



工业和信息化部“十二五”规划教材

# 红外物理与技术

Infrared Physics and Technology

杨风暴 主编



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



工业和信息化部“十二五”规划教材

# 红外物理与技术

杨风暴 主 编

蔺素珍 副主编

王肖霞 王志社 李大威 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是编者根据多年的教学经验和科研实践,按照新形势下教材改革的精神,结合红外物理与技术发展现状编写而成的。本书将理工融合的思想融入其中,内容充实、重点突出、通俗易懂、便于教学。本书内容共分12章,按从理论到技术的顺序系统介绍红外辐射的基本概念、辐射度量基础、热辐射的基本规律、红外辐射源、红外辐射的测量、红外辐射的大气传输、红外热成像技术、红外热成像系统的性能评价、红外偏振成像的原理与技术、红外仿真技术、红外图像处理技术及红外图像融合技术等内容。本书配套电子课件和习题参考答案。

本书可以作为高等学校物理学、应用物理学、光电信息科学与工程、安全科学与技术、公安技术等专业的高年级本科生或光学工程、仪器科学与技术、兵器科学与技术、生物工程等学科硕士生的教材,也可供从事红外与夜视方面的工程技术和科学研究人员参考使用。

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

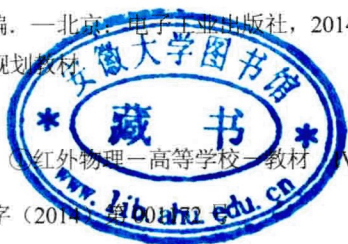
红外物理与技术 / 杨风暴主编. —北京:电子工业出版社, 2014.5

工业和信息化部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-22272-6

I. ①红… II. ①杨… III. ①红外物理—高等学校—教材 IV. ①TN211

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第004112号



策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 20.5 字数: 524.8千字

印 次: 2014年5月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 48.00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。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010)88258888。

# 前 言

红外技术在国民经济、国防和科学研究中得到了广泛的应用，是现代光电子技术的重要组成部分，尤其是红外成像的不断发展和完善，使红外技术的应用得到空前普及。因而，许多高等学校在相关专业和学科的本科生、研究生培养中开设了红外物理与技术方面的课程，以适应国民经济建设对红外技术人才的需求。

红外物理以电磁波谱中的红外辐射为特定对象，研究红外辐射的产生、传输及探测过程的现象、机理、特征和规律等；红外技术以红外物理为基础，研究目标的红外辐射特点、探测与成像、信息处理及应用方法等。红外物理为红外技术的应用、发展提供了理论基础和实验数据；而随着红外技术的不断推广和应用，会出现许多新的物理问题和现象，从而驱动红外物理的研究深入。二者是紧密联系，相互促进的。为了让理科学学生在掌握扎实的红外物理基本知识的同时，得到红外技术方面应用性能能力的培养，让工科学学生在学好红外技术应用知识的同时，进一步夯实红外物理的理论基础，满足理工融合型课程教学改革的需要，本书将红外物理、红外技术两大块内容有机整合起来，并加入该领域一些新的理论研究和技術发展成果，以利于人才全面素质的培养和提高。

本书共分 12 章，按照从理论到技术的顺序，具体内容安排是：第 1 章介绍红外辐射的基本概念、红外技术应用，第 2 章介绍辐射度量基础，第 3 章介绍热辐射的基本规律，第 4 章介绍红外辐射源以及常用的红外目标、背景的辐射特性，第 5 章介绍常用红外辐射的测量，第 6 章介绍红外辐射大气传输的衰减及透过率的计算，第 7、8 章分别介绍红外热成像技术、红外热成像系统的性能评价，第 9 章论述红外偏振成像原理与技术，第 10 章介绍红外仿真技术，第 11、12 章分别介绍红外图像处理技术、红外图像融合技术。

为了便于不同专业的教学，使用本书可按照不同的线程来组织教学内容。例如，物理类专业可选择第 1 章，第 2.2~2.5 节，第 4.1~4.3 节，第 5、6 章，第 7.1 节，第 9.1~9.2 节，第 10.1 节，第 11.1 节；光学类专业可选择第 1、3、4 章，第 5.1~5.4 节，第 6 章，第 7.1~7.4 节，第 9、11 章，第 12.1 节；信息类专业可选择第 1、3 章，第 4.4~4.5 节，第 5.5 节，第 6、7、8 章，第 9.2~9.3 节，第 10、11、12 章。也可以根据学时、专业特点、教学计划进行修改或采用其他线程进行教学。未选择的章节作为自学、选学内容，如物理类专业可选学第 7.2 节，第 10.2~10.3 节；光学类专业可选学第 7.1~7.2 节，第 10.1 节；信息类专业可选学第 2.1~2.4 节，第 4.1~4.3 节，第 5.1~5.3 节，供学生自主探究性学习。建议课堂讲授学时为 40~60 学时。

教学中，可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合，也可以进行适当扩展。为适应教学模式、教学方法和手段的改革，本书配套电子课件和习题参考答案，请登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 免费注册下载。

本书可以作为高等学校物理学、应用物理学、光电信息科学与工程、安全科学与技术、公安技术等专业的高年级本科生或光学工程、仪器科学与技术、兵器科学与技术、生物工程等学科硕士生的教材，也可供从事红外与夜视方面的工程技术和科研人员参考使用。

本书由杨风暴教授主编，第7、8、10章、第11.5节由蔺素珍编写，第3、5、6章由王肖霞编写，第4章、第11.1~11.4节由王志社编写，第1、9、12章由杨风暴编写，第2章由李大威编写；吉琳娜博士、纪利娥、安富、李伟伟、周萧等硕士研究生参与了部分章节的编写工作。

特别指出的是，本书编写过程中得到了广州飒特红外股份有限公司的支持，开展了产学研结合的有益合作，在此对其表示深深的谢意。北京未尔锐创科技有限公司提供了红外仿真方面的技术资料，在此表示诚挚的感谢。

在编写过程中，除了参阅各章之后所列出的参考文献外，还在网络上查阅了的大量资料，在此对相关作者也表示谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，欢迎大家批评指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 绪论	1	2.5 朗伯体的辐射量计算	35
引言	1	小结	42
1.1 红外辐射的基本概念	1	习题	42
1.1.1 电磁辐射	1	参考文献	44
1.1.2 红外辐射	3	第 3 章 热辐射的基本规律	45
1.1.3 红外辐射的特点	4	引言	45
1.2 红外物理与红外技术	5	3.1 物体发光类型	45
1.3 红外技术的应用	6	3.2 基尔霍夫定律	46
1.3.1 红外技术的发展	6	3.3 普朗克辐射定律	48
1.3.2 红外技术在军事领域的应用	7	3.4 维恩位移定律	55
1.3.3 红外技术在国民经济领域的应用	9	3.5 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	57
小结	13	3.6 黑体辐射的计算	58
习题	13	3.7 辐射效率和辐射对比度	60
参考文献	14	3.8 发射率	63
第 2 章 辐射度量基础	15	3.8.1 发射率的定义	63
引言	15	3.8.2 物体发射率的变化规律	65
2.1 辐射量	15	3.8.3 热辐射体的分类	66
2.1.1 基本辐射量	15	小结	67
2.1.2 光谱辐射量	19	习题	68
2.1.3 光子辐射量	20	参考文献	68
2.2 光度量	22	第 4 章 红外辐射源	70
2.2.1 光视效能与光视效率	22	引言	70
2.2.2 基本光度量	25	4.1 腔体辐射理论	70
2.3 朗伯辐射体	28	4.1.1 Gouffé 理论	70
2.3.1 朗伯余弦定律	28	4.1.2 Devos 理论	76
2.3.2 朗伯辐射体的特征	29	4.2 黑体型辐射源	83
2.4 朗伯辐射度量中的基本规律	30	4.3 实用红外辐射源	85
2.4.1 距离平方反比定律	30	4.3.1 电热固体辐射源	86
2.4.2 互易定理	30	4.3.2 气体放电辐射源	88
2.4.3 立体角投影定理	31	4.4 红外激光器	92
2.4.4 Sumpner 定理	32	4.4.1 激光的特性	92
2.4.5 角系数互换性关系	32	4.4.2 常用激光器	93
		4.5 自然景物光辐射	94

4.5.1 太阳光辐射	94	第 6 章 红外辐射的大气传输	144
4.5.2 月亮光辐射	96	引言	144
4.5.3 天空背景光辐射	97	6.1 大气的基本组成	144
4.5.4 地物光辐射	99	6.1.1 大气层的结构	144
4.5.5 海洋背景光辐射	101	6.1.2 大气的组成	145
4.6 人工目标的红外辐射	103	6.1.3 大气模式	149
4.6.1 火箭的红外辐射	103	6.2 辐射在大气中传输的光学现象	150
4.6.2 飞机的红外辐射	104	6.2.1 大气的折射	150
4.6.3 坦克的红外辐射	108	6.2.2 大气消光及大气窗口	151
4.2.4 火炮的红外辐射	110	6.2.3 大气的其他光学现象	153
4.6.5 红外诱饵的辐射	111	6.3 大气吸收与散射的计算	154
4.6.6 人体的红外辐射	111	6.3.1 大气的吸收	154
小结	112	6.3.2 大气的散射	160
习题	112	6.3.3 大气透过率	167
参考文献	112	6.4 大气消光对成像系统性能的影响	169
第 5 章 红外辐射的测量	113	6.5 大气传输计算软件 MODTRAN	170
引言	113	小结	175
5.1 常见的红外辐射测量仪器	113	习题	175
5.1.1 单色仪	113	参考文献	176
5.1.2 光谱辐射计	115	第 7 章 红外热成像技术	177
5.1.3 红外分光光度计	117	引言	177
5.1.4 傅里叶变换红外光谱仪	119	7.1 红外热成像技术的发展	177
5.1.5 多通道光谱仪	121	7.1.1 红外热成像的基本过程	178
5.2 基本辐射量的测量	122	7.1.2 红外热成像技术的发展过程	178
5.2.1 辐射亮度的测量	122	7.2 红外热成像系统的构成	178
5.2.2 辐射强度的测量	123	7.2.1 红外热成像系统的诞生及发展	179
5.2.3 总辐射通量的测量	123	7.2.2 红外热成像系统的类型及结构	179
5.3 红外发射率的测量	125	7.2.3 红外热成像系统的通用组件	181
5.3.1 半球全发射率的测量	126	7.2.4 红外热成像系统的基本参数	182
5.3.2 法向光谱发射率的测量	128	7.3 光学系统和扫描器	183
5.4 红外反射比的测量	131	7.3.1 光学系统	183
5.4.1 反射比	132	7.3.2 扫描器	185
5.4.2 积分球反射计	134	7.4 探测器和探测器电路	185
5.5 红外吸收比和透射比的测量	138	7.4.1 红外探测器的发展与分类	186
5.6 红外辐射测温	139	7.4.2 光子红外探测器	187
小结	142		
习题	142		
参考文献	143		

7.4.3 热红外探测器	188	9.2.1 偏振光的产生	214
7.4.4 红外探测器的性能参数	191	9.2.2 偏振光的描述	217
7.4.5 探测器电路	193	9.2.3 红外偏振成像方式	221
7.5 数字化	194	9.3 目标与背景的红外偏振特性	223
7.6 图像处理	195	9.3.1 自然目标的偏振特性	223
7.6.1 增益/电平归一化	195	9.3.2 人工目标的偏振特性	226
7.6.2 图像格式化	195	9.3.3 背景的偏振特性	227
7.6.3 伽马校正	195	9.4 红外偏振成像与光强成像	
7.7 图像重建与图像显示	196	的对比	229
小结	196	9.4.1 大气传输差异特性分析	229
习题	197	9.4.2 成像响应差异特性分析	230
参考文献	197	小结	232
<b>第 8 章 红外热成像系统的性能评价</b>	198	习题	232
引言	198	参考文献	232
8.1 红外热成像系统的主要性能指标及其测量	198	<b>第 10 章 红外仿真技术</b>	234
8.1.1 噪声等效温差 (NETD)	199	引言	234
8.1.2 调制传递函数 (MTF)	201	10.1 仿真技术的基本概念	234
8.1.3 最小可分辨温差 (MRTD)	203	10.1.1 仿真与仿真技术	234
8.1.4 最小可探测温差 (MDTD)	204	10.1.2 仿真模型与仿真实验	235
8.1.5 MRTD 和 MDTD 的测量	205	10.1.3 仿真工具与仿真方法	235
8.2 红外热成像系统的作用距离估算	206	10.2 红外仿真的基本方法	236
8.2.1 扩展源目标的视距估计模型	206	10.2.1 数学仿真	236
8.2.2 视距估算的修正因素	206	10.2.2 半实物仿真	237
8.3 热成像系统的特性参数测试平台	208	10.3 红外地表仿真	238
8.3.1 红外热成像系统的特性参数测试平台	208	10.3.1 地表红外辐射建模	238
8.3.2 红外热成像系统的特性参数测试	209	10.3.2 地表红外场景可视化	240
小结	210	10.3.3 实验结果及分析	243
习题	210	10.4 基于 JRM 软件系统的红外场景仿真	245
参考文献	211	10.4.1 JRM 介绍	245
<b>第 9 章 红外偏振成像的原理与技术</b>	212	10.4.2 仿真案例	253
引言	212	小结	255
9.1 光的偏振	212	习题	255
9.2 红外偏振成像的原理	214	参考文献	256
		<b>第 11 章 红外图像处理技术</b>	257
		引言	257
		11.1 红外图像的特点	257
		11.2 红外图像的非均匀性校正	257



11.2.1 红外图像的非均匀性产生机理	257	<b>第 12 章 红外图像融合技术</b>	281
11.2.2 红外图像的非均匀性校正方法	259	引言	281
11.3 盲元检测与补偿	265	12.1 图像融合的基本概念	281
11.3.1 盲元检测	265	12.1.1 图像融合的概念与层次	281
11.3.2 盲元补偿	265	12.1.2 图像融合效果的评价	284
11.4 红外图像的增强	266	12.1.3 常用图像融合方法分析	289
11.4.1 红外图像直方图	266	12.1.4 图像融合的应用	291
11.4.2 直方图均衡化	268	12.2 可见光与红外图像的融合	292
11.4.3 自适应分段线性变换	269	12.3 红外多波段图像的融合	294
11.4.4 离散小波变换红外图像增强方法	270	12.3.1 红外多波段图像的融合	294
11.4.5 图像增强实验	271	12.3.2 红外中波细分波段图像的融合	301
11.5 红外图像的降噪	273	12.3.3 红外短、长波段图像的融合	308
11.5.1 红外图像的常见噪声模型	273	12.3.4 红外多波段伪彩色融合	310
11.5.2 红外图像降噪的基本方法	275	12.4 红外偏振与红外光强图像的融合	312
11.5.3 基于阈上随机共振的红外图像降噪方法	277	小结	317
小结	279	习题	317
习题	279	参考文献	318
参考文献	280		

# 第1章 绪 论

## 引 言

红外物理与技术主要研究红外辐射的规律和应用，红外辐射是电磁辐射的一种，其使用价值不断提高，因此越来越引起科学研究和工程应用领域的重视，成为现代新兴科学技术中不容忽视的一个领域。

本章目的：(1) 在介绍电磁辐射的基础上给出红外辐射的概念及特点；(2) 讨论红外物理与红外技术的关系；(3) 结合红外技术的发展，介绍红外技术在军事和国民经济中的具体应用。

### 1.1 红外辐射的基本概念

#### 1.1.1 电磁辐射

根据电磁学理论可知，一切物质都在不停地发射或吸收电磁辐射，这是因为物质内部带电粒子（如电子）的变速运动会发射或吸收电磁辐射。电磁辐射在空间传播过程中所携带的能量称为电磁辐射能。在日常生活中，我们遇到的各种辐射，如 $\gamma$ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、微波、无线电波等都是电磁辐射。由于产生或探测各种辐射的方法不同，历史上它们就得到了上述各种不同的名称，但因为在本质上它们是相同的，所以将各种辐射统称为电磁辐射。如果把这些辐射按其波长（或频率）的次序排列成一个连续谱，那么就得到这个连续谱称为电磁波谱，如图1-1所示。通常，光辐射包括红外辐射、可见光和紫外辐射。

电磁辐射具有波动性，因此电磁辐射又称为电磁波。电磁波以横波形式进行传播，所有电磁波都遵循同样形式的反射、折射、干涉、衍射和偏振定律，且在真空中传播的

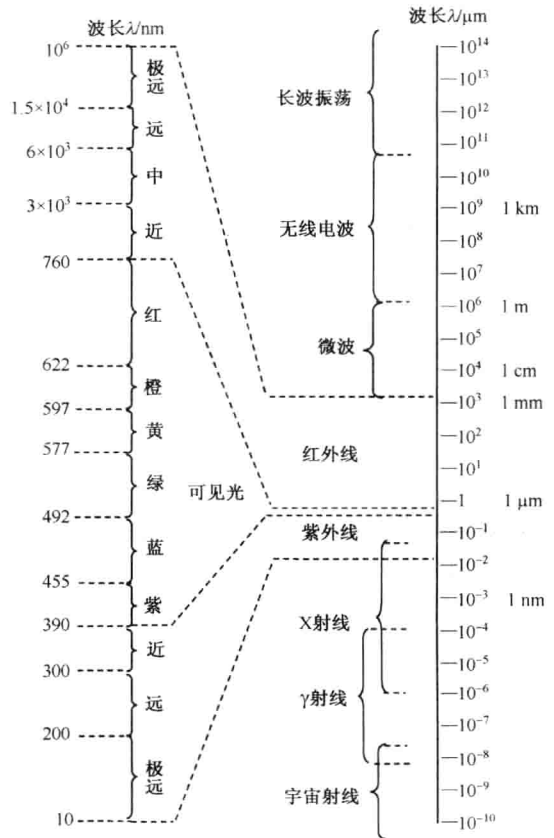


图 1-1 电磁波谱

速度具有同样的数值，即真空中的光速，其值为  $c = (2.99792458 \pm 0.00000012) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在真空中，频率为  $\nu$  的电磁波，波长为  $\lambda$ ，真空中的光速为  $c$ ，则有

$$\lambda \nu = c \quad (1-1)$$

通常认为各种电磁波都具有一定的频率，由于它们在不同的介质中有不同的传播速度，此时便可认为是电磁波的波长被改变了。如在介质中，同样频率为  $\nu$  的电磁波，波长为  $\lambda'$ ，速度为  $c'$ ，则有

$$\lambda' \nu = c' \quad (1-2)$$

由式 (1-1)、式 (1-2) 得到

$$\lambda = \frac{c}{c'} \lambda' = n \lambda' \quad (1-3)$$

式中， $n = c/c'$  称为介质对真空的折射率。式 (1-3) 表明，同一频率的电磁波，在介质中的波长是真空中波长的  $1/n$ 。正由于存在电磁波之间的频率差别，才使得电磁波的产生与物质的相互作用有了很大差异。

在光谱学中，由于电磁波的频率是很大的数值，不能直接测量，并且测得的频率数值精度通常比测得的波长数值精度低，因此，多用波长来描述紫外线、可见光和红外线等。

在描述红外辐射时，波长的单位通常用微米 ( $\mu\text{m}$ ) 表示，它与纳米 (nm) 以及埃 ( $\text{\AA}$ ) 的关系为

$$1\mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-4} \text{ cm} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$1\mu\text{m} = 10^3 \text{ nm} = 10^4 \text{ \AA}$$

在光谱学中，电磁波除了用波长  $\lambda$  或频率  $\nu$  等参数来表征外，还经常用波数  $\tilde{\nu}$  来表示。如果电磁辐射在真空中的波长用米 (m) 表示，则波长值的倒数就是波数值，即

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-4)$$

在国际单位制中，波数的单位是  $\text{m}^{-1}$ 。它的意义相当于在真空中 1m 长的路程上包含多少个波长的数值。利用式 (1-1)，可得到波数  $\tilde{\nu}$  和频率  $\nu$  的关系为

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} \quad (1-5)$$

即波数和频率成正比，波数大小同样可反映频率的高低。因此，在光谱学中，有时又把波数  $\tilde{\nu}$  称为“频率”。但应该注意，在使用“频率”一词时，不要将它与真正的频率混淆。

在光学领域，黑体辐射、光电效应、康普顿效应等现象无法用电磁辐射的波动性来解释，由此引起了对光的本性问题的进一步探索。最后人们认识到，电磁辐射除了具有波动性外，还具有粒子性，即波粒二象性。因此，电磁辐射除了作为一种电磁波而遵守上述的波动规律以外，它还以光量子的形式存在。在考虑电磁辐射的辐射和吸收问题时，必须把电磁辐射看成分立的微粒集合，这种微粒称为光子。一个光子具有的能量为

$$\varepsilon = h\nu \quad (1-6)$$

式中， $h = (6.626176 \pm 0.000036) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  称为普朗克 (Planck) 常数。

由式 (1-1)、式 (1-4) 得, 光子能量与波长和波数的关系为

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = hc\bar{\nu} \quad (1-7)$$

即光子的能量与波长  $\lambda$  成反比, 或者说, 光子的能量随其频率的不同而异, 频率越高, 对应的光子能量越大, 因而, 短波光子比长波光子具有更大的能量。在光谱学中, 有时也用波数  $\bar{\nu}$  来表示光子的能量。

光子的能量还常用电子伏特 (eV) 来表示。一个电子伏特的能量是指在真空中一个自由电子在 1V 电位差的加速下所获得的动能。

电子伏特和焦耳 (J) 之间的换算关系为

$$1\text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19}\text{J}$$

### 1.1.2 红外辐射

红外辐射也称为红外线, 是 1800 年由英国天文学家威廉·赫谢尔 (William Herschel, 1738—1822 年) (图 1-2) 在研究太阳七色光的热效应时发现的。他用分光棱镜将太阳光分解成从红色到紫色的单色光, 然后用涂黑的水银温度计测量不同颜色光的热效应。他发现: 当水银温度计移到红光边界以外, 人眼看不见有任何光线的黑暗区时, 温度反而比红光区域高。后来, 威廉·赫谢尔和其他科学家用火焰、烛光、火炉等光源和热源进行实验, 都观察到了类似现象。说明在红光外侧, 确实存在一种人眼看不见的“热线”, 后来称为“红外线”。

红外线存在于自然界的任何一个角落。事实上, 一切温度高于绝对零度的有生命和无生命的物体都在不停地辐射红外线。太阳是红外线的巨大辐射源, 整个星空都是红外线源。而地球表面, 无论是高山大海, 还是森林湖泊, 甚至是冰川雪地, 也在日夜不断地辐射红外线。特别是活动在地面、水面和空中的军事装置, 如坦克、车辆、军舰、飞机等, 由于它们有高温部位, 所以往往都是强红外辐射源。人们的生活环境中到处都有红外线源, 如照明灯、火炉, 甚至一杯热茶, 都在放出大量红外线。更有趣的是, 人体自身就是一个红外线源 (如图 1-3 所示, 人脸红外辐射图像, 左半部分不同颜色表示不同温度), 一切飞禽走兽也都是红外线源。总之, 红外辐射充满整个空间。

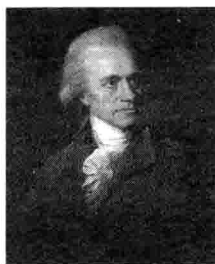


图 1-2 英国天文学家威廉·赫谢尔

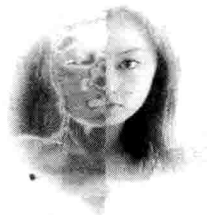


图 1-3 人脸红外辐射图像

在电磁波谱中, 常用倍频程等级来表征频谱或波长的范围。由图 1-1 可知, 红外辐射从可见光的红光边界开始, 一直扩展到电子学中的微波区边界。红外辐射的波长范围是  $0.75 \sim 1000\mu\text{m}$ ,

表 1-1 红外辐射光谱区划分

波段	近红外	中红外	远红外	极远红外
波长 / ( $\mu\text{m}$ )	0.75~3	3~6	6~15	15~1000

是个相当宽的区域，跨过大约 10 个倍频程。在红外技术领域，通常把整个红外辐射光谱区按波长分为 4 个波段，如表 1-1 所示。

以上的划分方法是根据红外辐射在地球大气层中的传输特性而确定的。例如，在前 3 个波段中，每个波段都至少包含一个大气窗口。所谓大气窗口，是指在这一波段内，大气对红外辐射的衰减较小、大气透过率较大。

图 1-4 所示为按 1976 年美国标准大气模型用 PcModWin 软件计算的辐射通过大气传输的光谱透过率曲线（详细内容见 6.5 节），从中也可以看出红外大气窗口在  $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$  波段。

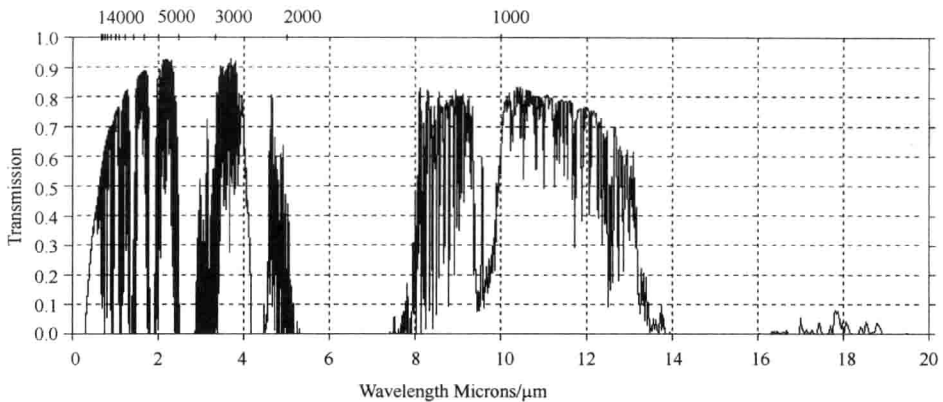


图 1-4 大气传输的光谱透过率曲线

工程实践中，红外探测器的工作波段常常与大气窗口的对应关系更为紧密，红外长波探测器一般工作在  $8\sim 12\mu\text{m}$  或  $8\sim 14\mu\text{m}$ ，中波探测器一般工作在  $3\sim 5\mu\text{m}$ ，短波探测器一般工作在  $1\sim 2.5\mu\text{m}$ 。工作波段大于  $15\mu\text{m}$  的探测系统常称为远红外波段探测器。另外中波红外还可再细分为两个波段，如  $3.4\sim 4.1\mu\text{m}$  和  $4.5\sim 5.3\mu\text{m}$ ；夜晚天光除可见光成分以外，还有丰富的短波红外辐射，短波红外辐射亮度随波长增加，甚至超过可见光的亮度，有时将  $1\sim 2.5\mu\text{m}$  短波红外再细分成 4 个波段：短波红外 1 ( $0.76\sim 1.11\mu\text{m}$ )，短波红外 2 ( $1.16\sim 1.32\mu\text{m}$ )，短波红外 3 ( $1.52\sim 1.77\mu\text{m}$ )，短波红外 4 ( $2.10\sim 2.40\mu\text{m}$ )。

在光谱学中，根据红外辐射产生的机理不同，红外辐射按波长分为 3 个区域。

- (1) 近红外区： $0.75\sim 2.5\mu\text{m}$ ，对应原子能级之间的跃迁和分子振动泛频区的振动光谱带。
- (2) 中红外区： $2.5\sim 25\mu\text{m}$ ，对应分子转动能级和振动能级之间的跃迁。
- (3) 远红外区： $25\sim 1000\mu\text{m}$ ，对应分子转动能级之间的跃迁。

### 1.1.3 红外辐射的特点

红外辐射是一种电磁场辐射，它既具有与可见光相似的特性，如反射、折射、干涉、衍射和偏振，又具有粒子性，即它可以以光量子的形式被发射和吸收。这已在电子对产生、康普顿散射、光电效应等实验中得到充分证明。此外，红外辐射还有一些与可见光不一样的独有特性：

(1) 由于人眼眼球中晶状体强烈吸收红外，人的眼睛对红外辐射不敏感，因此必须用对红外辐射敏感的红外探测器才能探测到；

(2) 红外辐射的光量子能量比可见光的小，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  $1/20$ ；

(3) 红外辐射的热效应比可见光的热效应要强得多；

(4) 在电磁波谱中，可见光谱的波长范围(0.38~0.75 $\mu\text{m}$ )只跨过一个倍频程，而红外波段(0.75~1000 $\mu\text{m}$ )却跨过大约10个倍频程。因此，红外光谱区比可见光谱区含有更丰富的内容。

(5) 红外辐射更容易被物质吸收。

## 1.2 红外物理与红外技术

红外物理学是现代物理学的一个分支，它以电磁波谱中的红外辐射为特定研究对象，是研究红外辐射与物质之间相互作用的学科。红外物理学运用物理学的理论和方法，研究分析红外辐射的产生、传输及探测过程中的现象、机理、特征和规律，从而为红外辐射的技术应用，探索新的原理、新的材料、新型器件和开拓新的波谱区提供理论基础和实验依据。

红外物理的主要研究内容包括红外辐射的基本规律、红外光谱学、红外辐射源、目标和背景红外辐射特性(包括空间分布特性、光谱辐射特性、时间变化特性)、红外辐射的大气传输特性、红外波段光学材料等。

红外技术是以红外物理学中的理论、方法和实验为基础，面向应用需求而开展研究的相关技术，其主要研究红外辐射的测量、目标的探测和成像、探测信号的处理等技术。具体包括红外辐射的测量、红外目标仿真、红外探测与成像技术(红外元器件的研制、系统开发)、红外检测技术、红外信号与信息处理、红外激光技术和红外应用技术等。

红外物理和红外技术是相互联系、相互依存、相互融合的，二者之间的关系既紧密联系又相互区别。红外物理学不仅能预言各种技术应用方案的可行性，而且它可以通过对各种物质、不同目标和背景红外辐射特性的研究，对地球大气层红外光学性质的研究，对不同材料红外吸收特性以及由此而引起的各种物理效应的研究，为红外系统工程的设计和新型元器件的研制提供了可靠依据；随着红外技术在各领域的推广和应用，出现了不少新的物理技术问题，这也需用红外物理的理论方法，结合使用对象具体加以解决，为红外物理学的研究提供需求驱动。

红外物理与红外技术的主要内容及其相互关系如图1-5所示，这也是本书章节安排的依据。除此之外，红外物理中还包括红外材料的研究，其主要属于材料学科的范畴，红外技术中还包括红外光谱分析，其主要属于化工学科的范畴，考虑专业差异，本书没有包含这两方面的内容，请读者注意。

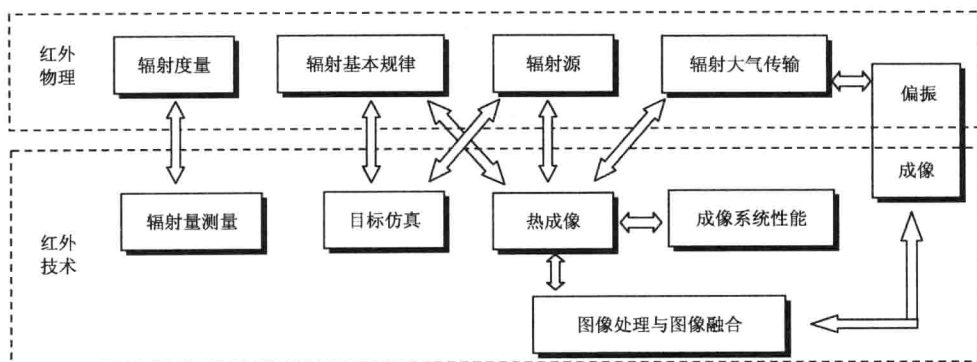


图 1-5 红外物理与红外技术的主要内容及其相互关系

红外系统往往是红外物理与红外技术研究成果的具体体现,一般的红外系统通常包括光学系统、调制盘(或扫描器)、红外探测器、电子线路和显示记录装置等。目标是红外系统所探测的对象,目标的辐射在传输过程中将因受到大气中某些气体分子的选择性吸收以及大气中悬浮微粒的散射而衰减。透过大气的目标辐射被光学系统接收,并聚焦到红外探测器平面上。调制盘可将连续光调制成交变信号并进行空间滤波,而扫描器则可将红外辐射的空间分布进行时序分解。红外探测器接收交变的红外辐射并把它转变为电信号,由探测器输出的信号经过电子线路完成放大处理。显示记录装置将经过处理的信号进行显示和记录。如果是用于监控的红外系统,还需将处理后的信号输入监控装置,以驱动执行机构工作,实现自动监控。与雷达系统和可见光仪器相比,红外系统具有如下特点:

- (1) 尺寸小,重量轻;
- (2) 能有效抵抗可见光波段的伪装;
- (3) 能昼夜全天候工作;
- (4) 比雷达有更高的角精确度;
- (5) 对辅助装置要求少(有些需要制冷装置)。

## 1.3 红外技术的应用

### 1.3.1 红外技术的发展

在红外辐射被发现之初,红外技术的应用发展比较缓慢。但随着红外物理及技术的研究深入,红外技术逐渐应用到许多领域。早在19世纪,红外探测器出现后,人们就开始利用它研究天文星体的红外辐射。但是,红外技术真正获得实际应用是从20世纪开始的。红外技术首先受到了军事部门的关注,因为它提供了在黑暗中观察、探测军事目标自身辐射及进行保密通信的可能性。第一次世界大战期间,为了战争的需要,人们研制出了一些实验性的红外装置,如信号闪烁器、搜索装置等。虽然这些红外装置没有投入批量生产,但它已显示出红外技术的军用潜力。第二次世界大战前夕,德国第一个研制出了红外变像管,并在战场上应用。战争期间,德国一直全力投入对其他红外设备的研究。同时,美国也大力研究各种红外装置,如红外辐射源、窄带滤光片、红外探测器、红外望远镜、测辐射热计等。第二次世界大战后,前苏联也开始重视并大力发展红外技术的研究。

20世纪50年代以后,随着现代红外探测技术的进步,军用红外技术得到了广泛的应用。美国研制的响尾蛇导弹上的寻的器制导装置和U-2间谍飞机上的红外照相机代表着当时军用红外技术的水平。因军事需要发展起来的前视红外装置(FLIR)获得了军界的重视,并得到广泛应用。机载前视红外装置能在 $1.5 \times 10^3 \text{m}$ 的上空探测到地面的人、小型车辆和隐蔽目标,能在 $2.0 \times 10^4 \text{m}$ 的高空分辨出汽车,特别是能探测到水下40m深处的潜艇。在海湾战争中,充分显示了红外技术,尤其是热成像技术在军事上的作用和威力。海湾战争从开始、作战到获胜的整个过程都是在夜间,夜视装备应用的普遍性乃是这次战争的最大特点之一。在战斗中投入的夜视装备之多,性能之好,是历次战争都所不能比拟的。美军每辆坦克、每个重要武器都配有夜视瞄准具,仅美军第二十四机械化步兵师就装备了上千套夜视仪。多国部队除了地面部队、海军陆战队广泛装备了夜视装置外,美国的F-117隐形战斗轰炸机、“阿帕奇”直升机、F-15E



战斗机、英国的“旋风”GRI对地攻击机等都装有先进的热成像夜视装备。正因为多国部队在夜视和光电装备方面的优势，所以在整个战争期间掌握了绝对的主动权。多国部队利用飞机发射的红外制导导弹在海湾战争中发挥了极大的作用，他们仅在10天内就摧毁伊军坦克650辆、装甲车500辆。

目前，红外技术与激光技术并驾齐驱，在军事上占有举足轻重的地位。红外成像、红外侦察、红外跟踪、红外制导、红外预警、红外对抗等在现代和未来战争中都是很重要的战略和技术手段。

在20世纪70年代以后，军事红外技术又逐步向民用部门转化。红外加热和干燥技术广泛应用于工业、农业、医学、交通等各行业和部门。红外测温、红外理疗、红外检测、红外报警、红外遥感、红外防伪更是各行业争相选用的先进技术。这些新技术的采用使测量精度、产品质量、工作效率及自动化程度大大提高。特别是标志红外技术最新成就的红外热成像技术，不但在军事上具有很重要的作用，而且在民用领域也大有用武之地。它与雷达、电视一起构成了当代三大传感系统，尤其是焦平面阵列技术的采用，将使其发展成可与人眼相媲美的凝视系统。

### 1.3.2 红外技术在军事领域的应用

利用红外技术可以昼夜对目标进行探测、跟踪和识别。从红外技术的发展可以看出其在军事方面具有重要的应用价值。在现代战争中，获取战场信息的优势已经成为掌握战争主动权的核心内容，红外技术便是获取战场信息的关键技术之一。因此许多国家投入了大量的人力和物力去研究红外技术，并将其广泛应用到军事领域，对现代战争产生了巨大影响。

一切军事目标（如空中的飞机、导弹、地面的车辆、部队及各种装备、海洋中的舰船等）都在散发大量的红外辐射。利用红外设备，可以从空中、地面对这些目标进行侦察、监视和跟踪。红外技术装备与微波雷达系统相比，具有不可替代的优势，在军事领域具体的应用主要有以下几方面。

#### （1）红外制导

红外制导是利用目标自身的红外辐射来引导导弹或其他武器装备自动接近目标，以提高命中率。空空、空地、地空和反坦克导弹等均采用了红外制导技术。红外焦平面阵列制导技术还具有识别各类诱饵的能力，使武器对目标的命中率更高。1999年，在北约国家对南联盟的轰炸中所使用的11种精确制导武器中，近半数采用了红外技术制导。图1-6所示为美国“海尔法”红外激光制导导弹发射的图片。



图 1-6 美国“海尔法”红外激光制导导弹

末敏弹中的制导部件常采用红外成像末敏器，在子弹进入稳定状态后，实时获取目标红外图像，并可检测出目标特征。

#### （2）红外夜视

红外夜视是除微光夜视以外的最主要的夜视手段。红外夜视仪在飞机的昼夜飞行（包括导航、搜索、目标捕获等）、武器瞄准、车辆驾驶、夜间战场侦察和观察、目标夜间定位跟踪、防空系统抗电磁干扰等方面都发挥着重要作用。图1-7所示为长波红外热像仪夜间拍摄的红



外夜视图像。近年来,在警察追捕犯罪嫌疑人时,也常使用红外夜视手段来发现目标。图 1-8 所示为美国警方公布的、2013 年波士顿马拉松爆炸案的第二犯罪嫌疑人藏匿在居民住宅后院游艇中的红外夜视图像。



图 1-7 红外夜视图像



图 1-8 波士顿爆炸案犯罪嫌疑人藏匿处红外图像

### (3) 红外通信

在发射端用红外辐射的平行光束作为载波,通过强度调制来发送信息;接收端收到该束红外辐射时,就可以从强度变化中解调出所传输的信息。与微波通信相比,红外通信具有更好的方向性,适用于国防边界哨所和哨所之间的保密通信。日常生活中,红外线鼠标与键盘、红外线打印机等的应用也很普及。



图 1-9 红外预警卫星

### (4) 红外预警

将红外探测器安装在舰艇和飞机等平台上,可用于对来袭导弹和其他红外威胁进行预警,发出自动对抗命令,启动红外干扰设备进行自卫。被动红外预警不易被发现、被攻击,可以弥补无线电雷达易被发现的缺点。近年来,红外预警卫星也不断受到各国的重视,图 1-9 所示为美国弹道导弹的红外预警卫星效果图。红外预警系统具有天基、空基、海基和陆基等不同系统。

### (5) 隐身藏匿武器探测

隐身武器装备虽然采用一些隐身措施,但其温度总比背景温度高,仍有可能被红外探测器检测到。将红外设备安装在空间平台上,可精确提供目标的角度位置信息,探测距离达数百千米。

藏匿于衣服内的武器,由于与其他部分的温度不同,也很容易被红外探测器检测到。如图 1-10 所示,图 1-10(a)是可见光图像,看不见右边人衣服内的武器,图 1-10(b)是红外图像,武器很容易被辨别出,图 1-10(c)是经过处理的图像。

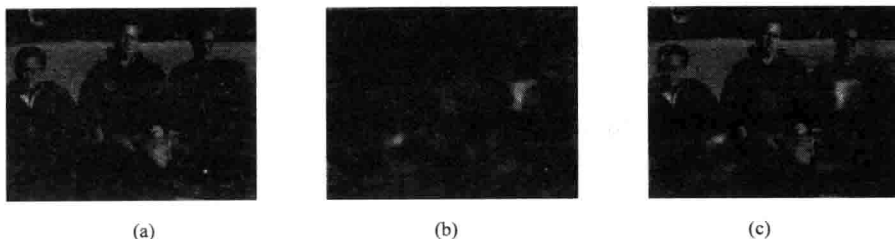


图 1-10 藏匿于衣服内武器的图像