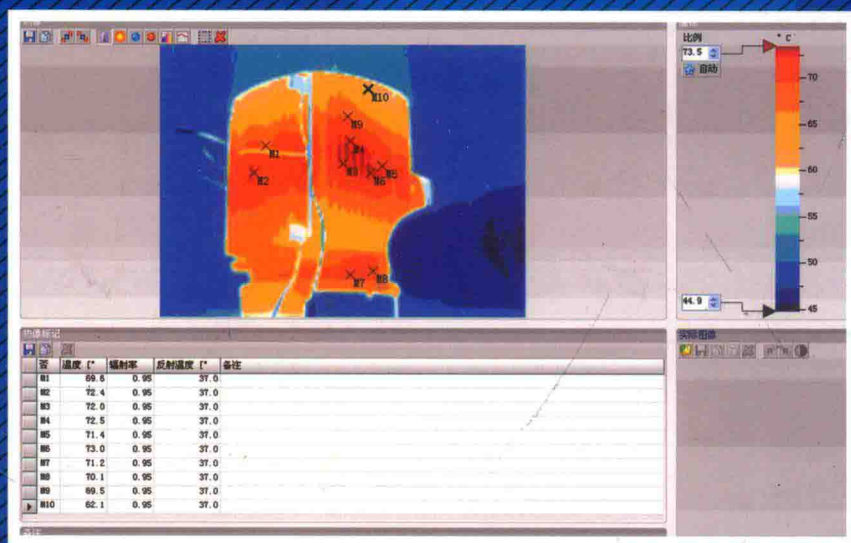




红外图像处理 理论与技术

◎ 陈钱 隋修宝 编著



中国工信出版集团

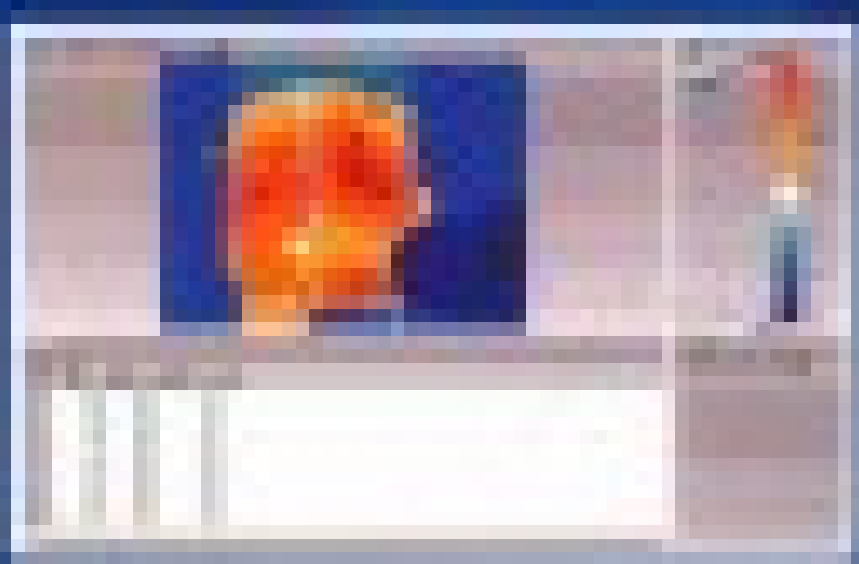


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



红外图像处理 理论与技术

王 勇 著



清华大学出版社



红外图像处理理论与技术

陈 钱 隋修宝 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是作者近二十年来对红外成像开发理论和技术的全面总结,是作者搜集了国内外最新研究成果,并在研究生授课讲稿的基础上改编的。本书分7章,主要内容包括:第1~2章介绍红外探测器的成像原理;第3章介绍红外成像的硬件系统设计;第4章介绍红外图像的非均匀性校正算法;第5章介绍红外图像的数字细节增强算法;第6章介绍红外图像的超分辨率处理技术;第7章介绍红外成像系统的测试方法。

本书可作为高等学校光电等相关专业的基础教材,也可供相关领域的工程技术人员学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

红外图像处理理论与技术 / 陈钱, 隋修宝编著. —北京: 电子工业出版社, 2018.1

ISBN 978-7-121-32391-1

I. ①红… II. ①陈… ②隋… III. ①红外技术—应用—图象处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 187532 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16.25 字数: 416 千字

版 次: 2018 年 1 月第 1 版

印 次: 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254113, wangxq@phei.com.cn。

前 言

红外成像是利用红外探测器对目标辐射的能量进行探测并成像的光电成像技术，是一种将不可见的红外光转换为可见光的光谱转换技术。由于其能够探测目标主动发出的能量，因此不需要阳光及星光的照射就能成像，是一种可以全天候、不分昼夜工作的被动成像技术，非常适用于夜间目标的观测。因此，红外成像技术最早在军工领域获得广泛应用。

21 世纪以来，红外成像技术得到了长足发展，非制冷探测器的阵列规模从 320×240 一直发展到 1024×1024 ，制冷探测器也从 128×128 发展到 640×512 规模以上，并成为稳定的货架产品。非制冷探测器的 NETD 也从 100mK 发展到当前低至 30mK 的水平。尤其近 5 年来，国产红外探测器的技术水平得到了很大提升，无论从探测器阵列规模，还是从 NETD 水平上来说，都逐渐缩小了与西方发达国家的差距。尤其在国家提高红外成像系统国产化率的大背景下，国产红外探测器在光电类武器装备中发挥了越来越重大的作用。此外，随着探测器工艺水平和材料生产技术的进步及我国国产化探测器的逐步成熟，红外成像在民用领域获得了广泛的应用。由于红外是对热量成像，凡是对热量敏感的场所均有红外成像应用的广泛天地。比如红外成像非接触测温，在 2003 年国家防控非典查询体温过高人员时，起到了非常重要的作用。红外还广泛应用于汽车夜间辅助驾驶、红外人体早期疾病筛查、红外有毒气体检测、红外电力系统非接触故障检测、红外森林防火监控等领域。红外成像技术的应用领域必然随着红外成像系统性能水平的提升和价格的下降，获得更为广泛的拓展。

然而，与可见光系统相比，红外探测器的可靠性、性能稳定性均有极大差距，红外探测器对微弱热量进行探测的定位，决定了红外探测器对噪声极为敏感，且其性能受环境温度影响极大。红外探测器普遍具有的非均匀性又降低了系统的性能。上述因素都决定了红外成像系统的技术开发门槛极高，而当前对红外探测器成像理论、系统开发和算法研究的系统性指导图书并不多见，这严重限制了我国红外成像系统的大规模生产和广泛应用。为促进我国红外成像水平的整体提升，培养红外探测领域的专门人才，加快我国红外成像技术在更多领域获得广泛应用，作者决定开始本书的编写工作。

作者近二十年来一直从事红外成像理论探测和开发，开发了大量国外非禁运和国产的制冷、非制冷探测器，对各种材料探测器的理论、性能非常了解，承担了国家和地方的多项红外科研项目，并获得国家科技进步奖二等奖、教育部科技进步奖一等奖和国防技术发明奖等多个国家级、省部级奖项。本书是作者近二十年来对红外成像开

发理论和技术的全面总结，是作者搜集了国内外最新研究成果，并在研究生授课讲稿的基础上改编而成的。本书共分7章：第1~2章介绍红外探测器的成像原理；第3章介绍红外成像的硬件系统设计；第4章介绍红外图像的非均匀性校正算法；第5章介绍红外图像的数字细节增强算法；第6章介绍红外图像的超分辨率处理技术；第7章介绍红外成像系统的测试方法。

本书由陈钱、隋修宝编著。其中，陈钱进行了章节的统筹规划，并负责了第1、2、5、7章的撰写，隋修宝负责了第3、4、6章的撰写。本书即将出版之际，感谢顾国华教授的章节统稿，和高航博士、赵耀博士、刘程威博士、匡小冬博士、黄熙燕硕士、吴骁斌硕士、潘科辰硕士在科研上的贡献及在文字校对、资料查阅等方面的工作。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请各位专家和广大读者批评指正。

陈 钱 隋修宝
2017年12月

目 录

| | |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 红外辐射 | 1 |
| 1.1.1 引言 | 1 |
| 1.1.2 红外辐射定律与特性 | 2 |
| 1.1.3 红外辐射在大气中的传输 | 3 |
| 1.1.4 红外光学系统 | 4 |
| 1.2 热成像技术 | 7 |
| 1.2.1 热成像技术解决的基本问题 | 8 |
| 1.2.2 热成像技术的作用与地位 | 8 |
| 1.2.3 热成像技术的军事应用 | 9 |
| 1.2.4 热成像技术在国民经济领域的应用 | 11 |
| 1.3 红外探测器与热成像技术的关系 | 12 |
| 第 2 章 红外焦平面阵列 | 14 |
| 2.1 红外焦平面阵列简介 | 14 |
| 2.1.1 扫描型和凝视型红外焦平面阵列 | 14 |
| 2.1.2 红外焦平面阵列的结构 | 15 |
| 2.1.3 典型的红外焦平面阵列 | 15 |
| 2.2 热绝缘结构的重要性 | 16 |
| 2.3 主要热探测机理 | 19 |
| 2.3.1 热电探测器和铁电测辐射热计 | 20 |
| 2.3.2 热电偶探测器 | 22 |
| 2.3.3 电阻微测辐射热计 | 23 |
| 2.3.4 电阻微测辐射热计的模型 | 25 |
| 2.3.5 温差电探测器 | 35 |
| 2.4 重要极限 | 36 |
| 2.4.1 温度波动噪声极限 | 36 |
| 2.4.2 背景波动噪声极限 | 37 |
| 2.4.3 非制冷热成像焦平面阵列设计 | 40 |
| 2.5 非制冷凝视红外焦平面读出电路 | 41 |
| 2.5.1 红外焦平面阵列读出电路读出方式 | 42 |

| | | |
|------------|------------------------------|------------|
| 2.5.2 | 非制冷红外焦平面阵列输入电路 | 44 |
| 2.6 | 非制冷凝视红外焦平面成像模型 | 49 |
| 第3章 | 红外成像电子系统设计 | 53 |
| 3.1 | 引言 | 53 |
| 3.2 | 低噪声偏置电压及高精度数字信号的实现 | 53 |
| 3.3 | 多次采样滤波技术 | 63 |
| 3.4 | 红外焦平面自适应偏置电压技术 | 65 |
| 3.5 | 系统构架搭建 | 69 |
| 3.5.1 | Qsys 平台 Avalon 总线和 Nios 处理器 | 69 |
| 3.5.2 | 基于 Qsys 平台和 Avalon 总线的系统架构 | 72 |
| 3.5.3 | 基于 Qsys 平台和 Avalon 总线的模块算法实现 | 83 |
| 第4章 | 红外图像的非均匀性校正 | 96 |
| 4.1 | 非均匀性定义 | 96 |
| 4.2 | 非均匀性成因 | 97 |
| 4.3 | 常用的非均匀性校正方法 | 99 |
| 4.3.1 | 基于定标的非均匀性校正算法 | 99 |
| 4.3.2 | 基于场景的非均匀性校正算法 | 104 |
| 4.4 | 单帧非均匀性去条纹算法 | 116 |
| 4.4.1 | 基于边缘灰度级共生矩阵条纹非均匀性校正方法 | 116 |
| 4.4.2 | 基于中间均衡直方图条纹非均匀性校正方法 | 119 |
| 4.4.3 | 基于全变分的条纹非均匀性校正方法 | 120 |
| 4.4.4 | 基于相邻灰度继承的条纹非均匀性校正方法 | 123 |
| 4.4.5 | 基于自适应灰度调整的条纹非均匀性校正方法 | 126 |
| 4.4.6 | 基于常数先验的条纹非均匀性校正方法 | 128 |
| 第5章 | 红外图像细节增强 | 131 |
| 5.1 | 红外图像细节增强的意义和概述 | 131 |
| 5.2 | 基于频域和空域红外图像细节增强技术 | 132 |
| 5.3 | 基于双边滤波的红外图像细节增强技术 | 134 |
| 5.4 | 基于混合滤波红外图像细节增强技术 | 137 |
| 5.5 | 基于傅里叶变换的红外图像细节增强技术 | 139 |
| 5.6 | 基于直方图的红外图像细节增强技术 | 141 |
| 5.6.1 | 基于梯度直方图的红外图像细节增强技术 | 142 |
| 5.6.2 | 基于自适应双平台直方图均衡细节增强算法 | 143 |
| 5.7 | 新型红外图像细节增强技术 | 146 |
| 5.7.1 | 基于 Retinex 红外图像细节增强技术 | 146 |

| | | |
|--------------|-------------------------|------------|
| 5.7.2 | 基于小波的红外图像细节增强技术 | 148 |
| 5.7.3 | 基于模糊域理论的红外图像细节增强技术 | 150 |
| 第 6 章 | 红外图像的超分辨率处理技术 | 153 |
| 6.1 | 引言 | 153 |
| 6.2 | 非制冷凝视红外焦平面微扫描理论 | 153 |
| 6.2.1 | 微扫描成像的理论基础 | 154 |
| 6.2.2 | 微扫描成像方案比较 | 161 |
| 6.2.3 | 改进的平板光学元件微扫描方案及锗片倾斜角度模型 | 165 |
| 6.3 | 微扫描成像技术的具体实现 | 170 |
| 6.3.1 | 红外光学系统选取 | 171 |
| 6.3.2 | 微扫描器的设计 | 175 |
| 6.3.3 | 驱动电机的选取 | 182 |
| 6.4 | 图像超分辨率重建算法 | 186 |
| 6.4.1 | 基于边缘定位的多帧红外微扫描图像位移误差补偿 | 187 |
| 6.4.2 | 基于主结构分离的稀疏表示单帧图像超分辨率重建 | 193 |
| 6.4.3 | 基于流形正则协同支持的单帧图像超分辨率重建 | 203 |
| 第 7 章 | 红外成像系统的测试方法 | 211 |
| 7.1 | 红外探测器参数测试方法 | 211 |
| 7.2 | 基于虚拟仪器的可视化多模式测试与仿真系统 | 212 |
| 7.2.1 | 虚拟仪器技术 | 212 |
| 7.2.2 | 基于虚拟仪器的可视化多模式测试与仿真系统组成 | 214 |
| 7.2.3 | 系统工作原理 | 216 |
| 7.3 | 凝视焦平面探测器参数测试技术 | 217 |
| 7.3.1 | 凝视焦平面探测器组件 | 217 |
| 7.3.2 | 凝视焦平面探测器盲元测试技术研究 | 219 |
| 7.3.3 | 凝视焦平面探测器非均匀性测试技术研究 | 229 |
| 7.4 | 红外成像机芯测试方法 | 232 |
| 7.4.1 | NETD 噪声等效温差的测试 | 232 |
| 7.4.2 | MRTD 最小可分辨温差的测试 | 233 |
| 7.4.3 | MTF 调制传递函数的测试 | 235 |
| 7.4.4 | MDTD 最小可探测温差的测试 | 237 |
| 7.4.5 | 红外整机性能测试 | 238 |
| 参考文献 | | 242 |

第1章 绪 论

1.1 红 外 辐 射

1.1.1 引 言

自然界中，任何温度高于热力学零度（ -273.15°C ）的物体都会向周围热辐射，红外辐射是热辐射的一部分，是一种与可见光相邻的不可见光。红外辐射是指波长在 $0.75\sim 1000\mu\text{m}$ 范围内的电磁波。一般来说，分子热运动产生的红外辐射称为热辐射。红外辐射与红外光、红外线等名词有相同的物理意义。根据习惯和方便，在热成像技术中，也不严格地将红外辐射与热辐射两个名词等同使用。

红外辐射具有与可见光等其他波段的电磁波相同的物理性质，如有波动性和量子性的双重特征。红外辐射的波动性表现为反射、折射、干涉、衍射和偏振等。红外辐射的量子性表现为黑体辐射和光电效应。在考虑红外辐射的发射和吸收时，只有将其视为“分立的微粒——光子”的集合体，才能进行完整的解释。一个光子的能量为 $h\nu$ （ h 为普朗克常数，其值为 $6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ， ν 为频率）。光子频率越高或波长越短，光子能量也就越大，红外线的光量子能量远小于可见光，例如， $10\mu\text{m}$ 波长的红外光子的能量大约是可见光光子能量的 $1/20$ 。量子力学首先就是在黑体辐射理论上取得突破的。此外，只有用红外辐射量子特性，才能进行红外辐射的光电效应分析。与可见光相比，红外辐射的特殊性在于其波长较长，具有更加明显的绕射、衍射等效应，更有利于在大气内传播。此外，其光子能量与构成物质的分子、原子热运动的能量大致相当，更容易被吸收和发射。与雷达的电磁波相比，红外辐射的特殊性在于其波长短，量子效应、热响应明显。因此，可研制出与可见光成像器件类似的、探测元尺寸足够小的红外焦平面探测器。

在红外光谱学中，一般将红外波段分成近红外、中红外和远红外3个波段。具体划分如下（在红外光谱学中，习惯用波长的倒数——波数作为波长单位）。

近红外波段： $0.78\sim 2.5\mu\text{m}$ （ $12821\sim 4000\text{cm}^{-1}$ ），对应电子低能级、振动谐波能量；

中红外波段： $2.5\sim 50\mu\text{m}$ （ $4000\sim 200\text{cm}^{-1}$ ），对应分子振动能量；

远红外波段： $50\sim 1000\mu\text{m}$ （ $200\sim 10\text{cm}^{-1}$ ），对应分子转动能量。

近红外波段可以用光电倍增管探测，有时也将其称为电子红外。中红外波段一般用卤化物晶体制成的棱镜进行分光和测量，有时将其称为棱镜红外。远红外波段没有合适的棱镜材料，只能采用衍射光栅进行分光和探测，所以也将其称为光栅红外。

因不同波长的红外辐射与大气分子的相互作用不同，所以，不同波长的红外辐射在

大气中的传播特性不同。在热成像技术中，也按波长和大气对红外辐射的吸收，将红外辐射分为 3 个波段：短波红外（SWIR）：1~2.5 μm ；中波红外（MWIR）：3~5 μm ；长波红外（LWIR）：8~14 μm 。

这 3 个波段是大气选择性吸收形成的“大气透射窗口”。室温物体的红外辐射集中在中波红外和长波红外波段。在该光谱区的红外辐射来自于构成物质的分子和原子与热运动对应的振动和转动能级之间跃迁的自发辐射，振动和转动的能量大致与室温能量相当，因此，即使是室温物体，其温度也可使物体具有足够的热能，激励其发射波长在中、长波红外的辐射。从狭义上讲，这是把中波红外和长波红外辐射称为热辐射的理由。

1.1.2 红外辐射定律与特性

以下这些规律揭示了红外辐射的本质特性，主要为基尔霍夫定律、斯忒藩-玻耳兹曼定律、维恩位移定律和普朗克定律。

1859 年，基尔霍夫指出，物体的出射辐射度和吸收本领 $\alpha_{\lambda T}$ 的比值与物体的性质无关，该比值对所有物体来说是波长和温度的普适函数，都等于同一温度下绝对黑体的出射辐射度 M_b 。即有名的基尔霍夫定律，其表达式为

$$\frac{M_{\lambda T}}{\alpha_{\lambda T}} = M_b \quad (1.1.1)$$

该定律表明，当几个物体处于同一温度时，各物体发射红外线的能力正比于它吸收红外线的能力，当物体处于红外辐射平衡状态时，它所吸收的红外能量，恒等于它所发射的红外能量。吸收本领大的物体，其发射本领也大，如果物体不能发射某波长的辐射能，则它也绝对不能吸收该波长的辐射能，反之亦然。根据这一定律可以推断出，性能好的反射体或透明体，必然是性能差的辐射体。绝对黑体就是定义为吸收和发射所有波段的辐射体，即发射率为 1。自然界中，绝对黑体是不存在的，但是可以根据要求，做出与绝对黑体性质非常相似的黑体，称为灰体，其发射率必然小于 1，认为与波长无关。

1879 年，斯忒藩通过实验得出了黑体的总辐射本领 M_b 与其热力学温度 T 的 4 次方成正比的结论，1884 年，玻耳兹曼从理论上证明了该结论，称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。其表达式为

$$M_{bT} = \int_0^{\infty} M_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.1.2)$$

式中， M_{bT} 为温度为 T 的黑体的总辐射本领 (W/cm^2)； σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数，近似值为 $5.67 \times 10^{-12} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； T 为黑体的热力学温度 (K)； λ 为波长 (m)。

由这一定律可以看出，物体的温度越高，其红外辐射能量就越多。用这个定律还可以做如下估算：正常人皮肤的平均温度为 30°C ，其表面面积为 1.5m^2 ，红外辐射功率则接近 1kW 。这是一个相当大的数字。不过，人体在辐射红外能量的同时，还吸收周围物

体辐射的红外能量，所以人体真正向外界释放的净功率远小于这个数值。

1893年，维恩指出，在黑体辐射本领的表达式中，辐射的频率与温度应以比值的方式出现，即得出了维恩位移定律。

$$\lambda_{\max} T = b \quad (1.1.3)$$

式中， λ_{\max} 为黑体辐射最大值所对应的波长； b 为与温度无关的常数，近似值为 $0.2897 \text{cm}\cdot\text{K}$ 。维恩位移定律表明，黑体辐射最大值对应的波长，随温度升高而向短波方向移动。

1900年，普朗克突破了经典理论的束缚，提出了量子假设。在量子假设的前提下，得出了黑体辐射的普朗克公式，其形式为

$$M_b(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} [e^{c_2/(\lambda T)} - 1]^{-1} \quad (1.1.4)$$

式中， c_1 为第一辐射常数 $3.74 \times 10^{-16} (\text{W}\cdot\text{m}^2)$ ； c_2 为第二辐射常数 $1.44 \times 10^{-2} (\text{m}\cdot\text{K})$ ； M_b 为绝对黑体的辐射出射度 ($\text{W}\cdot\text{cm}^2\cdot\mu\text{m}^{-1}$)； λ 为波长 (μm)； T 为热力学温度 (K)。

普朗克公式的理论结果与实验结果非常准确地相符，这一公式在红外辐射中占有重要的地位。从这个定律可以看出黑体辐射的几个特点：①辐射出射度是随温度的升高而迅速增大的；②光谱辐射出射度的峰值波长随温度的升高向短波方向移动；③温度越高，所有波长上的光谱辐射出射度就越大。

1.1.3 红外辐射在大气中的传输

红外目标发出的红外辐射，在被光学系统接收前要在大气中传输，而在大气中传输时会受到大气衰减，衰减的因素有大气的吸收、散射，以及云、雾、雨、雪等其他微粒的散射，到达探测器的红外辐射衰减的程度则取决于大气组分的种类和数量。虽然大气的组成成分众多，但是在大气中，对红外辐射产生影响最大的仅仅是水蒸气、二氧化碳和臭氧 3 种气体及悬浮在大气中的气溶胶。其他的吸收气体有甲烷、一氧化氮、一氧化碳、氨气、硫化氢和氧化硫等，虽然它们对红外辐射也有吸收，但它们在大气中的含量极微小，通常可以不考虑它们对红外辐射传输的影响。

水蒸气在大气中，尤其是在低层大气中含量较高，是对红外辐射传输影响较大的一种组分。在大气组分中，水是唯一能以固、液、气 3 种状态同时存在的成分，其固态形式的雪花和细小的冰晶及液态的云、雾、雨对红外辐射主要起散射作用；而气态形式的水蒸气，虽然在对流层中体积仅占大气组分的 2%，但是却对红外辐射有着强烈的吸收，其吸收带中心波长主要集中在 $0.94\mu\text{m}$ 、 $1.1\mu\text{m}$ 、 $1.38\mu\text{m}$ 、 $1.87\mu\text{m}$ 、 $2.70\mu\text{m}$ 、 $3.2\mu\text{m}$ 和 $6.27\mu\text{m}$ 。在不同地区和不同季节中，大气中的水蒸气含量有很大不同，即使在一个特定的区域，在短到一小时的时间内，大气中水蒸气的含量都会呈现较大的起伏，并且随着高度的增大，水蒸气的含量迅速减小，大概每升高 5km ，水蒸气的含量减少一个数量级，因此在考虑大气中水蒸气对红外辐射的衰减时，要精确测定水蒸气在大气中的含量。二

氧化碳在大气中含量较高,且在 $2.7\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 附近有强烈的吸收。二氧化碳占大气的体积比在海拔 80km 以内基本保持常数,约为 0.033% 。臭氧的主要红外吸收带在 $4.75\mu\text{m}$ 、 $9.6\mu\text{m}$ 和 $14\mu\text{m}$,其中 $9.6\mu\text{m}$ 吸收带最强,主要集中在海拔 $10\sim 30\text{km}$ 之间的大气层中,实际测量表明,这里集中了大气中 90% 的臭氧含量,而在低空,臭氧的含量很低,在海平面上臭氧的浓度也很低,大约为亿分之三,因此,在低空时一般可忽略臭氧的吸收。大气中的气溶胶不仅尺寸分布广泛(从凝结核的半径可以小到不足 $10^{-3}\mu\text{m}$ 到以 mm 计算),而且组成成分也不相同(从云、雾、雨、冰晶和来自地面的尘埃到碳粒子、烟、盐晶粒及微小的有机生命体)。

实验表明,能顺利通过大气的红外辐射主要有 3 个范围,即 $1\sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$,通常把这 3 个波段范围称为大气窗口。即使辐射在 3 个大气窗口中传播,还会有一定的能量衰减。辐射穿过大气未被吸收衰减的能量与总能量之比称为“大气透过率”。图 1.1.1 所示为著名的英格兰东海岸的测量结果,根据该图可以看出,红外辐射的 3 个窗口在该图中都有较高的透过率。当红外目标与光学系统之间的距离较近时,几乎可以认为,大气的透过率为 1 且不会引起太大的误差。

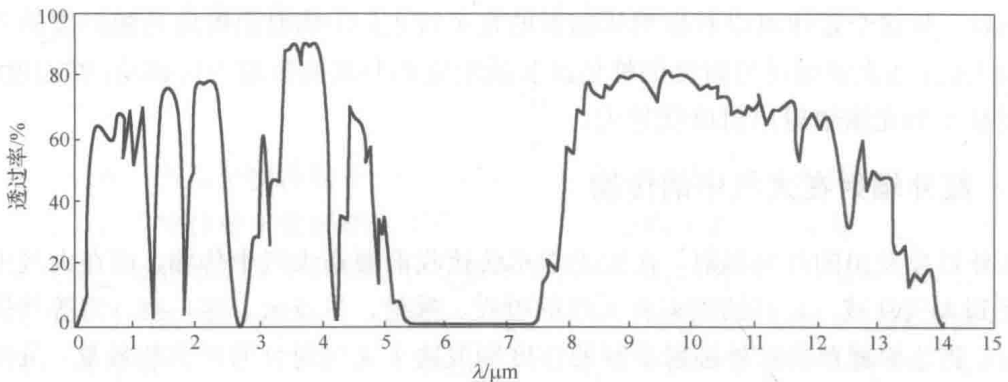


图 1.1.1 英格兰东海岸海平面上 600 英尺水平路段的大气透过率

1.1.4 红外光学系统

红外光学系统的作用是改善红外目标辐射的光束分布,最大限度地将红外辐射汇聚到焦平面探测器上,大大提高探测器光敏面上的照度,从而提高红外热像仪的信噪比,增强系统的探测能力。红外光学系统普遍需要满足以下要求:①尽量小的尺寸、尽量强的聚光能力和大的相对孔径,并且无中心遮拦;②尽量大的视场及接近衍射极限的弥散斑;③较强的抑制杂散光的能力;④较好的热稳定性和较高的透过率。

为计算焦平面上像的照度,首先需得到通过红外光学系统的光通量。显然,由物面上同一面元发出的、能进入系统的光通量随入瞳面积的增大而增大。如图 1.1.2 所示,设物面上辐射元是朗伯辐射体,其在各个方向的辐亮度均为 L ,并由入瞳大小决定光学系统的物方孔径角为 U ,则根据辐亮度的定义,可得由面元 dS 发出的能进入入瞳的全部光通量 ϕ

$$\varphi = \pi L \times \sin^2 U \times dS \quad (1.1.5)$$

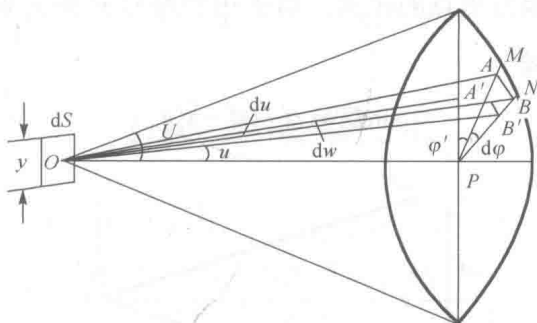


图 1.1.2 物面辐射进入光学系统示意图

物面上的辐射元 dS 通过光学系统在像面上的成像为 dS' ，它与出瞳构成了与图 1.1.2 完全对应的关系。若出射光束的光亮度为 L' ，则自出瞳射向像元 dS' 上的光通量为

$$\varphi' = \pi L' \times \sin^2 U' \times dS' \quad (1.1.6)$$

对 L 和 L' 有如下关系

$$L' = KL \times (n'_k / n_1)^2 \quad (1.1.7)$$

式中， K 为光学系统的透过率； n_1 为红外光学系统光线入射方向介质的折射率； n'_k 为红外光学系统光线出射方向介质的折射率。

将式 (1.1.7) 代入式 (1.1.6) 可得

$$\varphi' = \pi KL \times (n'_k / n_1)^2 \times \sin^2 U' \times dS' \quad (1.1.8)$$

式中，透过率 K 同样可用来表征光通量经光学系统的传递，但在光通量的传递中没有折射率因子，即

$$\varphi' = K\varphi \quad (1.1.9)$$

因此有

$$\varphi' = \pi KL \times \sin^2 U \times dS \quad (1.1.10)$$

因此像元 dS' 上的辐照度 E 为

$$E = \varphi' / dS' = \pi KL \times (n'_k / n_1)^2 \times \sin^2 U' \quad (1.1.11)$$

利用式 (1.1.10)，并将 dS / dS' 用系统的横向放大率 β 来表示，则有

$$E = \pi KL \times (1 / \beta)^2 \times \sin^2 U \quad (1.1.12)$$

可见，像面上轴上点处，小面积的光照度与孔径角正弦的平方成正比，与放大率的平方成反比。

下面把一般形式的像的辐照度公式表示成适用于红外光学系统的实用形式，图 1.1.3

所示为红外光学系统出瞳光线的简单示意图。 $P_1'P_2'$ 是光学系统的出瞳，直径为 $2a'$ 。像面和出瞳平面相对于像方焦点的距离，以惯用的符号 x' 和 x_p' 表示，则式(1.1.11)中的 $\sin^2 U'$ 可以近似表示成

$$\sin U' = a' / (x' - x_p') \tag{1.1.13}$$

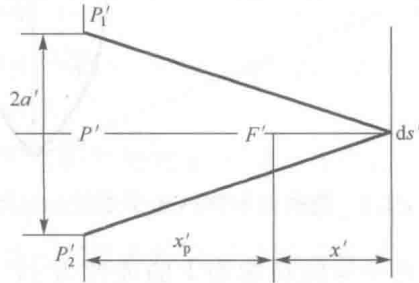


图 1.1.3 红外光学系统出瞳光线示意图

将式(1.1.13)中各量分别用入瞳半径 a 、轴向放大率 β_p 和 β 及系统的焦距 f' 表示。代入式(1.1.11)，并设系统位于空气中，可得

$$E = (1/4)\pi KL \times (2a / f')^2 \times \beta_p^2 / (\beta_p - \beta)^2 \tag{1.1.14}$$

式中，入瞳直径与焦距之比 $(2a / f')$ 称为相对孔径，即 $(1/F\#)$ ，它是红外光学系统中的一个重要性能参数。该式只是像面中心处很小面积上的辐照度公式，对于轴外点的像，由于其成像光束的孔径角较轴上点小，其辐照度要有所降低。表 1.1.1 列出了不同像方视场角时的像点辐照度与轴上点辐照度的比值。

表 1.1.1 不同像方视场角像点辐照度与轴上点辐照度对比

| 像与光轴夹角 | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° | 60° |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 像照度与光轴像照度比值 | 1.00 | 0.941 | 0.780 | 0.562 | 0.344 | 0.171 | 0.0625 |

从表 1.1.1 可以看出，一般视场较小的光学系统，视场边缘辐照度的减弱是微不足道的，可认为整个视场内照度均匀。当红外系统的视场角为 60° 时，视场边缘的照度约为中心照度的 56%，这会引入焦平面探测器探测辐热量或光子数不均匀，增大系统的噪声等效温差 (NETD)。

如果产生红外辐射的物体为朗伯辐射体，则有以下关系

$$M = \pi L \tag{1.1.15}$$

式中， M 为朗伯辐射体的辐出度。

联立式(1.1.6)、式(1.1.14)和式(1.1.15)，得到轴上物体温度 T 与像照度 E 之间关系的红外光学系统数学模型为

$$E = (1/4)K\sigma T^4 \times (2a / f')^2 \times \beta_p^2 / (\beta_p - \beta)^2 \tag{1.1.16}$$

当物面位于无穷远时, 因为 β 为 0, 则式 (1.1.16) 可以简化为

$$E = (1/4)K\sigma T^4 \times (2a/f')^2 \quad (1.1.17)$$

1.2 热成像技术

白天, 人眼能看到自然界中的景物, 因为眼睛接收到景物表面反射太阳的直射光或散射光。夜晚, 虽然没有太阳照明, 但在多数夜间, 仍有月光、星光或大气辉光存在, 自然界中的景物表面仍然要反射这些微弱的光线, 于是人眼还能模糊地看到近处景物、大景物的轮廓。在夜间观察, 基本矛盾是人眼接收到的光强不足。解决这个问题的基本思路是:

- ① 使用大口径的望远镜, 尽可能多地得到光能量;
- ② 像电子学那样, 设法对微弱的光图像进行放大;
- ③ 用人工光源对景物进行照明;
- ④ 利用景物在红外波段的辐射能量实现热成像。

用不同的技术解决这个问题, 就形成了不同的夜视方法——微光夜视技术和热成像技术。

微光夜视技术是利用电真空和电子光学等技术, 实现光子图像—电子密度图像—光子图像的转换。在该转换过程中, 通过对电子密度图像的倍增, 实现对光子图像的增强, 进而实现在有微弱光线照明下的夜间观察的一种技术。

微光夜视技术的核心是微光图像增强器, 是一个由光电阴极、电子光学部件、荧光屏 3 大部分组成的电真空器件。其工作原理是: 景物反射的微弱可见光和近红外光汇聚到光电阴极上, 光电阴极受激向外发射电子, 在这一过程中, 实现把景物的光强分布图像变成与之对应的电子密度分布图像; 在电子光学部件中, 输入一个电子, 可以输出成千上万个电子, 因此, 光电阴极的电子密度分布图像就被成千上万倍地增强了, 所谓的“微光图像增强”就是在这—过程中实现的。最后, 经过倍增的大量电子轰击荧光屏, 实现电子密度图像—光子图像的转变, 得到增强微光图像供人眼观察。迄今为止, 微光图像增强器已发展到第四代, 其差别主要是在光电阴极的材料和电子光学的部件上。实用的微光夜视仪还包括接收、汇聚光线的望远镜, 供人眼直接观察的目镜、电源等部分。如果用电视摄像机摄取微光图像增强器输出的图像, 用电视来观察, 这样的系统就是微光电视。

热是构成物体的分子、原子运动的宏观表现, 温度是分子、原子热运动程度的度量值。自然界中的物体, 只要有温度, 就会发射电磁波。在电磁波频谱中, 波长在 $0.001 \sim 1\text{mm}$ 的是红外线。自然界中的物体都有温度, 因此, 都以红外辐射的方式与环境进行能量交换。由于红外线是由分子、原子热运动引起的, 故也称为热辐射。物体表面热辐射的强弱与该点的温度和表面状态有关, 从而形成一幅反映物体温度分布和表面特征的

热辐射图像（简称热图像或热像），但人眼对热辐射没有视觉反应，不能直接看见热图像。由于决定景物可见光反射和反射率差的物性因素，也决定着景物热辐射发射和发射率差，所以景物热辐射分布的图像可以复现由景物反射和反射率差所形成的可见光图像的大部分细节。

1.2.1 热成像技术解决的基本问题

由于利用了景物自身发射的热辐射成像，从而在根本上解决了夜间观察中光强不足的问题。室温景物时刻不停地发射包括中波红外（ $3\sim 5\mu\text{m}$ ），尤其是长波红外（ $8\sim 14\mu\text{m}$ ）波段光子数巨大的红外辐射。在这两个红外波段，没有昼夜之分。显然，如果能感知景物的热图像，则一天 24 小时都是透明的。因此，借助于热成像技术，可以使人们更有效地进行夜间观察。

能够摄取景物红外辐射分布图像，并将其转换为人眼可见图像的装置，就是红外热成像系统（简称热像仪）。实现景物热成像的技术称为热成像技术。热成像技术就是综合利用红外物理和技术、半导体、微电子、真空、低温制冷、精密光学机械、电子学、信号处理、计算机、系统工程等获取景物的热辐射图像，并将其转变成电信号，再用处理后的电信号驱动显示器，产生可供人眼观察热图像的一门高新技术。实现将人眼不可见的景物热图像转换成人眼可观察的热像的装置称为热像仪。

热像仪一般包括 6 个部分：

①接收和汇聚景物发射红外线的红外望远镜；

②既实现红外望远镜大视场与红外探测器小视场匹配，又按显示制式的要求进行信号编码的光学机械扫描器；当使用探测元数量足够多的红外焦平面探测器时，光学机械扫描器可以省去；

③将热辐射信号变成电信号的红外探测器组件；

④对电信号进行处理的电子学组件；

⑤将电信号转变成可见光图像的显示器；

⑥进行信号处理的算法和软件。

到目前为止，已经发展了 3 代热成像产品，其差别主要是使用了不同的红外探测器。

1.2.2 热成像技术的作用与地位

热成像技术有 3 大功能：

①将人眼的观察范围扩展光谱红外区；

②极大地提高人眼观察的灵敏度；

③获得了客观世界与热运动相关的信息。

现代科学技术的迅猛发展使热成像技术有了革命性进展，具体表现为：

①实现了长波红外、中波红外的热成像，实现了真正意义上的夜视；

②成功发展二代热像仪产品，大批量生产，已广泛应用于陆、海、空、天等领域；