

# 红外辐射与制导

徐南荣 卞尚平 编著

国防工业出版社

# 红外辐射与制导

徐南荣 卞南华 编著

国防工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

红外辐射与制导/徐南荣,卞南华编著. —北京:国防工业出版社,1997.6

ISBN 7-118-01644-6

I. 红… I. ①徐… ②卞… II. 导弹制导:红外制导  
IV. TJ765.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 12950 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 14¼ 370 千字

1997 年 6 月第 1 版 1997 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:21.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

HK07/11

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾铎		
秘书长	刘琯德		
委员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

## 前 言

自 1800 年 F. W. Herschel 在测太阳光谱时发现了红外线后, 红外技术的发展已经历了二百年的历史。然而红外技术的较快发展是在二次大战后的五十年内。近五十年来在红外辐射理论、探测器和信号处理、致冷技术、红外光学及红外系统的探测及跟踪技术等方面均有了巨大的进步, 致使以红外技术和激光技术为代表的光电子技术已成为当今世界上的高科技领域之一。

红外探测器的发展是红外技术发展中最令人瞩目的一个方面。从 50 年代美国著名的响尾蛇导弹(AIM-9B)采用的, 工作在近红外波段的硫化铅(PbS)探测器, 到 70 年代美国发展的 AIM-9L 及法国发展的 R-550 等导弹采用的, 工作中红外波段的碲化镉(InSb)以及其他多种探测器, 直到近二十年出现的红外成像制导、成像探测用的多元阵列探测器技术, 使红外探测技术不断得到重大革新。

70 年代出现的 CCD 器件是探测器技术方面的一次跃变, 它使多元阵列探测器的信息读出大大地简化了, 因而使得多元阵列探测器的发展到了现实可行的阶段。80 年代美国提出的 SDI (Strategic Defence Initiative) 计划对红外探测器的发展起到了巨大的需求牵引作用, 特别是对大数量单元的面阵探测器的发展起了很大的促进作用。目前  $128 \times 128$  和  $256 \times 256$  红外混合焦平面阵列探测器已达到实际应用阶段。在焦平面阵列探测器中, 碲镉汞和硅化铂面阵的发展在目前尤为突出。

焦平面阵列探测器的进一步发展要求能制造出带读出电路并带有诸如延时积分、AD 转换、前置放大、空间滤波和降低干扰等功能。为使结构紧凑, 将使前部的信号处理和随后的数据处理都放

在焦平面附近,进一步还将使自适应和自身优化等功能也包含在焦平面处理之中<sup>[1,2]</sup>。这种发展趋势就会使焦平面阵列形成“敏感—思维”的标准化组件。

低温技术是保证工作中远红外波段的探测器正常工作所必须的。近二三十年来,在微型致冷、空间致冷技术方面也有了很大发展。可以这样说,微型和空间低温技术的发展与红外探测器发展的水平是相适应的。

导弹和空间飞行器上的红外光学系统大多是在古典望远系统的基础上发展起来的。过去由于加工水平的限制,古典望远系统中的非球面镜还不能真正实现。现在由于数控机床的发展,非球面镜的加工已不是难题了,因而就可以采用较为理想的红外光学系统了。

空间的红外光学系统往往要求有大口径的反射镜。由于温度变化、自身重量、装配误差等因素引起的变形会使成像清晰度下降,初次进入空间的哈勃望远镜就是一例。经过设计的改进、光学校正,改进后的哈勃望远镜的角分辨率可高达 $0.1''$ 。

红外探测和跟踪系统的技术也经历了几个发展阶段。较早期的导弹红外跟踪系统安装在动力随动陀螺的转子上,利用电磁力矩使陀螺进动以使红外系统跟踪目标。有的设计则采用二自由度机械跟踪系统,也可使红外系统跟踪目标。为了提高红外系统的跟踪角速度,上述方案均存在着惯性大的弱点。随着红外焦平面大面阵探测器的出现,红外系统在原理上可以实现无需机械运动就可达到跟踪目标的目的。

然而在红外焦平面大面阵技术中,还有不少问题尚待研究解决,例如工艺成品率、探测器瞎元率、信号串扰、放大器频带宽度、下行信号处理的前移,或者是敏感—思维一体化问题。

红外技术的应用首先是与军事应用密切相关的,目前它仍然是红外技术的主要应用方面。这与红外辐射、红外探测的下面一些特性有关,例如红外辐射的难遮性和夜视性,红外探测的隐蔽性,红外系统的高分辨率和高灵敏度,以及可进行多光谱探测等。红外



军事应用可包括红外夜视、红外制导、红外探测等方面。红外热像仪用于夜视已使具备此类装备的军队在夜战中具有明显的优势。红外制导的导弹不论在制导精度或在尺寸、重量及成本上与其他类型制导的导弹相比均具有较突出的优点。自70年代以来的空战中,被导弹击落的飞机中,被红外导弹击落的占70%~80%,这个事实就足以说明问题。红外探测在空间预警<sup>[3]</sup>、地面对空监测<sup>[4]</sup>、空间碰撞武器的目标探测中的重要作用也是其他探测系统难以相比的。

红外技术在科研、工农业生产、交通运输、医疗卫生等方面的作用也日益明显。红外探测在天文学方面的近期发展更是令人瞩目。美、英、荷等国在1983年发射的红外天文卫星(IRAS)、美国在1990年发射并在1994年对其红外光学系统修正的哈勃红外空间望远镜(HST)取得的观察结果是前所未有的。红外遥感在科研、资源考察、农业预报等方面的作用也很显著。红外热图(包括复合辐射)能有效地检测集成电路的质量。火车轴温的探测、汽车的测速等方面也已广泛应用了红外技术。红外技术在医学上的应用也日益广泛,到目前为止已召开了五届全国红外医疗会议。红外医学应用包括诊断和治疗,红外热像仪用于乳腺癌及血管疾病的诊断已获得肯定,红外辐射在治疗某些疾病方面的成功经验也获得了肯定。

综上所述关于红外技术的发展和应用的简述可见,红外技术是一门正在迅速发展并得到日益广泛应用的学科。无疑,本学科也得到广大从事将红外系统作为子系统的较大系统的设计人员的关注。本书重点以上述较大系统(如飞行器)设计人员为对象,讨论红外辐射的理论和计算,红外制导的原理和系统选型,以及系统主要参数的确定等问题。本书也可作为有关专业的大学本科及研究生的参考教材。

全书共分六章,第六章由卞南华编著,其余五章由徐南荣编著,全书也由徐南荣协调。本书由航天部二院黄培康研究员负责审校。全书插图由门长华绘制。作者谨向他们表示衷心感谢。

在本书编著过程中曾参阅多种国内外书籍和文章,作者谨向各位作者一并表示感谢。

由于时间匆忙,水平所限,书中会有不当或错误之处,希望读者不吝指正。

作者

1995.7

### 参 考 文 献

- 1 Jamieson J A. 红外技术:1975~1984年的进展. 1985~1994年的发展·红外, 1986,(5,6)
- 2 Fossum E R 等. 空间科学敏感器用红外读出电子部件:目前的技术水平与今后的方向. 高国龙译. 红外,1995,(4,5)
- 3 徐南荣. 美国空军导弹预警卫星的红外望远镜及其若干参数. 红外与激光技术, 1992,(1):13
- 4 Samuelson Hans. 地对空防御用红外监视系统. SPIE Vol. 1762. 红外. 1995,(4)

# 目 录

<b>第一章 红外辐射</b> .....	1
<b>第一节 辐射计量</b> .....	1
一、红外与可见光辐射计量的差别 .....	1
二、度量红外辐射的参量 .....	3
<b>第二节 黑体辐射</b> .....	6
一、吸收、反射、透过率及系数 .....	6
二、普朗克(Max Planck)定律及其近似式 .....	9
三、维恩(W. Wien)位移定律 .....	13
四、斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan - Boltzmann)定律 .....	14
五、兰伯特(J. H. Lambert)定律 .....	26
<b>第三节 非黑体辐射</b> .....	29
一、基尔霍夫(Kirchhoff)定律 .....	29
二、影响发射率的因素 .....	31
三、方向、半球、光谱、总发射率与吸收率的基尔霍夫定律形式 .....	40
<b>第四节 气体辐射</b> .....	45
一、气体辐射的特点 .....	45
二、H. C. Hottel 法 .....	46
三、喷气流(羽流)红外辐射场的数值算法 .....	52
<b>第五节 目标和背景辐射</b> .....	53
一、目标辐射 .....	53
二、背景辐射 .....	66
<b>参考文献</b> .....	77
<b>第二章 红外辐射在大气中的传输</b> .....	79
<b>第一节 辐射在大气中的传输方程</b> .....	79
一、辐射传输微分方程 .....	79
二、辐射传输微分方程的积分解 .....	86

三、高温燃气的辐射传输方程及其解 .....	86
第二节 地球大气的组成和结构 .....	89
一、地球大气的组成 .....	89
二、水汽、二氧化碳和气溶胶的含量 .....	103
三、大气层的结构 .....	109
第三节 大气的吸收衰减 .....	113
一、大气的选择吸收 .....	114
二、几种吸收谱线的形状 .....	114
三、分子吸收的逐线计算法 .....	119
四、分子吸收的波带模型法 .....	123
五、斜路程的大气吸收 .....	133
六、表格法计算大气吸收 .....	135
七、大气的连续吸收 .....	148
第四节 大气的散射 .....	149
一、散射效率因素 $Q_{sca}$ .....	149
二、相函数 .....	154
三、多散射 .....	156
四、散射衰减的工程计算法 .....	159
第五节 LOWTRAN 法 .....	161
一、分子吸收衰减 .....	162
二、分子散射 .....	163
三、气溶胶衰减 .....	163
参考文献 .....	169
<b>第三章 红外探测器</b> .....	<b>172</b>
第一节 半导体探测器的几个物理问题 .....	172
一、固体能带理论 .....	172
二、本征和非本征激发 .....	174
三、热平衡条件下的自由载流子浓度 .....	177
四、载流子的产生与复合 .....	178
第二节 热探测器 .....	180
一、温差电偶 .....	180
二、测辐射热计 .....	184
三、热释电探测器 .....	185
第三节 光子探测器 .....	188

一、外光电探测器 .....	188
二、光电导探测器 .....	190
三、光伏探测器 .....	200
第四节 光探测器的噪声 .....	205
一、探测器噪声 .....	206
二、背景噪声 .....	209
第五节 探测器的特性参数 .....	211
一、响应率 $R$ .....	211
二、噪声等效功率 NEP .....	211
三、探测率 $D, D^*$ .....	212
四、时间常数 $\tau$ .....	214
五、响应波段 .....	215
六、红外探测器的背景限 .....	216
七、暗阻、工作温度等 .....	217
第六节 CCD 及红外阵列探测器 .....	218
一、CCD 及红外阵列探测器 .....	218
二、红外 CCD 的发展 .....	221
参考文献 .....	223

<b>第四章 光学系统</b> .....	<b>225</b>
第一节 典型光学元件的物像关系 .....	225
一、反射镜和透镜 .....	225
二、非球面镜 .....	233
第二节 光学系统的参数 .....	236
一、光阑、入瞳 .....	236
二、相对孔径、 $f$ /数 .....	238
三、视场、视场角 .....	239
第三节 像差 .....	240
一、球差 .....	243
二、彗差 .....	246
三、色差 .....	248
四、像质评价 .....	249
第四节 红外光学系统 .....	252
一、反射式系统 .....	252
二、折射反射系统 .....	255

三、折射系统 .....	256
四、导弹的几种红外光学系统举例 .....	257
第五节 光学扫描系统 .....	259
一、转动平面反射镜 .....	259
二、反射折射棱镜 .....	265
第六节 辅助光学系统 .....	270
一、场镜 .....	270
二、浸没透镜 .....	272
三、光锥 .....	274
第七节 光学调制 .....	275
一、调制盘的空间滤波作用 .....	275
二、调制盘提供目标的方位信息 .....	278
参考文献 .....	291
<b>第五章 红外点源探测系统</b> .....	<b>293</b>
第一节 非接触式红外测温计 .....	293
一、全辐射测温法 .....	293
二、双色测温法 .....	294
三、辐射温度计举例 .....	295
第二节 红外点源系统及其跟踪 .....	296
一、位标器的类型 .....	297
二、陀螺的进动及章动 .....	304
三、位标器的跟踪 .....	311
四、在电磁力矩作用下的陀螺运动分析 .....	320
第三节 导引头的输出信号 .....	325
一、各环节的运动方程 .....	326
二、导引头的输出信号 .....	328
第四节 位标器的跟踪误差及最大转角 .....	331
一、位标器的跟踪误差 .....	331
二、位标器的最大转角 .....	332
第五节 红外系统的作用距离 .....	334
一、无背景辐射下的作用距离 .....	334
二、均匀背景作用下的作用距离 .....	338
第六节 虚警概率与探测概率 .....	340
第七节 红外系统设计方法的几个问题 .....	345

一、红外系统几个重要参数的确定 .....	346
二、红外系统设计举例 .....	352
参考文献 .....	360

## 第六章 红外成像制导系统..... 361

第一节 导言 .....	361
--------------	-----

第二节 红外成像系统 .....	362
------------------	-----

一、热像仪的原理 .....	363
----------------	-----

二、热像仪的基本技术参数 .....	366
--------------------	-----

三、热成像系统的类型 .....	368
------------------	-----

第三节 热像仪的系统性能 .....	390
--------------------	-----

一、噪声等效温差(NETD) .....	391
----------------------	-----

二、最小可分辨温差(MRTD) .....	397
-----------------------	-----

三、最小可探测温差(MDTD) .....	399
-----------------------	-----

第四节 红外成像制导 .....	399
------------------	-----

一、总述 .....	399
------------	-----

二、红外成像制导系统的组成 .....	401
---------------------	-----

第五节 图像处理 .....	402
----------------	-----

一、波门跟踪 .....	402
--------------	-----

二、相关跟踪 .....	411
--------------	-----

第六节 红外成像寻的器 .....	418
-------------------	-----

一、光学系统及结构 .....	418
-----------------	-----

二、工作原理 .....	420
--------------	-----

三、性能参数的估算 .....	422
-----------------	-----

第七节 玫瑰扫描亚成像制导.....	428
--------------------	-----

一、玫瑰扫描 .....	428
--------------	-----

二、玫瑰扫描位标器 .....	432
-----------------	-----

三、玫瑰扫描亚成像位标器的信号处理 .....	436
-------------------------	-----

参考文献 .....	439
------------	-----

# 第一章 红外辐射

红外辐射是整个电磁频谱中的一个重要组成部分。红外探测系统均是依靠探测目标辐射或反射的红外线而工作的。因此了解红外辐射的基本规律、目标和背景的红外辐射对设计或选用红外系统的工程技术人员来说是十分重要的。

## 第一节 辐射计量

近二三十年来,红外辐射已逐渐被工程技术人员所了解,然而由于红外技术发展的历史原因,国内有关领域对红外辐射计量方面的物理参量、名词术语及其定义的统一并不重视。为此作者根据国家标准首先对红外辐射计量方面的物理参量、名词术语及其定义加以统一。

### 一、红外与可见光辐射计量的差别

红外辐射和可见光、紫外线一样,其基本的物理量是功率,但是由于人眼对不同波长的可见光的视觉敏感度不同,因而在可见光波段内采用了与红外辐射功率单位(W)不同的功率单位,其名称为光通量。它是入射辐射中能被人眼接受的那部分功率。

光通量与入射辐射功率的关系可表示为

$$d\phi = P_{\lambda}K(\lambda)d\lambda \quad (1-1)$$

式中  $d\phi$  为波长间隔  $d\lambda$  内的光通量增量,  $P_{\lambda}$  为入射的光谱辐射功率,  $\lambda$  为波长,  $K(\lambda)$  为人眼的光谱光视效能函数,或称视敏度函数。光通量的单位为流明(lm)。

1lm 为处于钝铂的熔化温度(2045K)的黑体在  $1/60\text{cm}^2$  的表



面积向 1 球面度( $sr$ )立体角<sup>①</sup>内辐射的光通量。人眼光谱光视效能函数的值见表 1-1,其形状如图 1-1。

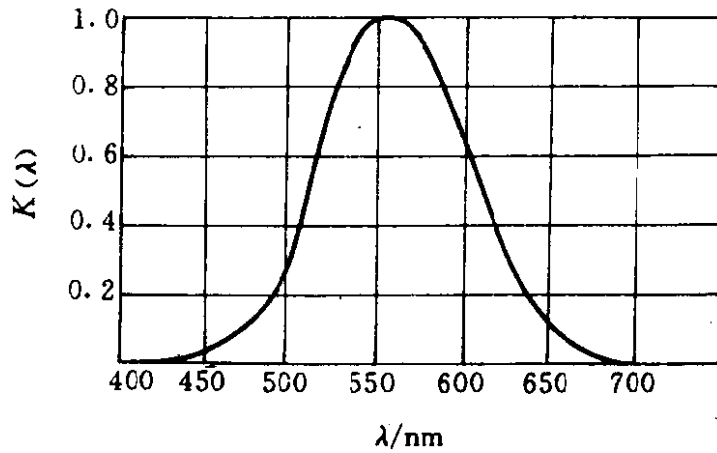


图 1-1 人眼视敏度曲线

表 1-1 人眼光谱光视效能函数表

光线颜色	波长/nm	$K(\lambda)$	光线颜色	波长/nm	$K(\lambda)$
紫	400	0.0004	黄	580	0.8700
紫	410	0.0012	黄	590	0.7570
靛	420	0.0040	橙	600	0.6310
靛	430	0.0116	橙	610	0.5030
靛	440	0.0230	橙	620	0.3810
蓝	450	0.0380	橙	630	0.2650
蓝	460	0.0600	橙	640	0.1750
蓝	470	0.0910	橙	650	0.1070
蓝	480	0.1390	红	660	0.0610
蓝	490	0.2080	红	670	0.0320
绿	500	0.3230	红	680	0.0170
绿	510	0.5030	红	690	0.0082
绿	520	0.7100	红	700	0.0041
绿	530	0.8620	红	710	0.0021
黄	540	0.9540	红	720	0.00105
黄	550	0.9950	红	730	0.00052
黄	555	1.0000	红	740	0.00025
黄	560	0.9950	红	750	0.00012
黄	570	0.9520	红	760	0.00006

① 立体角的概念见本节稍后的内容。