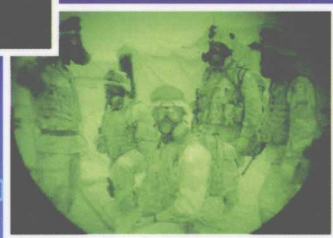
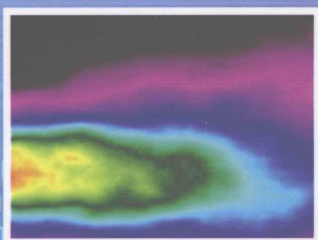


红外图像处理、分析与融合

Infrared Image Processing, Analysis and Fusion

李俊山 杨威 张雄美 著



科学出版社
www.sciencep.com

红外图像处理、分析与融合

李俊山 杨 威 张雄美 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从红外图像的目标特性出发,以红外图像景象匹配、红外目标识别与跟踪、红外图像融合等内容为重点,系统阐述了红外图像处理、分析与融合中的理论、方法和应用技术,涵盖了红外图像应用中涉及的核心内容。

本书是红外图像景象匹配、红外目标识别与跟踪、红外图像融合技术及其应用研究的最新成果总结,内容注重理论与实践并重,针对性与系统性较强。

本书可供信号与信息处理、通信与信息系统、电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与工程、红外遥感及应用等学科中从事图像处理与分析技术的研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生或高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

红外图像处理、分析与融合/李俊山,杨威,张雄美著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025784-0

I. 红… II. ①李…②杨…③张… III. ①红外技术-应用-图象处理
②红外技术-应用-图象分析 IV. TN911.73 TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 184094 号

责任编辑:鞠丽娜/责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉/封面设计:三函设计

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 11 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 11 月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—2 500 字数:284 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8002

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

前 言

红外探测技术以其被动式和全天候探测等得天独厚的优势,在现代高科技战争中发挥着越来越重要的作用。红外成像以其被动工作、抗干扰性强、目标识别能力强、全天候工作等特点,已在导弹制导、前视成像、红外夜视、红外搜索、红外跟踪、海关缉私、海上救援、森林消防、航空测量、资源勘探、损伤探测、生物医学等领域得到了越来越广泛和深入的应用,并使红外图像处理成为 21 世纪信息化社会构建和国防建设中的最重要的支撑技术之一,具有十分广阔的发展和应用前景。

一方面,由于总体上来说红外图像具有对比度低、边缘模糊、信噪比低、成分复杂等缺点;另一方面,由于信息技术的迅猛发展及在军事领域里的广泛应用,使得复杂战场环境中目标的灵活性、机动性不断提高,伪装和隐身能力不断增强;同时受大气热辐射、远作用距离、探测器噪声等因素影响,成像传感器探测到的目标的局部细节的灰度差异不明显,特别是在检测到的信号相对较弱、背景有非平稳起伏干扰的情况下,目标边缘有可能被大量杂波、噪声所淹没,从而导致图像信噪比降低、形状和结构的信息不足,使得目标检测识别变得更加困难。因此,红外图像的处理、分析与融合就成为红外成像及其应用中的关键且热点的课题。

本书从红外图像的目标特性出发,以红外图像景象匹配、红外目标识别与跟踪、红外图像融合等内容为重点,系统地阐述了红外图像处理、分析与融合中的理论、方法和技术。

本书共分为 4 篇 13 章。第 1 篇重点介绍了红外成像原理、红外图像的基本特征、红外目标与背景的红外辐射特性,并构成了后续各篇内容的基础。第 2 篇以国防应用中的下视红外景象匹配末制导应用为背景,系统阐述了景象匹配区选取、基于灰度的相关匹配、基于边缘的特征匹配等方面的基本原理和技术,基于神经网络、遗传算法、进化策略和改进的部分 Hausdorff 距离等新技术,建立了多种有创新性的景象匹配区选取和红外图像景象匹配算法,对于红外精确制导技术的研究和红外精确制导武器的研制具有重要的参考应用价值。第 3 篇以国防应用中的前视红外目标识别与跟踪应用为背景,系统地阐述了红外小目标检测、红外面目标检测、红外目标跟踪等方面的基本原理和技术,基于管道滤波、变分水平集、改进的 C-V 模型、粒子滤波和均值漂移等新技术,建立了多种有创新性的目标检测和目标跟踪算法,对于前视红外精确制导技术的研究和前视红外精确制导武器的研制具有重要的参考应用价值。第 4 篇从提高红外图像目标的可用性、清晰度、可识别性和提高红外图像目标的准确定位性出发,采用最新的多分辨率和多尺度分析方法

和技术,建立了多种有创新性的多分辨率图像融合方法和图像融合评价方法,对于发展和完善图像融合技术体系具有重要的意义。全书内容涵盖了红外图像处理、分析与融合中的理论、方法及应用技术的核心内容。

本书内容是作者承担的有关国家自然科学基金(项目编号:60572080,60772151)、国防预研(项目编号:413220209)等项目研究成果的总结。除作者外,参与本书内容构建工作的还有韩先锋、李旭辉、李龙、谭园园、曹素萍、史德琴等。

在本书的撰写过程中,参考和引用了一些文献的观点和素材,在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。

本书可供信号与信息处理、通信与信息系统、电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与工程、红外遥感及应用等学科中,从事图像处理与分析技术的研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业研究生或高年级本科生的学习参考书。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者和专家批评指正。

作 者

2009年8月1日于西安

电子信箱:lijunshan403@163.com

目 录

前言

第一篇 红外图像的目标特性

第 1 章 红外成像原理与红外图像特征	3
1.1 红外辐射基本理论	3
1.1.1 红外辐射与红外光谱	3
1.1.2 红外辐射的传输与衰减	4
1.1.3 红外辐射基本定律	6
1.2 红外成像原理	7
1.2.1 红外成像基本原理	7
1.2.2 红外成像系统的特点	9
1.2.3 红外探测器	9
1.3 红外图像的基本特征	11
1.3.1 红外图像的特点	11
1.3.2 红外图像与可见光图像的区别	12
1.4 军用红外小目标和背景的辐射特性	13
1.4.1 军用红外小目标的红外辐射特性	14
1.4.2 红外目标背景的红外辐射特性	16

第二篇 红外图像景象匹配

第 2 章 景象匹配区选取	19
2.1 典型的可匹配性检验参数分析	19
2.2 基于红外实时图的光学基准图选取	20
2.2.1 基于典型的可匹配性检验参数准则的基准图选取	21
2.2.2 仿真实验与结果分析	23
2.3 基准图选取控制策略	26
2.3.1 景象匹配区相关面特征的概念	27
2.3.2 最高峰尖锐度计算方法	29
2.3.3 景象匹配区相关面特征准则的验证	30
2.4 基于并行遗传算法的图像自匹配系数的快速计算方法	32
2.4.1 混沌优化方法	32
2.4.2 基于 PGA 的图像自匹配系数的快速计算	33

2.4.3 仿真实验及算法性能分析	34
第3章 基于遗传算法的灰度相关匹配	36
3.1 典型的灰度相似性算法分析	36
3.2 基于遗传优化的灰度相关匹配算法	38
3.2.1 基于遗传优化的灰度相关匹配算法设计	39
3.2.2 仿真实验	41
3.2.3 实验结果与分析	43
3.3 基于混合遗传算法的灰度相关匹配算法	44
3.3.1 混沌遗传优化组合方法研究	45
3.3.2 快速匹配算法的设计	45
3.3.3 实验及算法性能分析	47
3.4 基于遗传算法的分层快速匹配算法	48
3.4.1 算法控制策略设计	48
3.4.2 旋转实时图像的坐标变换	50
3.4.3 匹配算法的实现	52
3.4.4 仿真实验结果及分析	53
第4章 基于 Hausdorff 距离的边缘特征匹配	56
4.1 部分 Hausdorff 距离与景象匹配	56
4.1.1 Hausdorff 距离	56
4.1.2 部分 Hausdorff 距离	57
4.1.3 基于平均距离值的部分 Hausdorff 距离	57
4.1.4 改进的部分 Hausdorff 距离	58
4.2 基于 LTS-HD 的景象匹配加速技术	58
4.2.1 邻域排除法	59
4.2.2 扫描终止法	59
4.2.3 前向跳跃法	59
4.3 基于 LTS-HD 的边缘特征快速匹配算法	60
4.3.1 Hausdorff 距离的变换	60
4.3.2 基于 LTS-HD 的快速景象匹配算法设计	61
4.3.3 实验结果与分析	62
4.4 基于进化策略的边缘特征匹配算法	64
4.4.1 进化策略的算法模型	64
4.4.2 进化策略的改进措施	67
4.4.3 进化策略与 LTS-HD 结合的匹配算法	68
4.4.4 实验结果与分析	69
4.5 基于边缘金字塔结构的边缘特征匹配算法	71
4.5.1 边缘图像金字塔和距离图像金字塔	72

4.5.2 金字塔抽取模式和分解次数的自适应确定	73
4.5.3 边缘金字塔分解的 LTS-HD 距离匹配算法	74
4.5.4 仿真实验结果及分析	74
第 5 章 基于神经网络的景象匹配	77
5.1 BP 神经网络	77
5.2 基于 BP 神经网络的景象匹配设计	80
5.2.1 BP 神经网络匹配特征设计	80
5.2.2 景象匹配的 BP 神经网络结构设计	82
5.2.3 景象匹配的 BP 神经网络算法	83
5.2.4 算法性能分析	84
5.3 基于进化策略的 BP 神经网络匹配算法	86
5.3.1 传统 BP 算法的缺陷分析及以往的改进方法	86
5.3.2 改进的 ES 与 BP 神经网络结合的关键技术	87
5.3.3 基于进化策略的 BP 神经网络匹配算法设计	89
5.3.4 仿真实验与结果分析	90
5.4 基于像素环形排列的神经网络匹配算法	92
5.4.1 算法描述	92
5.4.2 仿真实验与结果分析	94

第三篇 红外目标识别与跟踪

第 6 章 红外小目标检测	99
6.1 红外小目标检测方法	99
6.1.1 DBT 方法	99
6.1.2 TBD 方法	101
6.2 基于特征统计表决的小目标检测	102
6.2.1 特征提取	102
6.2.2 分层特征统计表决的小目标提取	103
6.3 基于背景抑制和管道滤波的红外运动小目标检测	104
6.3.1 数学形态学理论	104
6.3.2 基于数学形态学滤波的背景抑制	105
6.3.3 基于管道滤波的序列图像中运动小目标的检测	107
第 7 章 红外面目标检测	109
7.1 基于二维熵分割的红外面目标检测	109
7.1.1 信息熵	109
7.1.2 二维直方图	110
7.1.3 二维熵分割算法	111
7.1.4 快速二维熵分割算法	111

7.1.5 实验结果及算法性能分析	114
7.2 基于变分水平集的红外面目标分割方法	115
7.2.1 曲线演化和水平集方法	116
7.2.2 C-V 模型	116
7.2.3 改进 C-V 模型的红外图像分割方法	117
7.2.4 实验结果及分析	118
7.3 基于时空联合的红外目标聚类提取方法	119
7.3.1 时域分割	120
7.3.2 空域分割	121
7.3.3 实验结果及分析	123
第 8 章 基于粒子滤波的红外目标跟踪	125
8.1 基于贝叶斯滤波的目标跟踪	125
8.2 粒子滤波方法	127
8.2.1 蒙特卡罗原理	127
8.2.2 序贯重要性采样	127
8.2.3 重采样	129
8.2.4 粒子滤波算法	130
8.3 基于粒子群优化的辅助粒子滤波跟踪方法	130
8.3.1 辅助粒子滤波	131
8.3.2 粒子群优化	132
8.3.3 跟踪算法	133
8.3.4 实验结果及分析	134
第 9 章 基于均值漂移的红外目标跟踪	137
9.1 均值漂移理论	137
9.1.1 核密度估计	137
9.1.2 均值漂移	139
9.2 基于均值漂移和特征匹配的红外目标跟踪	139
9.2.1 基于均值漂移的红外目标跟踪	140
9.2.2 红外目标的特征匹配修正定位	141
9.2.3 实验结果及分析	143
9.3 基于改进均值漂移算法的红外面目标跟踪	145
9.3.1 跟踪模型	145
9.3.2 跟踪方法	147
9.3.3 核半径的自动更新	149
9.3.4 跟踪流程	150
9.3.5 实验结果	150

第四篇 红外图像融合

第 10 章 多分辨率图像融合	155
10.1 多分辨率图像融合规则	155
10.1.1 基于像素的融合规则	155
10.1.2 基于区域的融合规则	157
10.2 基于金字塔分解的图像融合	158
10.2.1 基于 Laplace 金字塔分解的图像融合	158
10.2.2 基于对比度金字塔分解的图像融合	161
10.2.3 实验结果及分析	162
10.3 基于小波变换的图像融合	164
10.3.1 连续小波变换	164
10.3.2 用于图像处理的离散小波变换	165
10.3.3 基于小波变换的图像融合方法与意义	167
10.3.4 实验结果及分析	168
10.4 基于 Contourlet 变换的图像融合	169
10.4.1 Contourlet 变换	169
10.4.2 基于 Contourlet 变换的图像融合方法	172
10.4.3 实验结果及分析	173
第 11 章 非子采样轮廓波变换及其改进	174
11.1 非子采样轮廓波变换	174
11.1.1 非子采样金字塔	175
11.1.2 非子采样方向滤波器组	176
11.1.3 非子采样滤波器组	178
11.2 非子采样轮廓波变换的改进	180
11.2.1 不可分离小波变换	180
11.2.2 平移不变的 NSWT	181
11.2.3 基于平移不变 NSWT 的多尺度方向分析	182
11.3 图像融合实验及分析	183
11.3.1 多聚焦图像融合实验	184
11.3.2 畸变图像融合实验	186
11.3.3 微光夜视与前视红外图像融合实验	188
第 12 章 基于 NSWMDA 的自适应图像融合框架	190
12.1 基于 NSWMDA 的层内融合框架	190
12.2 基于 NSWMDA 的层间融合框架	192
12.3 基于 NSWMDA 的综合融合框架	194
12.4 实验结果及分析	194

第 13 章 图像融合效果评价	198
13.1 基于单个图像统计特征的评价方法	199
13.1.1 图像均值	199
13.1.2 信息熵	199
13.1.3 标准差	199
13.2 基于误差灵敏度的评价方法	200
13.2.1 均方根误差	200
13.2.2 峰值信噪比	200
13.3 基于结构信息传递量的评价方法	200
13.3.1 基于 SSIM 的融合图像质量评价方法	201
13.3.2 Q 因子	201
13.4 基于梯度的融合图像质量评价方法	202
13.4.1 基于梯度信息相关性的评价方法	203
13.4.2 基于边缘信息相关性的评价方法	205
13.5 实验结果及分析	205
参考文献	209

第一篇 红外图像的目标特性

目标和背景的红外辐射特征取决于它们本身的特征、工作状态、所处的环境及红外探测的时间等因素,直接决定了由红外成像探测系统获取的红外图像的特征。因此,研究红外目标及其背景的红外辐射特征及红外图像的目标特性,是进行红外图像处理、基于红外图像的景象匹配、红外目标识别与跟踪,以及红外图像融合的基础。

本篇主要对红外图像成像机理和红外图像的目标特性进行分析研究,由红外成像原理与红外图像特征 1 章内容组成。

首先,介绍了红外辐射基本理论和红外辐射的传输与衰减特性,这是本书研究工作的理论基础。

然后,给出了红外成像原理和红外成像系统的特点,介绍了红外探测器的概念,为理解红外图像特征进行了必要的铺垫。

接着,研究了红外图像的特点、红外图像与可见光图像的区别等,为进行红外图像的研究奠定了一定基础。

最后,总结了军用红外小目标的红外辐射特性和红外目标背景的红外辐射特性,构成了本书应用研究的基础。

总体来说,本篇内容是本书后续各篇内容的基础。

第 1 章 红外成像原理与红外图像特征

由于红外成像具有被动工作、抗干扰性强、目标识别能力强、全天候工作等特点,已被多数发达国家应用于军事侦察、监视和制导方面。红外成像侦察、监视和制导已成为当代武器技术发展的主流方向之一。红外辐射是整个电磁频谱中的一个重要组成部分。红外探测系统是依靠探测目标辐射或反射的红外线而工作的,因此广泛了解红外辐射的基本规律、红外探测器的成像原理,总结红外图像的基本特点,是红外图像处理、分析及融合技术研究的基础。

1.1 红外辐射基本理论

1.1.1 红外辐射与红外光谱

任何物质(体),其内部的带电粒子都是处于不断运动状态的。当物体具有一定温度,即物体温度高于热力学温度 0K 或摄氏温度 -273°C 时,它就会不断地向周围进行电磁辐射。物体的自发辐射在常温下主要是红外辐射。红外辐射俗称红外线或红外光,它是人眼看不见的光线,具有强烈的热作用,故又称热辐射。

红外线是位于可见光中红色光外的光线,是一种人眼看不见的光线,但这种光和其他任何光一样,也是一种客观存在的物质。红外线与可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线和微波等无线电磁波一起,构成了一个无限连续的电磁波波谱,如图 1.1 所示。

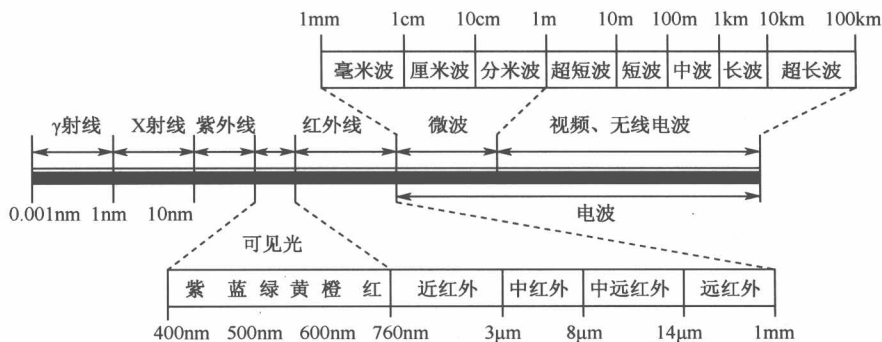


图 1.1 电磁波谱图

在电磁波谱中,通常将波长范围为 $0.7\sim 1000\mu\text{m}$ 的区域称为红外光谱区。它对应的频率范围大致在 $4\times 10^{14}\sim 3\times 10^{11}\text{Hz}$ 。为便于对不同波长的红外光进行研究,一般将红外辐射分为近红外、中红外、中远红外、远红外 4 个区域。所谓远或近是指红外辐射在电磁波谱中距离可见光的远近,靠近可见光的为近红外区。

1.1.2 红外辐射的传输与衰减

红外辐射的物理本质是热辐射^[1]。热辐射的程度主要由物体的温度所决定,温度越高,辐射出来的红外线越多,红外辐射的能量就越强,但作为电磁波的一种,红外辐射与可见光、无线电波一样是以波的形式在空间(同一介质)进行直线传播的,遵守反射、折射、散射、干涉和偏振等规律。它也有被传输介质吸收和散射等现象,导致辐射能在传输过程中会逐渐衰减。由于目标和景物的红外辐射需经过大气的传输才能被红外探测器所探测,所以大气的吸收和散射产生的衰减对于辐射而言是不可忽略的。大气是红外辐射的主要传输介质,组成大气的主要气体是氮(N_2)、氧(O_2)、氢(H_2)、氩(Ar)。其中,氢(H_2)和氩(Ar)占总体积的 99.9% 左右,其他气体占总体积的 0.1% 左右。 N_2 、 O_2 、 H_2 和 Ar 是空气中对称的双原子分子。它们在红外线传输过程中不会引起分子电荷的振荡(或者说在振动时不引起电偶极矩的变化),不吸收 $15\mu\text{m}$ 以下的红外线,即不会造成红外辐射在传输过程中衰减。

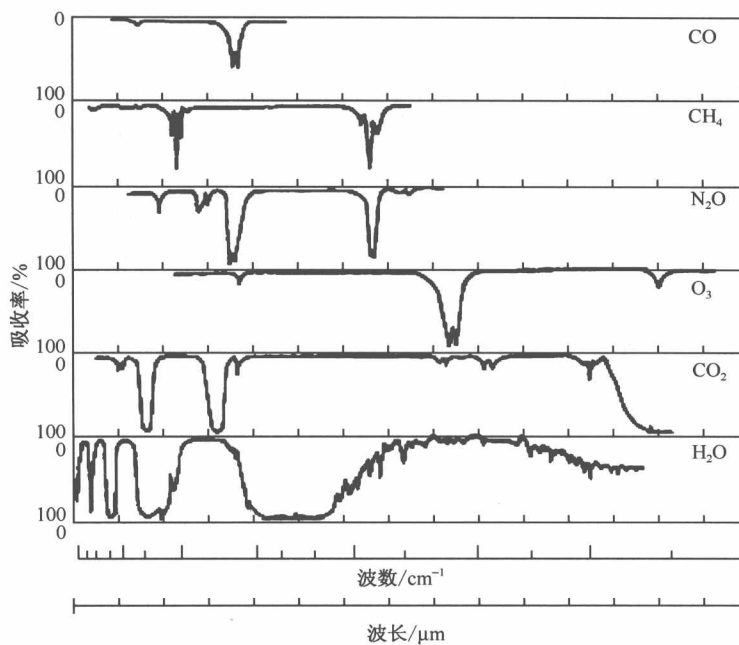
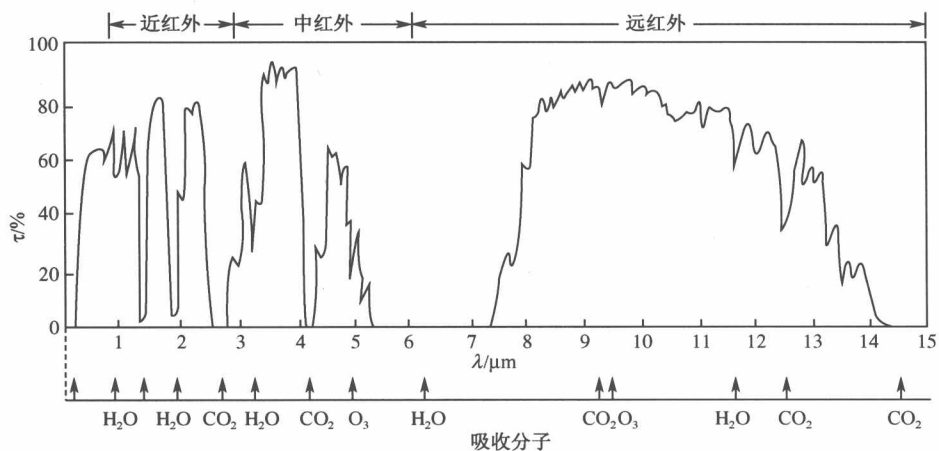
在实际大气中,除 N_2 、 O_2 、 H_2 和 Ar 外,还有其他的气体分子、水蒸气及尘埃、固体微粒等。例如, H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 N_2O 和 CO 等多原子气体分子,在红外线传输过程中会引起分子的电偶极矩变化,导致对红外线的吸收和散射,使辐射能在传输过程中逐渐衰减。除上述气体分子外,还存在着许多大小为 $10^{-1}\sim 10^{-7}\text{cm}$ 的液态和固态的悬浮物,如灰尘、烟、碳粒子、雾、云、雨和雪等。它们也会对红外辐射发生强烈散射或吸收,导致红外传输的衰减。

图 1.2 给出了 CO 、 CH_4 、 N_2O 、 O_3 、 CO_2 、 H_2O 几种吸收气体通过太阳光谱时的大气透过率曲线。由图可见,各种吸收气体对太阳光谱的形状有显著的影响。

图 1.3 给出了太阳光谱通过 1n mile (1n mile = 1.852km) 长度上大气的透过率合成曲线。从该图可以看出,红外辐射在通过大气层时被分割成 3 个波段,即在各种气体(尤其是 H_2O 和 CO_2) 吸收较弱的区段,红外线才能透过大气层向远方传播。

在这 3 个对太阳光谱吸收较弱的区段,即 $2\sim 2.6\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$,大气相对说来是比较透明的,常称为“大气窗口”。这 3 个大气窗口对于从事红外光谱研究、红外技术研究尤为重要。一般红外仪器或红外系统都工作在这 3 个窗口之内。

根据测量分析,一些重要的军事目标的热辐射波长集中在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中红外

图 1.2 各种吸收气体对太阳光谱的吸收率^[1]图 1.3 太阳光谱通过 1853m 长度的大气透射率曲线^[1]

线区和 $8\sim 10\mu\text{m}$ 的中远红外线区内。利用这一特点,目标红外传感器常选用适用于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 红外大气窗口的碲化铟和适用于 $8\sim 14\mu\text{m}$ 红外大气窗口的碲铜汞。

1.1.3 红外辐射基本定律

红外辐射也称为红外线,辐射过程除了取决于温度之外,还受到许多其他因素的影响。对于理想黑体(黑体或绝对黑体是指对于任何波长的电磁辐射都全部吸收,且具有最大辐射率的物体)而言,红外辐射的基本规律归结为 Plank(普朗克)黑体辐射定律、Wein(维恩)位移定律和 Stefan-Boltzmann(斯蒂芬-玻耳兹曼)3 个基本定律^[2,3]。

1. Plank 黑体辐射定律

Plank 黑体辐射定律揭示了黑体辐射能量按照波长和温度分布的规律,其数学表达式为

$$W_B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (1.1)$$

$$I_B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)} = \frac{W_B(\lambda, T)}{\pi} \quad (1.2)$$

在式(1.1)中, $W_B(\lambda, T)$ 为黑体分谱辐射通量密度,是单位面积黑体上、单位时间内、单位波长间隔里所发射出的辐射能量; λ 是波长(m); T 表示黑体的热力学温度; c_1 是第一辐射常数且 $c_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; c_2 是第二辐射常数,且 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

在式(1.2)中, $I_B(\lambda, T)$ 为黑体分谱辐射率,是单位面积黑体上、单位时间内、单位波长间隔里所发射出的辐射强度。

Plank 定律描绘了不同温度下黑体的分谱辐射通量密度 $W_B(\lambda, T)$ 随波长 λ 和热力学温度 T 变化的情况。因为所有的曲线都不相交,所以温度越高,所有波长上的总辐射通量密度就越大。对于给定温度的黑体,辐射曲线所围成的面积代表了该黑体的总的辐射通量密度。其温度越高,面积越大。任何温度的黑体辐射分谱曲线都有一个峰值(极值),峰值的位置随黑体温度的升高渐向短波长方向移动。各种温度下黑体分谱辐射通量密度如图 1.4 所示。

2. Wein 位移定律

黑体辐射的能量大小随波长而异。从实验中发现,黑体所发射的辐射能量集中在某一波长的附近,并且以该波长为最强,称为峰值波长。Wein 位移定律给出了黑体光谱辐射峰值波长 λ_M 与黑体热力学温度 T 之间的关系表达式,即

$$\lambda_M T = 2897.8 \pm 0.4 (\mu\text{m}) \quad (1.3)$$

Wein 位移定律表明,黑体光谱辐射峰值波长 λ_M 与黑体热力学温度成反比,即黑体温度愈高,其最大辐射波长愈偏向短波长区。但这一公式仍有局限性,Wein