

高等学校教材

红外物理

白长城 张海兴 方湖宝 编

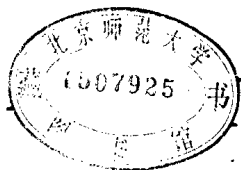


电子工业出版社

红 外 物 理

白长城 张海兴 方湖宝 编

July 18/15



电子工业出版社

内 容 简 介

本书是作者多年来在红外物理教学的基础上,按照电子物理与器件教材编委会制定的工科院校《红外物理》教材编写大纲的要求编写的。全书共分六章,系统地阐述了红外辐射的产生机理;目标和背景红外辐射特性及其辐射规律;红外辐射在大气中的传输特性以及在其它介质中传输特性及物理现象。本书作为红外技术的物理基础,着重介绍了工程设计中所涉及到的理论基础知识。

该教材参考教学时数为60学时,可作为工科院校光电子技术专业本科生的教材及其他有关专业师生和工程技术人员的参考书。

红 外 物 理

白长城 张海兴 方湖宝 编
责任编辑:高平

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)
新华书店北京发行所发行 各老新华书店经售
山东电子工业印刷厂印刷(淄博市周村)

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 17.625 字数: 450千字
1989年3月第一版 1989年5月第一次印刷
印数: 1—2,000册 定价: 3.15元
ISBN7-5093-0459-3/TN·182

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版计划,由电子物理与器件教材编审委员会激光与红外编审小组征稿,推荐出版的,责任编辑杨宜禾。

本教材由西北电讯工程学白长城、张海兴、方湖宝合编。吉林大学侯兰田担任主审。

本课程的参考学时数为60学时,其主要内容是应用物理学的方法系统地研究红外辐射的产生、目标或背景红外辐射特性及其辐射规律、红外辐射在大气中的传输特性以及在其它介质中传输的特性及物理现象。该教材是红外技术的物理基础。

全书共分为:引言、第一章辐射度量学基础、第二章红外辐射的基本规律、第三章红外辐射源、第四章红外辐射在大气中的传输、第五章红外辐射在其它介质中的传播和第六章介质的吸收和光电效应几部分。为了便于教学,主要章节均附有习题。使用本教材者应具备近代物理的基础知识。

本教材由张海兴编写第一章、第二章和第五章,白长城编写引言、第三章、第四章,方湖宝编写第六章。白长城统编全稿。参加审阅工作的还有南京工学院徐淦卿同志,他为本书提出许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。并感谢在编写过程中给予鼓励和热情帮助的西北电讯工程学院红外教研室领导和全体同志。由于作者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

白长城 张海兴 方湖宝

目 录

引 言	(1)
第一章 辐射度量学基础	(8)
1.1 常用辐射量的名称、定义和单位	(3)
1.2 朗伯余弦定律和小光源的辐射特性	(10)
1.3 点源、小面源、朗伯扩展源产生的辐照度	(18)
1.4 辐射度量中的几个基本规律	(16)
1.5 辐射通过光学系统遵守的规律	(28)
习 题	(30)
参考资料	(32)
第二章 热辐射的基本规律	(33)
2.1 基尔霍夫定律	(33)
2.2 普朗克公式	(35)
2.3 维恩位移定律	(43)
2.4 斯蒂芬-玻耳兹曼定律	(45)
2.5 黑体辐射的简算计算	(46)
2.6 辐射效率和辐射对比度	(48)
2.7 发射率和实际辐射	(51)
2.8 热辐射传输的两个问题	(55)
习 题	(70)
参考资料	(72)
第三章 红外辐射源	(73)
3.1 黑体型辐射源的理论分析	(73)
3.2 黑体型辐射源	(86)
3.3 实用红外辐射源	(88)
3.4 激光器	(90)
3.5 目标和背景的红外辐射	(100)
习 题	(115)
参考资料	(116)
第四章 红外辐射在大气中的传输	(117)
4.1 红外光谱的理论基础	(117)
4.2 地球大气的基本参数	(151)
4.3 大气的组成及其对红外辐射传输的影响	(155)
4.4 大气的吸收和散射理论	(167)
4.5 大气透射率的工程计算	(181)
4.6 大气闪烁(大气湍流)对红外辐射的影响	(201)
习 题	(202)
参考资料	(203)

第五章 红外辐射在其它介质中的传播.....	(205)
5.1 红外辐射的经典电磁理论基础.....	(205)
5.2 电磁波在膜层中的传播.....	(220)
5.3 电磁波在晶体中的传播.....	(238)
5.4 电磁波在光纤中的传播.....	(254)
习 题.....	(261)
参考资料.....	(262)
第六章 介质的吸收和光电效应.....	(263)
6.1 半导体中光的吸收过程.....	(263)
6.2 光电导效应与光生伏特效应.....	(271)
习 题.....	(276)
参考资料.....	(276)

引言

1800年英国天文学家威·赫谢耳(W·Herschel)在研究太阳光谱的热效应的时候,发现产生热效应最大的位置是在可见光谱的红端以外,从而首先发现了太阳光谱中还包含看不见的辐射能。当时他称这种辐射能为“不可见的光线”,后来人们就称它为红外线。由于人们最早对红外线的认识是从它所引起热效应开始的,而且,直到目前为止,受热物体仍是最重要、最常见的红外辐射源,所以,早期对红外线的研究,往往把它叫做热辐射。自从红外激光器和其它类型红外辐射源问世以后,再把红外辐射仅仅理解为热辐射,就不确切了。

现已周知,红外线和无线电波、可见光、X射线等一样都是电磁辐射。通常按照它们各自所占据的波长(或频率)范围排列起来形成电磁波谱。见图1,由电磁波谱明显看出:红外线就是介于可见光红端与微波之间的电磁辐射。换言之,红外线就是波长介于 $0.75\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ 之间的电磁辐射。在红外技术领域,由于不同波长的红外辐射在地球大气层中传输特性的不同,通常又把整个红外辐射分成下列几个波段,分别称为:

近红外: 波长范围 $0.75\sim 3\mu\text{m}$

中红外: 波长范围 $3\sim 6\mu\text{m}$

远红外: 波长范围 $6\sim 15\mu\text{m}$

极远红外: 波长范围 $15\sim 1000\mu\text{m}$

这种划分仅仅是为了红外技术工作的方便,采用这种划分方法,可使前三个波段中的一个波段至少包含一个大气窗口。而最后一个波段,大气对它已基本上不透明了。

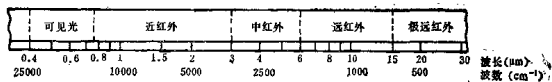
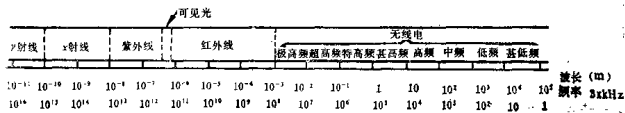


图1 电磁波谱

红外实验和理论的发展，促进了红外技术的建立。二十世纪初，科学工作者开创了红外光谱学和精密辐射学的应用；对恒星和行星的温度进行了辐射测量，并把红外光源用于医疗过程。1910年到1920年间出现了红外探测、保密通讯、防盗预警、温度遥测等设备的专利文献。第二次世界大战期间，红外探测、红外夜视等军用红外技术相继出现。第二次世界大战后，尤其是五十年代以来，半导体工艺以及激光技术的发展，为红外技术提供了高灵敏度、响应速度快的光子探测器和单色性好、能量集中的相干光源，使得红外技术得到了突飞猛进的发展。到了今天，广泛用于工业、农业、国防、医疗、交通等各方面的红外技术，已逐步形成了一个相对独立的红外系统工程领域。

随着红外技术的发展，人们越来越重视红外技术的物理学基础的研究。人们几乎用去近一个世纪的努力来认清红外辐射的本质和建立基本的辐射定律。人们用这些辐射定律来分析研究红外辐射的产生、传播及其与物质相互作用的规律。1961年国际性学术刊物《红外物理》(Infrared Physics)的创刊，就标志着红外物理成为一门独立的分支学科了。

根据我国《电子工业技术词典》对红外物理的解释，红外物理是应用物理学的方法系统地研究红外辐射的各种特殊问题(物理现象)的学科。其主要对象和任务是研究与分析红外辐射的产生、各种物体的红外辐射特性、红外辐射与物质的相互作用、红外辐射的传输及探测等有关的一些现象的机理、特性和规律。本教材就是以此为指导思想，根据激光与红外编审小组审定的编写大纲的要求编写的。共分为六章。第一章辐射度量学基础、第二章热辐射的基本规律、第三章红外辐射源。这三章主要论述了红外辐射的产生及其宏观辐射规律以及一些工程和实验室中经常遇到的红外辐射源的辐射特性。根据大纲要求，主要是以热辐射体为线索写的，至于激光器主要作为常用辐射源来对待，更深入、系统的内容可参考激光原理。后三章主要介绍了红外辐射在传输过程中的基本现象和规律，由于红外辐射在大气中的传输，对红外技术工作者是非常需要的，所以把它作为第四章奉献给读者。这一章是从工程角度介绍红外辐射在大气中衰减的规律以及低分辨率大气透射率的工程计算方法，即Lowtran法。第五章红外辐射在其它介质中的传输，第六章介质的吸收和光电效应。主要介绍辐射与物质相互作用，出现的一些物理现象及其在红外技术中的应用。显而易见，本课程的内容是红外技术的物理基础。系统地掌握这些知识，才能顺利地了解、学习并进一步深入研究，提高和改进红外工程技术。掌握本课程的内容也将会对红外技术发展的新领域，如：红外节能、等方面的研究，打好必要的理论基础。

第一章 辐射度量学基础

辐射度量学是一门度量电磁辐射能的科学技术，是红外物理与红外技术的基础。在红外物理与技术中经常遇到各种辐射量的基本概念，彼此之间的相互关系以及辐射在传输过程中各种辐射量的计算等问题。本章即从辐射量的定义和一些基本概念出发，着重讨论辐射度量学中的基本规律和辐射量的计算。这些讨论均假设辐射源是非相干的，辐射的传输可用几何光学的规律处理，若辐射在透明介质中传输，能量不被吸收。

由于历史上的原因，人们首先是对可见光的度量进行了比较充分的研究，从而引入光通量、光强、亮度、照度等光度学量来描述不同情况下人眼对光的敏感程度。这些光度学量是以人眼对可见光的刺激所产生的视觉为基础的，所以它与人眼的特性有关，受主观视觉的限制，而不是受客观的物理学描述方法的限制。因而它只能适用于电磁波谱的一个狭窄范围——可见光区。

在红外物理及红外技术中，所遇到的各种辐射量的计算和测量，显然不能用光度学量，必须用不受人们主观视觉限制而又建立在物理测量基础上的辐射度量学量。这些量可适用于整个电磁波谱范围。就名称而言，为了尽量与光度学量取得一致，我们一般在前面加上“辐射”二字。

1.1 常用辐射量的名称、定义和单位

常用的辐射量较多，其符号、名称也不尽统一。现将红外物理和红外工程中常用的辐射量名称、符号、意义、单位列于表1-1。为了将常用的辐射量与相应的光度学量加以对比，另将一些光度学量的名称、符号、意义、单位列于表1-2和表1-3。

表1-1 常用辐射量的名称、符号、定义和单位

名称	符号	定义	定义式	单位
辐射能 <i>Radiant energy</i>	Q	以电磁波的形式发射、传递或接收的能量		J
辐射能密度 <i>Radiant energy density</i>	w	辐射场单位体积中的辐射能	$w = \frac{\partial Q}{\partial V}$	J/m ³
辐射功率 <i>Radiant Power</i>	P	单位时间内发射、传输或接收的辐射能	$P = \frac{\partial Q}{\partial t}$	W
辐射通量 <i>Radiant flux</i>	Φ	单位时间内通过某面积传输的辐射能	$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$	W
辐射出射度 <i>Radiant exitance</i>	M	源单位表面向半球空间发射的辐射功率	$M = \frac{\partial P}{\partial A}$	W/m ²

续表

名称	符号	意义	定义式	单位
辐射强度 <i>Radiant intensity</i>	I	点源向某方向单位立体角发射的辐射功率	$I = \frac{\partial P}{\partial \Omega}$	W/sr
辐射亮度 <i>Radiance</i>	L	扩展源在某方向单位投影面积和单位立体角发射的辐射功率	$L = \frac{\partial^2 P}{\partial A \partial \Omega}$	W/m ² ·sr
辐射照度 <i>Irradiance</i>	E	入射到单位接收表面上的辐射功率	$E = \frac{\partial P}{\partial A}$	W/m ²
发射率 <i>Emissivity</i>	ϵ	物体发射的热辐射与同温度黑体辐射之比		无量纲其值在0~1之间
反射率 <i>Reflectivity</i>	ρ	介质的表面反射的辐射功率与入射功率之比		无量纲其值在0~1之间
吸收率 <i>Absorptivity</i>	α	介质吸收的辐射功率与入射功率之比		无量纲其值在0~1之间
透射率 <i>Transmissivity</i>	τ	透过介质的辐射功率与入射功率之比		无量纲其值在0~1之间
吸收系数 <i>Absorption coefficient</i>	a	由于纯吸收使辐射在介质内衰减到1/e时传播距离的倒数		1/m
散射系数 <i>Scattering coefficient</i>	γ	由于纯散射使辐射在介质内衰减到1/e时传播距离的倒数		1/m
消光系数 <i>Extinction coefficient</i>	K	介质的吸收系数与散射系数之和		1/m

表1-2 光度学量和单位

名称	符号	定义式	单位
光能	Q_V	$\int \Phi_V dt$	lm·s
光密度	w_V	dQ_V/dV	lm·s/m ³
光通量	Φ_V	dQ_V/dt	lm
照度	E_V	$d\Phi_V/dA$	lm/m ² =lx
光出射度	M_V	$d\Phi_V/dA$	lm/m ²
亮度	L_V	$d^2\Phi_V/dA \cdot d\Omega$	lm/m ² ·sr=nt
光强	I_V	$d\Phi_V/d\Omega$	lm/sr=cd

表1-3 光度量的几种附加单位

照 度	单 位
英尺坎德拉(fc)	lm/ft ²
勒 克 司(lx)	lm/m ²
厘米烛光(ph)	lm/cm ²
亮 度	单 位
阿 照 提(asb)	$\frac{1}{\pi}$ cd/m ²
英尺朗伯(ftL)	$\frac{1}{\pi}$ cd/ft ²
朗 伯(L)	$\frac{1}{\pi}$ cd/cm ²
尼 特(nt)	cd/m ²
照 提(sb)	cd/cm ²

一、基本辐射量

表1-1中所列的辐射量最基本的只有五个，现把这五个基本辐射量分别加以说明。

1. 辐射功率

辐射功率就是发射、传输或接收辐射能的时间速率。单位为W，又叫做辐射通量。其定义式为

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1-1)$$

因为辐射能还是波长、面积、立体角等许多因素的函数，所以P和Q的关系用Q对t的偏微商来定义。同理，下面讨论的其它辐射量，也将用偏微商来定义。

2. 辐射出射度

简称辐出度，又叫辐射通量密度。它是描述面源辐射特性的量。其定义式如下

$$M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta A} \right) = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1-2)$$

辐出度的数值就是源的单位面积向半球空间发射的辐射功率的数值。其单位是W/m²。

对于发射不均匀的源表面，辐出度应是源上位置的函数。

辐出度对源发射面积积分，就得到源发射的总功率

$$P = \int_{\text{源面积}} M dA \quad (1-3)$$

3. 辐射强度

辐射度是描述源表面辐射功率分布情况的量。如果要描述源的辐射功率在空间不同方向上的分布情况，就要引入另外两个辐射量：辐射强度和辐射亮度。辐射强度用于点辐射源（简称点源），辐射亮度用于扩展源（或称面源）。

我们先说明一下什么是点源和扩展源。真正的点源在物理学上是不存在的。实际上，辐射源是点源还是扩展源，首要的不是辐射源真实的物理尺寸，而是它相对于观测者（或探测器）所张的角度。例如，距地面遥远的一颗星，它的真实物理尺寸可能是很大的，但我们却可以把它看做是点源。同一个辐射源，在不同的场合，既可以是点源，也可以是扩展源。一般讲，只要在比辐射源本身的最大尺寸大十倍的距离上观测，而且观测装置是不带光学系统的简单探测器时，就可以把该辐射源作为点源来处理。如果观测装置使用了光学系统，则充满光学系统视场的辐射源可作为扩展源处理，而未充满视场的则算作点源。

因为在辐射强度的定义中，用到立体角的概念，所以我们在讨论辐射强度的定义前，先回忆一下立体角的定义。

如图1-1所示， ΔA 是半径为 R 的球面的一部分， ΔA 的边缘各点对球心 O 连线所包围的那部分空间叫立体角。立体角的数值为部分球面面积 ΔA 与球半径平方之比，即

$$\Omega = \Delta A / R^2$$

如部分球面面积 $\Delta A = R^2$ ，则这时的立体角叫做单位立体角，为1球面度(sr)。因为整个球面积为 $4\pi R^2$ ，所以，一个球对整个空间的立体角为 4π sr。所谓半径空间就是对应 2π 球面度的立体角。

现在我们来讨论描述点源特性的辐射量——辐射强度的定义和单位。如图1-2所

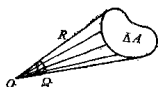


图1-1 立体角的定义

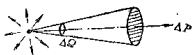


图1-2 辐射强度的定义

示，若一个点源在围绕某指定方向的小立体角 $\Delta\Omega$ 内发射的辐射功率为 ΔP ，则 ΔP 与 $\Delta\Omega$ 之比的极限，就定义为辐射源在该方向上的辐射强度

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta\Omega} \right) = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \quad (1-4)$$

辐射强度就是点源在单位立体角内发射的辐射功率。因此，它是源所发射的辐射功率在空间分布特性的描述。按定义，它的单位应该是W/sr。

辐射强度对整个发射立体角积分，结果就是源所发射的总辐射功率

$$P = \int_{\text{发射立体角}} I d\Omega \quad (1-5)$$

当 I 为常量时，即辐射功率在空间的分布是各向均匀时，则由式(1-5)得 $P = 4\pi I$ 。对于辐射功率在空间分布不均匀的辐射源，辐射强度应该与方向有关。

4. 辐射亮度

辐射强度 I 只能描述点源在空间不同方向的辐射, 这个量不能适用于扩展源。这是因为对于扩展源, 无法确定探测器对辐射源所张的立体角。为了描述扩展源的辐射功率在空间和源表面上的分布特性, 引入辐射亮度的概念, 辐射亮度又叫辐射率或面辐射强度。

如图1-3所示, 若在扩展源表面上某点 x 附近取一小的面积元 ΔA , 该面积元向半球空间发射的辐射功率为 ΔP 。如要进一步考虑, 在与面积元 ΔA 的法线夹角为 θ 的方向取一小立体角元 $\Delta\Omega$, 那么, 从 ΔA 向 $\Delta\Omega$ 内发射的辐射功率是二级小量 $\Delta(\Delta P) = \Delta^2 P$ 。由于从 ΔA 向 θ 方向发射的辐射, 就是从 θ 方向观测到的来自 ΔA 的辐射, 而在 θ 方向上看到的源面积是 ΔA 的表现面积 (即投影面积 $\Delta A_s = \Delta A \cos\theta$) 如图1-4所示。所以在 θ 方向

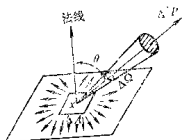


图1-3 辐射亮度的求义

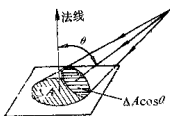


图1-4 源的表现面积

的立体角元 $\Delta\Omega$ 内发射的辐射, 就相当于从源的表现面积 ΔA_s 上发出的辐射。因此, 在 θ 方向观测到的源而上 x 点的辐射亮度就定义为 $\Delta^2 P$ 与 ΔA_s 及 $\Delta\Omega$ 比值的极限

$$L = \lim_{\substack{\Delta A_s \rightarrow 0 \\ \Delta\Omega \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta^2 P}{\Delta A_s \Delta\Omega} \right) = \frac{\partial^2 P}{\partial A_s \partial\Omega} = \frac{\partial^2 P}{\partial A \partial\Omega \cos\theta} \quad (1-6)$$

这个定义表明: 在某方向的辐射亮度, 就是扩展源在该方向上的单位表现面积向单位立体角发射的辐射功率。或者说, 辐射亮度是辐射源每单位面积上的辐射强度, 辐射亮度的单位应该是 $W/m^2 \cdot sr$ 。

一般讲, 辐射亮度的大小应该与源面上的位置 x 及方向 θ 有关。

既然辐射亮度 L 和辐射度 M 都是表征辐射功率在表面上的分布特性, 而 M 是单位面积向半球空间发射的辐射功率, L 是单位面积向特定方向上单位立体角发射的辐射功率, 所以我们可以推出两者之间的相互关系。

由式 (1-6) 可知, 源面上的小面元 dA , 在 θ 方向的小立体角 $d\Omega$ 内发射的辐射功率为

$$d^2 P = L \cos\theta \, d\Omega \, dA$$

所以, dA 向半球空间发射的辐射功率, 可以通过对立体角积分得到, 即

$$dP = \int_{\text{半球空间}} d^2 P = \left[\int_{\Omega} L \cos\theta \, d\Omega \right] dA$$

根据 M 的定义式 (1-2), 我们就得到 L 与 M 的关系式

$$M = \frac{dP}{dA} = \int_{2^{\circ}\text{球面度}} L \cos \theta \, d\Omega \quad (1-7)$$

5. 辐照度

以上讨论的各辐射量都是用来描述辐射源发射特性的量。为了描述被照表面单位面积所接收的辐射功率的分布，引入辐照度这个物理量。

如图1-5所示，辐射源投射到被照面 x 点附近的小面积 ΔA 上的辐射功率为 ΔP ，则 ΔP 与 ΔA 之比的极限，就是表面上 x 点处的辐照度

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta A} \right) = \frac{\partial P}{\partial A} \quad (1-8)$$

从上式可以看出，辐照度是投射到表面单位面积上的辐射功率。它的单位应该是 W/m^2 。这与辐出度的单位相同，但两者的物理意义完全不同。

通常所说某点的辐照度指的是在该点周围单位面积上所接收的辐射功率。

辐照度的大小与在被照面上的位置有关，而且还与辐射源的特性及被照面与源的相对位置有关。例如，有两个辐射强度 I 相同的点源 S_1 和 S_2 ，如图1-6所示，其中 S_1 在被照

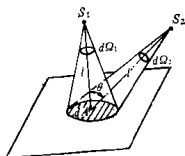


图1-5 辐照度的定义

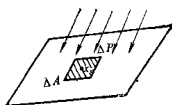


图1-6 点源的辐照度

面的法线方向， S_2 位于与法线夹角为 θ 的方向。如不考虑辐射传输过程中大气的影响，在离开源距离为 l 处的辐照度分别为

$$E_1 = \frac{dP_1}{dA} = \frac{I d\Omega_1}{dA} = \frac{I}{dA} \cdot \frac{dA}{l^2} = \frac{I}{l^2} \quad (1-9)$$

$$E_2 = \frac{dP_2}{dA} = \frac{I d\Omega_2}{dA} = \frac{I}{dA} \cdot \frac{dA \cos \theta}{l^2} = \frac{I \cos \theta}{l^2} \quad (1-10)$$

以上两式表明：点源在被照面上产生的辐照度与其辐射强度成正比，与源到被照面的距离平方成反比，并与源相对于被照面法线的方向夹角有关。

如前所述，如果源到被照面的距离超过辐射源最大尺寸的十倍，则在辐照度的计算中，就可以把该源当做点源，误差不大于1%。如果辐射源为扩展源，则在一般情况下，必须运用积分进行辐照度计算。

以上所讨论的有关辐射量之间的关系可列成表 1-4。

表1-4 有关辐射量之间的关系

	Q	P	I	M	L
Q	—	$\int Pbt$	$\int \int Id\Omega dt$	$\int \int MdAdt$	$\int \int L\cos\theta dA d\Omega dt$
P	$\frac{\partial Q}{\partial t}$	—	$\int Id\Omega$	$\int MdA$	$\int \int L\cos\theta dA d\Omega$
I	$\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial \Omega}$	$\frac{\partial P}{\partial \Omega}$	—	$\frac{\partial}{\partial A} \int MdA$	$\int L\cos\theta dA$
M	$\frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial A}$	$\frac{\partial P}{\partial A}$	$\frac{\partial}{\partial A} \int Id\Omega$	—	$\int L\cos\theta d\Omega$
L	$\frac{\partial^3 Q}{\cos\theta \partial t \partial A \partial \Omega}$	$\frac{\partial^2 P}{\cos\theta \partial A \partial \Omega}$	$\frac{\partial^2 I}{\cos\theta \partial A}$	$\frac{\partial M}{\cos\theta \partial A}$	—

二、光谱辐射量和光子辐射量

以上所讨论的五个基本辐射量，均只考虑辐射功率的几何分布特征，如在表面上的面密度和空间的角分布等，并没有明确指出这些辐射功率是在怎样的波长范围内发射的。实际上，自任何一个辐射源发出的辐射，或投射到一个表面上的辐射功率，均有一定的波长分布范围(或光谱特性)。因此，已讨论过的基本辐射量均应有相应的光谱辐射量，而且，在红外物理和红外工程中也往往要考虑这些反映光谱特性的光谱辐射量。

1. 光谱辐射量

以上所讨论过的五个基本辐射量，事实上是默认为包含了波长 λ 从0到 ∞ 的全部辐射的辐射量。因此也可以把它们叫做全辐射量。如果我们关心的是在特定波长 λ 附近的辐射特性，那么，我们就可以在指定波长 λ 处取一个小的波长间隔 $\Delta\lambda$ ，在此小波长间隔内的辐射量 X (它可以是 P 、 M 、 I 、 L 和 E)的增量 ΔX 与 $\Delta\lambda$ 之比的极限，就定义为相应的光谱辐射量，并记为

$$X_{\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta X}{\Delta\lambda} \right) = \frac{\partial X}{\partial \lambda} \quad (1-11)$$

例如，光谱辐射功率

$$P_{\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta\lambda} \right) = \frac{\partial P}{\partial \lambda}$$

它表征在波长 λ 处单位波长间隔的辐射功率，即辐射功率按波长的分布情况。

于是，其它几个光谱辐射量的定义分别是：光谱辐出度 $M_{\lambda} = \partial M / \partial \lambda$ ；光谱辐射强度 $I_{\lambda} = \partial I / \partial \lambda$ ；光谱辐射亮度 $L_{\lambda} = \partial L / \partial \lambda$ ；光谱辐照度 $E_{\lambda} = \partial E / \partial \lambda$ 。

在上述光谱辐射量的定义式中，均用 λ 角标。若一个量 X ，是波长的函数，则写作 $X(\lambda)$ 。

从光谱辐射功率的定义式可以知道，在波长 λ 处的小波长间隔 $d\lambda$ 内的辐射功率为

$$dP = P_{\lambda} d\lambda \quad (1-12)$$

只要 $d\lambda$ 足够小，此式中的 dP 就可以称为在波长 λ 处的单色辐射功率。上式从 λ_1 到 λ_2 积分，就得到在光谱带 λ_1 到 λ_2 之间的辐射功率

$$P_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} d\lambda \quad (1-13)$$

如果 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = \infty$, 则上述积分的结果就是全辐射功率

$$P = \int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda \quad (1-14)$$

上述几个量的物理意义是有区别的。光谱辐射功率 P_{λ} 是单位波长间隔的辐射功率, 单位应该是 $W/\mu m$ 。它是表征辐射功率随波长分布特性的物理量, 并非真正的辐射功率的量。单色辐射功率 dP 是指在足够小的波长间隔内的辐射功率。光谱带内的辐射功率 $P_{\Delta\lambda}$ 是指在较大的波长间隔内的辐射功率。全辐射功率 P 是指从 0 到 ∞ 的全部波长间隔内的辐射功率。 dP 、 $P_{\Delta\lambda}$ 和 P 的不同之处在于所占的波长范围不同, 而单位都是 W , 都是真正辐射功率的度量。其它各光谱辐射量、单色辐射量、波长间隔辐射量和全辐射量, 均可如此加以区别。

2. 光子辐射量

在红外技术中常用的探测器, 有很重要的一类属于光子探测器。这类探测器, 对于入射辐射的响应, 往往不是考虑入射辐射的功率, 而是考虑它每秒钟接收到的光子数目。因此, 描述这类探测器的性能和与其有关的辐射时, 通常采用每秒接收(或发射、通过)的光子数代替辐射功率来定义各辐射量。这样定义的辐射量叫做光子辐射量。例如光子辐出度 M_{λ} : 源的单位面积在单位时间内向半球空间发射的光子数。

$$M_{\lambda} = \frac{\partial^2 N}{\partial A \partial t} \quad (1-15)$$

式中, N 是光子数, A 是面积, t 是时间。它的单位是 $1/m^2 \cdot s$ 。

光谱光子辐出度 M_{λ} : 在指定波长 λ 处的单位波长间隔内的光子辐出度。单位是 $1/m^2 \cdot s \cdot \mu m$ 。

光子辐射亮度 L_{λ} : 源单位表观面积在单位时间内向 θ 方向单位立体角内发射的光子数。

$$L_{\lambda} = \frac{\partial^3 N}{\partial A \partial t \partial \Omega \cos \theta} \quad (1-16)$$

单位是 $1/m^2 \cdot s \cdot sr$ 。其余各光子辐射量和光谱光子辐射量的定义和单位可照此类推。

1.2 朗伯余弦定律和小面源的辐射特性

一、朗伯余弦定律

辐射源单位表面积向空间某方向单位立体角发射(或反射)的辐射功率, 和该方向与表面法线夹角的余弦成正比, 即

$$\Delta^2 P = B \cos \theta \Delta A \Delta \Omega \quad (1-17)$$

这个规律就称为朗伯余弦定律。式中 B 是一个与方向无关的常数。凡遵守朗伯余弦定律的辐射表面称为朗伯面, 相应的辐射源称为朗伯源或漫辐射源。

虽然朗伯定律是一个理想化的概念, 但是在实际中遇到的许多辐射源, 在一定的范围内都十分接近于朗伯余弦定律的辐射规律。例如, 第二章将讨论的黑体辐射, 就精确