

红外系统

陈 玻 若 主 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书论述了红外仪器的基本原理、结构、性能以及初步设计的方法。内容包括：绪论；红外辐射及其传输与探测；红外光学系统；辐射调制与调制盘；信号处理和显示；红外辐射测温；红外跟踪系统；红外搜索系统；热成像系统；系统分析与设计。书内就几类典型的红外仪器的结构、原理和性能进行了分析，讲述了红外系统设计的一般原则和基本方法，并就示例系统讲述了红外系统初步设计的步骤。

本书也在相应的章节中编入了国内外有关的技术资料和数据表，以供系统设计时选用。

本书可作为高等院校红外、光电技术专业本科生教材，也可供从事红外、遥感、光学、光电技术等工作的科学工作者、工程技术人员参考。

红 外 系 统

陈波若 主编

责任编辑 刘树兰

国防工业出版社 出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

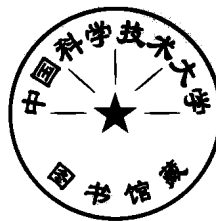
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张20 464千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷 印数：0,001—1,730册

ISBN 7-118-00357-3/TN69 定价：3.95元



前 言

本书是根据原兵器工业部第一教材编审委员会光电技术编审组审定的教材编写大纲,参考近年来国内外有关资料并根据我们的教学实践编写的。

全书共分十章。前五章是从整机角度讲述红外系统的工作原理、结构、性能及系统设计所需的基础知识。书中涉及的基本定律、公式将直接引用而不加推导,有关探测器机理等方面内容不做讨论。对这些方面有兴趣的读者可参阅专门书籍。由于调制技术是红外系统中的一个重要部分,而这部分内容在其它课程中又不包括,因此本书中做了着重的叙述。第六至第九章介绍了几类红外仪器的结构、工作原理和性能、特点,并就各类中的典型产品进行了分析。第十章讲述了红外系统的性能方程及系统设计的内容和方法,也介绍了示例系统初步设计的步骤。另外,本书也在相应的章节中编入了一些国内外的有关技术资料和数据表,以供系统设计时选用。

本书内各物理量的单位均采用国际单位制^[1]。

《红外系统》课程旨在使学生通过本课程的学习掌握红外仪器的基本知识及总体设计的一般原则和基本方法,学会系统性能分析及总体结构的初步设计。关于部件设计,可参阅其它有关书籍。

本课程的参考教学时数为 70 学时左右。

本书由长春光学精密机械学院陈玻若担任主编,中国科学院长春光学精密机械研究所陈星旦担任主审,华东工学院周旭辉担任责任编委。绪论、第一至三章、第六至十章由陈玻若编写。第四、五两章由张彤编写。全书由陈玻若统编。

红外系统涉及的内容较为广泛,虽然我们极力搜集新的技术成果,但在军用红外仪器方面,由于保密的缘故,很难得到能够编入教材的新内容。因此,在这方面,为了教学需要,本教材中不得不保留了一部分在技术上为 60 年代的内容,这将在今后的改编中逐渐充实和更新。另外,本书取材中,有的是尚未公开发表或交流的资料,并未列入参考文献中去,我们对这些资料的作者致以谢意。

在本书编写过程中得到了光电技术编审组组长华东工学院果玉忱同志的有益指导,编者在此谨表示衷心的感谢。

由于编者学识浅薄和缺少经验,书中一定有许多缺点甚至错误,我们诚恳地希望读者不吝指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 红外辐射及其传输和探测	5
§ 1-1 红外辐射的基本定律	5
§ 1-2 黑体辐射数据表	8
§ 1-3 红外辐射通过大气的传输	12
§ 1-4 红外探测器的特性参数	17
§ 1-5 红外探测器的特性数据	22
§ 1-6 红外探测器使用的制冷器	24
附录 水蒸气、二氧化碳和臭氧的光谱透过率表	27
第二章 光学系统	33
§ 2-1 概述	33
§ 2-2 影响像质的因素	35
§ 2-3 反射式物镜	38
§ 2-4 折射式物镜	49
§ 2-5 折反射系统	52
§ 2-6 辅助光学系统	56
§ 2-7 红外光学材料	68
第三章 辐射调制与调制盘	74
§ 3-1 概述	74
§ 3-2 斩波器对辐射的调制	75
§ 3-3 用调制盘提取目标的方位信息	84
§ 3-4 用调制盘进行空间滤波	86
§ 3-5 调幅式调制盘	88
§ 3-6 调频式调制盘	97
§ 3-7 脉冲编码式调制盘	102
§ 3-8 调相式调制盘	106
§ 3-9 旋转调幅式调制盘的分析与计算	107
§ 3-10 调频式调制盘的分析与计算	119
§ 3-11 脉冲编码式调制盘的分析与计算	121
§ 3-12 双色调制盘	123
§ 3-13 不用调制盘的红外系统	124
§ 3-14 辐射传输过程的数学描述	126
§ 3-15 背景辐射的统计描述	130
§ 3-16 空间滤波	134
第四章 信号处理	139
§ 4-1 噪声	139
§ 4-2 前置放大器	151
§ 4-3 信号处理中的带宽限制	157

第五章 显示	158
§ 5-1 概述	158
§ 5-2 发光二极管	159
§ 5-3 阴极射线管	162
第六章 红外辐射测温	172
§ 6-1 红外辐射测温的基本原理	172
§ 6-2 全辐射测温仪	178
§ 6-3 HCW-1 型红外测温仪	184
§ 6-4 亮度测温仪	193
§ 6-5 双波段测温仪	195
第七章 红外跟踪系统	198
§ 7-1 红外跟踪系统的组成及其工作原理	198
§ 7-2 对导引装置跟踪系统的基本要求	199
§ 7-3 坐标变换器	201
§ 7-4 陀螺系统的跟踪原理	202
§ 7-5 内框架式陀螺机构	204
§ 7-6 红外导弹及其导引装置	211
§ 7-7 成像跟踪简介	214
§ 7-8 导弹的红外对抗	216
第八章 红外搜索系统	221
§ 8-1 红外跟踪搜索系统	221
§ 8-2 行扫描搜索系统	227
§ 8-3 其它扫描方式的搜索系统	231
§ 8-4 红外搜索系统的探测概率和虚警概率	232
§ 8-5 机载森林探火仪	236
第九章 热成像系统	239
§ 9-1 热成像系统的组成、工作原理和基本参数	239
§ 9-2 扫描方式和扫描机构	242
§ 9-3 几种常用的光机扫描方案	253
§ 9-4 摄像方式	256
§ 9-5 信号处理及显示	261
§ 9-6 性能的综合量度	264
§ 9-7 对热图像的判断	277
§ 9-8 医用热像仪	278
§ 9-9 红外前视仪	283
第十章 系统分析与设计	287
§ 10-1 红外系统的作用距离	287
§ 10-2 扩展源情况下系统的信噪比方程	291
§ 10-3 搜索系统和跟踪系统的作用距离方程	292
§ 10-4 测温仪器的温度方程	294
§ 10-5 系统总体设计的主要内容	295
§ 10-6 热成像系统的设计	304
§ 10-7 搜索系统的设计	310
参考文献	312

绪 论

一、红外系统的组成和分类

红外系统也叫做红外整机、红外仪器，它是根据探测不同的目标（它们具有不同的形状、大小和辐射特性）和不同的实用目的而设计、制造的红外辐射探测装置。任何一个红外系统，通常包括光学系统、光学调制器或光学机械扫描器、红外探测器、信号处理系统以及信号输出的显示或记录装置等各部分组成。由于某些探测器工作时必须被冷却到低温，故有的红外系统也包括探测器的制冷装置。典型的红外系统组成的方框图如图 x-1 所示。

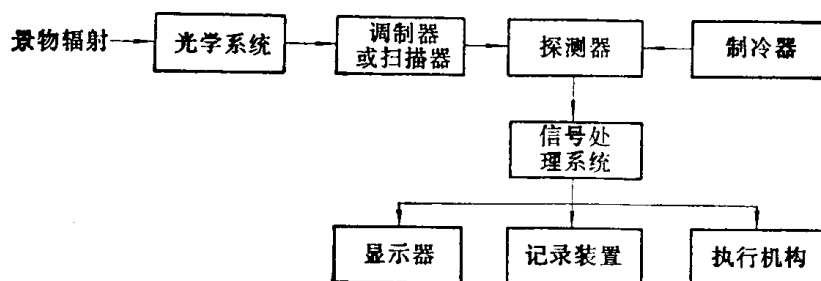


图 x-1 典型的红外系统组成方框图

由景物——目标和背景——发出的红外辐射，经空间传输受到大气衰减后投射到红外系统上。红外系统的光学系统接收景物的红外辐射形成像点。红外系统取得目标方位信息的方式有两种：一种是调制工作方式，一种是扫描工作方式。若红外系统是以调制方式取得目标方位信息的，则在光学系统的像平面上设置调制盘，它将入射红外辐射变成周期性变化的辐射并提取出目标的方位信息，通过调制盘的带有目标方位信息的辐射被红外探测器转变成电信号。若红外系统是以扫描方式工作的，则在光学系统后面设置扫描机构，对景物进行扫描，以确定目标的空间坐标或摄取景物图像。当红外系统须要对空间景物进行搜索，跟踪目标时，则须设置伺服机构。跟踪时，按信号处理系统输出的误差信号对目标进行跟踪；搜索时，则须要将专门的搜索信号送入信号处理系统，经处理后用它来驱动伺服系统使其对空间进行搜索。红外探测器输出的电信号经放大、滤波等一系列处理，提取出目标景物的有用信息。经处理后的信息，可以送至显示器显示，或记录装置记录，或推动和控制其它装置的操作。

红外系统可按照其功能、取得目标方位信息的方式或信息处理的方式进行分类。

红外系统按照其功能可分为：辐射计、搜索系统、跟踪系统、成像系统、通讯系统和测距系统。这种分类是根据仪器的作用以及确定这些系统设计参量方程的差别进行的。

辐射计包括一切接收来自相对不动的物体的辐射的探测系统，用来作辐射功率的测

表x-1 红外系

	军 事 方 面	工 业 方 面
1. 搜索、 跟踪和测 距	入侵探测 轰炸机防御 导弹制导 导航和飞行控制 非触发引信 舰艇、飞机、洲际弹道导弹和地雷的探测 火力控制 飞机碰撞预警	森林火灾探测 灭火导弹的制导 燃料点火监控器 探明隐患的位置 停车场监视仪表 探测飞机油箱中的起火
2. 辐射测 量	目 标 特 性	铁路车辆过热轴颈箱的探测 非接触尺寸测定 工艺控制 刹车衬套、电源线、切削刀具、焊接和钎焊件 以及钢锭等的温度测量
3. 光谱辐 射测量	地形分析 毒气的探测 目标和背景的特性 燃料蒸气的探测 液氧管路中污物的探测	探测晴空大气湍流 有机化学分析 气体分析 测定空气中的乙醇 发现管道的裂缝 探测水中的油质 控制锗和硅中的含氧量
4. 热成像	侦察和监视 热测绘 潜艇探测 导弹的地下发射阱、人员、车辆、武器野营 炊火以及战地营房的探测 损坏的勘查	非破坏性试验 查明墙壁和地板下掩埋的管路 检验红外光学材料 探测和显示微波场的分布 研究绝热体的效率
5. 反射通 量	夜间驾驶 冲锋枪的射击 入侵探测 伪装探测 基地保卫 停泊和着陆	工业监视和防止不合格品 检查生产中的照相底片 探测患病的树木和庄稼 移动式退光摄影 放映机自动对焦
6. 合作光 源	地面通讯 武器的指令制导 红外系统对抗 测距 无人驾驶飞机的指令联络 入侵探测	防盗监测 防止汽车碰撞 交通量计算 辐射加热和干燥 数据传输 车速探测

统应用⁽²⁾

医 学 方 面	科 学 方 面
盲人用的障碍物探测器	卫星探测 空间装置的导航和飞行控制 地平仪 仪器定向用的太阳跟随器 地平线光学结构的研究
皮肤温度测量 癌症早期探查 不用解开绷带以监视伤口的愈合与感染 远距离生物传感器 皮肤受热及对温度感知的研究	月球、行星和天体温度的测量 气象情况的遥测 植物中热交换的研究 地球热平衡的测量
大气污染的探测和监视 测定血液和呼出气体中的二氧化碳	地球和行星大气成分的测定 其它行星上的植被或生命的探测 地形分析 监视宇宙飞船中的大气 零—G级液面测量仪表 磁场测量
癌症的早期探测和确诊 最佳切除部位的确定 测定胎盘位置 研究北极服装的效能 初期脑溢血的早期诊断	地球资源调查 测定湾流的位置和绘制湾流图 用卫星探测森林火灾 研究火山 探测和研究水的污染 测定水隙的位置 侦察海面浮水 石油勘探
瞳孔直径的测量 确定静脉堵塞的部位 监视眼睛的运动 研究动物的夜间习性 透过不透明的角膜来检查眼睛 监视愈合过程	伪造品的探测 测定外延膜的厚度 测定月球和行星表面的成份 宝石鉴定 水质分析 探测患病的农作物
用于盲人测距和障碍物的探测热治疗	空间通讯 了解动物通讯的机制 计算机的周边输入 研究动物的夜间习性 夜间摄影用的地面照明

定、光谱分析、目标景物温度测量等。

搜索系统包括为探测和确定在某一视场范围内不动或缓慢移动目标方位的仪器，用于入侵探测、森林防火等。

跟踪系统用于对运动目标进行跟踪、导弹制导等。

成像系统是将景物的热图像通过机械的或（和）电子束的扫描，像电视那样一一对应地显现出来，用于观察景物图像和分析景物特性。

通讯系统是用红外激光进行传递信息的红外系统。

测距系统是包括测量距离的探测系统。

此外还有混合系统。包括各类中两个或两个以上系统的组合。如搜索-跟踪系统、跟踪辐射计、搜索-跟踪-辐射计等。

红外系统按照其取得目标方位信息的方式分为调制盘系统和扫描系统。

红外系统按信息处理方式分为幅度调制系统、角度调制系统和脉冲调制系统。角度调制包括频率调制和相位调制。脉冲调制包括脉冲位置调制、脉冲持续时间调制、脉冲频率调制、脉冲幅度调制和脉冲编码调制等。

二、红外系统的应用方面

各种各样的红外系统，它们有着不同的结构和功能，不同的应用方面。小哈得逊（R. D. Hudson, JR.）将红外系统的应用分为四个方面，即军事、工业、医学和科学研究，并按照其功能列成表格^[2]，清晰明瞭。现将这份红外系统应用表格摘录下来，介绍给读者，以供参考。

三、红外系统应用的特点

红外跟踪、搜索系统较之微波雷达系统简单，而且可以做成被动式的，其保密性强，隐蔽而不易被发现，更不易受干扰。因而它在某些场合较之微波雷达有着一定的优越性，但不能完全取代后者。在地面使用时，红外系统受气象条件的限制，探测距离明显地受到影响。

红外系统与雷达系统各有其优缺点，在使用时往往是建立雷达和红外综合探测系统，各在其不同条件下工作，各取所长，互相补充。目前带有红外跟踪装置的雷达系统在国内外都在大力进行研究和试制。

另外，红外系统可以完成其它系统所不能完成的任务，如：温度的遥测、天体表面物质成分的分析、伪装目标、地下目标（如导弹发射阱）、水下目标（如潜水艇）的探测，等等。

红外系统也并不是万能的。红外系统受气象条件限制而不能全天候运用；在地面大气层中若目标距离变远，气象条件变坏，红外系统就要失灵；被动式红外系统不能进行测距，等等。为了弥补红外系统的这些缺点，进一步加强红外系统抗干扰、识别目标的能力，近年来国内外有两个发展新动向：一是主动与被动相结合，发展红外-激光或红外-微波雷达综合系统；一是红外与可见光、与紫外相结合，发展多光谱光学系统。

第一章 红外辐射及其传输和探测

在这一章里，我们将从整机角度介绍学习红外系统的工作原理及进行系统设计所必需的**有关红外辐射的基本定律、辐射在大气传输中衰减的规律以及红外探测器的性能及其制冷器的知识**。对各原理、定律的公式不作推导，有关探测器的内容也不讨论它们的微观机理，而只介绍其特性参数。此外，为了便于学习系统设计，也摘录了一些有关的技术资料，如计算普朗克函数积分用的黑体辐射数据表、为在设计中估算大气透过率用的**大气透过率表**以及在设计中选择合适探测器用的国内外探测器性能资料等，这些数据和资料在进行系统设计时都要用到。

§ 1-1 红外辐射的基本定律

一、普朗克定律

普朗克定律给出了绝对黑体辐射的光谱分布，表示为

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1-1)$$

式中 M_{λ} ——绝对黑体的光谱辐射出射度($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)，
 λ ——波长 (μm)，
 T ——绝对温度 (K)，

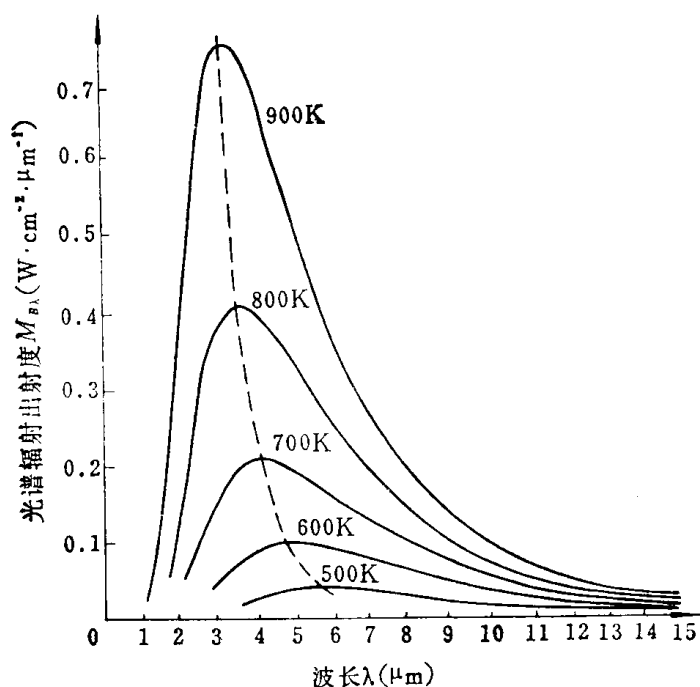


图1-1 各种温度下黑体的光谱辐射出射度

$c_1 = (3.741382 \pm 0.000020) \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^2$ ——第一辐射常数;

$c_2 = 1.438786 \pm 0.000045 \text{cm} \cdot \text{K}$ ——第二辐射常数。

图 1-1 给出了温度从 500K 到 900K 范围内绝对黑体的光谱辐射出射度与波长的关系曲线。从这些曲线可以看出黑体辐射的几个特性: (1) 与曲线下的面积成正比的总辐射出射度是随温度增加而迅速增加的; (2) 光谱辐射出射度的峰值波长随温度的增加向短波方向移动; (3) 每根曲线不相交, 因此温度越高, 所有波长上的光谱辐射出射度也越大。

二、斯忒藩-玻耳兹曼定律

在从零到无穷大的波长范围内积分普朗克公式 (1-1), 得到从黑体单位面积辐射到半球空间的总辐射功率, 即总辐射出射度的表达式, 通常称为斯忒藩-玻耳兹曼定律

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-2)$$

式中 M ——黑体的总辐射出射度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$);

$\sigma = (5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ——斯忒藩-玻耳兹曼常数。

在图 1-1 中辐射出射度随温度的增加而迅速增大是很明显的; 从斯忒藩-玻耳兹曼定律看出: 这个增加与绝对温度的四次方成正比。故相当小的温度变化, 就会引起辐射出射度很大的变化。

三、维恩位移定律

微分普朗克定律式 (1-1), 求出极大值, 就得到维恩位移定律

$$\lambda_m T = a \quad (1-3)$$

式中 λ_m ——光谱辐射出射度的峰值波长 (μm);

$a = 2897.8 \pm 0.4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

因此, 光谱辐射出射度的峰值波长与绝对温度成反比。图 1-1 中的虚线就是这些峰值的轨迹。

将 (1-3) 式代入 (1-1) 式, 得出维恩定律的另一形式, 给出了光谱辐射出射度的峰值

$$M_{\lambda_m} = b T^5 \quad (1-4)$$

式中 M_{λ_m} ——光谱辐射出射度的峰值 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$);

$b = 1.2862 \times 10^{-15} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5}$ 。

因此, 黑体的光谱辐射出射度的峰值与其绝对温度的五次方成正比。

四、基尔霍夫定律 发射率

基尔霍夫总结实验结果指出: 物体的辐射出射度 M 和吸收率 α 的比值 M/α 与物体的性质无关, 都等于同一温度下绝对黑体的辐射出射度; 并且, 这一结论不仅对所有波长的全辐射是正确的, 而且对波长为 λ 的任何光谱的辐射也是正确的。基尔霍夫定律可写成

$$\frac{M}{\alpha} = M_B, \quad \frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = M_{B\lambda} \quad (1-5)$$

式中下标 B 表示相应的黑体的量。这个定律可用一句话表达：“好的吸收体也是好的发射体”。

定义：同一温度下，物体的辐射出射度和黑体的辐射出射度之比，称为该物体的发射率，记为 ε 。据此定义，可将发射率用公式表示为

$$\varepsilon = \frac{M}{M_B} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda M_{B\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty M_{B\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda M_{B\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (1-6)$$

式中 ε_λ ——物体的光谱发射率，即在波长 λ 处物体的辐射出射度和黑体的辐射出射度之比。

根据基尔霍夫定律，由 (1-5) 式可知

$$\alpha = \frac{M}{M_B} \quad (1-7)$$

因此

$$\varepsilon = \alpha \quad (1-8)$$

同样，对辐射的每一光谱分量，

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (1-9)$$

也成立。

(1-8) 式表明：任何材料的发射率，在一定温度下，数值上等于同一温度下的吸收率。

当辐射能入射到一个物体的表面上，将发生三种过程：入射能的 α 部分被吸收， ρ 部分被反射， τ 部分被透射。根据能量守恒定律，必然有

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1-10)$$

对于某些不透明的材料， $\tau = 0$ ，因而有 $\alpha + \rho = 1$ ，按照 (1-8) 式， $\varepsilon = \alpha$ 。所以有

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (1-11)$$

这样，可以用测反射率 ρ 的办法来测定发射率，比直接测定 ε 来得容易。

由 (1-6) 式所定义的 ε 是对各种波长的 ε_λ 做了平均后的值，或者说是与波长无关的发射率。实际上不少材料的 ε 不但与材料的类型、表面状态、温度有关，而且与波长有关。因此，可以按 ε 与波长 λ 的不同关系把红外辐射体分成三类：

- (1) 绝对黑体—— $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$ (因而 $\alpha = 1$)， ε 不随波长变化；
- (2) 灰体—— $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{常数} < 1$ (因而 $\alpha < 1$)， ε 不随波长变化；
- (3) 选择性辐射体—— $\varepsilon < 1$ 且随波长变化 (因而 $\alpha < 1$ 也随波长变化)。

图 1-2 给出了每类辐射体的光谱发射率和光谱辐射出射度随波长变化的关系曲线。黑体在同样温度下，其总的或任意光谱区间的发射率和辐射出射度，都比其它种辐射体来得大。灰体的发射率是黑体的一个不变的分数。选择性辐射体在有限的光谱区间也可看成灰体，这样，可以简化计算。

表 1-1 给出了一些常用材料的发射率的数值，更多的材料的发射率可从文献 [6] 中

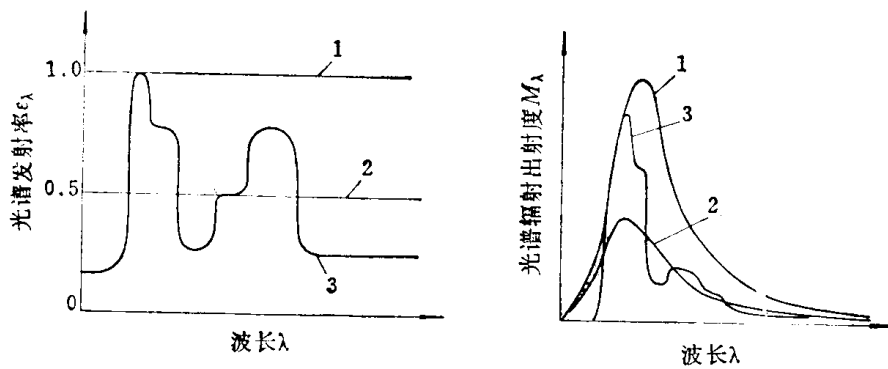


图1-2 三类辐射体的光谱发射率和光谱辐射出射度与波长的关系曲线

1—绝对黑体；2—灰体；3—选择性辐射体。

表1-1 一些常用材料的发射率^{〔6〕}

材 料	温度 (°C)	发射率 ε	材 料	温度 (°C)	发射率 ε
毛面铝	26	0.055	镀锌的有光泽铁板	28	0.228
氧化的铁面	125~525	0.78~0.82	水	0~100	0.95~0.96
磨光的钢板	940~1100	0.55~0.61	毛面红砖	20	0.93
铁锈	500~1200	0.85~0.95	无光黑漆	40~95	0.96~0.98
无光泽黄铜板	50~350	0.22	白色瓷漆	23	0.90
非常纯的水银	0~100	0.09~0.12	光滑玻璃	22	0.94
混凝土	20	0.92	黄土	20	0.85
沙	20	0.90	麦地	20	0.93
干的土壤	20	0.92	牧草	20	0.98
平滑的冰	-10	0.96	镍基底上的润滑油薄膜	20	
雪	-10	0.85	厚0.0254mm		0.27
			0.0508mm		0.46
			0.127mm		0.92
皮肤, 人体	32	0.98	单独镍基底本身	20	0.05

查到。

物体的发射率与其表面状态有关而与其体内特性无关。这是因为大多数辐射体材料, 对红外辐射来说都是不透明的, 因此表面几微米以下的体内发射到体外的辐射功率已很小, 可以忽略不计。这样 ε 就主要是材料表面状态函数而不是整体特性的函数。于是, 有包皮或涂层的表面发射率取决于包皮或涂层, 而不取决于包皮内的真实表面。

由于测量条件的不同, 例如温度变化, 样品上的指印、灰尘、油污、伤痕等都会影响所测量到的 ε 值的正确性。因此, 各种书籍上相同材料的 ε 值可能会有出入。

§ 1-2 黑体辐射数据表

在系统设计中常常要计算物体在某一波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的辐射出射度, 即积分值 $M_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda$ 。要人工做这样的计算是困难的, 因为普朗克公式 (1-1) 式给出的 M_λ 是超越函数。人们利用电子计算机把各种温度、各种波长、各种波段下的 M_λ 、 λ_m 、 M_{λ_m} 、 $M_{0-\infty}$ 、 $M_{0-\lambda}$ 的值计算出来制成表格, 便于使用。例如 1964 年 M. A. Брамсон. 编著的《热体红

外辐射参考数据表》就是一本比较实用的数据表^[4]。

中国科学院成都光电技术研究所和中国科学院上海技术物理研究所共同编制了一本黑体辐射数据表^[5]，该表除一般数据表所包含的能量辐射，光子辐射的数值外，还增加了可见光辐射、普朗克公式对温度求导数的微分辐射出射度等内容。

这本数据表主要是根据普朗克公式 (1-1) 式应用电子计算机计算，对数据作四舍五入处理的。为了学习红外系统设计的需要并因篇幅关系，仅选取了该表的温度为 300K、600K、1000K、2000K 和波长为 0.76~14 μm 间隔内各波长的普朗克公式 M_λ 、峰值波长 λ_m 、峰值光谱辐射出射度 M_{λ_m} 、积分值 $M_{0-\infty} = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda$ 和积分值 $M_{0-\lambda} = \int_0^\lambda M_\lambda d\lambda$ ，列于表 1-2。

表1-2 温度300K、600K、800K、1000K、2000K、6000K，
波长0.76~20 μm 间的 M_λ 、 $M_{0-\lambda}$ 等黑体辐射数据表^[5]
 $T = 300\text{K} [\lambda_m = 9.6593(0), M_{\lambda_m} = 3.1266(-3), M_{0-\infty} = 4.5930(-2)]$

λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$	λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$
0.76	5.7945(-23)	7.3210(-25)	8.60	3.0221(-3)	8.2086(-3)
0.80	1.0518(-21)	1.4762(-23)	8.80	3.0596(-3)	8.8169(-3)
1.00	5.5529(-17)	1.2333(-18)	9.00	3.0882(-3)	9.4318(-3)
1.20	6.6076(-14)	2.1405(-15)	9.20	3.1084(-3)	1.0052(-2)
1.40	9.2236(-12)	4.1194(-13)	9.40	3.1210(-3)	1.0675(-2)
1.60	3.4248(-10)	2.0237(-11)	9.60	3.1263(-3)	1.1300(-2)
1.80	5.3125(-9)	4.0245(-10)	9.80	3.1250(-3)	1.1925(-2)
2.00	4.5046(-8)	4.2678(-9)	10.00	3.1177(-3)	1.2549(-2)
2.20	2.4742(-7)	2.8736(-8)	10.20	3.1048(-3)	1.3171(-2)
2.40	9.8506(-7)	1.3793(-7)	10.40	3.0868(-3)	1.3791(-2)
2.60	3.0707(-6)	5.1126(-7)	10.60	3.0643(-3)	1.4406(-2)
2.80	7.9163(-6)	1.5488(-6)	10.80	3.0377(-3)	1.5016(-2)
3.00	1.7564(-5)	3.9968(-6)	11.00	3.0075(-3)	1.5621(-2)
3.20	3.4547(-5)	9.0629(-6)	11.20	2.9740(-3)	1.6219(-2)
3.40	6.1609(-5)	1.8488(-5)	11.40	2.9377(-3)	1.6810(-2)
3.60	1.0136(-4)	3.4553(-5)	11.60	2.8989(-3)	1.7394(-2)
3.80	1.5594(-4)	6.0022(-5)	11.80	2.8580(-3)	1.7970(-2)
4.00	2.2680(-4)	9.8018(-5)	12.00	2.8153(-3)	1.8537(-2)
4.20	3.1453(-4)	1.5187(-4)	12.20	2.7710(-3)	1.9096(-2)
4.40	4.1886(-4)	2.2494(-4)	12.40	2.7254(-3)	1.9645(-2)
4.60	5.3872(-4)	3.2045(-4)	12.60	2.6788(-3)	2.0186(-2)
4.80	6.7238(-4)	4.4135(-4)	12.80	2.6313(-3)	2.0717(-2)
5.00	8.1762(-4)	5.9017(-4)	13.00	2.5832(-3)	2.1238(-2)
5.20	9.7189(-4)	7.6900(-4)	13.20	2.5347(-3)	2.1750(-2)
5.40	1.1325(-3)	9.7935(-4)	13.40	2.4859(-3)	2.2252(-2)
5.60	1.2967(-3)	1.2222(-3)	13.60	2.4369(-3)	2.2744(-2)
5.80	1.4619(-3)	1.4981(-3)	13.80	2.3880(-3)	2.3227(-2)
6.00	1.6257(-3)	1.8069(-3)	14.00	2.3391(-3)	2.3699(-2)
6.20	1.7860(-3)	2.1482(-3)	14.20	2.2905(-3)	2.4162(-2)
6.40	1.9407(-3)	2.5209(-3)	14.40	2.2422(-3)	2.4616(-2)
6.60	2.0885(-3)	2.9240(-3)	14.60	2.1942(-3)	2.5059(-2)
6.80	2.2279(-3)	3.3558(-3)	14.80	2.1468(-3)	2.5493(-2)
7.00	2.3580(-3)	3.8145(-3)	15.00	2.0998(-3)	2.5918(-2)
7.20	2.4781(-3)	4.2983(-3)	15.20	2.0535(-3)	2.6333(-2)
7.40	2.5877(-3)	4.8051(-3)	15.40	2.0077(-3)	2.6739(-2)
7.60	2.6866(-3)	5.3327(-3)	15.60	1.9627(-3)	2.7136(-2)
7.80	2.7747(-3)	5.8790(-3)	15.80	1.9183(-3)	2.7525(-2)
8.00	2.8520(-3)	6.4418(-3)	16.00	1.8747(-3)	2.7904(-2)
8.20	2.9188(-3)	7.0191(-3)	17.00	1.6684(-3)	2.9674(-2)
8.40	2.9754(-3)	7.6087(-3)	18.00	1.4823(-3)	3.1247(-2)

(续)

 $T = 600\text{K} [\lambda_m = 4.8297(0), M_{\lambda_m} = 1.0005(-1), M_{0-\infty} = 7.3487(-1)]$

λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$	λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$
0.76	2.9243(-9)	7.7572(-11)	7.50	6.7194(-2)	4.1469(-1)
1.00	1.4415(-6)	6.8285(-8)	8.00	5.9991(-2)	4.4646(-1)
1.50	5.6205(-4)	6.3949(-5)	8.50	5.3387(-2)	4.7878(-1)
2.00	7.2577(-3)	1.5683(-3)	9.00	4.7433(-2)	4.9996(-1)
2.50	2.6164(-2)	9.4428(-3)	9.50	4.2121(-2)	5.2232(-1)
3.00	5.2023(-2)	2.8911(-2)	10.00	3.7415(-2)	5.4218(-1)
3.50	7.5456(-2)	6.1032(-2)	10.50	3.3264(-2)	5.5983(-1)
4.00	9.1264(-2)	1.0307(-1)	11.00	2.9612(-2)	5.7553(-1)
4.50	9.8821(-2)	1.5091(-1)	11.50	2.6402(-2)	5.8951(-1)
5.00	9.9766(-2)	2.0079(-1)	12.00	2.3582(-2)	6.0199(-1)
5.50	9.6239(-2)	2.4993(-1)	12.50	2.1104(-2)	6.1315(-1)
6.00	9.0089(-2)	2.9695(-1)	13.00	1.8924(-2)	6.2315(-1)
6.50	8.2663(-2)	3.3981(-1)	13.50	1.7003(-2)	6.3212(-1)
7.00	7.4852(-2)	3.7919(-1)	14.00	1.5309(-2)	6.4019(-1)

 $T = 800\text{K} [\lambda_m = 3.6222(0), M_{\lambda_m} = 4.2162(-1), M_{0-\infty} = 2.3226(0)]$

0.76	7.7941(-6)	2.8484(-7)	7.80	1.4350(-1)	1.7587(0)
1.00	5.7859(-4)	3.8168(-5)	8.00	1.3482(-1)	1.7865(0)
1.20	4.6586(-3)	4.5829(-4)	8.20	1.2672(-1)	1.8127(0)
1.40	1.8339(-2)	2.5436(-3)	8.40	1.1916(-1)	1.8372(0)
1.60	4.6859(-2)	8.7951(-3)	8.60	1.1211(-1)	1.8604(0)
1.80	9.0669(-2)	2.2318(-2)	8.80	1.0552(-1)	1.8821(0)
2.00	1.4542(-1)	4.5797(-2)	9.00	9.9376(-2)	1.9026(0)
2.20	2.0454(-1)	8.0777(-2)	9.20	9.3639(-2)	1.9219(0)
2.40	2.6170(-1)	1.2748(-1)	9.40	8.8282(-2)	1.9401(0)
2.60	3.1227(-1)	1.8501(-1)	9.60	8.3279(-2)	1.9572(0)
2.80	3.5356(-1)	2.5176(-1)	9.80	7.8605(-2)	1.9734(0)
3.00	3.8458(-1)	3.2575(-1)	10.00	7.4236(-2)	1.9887(0)
3.20	4.0557(-1)	4.0493(-1)	10.20	7.0151(-2)	2.0031(0)
3.40	4.1746(-1)	4.8737(-1)	10.40	6.6329(-2)	2.0168(0)
3.60	4.2158(-1)	5.7139(-1)	10.60	6.2752(-2)	2.0297(0)
3.80	4.1933(-1)	6.5558(-1)	10.80	5.9403(-2)	2.0419(0)
4.00	4.1208(-1)	7.3879(-1)	11.00	5.6265(-2)	2.0534(0)
4.20	4.0104(-1)	8.2016(-1)	11.20	5.3323(-2)	2.0644(0)
4.40	4.8727(-1)	8.9902(-1)	11.40	5.0564(-2)	2.0748(0)
4.60	4.7163(-1)	9.7494(-1)	11.60	4.7975(-2)	2.0846(0)
4.80	3.5483(-1)	1.0476(0)	11.80	4.5545(-2)	2.0940(0)
5.00	3.3741(-1)	1.1168(0)	12.00	4.3621(-2)	2.1029(0)
5.20	3.1981(-1)	1.1826(0)	12.20	4.1114(-2)	2.1113(0)
5.40	3.0235(-1)	1.2448(0)	12.40	3.9095(-2)	2.1193(0)
5.60	2.8526(-1)	1.3035(0)	12.60	3.7195(-2)	2.1270(0)
5.80	2.6870(-1)	1.3589(0)	12.80	3.5406(-2)	2.1342(0)
6.00	2.5280(-1)	1.4110(0)	13.00	3.3721(-2)	2.1411(0)
6.20	2.3763(-1)	1.4610(0)	13.20	3.2132(-2)	2.1477(0)
6.40	2.2322(-1)	1.5061(0)	13.40	3.0633(-2)	2.1540(0)
6.60	2.0959(-1)	1.5494(0)	13.60	2.9219(-2)	2.1600(0)
6.80	1.9674(-1)	1.5900(0)	13.80	2.7884(-2)	2.1657(0)
7.00	1.8467(-1)	1.6282(0)	14.00	2.6623(-2)	2.1711(0)
7.20	1.7333(-1)	1.6639(0)			
7.40	1.6272(-1)	1.6975(0)			
7.60	1.5278(-1)	1.7291(0)			

 $T = 1000\text{K} [\lambda_m = 2.8978(0), M_{\lambda_m} = 1.2867(0), M_{0-\infty} = 5.6703(0)]$

0.76	8.8556(-4)	4.1811(-5)	1.80	6.6902(-1)	2.2308(-1)
1.00	2.1111(-2)	1.8187(-3)	2.00	8.7898(-1)	3.7837(-1)
1.20	9.3334(-2)	1.2101(-2)	2.20	1.0504(0)	5.7206(-1)
1.40	2.3944(-1)	4.4172(-2)	2.40	1.1737(0)	7.9529(-1)
1.60	4.4380(-1)	1.1181(-1)	2.60	1.2492(0)	1.0383(0)

(续)

$$T = 1000K(\lambda_m = 2.8978(0), M_{\lambda_m} = 1.2867(0), M_{0-\infty} = 5.6703(0))$$

λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$	λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$
2.80	1.2830(0)	1.2922(0)	8.80	1.7171(-1)	5.0133(0)
3.00	1.2830(0)	1.5493(0)	9.00	1.6057(-1)	5.0465(0)
3.20	1.2576(0)	1.8037(0)	9.20	1.5030(-1)	5.0776(0)
3.40	1.2140(0)	2.0511(0)	9.40	1.4080(-1)	5.1067(0)
3.60	1.1585(0)	2.2885(0)	9.60	1.3202(-1)	5.1340(0)
3.80	1.0959(0)	2.5140(0)	9.80	1.2389(-1)	5.1595(0)
4.00	1.0297(0)	2.7266(0)	10.00	1.1637(-1)	5.1836(0)
4.20	9.6260(-1)	2.9259(0)	10.20	1.0939(-1)	5.2061(0)
4.40	8.9644(-1)	3.1117(0)	10.40	1.0291(-1)	5.2273(0)
4.60	8.3247(-1)	3.2846(0)	10.60	9.6890(-2)	5.2473(0)
4.80	7.7149(-1)	3.4449(0)	10.80	9.1296(-2)	5.2661(0)
5.00	7.1396(-1)	3.5934(0)	11.00	8.6092(-2)	5.2839(0)
5.20	6.6011(-1)	3.7308(0)	11.20	8.1246(-2)	5.3006(0)
5.40	6.0999(-1)	3.8577(0)	11.40	7.6729(-2)	5.3164(0)
5.60	5.6355(-1)	3.9750(0)	11.60	7.2516(-2)	5.3313(0)
5.80	5.2067(-1)	4.0834(0)	11.80	6.8582(-2)	5.3454(0)
6.00	4.8116(-1)	4.1835(0)	12.00	6.4908(-2)	5.3588(0)
6.20	4.4482(-1)	4.2760(0)	12.20	6.1472(-2)	5.3714(0)
6.40	4.1145(-1)	4.3616(0)	12.40	5.8257(-2)	5.3834(0)
6.60	3.8081(-1)	4.4408(0)	12.60	5.5216(-2)	5.3947(0)
6.80	3.5270(-1)	4.5141(0)	12.80	5.2425(-2)	5.4055(0)
7.00	3.2692(-1)	4.5820(0)	13.00	4.9778(-2)	5.4157(0)
7.20	3.0327(-1)	4.6450(0)	13.20	4.7295(-2)	5.4254(0)
7.40	2.8157(-1)	4.7035(0)	13.40	4.4962(-2)	5.4346(0)
7.60	2.6165(-1)	4.7578(0)	13.60	4.2770(-2)	5.4434(0)
7.80	2.4336(-1)	4.8082(0)	13.80	4.0708(-2)	5.4517(0)
8.00	2.2655(-1)	4.8552(0)	14.00	3.8767(-2)	5.4597(0)
8.20	2.1109(-1)	4.8989(0)			
8.40	1.9687(-1)	4.9397(0)			
8.60	1.8378(-1)	4.9778(0)			

$$T = 2000K(\lambda_m = 1.4489(0), M_{\lambda_m} = 4.1174(1), M_{0-\infty} = 9.0725(1))$$

0.76	1.1433(1)	1.2768(0)	5.80	2.3205(0)	8.5301(1)
1.00	2.8127(1)	6.0539(0)	6.00	2.0771(0)	8.5710(1)
1.20	3.7557(1)	1.2725(1)	6.20	1.8642(0)	8.6134(1)
1.40	4.1055(1)	2.0675(1)	6.40	1.6776(0)	8.6487(1)
1.60	4.0242(1)	2.8859(1)	6.60	1.5134(0)	8.6806(1)
1.80	3.7074(1)	3.6616(1)	6.80	1.3686(0)	8.7094(1)
2.00	3.2950(1)	4.3626(1)	7.00	1.2406(0)	8.7355(1)
2.20	2.8686(1)	4.9788(1)	7.20	1.1270(0)	8.7591(1)
2.40	2.4688(1)	5.5119(1)	7.40	1.0259(0)	8.7806(1)
2.60	1.8034(1)	5.9692(1)	7.60	9.3589(-1)	8.8002(1)
2.80	1.8034(1)	6.3600(1)	7.80	8.5542(-1)	8.8181(1)
3.00	1.5397(1)	6.6936(1)	8.00	7.8335(-1)	8.8345(1)
3.20	1.3166(1)	6.9786(1)	8.20	7.1865(-1)	8.8495(1)
3.40	1.1287(1)	7.2226(1)	8.40	6.6045(-1)	8.8633(1)
3.60	9.7047(0)	7.4320(1)	8.60	6.0798(-1)	8.8760(1)
3.80	8.3728(0)	7.6124(1)	8.80	5.6059(-1)	8.8877(1)
4.00	7.2496(0)	7.7683(1)	9.00	5.1770(-1)	8.8984(1)
4.20	6.2999(0)	7.9036(1)	9.20	4.7881(-1)	8.9084(1)
4.40	5.4946(0)	8.0213(1)	9.40	4.4348(-1)	8.9176(1)
4.60	4.8095(0)	8.1241(1)	9.60	4.1133(-1)	8.9262(1)
4.80	4.2247(0)	8.2143(1)	9.80	3.8204(-1)	8.9341(1)
5.00	3.7237(0)	8.2937(1)	10.00	3.5529(-1)	8.9414(1)
5.20	3.2930(0)	8.3638(1)	10.20	3.3083(-1)	8.9483(1)
5.40	2.9215(0)	8.4258(1)	10.40	3.0843(-1)	8.9547(1)
5.60	2.5999(0)	8.4809(1)	10.60	2.8789(-1)	8.9607(1)

(续)

$$T = 2000\text{K} \quad [\lambda_m = 1.4489(0), \quad M_{\lambda_m} = 4.1174(1), \quad M_{0-\infty} = 9.0725(1)]$$

λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$	λ	M_λ	$M_{0-\lambda}$
10.80	2.6902(-1)	8.9662(1)	12.80	1.4439(-1)	9.0660(1)
11.00	2.5166(-1)	8.9714(1)	13.00	1.3635(-1)	9.0688(1)
11.20	2.3568(-1)	8.9763(1)	13.20	1.2886(-1)	9.0714(1)
11.40	2.2095(-1)	8.9809(1)	13.40	1.2188(-1)	9.0739(1)
11.60	2.0734(-1)	8.9851(1)	13.60	1.1536(-1)	9.0762(1)
11.80	1.9476(-1)	8.9892(1)	13.80	1.0927(-1)	9.0785(1)
12.00	1.8312(-1)	8.9929(1)	14.00	1.0358(-1)	9.0207(1)
12.20	1.7233(-1)	8.9965(1)			
12.40	1.6232(-1)	8.9998(1)			
12.60	1.5303(-1)	9.0030(1)			

该表所有数据都列出五位有效数字。各数据均为这个五位数乘以 10 的 n 次幂，数据后括号内的数字即为幂指数(m)。例如 2.3391(-3) 即为 2.3391×10^{-3} ; 8.8345(1) 即为 8.8345×10 ，等等。该表所采用的单位与本书正文中相应量的单位相同。

例 计算在常温下 ($T = 300\text{K}$) 的黑体在波长 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 的辐射出射度 M_{8-14} 。这个数值在热像仪中是经常用到的。

根据 $T = 300\text{K}$ 的表，

$$\begin{aligned} M_{8-14} &= M_{0-14} - M_{0-8} = 2.3699 \times 10^{-2} - 6.4418 \times 10^{-3} \\ &= 1.7257 \times 10^{-2} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}. \end{aligned}$$

§ 1-3 红外辐射通过大气的传输

从目标发出的红外辐射，在到达红外系统之前受到大气中某些气体的选择性吸收、大气中悬浮微粒的散射，因此，辐射能受到衰减。红外辐射通过大气的透过率可表示为：

$$\tau = e^{-\sigma x} \quad (1-12)$$

式中 σ —— 衰减系数；

x —— 通过大气路程的长度。

在大多数情况下

$$\sigma = \alpha + \gamma \quad (1-13)$$

这里 α 是吸收系数，起因于大气中气体分子的吸收； γ 是散射系数，起因于大气中气体分子、霾和雾的散射， α 和 γ 二者均随波长而变化。

大气中各气体成分的含量常用所谓气体混合比表示，它定义为某种气体的体积 V_i 与处于相同温度和压力下的干燥空气体积 V 之比，简称为混合比 q_i ：

$$q_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-14)$$

表 1-3 列出了干燥大气中的各种气体成分的混合比，其中 H_2 、 O_2 、 CO_2 和 CH_4 等气体的成分含量在 80km 高度以下为常数，通常称它们为不变成分气体；水蒸气 H_2O 、臭氧 O_3 、二氧化硫 SO_2 等的含量随温度、高度和位置而变化，称为可变成分气体，其