



装备科技译著出版基金

光电系统 分析与设计

Electro-Optical System
Analysis and Design



【南非】科尼利厄斯·J·威勒斯
(Cornelius J. Willers)

著

范晋祥

译

白晓东

审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

光电系统分析与设计

Electro-Optical System Analysis and Design

[南非] 科尼利厄斯·J·威勒斯 (Cornelius J. Willers) 著

范晋祥 译

白晓东 审校



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-035 号

图书在版编目(CIP)数据

光电系统分析与设计/(南非)威勒斯(Willers, C. J.)著;

范晋祥译. —北京:国防工业出版社, 2015. 7

书名原文: Electro-Optical System Analysis and Design

ISBN 978-7-118-10124-9

I. ①光... II. ①威... ②范... III. ①光电子技术—研究 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 156012 号

Electro-Optical System Analysis and Design by Cornelius J. Willers

Copyright 2013 SPIE. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any Information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher and SPIE.

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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 22 字数 513 千字

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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

谨以此书献给

我一生的爱人 Riana

我的两个儿子 Bernard 和 Martinus

我的母亲 Agnes

并以此书纪念我的父亲 Jan Benardus

光电探测系统是以光电探测器为基础的探测装置,能够从一定距离以外接收由目标物体发射或反射的光波谱段(从紫外到红外)内的电磁辐射信号,经过适当的信号、信息分析处理,基于目标物体与周围的环境以及其他物体在光波谱段内的电磁辐射特性上的差异,检测出目标物体的存在并识别目标物体及其变化规律,进而完成规定的任务。光电探测系统具有其独特的优点,在军事、安全、科学和民用领域都获得了广泛的研究和应用。

辐射度学是研究 $3 \times 10^{13} \sim 3 \times 10^{16}$ Hz 频率范围之间电磁辐射计量技术的一门学科。该频率范围对应着 $10\text{nm} \sim 10\mu\text{m}$,包括通常所说的紫外光、可见光和红外光波谱。光电探测系统所采用的光电探测器要把接收的由目标物体发射或反射的光波谱段内的电磁辐射能量转换成便于计量的物理量。要设计出适当的光电探测系统,必须了解从目标投射到探测器上辐射能量的多少,要知道目标的辐射量到底有多大,也必须有相应的辐射度学测量技术。因此,辐射度学是光电探测系统的分析与设计的基础。

《光电系统分析与设计——辐射度学的视角》一书由红外成像导引头和机载红外对抗系统领域著名专家 Cornelius J. Willers 撰写,由 SPIE 出版社于 2013 年出版。全书总结了作者在多年的辐射度学实践(设计、测量、建模和光电系统仿真)中积累的经验,对光电系统分析与设计的基本流程及其所涉及的辐射度学理论和技术问题进行了全面系统的阐述。全书贯穿着采用系统工程思维来分析和设计由多个组件构成的复杂光电系统的思想,使读者从组件级的视角转向综合系统的视角,进而能更好地应用辐射度学来分析和设计用于各种不同场景的光电系统。

Cornelius J. Willers 是一名长期从事军用光电系统分析、设计和仿真工作的资深工程师,在光电系统开发、系统架构和系统工程、软件开发及红外场景仿真等方面具有近 40 年的工作经验。他创建了南非红外成像导引头的技术基础,是南非先进的基于物理的红外成像仿真的总架构师和技术领导者。他领导建立的仿真系统现在已用于全球多个实验室的多种不同的应用。他现在的研究兴趣包括红外特征测量和数据分析、红外系统建模和仿真、机载自卫防护系统开发,并正在牵头开发基于 Python 的 pyradi 辐射度学开源工具箱。

2013 年 7 月,译者在网上看到对本书的介绍之后,产生了很大的兴趣。为了能尽快地看到书中的内容,译者请在美国工作的同学、LSI 公司的李元兴博士从美国买到了此书。在见到本书之后,我们认真地通读了全书,认为本书对从事光电系统分析与设计及光电系统仿真等工作的技术人员及高校相关专业的研究生具有较大的参考价值。

全书由上海机电工程研究所范晋祥翻译,由中国空空导弹研究院白晓东研究员对全书进行了审校。

本书的翻译、出版得到了总装备部装备科技翻译基金和上海机电工程研究所的资助。

得到了西安现代自动控制研究所研究员、中国工程院院士杨绍卿先生、中国航天科工集团公司第三研究院张锋总师、上海航天技术研究院副院长兼上海机电工程研究所所长张宏俊研究员、上海机电工程研究所原所长贾耀兴研究员、现常务副所长孙刚研究员的极大支持。

美国 LSI 公司的李元兴博士为译者提供了本书的英文专著。

在此一并表示衷心感谢!

因译者水平所限,书中错误之处在所难免,敬请读者批评指正!

译者
2015 年 6 月

术语表

α	吸收比,吸收率,吸收系数	ρ_{λ}	光谱反射率(无单位)
α	吸收衰减系数(m^{-1})	ρ_d	散射反射(无单位)
α_{λ}	光谱吸收衰减系数(m^{-1})	ρ_i	镜面反射(无单位)
α_B	电阻的温度系数(K^{-1})	σ	材料电导率(U/m)
β	二极管 p-n 结非理想因子(无单位)	σ	散射衰减系数(m^{-1})
β	光学厚度(无单位)	σ	表面粗糙度(均方根)(m)
γ	衰减系数(m^{-1})	σ_e	斯特番-玻耳兹曼常数[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]
Γ	Γ 点:带隙中的最小能量差(条件)	σ_q	斯特番-玻耳兹曼常数[$\text{q}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^3)$]
$\delta()$	狄拉克 δ 函数(无单位)	τ	透过比,透过率,透过系数
Δ_{ε}	发射率中的空间纹理波动(无单位)	τ_{λ}	光谱透过率(无单位)
Δ_{ρ}	反射率中的空间纹理波动(无单位)	τ_{θ}	热时间常数(s)
$\Delta\Phi$	光学通量的变化(W 或 q/s)	τ_a	大气透过率(无单位)
$\Delta\Phi_e$	光学辐射通量的变化(W)	τ_c	对比度透过率(无单位)
$\Delta\Phi_p$	光学光子通量的变化(q/s)	τ_e	电子寿命(s)
Δf	等效噪声带宽(Hz)	τ_h	空穴寿命(s)
Δn_e	电子数目的变化(q)	τ_{RC}	电子电阻-电容时间常数(s)
Δn_h	空穴数目的变化(q)	Φ	光通量(W 或 q/s)
ε	发射率(无单位)	Φ_{λ}	光通量光谱密度($\text{W}/\mu\text{m}$)
ε	通过一段距离的电场(V/m)	Φ_e	光学辐射通量(W)
ε_{λ}	光谱发射率(无单位)	Φ_p	光学光子通量(q/s)
η	探测器量子效率(无单位)	Φ_q	光学光子通量(q/s)
η_a, η_b	沿着 a 和 b 方向的图像填充系数(无单位)	ψ	太阳辐射通量密度几何因子(sr/sr)
η_s	一个成像系统中的扫描效率(无单位)	ψ	自由电子的波函数(无单位)
θ	角度(rad)	ω	电学频率(rad/s)
θ	温度或热的量纲符号(无单位)	ω	几何立体角(sr)
λ	波长(μm)	ω	像素视场立体角(sr)
μ	载流子迁移率($\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$)	Ω	投影立体角(sr)
μ_e	电子载流子迁移率($\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$)	Ω_r	一个成像系统的观察场(sr)
μ_h	空穴载流子迁移率($\text{cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$)	A	面积(m^2)
ν	频率(Hz 或 s^{-1})	A_d	探测器面积(m^2)
$\bar{\nu}$	波数(cm^{-1})	A_s	源面积(m^2)
ρ	材料密度(g/m^3)	A_v	放大器或滤光片的电压增益(V/V)
ρ	反射比,反射率,反射系数	BRDF	双向反射分布函数(sr^{-1})

c	比热[$\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$]	g_{th}	热载流子产生率(q/s)
c	真空中的光速(m/s)	h	普朗克常数($\text{J} \cdot \text{s}$)
C	对比度(无单位)	$\hbar$	$\hbar = h/(2\pi)$, 单位为焦耳·秒($\text{J} \cdot \text{s}$), 其中 h 为普朗克常数
C, C_s	热探测器单元热容(J/K)	i	电流(A)
C_v	对比度门限(无单位)	i	噪声电流密度(A/Hz)
CODATA	科学和技术数据委员会	I	辐射强度(点量)(W/sr)
D	光学孔径或透镜的直径(cm)	$\hat{I}$	入射光线单位矢量(无单位)
D	探测率(W^{-1})	I_0	逆偏压饱和电流(A)
D	散射常数(m^2/s)	I_λ	辐射强度(点量)光谱密度[$\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})$]
D^*	比探测率[$\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz/W}}$]	I_b	偏压电流(A)
D_λ^*	光谱比探测率[$\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz/W}}$]	i_{gr}	产生—复合噪声(A 或 $\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$)
D_{eff}^*	宽带比探测率[$\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz/W}}$]	i_n	噪声电流(A 或 $\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$)
D_e	电子的散射常数(cm^2/s)	I_{ph}	光电流(A)
D_h	电子的散射常数(cm^2/s)	I_{sat}	逆向偏压饱和电流(A)
e	带电荷 q 的电子(C)	J	扩散电流密度(A/m^2)
E	能量(半导体能级)(J 或 eV)	J_d	漂移电流密度(A/m^2)
E	辐射通量密度(面量)(W/m^2)	k	玻耳兹曼常数(J/K)
E_λ	辐射通量密度(面量)[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$]	K_λ	光谱亮视觉光吸收效率(lm/W)
E_C	最低导带能级(J 或 eV)	K'_λ	光谱暗视觉光吸收效率(lm/W)
E_F	费米能级(J 或 eV)	K_μ	热光谱波段中的天空—地面面辐射强度比 (无单位)
E_g	半导体能量带隙(J 或 eV)	K_v	可见光波段中的天空—地面面辐射强度比 (无单位)
E_q	背景光子通量[$\text{q}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$]	k_f	时间带宽乘积($\text{s} \cdot \text{Hz}$)
E_V	最高价带能级(J 或 eV)	k_F	倒易晶格球半径(m)
f	电学频率(Hz)	k_n	噪声等效带宽与 -3dB 带宽之比
f	焦距(m)	L	面辐射强度[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$]
F	观察因子或结构因子(sr/sr)	L_λ	面辐射强度[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$]
f_{fill}	填充因子, 填充面积的部分(无单位)	L_v	载流子的扩散长度(cm)
F_F	成像系统的帧频(Hz)	L_e	电子的扩散长度(cm)
f_r	双向反射分布函数(sr^{-1})	L_h	空穴的扩散长度(cm)
F_T	傅里叶变换	L_p	探测器电感系数(H)
$f_{-3\text{dB}}$	-3dB 电路带宽(Hz)	LWIR	长波红外
$f/\#$	F -数, 替代的表示(无单位)	m	质量(g 或 kg)
$F_\#$	透镜的 F -数(无单位)	M	辐射出射度(W/m^2)
FAR	虚警率(s^{-1})	M_λ	辐射出射度光谱密度[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$]
FOM	性能指标	M_e	辐射出射度(W/m^2)
FOV	视场(rad)	m_e	电子质量(g)
FTIR	傅里叶变换红外光谱仪	m_e^*	等效电子质量, 单位与 m_e 相同
G	探测器光子增益(e/p)	m_h^*	等效空穴质量, 单位与 m_e 相同
G	热导率(W/K)		
G_e	偏压电路增益(无单位)		
G_{ph}	光导增益(e/p)		

MDT	最小可探测温度(K)	R	距离(m)
MRT	最小可分辨温度(K)	$\mathcal{R}$	响应率(A/W 或 V/W)
MTF	调制传递函数	$\hat{R}$	反射镜反射率单位矢量(无单位)
MTV	镁-聚四氟乙烯-氟橡胶	$\hat{\mathcal{R}}$	探测器响应率比例因子(A/W 或 V/W)
MWIR	中波红外	$\bar{R}$	等效路径长度(m)
n	电子浓度(cm^{-3})	$\tilde{\mathcal{R}}$	光谱响应率的归一化光谱形状(无单位)
n	折射系数(无单位)	$\mathcal{R}_\lambda$	探测器光谱响应(A/W 或 V/W)
N	物体、像素或探测器单元的数目(无单位)	R_0	在零偏压条件下的动态电阻(Ω)
$\hat{N}$	表面法线单位矢量(无单位)	$\mathcal{R}_{e\lambda}$	探测器光谱响应率(A/W 或 V/W)
n_a	受主浓度(cm^{-3})	$\mathcal{R}_{q\lambda}$	探测器光谱响应率(C 或 J/A)
n_d	施主浓度(cm^{-3})	R_{eff}	等效(宽带)响应率(A/W 或 V/W)
n_e	电子的数目(无单位)	R_L	负载电阻或偏压电阻(Ω)
n_h	空穴的数目(无单位)	R_V	气象距离(能见度)(km)
n_i	本征载流子浓度(cm^{-3})	RH	相对湿度,无单位表达为%
n_n	n 型材料中电子的浓度(cm^{-3})	rms	均方根(无单位)
n_p	p 型材料中电子的浓度(cm^{-3})	S, S_1, S_2	热电物质的赛贝克系数(V/K)
n_r	折射的复系数的实部(无单位)	S	传感器响应
NA	数值孔径(无单位)	$\hat{S}$	反射光线单位矢量(无单位)
$\text{NE}\Delta\rho$	噪声等效反射率(无单位)	S_λ	传感器光谱响应(无单位)
$\text{NE}\Delta T$	噪声等效温差(K)	$S(\omega), S(f)$	功率谱密度(A^2/Hz 或 V^2/Hz)
NEE	噪声等效辐射通量密度(W/m^2)	SCR	信杂比(无单位)
NEL	噪声等效面辐射强度[$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$]	SNR	信噪比(无单位)
NEM	噪声等效辐射出射度(W/m^2)	SWIR	短波红外
NEP	噪声等效功率(W)	t	时间(s)
NER	噪声等效反射率(无单位)	T	温度(K)
NETC	噪声等效目标对比度(K)	T	通过量($\text{sr} \cdot \text{m}^2$)
NETD	噪声等效温差(K)	T_b	背景温度(K)
NIR	近红外	T_{filter}	光学滤光片的温度(K)
OTF	光学传递函数	t_p	信号脉冲宽度(s)
P	空穴浓度(cm^{-3})	T_s	源温度(K)
$P(\theta)$	散射相位函数(无单位)	TPM	技术性能测度
P_d	探测概率(无单位)	v	电压(信号或噪声)(V)
P_n	n 型材料中的空穴浓度(cm^{-3})	V	体积(m^3)
p_p	p 型材料中的空穴浓度(cm^{-3})	V_λ	亮视觉光谱光视效率(无单位)
PSD	功率谱密度(A^2/Hz 或 V^2/Hz)	V'_λ	暗视觉光谱光视效率(无单位)
PSF	点扩展函数(无单位)	V_{bias}	跨器件的偏置电压(V)
q	绝对湿度(g/m^3)	V_d	p-n 二极管的内部电势(V)
q	电子电荷(C)	v_n	用电压表示的噪声(V 或 $\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$)
q	量子,像在光子计数中那样(无单位)	w	能量密度(J/m^3)
Q	能量($\text{W} \cdot \text{s}$ 或 J)		
r	半径(m)		

序

如果你和我各有一个苹果,如果我们交换苹果的话,我们还是只有一个苹果。
但当你和我各有一个想法,我们交换想法的话,我们就都有两个想法了。

——乔治·萧伯纳

有关共享

在我们人生的道路上始终都有老师。有些老师会留有名字,有些老师则仅留下了匿名的批注。在美国亚利桑那大学光学科学中心的那些老师中,有 James Palmer、Eustace Dere-niak 和 Jack Gaskill。他们无偿地与学生共享他们的知识。有些老师通过他们的书来教学,这里我要感谢 Bill Wolfe、George Zissis 和其他的许多老师。多年以前,R. Barry Johnson 的一个短期课程对我的职业生涯产生了决定性的影响。

本书的目的是共享我多年来在辐射度学实践(设计、测量、建模和光电系统仿真)中积累的某些经验。这里所提供的材料是基于我在亚利桑那大学光学科学中心所奠定的基础上的。我有机会在工学院的研究生层次的学术环境中共享这些材料,为此对涉及的关键概念进行了梳理。在数学和枯燥的理论之外,在现实世界的应用中有许多需要洞察的微妙之处,这也是我试图阐述的内容。希望本书能够帮助读者继续洞察这些微妙之处,并与他人共享。简化主义、综合和设计

简化主义认为,任意一个复杂系统都可以简化为许多可以理解的较小的系统。这种观点基于一个前提条件,即复杂系统可以看做其组成部分的累加,通过理解这些组成部分就可以理解由它们累加构成的复杂系统。尽管简化主义方法的确有其弱点,但这种方法对于本书所考虑的问题是有效的。这里所采用的方法学是利用简单的事例发展理论,开发一个工具箱,从而对基本原理有一个清晰的理解。

现实世界并不是由松散的组成部分和简单的系统组成。一旦上述假设不成立,我们将考虑复杂的概念,如传感器、特征以及由源、介质与接收器组成的简单系统。采用这些概念和在本书中开发的工具,读者应该能设计一个具有任意复杂度的系统。本书同时出现两个主题,即:将一个复杂的问题分解成简单的模块,利用较小的单元综合(设计)复杂的系统。在任何设计过程中,这两种行为交互发生且互为支撑。在这一分解和综合的反复过程中,不受控的外部因素(如大气、噪声)影响着最终的输出,这就是学术理论在现实世界中发现工程应用的地方。本书的目标是说明如何沿着这一道路行进。

为了实现本书的目标,重点从组件级的视角转向一个综合系统的视角,这里“系统”由源(简单的或复合的)、交互作用的介质和传感器组成。许多现实世界的光电应用需要在这—综合系统级进行分析和设计。分析和设计作为一个新系统的创新性综合,不采用实例很

难讲授。因此,书中给出了若干案例分析。案例分析简明扼要,重点放在案例设计的某些方面。任何实际的设计过程将需要一个详尽得多的过程,但这超出了本书的范围。

一般性评价

本书的目的是使读者能够找到现实世界问题的解,重点是在各种分析和设计场景中应用辐射度学。然而,有必要构建坚实的理论理解基础,并获得超越图、表和公式的视角。因此,本书并不试图提供大量的可用的公式和数据集,而是要试图洞察在这一领域中隐藏的微妙之处。这种出发点能够激发读者丰富的好奇心。

“辐射度学”的严格的词典定义是光辐射通量的测量。在本书中,术语“辐射度学”用于更宽泛的情境,以便覆盖对辐射通量的计算。这一宽泛的定义是这一领域的实践者普遍采用的,覆盖了各种形式光学辐射通量的处理,包括产生、测量、计算、建模和仿真。本书的重点不是辐射度量测量,而是对测量的数据的分析和建模,以及光电系统的设计。

Antoine de Saint - Exupery 曾经指出:“不是在你没有什么可加,而是在你没有什么可拿走时,你知道你已经实现了完美设计。”写一本书的最痛苦之处是决定要舍弃哪些内容。本书可以包括有关辐射度量测量、发射率测量、不同类型的红外探测器的特性或者有关光学材料的特性的参考信息等更多的内容;然而,这些主题已经有其他优秀的图书很好地覆盖,比在本书所涉及的有限的范围内实现得更好。

本书给出了很多习题,有些给出了解答。较前的章节的习题涉及的范围较小,而较后的章节的习题涉及的范围更宽泛,更复杂的习题需要数值求解。尽管有可能阅读本书而不做那些复杂的习题,但更希望读者花些时间来掌握计算技巧,这样做会在将来得到很好的回报。某些习题需要的数据不太适合以书的格式提供,为此标示了数据包(如 DP01),可以从 pyradi 网站(见 D.3.4 节)上获得。

对初学者而言,辐射度学领域内容宽泛,是一个危险的领域,面临着错误和不易觉察的陷阱。通过我们在设计实验室、外场测量试验和学术环境中的工作,确定了一系列努力使错误的风险最小的好的做法,称为“黄金法则”。一些原理来自 James Palmer 的课程教学,但大多数是从长期工作实践中总结梳理出来的。希望读者能够在日常工作中学习、使用和扩展这些最优方法。欢迎对“黄金法则”或者其他内容的任何反馈,这里表示感谢。

一本书很少是一个人的智力成果,它是与同事沿着一条道路协同前行的结果。在这条道路上,有很多人做出了贡献,或者是直接地,或者是不经心地。我诚挚地感谢所有在这一过程中付出宝贵的时间和资源的人。我诚挚地感谢 Riana Willers 的耐心和支持,作为我们许多项目的合作者,这本书的每一页都有她轻盈的足迹:为本书提出建议,仔细检查每一个细节,讨论符号和句子,编辑文本和图片,汇编术语和索引,并且为章节编写内容。Riana 的确是本书的影子作者! Fiona Ewan Rowett 允许在封面中使用她优雅的“卡鲁高原之夏”,这幅油画不仅优美地表现了南非高热的、半干旱的卡鲁高原,而且表现了辐射的光和蓬勃的热能,这正是本书的主题。我在亚利桑那大学光学科学中心的老师为这本书奠定了早期的基础。Ricardo Santos 和 Fabio Alves 参与了红外探测器与建模章节的编写。pyradi 团队构建了一个对本书的读者很有价值的工具包。Derek Griffith 提供了可见光和近红外反射率测量相关材料,Hannes Calitz 提供了光谱测量相关材料,Azwitamisi Mudau 提供了红外成像测量相关材料。KACST 的 Munir Eldesouki 博士授权本书使用本生灯火焰测量数据。Kentron 公司

(现为 Denel 动力公司)、CSIR、KACST 和 Pretoria 大学的许多同事、合作者和学生也对本书的出版提供了很多帮助。感谢 Scott McNeill 和 Tim Lamkins 在出版过程中的悉心指导。特别是 Scott 在详细的校对时的耐心。感谢 Eustace Dereniak 鼓励我提交本书出版。感谢 Barbara Grant、Eustace Dereniak 和不知名的评审者对本书的最终定稿所提出的修改意见。最后,感谢 Dirk Bezuidenhout 和 CSIR 在本书出版前的最后关键的一个月对项目的大力支持。

马克吐温曾经说过,他不允许正规的学校教育妨碍他的教学。我希望我尊敬的读者,能用更深远的视角,钻研本书所著述的内容,有人说,教学的艺术是帮助发明的艺术。祝愿您能通过本书获得更多的感悟。

纳里斯·威勒斯

哈坦柏斯

2013 年 3 月

目 录

术语表	XVII
序	XX
第1章 光电系统设计	1
1.1 引言	1
1.2 系统设计的原理	1
1.2.1 定义	1
1.2.2 设计过程	2
1.2.3 设计的先决条件	2
1.2.4 产品研发方法	3
1.2.5 寿命周期	3
1.2.6 在研发中的并行的活动	4
1.2.7 技术指标	5
1.2.8 性能测度和指标值	6
1.2.9 评估体系和设计选择	6
1.2.10 设计中的假设	7
1.2.11 设计过程回顾	7
1.3 光电系统和系统设计	8
1.3.1 光电系统的定义	8
1.3.2 光电系统级设计	9
1.3.3 光电系统建模和仿真	10
1.4 结论	10
参考文献	10
第2章 辐射度学基础	12
2.1 注解	12
2.2 引言	12
2.3 辐射度学术语	14
2.3.1 量的定义	14
2.3.2 辐射度量量的性质	15

2.3.3	光谱量	16
2.3.4	材质特性	16
2.4	线性角	17
2.5	立体角	18
2.5.1	几何和投影立体角	18
2.5.2	锥体的几何立体角	19
2.5.3	锥体的投影立体角	19
2.5.4	矩形平面的几何立体角	20
2.5.5	矩形平面的投影立体角	21
2.5.6	立体角的近似	21
2.5.7	球面的投影面积	21
2.5.8	球面的投影立体角	22
2.6	辐射度和通量传输	22
2.6.1	辐射度(面辐射强度)的守恒	22
2.6.2	辐射通量通过无损介质的传输	23
2.6.3	经过有损耗介质的辐射通量传输	24
2.6.4	任意形状的源和接收器	24
2.6.5	多光谱辐射通量传输	25
2.7	朗伯辐射体和投影立体角	26
2.8	空间观察因子或结构因子	27
2.9	辐射体的形状	28
2.9.1	圆盘	28
2.9.2	球面	29
2.10	光度学和颜色	29
2.10.1	光度学单位	29
2.10.2	眼睛的光谱响应	29
2.10.3	转换到光度学单位	30
2.10.4	颜色坐标简介	31
2.10.5	颜色坐标对源的光谱的敏感性	32
参考文献		33
习题		35

第3章 源 38

3.1	普朗克辐射体	38
3.1.1	普朗克辐射定律	39
3.1.2	维恩位移定律	41
3.1.3	斯忒藩—玻耳兹曼定律	42
3.1.4	普朗克定律累加近似	42

3.1.5	普朗克定律小结	43
3.1.6	常见物体的热辐射	45
3.2	发射率	45
3.2.1	基尔霍夫定律	46
3.2.2	源和接收器之间的辐射通量的传输	46
3.2.3	灰体和选择性辐射体	47
3.2.4	低发射率表面的辐射	48
3.2.5	腔的发射率	49
3.3	黑体前面的口径板	49
3.4	表面方向性反射	50
3.4.1	粗糙度和尺度	51
3.4.2	反射几何	51
3.4.3	光学平滑表面的反射	51
3.4.4	菲涅尔反射	52
3.4.5	双向反射分布函数	53
3.5	方向性发射率	55
3.6	自然界中的方向性反射率和发射率	56
3.7	太阳	57
	参考文献	57
	习题	61
第4章	光学介质	65
4.1	概述	65
4.2	光学介质	65
4.2.1	有损介质	65
4.2.2	路径辐射	66
4.2.3	对比度降低的一般规律	68
4.2.4	光学厚度	68
4.2.5	气体辐射体源	69
4.3	不均匀的介质和离散坐标	69
4.4	等效透过率	70
4.5	透过率作为距离的函数	72
4.6	大气作为介质	72
4.6.1	大气组分和衰减	72
4.6.2	大气分子吸收	72
4.6.3	大气气溶胶和散射	74
4.6.4	大气透过窗口	77
4.6.5	大气路径面辐射强度	78

4.6.6	路径面辐射强度的实际结果	79
4.6.7	在地球上向上和向下观察	80
4.6.8	大气水蒸气组分	81
4.6.9	大气中的对比度透过率	82
4.6.10	气象距离和气溶胶散射	84
4.7	大气辐射传输代码	85
4.7.1	概述	85
4.7.2	MODTRAN TM	85
	参考文献	86
	习题	89

第5章 光学探测器 90

5.1	历史回顾	90
5.2	探测过程概述	90
5.2.1	热探测器	91
5.2.2	光子探测器	91
5.2.3	归一化响应率	93
5.2.4	探测器结构	93
5.3	噪声	93
5.3.1	噪声功率谱密度	94
5.3.2	约翰逊噪声	95
5.3.3	散弹噪声	95
5.3.4	产生—复合噪声	96
5.3.5	$1/f$ 噪声	96
5.3.6	温度起伏噪声	96
5.3.7	接口电子噪声	97
5.3.8	成像系统中的噪声考虑	97
5.3.9	信号通量起伏噪声	97
5.3.10	背景辐射通量起伏噪声	98
5.3.11	探测器噪声等效功率和探测率	98
5.3.12	合成功率谱密度	99
5.3.13	噪声等效带宽	99
5.3.14	时间—带宽积	100
5.4	热探测器	100
5.4.1	工作原理	100
5.4.2	热探测器响应率	101
5.4.3	电阻微测辐射热计	103
5.4.4	热释电探测器	104

5.4.5	热电探测器	105
5.4.6	光子—噪声限工作方式	107
5.4.7	温度起伏噪声限工作方式	108
5.5	晶体材料的特性	108
5.5.1	晶状结构	108
5.5.2	能带中电子的出现率	109
5.5.3	能带中的电子密度	110
5.5.4	半导体带结构	112
5.5.5	导体、半导体和绝缘体	112
5.5.6	本征和非本征半导体材料	113
5.5.7	光子—电子交互作用	115
5.5.8	半导体中的光吸收	116
5.5.9	重要的半导体中的物理参数	118
5.6	光子探测过程概述	118
5.6.1	光子探测器工作原理	118
5.6.2	载流子和电流在半导体材料中的流动	118
5.6.3	光子吸收和多数/少数载流子	119
5.6.4	量子效率	119
5.7	探测器制冷	121
5.8	光导探测器	123
5.8.1	引言	123
5.8.2	光导探测器信号	123
5.8.3	光导探测器的偏压电路	124
5.8.4	光导探测器的频率响应	125
5.8.5	光导探测器中的噪声	126
5.9	光伏探测器	127
5.9.1	光伏探测器工作	127
5.9.2	二极管电流—电压关系	129
5.9.3	光伏探测器的偏置结构	131
5.9.4	光伏探测器的频率响应	133
5.9.5	光伏探测器中的噪声	134
5.9.6	探测器性能建模	137
5.10	探测器技术对红外系统的影响	139
	参考文献	140
	习题	145
第6章	传感器	147
6.1	概述	147