

高等学校教材

红外物理与技术

徐淦卿 陈 珏 程东杰



西安电子科技大学出版社

高等学校教材

红外物理与技术

徐淦卿 陈 珏 程东杰

西安电子科技大学出版社

1989

内 容 简 介

该书共 12 章分五大部分。第一部分讨论红外物理，研究红外辐射的特性、产生、吸收以及传输的基本现象、机理和规律；第二部分介绍红外辐射在光学介质中的传输和红外光学系统；第三部分分析各种红外探测器的工作原理、特性参数并讨论相关的电子学问题；第四部分讨论典型的红外系统；第五部分讨论红外技术在工业上的基本应用。

本书取材系统，阐述透彻精练，物理概念清楚，有适量习题，各部分内容既相互联系又相对独立，便于教学和自学。适合于“光电子技术”以外各专业大学生学习，亦对从事普及和推广应用红外技术的有关科技人员有相当参考价值。

高等学校教材

红外物理与技术

徐淦卿 陈 珏 程东杰

责任编辑 夏大平

西安电子科技大学出版社出版

西安电子科技大学印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787 × 1092 1/16 印张 20 8/16 字数 489 千字

1989 年 12 月第 1 版 1989 年 12 月第 1 次印刷 印数 1-1 400

ISBN 7-5606-0094-8/TN·0037

定价：4.05 元

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制定的工科电子类专业教材 1986—1990 年编审出版规划，由电子物理与器件教材编审委员会激光教材编审小组组织征稿、评选、推荐出版的。

本教材由东南大学徐淦卿担任主编，华中理工大学石定河担任主审。

本课程的参考学时数为 60 学时，其主要内容由红外物理、红外光学、红外探测器、红外系统和红外技术的应用五个部分组成，概括了红外科学的基本内容。第一章到第四章为红外物理部分，主要讨论红外辐射度量学、红外光谱、红外辐射源和红外辐射在大气中的传输，即研究红外辐射的产生、吸收和传输的基本现象、机理和规律。红外光学部分由第五章和第六章组成，讨论红外辐射在介质中的传输和红外光学系统。红外探测器部分由第七章到第十章组成，分析各种红外探测器的工作原理、特性参数并讨论与探测器有关的电子学问题。第十一章是红外系统，介绍典型的红外系统，如热像仪、辐射计和红外光谱仪。第十二章是红外技术的应用，讨论红外技术在工业上的基本应用。各部分的内容既相互联系又相对独立，可根据学时的安排和先修课程，删去部分章节而不失全书的系统性。要全面系统地学习本教材的内容需学过高等数学、工程数学、量子物理、半导体物理、电磁场理论和电子技术等课程，但大部分内容只要学过高等数学和大学物理后就能使用。

本教材由徐淦卿编写第二、三、四、七、八和十二章，陈珏编写第一、五、六和九章，程东杰编写第十和十一章，刘国庆也编写了部分章节，全书由徐淦卿统稿。激光教材编审小组的方湖宝、刘贤德和杨宜禾委员，都为本书提出过许多宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，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。

编 者

一九八八年十月

目 录

<p>第一章 红外辐射</p> <p>§ 1.1 红外辐射的基本概念..... 1</p> <p>§ 1.2 辐射物理量和光谱辐射量..... 2</p> <p>§ 1.3 吸收比、透射比和反射比 10</p> <p>§ 1.4 基尔霍夫定律 11</p> <p>§ 1.5 黑体和普朗克公式 12</p> <p>§ 1.6 斯蒂芬-玻尔兹曼定律和维恩位移定律 18</p> <p>§ 1.7 黑体通用曲线和辐射对比度 20</p> <p>§ 1.8 黑体辐射定律的其他形式 24</p> <p>§ 1.9 发射率 25</p> <p>附录 黑体的 $F(\lambda T)$ 函数表 30</p> <p>习题一 33</p> <p>第二章 红外光谱</p> <p>§ 2.1 分子与分子光谱 34</p> <p>§ 2.2 双原子分子的振动-转动光谱 37</p> <p>§ 2.3 多原子分子的红外光谱 44</p> <p>§ 2.4 光谱线的形状和增宽 51</p> <p>习题二 54</p> <p>第三章 红外辐射源</p> <p>§ 3.1 黑体型辐射源 56</p> <p>§ 3.2 能斯特灯和硅碳棒 62</p> <p>§ 3.3 激光器原理 63</p> <p>§ 3.4 激光器 74</p> <p>习题三 80</p> <p>第四章 红外辐射在大气中的传输</p> <p>§ 4.1 大气的特性 81</p> <p>§ 4.2 大气对红外辐射的吸收 84</p> <p>§ 4.3 大气吸收理论 90</p> <p>§ 4.4 大气的散射 96</p> <p>§ 4.5 红外辐射在大气窗口区的透射比 ... 99</p> <p>附录 1 海平面水平路径上水蒸气的 光谱透射比表 102</p> <p>附录 2 海平面水平路径上二氧化碳的 光谱透射比表 104</p>	<p>习题四 107</p> <p>第五章 红外辐射在光学介质中的传输</p> <p>§ 5.1 辐射在光学介质中传输的 吸收和色散 108</p> <p>§ 5.2 辐射在两介质界面上的反射 和折射 113</p> <p>§ 5.3 辐射在光波导中的传输 116</p> <p>§ 5.4 增透膜 124</p> <p>§ 5.5 高反射膜 129</p> <p>§ 5.6 滤光片 130</p> <p>习题五 134</p> <p>第六章 红外光学系统</p> <p>§ 6.1 光学系统的近轴成像 136</p> <p>§ 6.2 透镜 143</p> <p>§ 6.3 光阑和光瞳 145</p> <p>§ 6.4 像差和衍射 149</p> <p>§ 6.5 常用红外光学系统 154</p> <p>§ 6.6 光学机械扫描 160</p> <p>§ 6.7 红外光学材料 162</p> <p>习题六 169</p> <p>第七章 红外探测器概论</p> <p>§ 7.1 红外探测器的分类 171</p> <p>§ 7.2 红外探测器的噪声 176</p> <p>§ 7.3 红外探测器的性能参数 178</p> <p>§ 7.4 红外探测器的现状 181</p> <p>习题七 182</p> <p>第八章 光子探测器</p> <p>§ 8.1 光电导效应 184</p> <p>§ 8.2 光电导探测器 189</p> <p>§ 8.3 光伏探测器 193</p> <p>§ 8.4 光子探测器的背景辐射限制 195</p> <p>§ 8.5 典型的光子探测器 199</p> <p>§ 8.6 红外电荷耦合器件 206</p> <p>附录 光子探测器的噪声 213</p> <p>习题八 222</p>
--	--

第九章 热探测器	
§ 9.1 热探测器的一般问题.....	224
§ 9.2 测辐射热电偶和热电堆.....	228
§ 9.3 电阻测辐射热器.....	235
§ 9.4 热释电探测器.....	240
习题九	247
第十章 与红外探测器有关的电子学	
§ 10.1 前置放大器	248
§ 10.2 检测微弱信号的方法	257
习题十	262
第十一章 红外系统	
§ 11.1 红外系统的基本概念	263
§ 11.2 光机扫描热成像系统	267
* § 11.3 热成像系统的性能分析	272
§ 11.4 辐射计	281
§ 11.5 红外光谱仪	286
习题十一	295
第十二章 红外技术的应用	
§ 12.1 远红外辐射加热	297
§ 12.2 红外测温	306
§ 12.3 红外无损检测	310
§ 12.4 傅里叶变换红外衰减全反射 光谱及其应用	314
习题十二	320
主要参考书	321

第一章 红外辐射

红外辐射的知识是红外物理学和红外系统工程的基础。本章着重介绍红外物理学中常用辐射量的基本概念，讨论红外辐射所遵循的基本定律以及表征物体红外辐射能力的物理量。

§ 1.1 红外辐射的基本概念

物体以电磁波或光子传递能量的过程称为辐射。物体可以因不同的原因产生电磁波而发射辐射能。由物体温度而产生的辐射称为热辐射，热辐射覆盖紫外、可见光和红外波段。图 1-1 上绘出了电磁波的波谱。在电磁波谱中 0.76 ~ 1000 μm 的区域称为红外光谱区。

各个学科由于研究和发展的需要，根据学科的特点将红外区作了不同的划分，而且在同一学科中，划分有时也不一致。

红外光谱学的研究对象是物质结构。由于多数化合物中原子化学键振动的倍频和组合频率出现在 0.76 ~ 2.5 μm 的谐振区，其基频则多出现在 2.5 ~ 25 μm 的基振区，而它们的晶格振动和分子转动相应于 25 ~ 1000 μm 的振转区，故按此把红外区划分为近红外、中红外和远红外三个区域。

光学物理在学科的发展过程中，根据测试分光技术的进程，曾把 1.5 μm 和 5.6 μm 作为界限，该学科也承认这个界限的意义正在消失。

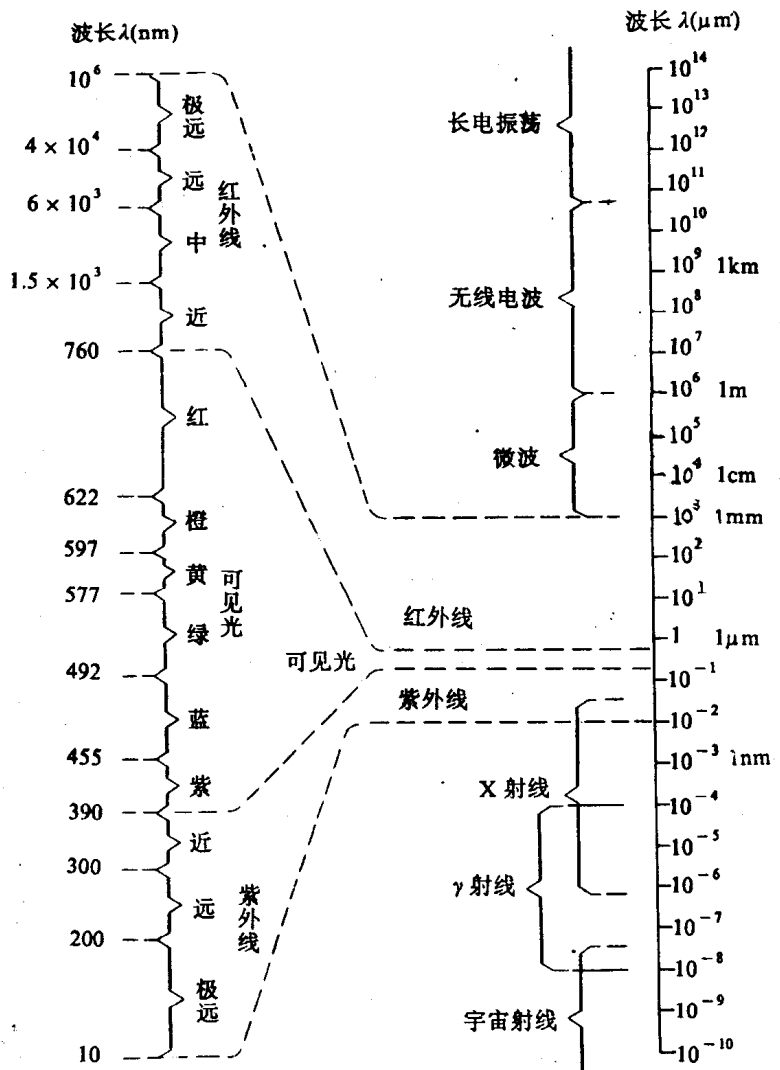


图 1-1 电磁辐射波谱

70年代发展了远红外加热技术，因为许多被加热的有机物、无机物和水吸收光谱大多在 $2.5 \sim 25 \mu\text{m}$ 范围内，因而往往把 $2.5 \mu\text{m}$ 以上的红外辐射称为远红外。

由此可见，在红外区内如何细分并无严格的界限。在图 1-1 中，把 $0.76 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 划作近红外， $1.5 \sim 6 \mu\text{m}$ 划为中红外， $6 \sim 40 \mu\text{m}$ 和 $40 \sim 1000 \mu\text{m}$ 分别称为远红外和极远红外。

虽然红外辐射是一种不可见的射线，但其本质和可见光并无差别，它具有波粒两象性。红外辐射具有诸如干涉、折射和偏振等波动性，也遵循折射和反射定律。从量子理论的观点看，红外辐射由光子输送能量，而且每个光子的能量为 $h\nu$ ，其中 h 是普朗克常数， ν 是光的频率。红外辐射在真空中以光速 c 传播。光速 c 、波长 λ 和频率 ν 三个基本量之间的关系是

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

如果辐射在折射率为 n 的介质中传播，传播速度 v 和光速 c 之间的关系为

$$v = \frac{c}{n} \quad (1-1-2)$$

在红外光谱学中，还经常使用波数 $\tilde{\nu}$ 来表征红外波谱。波数是波长的倒数，

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-1-3)$$

ν 的单位为 Hz， $\tilde{\nu}$ 的常用单位为 cm^{-1} 。

§ 1.2 辐射物理量和光谱辐射量

红外波段最常用的辐射量及其单位汇列于表 1-1 中，这些辐射量的定义是根据 GB3102·6-82 编制的。

1.2.1 辐射能和辐射通量

电磁波所传递的能量称为辐射能，用焦耳量度，以符号 W (或 Q) 表示。

辐射通量 (Φ)，又称辐射功率 (P)，是由辐射源发出的辐射能 dW 除以时间 dt 的商，即

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad (1-2-1)$$

因此，辐射通量在数值上等于单位时间内辐射源发出的辐射能，单位是瓦 (W)。

1.2.2 与辐射源有关的物理量

辐射源可分为点源和面源两类。在现实生活中，一个没有大小的几何点的点源是不存在的。在红外技术中，常把一个没有充满红外系统瞬时视场的小面源看成点源。同一个辐射源，在不同的场合，既可能被认为是点源，也可能被看作面源。假如辐射计是一个不带光学系统的探测器，则在 10 倍于辐射源最大尺寸的距离以外，都可以认为辐射源是一个

表 1-1 常用辐射量的定义及单位

名称	符号	意义	定义式	单位
辐射能	W, Q	电磁波传递的能量		焦耳(J)
辐射通量 或 辐射功率	Φ P	单位时间内传递的辐射能	$\Phi = \frac{dW}{dt}$	瓦(W)
辐射出射度	M	单位面积的辐射源向半球空间发射的辐射通量	$M = \frac{d\Phi}{dA_s}$	瓦/米 ² (W/m ²)
辐射强度	I	点源在单位立体角内发射的辐射通量	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	瓦/球面度 (W/sr)
辐射亮度	L	面源在某方向单位投影面积、单位立体角发射的辐射通量	$L = \frac{d\Phi}{dA_s \cos\theta d\Omega}$	瓦/(米 ² ·球面度) (W/(m ² ·sr))
辐照度	E	入射到单位面积的辐射通量	$E = \frac{d\Phi}{dA_s}$	瓦/米 ² (W/m ²)
光谱辐射出射度	M_λ	在特定波长上, 单位波长间隔内的辐射出射度	$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}$	瓦/(米 ² ·微米) (W/(m ² ·μm))
光谱辐射强度	I_λ	在特定波长上, 单位波长间隔内的辐射强度	$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda}$	瓦/(球面度·微米) (W/(sr·μm))
光谱辐射亮度	L_λ	在特定波长上, 单位波长间隔内的辐射亮度	$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$	瓦/(球面度米 ² 微米) (W/(sr·m ² ·μm))
光谱辐射通量	Φ_λ	在特定波长上, 单位波长间隔内的辐射通量	$\Phi_\lambda = \frac{d\Phi}{d\lambda}$	瓦/微米 (W/μm)
光谱辐照度	E_λ	在特定波长上, 单位波长间隔内的辐照度	$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$	瓦/(米 ² ·微米) (W/(m ² ·μm))

点源。如果辐射计用了光学系统，基本的判别标准是探测器尺寸和辐射源的像的尺寸之间的关系。假若像比探测器小，辐射源可看成是点源；当像比探测器大时，就认为辐射源是一个面源。

一、辐射出射度

一个平面辐射源在半球(即无限大半空间)内辐射能量，如图 1-2 所示。如果辐射源上元面积 dA_s 发射的辐射通量为 $d\phi$ ，则两者的比值

$$M = \frac{d\phi}{dA_s} \quad (1-2-2)$$

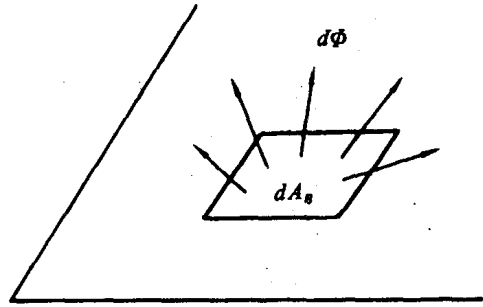


图 1-2 平面辐射源

就称为辐射出射度。在数值上，它等于单位面积的辐射通量，因此也称为辐射通量密度。

辐射源发射的辐射通量 ϕ ，可由辐射出射度对所有元面积 dA_s 积分求得，

$$\phi = \int_s M dA_s \quad (1-2-3)$$

如果辐射源的表面辐射是均匀的，那么式(1-2-3)可简化为

$$M = \frac{\phi}{A_s} \quad (1-2-4)$$

假若辐射源的表面辐射不均匀，则辐射出射度是辐射源上位置的函数。辐射出射度的单位是 W/m^2 。

二、辐射强度

辐射强度 I 是一个点源在给定的方向上离开辐射源的辐射通量与辐射所包围的立体角元 $d\Omega$ (见图 1-3) 的商，即

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (1-2-5)$$

因此，辐射强度在数值上等于单位立体角内发射的辐射通量，单位是 W/sr 。

辐射强度 I 对立体角元 $d\Omega$ 积分就可求得辐射通量 ϕ ，

$$\phi = \int_a I d\Omega \quad (1-2-6)$$

若点源是各向同性的，即其辐射强度在所有方向上都相同，那么辐射通量为

$$\phi = I\Omega \quad (1-2-7)$$

令 $\Omega = 4\pi$ ，就得到点源向各个方向发射的总辐射通量为

$$\phi = 4\pi I \quad (1-2-8)$$

对于各向异性的辐射源，其辐射强度与方向有关。

三、辐射亮度

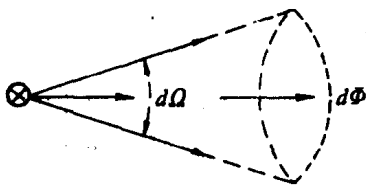


图 1-3 立体角 $d\Omega$ 内的辐射通量

辐射强度 I 只能描述点源在空间不同方向的辐射, 它不适用于面源, 因为对于面源无法确定探测器对辐射源所张的立体角。为了描述面源的辐射在空间和源表面上的分布特性, 引入了辐射亮度(也称面辐射强度)概念。确定辐射亮度所用的几何图形如图 1-4 所示。

辐射亮度 L 的定义是, 在给定方向上离开或通过面积元 dA_s 的辐射强度除以该面积元在该给定方向上的投影 $dA_s \cos\theta$, 即

$$L = \frac{dI}{dA_s \cos\theta} \quad (1-2-9)$$

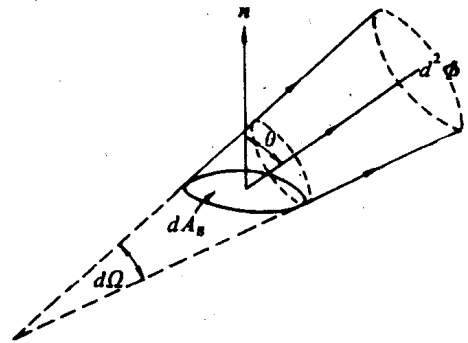


图 1-4 辐射亮度的确定

式中 θ 是辐射方向和表面法线的夹角。

辐射源上面积元 dA_s 在与元面积法线成 θ 角的方向上, 在一个很小的立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐射通量是一个二阶微小量 $d^2\Phi$ 。根据上述定义, 有

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_s \cos\theta d\Omega} \quad (1-2-10)$$

辐射亮度 L 在数值上等于单位表观面积、单位立体角内发射的辐射通量, 其单位是 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。假若辐射源的辐射亮度是常数, 与方向无关, 则该辐射源在立体角 $d\Omega$ 内发射的辐射通量随方向角 θ 的余弦变化, 这样的辐射体称为朗伯辐射体。真正的漫反射体是朗伯辐射体。

比较式(1-2-5)和式(1-2-10)可以看到, 辐射亮度就是辐射源沿法线方向的单位面积上的辐射强度。

辐射亮度与辐射出射度的概念密切相关, 为了确定两者的关系, 我们来求面积元 dA_s 在各个方向上发射的辐射通量。

面积元 dA_s 在有限立体角 Ω 内发射的辐射通量是

$$d\Phi = \int_{\Omega} L dA_s \cos\theta d\Omega \quad (1-2-11)$$

若辐射源是朗伯辐射体, 则

$$d\Phi = L dA_s \int_{\Omega} \cos\theta d\Omega \quad (1-2-12)$$

计算面积元在 2π 立体角内发射的辐射通量, 就可以求得朗伯辐射体的辐射亮度和辐射出射度的关系。

在用球坐标表示的图 1-5 中, 立体角元 $d\Omega$ 为

$$\begin{aligned} d\Omega &= \frac{rd\theta \cdot r\sin\theta d\phi}{r^2} \\ &= \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (1-2-13)$$

把它代入式(1-2-12), 并在 $\Omega=2\pi$ 的立体角内积分, 就得到 dA_s 在半球平面内发射的辐射通量

$$\begin{aligned} d\Phi &= L dA_s \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \\ &= \pi L dA_s \end{aligned} \quad (1-2-14)$$

比较式(1-2-14)和式(1-2-2), 可得如下关系:

$$M = \pi L$$

或

$$L = \frac{M}{\pi} \quad (1-2-15)$$

上式表明, 朗伯辐射体的辐射亮度在数值上等于辐射出射度的 $1/\pi$ 。

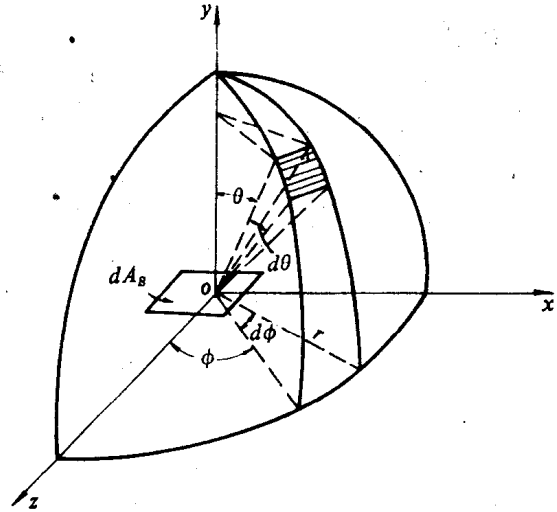


图 1-5 确定平面辐射源辐射通量的图形

1.2.3 与被辐照物体有关的物理量

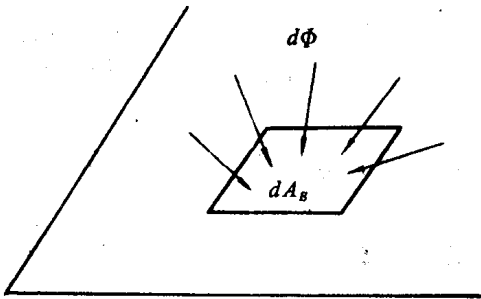


图 1-6 入射到 dA_s 上的辐射通量

辐照度是描述物体被辐照情况的物理量。如果像图 1-6 所示那样, 入射到面积元 dA_s 上的辐射通量是 $d\Phi$, 那么该物体的辐照度 E 为

$$E = \frac{d\Phi}{dA_s} \quad (1-2-16)$$

辐照度在数值上等于被辐照物体在单位面积上所接收到的辐射通量, 单位是 W/m^2 。

比较式(1-2-2)和式(1-2-16)可以看到, 辐射出射度和辐照度的表达式相同, 其区别在于辐射出射度表达式中的 $d\Phi$ 是指 dA_s 面上发射的辐射通量, 而在辐照度表达式中, $d\Phi$ 是指 dA_s 面所接收到的辐射通量。

1.2.4 光谱辐射量

上面讨论了几个基本的辐射量, 在分析这些辐射量时, 仅考虑辐射通量在空间分布的特性, 并没有明确这些辐射通量在什么波长范围。事实上, 任何一个辐射源发出的辐射, 或投射到一个表面的辐射, 都有一定的波长范围。因此, 前面所讨论的辐射量都有相应的光谱辐射量。在红外物理和红外系统中都要考虑反映光谱特性的光谱辐射量。

如果我们所关心的是某一特定波长 λ 附近的辐射特性, 那么可以在波长 λ 附近取一个小的波长间隔 $\Delta\lambda$, 在这小波长范围内的辐射量 R (泛指 Φ 、 I 、 M 、 L 和 E) 的增量与 $\Delta\lambda$ 之比的极限, 就定义为这些辐射量的光谱辐射量。

例如光谱辐射量 Φ_λ , 指的是在一定波长上, 每单位波长间隔内的辐射通量, 下标 λ

表示相应的波长,

$$\phi_{\lambda} = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (1-2-17)$$

按照这种方法,也可以定义出其他光谱辐射量。

为了确定波长 λ_1 和 λ_2 之间的辐射通量,可以对式(1-2-17)进行积分,即

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{\lambda} d\lambda \quad (1-2-18)$$

如果积分限从零到无限大,那么就得到 $0 \rightarrow \infty$ 全部波长范围内的总辐射通量。

1.2.5 辐射量计算举例

一、辐射强度为 I 的点源所产生的辐照度

如图 1-7 所示,点源 O 的辐射强度为 I ,在离其距离为 r 处有一面积元 dA_S ,求点源在面积元 dA_S 上所产生的辐照度。

设辐射源 O 到面积元 dA_S 中心所引的径向量 r 与该面的法线成 θ 角,从点源看面积元 dA_S 所张的立体角为 $d\Omega$,则根据辐射强度的定义,

$$d\Phi = Id\Omega$$

因为

$$d\Omega = \frac{dA_S \cos\theta}{r^2}$$

所以

$$d\Phi = \frac{IdA_S \cos\theta}{r^2} \quad (1-2-19)$$

$$E = \frac{d\Phi}{dA_S} = \frac{I \cos\theta}{r^2} \quad (1-2-20)$$

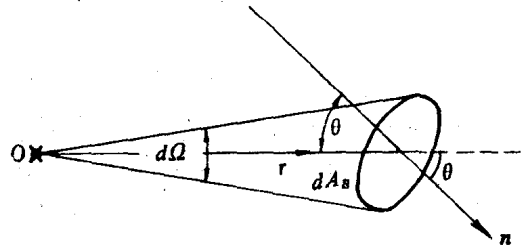


图 1-7 点源产生的辐照度的计算

由此可见,点辐射源在被辐照面积上所产生的辐照度与该点源的辐射强度成正比,与离点源的距离的平方成反比。此外,辐照度随入射角而变,入射线愈倾斜,所产生的辐照度愈小。

二、辐射亮度为 L 的面积元 dA_S 在相距 r 处面积元 dA'_S 上所产生的的辐照度

设辐射源上面积元 dA_S 的法线 n 和被辐照面积元 dA'_S 的法线 n' 分别与 r 方向成 θ 和 θ' 角,如图 1-8 所示。射在被辐射面积元 dA'_S 上的辐射通量,是辐射源上面积元 dA_S 在立体角 $d\Omega$ (从源面积元 dA_S 处看面积元 dA'_S 所张的立体角)的范围内所发射的辐射通量。

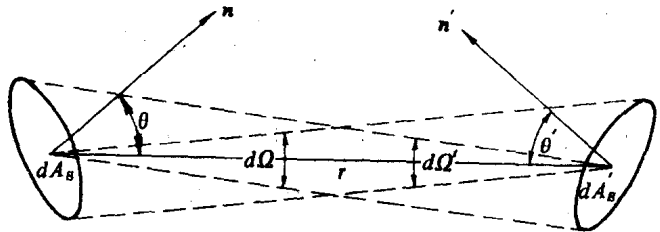


图 1-8 已知辐射源辐射亮度,求被辐照面积上的辐照度

$$d\Phi = L dA_s \cos\theta d\Omega$$

因为

$$d\Omega = \frac{dA'_s \cos\theta'}{r^2}$$

所以

$$\begin{aligned} d\Phi &= \frac{L dA_s \cos\theta dA'_s \cos\theta'}{r^2} \\ &= L dA'_s \cos\theta' d\Omega' \end{aligned}$$

其中

$$d\Omega' = \frac{dA_s \cos\theta}{r^2}$$

是从面积元 dA'_s 看源上面积元 dA_s 所张的立体角。因此， dA'_s 上的辐照度为

$$E = \frac{d\Phi}{dA'_s} = L \cos\theta' d\Omega' \quad (1-2-21)$$

可见，源面积元在某一面积上所产生的辐照度，与辐射源的辐射亮度、被辐照面积元对辐射源所张的立体角以及入射辐射和被照面积元法线夹角的余弦成正比。

必须注意，此式只有在源面积元的线度比 r 小得多的时候才适用。

三、均匀大面积朗伯辐射源所产生的辐照度

设有一大面积的圆盘形辐射体，其面积为 A_s ，半径为 a_0 (见图 1-9)，是个辐射亮度为 L 的朗伯辐射体 (例如天空背景)。被照面积元 dA'_s 与大圆盘中心的垂直距离为 x 。圆盘上任一面积元 dA_s 到被照面积元 dA'_s 的距离是 l ， l 与 dA_s 的法线 n 的夹角为 θ 。假设辐射体与被照面积正对，即 A_s 面与 dA'_s 面平行，这样， l 与 dA'_s 的法线 n' 的夹角也是 θ 。

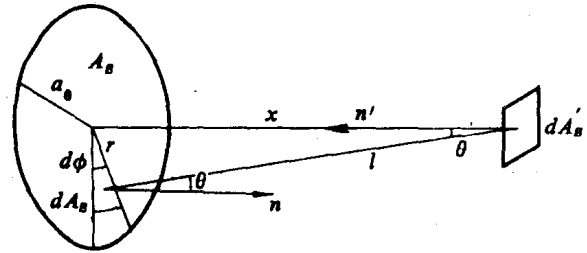


图 1-9 大面积朗伯辐射源所产生的辐照度

源面积元 dA_s 的大小为

$$dA_s = r dr d\phi$$

从源面积元 dA_s 看被照面积元 dA'_s 所张的立体角为

$$d\Omega = \frac{dA'_s \cos\theta}{l^2}$$

根据式(1-2-21)，由面积元 dA_s 发出并为 dA'_s 所接收的辐射通量为

$$\begin{aligned} d\Phi &= L dA_s \cos\theta d\Omega \\ &= L r dr d\phi \frac{dA'_s \cos\theta}{l^2} \cos\theta \end{aligned}$$

因此，整个圆盘发出并为 dA'_s 所接收的辐射通量为

$$\begin{aligned} d\Phi &= \int_0^{2\pi} \int_0^{a_0} L \frac{dA'_s \cos^2 \theta}{l^2} r dr d\phi \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{a_0} L dA'_s \frac{x^2}{(r^2 + x^2)^2} r dr d\phi \\ &= 2\pi L dA'_s x^2 \int_0^{a_0} \frac{r dr}{(x^2 + r^2)^2} \end{aligned}$$

其中

$$l^2 = x^2 + r^2, \quad \cos \theta = \frac{x}{l}$$

令 $y = r^2$ ，则有

$$\begin{aligned} d\Phi &= 2\pi L dA'_s x^2 \int_0^{a_0^2} \frac{1}{2} \frac{dy}{(x^2 + y)^2} \\ &= \pi L dA'_s x^2 \frac{a_0^2}{x^2(x^2 + a_0^2)} \\ &= \pi L dA'_s \frac{a_0^2}{x^2 + a_0^2} \end{aligned} \quad (1-2-22)$$

按照定义，大圆盘在 dA'_s 上产生的辐照度为

$$\begin{aligned} E &= \frac{d\Phi}{dA_s} = \pi L \frac{a_0^2}{x^2 + a_0^2} \\ &= M \frac{a_0^2}{x^2 + a_0^2} \end{aligned} \quad (1-2-23)$$

若圆盘无限大，即 $a_0 \rightarrow \infty$ ，则 $E \rightarrow M$ 。

因此，一个大面积的辐射源在被照物体表面产生的辐照度与该面辐射源的辐射出射度相等。

四、点源向圆盘发射的辐射通量

设半径为 R 的圆盘的中心与辐射强度为 I 的点源相距 l_0 ，如图 1-10 所示，计算该点源发射到圆盘上的辐射通量。

根据式(1-2-19)可得自点源 O 向圆盘上面积元 dA_s 上发射的辐射通量为

$$d\Phi = E dA_s = \frac{I \cos \theta dA_s}{l^2}$$

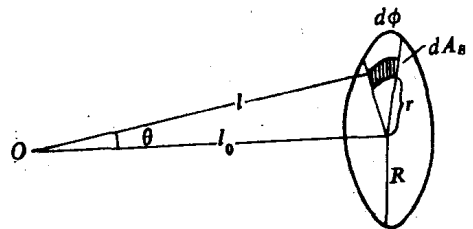


图 1-10 点源向圆盘发射的辐射通量

由图 1-10 可见,

$$\cos\theta = \frac{l_0}{(r^2 + l_0^2)^{1/2}}, \quad dA_s = r dr d\phi$$

把上述关系代入, 得

$$d\Phi = \frac{I l_0}{(r^2 + l_0^2)^{3/2}} r dr d\phi$$

对 dr 和 $d\phi$ 积分就可求得圆盘接收的辐射通量为

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{I l_0}{(r^2 + l_0^2)^{3/2}} r dr d\phi \\ &= 2\pi I \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{l_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \end{aligned} \quad (1-2-24)$$

§ 1.3 吸收比、透射比和反射比

当辐射投射到物体表面上时会发生吸收、反射和透射现象。

如图 1-11 所示, 假设外界投射到物体表面的辐射功率为 P_0 , 其中一部分 P_a 在进入表面后被吸收; 另一部分 P_p 被物体反射; 其余的部分 P_t 透过物体。于是, 根据能量守恒定律有

$$P_0 = P_a + P_p + P_t$$

或

$$\frac{P_a}{P_0} + \frac{P_p}{P_0} + \frac{P_t}{P_0} = 1 \quad (1-3-1)$$

其中各个能量比 P_a/P_0 、 P_p/P_0 和 P_t/P_0 分别称为吸收比、反射比和透射比, 并依次用符号 α 、 ρ 和 τ 表示。因此, 上式也可改写成

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1-3-2)$$

对于不透红外的材料, 透射比 $\tau = 0$ 。这时式(1-3-2)就简化为

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1-3-3)$$

由此可见, 吸收能力强的物体其反射本领就弱; 反之, 反射本领高的物体其吸收能力就低。

红外辐射投射到物体表面上所产生的反射现象和可见光一样, 有镜面反射和漫反射之分, 它取决于表面不平整尺寸的大小, 即表面的粗糙程度。这里所指的粗糙程度是相对于红外辐射的波长而言的。当表面不平整尺寸小于入射辐射的波长时, 形成镜面反射, 这时反射角等于入射角, 见图 1-12(a)。高度磨光的金属板就是镜面反射的实例。当表面的

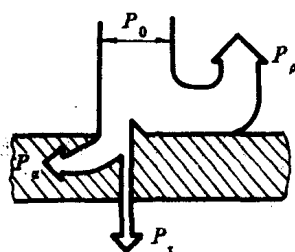


图 1-11 辐射在物体表面上的吸收、反射和透射