



# 红外热成像测温 原理与技术

---

杨立 杨楨 等著

---



科学出版社

# 红外热成像测温 原理与技术

杨立 杨楨 等著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是在海军工程大学工程热物理研究室十多年的教学科研成果经验总结的基础上撰写而成的。本书在介绍红外热像仪的基本概念、红外辐射特性及其传输基本知识的基础上,重点论述红外成像测温原理、非漫射体红外测温技术、变谱法红外测温技术、军事目标和海面的红外成像测温技术,讨论影响红外测温准确性的因素和红外测温修正方法,介绍红外热像仪的标定和测试技术。

本书可作为高等院校能源、动力、光学、机械、船舶和交通运输等专业的高年级本科生和研究生的教学用书,也可作为相关科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

红外热成像测温原理与技术/杨立等著.—北京:科学出版社,2012  
ISBN 978-7-03-034817-3

I. ①红… II. ①杨… III. ①红外成象系统-红外测温仪-研究  
IV. ①TH811.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 125652 号

---

责任编辑:杨向萍 陈 婕 潘继敏 / 责任校对:包志虹  
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 6 月 第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 6 月 第一次印刷 印张:11 3/4

字数:234 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

自从 1964 年研制出具有测温功能的红外热像仪以来,红外成像测温技术得到广泛应用,如传热研究、设备红外检测、红外遥感、军事目标红外测量、大气红外检测、工业设备红外监控、交通管理、医学热诊断等。特别是近年来随着半导体集成电路技术、热辐射探测器材料研究的进步,采用非制冷红外焦平面阵列探测器的热像仪的成功研制,使得热像仪的体积更小、价格更低、使用更方便,红外热像仪的应用已覆盖从民用到国防的诸多领域。由于红外热像仪温度测量原理较复杂,影响温度测量准确性的因素较多,在许多人看来红外测温的准确度不高,因此,开展红外辐射温度测量技术的研究,探索提高红外测温准确性的方法变得日益迫切。红外热像仪测温精度是在实验室近距离通过对黑体辐射源的标定来保证的,但是在实际测量中被测物体往往不满足黑体辐射特性,物体表面发射率和反射率、环境辐射、大气辐射等都会对红外热像仪测温造成影响。目前,红外热像仪测温的修正方法是假设被测物体满足灰体近似,通过设定被测物体表面发射率和环境温度或反射温度来修正温度测量值,这种修正方法对发射率较高的非金属物体的红外测温能基本满足测量准确性的要求。但对低发射率物体、非漫射表面、环境存在多个高温热源和远距离测量等情况,目前的测温修正算法误差太大,不能满足红外测温的需要。近十多年来,作者在红外辐射测温、设备状态红外检测和故障定量识别、军用目标红外特征测量等方面开展了一系列的教学和科研工作,本书归纳整理了部分研究结果。

全书共分 9 章。第 1 章介绍红外热像仪的基本概念和发展历史;第 2 章介绍红外辐射及其传输的基本知识、基本定律;第 3 章介绍红外成像测温原理,着重介绍红外辐射温度测量和发射率测量的基本方法;第 4 章介绍红外成像测温误差分析与修正方法,着重介绍环境温度、邻近高温物体、太阳辐射、探测器温度等因素对红外测温的影响及其修正方法,介绍反射温度补偿法对红外测温的修正与补偿计算;第 5 章介绍非漫射体红外成像测温技术;第 6 章介绍基于变谱法的红外测温技术;第 7 章介绍红外热像仪的标定与性能测试,介绍黑体辐射源和红外热像仪主要性能参数的标定与测试方法;第 8 章介绍军事目标的红外热成像温度测温技术,主要介绍军事目标红外测温的模型、红外测温的计算公式和对影响军事目标测温准确性的方法进行修正;第 9 章介绍海面温度的红外热成像测温技术,主要介绍海面反射率与发射率的计算、海面辐射分析和海面温度红外测量原理与测量方法。

本书第 1~3 章、4.1 节、4.3 节、4.4 节和第 7 章由杨立撰写,第 4.2 节、4.5

节、第 5 章、第 6 章和第 8 章由杨桢撰写,第 9 章由张士成和陈翮撰写,全书最后由杨立统稿和修改。

本书在撰写过程中得到海军工程大学舰艇动力工程专业高年级学生和工程热物理专业的研究生刘慧开、张健、范春利、杨宝东、杜永成、吕事桂、王为清、彭友顺等的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥之处,恳请读者提出宝贵意见和建议。

作 者

2012 年 3 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 红外热像仪概述</b> .....	1
1.1 红外热像仪简介 .....	1
1.2 红外热像仪的发展 .....	3
1.3 红外热像仪的组成及工作原理 .....	4
1.3.1 红外热像仪的组成部分 .....	5
1.3.2 红外热像仪工作原理 .....	12
1.3.3 红外热像仪的主要性能参数 .....	15
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 红外辐射基本理论</b> .....	18
2.1 概述 .....	18
2.2 黑体的红外辐射规律 .....	20
2.2.1 辐射的光谱分布规律——普朗克辐射定律 .....	20
2.2.2 辐射光谱的移动规律——维恩位移定律 .....	21
2.2.3 辐射功率随温度的变化规律——斯特藩-玻尔兹曼定律 .....	22
2.2.4 黑体辐射能按波段的分布 .....	22
2.3 实际物体的红外辐射规律 .....	23
2.4 辐射度学的一些基本概念 .....	26
2.4.1 常用辐射量 .....	27
2.4.2 辐射度量中的基本规律 .....	29
2.4.3 发射率及其变化规律 .....	30
2.4.4 吸收率及其变化规律 .....	34
2.4.5 反射率及其变化规律 .....	35
2.4.6 反射率、吸收率和发射率之间的关系 .....	37
2.5 红外辐射的大气传输 .....	37
2.5.1 大气吸收 .....	39
2.5.2 大气散射 .....	40
2.5.3 大气辐射传输的计算 .....	43

参考文献 .....	45
<b>第 3 章 红外热成像测温原理</b> .....	47
3.1 概述 .....	47
3.2 红外测温原理 .....	48
3.3 红外温度测量方法 .....	52
3.3.1 温度的直接测量法 .....	52
3.3.2 温度的相对测量法 .....	53
3.3.3 双波段测温法 .....	53
3.4 物体发射率测量方法 .....	54
3.4.1 利用热像仪测量表面发射率的误差分析 .....	55
3.4.2 几种测量发射率的方法 .....	55
参考文献 .....	57
<b>第 4 章 红外成像测温误差分析与修正方法</b> .....	60
4.1 红外测温误差计算分析 .....	60
4.1.1 被测物体表面发射率的影响 .....	61
4.1.2 被测物体表面吸收率误差的影响 .....	63
4.1.3 大气透射率误差的影响 .....	63
4.1.4 大气发射率误差的影响 .....	64
4.1.5 大气温度误差的影响 .....	65
4.1.6 环境温度误差的影响 .....	65
4.1.7 辐射温度的影响 .....	65
4.2 探测器温度对非制冷微测辐射热计热像仪测温的影响与修正 .....	66
4.2.1 非制冷微测辐射热计热像仪测温原理与计算 .....	67
4.2.2 探测器温度对测温的影响 .....	68
4.2.3 修正原理及方法 .....	68
4.2.4 实验验证 .....	72
4.3 太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响 .....	73
4.3.1 测温原理 .....	74
4.3.2 测温计算及误差分析 .....	74
4.3.3 太阳辐射吸收率对测量误差的影响 .....	75
4.3.4 太阳辐射的影响 .....	75
4.4 邻近高温物体对红外测温的影响 .....	76
4.4.1 测温计算及误差分析 .....	77

---

4.4.2 高温物体对测温的影响分析 .....	78
4.5 反射温度补偿法对红外测温的修正与补偿计算 .....	81
4.5.1 红外热像仪测温原理与计算 .....	81
4.5.2 反射温度补偿法及其原理 .....	81
4.5.3 误差分析与补偿效果比较 .....	83
4.5.4 实验验证 .....	87
参考文献 .....	88
<b>第5章 非漫射体红外热成像测温技术 .....</b>	<b>90</b>
5.1 实际物体红外热像仪测温原理 .....	90
5.2 红外热像仪测温计算 .....	92
5.3 实际物体温度测量实验验证 .....	93
5.3.1 实验仪器介绍 .....	93
5.3.2 实际物体辐射特性的实验 .....	95
5.3.3 被测物体周围存在高温物体的反射温度补偿法实验 .....	100
5.4 一种测量实际物体发射率的实用方法 .....	104
5.4.1 测量原理 .....	104
5.4.2 实验验证 .....	105
参考文献 .....	106
<b>第6章 基于变谱法的红外热像仪测温技术 .....</b>	<b>108</b>
6.1 红外热像仪测温原理与计算 .....	108
6.1.1 红外热像仪测温原理 .....	108
6.1.2 热探测器响应度分析 .....	109
6.1.3 非制冷红外热像仪测温计算 .....	111
6.1.4 测温公式准确性的实验验证 .....	113
6.2 红外热像仪测温的变谱法 .....	114
6.2.1 变谱法的原理 .....	114
6.2.2 技术实现 .....	115
6.3 灰体材料的测温 .....	116
6.3.1 灰体材料测温原理 .....	116
6.3.2 测温方法验证 .....	117
6.4 郎伯体材料的测温 .....	120
6.4.1 郎伯体材料的测温原理 .....	120
6.4.2 测量方法验证 .....	121

---

6.5	复杂背景环境中红外热像仪测温的变谱法 .....	124
6.5.1	理论基础 .....	124
6.5.2	方法验证 .....	126
	参考文献 .....	129
<b>第7章</b>	<b>红外热像仪的标定与性能测试</b> .....	<b>131</b>
7.1	黑体型辐射源 .....	131
7.1.1	黑体和黑体型辐射源 .....	131
7.1.2	典型黑体辐射源的结构 .....	133
7.2	黑体腔的有效发射率 .....	134
7.3	红外热像仪的标定 .....	137
7.3.1	准确度校准 .....	137
7.3.2	测温一致性校准 .....	138
7.4	红外热像仪性能测试 .....	138
7.4.1	噪声等效辐射测试 .....	138
7.4.2	等效噪声温差测试 .....	139
7.4.3	最小可分辨温差测试 .....	140
7.4.4	最小可探测温差测试 .....	142
7.4.5	相对光谱响应测试 .....	143
	参考文献 .....	143
<b>第8章</b>	<b>军事目标红外热成像温度测量技术</b> .....	<b>144</b>
8.1	军事目标测温模型与测温计算 .....	145
8.2	军事目标表面发射率的测量技术 .....	147
8.2.1	影响发射率大小的因素分析 .....	147
8.2.2	测量发射率的方法 .....	149
8.3	大气透射率的测量 .....	150
8.3.1	大气衰减的原因 .....	150
8.3.2	现有大气影响的修正方法评述 .....	151
8.3.3	大气透射率算法 .....	152
8.3.4	大气透射率的现场标定法 .....	153
8.3.5	一种测量大气透射率的方法 .....	154
8.4	背景辐射的修正 .....	155
8.4.1	太阳辐射 .....	155
8.4.2	天空背景辐射 .....	157

---

8.4.3 地表辐射 .....	158
8.4.4 等效背景辐射的测量 .....	158
参考文献 .....	159
<b>第 9 章 海面温度的红外热成像测温技术 .....</b>	<b>161</b>
9.1 海面反射率与发射率计算 .....	161
9.2 海面辐射分析 .....	167
9.3 海面温度测量原理 .....	170
9.3.1 垂直海面方向温度测量 .....	171
9.3.2 观测方向天顶角较大时海面温度测量 .....	171
9.3.3 考虑太阳辐射影响时海面温度的测量原理 .....	173
参考文献 .....	175

# 第 1 章 红外热像仪概述

## 1.1 红外热像仪简介

红外热像仪是接收物体发出的红外辐射,并将其转换为可见光图像的装置。这种热像图与物体表面的表观温度分布场相对应,实质上是被测目标各部分的红外辐射分布图。热辐射图像主要是由温度差和发射率差产生的。由于红外热像仪利用景物自身发射的热辐射成像,从根本上解决了夜间的成像探测和观察问题。红外成像技术有三大功能:一是将人眼的观察范围扩展到红外光谱区;二是极大提高人眼观察的灵敏度;三是获得客观世界与热运动相关的信息<sup>[1]</sup>。

红外热像仪不但在军事应用中占有重要地位,在民用方面 also 具有很强的生命力。它具有以下特点<sup>[2]</sup>:

(1) 它属于非接触测量技术,适合检测快速运动目标、带电目标和微小目标的温度。

(2) 测温面积大,测温效率高,能直观显示物体表面温度场。热像仪可同时测量物体表面各点温度的高低,并以图像形式显示出来。民用热像仪的热图可以显示  $640 \times 640$  个单元的温度分布,空间分辨率很高。

(3) 温度分辨率高。由于热像仪可以同时显示两点的温度值,可准确区分很小的温差,温度分辨率可达  $0.01^{\circ}\text{C}$  甚至更高。

(4) 可采用多种显示方式。热像仪输出的视频信号可以用伪彩色或灰度的形式显示热图像。通过模数转换处理,还可用数字显示物体各点温度。

(5) 可进行数据存储和计算机处理。

红外热像仪按工作方式可分为主动系统与被动系统、单元系统与多元系统、光点扫描系统与调制盘扫描系统、成像系统与非成像系统。

按检测物体的点、线、面分,红外辐射测温系统依次有红外点温仪(又称红外测温仪)、红外行扫仪、红外热电视和红外热像仪。

红外点温仪主要用于测量物体一个相对小的面积上的平均温度,因此每次测量的区域有限,当需要大面积测量时,必须在被测区域内选择多点、多次测量才能完成,相当麻烦。但由于它轻巧便携、坚固耐用、使用方便,因而成为设备巡检和维护人员的得力工具和必要手段。红外热电视采用热释电靶面探测器和标准电视扫描方式,结构简单、造价低、无机械转动、无需特殊冷却,不足之处是温

度分辨率较低,适合于工业系统使用。

按应用领域,红外成像系统可以分为军用系统与民用系统两大类型。

(1) 军用热像仪。它只要求对目标清晰成像,不需要定量监测温度,它的性能要求重点是高的取像速度和高的空间分辨率,被称为“红外前视系统(forward looking infrared system, FLIRS)”,现在用来泛指任何快速帧扫描热像仪。

(2) 民用热像仪。在大量工业、医疗、交通、科研实验等场合,不仅需要对被测物体表面的热场分布进行清晰成像,而且强调精确的温度测量。与军用红外系统相比,民用热像仪更强调温度测量的灵敏度,称为“红外热像仪”。

按扫描读出方式,热像仪可分为光机扫描热像仪和凝视型热像仪。

(1) 光机扫描热像仪。早期研制和生产的热像仪大都采用光学机械扫描仪对单元器件进行高速扫描,得到物体的实时热图,但系统的探测能力不高。采用线列探测器进行扫描,可提高系统的探测能力。根据扫描器在光路中位置的不同,热像仪又分为物方扫描和像方扫描两种扫描方式。根据探测器相对于行扫方向排列方式的不同,热像仪又分为串扫热像仪和并扫热像仪。

(2) 凝视型热像仪。随着焦平面阵列探测器的发展,现代热像仪采用了大面阵探测器,系统取消了光学机械扫描器,实现了凝视成像,使热像仪结构大大简化,性能大幅提高,使用十分方便。

红外热像仪发展到目前已有三代产品。第一代红外热像仪就是制冷型的光机扫描热像仪,探测器单元数少于 200 元。光机扫描热像仪的成像清晰度相当好,取得的热信息相当丰富,但是扫描系统繁杂,制造和使用维护都十分不便。为此又研制出第二代红外热像仪,其特点是探测器采用了扫描型的焦平面探测器,探测器单元数少于 106 元。第三代红外热像仪采用大面阵焦平面探测器,探测器单元数大于 106 元,革除了高速运动的机械扫描机构,采用自扫描的固体器件做成凝视型红外焦平面热像仪。

按工作波段分类,热像仪可分为长波红外热像仪、中波红外热像仪、短波红外热像仪、双波段红外热像仪和多波段红外热像仪。

根据完成帧扫描的时间分类,热像仪又可分为低速热像仪、中速热像仪和高速热像仪<sup>[2]</sup>。低速热像仪的帧扫描时间高于 10s,如美国巴恩斯(Barnes)工程公司生产的第一台获得广泛应用的机械扫描远红外热像仪,采用无需制冷的半导体测辐射计,每帧扫描时间为 2min,温度分辨率为 0.04℃;苏联生产的红宝石热像仪采用液氮制冷的 InSb 光导探测器,帧扫描时间为 40s,每帧 240 行,温度分辨率为 0.1℃。中速热像仪的帧扫描时间为 0.1~10s,如日本生产的红外眼热像仪,在水平和垂直方向的扫描时间为 10s,采用 HgCdTe 红外探测器,温度分辨率为 0.1℃;美国得克萨斯仪器公司生产的 Texas 热像仪,采用 HgCdTe 红外探测器,帧频为 0.25 Hz,温度分辨率达到 0.07℃。高速热像仪的帧扫描时间低

于 0.1s, 通常的帧频为 16~25Hz, 采用多元探测器帧频可提高到 50Hz, 如瑞典 AGA 公司生产的 AGA680 型、AGA750 型和 AGA780 型系列热像仪等。

按系统是否具有制冷装置分类, 热像仪分为制冷型热像仪和非制冷型热像仪。制冷型热像仪温度分辨率高、重量较轻, 但体积大、价格高, 使用不方便; 非制冷型热像仪在探测性能方面不及制冷型的, 但价格便宜、体积小、重量轻、使用方便, 在军事领域的低端应用和民用等方面有广阔的应用前景。

## 1.2 红外热像仪的发展

利用红外辐射原理进行温度测量的仪器是从简单到复杂逐渐发展而成的, 最先应用于军事。1929 年, Czerny 等研制出蒸发式热像仪<sup>[3]</sup>。蒸发式热像仪是根据如下原理设计而成的: 当红外辐射投射到涂有挥发性的薄油膜上时, 膜片吸收热辐射使其局部温度发生变化, 进而导致油膜的蒸发和膜厚度的改变, 在可见光的照射下可看到不同颜色的干涉条纹。1929 年, 科勒发明了对近红外辐射响应灵敏的银氧铯光电阴极。20 世纪 30 年代初, 美国工程师法恩斯沃思和霍尔斯特提出了光电图像转换原理。在此基础上, 荷兰、德国和美国等国研制成红外变像管。红外变像管是将不可见的红外图像变成可见图像的真空电子器件。在红外变像管中, 当外来辐射成像于光电阴极时, 光电阴极发射电子, 电子经电子透镜聚焦并加速后, 轰击荧光屏使之产生较亮的可见图像。由于很少有军事目标能在变像管的响应范围内产生强辐射, 于是就需要提供一种照射源, 因此这种使用变像管的系统称为主动式系统<sup>[4]</sup>。1952 年, 美国陆军研制出第一台光机扫描的慢帧速热像记录仪, 它使用一个 16in(1in=2.54cm)的探照灯反射镜、一个双轴扫描器和一个辐射热探测器, 所成的热像被记录在照相胶片上, 属于非实时装置。随着制冷型、短时间常数的铟化铟(InSb)和掺镉汞(Ge:Hg)等光电探测器的出现, 1956 年芝加哥大学在空军资助下试制出第一台长波前视红外仪器, 它由 AN/AAS-3 型条幅式绘图仪改进而成, 在绘图仪的计数回转光楔扫描器上加一个节点俯仰反射镜, 使单个探测器能描绘出二维光栅图形<sup>[5]</sup>。1960 年, Perkin-Elmer 公司为美国陆军研制出第二台实时长波前视红外仪器。这台仪器叫做棱镜式扫描仪, 它利用两个旋转折光棱镜对单个 InSb 探测器产生螺旋式扫描, 它对后续军用和民用热像仪的发展起到很大的促进作用。1965 年, 得克萨斯仪器公司开发研制出第一代用于军事领域的机载红外成像装置, 称为前视红外系统(FLIR)。从此以后, 前视红外系统如雨后春笋, 快速发展。在 1960 年至 1974 年间, 美国至少研制出 60 种不同的前视红外系统, 并生产了数百具产品<sup>[5]</sup>。

1964 年, 瑞典 AGA 公司和瑞典国家电力局联合成功研制第一台工业用热像仪(Thermovision 650), 它用液氮制冷, 仪器重量达 30 多公斤, 使用很不方便。

尽管笨重,但在各种应用中,特别是电力设备维修中,这台工业用热像仪体现了其应用价值。此后,工业用热像仪的发展经历了以下过程<sup>[6]</sup>:

(1) 1973年,世界上第一台便携式红外热成像系统诞生(Thermovision 750)。

(2) 1979年,世界上第一台与计算机连接的、具有数字成像处理系统的热成像系统诞生。

(3) 1986年,世界上第一台热电制冷红外成像系统面世,从而摆脱了大的气瓶。

(4) 1991年,世界上第一台真正双通道数字式12bit研究型热成像系统——THV900(AGEMA)诞生。

(5) 1995年,第一台获得ISO 9001国际质量体系认证的、焦平面、内循环制冷性热成像系统出现。

(6) 1997年,世界上第一台非制冷、长波、焦平面热像仪THV570诞生,这是红外技术领域的一次革命性转变,将世界红外检测技术推向一个崭新的阶段,启动速度由原来的5min下降到45s。

(7) 2000年,世界上第一台集红外和可见光图像于一体的非制冷、长波、焦平面的红外热像仪诞生。

红外成像属于技术密集度高、投资强度大、研究周期长、应用前景广泛的高新技术产业,其发展方向主要有以下6个方面<sup>[1]</sup>:

(1) 集成化。探测器材料与电路集成,光、机、电集成。

(2) 大阵列。长线列如 $6000 \times 1$ (美国已用于高空预警机),大面阵如 $2048 \times 2048$ (中短波)、 $640 \times 480$ (长波)。

(3) 小型化。缩小体积,减轻重量,便于携带。

(4) 多色化。向双色、多光谱发展,包括拓展光谱波段,将光谱波段划分为更细致的波段等。

(5) 高速化。增加探测器单元数量,快速获取目标热图,提高焦平面探测器的帧速和采样频率。

(6) 智能化。在探测器芯片上实现非均匀性校正、图像处理、对背景辐射的自适应探测等。

### 1.3 红外热像仪的组成及工作原理

在热像仪中具体实现由红外光变为电信号、由电信号变为可见光的转换功能是由热像仪各个部件完成的。热成像系统一般包括四个基本组成部分:光学成像系统(包括扫描系统)、红外探测器及制冷器、电子信息处理系统和显示系

统。光学成像系统的作用是将物体发射的红外线会聚到焦面上,扫描器既要实现光学系统大视场与探测器小视场匹配,又要按照显示制式进行扫描,探测器将红外辐射变成电信号,电子处理单元对电信号进行放大和处理,显示器将电信号用可见的图像形式显示出来。

### 1.3.1 红外热像仪的组成部分

#### 1. 光学系统

红外光学系统的作用是收集辐射,将辐射会聚到探测器灵敏面上。光学系统的使用可大大提高灵敏面上的照度,提高仪器信噪比,增大系统探测能力。红外光学系统分为透射式光学系统、反射式光学系统和混合式光学系统<sup>[2]</sup>。

##### 1) 透射式光学系统

透射式红外光学系统也称折射式红外光学系统,它一般由几个透镜或组合透镜构成,每个组合透镜可看做一个光学系统。组合透镜系统由若干个单透镜组成,这种系统能很好地消除像差,获得较好的像质,但总透过率较低。近年来,高透过率红外光学材料的发展为透射式系统的应用创造了条件。在前视红外系统设计中,多半倾向于采用透射系统。

##### 2) 反射式光学系统

由于红外辐射波长较长,能透过它的材料很少,因而早期的光学系统大都采用反射式红外光学系统。透镜的通光口径和焦距一定时,反射系统的反射和吸收损失比透射系统的吸收损失小,且造价低廉,但像质比不上透射系统。反射式光学系统按截面形状不同可分为球面形、抛物面形、双曲面形及椭球面形等4种。

##### 3) 混合式光学系统

混合式光学系统也称折射-反射式光学系统,它结合了反射式和透射式系统的优点,采用球面镜取代非球面镜,同时用补偿透镜来校正球面反射镜的像差,从而获得较好的像质。但这种系统往往体积大,加工困难,成本较高。

#### 2. 增透膜

碱金属卤族化合物红外材料折射率大多在1.5~2.0,其红外透过率较高。而硫族化合物、硅和锗的折射率要高得多,在材料表面会产生高反射损失。为了消除在给定波长上的反射,可在表面镀一层增透膜,其光学厚度等于 $1/4$ 波长,可在一个波带内减小这种反射损失。对于硅、锗和三硫化砷,可在一定波长间隔内将绝对透射率提高一倍<sup>[4]</sup>。通常对折射系数大于1.6的任何透射材料都镀膜。

### 3. 滤光片

为了避免来自背景、大气和接收器周围环境的干扰辐射,常常要用到滤光片。滤光片分为短波通、长波通和带通三种。短波通滤光片能透过短于某特定截止波长的辐射;长波通滤光片能透过大于某特定截止波长的辐射;带通滤光片只能透过一定波段的辐射。

滤光片按其工作原理可分为两类:吸收滤光片和反射或干涉滤光片。吸收滤光片会吸收不希望透过的波长的辐射。吸收滤光片用得较少,因为它的吸收特性只有在极少情况下符合所希望的光谱特性。然而对长波通和短波通滤光片来说,一般仍用这一类滤光片。干涉滤光片是以程序控制的方法在基片上或直接在透镜以及对辐射敏感的材料上蒸发一层甚至上百层  $1/4$  波长厚的介电材料而制成的。为了提高反射率要交替使用具有高折射率和低折射率的材料作干涉膜。目前已可做成任意希望的光谱波段滤光片。

### 4. 红外探测器

#### 1) 红外探测器分类

红外探测器是将红外辐射转换为电信号的元件,可分为量子探测器和热电探测器(非量子探测器)两大类。量子探测器吸收红外辐射后,入射光子与探测器材料的电子间直接相互作用,其晶格原子范围内的电子状态发生变化,产生光电效应。热电探测器吸收红外辐射后,引起探测器某一电特性的变化,它不是对光子的响应,而是正比于所吸收的辐射能量。探测器的响应正比于吸收的光子数,因此有量子计数器之称。

##### (1) 量子探测器(光电探测器)。

量子探测器主要利用外光电效应和内光电效应工作。

外光电效应是由某些金属、金属氧化物或半导体材料吸收辐射或吸收光子后发射电子产生的,这种现象统称为光电子发射。这种效应实际上是把光能转变为电能的效应,其前提是吸收的光子能量要大于或等于电子逸出功。电子逸出功是材料的一种特征值。光电管、光电倍增管、光电图像转换器和增强器都是根据这种原理工作的。

内光电效应是指材料吸收辐射后产生准自由电子或者电子-空穴对的现象。它与外光电效应相反,产生的载流子没有离开材料本身,而是留在材料内部并改变材料电子状态。内光电效应又分为光电导效应和光伏效应。当半导体吸收光子后,半导体内有些电子和空穴从原来的不导电束缚状态转变为能导电的自由状态,使它的电导率明显增大,这种现象称为光电导效应。利用半导体光电导效应制成的红外探测器叫做光电导探测器(简称 PC 器件),它是种类最多应用最

广泛的一类量子探测器。

光电导探测器又可分为单晶型和多晶薄膜型两类。单晶型光电导探测器分为本征型和掺杂型两类,早期以本征型锑化铟(InSb)为主,能探测 $7\mu\text{m}$ 以下的红外辐射,后来发展了响应长波的本征型碲镉汞(HgCdTe)和碲锡铅(PbSnTe)等探测器。掺杂型主要有适用于 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的Ge: Hg及长波限分别在 $30\mu\text{m}$ 处的Ge: Cu、 $21\mu\text{m}$ 处的Ge: Cd和 $7\mu\text{m}$ 处的Ge: Au。多晶薄膜型探测器的种类较少,主要有响应 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的硫化铅(PbS)、响应 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的硒化铅(PbSe)和PbTe(碲化铅)<sup>[8]</sup>。

pn结及其附近吸收光子后产生电子-空穴对,结间的电场使这两类载流子分开,形成光生伏特电压,这就是pn结的光伏效应,利用光伏效应制成的红外探测器称为光伏探测器(简称PV器件)。光敏电阻、光电二极管和光电池都是根据这种效应制成的。常用的光伏型探测器有砷化铟(InAs)、碲镉汞(HgCdTe)和光伏型锑化铟(InSb)。

除以上三种主要光电效应外,还有其他许多不太重要的效应,如光电磁效应、光子牵引效应、光电晶体管、红外量子计数器、磷光体和红外照相胶片等<sup>[9]</sup>。

量子探测器的优点:

- ① 探测器响应度与波长有关,探测器响应是有区间的。例如,锑化铟(InSb)响应区间为 $3\sim 5.6\mu\text{m}$ ;碲镉汞(HgCdTe)响应区间为 $8\sim 14\mu\text{m}$ 。
- ② 探测器响应频率快,能分辨高频脉冲( $<1\text{GHz}$ )辐射。
- ③ 量子效率高,探测器很灵敏。
- ④ 对长波探测器需要制冷,波长越长,制冷温度越低。开发能在高温下工作的探测器是发展趋势,在灵敏度要求不高时,可采用常温下工作的热探测器。

(2) 热电探测器。

热电探测器利用材料的热效应而制成。某些材料因吸收红外辐射后,其温度发生变化,从而导致材料某些性质的变化<sup>[9]</sup>。热电探测器有以下几种:

- ① 热敏电阻红外探测器。它是一种根据物体受热后电阻会发生变化的性质而制成的红外探测器。它是一种无选择探测器,从X射线到微波波段都可响应。它的时间常数大,为毫秒级。一些红外测温仪常用此探测器。

- ② 温差电堆探测器(热电堆探测器)。两种不同的导体以及它们之间的接头所组成的电路中,一个接头受热,回路就会产生电压,这种效应称为温差电效应。利用温差电效应制成的感温元件称为温差电偶(也称热电偶)。器件接头上因吸收辐射而出现温度差时,称该器件为辐射温差电偶。几个热电偶串联,可组成辐射温差热电堆。辐射温差电堆通常的制作方法是在衬底上蒸发一层金属薄膜,然后再蒸发第二种金属,并与第一层金属膜部分重叠,从而形成若干接头。采用蒸发技术制成的热电堆时间常数可达毫秒级。红外测温仪常用此探测器。

③ 测辐射热计。因入射辐射加热而引起电阻变化的热探测器称为测辐射热计,它包括金属(电阻)测辐射热计、热敏电阻测辐射热计、超导测辐射热计、低温(碳)测辐射热计和锗测辐射热计<sup>[4]</sup>。1982年,人们制造出硅微测辐射热计焦平面阵列<sup>[1]</sup>。典型的电阻测辐射热计由一对尽可能一样的金属片构成,一个称为作用单元,受入射辐射的照射;另一个称为补偿单元,仔细屏蔽开入射辐射。用这两个单元作为电桥的两个臂,可使探测器温度的缓慢变化不影响到电桥的平衡。

④ 热释电探测器。它是利用某些铁电材料的热释电效应制成的。这些铁电材料吸收红外辐射后,温度升高,表面电荷发生明显变化,从而实现对红外辐射的探测。铁电体有硫酸三甘肽(TGS)等,主要作为电子束扫描型红外热电视的感温元件。

⑤ 焦平面阵列(focal plane array)。为了提高红外系统的作用距离、响应速度及扩大视场和简化光机扫描结构,红外探测器由单元向多元和焦平面阵列方向发展<sup>[2]</sup>。当焦平面器件的元数足够多、能满足视场等技术要求时,红外系统就不需要光机扫描了,光机扫描由电子扫描代替,这类系统称为红外凝视系统,用于凝视红外系统的器件称为凝视红外焦平面器件。

前面介绍的探测器几乎都可以制作多元和焦平面器件。报道较多的焦平面器件有 PtS、PtSi、InSb、HgCdTe、硅掺杂、超导和热释电等。焦平面阵列包括探测器和焦平面信号处理电路两部分,有混合式、单片式等多种结构。单片式结构是在同一种材料上同时制备光敏元件和信号处理单元。混合式焦平面器件是分别制备红外焦平面阵列和相应的信号处理芯片,然后互连接而成。焦平面信号读取有用电耦合器件(CCD)、金属氧化物半导体(MOS)器件和电荷注入器件(CID)等三种方式。焦平面器件分制冷型和非制冷型两类。由于制冷型焦平面器件需要复杂的制冷机,热像仪的价格、体积、重量和可靠性都受到限制,因此非制冷焦平面阵列(uncooled focal plane array, UFPA)的研制成为人们关注的焦点。20世纪70年代后期,美国等国家秘密开始研制非制冷红外焦平面探测器,到1992年,美国、英国等国家的非制冷红外焦平面探测器已进入生产。非制冷焦平面探测器的出现,使非制冷热像仪的价格降低到第一代制冷型热像仪的1/10以下,使热像仪在更大规模、更多领域得到应用。非制冷探测器通常由一个二维的热探测像素阵列组成,每个像素包括一个连接到衬底的敏感区,红外辐射照射到一个探测像素上,被敏感区域吸收,引起其温度升高,热量从敏感区流向周围环境。信号处理电路由探测信号多路读出电路、信号时延和积分电路、A/D变换电路、背景消除/抑制、抗模糊、校正非均匀性电路等组成。

## 2) 红外探测器的性能参数

### (1) 响应度 $\mathfrak{R}$ (响应率)。

探测器的输出均方根电压信号  $V_s$  (或均方根电流  $I_s$ ) 与入射辐射功率均方根值  $P$  之比, 也就是投射到探测器上的单位均方根辐射功率所产生的均方根信号(电压或电流), 称为探测器响应度  $\mathfrak{R}$ , 单位为  $V/W$  或  $A/W$ , 它表示探测器把红外辐射转换成电信号的能力。 $\mathfrak{R}$  为电压响应度, 可表示为

$$\mathfrak{R} = \frac{V_s}{P} \quad (1.1)$$

如果是恒定入射辐射, 探测器的输出信号也是恒定的, 这时的响应度称为直流响应度。如果入射辐射是交变辐射, 那么探测器的输出信号为交变信号, 这时的响应度为交流响应度。响应度随调制频率的变化叫做探测器的频率响应。探测器的响应度又可分为黑体响应度和单色响应度两种。通常, 探测器的响应度是随光谱变化的。

电阻测辐射热计的响应度<sup>[10]</sup>为

$$\mathfrak{R} = \frac{i_b \alpha R \eta \beta}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (1.2)$$

式中,  $i_b$  为偏置电流;  $\alpha$  为电阻温度系数;  $\eta$  为辐射吸收因子;  $G$  为探测器与环境之间的热导;  $\omega$  为辐射调制频率;  $\tau$  为热响应时间。由式(1.2)可知, 热探测器的响应度正比于薄膜的电阻温度系数, 反比于器件的热导。对于特定的材料其电阻温度系数可改善的幅度很小, 提高探测器的响应度的主要途径是降低热导和增大辐射吸收率。

(2) 探测器的响应时间(时间常数)。

探测器响应速度是有限的, 为了说明探测器响应速度的快慢, 定义一个探测器的响应时间  $\tau$ 。响应时间的物理意义是, 当探测器受辐射照射时, 输出信号上升到稳定值的 63% 时所需要的时间, 表征了探测器对辐射响应的快慢, 如图 1.1 所示。热探测器中响应最快的是热敏电阻测辐射热计, 它的响应时间大于  $10^{-3}$  s;

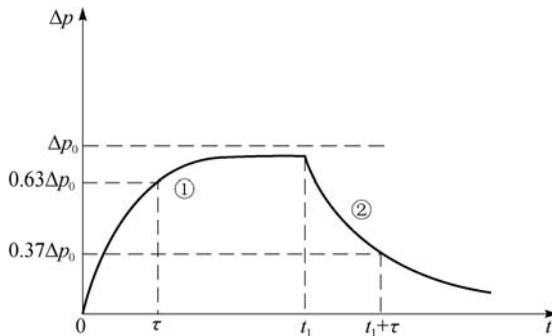


图 1.1 探测器的响应时间<sup>[8]</sup>

在量子探测器中,光电导探测器的响应时间为  $10^{-5}$  s,光伏探测器的响应时间小于  $10^{-6}$  s。

### (3) 噪声等效功率。

当入射到探测器上的辐射产生的信号电压  $V_s$  正好等于探测器本身的噪声电压值  $V_N$  (即信号噪声比为 1) 时,所需投射到探测器上的辐射功率  $P$  称为探测器噪声等效功率,用 NEP 表示。NEP 的单位为 W,它标志探测器所能探测的最小功率。

$$\text{NEP} = \frac{PV_N}{V_s} = \frac{V_N}{\mathfrak{R}} \quad (1.3)$$

### (4) 探测率。

取 NEP 的倒数,定义探测率  $D$ ,单位为  $\text{W}^{-1}$ ,它表示每瓦辐射功率所能获得的信号噪声电压比。探测率越大,表明探测器探测能力越强。

$$D = \frac{1}{\text{NEP}} \quad (1.4)$$

大部分探测器噪声等效功率与探测器面积  $A$  的平方根和带宽  $\Delta f$  的平方根成正比,用探测器的面积和带宽的平方根去除以 NEP 得到一个与面积、带宽无关的数值,这个数值的倒数称为归一化探测率或星探测率,用  $D^*$  表示。

$$D^* = \frac{(A \cdot \Delta f)^{1/2}}{\text{NEP}} = D(A \cdot \Delta f)^{1/2} = \frac{\mathfrak{R}}{V_N}(A \cdot \Delta f)^{1/2} \quad (1.5)$$

$D^*$  实质上是单位辐射功率辐照在探测器单位面积上在放大器单位带宽条件下所获得的信噪比,单位为  $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。探测率也分为黑体探测率和单色探测率两种。

### (5) 探测器的光谱响应。

响应度随入射辐射波长的变化称为探测器的光谱响应。光谱响应有绝对光谱响应和相对光谱响应。绝对光谱响应测量需校准辐射能量的绝对值,实现比较困难;相对光谱响应测量只需辐照能量的相对校准,比较容易实现。通常用单色波长的响应度或探测率对波长作图来反映探测器的光谱响应特性。

热探测器具有宽广的光谱响应特性,而且光谱响应比较均匀,但它的响应较慢。量子探测器具有光谱选择性,具有较高的时间响应特性。

在理想情况下,单位波长间隔的辐射功率相等时,光子产率与波长成正比。因此,光子探测器在单位波长间隔和单位辐射功率下的响应随波长增加线性上升,达到峰值后又急剧下降到零。热探测器是对辐射功率的响应,而不是对光子产率的响应,单位波长间隔内单位辐射功率的光谱响应特性在理论上与波长无关。常用的红外探测器的光谱响应如图 1.2 所示。

### (6) 探测器的工作温度。

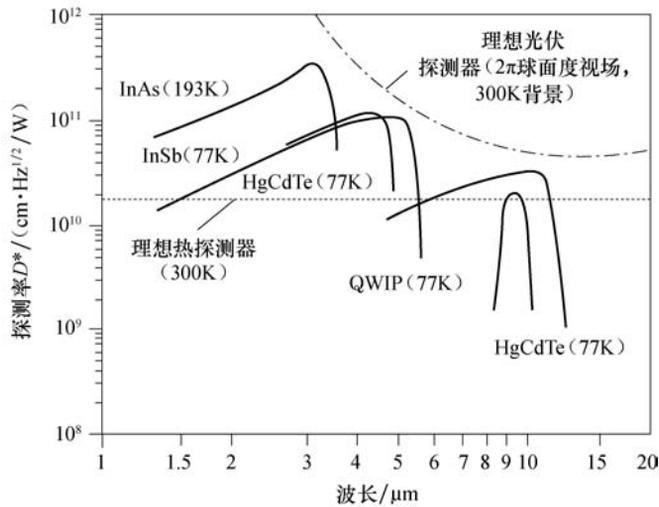


图 1.2 红外探测器的光谱响应<sup>[11]</sup>

工作温度是探测器的重要工作条件之一。光子探测器通常在几十开尔文的低温下工作，一旦超过这一温度探测器性能迅速下降，因此多数探测器需要制冷。有的探测器可在常温下工作，如光电导探测器和热电探测器。PbS 是常在室温下工作对  $1\sim 3\mu\text{m}$  波段的红外辐射有很高灵敏度的一种光电导探测器，其随着工作温度的降低响应率逐渐增高，在 200K 左右达到最大，如图 1.3 所示。

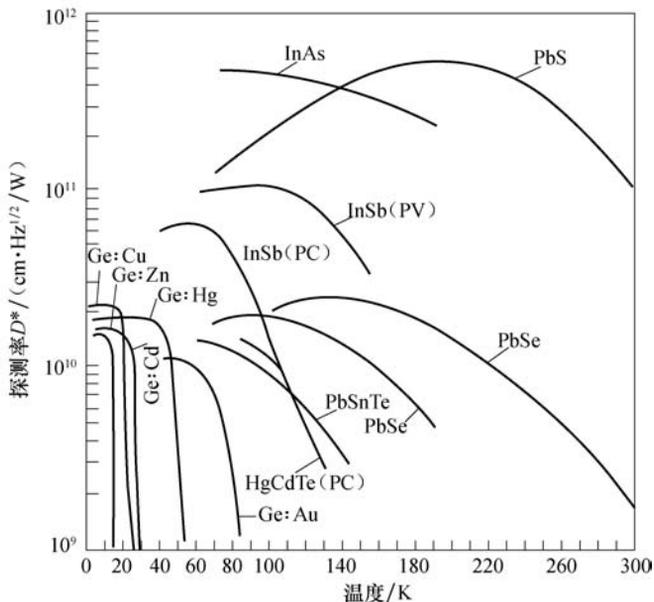


图 1.3 红外探测器探测率与温度的关系<sup>[2]</sup>

### 5. 制冷探测器

探测器可分为非制冷探测器和制冷探测器。制冷探测器的辐射敏感元件一般置于一个复杂的真空杜瓦瓶中,杜瓦瓶设有红外窗口或滤光片,还可能包括光学部分,如光导体、场透镜等。制冷探测器有多种制冷方式。通常采用液化气体直接制冷。这种制冷方式只能在实验室使用或在户外短时间使用。常用的制冷液化气体为液氮,在一个大气压下液化温度为 77.3K。其他制冷方式有焦耳-汤姆逊效应、斯特林制冷机、温差电制冷等。

### 1.3.2 红外热像仪工作原理

红外热像仪的作用是将目标发出的红外辐射转换为可见二维灰度或伪彩色信号,这一可视信号可显示出目标的二维温度分布。红外热像仪主要由光学系统、探测器、制冷系统、信号和图像处理系统、输出接口、控制接口和图像显示器组成。目前,红外热像仪有光机扫描式和凝视型两种。对扫描热像仪,红外热图是随时间一行一行产生的,就像电视图像一样,而凝视型热像仪的图像是同时投影到探测器阵列的像元上的。

#### 1. 制冷型光机扫描热像仪工作原理

光机扫描红外热像仪的工作原理如图 1.4 所示,目标发出的辐射能通过大

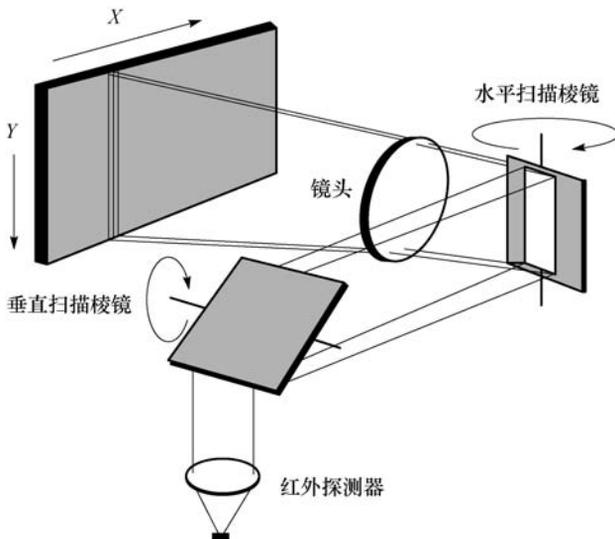


图 1.4 光机扫描红外热像仪的工作原理<sup>[12]</sup>

气传输到达热像仪的镜头,经过水平扫描棱镜、垂直扫描棱镜,通过聚焦和滤光将辐射能会聚到红外探测器上,探测器将辐射能转换成电信号,经放大的电信号输出到显示器上显示热像<sup>[12]</sup>。

瑞典 AGEMA 公司生产的 AGA782 型扫描热像仪,其热像系统由扫描器、黑白显示器、彩色转换系统、彩色显示器、数据接口、计算机、彩色打印机和录像机等部分组成。扫描器的配置如图 1.5 所示,由物体发射出的红外辐射经红外接收镜头到达垂直棱镜,垂直棱镜以 180r/min 的速度旋转,由垂直棱镜输出的辐射信号再通过水平棱镜,水平棱镜以 18000r/min 速度旋转。两个棱镜的旋转由两个开缝圆盘控制,两个圆盘分别与相应的棱镜在同一个轴上旋转。旋转开缝圆盘与水平和垂直触发电路相连,提供水平和垂直触发脉冲给监视器。这些脉冲也控制水平和垂直棱镜电动机的速度,同步它们彼此间相对的旋转速度。水平和垂直电动机被同步成下列方式:每四个隔行扫描的半帧产生一个隔行扫描帧,每一个隔行扫描半帧有 100 条水平扫描线。对每一隔行扫描半帧只有 70 线被用作实际图形线,每帧 280 线。由于以每 25 个隔行扫描半帧的速度扫描,每秒可产生 25/4 帧完整的隔行扫描图像。

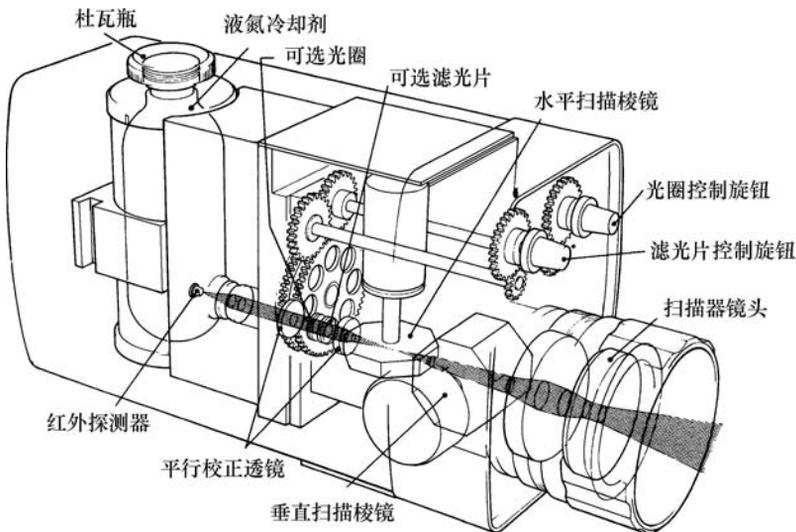


图 1.5 AGA782 型光机扫描红外热像仪配置图

从水平棱镜输出的辐射通过一组中继光学系统(该系统包含一个可选光圈和一个可选滤光片)最后聚焦在一个单点探测器上,它由铋化钢制成,位于杜瓦瓶的壁上。液氮制冷剂使容器保持 $-196^{\circ}\text{C}$ 的温度。当检测元件接收到光子后,能在短于微秒的时间内产生电子。探测器将接收到的热辐射信号成比例地转换

成电信号输出。这一信号被放大并形成一视频信号,视频信号经连接电缆输送到显示单元。

进入显示器的信号,首先进行放大,然后在显示器的荧光屏上成像,该像是由 8192 个像元组成的。显示器上所成的像可由录像机录到磁带上存储起来,需要时可用录像机回放,使存储在磁带上的热像在显示器上重现。显示器中的热像还可通过数据接口输入计算机进行分析处理。

### 2. 非制冷焦平面热像仪的工作原理

焦平面热像仪的红外探测器呈二维平面形状,自身具有电子扫描功能,被测目标只需通过筒捷的物镜,聚焦成像在红外探测器的阵列平面上,就和照相的原理相似,成像机理可参见图 1.6。

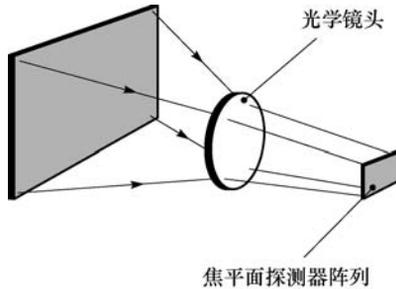


图 1.6 焦平面热像仪成像原理<sup>[12]</sup>

焦平面红外探测器有数以万计的传感元件组成阵列,其响应率的均匀性好,尺寸以微米( $\mu\text{m}$ )计,功耗极小,分为制冷型和非制冷型两大类。

非制冷型焦平面红外热像仪的工作原理如图 1.7 所示。在图 1.7 所示桥式

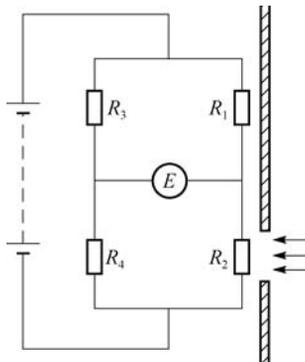


图 1.7 非制冷型热像仪的工作原理

$R_1$ -内置探测器;  $R_2$ -工作探测器;  $R_3$ 、 $R_4$ -标准电阻;  $E$ -取样电压信号

电路中,  $R_1$  为内置探测器,  $R_2$  为工作探测器,  $R_3$  和  $R_4$  为平衡电路的标准电阻,  $E$  为取样电压信号。  $R_1$  被屏蔽不露,  $R_2$  暴露在外接收红外辐射。当无外来辐射时, 电桥电路保持平衡, 则无电压信号输出, 此时  $E=0$ ; 当外来辐射照射时, 将使  $R_2$  的温度发生变化, 引起电阻阻值随之变化, 打破桥式电路的平衡, 使信号输出电路的两端产生电压差, 则有电压信号输出。

### 1.3.3 红外热像仪的主要性能参数

衡量红外热像仪综合性能好坏的主要指标是它的温度分辨率和空间分辨率, 为了描述这两个综合性能, 通常采用噪声等效温差 (NETD)、最小可分辨温差 (MRTD)、最小可探测温差 (MDTD) 和瞬时视场 (IFOV) 等性能指标来表示。热像仪的主要性能参数如下:

#### 1) 工作波段

工作波段是指红外热像仪中所选择的红外探测器的响应波长区域, 一般是  $3\sim 5\mu\text{m}$  或  $8\sim 13\mu\text{m}$ 。

#### 2) 视场

视场 (FOV) 是光学系统视场角的简称。它表示在光学系统中能够像平面视场光阑内成像的空间范围, 即使物体在热像仪中成像的空间最大张角, 一般是矩形视场, 表示为水平  $\alpha\times$  垂直  $\beta$ , 单位为度。视场取决于热像仪光学系统的焦距  $f$ , 有时也用 ( $f$ /数) 表示, 其中的“数”表示光学系统的焦距对通光孔径的倍数。

#### 3) 空间分辨率

空间分辨率又称为瞬时视场 (IFOV), 其大小是反映红外热像仪空间分辨率高低的指标, 单位为毫弧度 (mrad)。单元探测器尺寸为  $a\times b(\mu\text{m}^2)$ , 水平及俯仰方向的瞬时视场角  $\alpha, \beta$  由  $a, b$  及光学系统焦距  $f_0$  (mm) 决定

$$\alpha = \frac{a}{f_0} (\text{mrad}) \quad (1.6)$$

$$\beta = \frac{b}{f_0} (\text{mrad}) \quad (1.7)$$

#### 4) 噪声等效温差

噪声等效温差是衡量热像仪温度灵敏度的一个客观指标, 一般采用在  $30^\circ\text{C}$  时的噪声等效温差 (NETD@ $30^\circ\text{C}$ ) 来表示。其定义为用热像仪观察标准试验图案, 图案上的目标与背景之间能使基准化电路输出端产生峰值信号与均方根噪声之比为 1 时的温差。

#### 5) 最小可分辨温差

最小可分辨温差是一个作为景物空间频率函数的表征系统受视在信噪比限

制的温度分辨率的度量。当被检测热像仪对准标准的四杆周期调试图形(长宽比为 7:1 的 4 条条纹)时,在观察者刚好能分辨出四杆图案的情况下,目标与背景之间最低的等效黑体温差。

最小可分辨温差既反映热像仪温度灵敏度,又反映热像仪空间分辨率特性,还包括观察者眼睛工作特性的系统综合性能参数。

#### 6) 最小可探测温差

最小可探测温差仍采用最小可分辨温差的观测方式,由在显示屏上刚好能分辨出目标时所需的目标对背景的温差来定义。但最小可探测温差采用的标准图案是位于均匀背景中的单个方形目标,其尺寸可调,这是对噪声等效温差和最小可分辨温差的标准图案特点的一种综合。

#### 7) 信噪比

如果在电路同一阻抗上测量信号和噪声电压,称其均方电压之比的平方,即二者的功率比为信噪比,它是无量纲的。

#### 8) 相对孔径

光学系统的通光孔径  $D_0$  与其焦距  $f_0$  的比值称为相对孔径。相对孔径是光学系统的一个重要指标,热像平面辐照度与相对孔径的平方成正比。

#### 9) 探测器类型

探测器类型是指使用的红外器件类型,如采用硫化铅(PbS)、碲化铟(InSb)、碲镉汞(HgCdTe)等。

#### 10) 帧频

热像仪每秒钟产生完整图像的画面数称为帧频,单位为 Hz。

### 参 考 文 献

- [1] 常本康,蔡毅.红外成像阵列与系统[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等.红外与微光技术[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [3] 杨宜禾,岳敏,周维真.红外系统[M].第2版.北京:国防工业出版社,1995.
- [4] 小哈得逊 R D.红外系统原理[M].《红外系统原理》翻译组译.北京:国防工业出版社,1975.
- [5] 劳埃德 J M.热成像系统[M].尹白云,戴传衡译.北京:国防工业出版社,1981.
- [6] 田裕鹏.红外检测与诊断技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [7] 斯达尔 K,缪斯卡 G.红外技术[M].石定河,王桂群译.武汉:华中工学院出版社,1982.
- [8] 王义玉.红外探测器[M].北京:兵器工业出版社,1993.
- [9] 凯斯 R J.光探测器与红外探测器[M].董培芝等译.北京:科学出版社,1984.
- [10] Kruse P W. Uncooled Thermal Imaging Arrays, Systems, and Applications[M]. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2001.

- 
- [11] Vollmer M, Mollmann K P. Infrared Thermal Imaging—Fundamental, Research and Applications[M]. Weinheim; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2010.
- [12] Minkina W, Dudzik S. Infrared Thermography—Errors and Uncertainties[M]. London; John Wiley & Sons, Ltd, 2009.

## 第 2 章 红外辐射基本理论

### 2.1 概 述

1800 年,英国天文学家赫歇尔(Herschel)在寻找新光学介质时意外发现了红外线。他在使用各种不同颜色的镜片样本进行测试时,发现一个有趣的现象:在达到相近亮度减弱效果的前提下,某些样本只通过了阳光很少的热量,而另一些则通过了大量的热量。为了观察光学频谱亮度的热效应,他用分光棱镜将太阳光分解成从红色到紫色的单色光,依次测量不同颜色光的热效应,发现当用墨水染黑的水银温度计沿着光谱上颜色缓慢移动时,温度计读数从紫端到红端逐渐升高,当把温度计移到红端以外的区域,即人眼看不见有任何光线的黑暗区时,温度反而比红光区域的温度更高。到 1830 年,经大批研究人员的反复实验证明,在红光外侧,确实存在一种人眼看不见的“热线”,并存在一个热效应最大的波段,法国物理学家白克兰把这种辐射称为“红外辐射”<sup>[1]</sup>。

红外线存在于自然界的任何一个角落,一切温度高于绝对零度的物体时时刻刻都在不停地辐射红外线。物质的运动是产生红外线的根源。物质由原子分子组成,由于热的存在,它们按一定的规律不停地运动着,其运动状态也不断地变化,因而不断地发射或吸收辐射能量。这种辐射的本质是热辐射,其大小主要由这个物体的温度和材料本身的性质决定。特别是热辐射的强度及光谱成分取决于辐射物体的温度,也就是说,温度对热辐射现象起着决定性作用。具有一定温度的任何物体都会向周围空间辐射电磁能,虽然辐射的形式各种各样(可见光、X 射线、无线电波),但它们都由带电粒子的能态变化产生;传播过程都遵守麦克斯韦波动方程;以光速传播;并遵守光线传播的所有规律,如反射、折射和衍射定律;其强度与距离的平方成反比,且都称为电磁辐射,它们的区别仅在于波长和发射源不同。所以热辐射在宏观上是连续的电磁波传递能量的过程,而在微观上则是不连续的光子传递能量的过程。物体间相互辐射和相互吸收称为辐射换热。辐射换热不需要互相接触,也不需要介质,并在真空中传递最有效,如太阳辐射。换热过程伴随着能量形式的转换,其中,物体向外辐射时,其内能转换为辐射能;物体吸收辐射能时,其吸收的辐射能转换为内能。

物体辐射投射到某介质表面上时,一部分将被介质吸收,一部分被表面反射,如果介质是部分透明的,还有一部分将从介质中透射过去。我们将被介质吸

收、被表面反射和从介质中透射过去的辐射能量与投射能量的比值分别称为吸收率  $\alpha$ 、反射率  $\rho$  和透射率  $\tau$ 。

通常把电磁辐射按波长或频率的不同划分为许多波段,总称为电磁波谱,如图 2.1 所示。辐射的电磁波波长理论上从 0 到无穷大,红外波段位于电磁波谱中可见光和微波之间,波长范围为  $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。工程上把  $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$  波段的辐射称为热射线,其中大部分位于红外区( $0.76 \sim 20 \mu\text{m}$ ),可见光所占份额不大。

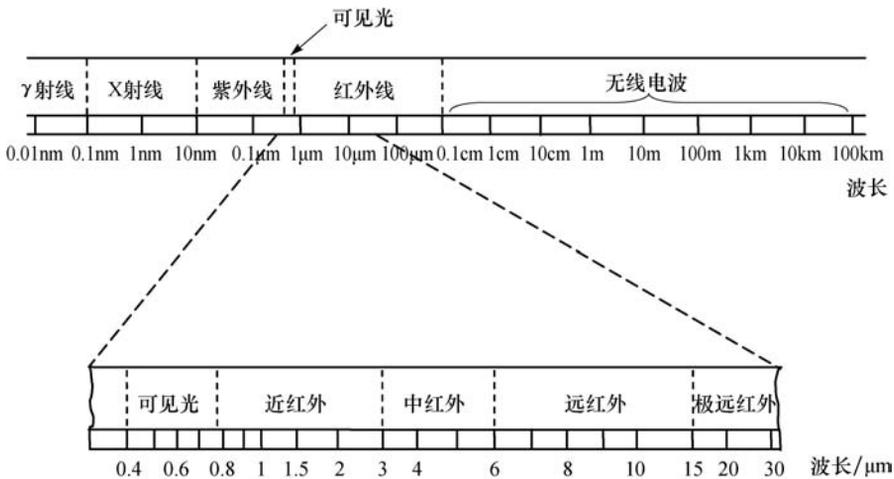


图 2.1 电磁波的频谱

通常把红外波段分为近红外( $0.76 \sim 3 \mu\text{m}$ )、中红外( $3 \sim 6 \mu\text{m}$ )、远红外( $6 \sim 15 \mu\text{m}$ )和极远红外( $15 \sim 1000 \mu\text{m}$ )四部分。红外波段的前三部分各包含一个大气窗口,分别为  $2 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。在大气窗口内,大气对红外线的吸收较少,因此大多数红外系统都选用这些波段<sup>[2]</sup>。

热辐射也具有电磁波的共同特征:都以横波的形式在空间传播,并且在真空中都有相同的传播速度

$$c = \lambda\nu \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

式中, $\lambda$ 为波长(m); $\nu$ 为频率(Hz)。

在介质中,同样频率的电磁波的传播速度为

$$c' = \lambda'\nu \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.2)$$

由式(2.1)和式(2.2)可得

$$\lambda = \frac{c}{c'}\lambda' = n\lambda' \quad (2.3)$$

式中,  $n=c/c'$ 称为介质对真空的折射率。式(2.3)表明对相同频率的电磁波,在介质中传播波长是真空中波长的  $1/n$ 。

由于电磁波具有波粒二象性,电磁波还以光子的形式存在,一个光子具有的能量为

$$\epsilon = h\nu \quad (2.4)$$

式中,  $h=(6.626176\pm 0.000036)\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ ,称为普朗克常量。光子的能量还可用电子伏特(eV)来表示,  $1\text{eV}=1.6021892\times 10^{-19}\text{ J}$ 。

尽管物体发射红外辐射的物理机制不止一种,但是,自然界中普遍存在的红外辐射源是物体自发热辐射。因此,为了研究红外辐射温度测量原理,首先应掌握物体发射红外辐射的基本规律。

由于实际物体辐射的情况较为复杂,研究它们的辐射规律时,首先从一种简单模型——黑体入手。1860年,基尔霍夫首先提出黑体的概念。所谓黑体,简单来讲就是在任何情况下对一切波长的入射辐射都全部吸收的物体,即黑体的吸收率等于1。显然,自然界中实际存在的任何物体对不同波长的入射辐射都有一定的反射(吸收率不等于1),所以,黑体只是人们抽象出来的一种理想化物体模型。尽管如此,黑体热辐射的基本规律却是红外科学领域中许多理论研究和应用的基础,它揭示了黑体发射的红外热辐射随温度及波长变化的定量关系。黑体是波谱中能量分布完全确定的标准物体<sup>[1]</sup>。具体讲,与黑体有关的辐射定律可以概括为三个基本定律,即普朗克(Planck)定律、维恩(Wien)位移定律、斯特藩-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律。

## 2.2 黑体的红外辐射规律

### 2.2.1 辐射的光谱分布规律——普朗克辐射定律

1900年,德国科学家普朗克根据量子理论提出一个绝对温度为  $T(\text{K})$  的黑体,单位表面积在波长  $\lambda$  附近单位波长间隔内向整个半球空间发射的辐射功率(称为光谱辐射出射度,简称光谱辐出度)  $M_{b,\lambda}(T)$ ,与波长  $\lambda$ 、温度  $T$  满足下列关系:

$$M_{b,\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1} = C_1 \lambda^{-5} \left[ \exp\left[\frac{C_2}{\lambda T}\right] - 1 \right]^{-1} \quad (2.5)$$

式中,  $c$  为真空中的光速,  $c=3\times 10^8\text{ m/s}$ ;  $h$  为普朗克常量,  $h=6.6256\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $k$  为玻尔兹曼常量,  $k=1.38054\times 10^{-23}\text{ J/K}$ ;  $C_1$  为第一辐射常量,  $C_1=2\pi hc^2=$