

中国科学院大学研究生教材系列

# 高级红外光电工程导论

周世椿 编著

 科学出版社

中国科学院大学研究生教材系列

# 高级红外光电工程导论

周世椿 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

红外光电工程涉及红外物理、光学、探测器、信号检测与处理等多个技术领域，是一门工程性强、知识覆盖面宽的综合性学科。本书是中国科学院大学推出的系列教材之一，重点介绍红外光电系统的基础理论和相关技术。按红外光电系统信息获取的流程，本书共分“红外辐射和辐射源”“红外光学系统”“红外探测器”“红外分光技术”“光机扫描技术”等五章，其中前三章是本书的重点。

本书可作为科研院所、军事院校及普通高校光电信息工程、光信息科学与技术、测试技术与仪器、电子科学与技术等专业的研究生教材或教学资料，也可供从事光学遥感、光电对抗、红外光电检测系统设计、研制或技术应用的科研人员和工程管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高级红外光电工程导论/周世椿著. —北京: 科学出版社, 2014. 6

中国科学院大学研究生教材系列

ISBN 978-7-03-041288-5

I. ①高… II. ①周… III. ①红外探测—研究生—教材 IV. ①TN215

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2014)第138625号

责任编辑: 钱俊 周 滔 责任校对: 桂伟利

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 陈 敬

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

新科印刷有限公司印刷

科学出版社总发行 各地书店经销

\*

2014年7月第一版 开本: 720×1000 1/16

2014年7月第一次印刷 印张: 23 3/4

字数: 458 000

定价: 118.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

红外辐射是电磁辐射频谱的一个波段,红外技术主要研究红外辐射的产生、传输、接收、信息处理及其应用。得益于军事上的迫切需求和航天工程的蓬勃发展,红外技术在第二次世界大战期间和战后的几十年取得迅速发展。目前,红外技术不仅应用于军事、航空航天遥感等领域,也广泛应用于工业检测、医学诊断、科学研究等方面。探测的电磁辐射不限于红外波段,也包括可见光、紫外和太赫兹等波段,红外技术应用更完整地称为红外光电技术。

红外光电工程涉及红外物理、光学、探测器、信号检测与处理等多个技术领域,是一门工程性强、知识覆盖面宽的综合性学科。从事红外光电系统设计、研制的科研人员、研究生往往有不同的专业背景,在涉足这一学科时,通常需要自学红外系统理论。作者于1978年在中国科学院上海技术物理研究所攻读光电专业硕士学位时,导师匡定波院士就要求我们几位弟子在浙江大学进修基础课程的同时自学美国小哈德逊所著的《红外系统原理》一书,该书也是所里前辈广为选用的入门书。在日后的科研工作中参考较多的系统理论书籍是美国密西根环境研究所与国际光学工程学会(SPIE)于1993年出版的《红外光电系统手册》。

本书的编写始于2003年4月,上海技术物理研究所决定为本所的在读博士研究生开设名为“高级红外光电工程导论”的专业课程,委托作者授课并结合工程实践自编教材,希望将该门课程最终打造成特色课程、精品课程。

作者认为,一本好的工程类教材应该是授人以渔,而不是授人以鱼。因此,在本书编写过程中,作者注重吸取红外光电技术领域的名著、专著的精华,力求保持红外光电工程基本理论的系统性、完整性,同时也适当结合工程实践和应用实例,以深化读者对系统理论的理解。

本书共五章,其中前三章是本书的重点,全书的框架基本按红外光电系统信息获取的流程编排。讲述的内容以红外为主、可见光为辅,主题始终环绕辐射的强度、空间、光谱、时间等特性的探测、利用及其特性之间的相互制约。

作者以本书为教材,至今已为上海技术物理研究所10届400余名博士生讲授了“高级红外光电工程导论”课程,在所内取得较好反响。2009年10月,本书通过中国科学院研究生院(现已更名为中国科学院大学)教材编审委员会的审定,并列入教材资助计划。2013年1月,中国科学院大学委托科学出版社与作者联系,商谈公开出版事宜,准备以中国科学院大学系列教材的形式出版。2013年7月起,作者花费近

半年时间对该教材进行了修改。

书稿的一大修改是红外名词的规范化。近年来,作者有幸参与了中国光学学会委托上海技术物理研究所开展的红外名词审定工作,在匡定波、方家熊两位院士指导下,所内外专家集思广益,已完成编写稿并送交中国光学学会。“红外名词”是中国光学学会编写的《中国光学名词》的一部分,获准后将作为国家标准颁布。此外,上海技术物理研究所组织所内专家编写的《红外常用术语》也已完稿,该书概括了红外辐射、光学、探测器、系统、应用等方面和相关专业的常用术语。作者从上述工作中受益匪浅,在修改书稿时有更高的起点、更宽的视野和对一些众说不一的红外名词、术语有准确的把握。

本书原稿是以研究生为对象的教学用书,一期课程约需 80 学时,其中包括作业讲评、课堂讨论。考虑到出版后本书既能用作研究生教材,也能供从事红外光电工程系统研制和应用的技术人员、管理人员自学,修改稿在章节编排上作了调整,内容叙述也力求深入浅出,各章结尾给出的参考文献可供需要深入了解的读者扩展阅读。

本书的书名《高级红外光电工程导论》沿用了向中国科学院大学申报的博士生课程名。其实,“高级”仅是有相对意义的修饰词,“导论”才是关键词。考虑到删除“高级”会引发书名与课程名不一致的矛盾,只能保留,希望读者不要因辞害意。作者在书中较多引用了上海技术物理研究所在航天航空遥感和光电对抗方面的工程实例。虽然上海技术物理研究所从事的红外光电工程研究有一定代表性,但其覆盖面毕竟有限,读者阅读本书时可结合自己的工作实践,融会贯通。

本书自开始编写至向科学出版社付稿,已历时十年。虽有“十年磨一剑”之说,但由于作者学识、实践经验均有限,尽力未必能尽美,欠缺之处,期望得到广大专家、读者的指正。

在本书编写、修改过程中,作者得到上海技术物理研究所工程七室、研究生部的全力支持。裴云天、潘兆鑫、梁平治、王培纲等先生审阅了有关章节,并提出了宝贵意见。该书的出版得到上海技术物理研究所和中国科学院大学的资助,作者在此表示衷心的感谢!

周世椿

2014 年 1 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 红外辐射和辐射源	1
1.1 红外辐射	1
1.1.1 电磁波频谱	1
1.1.2 波段划分方法	3
1.2 红外光电系统	5
1.2.1 探测对象	5
1.2.2 信息流程	6
1.2.3 系统特性	7
1.2.4 应用分类	8
1.3 辐射测量术语	8
1.3.1 常用辐射量	8
1.3.2 光谱辐射量	10
1.3.3 波段辐射量	11
1.3.4 光子辐射量	12
1.3.5 光度量	12
1.3.6 朗伯漫射体	14
1.4 辐照度计算	16
1.4.1 面元之间的辐射传递	16
1.4.2 点源与面源	17
1.4.3 点源产生的辐照度	18
1.4.4 面源产生的辐照度	19
1.4.5 太阳常数计算	20
1.5 热辐射基本定律	21
1.5.1 辐射体的分类	21
1.5.2 基尔霍夫定律	22
1.5.3 普朗克定律	23
1.5.4 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	25

1.5.5	维恩位移定律	25
1.5.6	微分辐亮度	26
1.5.7	光子形式的普朗克定律	27
1.6	反射率	28
1.6.1	镜面反射率	28
1.6.2	漫反射率	28
1.6.3	漫反射目标的辐射计算	31
1.7	发射率	32
1.7.1	发射率定义	32
1.7.2	黑体、灰体和选择性辐射体	33
1.7.3	辐射测温的温度定义	34
1.7.4	材料的发射率	35
1.7.5	热控涂层的辐射特性	38
1.8	自然辐射源	41
1.8.1	概述	41
1.8.2	太阳辐射	41
1.8.3	天体和宇宙背景	43
1.8.4	地球大气	44
1.8.5	地物	46
1.8.6	地球-大气系统	49
1.9	人工辐射源	50
1.9.1	概述	50
1.9.2	黑体型辐射源	50
1.9.3	积分球	56
1.9.4	非气体白炽光源	56
1.9.5	弧光灯	58
1.9.6	气体放电灯	58
1.9.7	发光二极管	59
1.9.8	激光器	60
1.10	人工目标辐射计算	62
1.10.1	有动力飞行器辐射计算	62
1.10.2	空间目标的平衡温度	65
1.11	红外辐射的大气传输	67

---

1.11.1 大气特性 .....	67
1.11.2 大气吸收 .....	71
1.11.3 大气散射 .....	74
1.11.4 其他大气效应 .....	76
1.11.5 大气传输计算 .....	76
1.12 MODTRAN 介绍 .....	79
1.12.1 大气模型 .....	79
1.12.2 气溶胶模型 .....	80
1.12.3 大气路径类型 .....	80
1.12.4 运行模式 .....	80
1.12.5 计算实例 .....	82
1.13 大气传输效应的应用 .....	83
1.13.1 太阳辐射定标 .....	83
1.13.2 地空目标探测的大气效应 .....	87
1.13.3 大气垂直探测原理 .....	88
参考文献 .....	90
<b>第 2 章 红外光学系统 .....</b>	<b>91</b>
2.1 光的波动理论 .....	91
2.1.1 光的波粒二象性 .....	91
2.1.2 光矢量 .....	91
2.1.3 自然光和偏振光 .....	92
2.1.4 光的传播 .....	92
2.2 几何光学基本定律 .....	93
2.2.1 直线传播和独立传播定律 .....	93
2.2.2 反射定律 .....	94
2.2.3 折射定律 .....	95
2.2.4 费马原理 .....	96
2.3 红外光学元件的反射损失 .....	97
2.3.1 界面反射率 .....	97
2.3.2 平板透过率 .....	98
2.3.3 折射元件的表面增透 .....	99
2.4 近轴光学理论 .....	99
2.4.1 共轴光学系统 .....	99



2.4.2	近轴理论和应用	99
2.4.3	共轴球面系统近轴光计算	101
2.5	理想光学系统	104
2.5.1	主点和焦点	104
2.5.2	物像关系	106
2.5.3	焦深和景深	107
2.5.4	光学系统的组合	108
2.6	实际光学系统	109
2.6.1	光学孔径	109
2.6.2	光学视场	110
2.6.3	光敏元照度和辐射通量计算	116
2.7	光学像差	117
2.7.1	像差概述	117
2.7.2	球差	118
2.7.3	轴外像差	120
2.7.4	彗差	122
2.7.5	场曲和像散	123
2.7.6	畸变	124
2.7.7	色差	125
2.7.8	初级像差概要	126
2.8	光学系统像质评价	127
2.8.1	衍射限点分辨率	127
2.8.2	分辨率法	129
2.8.3	点列图法	130
2.8.4	光学传递函数法	131
2.9	调制传递函数	132
2.9.1	脉冲响应和频率响应	132
2.9.2	点扩散函数	133
2.9.3	调制度	133
2.9.4	光学传递函数	135
2.9.5	调制传递函数计算	136
2.9.6	调制传递函数检测	137
2.9.7	方波传递函数	139

2.9.8 附录:傅里叶变换的数学基础	141
2.10 系统调制传递函数	142
2.10.1 概述	142
2.10.2 扫描成像系统 <i>MTF</i> 分析	144
2.10.3 成像系统的分辨率	147
2.11 红外光学系统的主要类型	148
2.11.1 反射式系统	148
2.11.2 卡塞格伦双反射系统	152
2.11.3 折反射系统	154
2.11.4 折射式系统	156
2.12 辅助光学系统	160
2.12.1 场镜	160
2.12.2 光锥	161
2.12.3 浸没透镜	162
2.13 红外光学材料	163
2.13.1 主要特性参数	163
2.13.2 红外光学晶体	165
2.13.3 红外光学玻璃	169
2.13.4 红外光学塑料	169
2.13.5 材料选择	170
参考文献	170
<b>第3章 红外探测器</b>	<b>171</b>
3.1 概述	171
3.2 探测器特性参数	171
3.2.1 响应率	171
3.2.2 噪声等效功率	174
3.2.3 探测率	175
3.3 热探测器	177
3.3.1 热敏效应	177
3.3.2 测辐射热计	177
3.3.3 热电偶和热电堆	179
3.3.4 热释电探测器	180
3.4 光子探测器	182

3.4.1	光电效应 .....	182
3.4.2	固体能带理论 .....	183
3.4.3	光电导型红外探测器 .....	185
3.4.4	光伏型探测器 .....	186
3.4.5	光磁电型红外探测器 .....	189
3.4.6	光发射型探测器 .....	189
3.4.7	量子阱红外探测器 .....	189
3.5	常用红外探测器 .....	191
3.5.1	探测器发展历史 .....	191
3.5.2	探测器种类和性能 .....	192
3.6	探测器噪声 .....	195
3.6.1	噪声概述 .....	195
3.6.2	探测器噪声分类 .....	196
3.6.3	背景限探测率 .....	201
3.6.4	低噪声放大电路设计 .....	201
3.6.5	晶体管噪声 .....	204
3.7	系统灵敏度 .....	207
3.7.1	灵敏度表达方法 .....	207
3.7.2	系统噪声等效带宽 .....	208
3.7.3	测量精度、灵敏度与噪声 .....	210
3.7.4	噪声等效灵敏度 .....	211
3.7.5	目标探测灵敏度 .....	214
3.7.6	探测概率和虚警率 .....	218
3.8	红外焦平面阵列 .....	221
3.8.1	概述 .....	221
3.8.2	红外焦平面器件结构 .....	221
3.8.3	读出集成电路的前置放大 .....	224
3.8.4	电流-电压放大器 .....	226
3.8.5	复位积分电路 .....	227
3.8.6	信号多路传输与读出 .....	231
3.8.7	片上信号处理 .....	233
3.9	焦平面阵列的噪声 .....	235
3.9.1	时间噪声与空间噪声 .....	235

3.9.2	信号与噪声电子数	236
3.9.3	像元的噪声电子数计算	237
3.9.4	实测时间噪声和空间噪声	238
3.10	图像传感器	239
3.10.1	图像传感器种类	239
3.10.2	图像传感器性能参数	241
3.10.3	凝视成像系统灵敏度计算	247
3.10.4	CCD 图像传感器	249
3.10.5	CMOS 图像传感器	252
3.11	红外焦平面阵列实例	255
3.11.1	光伏型红外焦平面线列	255
3.11.2	热敏型非致冷红外焦平面面阵	259
3.12	红外凝视成像系统性能评价	261
3.12.1	噪声等效温差	261
3.12.2	热像仪参数测量	264
3.12.3	目标识别距离预测	267
3.13	红外探测器制冷方式	269
3.13.1	制冷方式介绍	269
3.13.2	辐射制冷	269
3.13.3	热电制冷	270
3.13.4	储存式制冷	271
3.13.5	低温机械制冷	272
	参考文献	273
<b>第 4 章</b>	<b>红外分光技术</b>	<b>274</b>
4.1	引言	274
4.2	薄膜光学基础	274
4.2.1	光学薄膜	274
4.2.2	菲涅耳公式	275
4.2.3	单层膜的多光束干涉	277
4.2.4	等效光纳	279
4.2.5	两种特殊膜层	280
4.2.6	红外光学薄膜	281
4.2.7	红外滤光片及其应用	285

4.3	棱镜分光 .....	288
4.4	光栅分光 .....	289
4.4.1	衍射光栅概述 .....	289
4.4.2	衍射光栅分光 .....	290
4.4.3	闪耀光栅 .....	295
4.4.4	体积相位全息光栅 .....	297
4.4.5	球面光栅 .....	302
4.5	成像光谱仪 .....	303
4.5.1	概述 .....	303
4.5.2	推扫型成像光谱仪 .....	304
4.5.3	光机扫描型成像光谱仪 .....	307
4.5.4	谱线弯曲和色畸变 .....	307
4.6	干涉分光技术 .....	309
4.6.1	概述 .....	309
4.6.2	干涉分光原理 .....	310
4.6.3	干涉分光光谱分辨率 .....	312
4.6.4	干涉分光特点 .....	314
4.6.5	干涉光谱仪结构 .....	315
	参考文献 .....	317
<b>第5章</b>	<b>光机扫描技术 .....</b>	<b>318</b>
5.1	引言 .....	318
5.2	光机扫描种类 .....	319
5.2.1	物面扫描 .....	319
5.2.2	像面扫描 .....	319
5.2.3	多元扫描 .....	320
5.2.4	行扫描方式 .....	320
5.3	光机扫描部件 .....	321
5.3.1	扫描部件及驱动 .....	321
5.3.2	摆动平面镜 .....	321
5.3.3	摆动、旋转传感头 .....	323
5.3.4	旋转 45°扫描镜 .....	325
5.3.5	旋转多面体反射棱柱 .....	327
5.3.6	旋转多面体折射棱柱 .....	329

---

5.3.7 旋转折射光楔 .....	329
5.3.8 摆动二维指向镜 .....	331
5.4 扫描图形 .....	335
5.4.1 直线扫描 .....	335
5.4.2 圆锥扫描 .....	336
5.5 扫描仪数据畸变与对地定位 .....	337
5.5.1 概述 .....	337
5.5.2 地面畸变和正切畸变 .....	338
5.5.3 扫描漏失和重叠 .....	339
5.5.4 飞行姿态 .....	342
5.5.5 遥感数据的对地定位 .....	343
5.5.6 机载行扫描仪数据流 .....	345
5.6 卫星轨道简介 .....	346
5.6.1 卫星轨道概述 .....	346
5.6.2 轨道高度、速度与周期 .....	346
5.6.3 太阳同步与地球同步轨道 .....	349
5.7 附录 1:45°镜多元并扫 K 镜消像旋技术 .....	352
5.7.1 消像旋方法 .....	352
5.7.2 平面镜转动的物像矢量关系 .....	353
5.7.3 K 镜消像旋原理 .....	354
5.8 附录 2:二维指向搜索跟踪系统成像特性 .....	357
5.8.1 绕单轴转动矢量公式 .....	357
5.8.2 绕单轴转动的物像矢量关系 .....	358
5.8.3 绕两轴转动的坐标变换矩阵 .....	359
5.8.4 扫描轨迹计算 .....	360
5.8.5 像旋角计算 .....	361
5.8.6 目标精确跟瞄的像旋修正 .....	362
参考文献 .....	363

# 第 1 章 红外辐射和辐射源

## 1.1 红外辐射

### 1.1.1 电磁波频谱

#### 1.1.1.1 电磁辐射

电磁辐射是一种物质以电磁波形式发射、传播能量的物理现象。由于电场和磁场的变化能相互感应,电场和磁场的能量能在介质或真空中自行传播,形成电磁波。

电磁波可根据波长(频率)划分为 $\gamma$ 射线、X射线、紫外(UV)、可见光、红外(IR)、微波和无线电波等谱段,电磁波的频谱由这些谱段排列组成(见图 1.1)。光学研究的内容覆盖了电磁波谱中从远红外至紫外并延伸至软 X 射线的光谱范围,可见光只是电磁波谱中能被人眼所感知的极小部分。

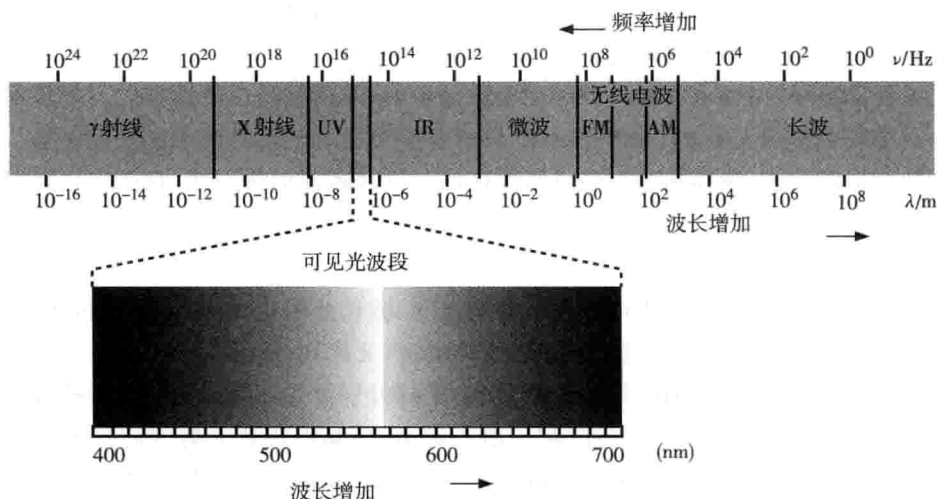


图 1.1 电磁波频谱

不同谱段电磁波的波长、频率、光子能量有较大差别(见表 1.1),但它们都遵守同样的反射、折射、衍射和偏振等定律,在真空中的传播速度相同,为  $3 \times 10^8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。电磁波在长波端(如微波、无线电波)表现出显著的波动性,在短波端(如 $\gamma$ 射线、X射线)表现出极强的粒子性,而光波具有显著的波粒二象性。

根据经典物理理论,物质带电粒子的加速运动会产生变化的电场。物质(包括固体、液体和气体)内部的分子、原子或电子在加热、电子撞击、光照射以及化学反应等外部激发后能发生能级跃迁,产生各种光学波段的电磁辐射。真空腔、导体中电流振荡能产生微波、无线电波辐射,而光子能量更大的 X 射线是电子辐射, $\gamma$  射线则是原子核的放射性衰变产生的辐射。

表 1.1 电磁波谱段的波长、频率和光子能量

谱段	波长	频率	光子能量
$\gamma$ 射线	小于 0.01nm	大于 10EHz	100keV~300GeV
X 射线	0.01~10nm	30EHz~30PHz	120eV~120keV
紫外	10~390nm	30PHz~790THz	3~124eV
可见光	390~750nm	790~405THz	1.7~3.3eV
红外	750nm~1mm	405THz~300GHz	1.24meV~1.7eV
微波	1mm~1m	300GHz~300MHz	1.24 $\mu$ eV~1.24meV
无线电波	1mm~100000km	300GHz~3Hz	12.4feV~1.24meV

#### 1.1.1.2 热辐射

热辐射是物质中带电粒子热运动产生的电磁辐射。绝对温度非零的物体均有热辐射。热辐射可产生从紫外、可见光、红外至微波的连续光谱,其光谱分布随温度而异。常温、低温物体热辐射的能量主要集中在红外波段。

工程上,热辐射被认为是一种利用电磁波辐射、非接触的热传递方式。热辐射的基本定律有基尔霍夫定律、普朗克定律、维恩位移定律、斯蒂芬-玻尔兹曼定律等。根据普朗克辐射定律,物体热辐射强度与物体的温度及表面的辐射能力有关,热辐射的光谱分布则与物体温度有关。

#### 1.1.1.3 红外线

电磁辐射频谱中,将介于可见光和微波之间、波长范围为 0.76~1000 $\mu$ m 的波段命名为红外。红外波段的电磁辐射称为红外辐射,又称红外线。

红外线的发现始于 1800 年,英国天文学家赫胥尔在寻找观察太阳时保护自己眼睛的方法时发现了这一“不可见光线”。由于常温、低温物体热辐射的能量主要集中在红外波段,红外光电系统可采取无源、被动的方式,非接触地探测物体自身的热辐射,并反演物体表面的温度或辐射特性。

#### 1.1.1.4 可见光

电磁辐射频谱中,将介于紫外和红外之间、波长范围为 390~750nm 的波段命名为可见光。

可见光是能产生人眼视觉响应的电磁辐射,可见光波长范围根据人眼的视觉响应界定。不同波长可见光能产生不同视觉色彩,可根据视觉色彩将可见光划分为紫



光(390~450nm)、蓝光(450~495nm)、绿光(495~570nm)、黄光(570~590nm)、橙光(590~620nm)、红光(620~750nm)等波段。对人眼视觉最灵敏的单色光是波长550nm附近的绿光。可见光能透过地球大气,其透射窗口也称大气光学窗口。硅探测器是最常用的可见光探测器。

#### 1.1.1.5 紫外线

电磁辐射频谱中,将介于X射线和可见光之间、波长范围为10~390nm的波段命名为紫外。紫外波段的电磁波称为紫外辐射,又称紫外线。

德国物理学家里特于1801年发现经氯化银溶液浸泡的纸片会在三棱镜可见光色散光谱的紫光外侧的某种射线的照射下变黑,由于此射线的波长位于可见光紫光区的外侧,因此被称为紫外线。

凡是温度达到1200℃以上的物体均有丰富的紫外辐射,大气层外太阳光能量的10%为紫外辐射。利用电弧、气体放电、高温燃烧等原理可人工制造紫外源。紫外光子能量较大,能引起物质化学反应、发光或发射荧光。

紫外波段可再划分为若干个子波段,如划分为近紫外、中紫外、远紫外、极远紫外等。根据太阳紫外线在地球大气中的透射特性,还可专门命名一些紫外光谱区,如可见盲紫外、日盲紫外、真空紫外等。

### 1.1.2 波段划分方法

红外波段可划分为若干个子波段。不同专业领域根据各自的应用,提出了不同的波段划分方法。如国际照明委员会将红外划分为近红外(0.7~1.4μm)、中波红外(1.4~3μm)、远红外(50~1000μm)等波段。天文工作者同样将红外分为近红外、中波红外、远红外等波段,但波长范围不同。

目前较常见的红外波段划分方法兼顾了应用、大气窗口、探测器响应等因素,将整个红外波段划分为近红外、短波红外、中波红外、长波红外、远红外等5个子波段(见表1.2)。

表 1.2 红外波段划分(常用)

波段名	英文名	缩略语	波长范围/μm
近红外	near-infrared	NIR	0.75~1.4
短波红外	short-wavelength infrared	SWIR	1.4~3
中波红外	mid-wavelength infrared	MWIR	3~8
长波红外	long-wavelength infrared	LWIR	8~15
远红外	far infrared	FIR	15~1000

上海技术物理研究所从遥感应用、红外探测器和红外材料的角度,提议将红外波段划分为近红外、短波红外、中波红外、长波红外、远红外、甚远红外等6个子波段(见表1.3)。