quad (1-55)$$

式中 L_o ——面朗伯源的辐亮度； A_s ——面朗伯源的面积； A_c ——受照面面积； E ——受照面上的辐照度。

此式表明面朗伯源对平面照射时，当两者之间的距离远远大于面朗伯源和受照面的最大线尺寸的条件下，其受照面上接收到的辐射量，等于把面朗伯源看成点辐射并垂直入射到受

照面上所产生的辐照度与该受照面面积的乘积。

特例二：如图 1-10 所示，设小面源的面积为 ΔA_s ，辐射亮度为 L ， ΔA_s 与受照面相距 l_0 ，因为 ΔA_s 很小，所以它的辐射照度可以通过对(1-41)式的简化得到，即

$$E = L \cos \alpha \frac{\Delta A_s}{l_0^2} \cos \theta \quad (1-56)$$

如果小面源是朗伯源，则

$$E = L_0 \cos \alpha \frac{\Delta A_s}{l_0^2} \cos \theta \quad (1-57)$$

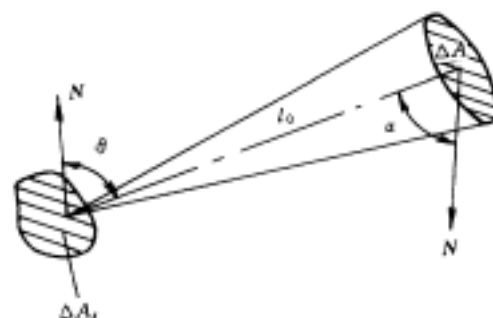


图 1-10 小面源的辐照度计算

1 2 热辐射

1 2 .1 热辐射

所谓热辐射就是由于物体温度不等于 0K 而发出的电磁辐射，它的辐射能是由物体热运动能量转变而成的。当物体在向外辐射能量时，如果它吸收周围物体的辐射能恰好补偿了由于自身辐射面而减少的能量，此时辐射过程达到平衡。在这种状态下，辐射物体的热状态可以用一个固定的温度 T 来描述，则称这种状态的热辐射为平衡热辐射。

除了热辐射以外，按辐射所消耗能量的补充形式，还存在其它辐射。如在辐射过程中，物质内部化学能发生变化的辐射；辐射是由预先照射或不断辐照所引起的光致辐射和由电作用引起的电致辐射等。

描述物体辐射能力可以用光谱辐射出射度（光谱辐射本领） $M(\lambda, T)$ 和辐射出射度 $M(T)$ （辐射本领），其相互关系为

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda \quad (1-58)$$

描述物体吸收辐射能的能力常用光谱吸收比（光谱吸收本领） $\alpha(\lambda, T)$ ，其定义为：在某一温度下，物体对单位波长间隔内的吸收辐射通量 $\Phi_a(\lambda, T)$ 与入射辐射通量 $\Phi_0(\lambda, T)$ 之比，即

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{\Phi_a(\lambda, T)}{\Phi_0(\lambda, T)} \quad (1-59)$$

类似也可定义物体的吸收比（吸收本领） $\alpha(T)$ 。

1. 2. 2 基尔霍夫定律

假设温度不同的物体 $A_0(T)$ 、 $A_1(T)$ 、 $A_2(T)$ 放置在一个与外界隔离的封闭容器内，如图 1-11 所示。若容器内部是真空的，则物体之间只能通过辐射相互交换能量。

实验证明，经过一段时间后，容器内的物体以及容器都会达到同一温度 T 即建立起热平衡。此时各物体之间在单位时间内辐射出的能量恰好等于吸收的能量。这个结果说明辐射本领大的物体吸收本领也大，而辐射本领小的物体吸收本领也小。基尔霍夫将这个关系用定律的形式表达为：物体在相同温度相同波长上的辐射本领和吸收本领之比值与物体的性质无