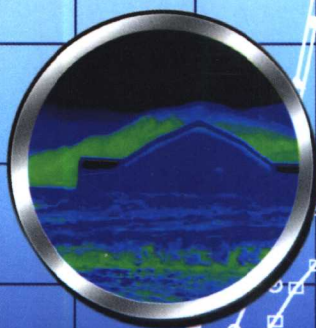


地面目标和背景的热红外特性

[荷兰] Pieter A. Jacobs 著

Thermal Infrared Characterization
of Ground Targets and
Backgrounds

吴文健 胡碧茹 满亚辉 译 周世光 校译



<http://www.ndip.cn>

国防工业出版社

地面目标和背景的热红外

Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds

[荷兰] Pieter A. Jacobs 著
吴文健 胡碧茹 满亚辉 译
周世光 校译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2002-005号

Authorized Chinese-language edition

图书在版编目(CIP)数据

地面目标和背景的热红外特性/(荷)皮特(Pieter, A.)著;吴文健等译. —北京:国防工业出版社, 2004.1

书名原文: Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds
ISBN 7-118-03225-5

I.地... II.①皮... ②吴... III.①地面侦察-红外目标-红外辐射-特征 ②地面侦察-红外背景-红外辐射-特征 IV.E933.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 072718 号

© 1996 SPIE. All rights reserved.

未经国防工业出版社和 SPIE 的书面许可,本书的任何一部分都不得以任何形式或通过任何电子或机械的方式进行复制或传播,包括影印、录制,或借助任何信息存储和检索系统。

本书中文简体版由美国 SPIE 授予中国国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6 1/4 175 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

序

光电技术广泛应用于国民经济和军事领域,特别是在军事技术中,各种光电侦察、探测、观瞄、制导等装备器材,如主动红外夜视仪、激光测距机和目标指示器、微光夜视仪、红外热像仪、红外辐射仪等,其研究、应用和开发都离不开对目标、背景和大气红外特征的研究,许多国家都投入了一定的人力和物力开展这方面的研究。但由于该领域的特殊性,其研究内容和资料成果公开发表的很少,且由于目标和背景的红外成像特征随实际条件变化很大,实验数据的分析处理非常困难,一些测量仪器和方法又没有统一的规范,因此,这一方面的资料不够全面和系统。我一直想获得较为详尽的资料,也曾计划开展相关的研究工作,但未能如愿。

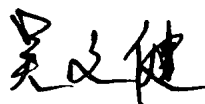
1999年3月,我在校图书馆组织的一次书展上看到了一本名为《Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds》的书。它将理论(经验)模型和实际测量有机地结合起来,通过对长时间连续观测数据的系统分析,研究了在各种气候、不同季节、不同时间、各种地形环境和不同背景等条件下,不同类型的各种目标和背景物的热红外特征及其影响因素,并结合实际详细介绍了测试方法和仪器系统。该书的主要特色是其详实丰富的实测数据、简便有效的测试技术和仪器设备、科学的数据处理和分析方法、实用的理论模型和经验参数等,这些是绝大多数的专业著作和教材鲜有涉及的,至少没有这么系统和详尽,它们将为我们开展相关研究和试验工作提供极有价值的数据资料和方法思路。这是一本难得的书,也是我迫切需要、而又一直未能找到的书。我相信,对于从事红外特征相关研究的同行来说,也一定同我一样需要它。因此,我决定将它翻译出来。

本书的原著是 SPIE 出版的 optics 工程系列教材之一,实质上是一本讲义,因而也就没有过于注重其结构和文字的修饰;该书侧重于测量技术、仪器设备及数据处理,某些理论叙述不是很完善,多处出现前后不一致的概念、符号,这就给翻译工作带来了很大的麻烦。在尊重原著的前提下,我们对其文字进行了适当的整理,对某些章节标题进行了调整,对全书的概念和符号进行了统一。

本书的第 1 至第 4 章由胡碧茹翻译,吴文健翻译第 5 章、第 6 章,满亚辉翻译第 7 章,并负责全书图片的扫描和编排工作,全书由吴文健统稿。为慎重起见,译文先后经过了 4 次全面的校正和修改,对于一些概念、定律和术语的定义和叙述,查阅了相关的论著,务求做到译文准确,又符合中文的专业术语。光电对抗专家周世光教授对全书进行了审校。周教授非常认真、细致,对原文中的每一个词都仔细审核,对译文中的每一句话都仔细推敲,甚至连文中图片坐标单位和旁注的译文都逐一校对,为此查阅了各种类型和版本的词典和专业著作。我们在此对周世光教授严谨的科学态度、踏实的工作作风和辛勤的劳动表示由衷的敬佩和感谢。

该书是一本针对性很强的专业书籍,因而在寻求出版过程中遇到了不少的困难。我们要特别感谢国防工业出版社,由于得到他们装备科技翻译图书出版基金的资助,使得本书得以出版。

本书也有其不完善之处,例如,对理论模型的建立机制和方法没有详细叙述,其中的经验参数如何选取和确定也未进行深入的讨论,大量的实测数据只分析处理了一部分,对伪装材料与技术的指导性建议也不系统和深入,等等。当然,这些问题本身就是难题,需要我们共同的努力和创造性的工作。



2002 年 9 月

内 容 简 介

本书是 SPIE (Society of Photo - optical Instrumentation Engineers) 出版的光学工程系列教材之一 (Vol TT23, 1996 年出版), 系统地介绍了热红外和目标探测的基本理论、地面目标和背景的红外特性及其影响因素、红外测量方法和仪器系统及其校正方法、红外伪装和效果评价等。本书以 1 年多时间内的系统、连续的外场监测试验数据为基础, 详细介绍了地面目标和背景的热红外探测技术和设备、试验技术、数据处理和分析方法, 内容丰富、数据详实, 图文并茂。该书是 1 本难得的理论与实践相结合的参考书, 国内尚无类似的专著出版, 可作为从事红外探测、光电对抗、光学仪器等方面科研和学习的专业技术人员、研究生的教材或参考书。

目 录

引 言	1
参考文献	4
第 1 章 红外辐射度学基本概念	6
1.1 大气窗口	6
1.2 辐射参数及定律	7
1.3 本征辐射参数	11
1.4 探测距离的影响	12
1.5 目标—背景对比度	13
参考文献	15
第 2 章 目标探测简介	16
2.1 点目标	18
2.2 面目标	19
2.3 红外辐照对比度	20
参考文献	21
第 3 章 热红外传输理论	22
3.1 热量和物质的传输	22
3.2 表面—大气边界层	27
3.3 热平衡方程	28
3.3.1 太阳辐射	28
3.3.2 长波辐射	37
3.3.3 对流热交换	40

3.3.4 由蒸发/冷凝引起的热交换	45
3.4 建立模型	47
3.4.1 模型定义	47
3.4.2 灵敏度分析	50
参考文献	60
 第4章 气象和大气参数	62
4.1 气象参数	62
4.2 SCORPIO 天空红外辐亮度分布测试系统	63
4.3 HDS 天空光学和红外辐亮度分布测量系统	70
4.3.1 光机设计	71
4.3.2 隔膜结构	75
4.4 天空短波辐亮度分布的测量	77
4.4.1 校正	77
4.4.2 测量	80
4.5 天空红外辐亮度分布的测量	85
4.5.1 校正	85
4.5.2 测量	86
4.6 辐照度的计算	90
4.7 云况的自动测量	93
4.8 绝对湿度的自动测量	96
4.8.1 样机设计	97
4.8.2 信号处理	97
4.8.3 校正	100
参考文献	102
 第5章 红外测量数据的校正	103
5.1 校正方法	104
5.2 黑体校正源	106
5.3 校正方法	109

5.3.1 同一视场中的等距黑体和目标	110
5.3.2 同一视场中的不等距黑体和目标	112
5.3.3 不同视场中的黑体和目标	113
5.4 实例	116
参考文献	121
第6章 红外辐射特征	122
6.1 目标特征	122
6.1.1 模型输入参数	123
6.1.2 模型输出参数	124
6.1.3 温度直方图	125
6.1.4 极坐标图	127
6.2 背景特征	128
6.2.1 短波反射率的户外测量	130
6.2.2 长波反射率的户外测量	135
6.3 背景表观温度的测量	138
6.3.1 CARABAS 测量系统	139
6.3.2 实例	148
6.4 经验模型及其局限性	151
6.4.1 瞬时热红外特征分析	154
6.4.2 统计分析	157
6.4.3 曲线拟合	164
6.5 背景红外热图像特征分析	176
6.5.1 红外热图像的分析方法	176
6.5.2 模型的回归计算	179
参考文献	183
第7章 红外伪装	185
7.1 理论模型计算	186
7.2 经验模型	189

7.2.1 伪装后表观温度的测量	194
7.2.2 伪装材料表观温度的统计分析	197
7.2.3 伪装效率的计算	203
参考文献	207

引 言

本书主要讨论红外探测系统、目标、气候和环境等几方面要素的相互关系(见图 1)。

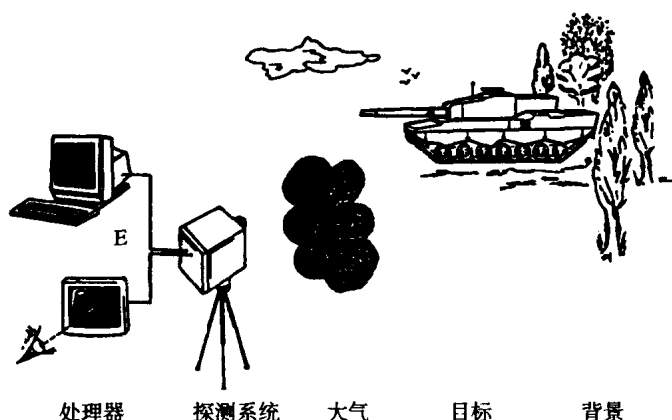


图 1 红外探测示意图

我们知道,目标探测的基本条件是至少有一个目标特征与背景有所不同,也就是说,只有目标和背景的特征差异能产生(明显)区别于探测器系统噪声的探测信号,才可能对目标进行探测、分析和识别。目前已有多种图像和非图像探测器系统,用来探测诸如颜色、温度、声音、气味、形状等信号特征。

探测系统可分为主动和被动两类。主动探测系统是利用自带的辐射源,产生(或增强)目标与背景的特征差异,从而提高目标的可探测性,例如雷达和激光测距机;被动探测系统不需要配备辐射源,而是利用物体的自然特征进行探测,例如,测量温度的温度计和探测直升机声音的微音器。

人的视觉系统就是一个性能优异的探测器,但其有效光谱区域较小,仅为电磁波谱的可见光部分(见图 2)。它是利用自然光源形成视觉,是一个被动探测系统。人眼只能看见白天的景物,而且在恶劣天气情况下,其性能大大下降。

由于可见光探测系统的局限性以及军方优选被动探测系统,促使人们研究了许多新的探测技术,其中热红外探测就是很有前途的一项技术。自然物体表面都能发射电磁辐射,以此作为被动探测的信号源,利用特殊的仪器可探测物体的热辐射以及目标和背景的热红外差异(后者称为红外对比度)。

在过去的 20 多年中,由于现代电子学理论和技术的飞速发展以及新型探测器材料的不断涌现和性能的提高,红外技术日臻成熟和完善, $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段的高性能红外热像仪已广泛使用。此处的高性能是指本征系统参数,例如噪声等效温度差值(NETD: Noise Equivalent Temperature Difference)、瞬时视场(I-FOV: Instantaneous Field of View)和最小温度分辨率(MRTD: Minimum Resolvable Temperature Difference)等,可通过优化处理,达到或接近探测元器件的极限值。

同一时期,计算机的计算能力大大提高,功能强大的图像处理软件不仅可进行实时的图像分析,还可进行众多目标和背景特征的快速、自动处理,获得清晰的红外热图像及相应的数据结果。

除了硬件特性外,系统性能主要是指其完成指定任务的整体能力,例如,“使用该系统可以在中欧一个明朗的午夜,探测到 3km 以外树丛中的装甲运兵车。”这不仅与系统硬件有关,而且很大程度取决于大气的传输性能、目标和背景的瞬时红外对比度等因素。

通过大气传输过程分析,加深了我们对大气影响的理解,例如,气溶胶、灰尘和烟雾粒子都能影响红外辐射在大气中的传输。许多测量都是在各种气象条件下和不同观测距离内进行的,由这些测试结果归纳出一系列复杂的半经验模型,如 LOWTRAN、MOD-

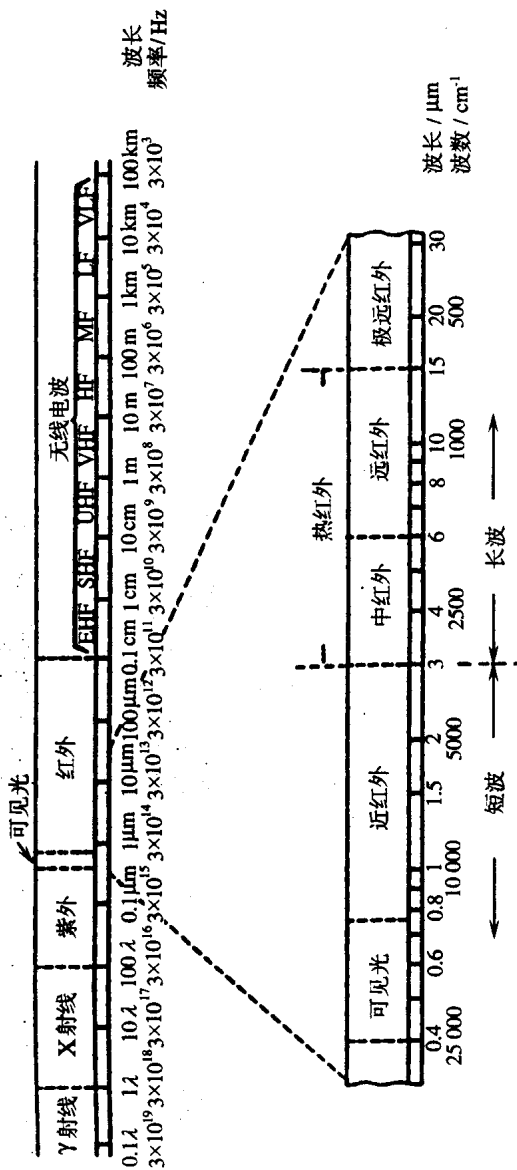


图 2 电磁波谱

TRAN 和 HITRANO 等。由于这些测量技术和理论的运用,在过去 15 年间这些模型不断更新完善。现在,只须输入少数几种气象参数便可计算出大气的传输性能。本书仅以其中的 LOWTRAN 模型为代表。

下一步就是对所获得的红外对比度数据进行处理,得出目标和背景的红外特征。如果目标形状简单,其红外特征可由各表面区域的热平衡计算求得,但随着物体几何结构复杂性增大,其计算结果不准确性也陡然增大。这是因为此时那些人为划分的小区域的能量平衡不能再用常规的方程来准确表达,只能进行实际测量,根据需要控制目标状态,并人为地(或多或少)选择环境条件。目前,我们已收集了不同目标条件和观测角度下拍摄的上万张军事目标的红外热图像,并编辑整理成系统的数据库。

背景辐射的特征是最复杂的,而探测过程中背景信息的不详尽已成为最关键的制约因素,这个问题已引起人们更多的关注。尽管经过了很大的努力,尤其是在计算模型方面,但计算结果仍难以达到探测和识别所需的准确度,这主要是客观条件所决定的。一方面是由于背景复杂的几何结构难以模拟,另一方面是由于对某些物理过程(如植被层的热传输过程)的数学表达不够准确。尽管如此,半经验模型仍可较好地描述背景红外辐射的瞬时变化。

本书不讨论背景红外辐射的空间分布特征,而主要讨论地面目标和背景的热红外($3\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段)辐射对比特征。另外,本书对探测系统也只是作相应的简单叙述,详细资料可参阅有关参考书^[1-3],或红外探测器的专业文献^[4]。

本书第 1 章至第 4 章讲述有关的基本原理和气象参数,第 5 章和第 6 章讨论校正方法、信号测量和数据分析,最后,作为应用实例,将红外伪装材料的研发、测试及效果评估列为第 7 章。

参 考 文 献

- 1 J. S. Accetta and D. L. Shumaker, executive eds., The Infrared and Electro-Optical Systems

Handbook, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, and SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Wash. (1993)

- 2 J. M. Loyd, Thermal Imaging Systems, Plenum Press, New York (1975)
- 3 R. Siegel, J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, Taylor & Francis (1995)
- 4 E. L. Dereniak, R. E. Sampson, eds., Infrared Detectors and Focal Plane Arrays II, SPIE Vol. 1685 (1992)

第 1 章 红外辐射度学基本概念

本章介绍辐射测量中涉及到的常用术语、单位和基本定律。本章未提及的其他内容可参阅有关参考书^[1,2]。

当某参数的量值与波长有关时,则在该参数前冠以形容词“光谱”,符号后则加上波长符号 λ ,例如,光谱辐亮度表示为 $L(\lambda)$ 。

1.1 大气窗口

对红外探测器而言,大气传输有 2 个较典型的窗口(见图 1.1),分别是 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 波段,本书后续的讨论都是

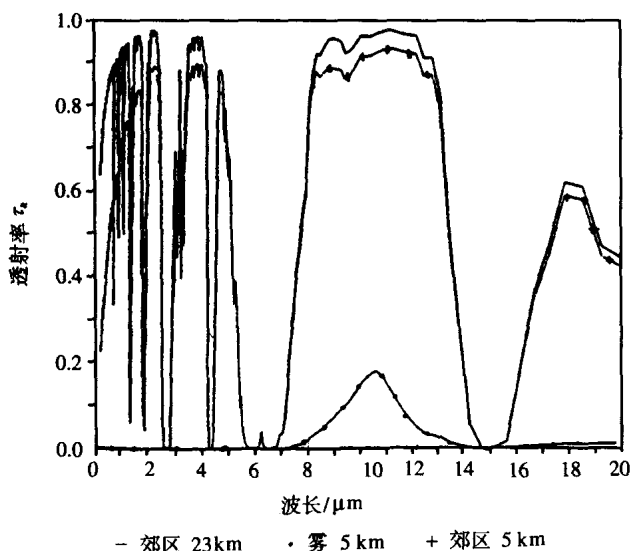


图 1.1 大气光谱透射率 $\tau_a(\lambda)$

用 LOWTRAN7 模型计算大气透射率,光程 1km,亚寒带冬季。

针对这 2 个特殊波段的。也许是自然的巧合,地表的辐射平均温度为 290K,相应的峰值波长约为 $\lambda_m \approx 10\mu\text{m}$,恰好是第二个大气窗口的中间值。另一窗口的中间值 $\lambda_m \approx 4\mu\text{m}$,与 720K 的温度相对应,正好与发动机、动力设施和燃气等热源相匹配。

除了这 2 个红外窗口外,其他特殊波段(有的波段很窄)也有其特殊用途,在此不作介绍。

1.2 辐射参数及定律^①

下面介绍一些辐射度学参数和定律。

(1) 辐射通量(radiant flux) Φ : 单位时间内发射、传输或接收的辐射能总和(W)。(有的文献中称之为辐射功率——译者注)。

(2) 辐射通量密度(radiant flux density) φ : 单位面积上的辐射通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

(3) 辐射度(Emittance)或辐射出射度(radiant exitance) M : 某一表面发射的辐射通量密度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

(4) 辐照度(irradiance) E : 入射到表面的辐射通量密度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

(5) 辐亮度(radiance) L : 单位立体角 Ω 内的辐射通量密度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)。

(6) 辐强度(radiant intensity) I : 单位立体角的辐射通量($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)。

上述各参数有如下关系式,其几何关系如图 1.2 所示。

$$\begin{aligned} d\Omega &= \frac{dS}{r^2} & I &= \frac{d\Phi}{d\Omega} \\ L &= \frac{dI}{dA \cdot \cos\varphi} & M &= \frac{d\Phi}{dA} \end{aligned}$$

(7) 朗伯余弦定律: 理想漫辐射源单位表面积向空间某指定

^① 原文为 Spatial relationships, 空间关系, 根据本节内容改为此名——译者注。