
红外目标可测度

Hongwai Mubiao Kecedu

易亚星 余志勇 曹菲 苗倩 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

红外目标可测度

易亚星 余志勇 曹菲 苗倩 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书针对红外目标探测中的理论和工程应用问题,重新定义了点目标和面目标的概念,建立了统一的红外目标探测方程;定义了目标可测度的概念,提出了目标可测度的工程计算方法,并对计算误差进行了初步的分析;通过大量的模拟计算,分析了目标的速度与高度对可测度的影响及其规律,还分析了大气的温度、湿度、压强和能见距对目标可测度的影响;在可测度概念的基础上,对红外目标探测和目标跟踪的作用距离指标,提出了实用的等可测度检验和距离折算方法,并分别对某红外预警设备和某红外跟踪设备的作用距离进行了等效折算。等可测度检验和距离折算的方法,不仅适用于红外预警系统和红外跟踪系统,也适用于可见光波段的探测和跟踪系统。

本书可供光电对抗、红外目标探测领域相关技术人员阅读,也可作为光电探测、军用光学相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

红外目标可测度/易亚星等著. —北京:国防工业出版社, 2015. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 09797 - 9

I. ①红... II. ①易... III. ①红外探测 IV. ①
TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 271833 号



※

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 100048)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 4½ 字数 126 千字

2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

作用距离是衡量红外预警系统性能的重要指标之一,也是影响其战场实用的最关键的一个战术指标。作用距离的设计指标往往是在某些设定的使用条件下取得的,但是在装备检验和战场使用中,实际目标型号、飞行状态和大气参数等条件很难与设计条件一致,这样就无法判断系统作用距离是否达到了设计要求。作用距离的等效检验与折算已成为当前亟待解决的重要技术难题。

本书以野外靶场装备试验为背景,以红外目标探测问题为研究对象,对空中目标的红外可测度进行了较为系统的研究。全书共分为8章,其中:第1章简要介绍了红外目标探测研究现状;第2章重新定义了点目标和面目标,提出了有效视场的概念,引出了目标可测度的物理量;第3章提出了可测度的近似计算方法;第4章分析了目标飞行高度和速度对可测度的影响及其规律;第5章分析了温度、湿度、压强和能见度等大气参数对可测度的影响;第6章分析了红外目标探测和目标跟踪的作用距离指标,提出了实用的等效检验和作用距离折算方法;第7章分析了影响红外目标探测亮度的各项因素;第8章提出了后续研究工作的初步设想。

本书对红外目标探测与跟踪问题进行了较为深入的研究,对于提高靶场实验能力和技术水平具有重要意义,而且能够为新型武器装备研发和现役装备技术改造提供技术参考。本书具有较强的理论性和实践性,得出的初步结论来源于大量的实验数据和模拟计算;研究提出的等可测度检验和距离折算方法,不仅适用于红外预警系统和红外跟踪系统,也适用于可见光波段的探测和跟踪系统。

本书的研究得到了王国玉研究员、陈永光研究员的大力指导,得到了吴军辉研究员的热情无私的指导和帮助。蒙薛建国研究员多次审阅

书稿,并提供了宝贵的修改意见。姚梅工程师承担了书中设计的大量模拟计算,付出了辛勤劳动。李华、朱震、雷刚、康大勇等同志也给予了大量的支持和帮助。在此,谨向关心和支持本书出版的各位老师和朋友表示衷心的感谢。

本书可供光电对抗、红外目标探测领域相关专业技术人员阅读参考,也可作为光电探测、军用光学相关专业研究生的参考用书。由于能力和水平的限制,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2014年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 红外目标探测作用距离	1
1.1.1 作用距离的检验与折算	1
1.1.2 研究的内容	2
1.1.3 研究的意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.3 全文结构安排	7
第 2 章 红外预警与目标可测度	9
2.1 概述	9
2.2 红外预警	9
2.2.1 红外辐射	9
2.2.2 大气窗口	11
2.2.3 红外预警	11
2.2.4 能见度与能见距	12
2.3 目标与背景对比特征的描述	13
2.3.1 对比度	13
2.3.2 红外辐照/辐射对比度	14
2.3.3 视在反差强度	15
2.3.4 辐射强度差	15
2.3.5 红外辐射对比度	16
2.3.6 信噪比	16
2.4 点目标与面目标	17
2.5 红外探测系统的作用方程	19
2.6 有效视场	21

2.7	可测度	22
2.7.1	可测度的定义	22
2.7.2	可测度与信噪比的关系	24
2.8	本章小结	25
第3章	可测度的计算	26
3.1	可测度计算	26
3.2	目标的红外辐射亮度计算	26
3.3	大气的红外辐射亮度和透过率计算	28
3.3.1	大气的温度结构	28
3.3.2	大气水汽垂直分布	29
3.3.3	大气压强的垂直分布	29
3.3.4	大气气溶胶	29
3.4	探测器单个像元最大有效视场的计算	31
3.5	计算误差	33
3.6	本章小结	34
第4章	目标的高度和速度对可测度的影响	35
4.1	概述	35
4.2	目标的红外辐射亮度	35
4.3	背景的红外辐射亮度	36
4.4	路径红外波段透过率	38
4.5	探测单元的最大有效视场	39
4.6	可测度	39
4.7	等可测度曲线	43
4.8	本章小结	45
第5章	大气参数对可测度的影响	46
5.1	概述	46
5.2	温度变化对可测度的影响	46
5.3	湿度变化对可测度的影响	48
5.4	压强变化对可测度的影响	50
5.5	能见距变化对可测度的影响	53
5.6	温度和能见度的综合影响	53

5.7	本章小结	55
第6章	目标探测与跟踪作用距离的等效检验	56
6.1	等效检验问题	56
6.2	作用距离的等效检验方法	57
6.3	实例一 红外预警作用距离检验	58
6.4	实例二 红外跟踪作用距离检验	63
6.5	实例三 电视跟踪作用距离检验	68
6.6	本章小结	72
第7章	影响红外目标探测亮度的因素	73
7.1	实验现象	73
7.2	红外探测亮度方程	74
7.3	影响红外目标探测亮度的因素	75
7.4	目标的红外辐射亮度	76
7.5	目标的有效探测面积、目标与探测器间的距离	76
7.6	路径红外波段透过率	77
7.7	背景的红外辐射亮度	78
7.8	路径的红外辐射亮度	80
7.9	综合作用效果	80
7.10	可测度	82
7.11	本章小结	83
第8章	结束语	84
8.1	本书主要的工作	84
8.2	研究工作中存在的不足	85
8.3	对后续研究工作的设想	86
附录A	作用距离等效折算用表	88
插图索引		129
表格索引		131
参考文献		132
主要符号与缩略语表		135

第1章 绪 论

1.1 红外目标探测作用距离

1.1.1 作用距离的检验与折算

红外侦察与告警在现代战争中具有十分重要的作用。红外预警系统的作用距离是衡量系统性能的一个综合性指标,也是影响系统战场使用的最关键的战术指标之一。在红外预警系统自身所有与作用距离相关的技术参数、工作参数、技术状态和信号处理方法等不变情况下,其作用距离与具体的条件(包括气象条件、目标类型以及目标飞行的速度和高度等)密切相关,不同的条件下系统的作用距离不同,其差别可以很大。

在对红外预警系统作用距离指标进行实验检验与评价时,常常遇到这样一个问题:系统设计指标中对作用距离这一指标的检验规定了具体的使用条件;而在实验检验时,由于野外条件的制约,实际的目标型号和气象条件等很难与指标设计规定的目标型号、气象条件完全一致。当实验条件与指标设计所规定的使用条件不一致时,就不能直接将实验获得的作用距离值与设计指标进行比对,无法判断系统作用距离是否达到了设计要求。这就需要将实验条件下获得的作用距离值折算到指标设计所规定的使用条件下的作用距离值,然后将折算后的作用距离值与设计指标直接比对,进而评价系统作用距离是否达到了设计要求。于是,在不同的条件下如何对红外预警系统的作用距离指标进行等效检验,就成为迫切需要研究的问题。同样,红外跟踪系统以及工作在可见光波段的电视跟踪系统,都存在这样的作用距离等效检验问题。

从战场使用的角度来看,已经知道红外预警系统(红外/电视跟踪

系统)在某种条件(包括气象条件、目标类型以及目标飞行的速度和高度等)下的作用距离,那么当条件发生改变后,系统的作用距离会发生怎样的改变呢?这就是不同条件下红外预警系统(红外/电视跟踪系统)作用距离的等效折算问题。对这一问题的研究有助于深入了解武器装备在战场环境下的战术技术性能,是武器装备作战运用中迫切需要解决的问题。

上述两个问题(装备检验中的作用距离等效检验问题、装备使用中的作用距离等效折算问题)是本书研究的依据。如何在不同条件下对红外预警系统作用距离指标进行等效检验,以及在一种条件下测得的作用距离如何等效折算为另一种条件下的作用距离,是本书研究的主要任务。

1.1.2 研究的内容

本书研究的领域为对空红外预警,具体内容包括:目标被探测到的难易程度的定量描述方法;空中目标红外探测的影响因素;目标的飞行速度和高度对红外探测的影响及其规律;大气参数(温度、湿度、压强和能见度)对红外探测的影响及其规律;不同条件下红外预警系统作用距离的等效检验和等效折算;影响红外目标探测亮度的因素及其规律。

1.1.3 研究的意义

红外预警系统作用距离的等效检验问题是实验评估迫切需要解决的技术难题,解决这一问题可以大大拓宽实验评估的适应条件。具体地说,作用距离等效检验问题的解决,可以不限定目标的类型,可以放宽对天气气象条件的限制,从而大幅节约实验的经费和时间。显然,这对于提升实验能力和技术水平具有重要意义。

解决不同目标、不同条件下红外预警系统作用距离的等效折算问题,可以绘制出红外预警系统在各种典型气象条件下对各种典型威胁目标(包括目标型号、目标航线)的作用距离图表,或者开发系统作用距离计算软件。这些图表或系统作用距离计算软件对于作战战术方案制定、系统参战使用以及兵力推演都非常有价值;对于合理使用红外预

警系统,充分发挥武器装备的作战效能,提高部队战斗力,具有十分重要的现实意义。

对于红外目标探测问题进行深入的研究,不仅可以加深理解现有武器装备的战术技术性能和环境适应性,使现有武器装备的使用更加合理有效,更为重要的是能够为现有武器装备的改进和新武器的研制提供参考和指导,从而不断提高我军的武器装备现代化水平。

1.2 国内外研究现状

对于红外预警系统作用距离的等效检验问题,吴晗平博士^[1]在这方面做过较为深入的探讨,也提出了等效检验的方法,但他的研究基于这样的假设:“唯一的假定是,系统的噪声受探测器噪声的限制。如果因设计不良或装配不妥而满足不了上述假定,则实际探测距离将小于方程式所计算的值。”这种对设备的最优化设计和装配的假设实际上是沿用了小哈德森^[2]推导作用距离方程时所设的前提条件。吴晗平博士的研究在理论和方法上进行了十分有益的探索,但由于假定条件比较苛刻,不能完全代表设备的普遍特性,其成果难于直接应用于普遍意义上的作用距离等效检验和折算。吴军辉也对这个问题做过专门研究^[3],提出了基于红外图像信噪比的等效折算方法,具有比较重要的理论意义,为设备作用距离等效检验和折算奠定了一定的理论基础。但由于红外图像信噪比直接依赖于红外探测系统的性能,所以不便于应用这种方法来进行装备检验。而且,由于无法得到红外图像(其原因在后续章节有进一步的说明),所以实际的应用受到一定的限制。

对于如何定量地描述一个空中目标被清晰地观测/探测的程度,国内外还没有一个统一的标准。最容易想到的大概是目标和背景的对比度,因为所有的观测或探测都不可避免地基于目标和背景的对比特性,目标和背景的差异性是目标观测和探测的前提和基础。然而,目前对目标背景对比度概念的定义也没有一个统一的标准。

经典的对比度定义^[4]是目标背景的亮度差与背景亮度的比值,适用于人眼观测,但不适用于仪器探测。文献[5]将对比度作为红外目标探测距离依据,来进行作用距离评估。当然,抛开仪器探测这个具体

应用背景而研究对比度的影响因素及其规律^[6]是有意义的。与此同时,通用的对比度定义还有两种^[7]:一种是调制对比度,即目标背景亮度差与亮度和的比值;另一种是目标背景亮度差与目标亮度的比值。

宣益民^[8]、桑农^[9]等所描述的对比度定义基于红外图像灰度对比,适用于数字图像处理。吴军辉^[3]提出的信噪比与宣益民的灰度对比度实际上是同一个概念。Pieter 将对比度定义为目标的背景的辐射/辐照差^[10],反映了仪器探测的不同于人眼观测的特点。吴晗平博士^[1]用辐射强度差来描述目标和背景的对比特征。而文献[7]则介绍了一种称为视在反差强度的概念,它在辐射强度差的基础上前进了一步,考虑了大气的衰减因素,将辐射强度差与大气透过率的乘积定义为视在反差强度。

上述概念从不同的侧面反映了目标与背景的对比特征,同时也在不同的程度上反映了目标被观察/探测的难易程度。其中,宣益民的灰度对比度和吴军辉的红外图像信噪比(它们实际上是同一个概念)能够完整地反映目标被探测的难易程度。其他的几个对比度定义都不能独立地反映目标被观察/探测的难易程度,如果要完整地反映目标的可见/可测的程度还需要考虑另外一个量,即目标对人眼的视张角或探测器单元的视场角。

红外图像信噪比虽然能独立反映目标可探测的程度,但它的应用受到一定的制约,即必须有拍摄好的红外图像。这个制约条件使得有些应用领域无法使用,例如作用距离等效检验问题就是由于野外靶场条件无法满足设计指标要求的条件而提出来的,连满足要求的条件都不具备,当然也就无法拍摄到满足要求条件下的红外图像。另外,在实际的测试条件下,由于红外预警系统搜索视场大,其红外图像数据量巨大,系统也无法记录红外图像。所以,对于基于天空搜索的红外预警系统来说,既不能得到设计指标要求条件下的红外图像,也得不到实际测试时的红外图像。对于视场相对较小的红外跟踪系统来说,也只能得到实际测试时的红外图像。

对于影响目标探测的各项因素以及这些因素影响目标探测的方式,这是一个比较复杂的问题。这方面的研究已有比较丰富的成果,其中最核心的是对大气辐射和大气辐射传输的研究。大气辐射传输学通

常被认为是大气科学的一个分支学科,在诸如卫星遥感、天体物理学、行星学、电子工程学、应用光学以及应用物理学等领域有着重大而广泛的应用。到目前为止,大气辐射传输这一学科已得到长足的发展,大气辐射传输理论方面已有相当广泛和深入的研究,应用方面已经发展了多种解法和算法。为了满足不同需要,研究人员已经编写出多种大气辐射传输计算程序,其中最有代表性的是美国空军地球物理实验室(AFGL)的系列软件 LOWTRAN、MODTRAN 和 FASCODE,离散坐标法(Discrete Ordinate Method)辐射传输软件包 DISORT,蒙特卡罗法,多通量法等。

LOWTRAN 是计算大气透过率及辐射的软件包^[11-14],由美国空军地球物理实验室(AFGL,前空军坎布里奇实验室)用 Fortran 语言编写,其主要用途是军事和遥感的工程应用。目前流行的版本是 1989 年 2 月公布的 LOWTRAN7。它以 20cm^{-1} 的光谱分辨率的单参数带模式,计算 0 cm^{-1} 到 50000 cm^{-1} ($0.20\mu\text{m}$ 到无穷)的大气透过率、大气背景辐射、单次/多次散射的阳光和月光辐射亮度、太阳直射辐照度。该程序考虑了连续吸收,分子、气溶胶、云、雨的散射和吸收,地球曲率及折射对路径及总吸收物质含量计算的影响。

LOWTRAN 正式命名于 1972 年,其原意是“低分辨率大气透过率计算程序”。LOWTRAN 的前身是 Manley 等人编写的 OPTIR(后来也称为 LOWTRAN1)。它由一个仅 1500 行的程序变成约 17000 行的软件包,其内容不断扩充,资料不断更新,算法不断改进,其结构越来越庞大,计算功能不断增强增多。目前我们使用的 LOWTRAN 软件,已基本成熟固定。LOWTRAN7 的光谱分辨率为 20cm^{-1} ,这一分辨率主要适用于可见—红外波段。

MODTRAN^[15] 的目的在于改进 LOWTRAN 的光谱分辨率。它将光谱的半高全宽度(Full Width Half Maximum, FWHM)由 LOWTRAN 的 20cm^{-1} 减少到 2cm^{-1} 。它的主要改进在于发展了一种 2cm^{-1} 光谱分辨率的分子吸收的算法,更新了对分子吸收的气压温度关系的处理。

FASCODE 与 HITRAN 数据库结合^[16],可实现逐线(Line - By - Line)计算。逐线计算方法能给出任意分辨率和高精度的结果,但其计算量特别大,通常用来作为其他方法的验证或作为其他方法的基本数

数据库。

辐射传输的离散坐标法的一般表述由 Chandrasekhar^[18] 和 Liou^[19] 给出。但由于数值解算的困难,难以广泛应用于辐射传输计算。1988 年 Stamnes 等人^[20] 解决了离散坐标法矩阵形式中的特征值和特征向量求解问题以及积分常数的求解问题,同时公布了离散坐标法的辐射传输软件包 DISORT,这使得离散坐标法的广泛应用成为可能。DISORT 软件包采用离散坐标法求解辐射传输方程,给出了完全稳定的解析解,成为普遍公认的辐射传输精确算法的实用软件包。它可求解垂直非均匀、各向异性并含热源的平面平行介质中的辐射传输问题,其波谱可覆盖紫外—微波段,计算包括了热辐射、散射、吸收、下边界双向反射和发射的物理过程。

多通量理论^[21,22] 可导出简洁而准确的公式,计算简单并保证精度,常用于求解传输问题。在四通量理论中用前向和反向流动的准直射束以及前向和反向流动的扩散通量共 4 个量来代表强度流;如不考虑反向准直射束则变为三通量理论;如只考虑扩散通量则变为二通量理论。

蒙特卡罗方法(Monte - Carlo)以辐射传输方程为依据,并直接模拟辐射传输方程^[23-26],是一种随机模拟方法。它将散射过程当作光子和介质的碰撞过程;两次碰撞之间光子在介质中所走的距离与消光系数有关;碰撞后光子将改变前进方向,散射角由相函数确定;对大量光子的行为跟踪并进行统计就可得到具体问题的结果。其突出优点是既能处理任意几何形状下的辐射传输问题,也能处理任意单次散射反照率和各向异性很强的散射相函数。而其他辐射传输解法在这方面则有局限性。蒙特卡罗方法可解决一些复杂几何的辐射传输问题(如裂云大气传输问题)或作为其他方法的结果验证,但它需要根据实际问题精选出概率模型,并定出随机抽样法,且精选概率模型与抽样方法不唯一。因此,没有一个现成的普适程序,这限制了它的应用。

由于气候研究中对温室气体辐射效应的关注和大气遥感的进一步量化,辐射传输模式的精度受到极大的重视。国际气象和大气物理委员会(IAMAP)的辐射委员会曾组织了对现有的散射大气中辐射传输模式的比较,世界气象组织和国际科联通过 IAMAP 和美国能源部联

合组织了气候模式中的辐射模式比较(ICRCCM)。前者侧重单色波在散射大气中的辐射求解,后者侧重于宽光谱(太阳和长波)中对气候有意义的积分辐射量。在国内应用方面的研究基本上是围绕 LOWTRAN 进行的,如:中国科学院大气物理研究所对 LOWTRAN 和 Alaska 大学 Stamnes 的 DISORT(离散坐标法计算程序包)进行了对比研究^[27],还对 LOWTRAN 的气溶胶模式在我国北京地区的适应性进行了实际的测量研究^[18];在大气湍流方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所进行了深入而独到的研究。至于目标和环境的各项因素对目标可探测程度的研究,比较深入的有王毅博士^[6,28]的研究,她通过大量的计算,分析了目标背景对比度和斜程能见度的一些因素。但她采用的对比度的定义比较适合于人眼的目视观测,并不适合于仪器探测的情形。

对于目标与背景的红外特征的研究,可以查阅到大量的文献,其范围涉及地面^[29,31,32]、海面^[30]和空中^[33]。

1.3 全文结构安排

本书对空中目标的红外可测度进行了系统的研究,全书共分8章。

第1章绪论。简要介绍红外目标探测在工程应用中存在的问题和背景、国内外的研究现状以及本书的基本结构。

第2章红外预警与目标可测度。介绍了红外预警的基本概念和前人描述目标可观测或探测的程度的方法和参量;重新定义了点目标和面目标的概念;定义了有效视场的概念,使点目标和面目标的探测方程可以统一起来;提出并精确定义了一个新的描述目标可探测程度的物理量——可测度。

第3章可测度的计算。介绍可测度的近似计算方法以及可测度计算中各个因子的具体计算方法,并进行了初步的误差分析。

第4章目标飞行高度和速度对可测度的影响。通过大量的计算,分析了目标的飞行速度和飞行高度对目标可测度的影响及其规律。

第5章大气参数对可测度的影响。通过大量的计算,分析了大气参数(温度、湿度、气压和能见度)对目标可测度的影响及其规律。

第6章红外预警系统作用距离的等效检验。提出了一种实用的等

效检验和距离折算方法,可以对红外预警系统作用距离指标进行检验,也可以将一种条件下的作用距离折算为另一种条件下的等效作用距离。并根据红外目标探测实验、红外跟踪实验和电视跟踪实验的结果,分别对红外预警、红外跟踪和电视跟踪作用距离进行了实际的等效检验和折算。

第7章影响红外目标探测亮度的因素。针对红外预警实验中目标亮度随距离减小而减小的现象,对影响红外目标探测亮度的各项因素进行了全面深入的分析,不仅合理解释了实验现象,也在一定程度上揭示了大气对目标探测亮度的影响及其规律性。

第8章结束语。分析了当前研究工作中的不足之处,并提出了对后续研究工作的初步设想。

第2章 红外预警与目标可测度

2.1 概 述

由于任何目标都有红外辐射,因此红外预警成为一种十分重要的预警手段,在现代战争中有着极其重要的地位。红外预警的关键是红外目标的探测。本章将首先概要地介绍红外预警的基本概念,然后介绍前人定义和使用的有关描述目标观察/探测的一些物理量。为了更好地研究红外目标探测问题,本章将定义一个新的物理量,用来描述一个目标被探测到的难易程度。

2.2 红 外 预 警

本节介绍红外预警的基本概念和有关常识,主要包括红外线在电磁频谱中的位置、波长的划分、红外辐射在大气中的传输特性、红外预警的基本频段以及大气能见度的基本概念,作为讨论红外目标探测的预备知识。

2.2.1 红外辐射

红外线是一种电磁波,在整个电磁波谱中只占很小的一部分。如图2-1所示,整个电磁波谱由长电振荡、无线电波、微波、红外辐射、可见光、紫外辐射、X射线、 γ 射线和宇宙射线组成,其波长可在 $10^{-10}\mu\text{m}$ 到 $10^{14}\mu\text{m}$ 间变化。而红外线的波长范围从760nm到 10^6nm 。习惯上把红外波段划分为4个区域,这种划分是按习惯规定的,没有统一的标准,在各种文献中的划分也不完全相同。本书采用文献[34]的划分方案(图2-1所示电磁波谱),具体划分如表2-1所列红外线的详细划分。