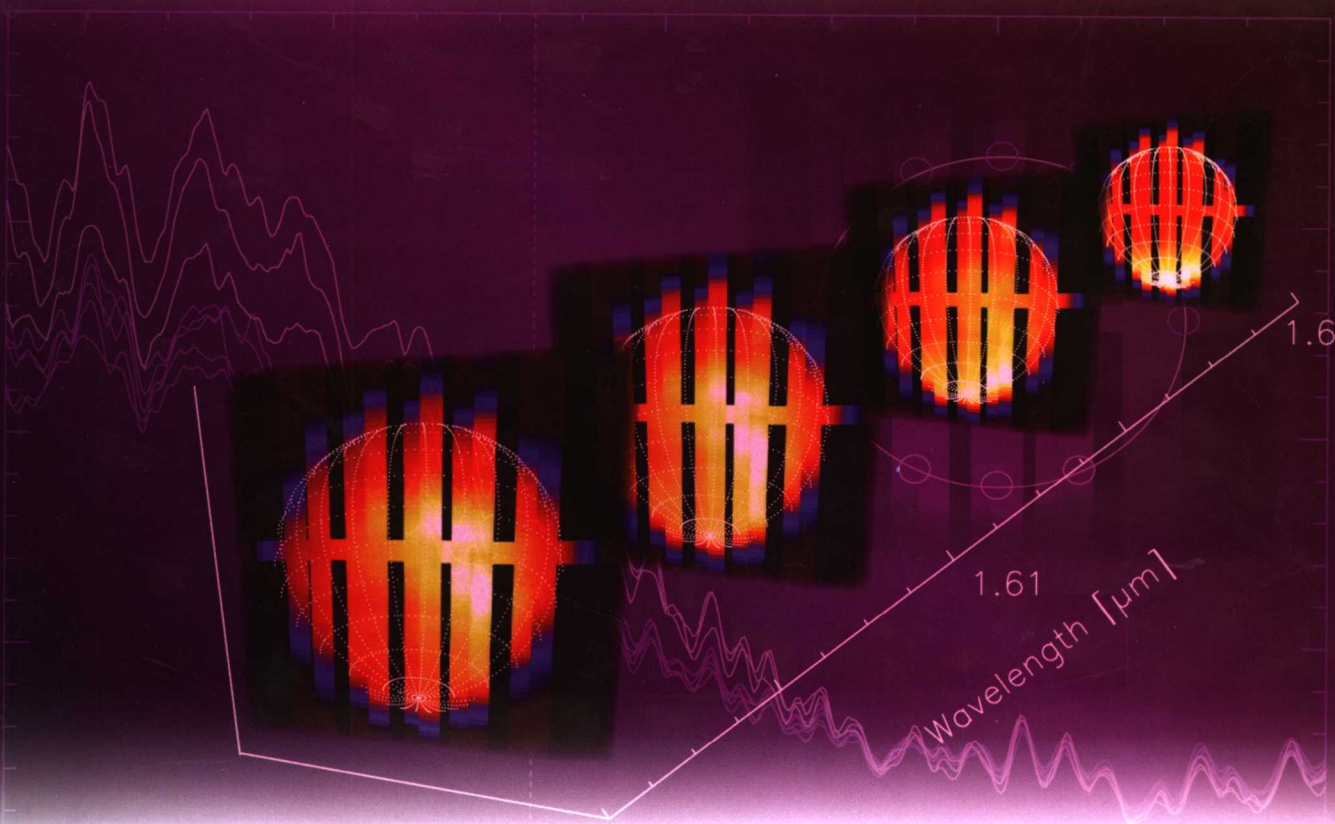


兵工十五规划教材

红外物理

HONGWAIWULI

石晓光 王 蓓 叶 文 编



兵器工业出版社

兵工十五规划教材

红 外 物 理

石晓光 王 蓊 叶 文 编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书是红外技术系列教材之一。书中主要介绍了红外技术的基本概念、红外技术的发展与应用及红外技术专业课程的基本内容；光度学与辐射度学的基本知识；红外技术中涉及到的辐射量及其计算；热辐射的基本定律、红外辐射的简易计算及红外测温的基本理论；黑体型和其他红外辐射源的基本特性和应用；红外辐射在大气中传输的规律及大气透过率的简单计算，以及红外辐射测量仪器的基本原理及测量方法等内容。

本书系高等学校教材，也适合有关专业科研、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

红外物理/石晓光,王蓟,叶文编. —北京:兵器工业出版社, 2005. 8

ISBN 7-80172-533-6

I. 红... II. ①石... ②王... ③叶... III. 红外辐射—高等学校—教材 IV. 0434.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 098060 号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010-68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市登峰印刷厂
版 次: 2006 年 7 月第 1 版第 2 次印刷
印 数: 2351—4350

责任编辑: 莫丽珠
封面设计: 李 晖
责任校对: 郭 芳
责任印制: 赵春云
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 7.25
字 数: 178 千字
定 价: 12.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

红外技术作为一种现代高科技技术，与激光技术并驾齐驱，涉及到军事战术或战略的情报搜集、目标的侦察监视、武器制导等各个领域，对未来战争产生重大的影响。在工业、医学和科研等许多方面也广为使用。

红外物理课程是红外技术的理论基础，全书共分为六章。

第一章介绍了红外技术的基本概念、红外技术的发展与现状及红外技术专业课程的主要内容等。第二章是光度学与辐射度学的基本知识，主要介绍了红外技术中涉及到的辐射量及其计算等。第三章讲述了热辐射的基本定律、红外辐射的简易计算及红外测温的基本理论。第四章介绍了黑体型和其他红外辐射源的基本特性和应用。第五章叙述了红外辐射在大气中传输的规律及大气透过率的简单计算。第六章介绍了红外辐射测量仪器的基本原理及测量方法等内容。

本教材的参考学时为 32 ~ 48 学时。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 红外技术的基本概念	(1)
1.1.1 红外辐射	(1)
1.1.2 红外辐射波段的划分	(1)
1.1.3 红外技术的研究内容	(2)
1.2 红外技术的发展与应用	(2)
1.2.1 红外技术的发展概况	(2)
1.2.2 红外技术在军事上的应用	(3)
1.2.3 红外技术在国民经济方面的应用	(4)
1.3 红外技术专业课程的基本内容	(5)
1.3.1 红外系统的组成	(5)
1.3.2 红外系统专业课程	(5)
第二章 光度学与辐射度学基础	(6)
2.1 引言	(6)
2.2 描述辐射场的基本物理量	(6)
2.2.1 立体角	(6)
2.2.2 辐射量	(8)
2.3 光谱辐射量与光子辐射量	(11)
2.3.1 光谱辐射量	(11)
2.3.2 光子辐射量	(12)
2.4 光度量	(13)
2.4.1 光谱光视效能和光谱光视效率	(13)
2.4.2 光度量	(16)
2.5 朗伯余弦定律和漫辐射源的辐射特性	(19)
2.5.1 漫辐射源	(19)
2.5.2 漫辐射源的辐射特性	(20)
2.6 辐射量的基本规律及计算	(21)
2.6.1 距离平方反比定律	(21)
2.6.2 立体角投影定律	(22)
2.6.3 组合定律	(22)
2.6.4 塔尔伯特 (Talbot) 定律	(22)
2.7 辐射的反射、吸收和透射	(23)
2.7.1 反射比、吸收比和透射比	(23)
2.7.2 朗伯定律和朗伯一比耳定律	(24)

2.8	辐射量的计算举例	(28)
第三章	热辐射的基本规律	(33)
3.1	发光种类的介绍	(33)
3.2	基尔霍夫定律	(33)
3.3	黑体及其辐射定律	(35)
3.3.1	黑体	(35)
3.3.2	普朗克公式	(36)
3.3.3	维恩位移定律	(37)
3.3.4	斯忒藩—玻耳兹曼定律	(38)
3.4	黑体辐射的简易计算	(38)
3.4.1	黑体辐射函数	(39)
3.4.2	计算举例	(42)
3.5	发射率和实际物体的辐射	(43)
3.6	辐射对比度和辐射测温	(47)
3.6.1	辐射对比度	(47)
3.6.2	辐射测温	(48)
第四章	红外辐射源	(51)
4.1	黑体型辐射源	(51)
4.1.1	空腔辐射理论	(51)
4.1.2	黑体辐射源	(51)
4.2	其他红外辐射源	(54)
4.2.1	电热固体辐射源	(54)
4.2.2	气体放电辐射源	(56)
4.2.3	红外激光器	(59)
第五章	红外辐射在大气中的传输	(62)
5.1	地球大气的基本组成和气象条件	(63)
5.2	大气中的主要吸收气体和主要散射粒子	(65)
5.3	大气的吸收衰减	(70)
5.4	大气的散射衰减	(78)
5.5	大气透射率的计算举例	(81)
5.6	大气红外辐射传输计算软件介绍	(82)
第六章	红外辐射测量仪器及基本参数测量	(83)
6.1	红外辐射测量仪器	(83)
6.2	基本辐射量的测量	(91)
6.3	红外发射率测量	(95)
6.4	红外反射比测量	(101)
6.5	红外吸收比和透射比测量	(107)
参考文献	(109)

第一章 绪 论

1.1 红外技术的基本概念

红外技术是研究红外波段内电磁波的特性、变化规律及其应用的一门现代技术。

众所周知，从波长很长的无线电波到波长很短的宇宙射线都是不同波长的电磁波，或称为电磁辐射。一切物质都不停地发射和吸收电磁辐射。电磁波谱（见图 1-1）上的每一段都具有其独特的规律，每一段都是一个研究领域，都有其特性和规律。研究并加以应用，造福于人类，是每个学科的宗旨。红外技术则是研究红外辐射的产生、传播、转化等过程的应用技术。

频率 ν 和波长 λ 的关系为 $\lambda\nu = c$ （光速），

例如 $0.55 \mu\text{m}$ 波长对应的频率是 $5.4 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 。也有用波数 σ 表示波长的， $\sigma = 1/\lambda$ (cm^{-1})，这种表示方法在光谱仪器中常用，例如 $2.5 \mu\text{m}$ 波长对应的波数是 4000 cm^{-1} 。

1.1.1 红外辐射

红外辐射是人眼看不见的光线，通常人们又把红外辐射称为红外光、红外线，是指波长约在 $0.75 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的电磁波，是英国科学家赫歇尔（Herschel）在 1800 年发现的。绝对零度以上的物体都在不停地向外辐射一定波长的电磁波，维恩（Wien）位移定律 $\lambda T = b$ 能够很好地说明这一问题，式中 T 是绝对温度， b 是常数 ($2989 \mu\text{m} \cdot \text{K}$)。只要绝对温度 T 不等于零，就存在辐射且其峰值波长为 λ ，那么自然界中温度从零下几十 K 的物体直到约 6000 K 的太阳，辐射的波长在可见光到远红外之间，而大部分物体的辐射都在红外波段。

1.1.2 红外辐射波段的划分

红外辐射波段的划分根据不同的研究领域划分方法不同。在红外技术领域，红外辐射波段的划分如表 1-1 所示。

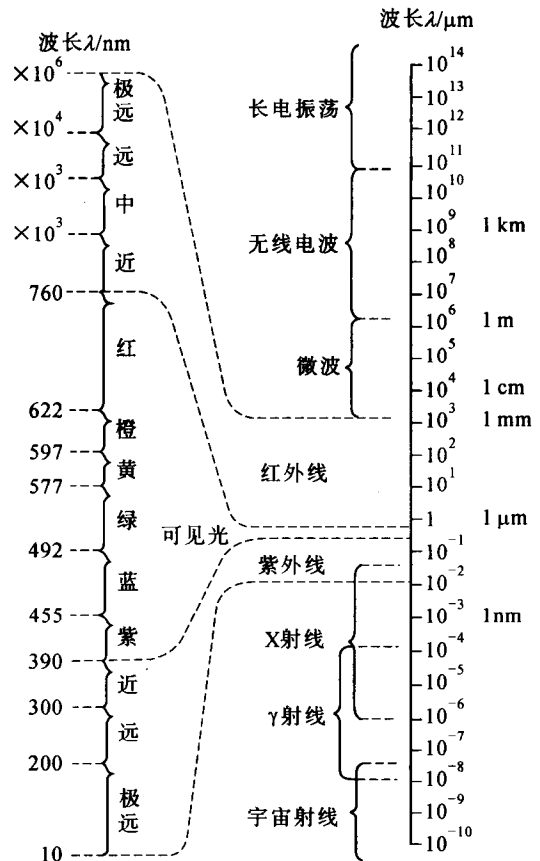


图 1-1 电磁波谱

表 1-1 红外辐射波段的划分

波段	近红外	中红外	远红外	极远红外
波长/ μm	0.75 ~ 0.3	3 ~ 6	6 ~ 15	15 ~ 1 000

不同的研究领域、不同文献对红外辐射波段的划分方法不同，各有各的道理，不十分严格。上述划分方法是在前三个波段中，每一个波段都至少包含一个大气窗口。所谓大气窗口，是指大气中能够透过红外辐射的波段，除这些窗口之外，红外辐射在大气中基本上不能传播或传播距离很近。

在光谱学中，根据红外辐射产生的机理将其划分成三个区域，它们各对应着分子跃迁的不同状态。近红外区是 0.75 ~ 2.5 μm ，对应原子能级之间的跃迁和分子振动泛频区的振动光谱带；中红外区是 2.5 ~ 25 μm ，对应分子转动能级和振动能级之间的跃迁；远红外区是 25 ~ 1 000 μm ，对应分子转动能级之间的跃迁。

1.1.3 红外技术的研究内容

红外技术的主要研究内容包含以下几个方面：

(1) 红外辐射的性质。其中有物体所发射的辐射在光谱、强度和方向的分布；辐射在媒质中的传播特性——反射、折射、衍射和散射；热电效应和光电效应等。

(2) 红外元器件、部件的研制。包括红外探测器、辐射源、微型制冷器、红外光学材料和滤光片等。

(3) 用各种红外元器件、部件构成完整的应用系统。

(4) 红外技术在军事上和国民经济中的应用。

由此可见，红外技术的研究涉及的范围相当广泛，既有目标的红外辐射特性，背景特性，又有红外元、部件及系统；既有材料问题，又有应用问题。

红外技术的相关技术是探测技术、精确制导技术、光电子技术和先进材料技术，红外技术发展的技术难点关键在于红外材料的研制、红外设备的致冷、红外设备向更长波段发展、红外焦平面阵列器件的研制和红外设备与数据处理设备的结合等。

1.2 红外技术的发展与应用

1.2.1 红外技术的发展概况

自从 1800 年英国天文学家 F. W. 赫歇尔发现红外辐射至今，红外技术的发展经历了两个世纪。但其发展比较缓慢，直到 1940 年前后德国才真正出现现代的红外技术。当时，研制成硫化铅和几种红外透射材料，利用这些元、部件制成一些军用红外系统。此后，各国竞相发展。特别是美国，大力研究红外技术在军事方面的应用。目前，美国将红外技术应用于单兵装备、装甲车辆、航空和航天的侦察监视、预警、跟踪以及武器制导等各个领域。

从 20 世纪 60 年代中叶起，红外探测器和系统的发展体现了红外技术的现状及发展方向。目前先进的红外焦平面阵列技术正处在从第二代向第三代更为先进的阵列技术发展的转变时期。世界各国正在加紧确定第三代红外焦平面阵列技术的概念，各有关公司和厂家机构

的注意力已转向第三代红外焦平面阵列传感器的发展。第三代红外焦平面阵列技术的特征是：① 焦平面上探测器像元的集成度进一步提高，至少双色工作；② 高的工作温度，以实现低功耗和小型轻量化的系统应用；③ 非制冷工作红外焦平面阵列传感器的性能达到或接近目前第二代制冷工作红外焦平面阵列传感器的水平；④ 极低成本微型传感器，甚至是一次性应用的传感器。最终的第三代红外焦平面阵列将是极低成本微型传感器，它将占领整个红外市场，其未来的应用将是无人操作的一次性应用传感器，如微型无人驾驶航空飞行器，头盔安装式红外摄像机和微型机器人等。红外热成像技术已从当初的机械扫描机构发展到了目前的固体小型化全电子自扫描凝视摄像，特别是非制冷技术的发展使红外热摄像技术从长期的主要军事目的扩展到诸如工业监控测温、执法缉毒、安全防范、医疗卫生、遥感、设备先期性故障诊断与维护、海上救援、天文探测，以及车辆、飞行器和舰船的驾驶员夜视增强观察仪等广阔的民用领域。

1.2.2 红外技术在军事上的应用

红外技术在军事方面的应用非常广泛。自然界中，任何物体都在向外辐射红外线，物体的温度越高，其辐射红外线的强度也越大。根据各类目标和背景辐射温度特性的差异，就可以利用红外技术（在白天和黑夜）对目标进行探测、跟踪和识别，以获取目标信息。在现代战争中，获取战场信息的优势已经成为掌握战争主动权的关键，红外技术是获取战场信息的关键技术之一。因此，许多国家均投入很大的人力和物力去研究红外技术，并将其广泛地应用于军事领域，并产生巨大影响。

一切军事目标，如海洋中的舰船、地面部队行动及各种装备、空中的飞机、导弹，都散发热量，发出大量的红外辐射。利用红外技术装备，就可以从空中和空间对这些目标进行侦察、监视与跟踪。如侦察卫星依靠红外成像设备和多光谱仪可以白天黑夜地获取大量的军事情报。装有红外探测器的导弹预警卫星从 20 世纪 70 年代以来，一直监视着世界各国的弹道导弹发射，为国家及军事指挥部门提供警报，如目前美国国防支援计划中的预警卫星在几十秒钟内，就可以鉴别来袭导弹的发射和方向。据说将来美国的天基红外系统可在 20 s 内，提供有关导弹发射和方向方面的精确信息，为拦截来袭导弹提供宝贵的预警时间。对于贴近海面飞行的低仰角导弹和飞机，红外技术装备比微波雷达能更有效地进行侦察、监视与追踪。

(1) 红外制导

红外制导是利用目标自身的红外辐射来引导导弹和其他武器装备自动接近目标，以提高命中率。空空、空地、地空和反坦克导弹等都有采用红外制导技术的。红外焦平面阵列制导技术还具有识别各类诱饵的能力，从而使武器对目标有更高的命中率。1999 年 3 月，北约国家在对南联盟的轰炸中使用的 11 种精确制导武器中，有近半数采用了红外技术制导。

(2) 红外通信

在发射端，用红外辐射的平行光束作载波，其强度受发送信息调制。在接收端收到这束红外辐射时，就可从强度变化获得所需信息。与微波通信相比，红外通信具有更好的方向性，适于国防边界哨所与哨所间的保密通信。

(3) 军用夜视仪

这类仪器在飞机昼夜飞行、导航、搜索、目标捕获；武器制导和瞄准；车辆驾驶；夜间战场侦察与观测；夜间对目标进行精确定位、跟踪与射击；高炮防空系统抗电子干扰等方面

都将发挥重要作用。

(4) 探测隐身武器装备

隐身武器装备虽然采取了红外隐身技术，但其温度总比背景温度要高，仍有可能被红外探测器探测到。将红外成像设备安装在空间平台上，可精确提供目标的角位置信息，探测距离可达数百千米。

(5) 红外预警

将红外探测器安装在舰艇和飞机等平台上，可用以对来袭导弹和其他红外威胁进行告警，或自动发出对抗指令、启动红外干扰设备进行自卫。红外预警有优越性，不易被发现。而无线电雷达却易被攻击。

红外对抗是消除目标与背景之间红外辐射的差别，使敌方红外探测设备失灵，达到保护目标作用的手段。例如，红外干扰机是模拟被保护目标的红外辐射并加以调制，使敌方导弹的制导系统产生误差，攻击不到目标；红外诱饵是利用不同的材料燃烧时发出的红外辐射特性不同的原理，制作成红外曳光弹、热气球及喷射燃油等，制造假象，引诱敌红外制导的导弹偏离目标，保护自己；红外烟幕利用光被吸收或散射的原理，主要干扰热成像系统，对可见光、电视、激光等瞄准器材都有很大阻碍作用；红外隐身则是用各种方法改变目标的红外辐射特性，使红外仪器观测不到，例如使用特殊涂料或不利于反射的外表形状进行隐身。

1.2.3 红外技术在国民经济方面的应用

红外技术在国民经济方面的应用也越来越广泛，主要体现在以下几个方面：

(1) 红外测温技术：它是利用红外探测器接收被测物体的热辐射原理工作的非接触测温方法，有很多优越性，可测量不易接触的高温、移动、化学、危险等物品的温度。

(2) 红外遥控技术：这是早已成熟的技术。其使用一个红外发射源，通常是红外发光二极管，发射编码信号，被红外接收器收到后经过解码得到指令，从而控制各种动作，抗干扰能力强。

(3) 红外遥感技术：红外遥感技术是红外物理与技术研究和应用进展的重要标志。利用飞机、卫星等运载工具把红外传感器带到空中，接收和记录地面各种物体发射和反射的辐射信号，并将这些信息进行图像处理和分析判断，以达到探测地球和环境的目的。它在军事、农业、地质、测绘、海洋、气象等很多方面都有广泛的应用。红外遥感由于具有保密性好、抗干扰本领强、能昼夜连续工作等优点，因此首先在空中军事侦察中占有十分重要的位置。同时在气象，土地资源管理，自然灾害、环境污染分析等方面也得到广泛的应用，并取得了令世人瞩目的成果。红外光学遥感器是空间光学遥感器中研制难度最大、用途最广的。它集合了光学、精密机械、空间致冷、温度控制、探测器和系统控制等多种领域的技术成果，体现着一个国家的综合科技实力。

(4) 红外医疗技术：医用红外技术是一个重要的应用方面。它主要体现在红外诊断和红外理疗两个方面。红外理疗也是中国的传统技术。医用热像仪正在兴起。

(5) 红外辐射加热技术：红外辐射加热可以节能，这是通过选用某些发射率高的材料实现的，如红外烤炉等，工业用途很广。

(6) 红外光谱技术：它利用不同的物体在不同条件下发出的红外波段光谱辐射特性的不同，来检测和鉴别物质，在公安、环保、考古、文物鉴定等方面应用广泛。以傅里叶变换

光谱技术为代表的红外光谱学在气态、液态、固态等不同形态分析对象中得到了广泛的应用。例如，大气污染分析、混合气体中大气毒物定量分析、燃烧废气的检测、润滑油品质分析、化妆品质量分析等。红外光谱技术无论是在对固体、液体、气体的定量还是定性分析中都有广泛的应用，如果能够选取恰当的定量分析方法，就可以得到非常有用的结果，并且红外光谱技术与气相色谱的联用使定量和定性分析更加准确。

总之，红外技术作为一种现代高科技技术，与激光技术并驾齐驱，并已涉及到军事战术或战略的情报搜集、目标的侦察监视、武器制导等各个领域，对未来战争必将产生重大的影响。在工业、医学和科研等许多方面也将得到更广泛的应用。

1.3 红外技术专业课程的基本内容

1.3.1 红外系统的组成

红外系统由如图 1-2 所示的几大部分组成。

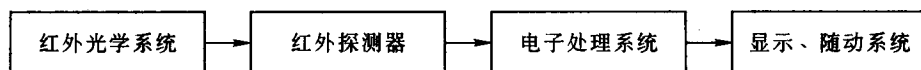


图 1-2 红外系统组成框图

- (1) 红外光学系统：起天线的作用，把红外辐射源辐射的能量聚集在探测器上。
- (2) 红外探测器：接收辐射源的红外辐射并将其转换成电信号。
- (3) 电子处理系统：将微弱的电信号处理成能够应用的形式或数值。
- (4) 显示、随动系统：执行机构，根据需要执行相应的动作，如显示、驱动等。

图 1-2 所示为基本系统，根据需要还可能有些附加装置，如调制系统、致冷系统等。

1.3.2 红外系统专业课程

红外技术中有完整的系统概念，专业的课程设置是与红外系统的各个组成部分相对应的，红外系统中的每一个组成部分都设有一门专业课程，各专业课程设置如下：

(1) 《红外物理》：是红外技术的理论基础，涉及各种辐射量和各种定律的概念及计算，红外辐射源、红外辐射在大气中的传输等。

(2) 《红外光学系统》：主要涉及红外光学材料、特殊滤光片、薄膜光学、光学系统的设计及计算等。

(3) 《红外探测器》：讲述红外探测器的机理和探测原理，典型红外探测器介绍、测试、计算等。

(4) 《红外电子学》：主要讲述弱信号处理方法，包括低噪声电子电路、放大、调制、解调、红外系统中常用的特殊电子电路等。

(5) 《随动系统》：讲述系统最终的执行机构，即执行探测到信号后要完成的动作。例如，数字或图像显示、驱动继电器或电机完成所需要的动作，如控制尾舵、转盘、瞄准、跟踪装置等。

(6) 《红外系统》：主要讲述红外系统的设计，包括各部分的衔接、典型系统的设计、红外仪器的基本原理及应用等。

第二章 光度学与辐射度学基础

2.1 引言

我们知道光学是研究光的本质、特性、传播规律的科学。最先接触的几何光学，是以光线在均匀媒质中直线传播的规定为基础的研究；后来学习的物理光学，是在证明了光是一种电磁波以后的研究，主要有干涉、衍射和偏振等；再进一步学习的量子光学，是现代理论对光的本质所达到的认识，揭示了粒子性和波动性，也证明了光是一种能量。

光既然是一种传播着的能量，如何度量和定量研究呢？光度学与辐射度学的任务就是对光能进行定量的研究。其中光度学包含人眼特性，只限于可见光范围，而辐射度学的规律则适用于从紫外到红外波段，有些规律适用于整个电磁波。红外物理就是从光是一种能量的角度出发，定量地讨论光的计算和测量问题，主要是在红外波段。

辐射度学的基本概念集中了电磁辐射的三个特性：传播的直线性、波动性和量子性。研究过程中有两个假设：一个是辐射按直线传播，辐射的波动性不会使辐射能的空间分布偏离几何光线；另一个是认为辐射能不相干，研究中不考虑干涉效应。

需要强调的是，辐射量是纯物理量，而光度量则是通过对人眼进行测试和统计得出的，所以各种辐射量的计算和测量显然不能用光度量，必须用不受人们主观视觉限制、建立在物理测量基础上的辐射度量。

辐射量和光度量的名称基本一致，例如强度、亮度、照度等，而且一般都用相同的符号表示，注意不要混淆。通常在同时使用的时候，以符号的下标来区分辐射量和光度量，大部分文献中，以下标 e 或不用下标表示辐射量，以下标 v 表示光度量。

2.2 描述辐射场的基本物理量

2.2.1 立体角

在光辐射测量中，常用的几何量就是立体角。立体角涉及到的是空间问题。任一光源发射的光能量都是辐射在它周围的一定空间内。因此，在进行有关光辐射的讨论和计算时，也将是一个立体空间问题。与平面角度相似，我们可把整个空间以某一点为中心划分成若干立体角。

定义：一个任意形状锥面所包含的空间称为立体角。用符号 Ω 表示，单位是球面度，单位符号用 sr 表示。

如图 2-1 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

$$\Omega = \frac{\Delta A}{R^2} \quad (2-1)$$

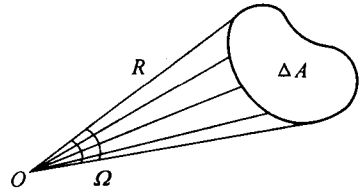


图 2-1 立体角的定义

单位立体角：以 O 为球心、 R 为半径作球，若立体角 Ω 截出的球面部分的面积为 R^2 ，则此球面部分所对应的立体角称为一个单位立体角，或一球面度。

对于一个给定顶点 O 和一个随意方向的微小面积 dS ，它们对应的立体角为

$$d\Omega = \frac{dS \cos\theta}{R^2} \quad (2-2)$$

其中 θ 为 dS 与投影面积 dA 的夹角， R 为 O 到 dS 中心的距离。

例 1 球冠所对应的立体角，如图 2-2 所示：

根据定义，全球所对应的立体角

$$\Omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$$

全球所对应的立体角是整个空间，又称为 4π 空间。同理，半球所对应的立体角为 2π 空间。

球冠所对应的立体角：

$$\Omega = \frac{2\pi (1 - \cos\alpha) R^2}{R^2} = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (2-3)$$

当 α 很小时，可用小平面代替球面， 5° 以下时误差 $\leq 1\%$ 。

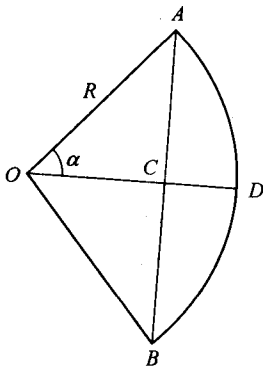


图 2-2 球冠所对应的立体角

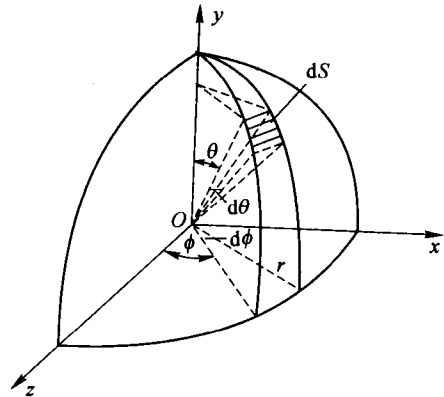


图 2-3 用球坐标表示立体角

例 2 球台侧面所对应的立体角，如图 2-3 所示：

面积为大球面积减去小球面积

$$\Omega = \frac{2\pi R^2}{R^2} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) = 2\pi (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (2-4)$$

立体角还可以用球坐标表示，图 2-3 中微小面积

$$dS = r^2 \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi$$

则 dS 对应的立体角为

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2-5)$$

计算某一个立体角时，在一定范围内积分即可。

$$\Omega = \int d\Omega$$

2.2.2 辐射量

通常，把以电磁波形式传播的能量称为辐射能，用 Q 表示，单位为 J（焦耳）。

$$Q = h\nu \quad (2-6)$$

h 是普朗克常数， ν 是光的频率， ν 与光速 c 、波长 λ 之间都是可换算的。辐射能既可以表示辐射源发出的电磁波的能量，也可以表示被辐射表面接收到的电磁波的能量，也就是辐射功率。辐射功率以及由它派生出来的几个辐射度学中的物理量，属于基本物理量。它们的量值都可以用专门的红外辐射计在离开辐射源一定的距离上进行测量，所以其他辐射量都是由辐射功率（或称为辐射通量） Φ 定义的。

辐射通量 Φ ：单位时间内通过某一面积的光辐射能量。单位是 W（瓦）。

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2-7)$$

Q 是辐射能量。 Φ 与功率意义相同，所以在很多文献中辐射能量与辐射功率 P 是混用的。

(1) 辐射强度 I

辐射强度是描述点辐射源特性的辐射量。辐射源尺寸的大小是相对的，如果辐射源与观测点之间距离大于辐射源最大尺寸 10 倍时，可当作点源处理，忽略其物理尺寸，在光路图上只是一个点，否则称为扩展源或面源。

若点辐射源在小立体角 $\Delta\Omega$ 内的辐射功率为 $\Delta\Phi$ ，则 $\Delta\Phi$ 与 $\Delta\Omega$ 之比的极限值定义为该点源的辐射强度（见图 2-4），用符号 I 表示。

$$I = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} = \frac{\partial\Phi}{\partial\Omega} \quad (2-8)$$

其物理意义是点辐射源在某方向上的辐射强度，指辐射源在包含该方向的单位立体角内所发出的辐射通量，单位是 W/m^2 （瓦/球面度）。

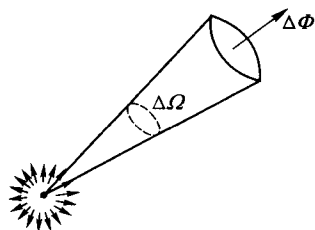


图 2-4 辐射强度的定义

点辐射源在整个空间发出的辐射通量，是辐射强度对整个空间立体角的积分，即

$$\Phi = \int_{\Omega} I d\Omega \quad (2-9)$$

对于各向同性的辐射源， I 是常数，由上式得 $\Phi = 4\pi I$ 。

(2) 辐射出射度 M

辐射出射度简称辐出度，是描述扩展源辐射特性的量。辐射源单位表面积向半球空间（ 2π 立体角）内发射的辐射功率称为辐射出射度，用 M 表示。

如图 2-5 所示, 若面积为 A 的扩展源上围绕 x 点的一个小面元 ΔA , 向半球空间内发射的辐射功率为 $\Delta\Phi$, 则 $\Delta\Phi$ 与 ΔA 之比的极限就是该扩展源在 x 点的辐射出射度, 即

$$M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta A} \right) = \frac{\partial\Phi}{\partial A} \quad (2-10)$$

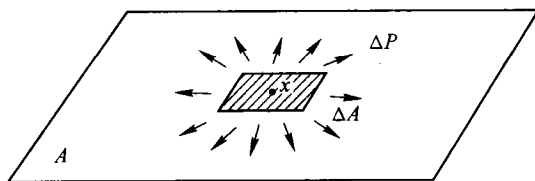


图 2-5 辐射出射度的定义

辐射出射度是扩展源所发射的辐射功率在源表面分布特性的描述。或者说, 它是辐射功率在某一点附近的面密度的度量。按定义, 辐射出射度的单位是 W/m^2 。

对于发射不均匀的辐射源表面, 表面上各点附近将有不同的辐射出射度。一般地讲, 辐射出射度 M 是源表面位置 x 的函数。辐射出射度 M 对源发射表面积 A 的积分, 就是该辐射源发射的总辐射功率, 即

$$\Phi = \int_A M dA \quad (2-11)$$

如果辐射源表面的辐射出射度 M 为常数, 则它所发射的辐射功率为 $\Phi = MA$ 。

(3) 辐射亮度 L

辐射亮度简称辐亮度, 是描述扩展源辐射特性的量。由前面定义可知, 辐射强度 I 可以描述点源在空间不同方向上的辐射功率分布, 而辐射出射度 M 可以描述扩展源在源表面不同位置上的辐射功率分布。为了描述扩展源所发射的辐射功率在源表面不同位置上沿空间不同方向的分布特性, 特别引入辐射亮度的概念。其描述如下: 辐射源在某一方向上的辐射亮度是指在该方向上的单位投影面积向单位立体角中发射的辐射功率, 用 L 表示。

如图 2-6 所示, 若在扩展源表面上某点 x 附近取一小面元 ΔA , 该面积向半球空间发射的辐射功率为 $\Delta\Phi$ 。如果进一步考虑, 在与面元 ΔA 的法线夹角为 θ 的方向上取一个小立体角元 $\Delta\Omega$, 那么, 从面元 ΔA 向立体角元 $\Delta\Omega$ 内发射的辐射通量是二级小量 $\Delta(\Delta\Phi) = \Delta^2\Phi$ 。由于从 ΔA 向 θ 方向发射的辐射 (也就是在 θ 方向观察到来自 ΔA 的辐射), 在 θ 方向上看到的面元 ΔA 的有效面积, 即投影面积是 $\Delta A_0 = \Delta A \cos\theta$, 所以, 在 θ 方向的立体角元 $\Delta\Omega$ 内发出的辐射, 就等效于从辐射源的投影面积 ΔA_0 上发出的辐射。因此, 在 θ 方向观测到的辐射源表面上位置 x 处的辐射亮度, 就是 $\Delta^2\Phi$ 比 ΔA_0 与 $\Delta\Omega$ 之积的极限值, 即

$$L = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta\Omega \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta^2\Phi}{\Delta A_0 \Delta\Omega} \right) = \frac{\partial^2\Phi}{\partial A_0 \partial\Omega} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial A \partial\Omega \cos\theta} \quad (2-12)$$

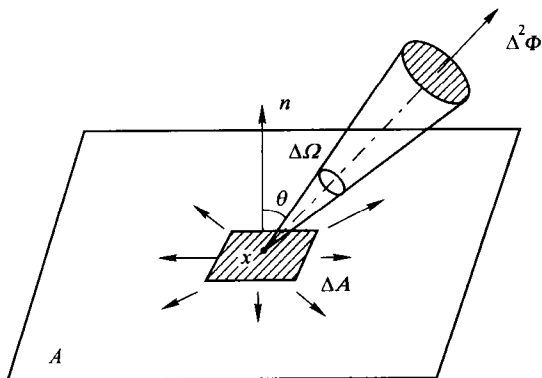


图 2-6 辐射亮度的定义

这个定义表明：辐射亮度是扩展源辐射功率在空间分布特性的描述。辐射亮度的单位是 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。

一般来说，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 和辐射出射度 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 是单位表观面积向特定方向上的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 (2-12) 可知，源面上的小面元 dA ，在 θ 方向上的小立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐射功率为 $d^2\Phi = L\cos\theta d\Omega dA$ ，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

$$d\Phi = \int_{\text{半球空间}} d^2\Phi = \int_{2\pi\text{球面度}} L\cos\theta d\Omega dA$$

根据 M 的定义式 (2-10)，我们就得到 L 与 M 的关系式，为

$$M = \frac{d\Phi}{dA} = \int_{2\pi\text{球面度}} L\cos\theta d\Omega \quad (2-13)$$

在实际测量辐射亮度时，总是用遮光板或光学装置将测量限制在扩展源的一小块面元 ΔA 上。在这种情况下，由于小面元 ΔA 比较小，就可以确定处于某一 θ 方向上的探测器表面对 ΔA 中心所张的立体角元 $\Delta\Omega$ 。此时，用测得的辐射功率 $\Delta(\Delta\Phi(\theta))$ 除以被测小面元 ΔA 在该方向上的投影面积 $\Delta A\cos\theta$ 和探测器表面对 ΔA 中心所张的立体角元 $\Delta\Omega$ ，便可得到辐射亮度 L 。从理论上讲，将在立体角元 $\Delta\Omega$ 内所测得的辐射功率 $\Delta(\Delta\Phi)$ ，除以立体角元 $\Delta\Omega$ ，就是辐射强度 I 。

在定义辐射强度时特别强调，辐射强度是描述点源辐射空间角分布特性的物理量。同时指出，只有当辐射源面积（严格讲，应该是空间尺度）比较小时，才可将其看成是点源。此时，将这类辐射源称为小面源或微面源。可以说，小面源是具有一定尺度的“点源”，它是联系理想点源和实际面源的一个重要概念。对于小面源而言，它既有点源特性的辐射强度，又有面源的辐射亮度。

对于上述所测量的小面元 ΔA ，有

$$L = \frac{\partial}{\partial A\cos\theta} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\Omega} \right) = \frac{\partial I}{\partial A\cos\theta} \quad (2-14)$$

和

$$I = \int_{\Delta A} L dA\cos\theta \quad (2-15)$$

如果小面源的辐射亮度 L 不随位置变化（由于小面源面积 ΔA 较小，通常可以不考虑 L 随 ΔA 上位置的变化），则小面源的辐射强度为

$$I = L\Delta A\cos\theta \quad (2-16)$$

即小面源在空间某一方向上的辐射强度等于该面源的辐射亮度乘以小面源在该方向上的投影面积（或表观面积）。

(4) 辐射照度 E

以上讨论的各辐射量都是用来描述辐射源特性的量。对一个受照表面接收辐射的分布情况，就不能用上述各辐射量来描述了。为了描述一个物体表面被辐照的程度，在辐射度学中，引入辐射照度的概念。

被照表面的单位面积上接收到的辐射功率称为该被照射处的辐射照度。辐射照度简称为辐照度，用 E 表示。

如图 2-7 所示，若在被照表面上围绕 x 点取小面元 ΔA ，投射到 ΔA 上的辐射功率为 ΔP ，则表面上 x 点处的辐射照度为

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta A} \right) = \frac{\partial \Phi}{\partial A} \quad (2-17)$$

辐射照度的数值是投射到表面上每单位面积的辐射功率，辐射照度的单位是 W/m^2 。

一般来说，辐射照度与 x 点在被照面上的位置有关，而且与辐射源的特性及相对位置有关。

辐射照度和辐射出射度具有同样的单位，它们的定义式相似，但应注意它们的差别。辐射出射度描述辐射源的特性，它包括了辐射源向整个半球空间发射的辐射功率；辐射照度描述被照表面的特性，它可以是由一个或数个辐射源投射的辐射功率，也可以是来自指定方向的一个立体角中投射来的辐射功率。

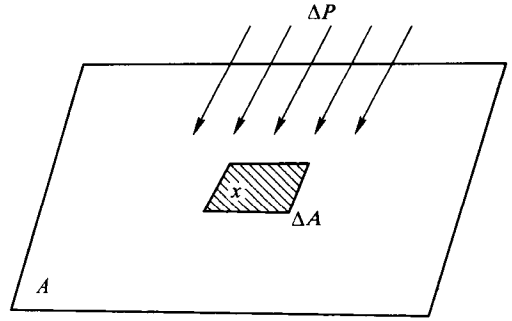


图 2-7 辐射照度的定义

2.3 光谱辐射量与光子辐射量

2.3.1 光谱辐射量

前面叙述的辐射量只考虑了辐射的空间分布特征，认为这些辐射为所有波长的全辐射，波长 λ 从 $0 \sim \infty$ ，因此把它们叫做全辐射量。

辐射源的辐射往往是由许多单色辐射组成，很多场合我们关心辐射源在某一特定波长附近的辐射特性。所以也需要对某一特定波长的单色辐射做出相应定义。

辐射源在 $\lambda + \Delta\lambda$ 波长间隔内发出的辐射功率，称为在波长 λ 处的光谱辐射功率（或单色辐射功率） Φ_λ ，单位是 W/m （瓦/米）。

$$\Phi_\lambda = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\lambda} = \frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} \quad (2-18)$$

严格地讲，单色辐射通量和光谱辐射通量不同，其区别在于“单色辐射通量”比“光谱辐射通量”的波长范围更小一些。注意光谱辐射通量的单位是 W/m ，不是辐射通量的单位 W/m^2 ，而是辐射通量与波长的比值，描述的是某一波长或波段的辐射特性。它表征在指定波长 λ 处单位波长间隔内的辐射功率。

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

$$d\Phi = \Phi_\lambda d\lambda \quad (2-19)$$

只要 $d\lambda$ 足够小，此式中的 $d\Phi$ 就可以称为波长为 λ 的单色辐射功率。将式 (2-15) 从 λ_1 到 λ_2 积分，即可得到在光谱带 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐射功率

$$\Phi_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda d\lambda \quad (2-20)$$