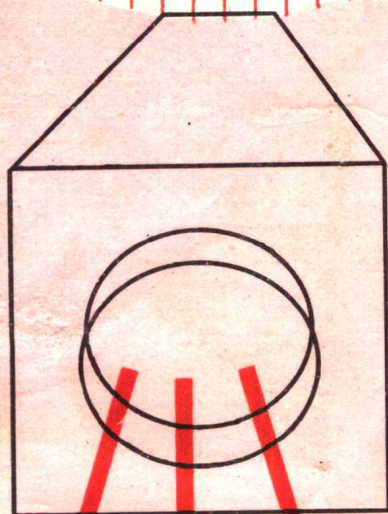


普通高等教育
兵工类规划教材

红外系统

陈玻若 编著



兵器工业出版社

红 外 系 统

陈玻若 编著

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内 容 简 介

本书论述了红外仪器的基本工作原理、结构、性能以及初步设计的方法。内容包括三部分。第一部分即第一至三章,为全书的基础,介绍了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。第二部分即第四至七章,介绍了几类红外系统的结构和工作原理、性能和特点,其中有红外测温仪、红外跟踪系统、红外搜索系统和热成像系统,并就各类系统中的典型产品进行了分析。第三部分即第八章,讲述了红外系统的性能方程及系统设计的内容和初步设计方法,也介绍了示例系统的设计步骤。

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技术、光电技术专业本科学学生教材,也可供从事红外、遥感、光学、光电技术等方面的科学工作者、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

红外系统/陈玻若编著. —北京:兵器工业出版社,1995.8

ISBN 7-80038-852-2

I. 红… II. 陈… III. 红外系统 IV. TN21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 15223 号

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟 10 号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京孙中印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:433.68千字

1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷

印数:1~500 定价:10.00元

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、明确岗位责任,制定了由主审人审查、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。

本教材由陈星旦主审,经中国兵器工业总公司激光及夜视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和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1994 年 6 月

0402 (4/0p

序

兵工红外系列教材在兵器部门领导支持下,即将相继出版,这将为红外专业教学和科研的开展起到一定的推动作用。

红外辐射这一物理现象的发现可追溯到1800年。但直到本世纪的50年代,红外技术才开始进入广泛应用的阶段,从而标志红外物理与技术作为一门新兴学科而逐步形成,随着国际性专业刊物《红外物理》(Infrared Physics)问世(1961年)各种红外专业的学术会议日益频繁,以及60年代激光器的出现,对红外物理与技术的发展产生了深远的影响。

红外光谱学是红外物理与技术研究的重要基础。其中干涉光谱术是近20多年来发展很快,取得显著成就的新技术,它的理论基础虽然可追溯到迈克尔逊早年用干涉图的可见度来估算光谱,但是真正的发展是从1957年国际分光会议开始,特别是把傅里叶变换、干涉,以及快速计算机结合起来,干涉光谱术才得到迅速发展,从实验室的原理实现发展成为现代光学仪器干涉光谱仪,它具有多重光谱同时测定和辐射通过量更高的显著特点……。现在从近红外到远红外,甚至到微波,可以说傅里叶光谱仪占绝对优势。

红外探测器的研究,始终是红外物理与技术进展的核心。一百多年来红外技术发展的历史证明,每种性能更好的新型红外探测器的出现,都标志着人类认识红外辐射现象和本质的进步,有力地推动着整个红外学科的发展。当前,红外探测器研究的前沿是:红外焦平面列阵探测器、红外量子阱探测器、超导约瑟夫森结红外探测器、非平衡模式CMT探测器、以及外延TGS₂热释电红外探测器。目前,尤其前两种最引人注目。

红外遥感与热成像技术是红外物理与技术研究和应用的最新进展的重要标志。包括陆地、海洋、大气在内的地球环境遥感技术取得卓著的成果,受到世界各国的广泛重视,其中尤其以红外和多波段遥感最为活跃。红外遥感由于保密性好,抗干扰本领强,能昼夜连续工作等优点,首先在空中军事侦察中占据十分重要的地位。80年代以来,第一代红外热成像和多光谱遥感器进入了成熟时期。目前,已有数十种军用热像仪。多光谱遥感仪的新趋势是从光机扫描结构过渡到推扫结构。

远红外波段的开拓研究是当前各国科学界密切关注的发展领域之一。激光参与的各种非线性过程,包括差频和频,参量振荡,受激拉曼和极化声子散射等过程,能产生相干宽谱可调谐红外辐射。该方面研究的深入发展,必将给远红外光谱带来革命性的变化,必将给红外在军事上的应用提供新的手段。

兵工红外技术专业系列教材包括:红外物理、红外器件、红外技术,以及红外工程系统等诸多广泛的内容。教材配套性将反映红外学科领域及相关技术发展的轮廓。可供红外技术、光电技术、应用物理等专业的本科学生使用,也可供从事相应技术研究的科学技术人员和工程技术人员参考。

这套教材得到了兵器部门的领导的重视,是在高等工业学校光电技术专业教学指导委员会的指导下编写的,将体现兵工教材特点。它的出版必将在国防科学新技术领域中日益显示出巨大的应用潜力,所以,我认为这是一件很有意义的工作。

王大珩

1992年6月

前 言

本书是根据高等工科院校教学指导委员会光电技术委员会于 1990 年会议通过的教材编写大纲,参考了近年来国内外有关资料和根据我们的教学实践编写的。同年被列入兵工专业红外技术系列教材出版计划。

全书共分三大部分。第一部分即前三章,为基础部分,从整机角度讲述红外系统及系统设计所需的基础知识。这部分中涉及的基本定律、公式将直接引用而不做推导,有关探测器机理方面的内容不做讨论,对这些方面有兴趣的读者可参阅有关书籍。由于调制技术是红外技术中的一个重要部分,而这部分内容在其它课程和书籍中又不被包括,因此,本书中做了着重的讲述。第二部分为第四至第七章,介绍了几类红外系统的结构和工作原理、性能和特点,并就各类中的典型产品进行了分析。第三部分即第八章,讲述了红外系统的性能方程和系统设计的内容及初步设计方法,也介绍了示例系统的设计步骤。另外,本书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,以供系统设计时选用。

本书内各物理量的单位均采用法定计量单位^[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和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,可参阅其它书籍。本课程的参考教学时数为 70 学时左右。

中国科学院长春光学精密机械研究所研究员陈星旦先生担任本书的主审;国家兵器工业总公司兵工教材编审室刘金环高级工程师对本书做了最后审定。作者向这些同志表示衷心的感谢。

在本书取材中,有的是尚未公开发表或交流的技术资料,并未列入参考文献中去,我们对这些资料的作者表示谢意。

由于作者学识浅薄和缺少经验,书中不免有许多缺点甚至谬误之处,诚恳地希望读者不吝指正。

编者

1994 年 3 月

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	(13)
§ 1.4 红外探测器的特性参数	(24)
§ 1.5 红外探测器的特性数据	(29)
§ 1.6 红外探测器使用的致冷器	(32)
第二章 光学系统	(34)
§ 2.1 概述	(34)
§ 2.2 影响像质的因素	(36)
§ 2.3 反射式物镜	(38)
§ 2.4 折射式物镜	(50)
§ 2.5 折反射系统	(53)
§ 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	(83)
§ 3.4 用调制盘进行空间滤波	(84)
§ 3.5 调幅式调制盘	(86)
§ 3.6 调频式调制盘	(95)
§ 3.7 脉冲编码式调制盘	(100)
§ 3.8 调相式调制盘	(104)
§ 3.9 旋转调幅式调制盘的分析与计算	(105)
§ 3.10 调频式调制盘的分析与计算	(116)
§ 3.11 脉冲编码式调制盘的分析与计算	(118)
§ 3.12 双色调制盘	(120)
§ 3.13 不用调制盘的红外系统	(121)
§ 3.14 辐射传输过程的数学描述	(123)
§ 3.15 背景辐射的统计描述	(127)
§ 3.16 空间滤波	(130)
第四章 红外辐射测温	(135)
§ 4.1 红外辐射测温的基本原理	(135)
§ 4.2 全辐射测温仪	(140)

§ 4.3	一种典型的全辐射测温仪	(146)
§ 4.4	亮度测温仪	(153)
§ 4.5	双波段测温仪	(155)
第五章	红外跟踪系统	(158)
§ 5.1	红外跟踪系统的组成及其工作原理	(158)
§ 5.2	对导引装置跟踪系统的基本要求	(160)
§ 5.3	坐标变换器	(161)
§ 5.4	陀螺系统的跟踪原理	(162)
§ 5.5	内框架式陀螺机构	(164)
§ 5.6	红外导弹及其导引装置	(171)
§ 5.7	成像跟踪简介	(174)
§ 5.8	导弹的红外对抗	(176)
第六章	红外搜索系统	(181)
§ 6.1	红外跟踪搜索系统	(181)
§ 6.2	行扫描搜索系统	(187)
§ 6.3	其它扫描方式的搜索系统	(191)
§ 6.4	红外搜索系统的探测概率和虚警概率	(192)
§ 6.5	机载森林探火仪	(196)
第七章	热成像系统	(199)
§ 7.1	热成像系统的组成、工作原理和基本参数	(199)
§ 7.2	扫描方式和扫描机构	(202)
§ 7.3	几种常用的光机扫描方案	(213)
§ 7.4	摄像方式	(216)
§ 7.5	信号处理及显示	(221)
§ 7.6	性能的综合量度	(223)
§ 7.7	对热图像的判断	(236)
§ 7.8	医用热像仪	(237)
§ 7.9	红外前视仪	(242)
§ 7.10	手持式热像仪	(245)
第八章	系统分析与设计	(248)
§ 8.1	红外系统的作用距离	(248)
§ 8.2	扩展源情况下系统的信噪比方程	(252)
§ 8.3	搜索系统和跟踪系统的作用距离方程	(252)
§ 8.4	测温仪器的温度方程	(254)
§ 8.5	系统总体设计的主要内容	(256)
§ 8.6	热成像系统的设计	(264)
§ 8.7	搜索系统的设计	(270)
参考文献		(271)

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,通常由光学系统、光学调制器或光机扫描器、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致冷装置。典型的红外系统组成方框图如图 0.1 所示。

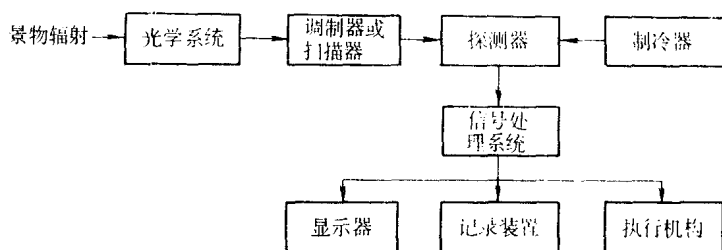


图 0.1 典型红外系统组成方框图

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,以确定目标的坐标或摄取景物图像。当红外系统需要对空间进行搜索,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电子线路放大、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、通信系统和测距系统。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,用来做辐射功率的测定、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

表 0.1 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^[3]

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分 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

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示出来,用于观察景物图像和分析景物特性。

通信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的系统的组合。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。

红外系统按照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^[3],清晰明了。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。见表 0.1(P2~P3)。

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,各取其长,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(如导弹发射阱)和水下目标(如潜水艇)的探测,等等。

红外系统也不是万能的。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:一是主动和被动相结合,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知识。对各原理、定律的公式不做推导,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射比用的大气透射比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);

$c_1 = (3.741382 \pm 0.000020) \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^2$ ——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的增加而迅速增加的;(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)每根曲线互不相交,因此温度愈高,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

微分普朗克公式(1-1),求出极大值,即得到维恩位移定律

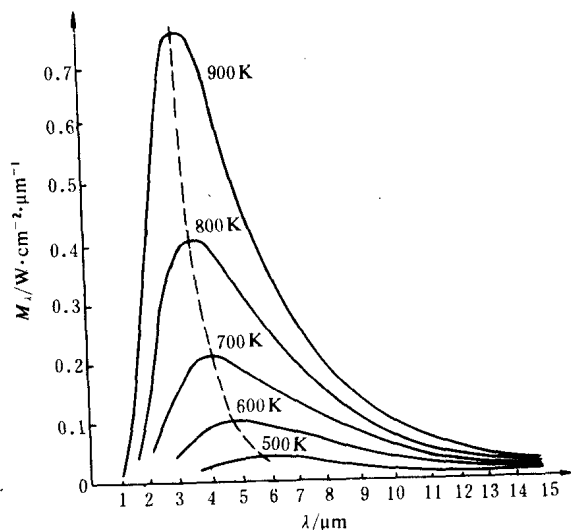


图 1.1 各种温度下绝对黑体的辐射出射度

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

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随黑体绝对温度的变化关系式

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

式中 M_{λ_m} ——光谱辐射出射度的峰值波长(μm);

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

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,可将发射率公式表示为

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

式中 ϵ_λ ——物体的光谱发射率,即在波长为 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

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

同样,对辐射的每一光谱分量

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

也成立。

(1-8)式也表明: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

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

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

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

这样,可以用测反射率的办法测定发射率,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,可以按波长 λ 的不同关系把红外辐射体分成三类:

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

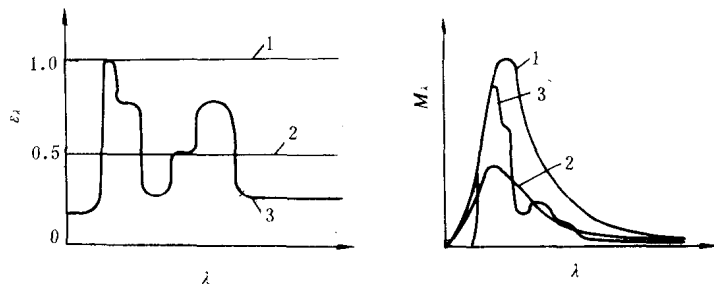


图 1.2 三类辐射体的光谱发射率和光谱辐射出射度与波长的关系曲线

1—绝对黑体; 2—灰体; 3—选择性辐射体

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以从参考文献^[3]中查到。

表 1.1 一些常用材料的发射率^[3]

材料	温度/℃	ϵ	材料	温度/℃	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	0.35~0.95	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

物体的发射率(ϵ)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的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 $M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda$ 。要由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在各种温度、各种波长、各种波段下的 M_λ 、 λ_m 、 M_{λ_m} 、 $M_{0 \sim \lambda}$ 、 $M_{0 \sim \infty}$ 的值计算出来制成表格,便于使用。例如1964年M. A. Врамсон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,对数据做四舍五入处理的。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 $M_{0 \sim \lambda} = \int_0^\lambda M_\lambda d\lambda$ 和积分值 $M_{0 \sim \infty} = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda$ 列于表1.2。

表 1.2 温度 300K、600K、800K、1000K、2000K、
波长 0.76~14 μ m 间的 M_λ 、 M_0 、 λ 等黑体辐射数据表⁽⁵⁾

$T=300\text{K}$ [$\lambda_m=9.6593(0)$, $M_\lambda=3.1266(-3)$, $M_0=4.5930(-2)$]

λ	M_λ	$M_0 \cdot \lambda$	λ	M_λ	$M_0 \cdot \lambda$
0.76	5.7945(-23)	7.3210(-25)	8.60	3.0221(-3)	8.2086(-2)
0.80	1.0518(-21)	1.4762(-23)	8.80	3.0596(-3)	8.3169(-2)
1.00	5.5529(-17)	1.2333(-18)	9.00	3.0882(-3)	9.4318(-2)
1.20	6.6076(-14)	2.1405(-15)	9.20	3.1084(-3)	1.0032(-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	3.3125(-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)	7.6909(-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(-2)	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)