

《红外与光电系统手册》第4卷

光电系统设计、分析和测试

航天工业总公司第三研究院
八三五八所翻译出版



光电系统设计、分析和测试

第4卷

红外与光电系统手册

一部丛书 红外及光

由军事工程设计

白重安手册

王六六
一九九六年
十月

翻译出版序言

本书以1978年出版的“红外手册”为基础，并对它作了大量的修订、更新和补充，而且进行了重新整理和编排，于1993年再版。因此，无论在内容和形式上都以崭新的面貌出现。

全书共分八卷四十五章。几乎涉及到目前活跃于军事、航空航天和民用光电技术的大部分学科。有些内容是由先进的军事技术派生而来，在公开发表的文献中很少有如此大量的报道。在编排上也较好地考虑了可使用性因素。每章自成一体，避免了互相间繁琐的查阅，陈述格式由简明导言、实用公式汇编、有关数据、公式和数据使用方法实例四部分组成，非常明了、实用。

本书内容广泛充实，有较丰富的数据和参考文献，反映了美国80年代后至90年代初在此学科领域内的工程研究水平，具有先进性和借鉴性，是目前红外与光电系统学科领域中最新的一本参考书和非常有用的工具书。

为及时地把这本手册推荐给我国从事红外和光电系统设计的工程技术人员，我们决定翻译出版本手册。

红外和光电系统技术属于跨学科应用工程技术，所涉及的专业知识面极广。由于参加翻译、校对和审订者的专业水平和外语水平有限，在译文中难免有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

本手册由中国科学院成都分院林祥棣院长推荐并引进，值此翻译出版之际对他表示谢忱。

孙再龙

2001年5月

《红外与光电系统手册》 翻译出版委员会

顾 问：姚绍福 黄瑞松 承 文 于世元
委员会主任：姜殿元 谷满仓
副 主 任：孙再龙 杨树谦
主 编：孙再龙
责 任 编 辑：赵雪燕 何淑珍 丰金凤 李 瑾 翟远征

《光电系统设计、分析和测试》

翻 译：杨应槐
技术校对：陈光余 周赞熙 陆玲华
文字校对：陆玲华

引 言

本卷旨在研究光电系统的设计、分析和测试方法。描述了用于传感器研制过程中的一系列成像过程。本卷还适用于希望了解光电传感器研制原理、模型及实践知识的科学工作者及工程师。所阐述的内容均辅之以相关数据、实例描述及参考文献。

本卷主要介绍成像传感器,但也涉及其它成像和非成像传感器系统。光电传感器在军事和商业方面的应用不断增长,提出了许多特殊的传感问题。虽然传感问题各种各样,但传感器研制的物理原理却是相似的。本卷将要介绍那些传感器研制中相同的部分。

本卷共分六章。第一章由 J·Michael Lloyd 编著,介绍光电成像系统,着重介绍热成像系统,包括用系统工程的方法理解辐射源、传感器和图像的景物特性。本章的中心是应用光学传递函数的理论描述传感器对各种输入函数的响应。本章为传感器分辨率理论极限的一阶估计、频率响应和噪声限成像传感器的性能、信噪比和分辨率准则以及相对于信号源的景物杂波强度提供了分析工具。

第二章由 James Howe 编著,介绍光电成像系统性能预测的基本原理,给出了与第一代和第二代成像传感器探测、识别和辨认有关的性能参数的详尽描述。本章继续对传感器研制的系统工程进行研究,并提供由传感器系统产生景象的信息内容的详细分析。重要的是了解第一代和第二代热成像系统性能模型的应用和限制方法。

第三章由 Daniel Vukobratovich 编著,给出了有关光电传感器光学机械系统设计应用中的理论和实际数据。论述了与光电传感器窗口、透镜壳体 and 结构特性设计有关的许多实际问题。本章是传感器系统设计过程中自然要有的一个步骤,有助于设计人员在实际传感器的设计中满足系统工程师拟想的性能特性。所有系统研制者关心的是光学件的装配,确保光学特性不受热和压力影响。

第四章由 Gerald Holst 编著,介绍对光电系统测试和性能评估,提供了用于成像光电传感器多种性能测量的方法和步骤。另外, Holst 提出了与光学准直仪试验设备和电路测量有关的实际问题。本章补充了对成像环节的分析,使系统工程师按理论设计准则去评估实际硬件的测试结果。

第五章由 Robert Nasburg 编著,对跟踪和控制系统的理论和应用进行了讨论。随着对传感器信息图像处理的要求不断增长, Nasburg 将系统工程的研究方法用于由传感器获取信息的应用中。本章使系统设计人员更进一步理解了对传感器输出作信息处理的要求。这在显示给操作人员之前作信息预处理或预滤波的光电传感器系统中特别重要。

第六章由 John Conant 和 Malcom LeCompte 编著,介绍信标建模,给出了对来自复杂目标形状的发射和反射辐射作一阶估计的实用方法。它使系统研制者可以针对新的或不同类型的目标或在不同的应用场合中,对一个光电传感器的性能作出近似估计。本章进一步描述了光电信号产生的固有物理现象。

Michael C. Dudzik
Ann Arbor, Michigan

《红外与光电系统手册》总目次

第1卷 红外辐射

- 第1章 辐射理论
- 第2章 人工辐射源
- 第3章 自然辐射源
- 第4章 辐射计

第2卷 辐射的大气传输

- 第1章 大气透射
- 第2章 通过大气湍流的传输
- 第3章 空气动力学效应
- 第4章 非线性传输:热晕

第3卷 光电元器件

- 第1章 光学材料
- 第2章 光学设计
- 第3章 光机扫描应用、技术和器件
- 第4章 探测器
- 第5章 红外传感器的读出电路
- 第6章 低温制冷系统的热学与机械设计
- 第7章 图像显示技术以及在机载条件下的特殊问题
- 第8章 摄影胶卷
- 第9章 调制盘
- 第10章 激光器

第4卷 光电系统设计、分析和测试

- 第1章 光电成像系统的基础分析
- 第2章 光电成像系统性能预测
- 第3章 光学机械系统设计
- 第4章 红外成像系统的测试
- 第5章 跟踪和控制系统
- 第6章 信标预测和建模

第5卷 被动光电系统

- 第1章 红外行扫描系统
- 第2章 前视红外系统
- 第3章 凝视传感器系统
- 第4章 红外搜索/跟踪系统

第 6 卷 主动光电系统

- 第 1 章 激光雷达
- 第 2 章 激光测距仪
- 第 3 章 毫米波雷达
- 第 4 章 光纤系统

第 7 卷 光电对抗系统

- 第 1 章 报(预)警系统
- 第 2 章 伪装、抑制及屏障系统
- 第 3 章 主动红外对抗
- 第 4 章 消耗性诱饵
- 第 5 章 光学和传感器的保护
- 第 6 章 遮挡对抗

第 8 卷 新系统和技术

- 第 1 章 非常规成像系统
- 第 2 章 自适应光学
- 第 3 章 传感器与数据融合
- 第 4 章 自动目标识别系统
- 第 5 章 定向能量系统
- 第 6 章 全息学
- 第 7 章 视觉耦合系统的设计考虑

目 次

第 1 章 光电成像系统的基础分析

1.1 引言	(1)
1.1.1 定义	(1)
1.1.2 特性	(5)
1.1.3 源探测的障碍	(5)
1.1.4 基本极限	(6)
1.1.5 理想模型	(7)
1.2 光子收集和信噪比	(7)
1.2.1 噪声特性	(7)
1.2.2 辐射能量传输	(9)
1.2.3 扩展源焦平面通量方程	(10)
1.2.4 点源辐照度公式	(11)
1.2.5 探测器输出信噪比	(12)
1.2.6 灵敏度	(16)
1.2.7 视在量	(21)
1.2.8 光谱带的选择	(22)
1.3 干扰噪声	(23)
1.3.1 描述	(23)
1.3.2 昼夜的变化	(25)
1.3.3 影响	(25)
1.4 空间频率响应	(25)
1.4.1 线性滤波理论	(26)
1.4.2 系统光学传递函数	(26)
1.4.3 光学系统的光学传递函数	(28)
1.4.4 探测器的光学传递函数	(29)
1.4.5 信号处理的光学传递函数	(29)
1.4.6 方波响应	(30)
1.4.7 目标定位估计的理论极限	(31)
1.5 采样和虚景	(32)
1.5.1 基本结构和复制	(32)
1.5.2 采样的数学公式	(33)
1.5.3 信号混叠和噪声起伏	(34)
1.5.4 凝视阵列	(34)
1.5.5 内插显示的复现	(35)
1.6 噪声信号的视觉探测	(35)

1.7	系统设计应用	(36)
第2章 光电成像系统性能预测		
2.1	引言	(38)
2.2	目标截获的要素	(41)
2.2.1	一般性描述	(41)
2.2.2	目标截获的复杂性	(41)
2.2.3	目标截获用语	(41)
2.3	成像的主要环节	(43)
2.3.1	目标和背景	(43)
2.3.2	大气	(45)
2.3.3	前视红外系统	(45)
2.3.4	观察者	(49)
2.4	系统性能测量	(52)
2.4.1	前视红外性能测量	(52)
2.5	静态性能预测	(56)
2.5.1	探测	(56)
2.5.2	高阶鉴别和 Johnson 法	(60)
2.5.3	讨论	(63)
2.5.4	其它静态性能模型	(64)
2.5.5	最近的前视红外系统和性能模型	(65)
2.6	搜索性能建模	(69)
2.6.1	搜索过程	(69)
2.6.2	影响搜索性能的因素	(70)
2.6.3	搜索建模	(70)
第3章 光学机械系统设计		
3.1	引言	(75)
3.2	窗口	(75)
3.2.1	热对平面窗口的影响	(75)
3.2.2	压力对平面窗口的影响	(76)
3.2.3	压力差引起整流罩的应力	(77)
3.2.4	窗口强度	(79)
3.2.5	窗口基本频率	(83)
3.2.6	窗口的装配	(84)
3.3	棱镜	(85)
3.3.1	棱镜装配的一般原理	(85)
3.3.2	棱镜粘接	(85)
3.3.3	棱镜的动态装配	(86)
3.3.4	棱镜大接触面的装配	(86)
3.4	透镜的装配	(87)

3.4.1	透镜装配的一般性考虑	(87)
3.4.2	透镜粘接的装配	(89)
3.4.3	垫补装配	(91)
3.4.4	座和压圈的装配	(91)
3.5	透镜筒	(94)
3.5.1	透镜筒材料	(94)
3.5.2	透镜筒设计	(95)
3.5.3	透镜筒的密封	(98)
3.6	反射镜设计与装配	(98)
3.6.1	反射镜的自重偏移	(98)
3.6.2	轻质反射镜	(100)
3.6.3	金属反射镜	(103)
3.6.4	反射镜热效应	(106)
3.6.5	反射镜的安装	(110)
3.7	无热化	(113)
3.7.1	结构无热化	(113)
3.7.2	相同材料的无热化	(113)
3.7.3	无热化补偿	(114)
3.8	例题	(116)
3.8.1	窗口设计	(116)
3.8.2	整流罩的设计	(117)
3.8.3	棱镜装配	(118)
3.8.4	粘接的透镜座	(118)
3.8.5	透镜机械装配	(119)
3.8.6	小圆反射镜的装配	(120)
3.8.7	轻型反射镜设计	(120)
3.8.8	反射镜上的热效应	(121)
3.8.9	金属反射镜的热双金属弯曲	(122)

第4章 红外成像系统的测试

4.1	引言	(124)
4.2	试验基本原理	(127)
4.3	辐射度和 ΔT 概念	(127)
4.4	试验布局	(129)
4.5	信号传递函数	(131)
4.6	3D噪声模型	(132)
4.7	狭缝响应函数	(137)
4.8	调制传递函数	(138)
4.8.1	数字化和相位影响	(139)
4.8.2	背景消除	(140)

4.8.3	抖动	(140)
4.8.4	噪声	(141)
4.8.5	傅里叶变换	(141)
4.8.6	归一化	(142)
4.8.7	调制传递函数总和	(143)
4.9	对比度传递函数	(143)
4.10	最小可分辨温度	(144)
第5章 跟踪和控制系统		
5.1	引言	(148)
5.1.1	自动视频跟踪系统的回顾	(149)
5.1.2	跟踪回路结构	(150)
5.2	目标位置评估	(152)
5.2.1	质心跟踪器	(152)
5.2.2	目标位置的最大似然估计	(158)
5.2.3	相关跟踪器	(163)
5.2.4	自适应、学习和漂移	(167)
5.2.5	多模式跟踪	(168)
5.2.6	目标位置算法的比较	(169)
5.3	目标波门选定和解锁探测	(169)
5.3.1	波门构造和跟踪性能	(170)
5.3.2	基于直方图分析的目标长度估计	(172)
5.3.3	目标分割	(173)
5.3.4	解锁探测算法	(173)
5.4	视线确定和跟踪回路补偿	(174)
5.4.1	视线确定	(174)
5.4.2	跟踪回路补偿	(175)
5.5	跟踪回路性能预测	(176)
5.5.1	跟踪系统的性能判据	(176)
5.5.2	瞄准指示精度预测的解析系统	(177)
5.5.3	通过仿真预测跟踪系统性能	(178)
第6章 信标预测和建模		
6.1	引言	(180)
6.2	可观测的强度关系	(181)
6.3	几何描述	(183)
6.3.1	景象坐标	(183)
6.3.2	目标坐标	(183)
6.4	简化的辐射环境模型	(187)
6.5	简化的双向反射分布函数/发射模型	(191)
6.6	物体温度	(192)

6.7 非透明面的反射和发射	(195)
6.7.1 太阳的反射	(195)
6.7.2 地球照射的反射	(196)
6.7.3 天空照射的反射	(196)
6.7.4 简化的公式	(196)
6.8 引擎排气羽烟	(197)
6.8.1 羽烟的特性	(199)
6.8.2 羽烟辐射亮度和透过率的计算	(200)
6.8.3 MWIR 的羽烟辐射估计	(201)
6.9 总结	(206)
参考文献	(208)

第一章 光电成像系统的基础分析

1.1 引言

光电成像系统是把光学波段内的电磁辐射转换为用于辐射源探测和/或模拟显示的电信号,在波长、信号灵敏度、距离和环境条件方面扩展了人类视觉。在焦平面上产生的所选波段内的景物图像是由位于焦平面上的探测器把光信号转换成视频信号完成的。

光电成像是七维的:强度、时间、波长、极性和三维空间尺寸。光电成像器是把景物的三维空间分布透视在焦平面的二维平面上。如果需要的话可由已有的知识(被动测距),或由脉冲照射(距离选通),或由相干照明和探测(激光雷达)等方法计算获得距离的大小。

由成像器产生的视频信号是一个典型的电信号序列,每个采样点处电信号的幅值与景物强度成正比,由信号在序列内时间轴上的位置对位置信息编码。典型的是以比光频率低几个数量级的速率采样景物中强度的时域变化。波长信息可保留也可不保留,而极性也很少用到。

本章是从军用战术热成像系统的观点来编写的。这里提出的理论可用于光电成像的其它形式,不包括那些黑体辐射直接用于方程中的情况。分析重点考虑了有限的光学和电路带宽引起的图像细节模糊,也考虑了离散栅格点上的采样效应和噪声对信号源的遮蔽。

这些分析均基于以下假设:光电系统服从空间和时间频率分析,噪声干扰探测按信号与噪声线性比的方式进行,人的视觉模型对有用信号预测有足够的精度等。这里介绍的有关内容的背景、复杂的分析及应用,感兴趣的读者可参考以下作者的著作: Biberman^[1]、Dereniak 和 Crowe^[2]、Hudson^[3]、Karim^[4]、Lloyd^[5]、Spiro 和 Schlessinger^[6]、Rosell 和 Harvey^[7]、Seyrafi^[8]和 Shumaker、Wood 和 Thacker^[9]。

1.1.1 定义

图 1.1 示出一个光电成像系统的基本光学成像特性和光电成像系统的参数,表 1.1 列出本章使用的各种符号、简称和缩写。一个光电成像器具有二维角覆盖视场,称作视场(FOV),在视场内成像器看到景物。典型的视场是矩形的,水平方向为 A 弧度,垂直方向为 B 弧度。注视视场与 FOV 不同,注视视场二维角度覆盖更大,在这个视场内成像器可以步进或平移的方式,探测比 FOV 大的景物。

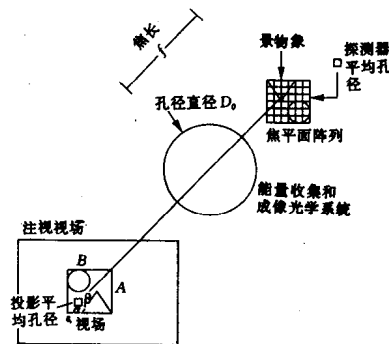


图 1.1 光电成像系统的基本特性

表 1.1 符号、术语和单位

符号或缩写	定义	单位
a	探测器水平方向的尺寸	m
A	水平方向的视场	rad
A_d	探测器面积	m ²
A_o	光学收集面积	m ²
b	探测器垂直方向尺寸	m
B	垂直方向的视场	rad
B	下标,表明与背景有关的量	—
c	真空中的光速	ms ⁻¹
c	下标,表明由于衍射限或探测器几何尺寸的不同的空间截止频率	—
c_1	第一普朗克辐射常数	Wμm ⁴ m ⁻²
c_2	第二普朗克辐射常数	μmK
c_3	第三普朗克辐射常数	—
C	泊松分布平均值	—
D	探测率	W ⁻¹
D^*	比探测率	cm Hz ^{1/2} W ⁻¹
$D_{\Delta\Omega}^*$	背景限 D^*	cm Hz ^{1/2} W ⁻¹
$D_{\Delta\Omega}^*$	对半球张角的背景限 D^*	cm Hz ^{1/2} W ⁻¹
D_o	光学孔径	m
e	下标,表示能量	—
E	辐照度,能量的或光子的,取决于下标	—
f	有效焦距	m
f_s	电(时间)频率	Hz
f_x, f_y	空间频率,每单位测量角度的周,即周/毫弧度	c/mrad
$f/\#$	焦比或 F 数	—
f_e	电频率	Hz
$F\{ \}$	正向傅里叶变换	—
$F^{-1}\{ \}$	反向傅里叶变换	—
FOR	注视视场	rad
FOV	视场	rad
h	普朗克常数	Ws ²
I	辐射强度,能量的或光子的,取决于下标	—
k	玻耳兹曼常数	—
L	辐射亮度,能量的或光子的,取决于下标	JK ⁻¹
M	辐射出射度,能量的或光子的,取决于下标	—
n_B	背景产生的载流子数	—

表 1.1 (续)

符号或缩写	定 义	单 位
n_s	信号载流子数	—
n_t	总的载流子数	—
NEP	噪声等效功率	W
NETD	噪声等效温差	K
PSD	功率谱密度, 单位频带宽的平方辐射单位	—
PTF	相位传递函数	rad
q	下标, 表示光子量	—
Q	辐射能量, 能量的或光子的, 取决于下标	—
\bar{Q}_q	光子数平均值	—
r	自相关函数任意两点的径向分离	—
R	对源的斜距	m
\mathcal{R}	探测器响应度	VW ⁻¹
S_0	光对探测器耦合的形状系数	—
t	下标, 表示与目标有关的量	—
T	绝对温度	K
T_f	帧时	s
V_s	信号电压	V
V_n	均方根噪声电压	V
希腊文:		
α	探测器水平方向张角	rad
β	探测器垂直方向张角	rad
$\Delta\lambda$	波带	m
$\Delta\lambda$	下标, 表示在整个波段范围积分的量	—
Δf	噪声等效电频率带宽	Hz
Δn_s	信号载流子数的变化	—
ΔT	微小的温度变化	K
*	符号任一侧的上角, 表示相应量的卷积	—
η_{ca}	冷屏蔽效率	—
η_q	量子效率	—
θ	角	—
λ	波长, 单位 μm , 或作为下标, 表示光谱密度	—
Λ	相干波段	—
ξ	积分变量, 假的变量	—
σ	随机变量变化量的方根	—
σ_e	斯蒂芬-玻耳兹曼常数, 能量单位	Wm ⁻² K ⁻⁴
σ_q	斯蒂芬-玻耳兹曼常数, 光子单位	s ⁻³ m ⁻⁶ K ⁻⁹

表 1.1 (续)

符号或缩写	定义	单位
σ_Q	测量中记数的光子数变化量的平方根	—
τ_a	大气传输系数	—
τ_{aa}	视在大气透过率	—
τ_{cf}	制冷滤波器透过率	—
τ_i	积分周期	s
τ_o	光学透过率	—
τ_{oa}	视在光学透过率	—
Φ	通量密度, 能量的或光子的, 取决于下标	—
λ	干扰长度	—
ω	探测器总的张角	sr
Ω	立体角, 或总视场	sr
Ω_{ca}	冷屏立体角	sr
Ω_p	理想的冷屏蔽立体角	sr

把物方空间映射到焦平面的光学系统是以光学孔径的线性尺寸为特征, 其孔径用于收集景物的辐射能量; 光学系统另一特征是光线相对光轴的最大角度, 该角度内的光线聚焦到探测器敏感面上。这些尺寸和这个角度确定了自孔径到焦面的有效光学距离, 称作有效焦长, 经过这段距离能量会聚到焦平面上。

光学孔径面积决定指定距离收集远距离辐射源能量的大小, 最终确定了景物的信号灵敏度, 有效焦长确定给定距离的特定景物源的焦平面尺寸。有效焦长、光学孔径和光学透过率确定了在焦平面上收集的辐射能量的通量密度。有效焦长与孔径直径之比叫作焦比, 或 $f/\#$, 通过光学系统投影在传感器表面的总范围确定了器件的视场角。

此外, 光学系统的特征由作波长函数的光透过率确定。系统可在紫外、可见光或红外光谱范围工作, 后者可分为近红外、短波红外、中波红外和长波红外。整个光谱响应, 作为波长函数, 在景物的光学信号转换成电信号时相对有效, 它包括光学系统的光谱传输和探测器的光谱响应。由于光学衍射现象, 依据通光孔径尺寸和使用的波段, 可确定系统能够分辨的空间频率上限。这个衍射限截止频率 f_c 是通光孔直径与平均波长之比。

辐射能量转换成电信号的过程称作探测, 实际测量的信号量可以是电压或电流, 这个信号具有的最大值称饱和信号。探测面的特征是在焦平面整个尺寸范围内能量空间均匀分布, 称作平均孔径或单元。探测的同时产生使信号模糊的噪声。

探测过程的量化用信噪比 (SNR) 来描述, 即信号幅值与噪声统计变化量的平方根的线性之比。线性信噪比的应用起因于众所周知的通讯理论, 即确定有无信号的最低探测虚警率是用阈值测量。探测概率仅是信号阈值和信噪比的函数。对成像系统应用信噪比的另一个理由是视觉可探测度的低限决定于阈值过程, 这是有充分证据的。在信号饱和的情况下, 传感器的信噪比称作动态范围。

一个完美的成像系统的特点是空间上高保真, 可将景物图像转换成视频信号, 这是量化测