



普通高等教育“十二五”规划教材



天津市科协资助出版

光电信息科学与工程类专业规划教材

图像传感器应用技术

(第2版)

王庆有 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
光电信息科学与工程类专业规划教材

图像传感器应用技术

(第2版)

王庆有 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从应用的角度介绍了 CCD、CMOS 半导体图像传感器的基本工作原理、利用光电传感器扫描成像的技术和图像显示技术;分析典型图像传感器的基本特性与特性参数;对传感器的驱动方式、A/D 数据采集与计算机数据传输与处理技术进行研讨;最后列举 18 种典型应用实例,通过实例讲述实际应用中对光源的选择、光学系统的设计、期望量的计算和应用技巧等内容。为读者开拓图像传感器的应用领域。

本书可作为光电信息工程、计量测试仪器、测控技术与仪器、光信息科学与工程、测绘工程、环境工程、机械电子工程、公安图像技术、光电检测仪器、光学技术与仪器、生物医学工程等专业的本科生及研究生教材,也可作为光电技术领域科技人员的技术参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

图像传感器应用技术/王庆有编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2013.2

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-19186-2

I. ①图… II. ①王… III. ①图像处理-传感器-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 293128 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:600 千字

印 次:2013 年 2 月第 1 次印刷

印 数:2 000 册 定价:55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

人们通过感官从自然界提取各种信息,其中以人眼通过视觉提取的信息量为最多,也最为丰富多彩,最为可靠。成语“百闻不如一见”就说明了这个道理。图像传感器帮助人们提高人眼的视觉范围,使人们看到肉眼无法看到的微观世界和宏观世界,看到人们暂时无法到达处所发生的事件,看到超出肉眼视觉范围的各种物理、化学变化过程,生命、生理、病变的发生、发展过程等。可见图像传感器在人们的文化、体育、生产、生活和科学研究中起到非常重要的作用,可以说现代人类活动已经无法离开图像传感器。

图像传感器是基于光电技术基础上发展起来的,是将光学图像转换成一维时序信号的器件。它包含电子束摄像管、像增强管与变相管等真空管图像传感器,CCD(Charge coupled devices)、CMOS(Complementary Metal - Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)等半导体集成图像传感器和扫描型图像传感器等。其中,电子束摄像管等真空图像传感器正逐渐被 CCD、CMOS 等半导体集成图像传感器所取代。因此,本书不再讨论真空图像传感器,而重点讲授半导体图像传感器和扫描型图像传感器的原理及其应用技术。

本书共 12 章,主要内容包括:光电技术基础理论,各种图像传感器的工作原理、特性、特性参数、驱动方式与计算机接口技术,几款特种图像传感器,以及图像传感器在非接触尺寸测量、图像传感、图像分析、光谱探测、天文观测和安全监控等方面的典型应用。这些典型应用来自于参与本书编写的作者的科技作品,非常具有实际指导意义。书中还收集了许多典型图像传感器的特性参数、特性曲线、典型驱动电路和利用图像传感器的一些技巧。希望它能为科技开发做出贡献。因此,它不但是一本讲授图像传感器的教科书,更是从事光电工程和现代测试技术科技人员的有益参考书。

本书第 1 版自 2003 年出版以来受到光电界工程技术人员与高校相关专业教师及学生的欢迎,很多高校把它选作技术基础课的必修教材。随着科技的发展,图像传感器应用技术在不断地进步与提高,为适应当前技术层面的提高和高校教育改革的需要,作者决定再版。

这次修订除了把第 3 章改为图像扫描与图像显示技术外,还补充了第 9 章的内容,增加 PCIE 总线数据采集卡的内容,另外对全书第 1 版的文字、符号,以及印刷错误等进行了修正。

这次修订主要由王庆有完成,参加修订的人员还有:缙开顺,参与修订第 3 章;朱同波参与修订第 11 章;尚可可和王达成参与修订第 12 章。本书第 1 版由王庆有编著,其中,林家明编写第 6.6、6.7、6.8 节,蔡怀宇编写第 10 章,杨艺编写第 8 章,杨森编写 9.4 节,其他章节由王庆有编写。

天津理工学院龚正烈教授对全部书稿进行了认真细致的审校。本书在编写过程中得到了国内光电技术领域许多老师和朋友的支持和帮助,他们为本书提供了大量的素材和技术资料。在此衷心感谢:天津大学叶声华院士、孙长库教授、黄战华教授,北京理工大学张忠廉教授、周仁忠教授,天津工业大学张海明,南京理工大学李开明,空军第一航空学院黄宜军,中国科学院西安光机所陈良益、孙传东,中科院光电技术研究所沈忙作、陈旭南,北京凌云光视数字图像技术公司姚毅博士,北京嘉恒中自图像技术有限公司吴小宁经理,天津市耀辉光电技术有限公司李强、孟玲霞,天津市开希机器视觉技术有限公司王雪峰、于洪明等。本书修订过程中还得到天津大学光电信息工程系、闽南理工学院光电信息工程教研室和天津工业大学理学院光信息科学与技术系的支持和帮助,在此一

并表示诚挚的谢意!

本书得到天津市科学技术协会专著经费的资助,并获得福建省创新人才培养改革试点项目的支持。在此向天津市科技协会与福建省闽南理工学院表示感谢。

本书修订过程中事物繁多,难免有些疏漏,望读者批评指正。欢迎教学第一线的教师提出宝贵意见(wqy@tju.edu.cn)。

编著者
于闽南理工学院

目 录

第1章 光辐射与光电技术基础 (1)

1.1 光辐射的度量 (1)

1.1.1 与辐射源有关的参数 (2)

1.1.2 与接收器有关的参数 (4)

1.1.3 光源的辐射光谱分布参量 (6)

1.1.4 量子流速率 (6)

1.2 物体热辐射 (7)

1.2.1 黑体辐射定律 (7)

1.2.2 辐射体的分类及其温度表示 (9)

1.3 辐射度参数与光度参数的关系 ... (11)

1.3.1 人眼的视觉灵敏度 (11)

1.3.2 人眼的光谱光视效能 (13)

1.3.3 两种辐射体光视效能的计算 (14)

1.4 半导体对光的吸收 (15)

1.4.1 物质对光吸收的一般规律 (15)

1.4.2 半导体对光的吸收 (15)

1.5 光电效应 (16)

1.5.1 内光电效应 (17)

1.5.2 光电发射效应 (20)

思考题与习题1 (22)

第2章 光源 (23)

2.1 自然光源 (23)

2.2 钨丝灯光源 (24)

2.2.1 钨丝白炽灯 (24)

2.2.2 卤钨灯 (27)

2.3 气体放电灯 (28)

2.4 半导体发光二极管(LED)光源 ... (31)

2.4.1 发光二极管的发光机理 (32)

2.4.2 发光强度-电流特性 (32)

2.4.3 发光光谱和发光效率 (33)

2.4.4 LED灯构成的仪器光源 (35)

2.5 激光光源 (36)

2.5.1 激光的产生机理 (36)

2.5.2 氦氖激光器 (37)

2.5.3 半导体激光器(LD) (40)

2.6 图像传感器应用系统中光源和照度的匹配 (41)

思考题与习题2 (42)

第3章 图像扫描与图像显示技术 (43)

3.1 图像解析原理 (43)

3.1.1 图像的解析方法 (43)

3.1.2 图像传感器基本技术参数 (46)

3.2 图像的显示与电视制式 (47)

3.2.1 电视监视器的扫描 (47)

3.2.2 电视制式 (49)

3.3 图像显示器的分类 (49)

3.4 典型图像显示器 (50)

3.4.1 TFT-LCD 图像显示器简介 (50)

3.4.2 TFT-LED 图像显示器简介 (52)

3.4.3 LED 图像显示器 (52)

思考题与习题3 (53)

第4章 电荷耦合摄像器件的基本工作原理 (55)

4.1 电荷存储 (55)

4.2 电荷耦合 (56)

4.3 CCD的电极结构 (57)

4.4 电荷的注入和检测 (60)

4.5 CCD的特性参数 (63)

4.6 电荷耦合摄像器件 (64)

4.6.1 工作原理 (65)

4.6.2 CCD的基本特性参数 (68)

4.6.3 动态范围 (69)

4.6.4 暗电流	(70)	6.4 IA-D4 型面阵 CCD	(121)
4.6.5 分辨率	(71)	6.4.1 IA-D4 的结构	(121)
思考题与习题 4	(72)	6.4.2 工作原理	(122)
第 5 章 典型线阵 CCD 图像传感器 ...	(73)	6.4.3 IA-D4 的基本特性	(124)
5.1 典型单沟道线阵 CCD	(73)	6.5 特种面阵 CCD	(125)
5.1.1 TCD1209D 的基本结构	(73)	6.5.1 IA-D9-2048 型面阵 CCD	(125)
5.1.2 TCD1209D 的基本工作原理	(74)	6.5.2 IA-D9-5000 型面阵 CCD	(128)
5.1.3 TCD1209D 的特性参数	(75)	6.5.3 2620 万像素面阵 CCD	(128)
5.1.4 TCD1209D 的驱动电路	(76)	6.6 面阵 CCD 摄像器件的特性 ...	(129)
5.1.5 TCD1209D 的外形尺寸	(77)	6.7 面阵 CCD 的电荷累积时间 与电子快门	(133)
5.2 典型双沟道线阵 CCD 器件	(78)	6.8 MTV-2821 摄像机	(134)
5.3 具有积分时间调整功能的 线阵 CCD	(82)	6.8.1 工作原理	(134)
5.3.1 TCD1205D	(82)	6.8.2 MTV-2821CB 特性参数	(135)
5.3.2 IL-P1 型线阵 CCD	(85)	6.8.3 MTV-2821CB 的主要功能 及其设置	(137)
5.4 具有采样保持输出电路的 线阵 CCD	(88)	6.8.4 帧累积功能	(139)
5.5 并行输出的线阵 CCD	(90)	思考题与习题 6	(142)
5.5.1 并行输出的 TCD1703C	(91)	第 7 章 CCD 彩色摄像机概述	(143)
5.5.2 分段式并行输出的线阵 CCD ...	(92)	7.1 三管 CCD 彩色电视摄像机 ...	(143)
5.6 用于光谱探测的高性能 线阵 CCD	(95)	7.1.1 三管 CCD 彩色电视摄像机的 基本组成	(143)
5.6.1 RL1024SB	(95)	7.1.2 光学系统和 CCD 摄像机中的 重合调整	(144)
5.6.2 RL2048DKQ	(98)	7.1.3 频谱混叠干扰在 R, G, B 信号之间 相互抵消	(145)
5.6.3 TCD1208AP	(100)	7.2 两管式 CCD 彩色电视摄像机 ...	(146)
5.7 彩色线阵 CCD	(100)	7.3 单管 CCD 彩色摄像机	(147)
5.7.1 TCD2000P	(101)	7.4 典型单片彩色 CCD	(150)
5.7.2 TCD2558D	(102)	7.4.1 Bayer 滤色器单片彩色 CCD ...	(150)
5.7.3 TCD2901D	(104)	7.4.2 复合滤色器(或补色滤光片)型的 彩色 CCD	(151)
5.8 环形线阵 CCD	(106)	7.5 彩色数码照相机简介	(154)
思考题与习题 5	(109)	思考题与习题 7	(156)
第 6 章 典型面阵 CCD	(111)	第 8 章 CMOS 图像传感器	(157)
6.1 DL32 型面阵 CCD	(111)	8.1 MOS 场效应管	(157)
6.1.1 结构	(111)	8.1.1 MOS 场效应管的基本结构	(157)
6.1.2 工作原理	(112)	8.1.2 场效应管的主要性能参数	(158)
6.1.3 DL32 型 CCD 的光电特性	(113)		
6.2 TCD5130AC 面阵 CCD	(114)		
6.3 TCD5390AD 面阵 CCD	(118)		

8.2	CMOS 成像器件的原理结构	···	(161)	10.2	光学元件的成像特性	·····	(221)
8.2.1	CMOS 成像器件的组成	·····	(161)	10.2.1	球面光学元件的成像特性	·····	(222)
8.2.2	CMOS 成像器件的像敏 单元结构	·····	(162)	10.2.2	平面光学元件的成像特性	·····	(223)
8.2.3	CMOS 图像传感器的工作流程	···	(165)	10.3	光学成像系统中的光阑	·····	(228)
8.2.4	CMOS 成像器件的辅助电路	·····	(166)	10.4	常用光电图像转换系统的 成像特性	·····	(231)
8.3	CMOS 图像传感器的性能 指标	·····	(170)	10.4.1	摄影系统及其物镜的光学 成像特性	·····	(231)
8.4	典型 CMOS 图像传感器	·····	(174)	10.4.2	显微系统及其物镜的光学 成像特性	·····	(233)
8.4.1	IBIS4 SXGA 型 CMOS 成像 器件	·····	(174)	10.4.3	望远系统及其物镜的光学 成像特性	·····	(234)
8.4.2	FUGA1000 图像传感器	·····	(178)	10.5	照明系统	·····	(236)
8.4.3	高速 CMOS 图像传感器	·····	(180)	10.6	远心光路在动态测试中的 应用	·····	(237)
8.5	CMOS 摄像机	·····	(183)	10.7	面阵 CCD 摄像机光学镜头的 类型及其参数	·····	(238)
8.5.1	IM28-SA 型 CMOS 摄像机	·····	(183)	10.8	线阵 CCD 常用的物镜	·····	(242)
8.5.2	MC1300 高速 CMOS 摄像机	···	(186)	思考与习题 10	·····	(244)	
思考题与习题 8				(187)			
第 9 章 视频信号处理与计算机 数据采集 ···· (188)							
9.1	CCD 视频信号的二值化处理	···	(188)	第 11 章 特种图像传感器 ···· (246)			
9.1.1	二值化处理方法	·····	(188)	11.1	微光图像传感器	·····	(246)
9.1.2	二值化数据采集与计算机接口	···	(190)	11.1.1	微光图像传感器的发展概况	···	(246)
9.2	CCD 视频信号的量化处理	·····	(192)	11.1.2	微光电视摄像系统	·····	(248)
9.3	线阵 CCD 输出信号的数据采集与 计算机接口	·····	(195)	11.1.3	微光电视摄像系统观察 距离的估算	·····	(250)
9.4	面阵 CCD 的数据采集与计算机 接口	·····	(206)	11.1.4	微光 CCD 摄像器件	·····	(251)
9.4.1	图像采集卡的基本工作原理	···	(206)	11.2	红外 CCD 图像传感器	·····	(260)
9.4.2	图像卡的基本结构	·····	(206)	11.2.1	主动红外电视摄像系统	·····	(260)
9.4.3	典型图像数据采集卡	·····	(210)	11.2.2	被动红外电视摄像系统	·····	(261)
思考与习题 9				11.3	X 光 CCD 图像传感器	·····	(264)
(217)				11.3.1	X 光像增强器	·····	(264)
第 10 章 图像传感器的光学成像 系统 ···· (218)							
10.1	光学成像系统的基本计算 公式	·····	(218)	11.3.2	医用 X 光电视摄像系统	·····	(266)
10.1.1	理想光学系统的基本参数	·····	(218)	11.3.3	工业用 X 光光电检测系统	···	(267)
10.1.2	理想光学系统的物像 位置公式	·····	(219)	11.4	热成像技术	·····	(268)
10.1.3	理想光学系统的放大率	·····	(220)	11.4.1	点扫描式热释电热像仪	·····	(268)
				11.4.2	热释电摄像管的基本结构	·····	(269)
				11.4.3	典型热像仪	·····	(270)
				思考与习题 11			
				(271)			

第 12 章 图像传感器的典型应用

实例	(272)
12.1 图像传感器用于一维尺寸的测量	(272)
12.1.1 玻璃管内、外径尺寸测量控制仪器的技术要求	(272)
12.1.2 仪器的工作原理	(272)
12.1.3 线阵 CCD 的选择	(273)
12.1.4 光学系统设计	(273)
12.1.5 对外径、壁厚的检测电路	(276)
12.1.6 微机数据采集接口	(278)
12.1.7 系统的长线传输	(278)
12.2 CCD 的拼接技术在尺寸测量系统中的应用	(278)
12.2.1 CCD 的机械拼接技术在尺寸测量中的应用	(278)
12.2.2 线阵 CCD 的光学拼接	(280)
12.3 线阵 CCD 图像传感器用于二维位置的测量	(282)
12.3.1 高精度二维位置测量系统	(282)
12.3.2 光学系统误差分析	(284)
12.4 CCD 在 BGA 管脚三维尺寸测量中的应用	(284)
12.4.1 测量原理	(285)
12.4.2 数学模型	(285)
12.4.3 系统的标定	(286)
12.4.4 BGA 芯片测量实验	(287)
12.5 CCD 图像传感器用于平板位置的检测	(288)
12.6 利用线阵 CCD 非接触测量材料变形量的方法	(290)
12.7 CCD 图像传感器用于物体振动的非接触测量	(293)
12.8 图像传感器用于高精度细丝直径的测量	(295)
12.9 图像传感器用于透镜曲率半径的自动测量	(298)
12.9.1 测量原理和系统构成	(298)
12.9.2 测量系统的硬件与软件	(300)
12.9.3 系统测量误差	(301)
12.10 图像传感器用于成像物镜光学传递函数的测量	(301)
12.10.1 光学传递函数检测原理	(302)
12.10.2 光学传递函数检测系统	(303)
12.11 CCD 用于 ICP-AES 光谱探测与分析	(305)
12.11.1 ICP-AES 光谱探测器的基本原理	(305)
12.11.2 实验结果分析及结论	(307)
12.12 CCD 图像传感器用于光学系统像差测量	(308)
12.13 线阵 CCD 图像传感器在扫描复印技术中的应用	(311)
12.14 面阵 CCD 图像传感器用于钢板尺寸测量系统	(313)
12.15 CCD 天文图像观测系统	(316)
12.16 图像传感器用于光电显微分析仪	(317)
12.17 图像传感器在内窥镜摄像系统中的应用	(320)
12.17.1 工业内窥镜电视摄像系统	(320)
12.17.2 医用电子内窥镜摄像系统	(322)
12.17.3 侦察内窥镜摄像系统	(322)
12.18 图像传感器用于数码照相机	(322)
思考题与习题 12	(327)
参考文献	(329)

第 1 章 光辐射与光电技术基础

图像传感器的性能评估和应用说明都离不开光辐射与光电技术的基本理论。本章首先讨论光辐射的基本度量方法和度量单位,再讨论物体热辐射的基本定律、光与物质的作用等问题,为光电图像传感器技术的学习打下基础。

光电技术的理论基础是光的波粒二象性。几何光学研究了光的折射、反射与成像等基本规律,形成有关光学成像和像差基本定律与理论。物理光学依据光的波动性成功地解释了光的干涉、衍射等现象,为光谱分析仪器、全息摄影技术奠定了理论基础。然而,光的本质是物质,它具有粒子性,又称为光量子或光子。光子具有动量与能量,并分别表示为 $p = \frac{h\nu}{c}$ 与 $E = h\nu$,式中 h 为普朗克常数($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$); ν 为光的振动频率(s^{-1}); c 为光在真空中的传播速度($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

光的量子性成功地解释了光与物质作用时引起的光电效应,而光电效应充分证明了光的量子性。光是以电磁波方式传播的物质。即光的波粒二象特性。

电磁波谱的频率范围很宽,涵盖了由宇宙射线到无线电波($10^2 \sim 10^{25} \text{ Hz}$)的宽阔频域。图 1-1 所示为电磁波谱按波长的分布及各波长区域的定义。由图可见,光辐射仅仅是电磁波谱中的一小部分,它包括的波长区域从几纳米到几毫米,即 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 的范围。在这个范围内,只有 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的光才能被人眼所见。

图像传感器的光谱响应范围远远超出人眼的视觉范围,一般从 X 光到红外辐射、T 赫兹波谱和远红外辐射等。特种材料的热成像图像传感器的光谱响应范围有望超过厘米波的限制,即人们可以借助于光电图像传感器观测到近乎整个电磁波谱的图像信息。

电磁波名称	$\lambda (\text{m})$
宇宙射线	10^{-14}
	10^{-13}
γ 射线	10^{-12}
	10^{-11}
X 光	10^{-10}
	10^{-9}
紫外辐射	10^{-8}
	10^{-7}
可见光谱	10^{-6}
	10^{-5}
红外辐射赫兹波	10^{-4}
	10^{-3}
无线电波	10^{-2}
	10^{-1}
	10^0
	10^1
	10^2

图 1-1 电磁波谱的分布

1.1 光辐射的度量

为了定量分析光与物质相互作用产生的光电效应,分析图像传感器的光电特性,以及用图像传感器进行光谱、光度的定量计量需要对辐射量给出相应的计量参数和量纲。光辐射的度量方法有两种,一种是物理(或客观)的计量方法,称为辐射度学或辐射度参数,它适用于整个电磁辐射谱区,对辐射量进行物理的计量;另一种是生理(主观)的计量方法,是以人眼所能见到的光对大脑刺激程度来对光进行计量的方法,称为光度参数。光度参数只适用于 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的可见光谱区,是对光强度的主观评价,超过这个谱区,光度参数没有任何意义。

辐射度参数与光度参数在概念上虽不一样,但它们的计量方法有许多相同之处,为学习和讨论方便,常用相同的符号表示辐射度量与光度量。为区别它们,常在对应符号的右下角标以“e”表示辐射度参数,标以“v”表示光度参数。

1.1.1 与辐射源有关的参数

所谓与辐射源有关的参数是指计量辐射源在辐射波长范围内发射连续光谱或单色光谱能量的参数。

1. 辐(射)能和光能

以辐射形式发射、传播或接收的能量称为辐(射)能,用符号 Q_e 表示,其计量单位为焦耳(J)。

光能是光通量在可见光范围内对时间的积分,以 Q_v 表示,其计量单位为流明秒($\text{lm} \cdot \text{s}$)。

2. 辐(射)通量和光通量

辐(射)通量或辐(射)功率是以辐射形式发射、传播或接收的功率;或者说,在单位时间内以辐射形式发射、传播或接收的辐射能称为辐(射)通量,以符号 Φ_e 表示,其计量单位为瓦(W),即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-1)$$

若在 t 时间内发射、传播或接收的辐(射)能不随时间改变,则式(1-1)可简化为

$$\Phi_e = Q_e/t \quad (1-2)$$

对可见光,光源表面在无穷小时间段内发射、传播或接收所有可见光谱,光能被无穷短时间段隔 dt 来除,定义为光通量 Φ_v ,即

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (1-3)$$

若在 t 时间内发射、传播或接收的光能不随时间改变,则式(1-3)简化为

$$\Phi_v = Q_v/t \quad (1-4)$$

Φ_v 的计量单位为流[明][lm]。

显然,辐通量对时间的积分称为辐能,而光通量对时间的积分称为光能。

3. 辐出射度和光出度

对有限大小面积 A 的面光源,表面某点处的面元向半球面空间内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元面积 dA 之比,定义为辐出度 M_e ,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

M_e 的计量单位是瓦[特]每平方米 [W/m^2]。

由式(1-5),面光源 A 向半球面空间内发射的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_{(A)} M_e dA \quad (1-6)$$

对于可见光,面光源 A 表面某一点处的面元向半球面空间发射的光通量 $d\Phi_v$ 与面元面积 dA 之比称为光出度 M_v ,即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-7)$$

其计量单位为勒[克斯][lx] 或 [lm/m^2]。

对均匀发射辐射的面光源有

$$M_v = \Phi_v/A \quad (1-8)$$

由式(1-7),面光源向半球面空间发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{(A)} M_v dA \quad (1-9)$$

4. 辐强度和发光强度

对点光源在给定方向的立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐通量 $d\Phi_e$, 与该方向立体角元 $d\Omega$ 之比定义为点光源在该方向的辐强度 I_e , 即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-10)$$

辐强度的计量单位为瓦[特] 每球面度 $[W/sr]$ 。

点光源在有限立体角 Ω 内发射的辐通量为

$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega \quad (1-11)$$

各向同性的点光源向所有方向发射的总辐通量为

$$\Phi_e = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_e \quad (1-12)$$

对可见光, 与式(1-9) 类似, 定义发光强度为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1-13)$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega \quad (1-14)$$

一般点光源是各向异性的, 其发光强度分布随方向而异。

发光强度的单位是坎[德拉][cd]。1979 年第十六届国际计量大会通过决议, 将坎德拉重新定义为: 在给定方向上能发射 540THz 的单色辐射源, 在此方向上的辐强度为 $(1/683) W/sr$, 其发光强度定义为一个坎德拉。

由式(1-13), 对发光强度为 1cd 的点光源, 向给定方向 1 球面度内发射的光通量定义为 1lm。发光强度为 1cd 的点光源在整个球空间所发出的总光通量为

$$\Phi_v = 4\pi I_v = 12.566 \text{ (lm)}$$

5. 辐亮度和亮度

光源表面某一点处的面元在给定方向上的辐强度除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积, 称为辐亮度 L_e , 即

$$L_e = \frac{I_e}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (1-15)$$

式中, θ 为所给方向与面元法线之间的夹角。辐亮度 L_e 的计量单位为瓦[特] 每球面度每平方米 $[W/(sr \cdot m^2)]$ 。

对可见光, 亮度 L_v 定义为光源表面某一点处的面元在给定方向上的发光强度除以该面元在垂直给定方向平面上的正投影面积, 即

$$L_v = \frac{I_v}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (1-16)$$

L_v 的计量单位是坎德拉每平方米 $[cd/m^2]$ 。

若 L_e, L_v 与光源发射辐射的方向无关, 且由式(1-15) 及式(1-16) 表示, 这样的光源称为余弦辐射体或朗伯辐射体。黑体是一个理想的余弦辐射体, 而一般光源的亮度多少与方向有关。粗糙表面的辐射体或反射体及太阳等是一个近似的余弦辐射体。

余弦辐射体表面某一点处面元在 dA 向半球面空间发射的通量为

$$d\Phi = \iint L \cos\theta dA d\Omega$$

式中, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ 。

对上式在半球面空间内积分的结果为

$$d\Phi = L dA \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\theta = \pi L dA$$

由上式得到余弦辐射体的 M_e 与 L_e 、 M_v 与 L_v 的关系为

$$L_e = M_e / \pi \quad (1-17)$$

$$L_v = M_v / \pi \quad (1-18)$$

6. 辐效率与发光效率

光源所发射的总辐通量 Φ_e 与外界提供给光源的功率 P 之比称为光源的辐效率 η_e ; 光源发射的总光通量 Φ_v 与提供的功率 P 之比称为发光效率 η_v 。它们分别为

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} \times 100\% \quad (1-19)$$

$$\eta_v = \Phi_v / P \quad (1-20)$$

辐效率 η_e 无量纲, 发光效率 η_v 的计量单位是流明每瓦 $[\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}]$ 。

对限定在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐效率

$$\eta_{e,\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{P} \times 100\% \quad (1-21)$$

式中, $\Phi_{e,\lambda}$ 称为光源辐通量的光谱密集度, 简称为光谱辐通量。

1.1.2 与接收器有关的参数

接收光源发射辐射的接收器可以是探测器, 也可以是反射辐射的反射器, 或两者兼有的器件。对接收器的有关参数定义如下。

1. 辐射照度与照度

辐射照度 E_e 是照射到物体表面某一点处面元的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该面元的面积 dA 的商, 即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-22)$$

E_e 的计量单位是瓦[特]每平方米 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 。

若辐射通量是均匀地照射在物体表面上的, 则式(1-22) 简化为

$$E_e = \Phi_e / A \quad (1-23)$$

注意, 不要把辐射照度 E_e 与辐射出射度 M_e 混淆起来。虽然两者单位相同, 但定义不一样。辐射照度是从物体表面接收辐通量的角度来定义的, 辐射出射度是从面光源表面发射辐射的角度来定义的。

本身不辐射的反射体接收辐射后, 吸收一部分, 反射一部分。若把反射体当做辐射体, 则光谱辐射出射度 $M_{er}(\lambda)$ (r 代表反射) 与辐射体接收的光谱辐射照度 $E_e(\lambda)$ 的关系为

$$M_{er} = \rho_e(\lambda) E_e(\lambda) \quad (1-24)$$

式中, $\rho_e(\lambda)$ 为辐射度光谱反射比, 是波长的函数。

式(1-24) 对波长积分, 得到反射体的辐射出射度

$$M_e = \int \rho_e(\lambda) E_e d\lambda \quad (1-25)$$

对可见光,照射到物体表面某一面元的光通量 $d\Phi_v$ 除以该面元面积 dA 称为照度 E_v ,即

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

$$E_v = \Phi_v/A \quad (1-26)$$

E_v 的计量单位是勒[克斯][lx]。

对接收光的反射体,同样有

$$M_v(\lambda) = \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) \quad (1-27)$$

$$M_v = \int \rho_v(\lambda) E_v d\lambda \quad (1-28)$$

式中, $\rho_v(\lambda)$ 为光度光谱反射比,是波长的函数。

2. 辐照量和曝光量

辐照量与曝光量是光电接收器接收辐能量的重要度量参数,对于图像传感器来讲更为重要,图像传感器的光敏单元的输出信号常与所接收的入射辐能量成线性关系。

照射到物体表面某一面元的辐照度 E_e 在时间 t 内的积分称为辐照量 H_e ,即

$$H_e = \int_0^t E_e dt \quad (1-29)$$

辐照量 H_e 的计量单位是焦耳每平方米 [J/m^2]。

如果面元上的辐照度 E_e 与时间无关,式(1-29) 可简化为

$$H_e = E_e t \quad (1-30)$$

与辐照量 H_e 对应的光度量是曝光量 H_v ,它定义为物体表面某一面元接收的光照度 E_v 在时间 t 内的积分,即

$$H_v = \int_0^t E_v dt \quad (1-31)$$

H_v 的计量单位是勒[克斯] 秒 [$lx \cdot s$]。

如果面元上的光照度 E_v 与时间无关,式(1-31) 可简化为

$$H_v = E_v t$$

上面讨论的辐射量度参数和光度参数的基本定义与基本计量公式,都是对辐射源发出的辐射能量的度量,是从不同角度来定义的。为了便于学习掌握这些参数,将其汇总成如表 1-1 所示的辐射量度参数与光度参数的定义及计量单位。

表 1-1 辐射量度参数与光度参数的定义及计量单位

辐 射 量 度 参 量				光 度 参 量			
名 称	符号	定 义	单 位	名 称	符号	定 义	单 位
辐能	Q_e		J[焦(耳)]	光量	Q_v		$lm \cdot s$ [流(明)秒]
辐通量 辐功率	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W[瓦(特)]	光通量 光功率	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm [流(明)]
辐出射度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦(特) 每平方米]	光出射度	M_v	$M_v = \frac{\Phi_v}{A}$	lm/m^2 [流(明) 每平方米]
辐强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr [瓦(特) 每球面度]	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd[坎德拉]

辐 射 量 度 参 量				光 度 参 量			
名 称	符 号	定 义	单 位	名 称	符 号	定 义	单 位
辐亮度	L_e	$L_e = \frac{I_e}{dA \cos \theta}$ $= \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \theta}$	$W/(sr \cdot m^2)$ [瓦(特) 每球面度平方米]	光亮度	L_v	$L_v = \frac{I_v}{dA \cos \theta}$ $= \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta}$	cd/m^2 [坎德拉 每平方米]
辐照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦(特) 每平方米]	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx [勒(克斯)]
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m^2 [焦(耳) 每平方米]	曝光量	H_v	$H_v = \int_0^t E_v dt$	$lx \cdot s$ [勒(克斯) 秒]

1.1.3 光源的辐射光谱分布参量

光源发射的辐射能是按波长分布在辐射光谱范围内的。光源在单位波长范围内发射的辐射量(包含上节介绍的所有辐射量)称为辐射量的光谱密度 $X_{e,\lambda}$, 简称为光谱辐射量, 即

$$X_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1-32)$$

式中, 通用符号 $X_{e,\lambda}$ 是波长的函数, 代表所有光谱辐射量, 如光谱辐通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 、光谱辐出度 $M_{e,\lambda}$ 、光谱辐强度 $I_{e,\lambda}$ 、光谱辐亮度 $L_{e,\lambda}$ 、光谱辐照度 $E_{e,\lambda}$ 。

同样, 以符号 $X_{v,\lambda}$ 表示光源在可见光区单位波长范围内发射的光度量称为光度量的光谱密度, 简称为光谱光度量, 即

$$X_{v,\lambda} = \frac{d\Phi_v}{d\lambda} \quad (1-33)$$

式中, $X_{v,\lambda}$ 代表光谱光通量 $\Phi_{v,\lambda}$ 、光谱光出射度 $M_{v,\lambda}$ 、光谱发光强度 $I_{v,\lambda}$ 和光谱光照度 $E_{v,\lambda}$ 。

光源的辐射度参量 $X_{e,\lambda}$ 随波长 λ 的分布曲线称为该光源的绝对光谱辐射分布曲线。该曲线任一波长 λ 处的 $X_{e,\lambda}$ 除以峰值波长 $\lambda_{\max}$ 处的光谱辐射量最大值 $X_{e,\lambda_{\max}}$ 的商 X_{e,λ_r} , 称为光源的相对光谱辐射量, 即

$$X_{e,\lambda_r} = X_{e,\lambda} / X_{e,\lambda_{\max}} \quad (1-34)$$

相对光谱辐射量 X_{e,λ_r} 与波长 λ 的关系称为光源相对光谱辐射分布。

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内发射的辐射通量

$$\Delta\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda$$

若积分区间从 $\lambda_1 = 0$ 或 $\lambda_2 \rightarrow \infty$, 则得到光源发出的所有波长的总辐通量

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda} d\lambda = \Phi_{e,\lambda_{\max}} \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda_r} d\lambda \quad (1-35)$$

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐通量 $\Delta\Phi_e$ 与总辐通量 Φ_e 之比称为该光源的比辐射 q_e , 即

$$q_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda / \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (1-36)$$

式中, q_e 没有量纲。

1.1.4 量子流速率

光源发射的辐射功率是每秒发射光子能量的总和。光源在给定波长 λ 处很小邻域($\lambda \sim \lambda + d\lambda$)

范围内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该波长 λ 的光子能量 $h\nu$, 得到光源在该波长 λ 处每秒发射的光子数, 称为光谱量子流速率 $dN_{e,\lambda}$, 即

$$dN_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{h\nu} = \frac{\Phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} \quad (1-37)$$

光源在波长 λ 为 $0 \rightarrow \infty$ 内发射的总量子流速率为

$$N_e = \int_0^\infty \frac{\Phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} = \frac{\Phi_{e,\lambda_{\max}}}{hc} \int_0^\infty \Phi_{e,\lambda} \lambda d\lambda \quad (1-38)$$

对可见光区域, 光源每秒发射的总光子数

$$N_v = \int_{0.38}^{0.78} \frac{\Phi_{e,\lambda}}{hc} \lambda d\lambda \quad (1-39)$$

量子流速率 N_e 或 N_v 的计量单位为光子数每秒 $[1/s]$ 。

1.2 物体热辐射

物体常以两种不同形式辐射能量。

第一种是热辐射。高于绝对零度的物体都具有发出辐射的能力, 其光谱辐射量 $X_{e,\lambda}$ 是波长 λ 和温度 T 的函数。温度低的物体发射红外光, 温度升高到 500°C 时开始发射一部分暗红色的光, 再升高到 1500°C 时开始发白光。物体靠加热保持一定温度使内能不变而持续辐射的辐射形式称为物体热辐射或温度辐射。凡能发射连续光谱, 且辐射是温度函数的物体叫热辐射体, 如一切动、植物体, 以及太阳和钨丝白炽灯等均为热辐射体。

第二种是发光。物体不是靠加热来保持温度, 使辐射维持下去, 而是靠外部能量的激发而产生辐射, 这种辐射称为发光。发光光谱是非连续光谱, 且不是温度的函数。靠外能激发发光的方式有电致发光(气体放电产生的辉光)、光致发光(日光灯发射的荧光)、化学发光(磷在空气中缓慢氧化发光)、热发光(火焰中的钠或钠盐发射的黄光)。发光是非平衡辐射过程, 发光光谱主要是线光谱或带光谱。

下面讨论物体热辐射的基本定律, 并计算人眼的光度参量。

1.2.1 黑体辐射定律

1. 黑体

能够完全吸收从任何角度入射来的任何波长的辐射, 并且在每一个方向都能最大可能地发射任意波长的辐射能的物体称为黑体。显然, 黑体的吸收系数为 1, 发射系数也为 1。

黑体只是一个理想的温度辐射体, 常被用做辐射计量的基准。在有限的温度范围内可以制造出黑体模型。例如, 一个开有小孔的密封空腔恒温辐射体, 空腔的内壁涂有黑色物质, 使其反射系数极小, 小孔的孔径远小于腔体的直径, 并将空腔辐射体置于恒温槽内, 使其在工作中保持腔体的温度不变, 该空腔体可近似为黑体。当从任何方向入射的辐射进入小孔时, 在空腔内都要经过多次反射才能从小孔射出。然而, 空腔内的黑色物质反射系数极低, 经过多次反射后, 反射出去的辐射能已经极小, 绝大部分入射进来的辐射能都被空腔体吸收, 因而空腔体的吸收系数很高, 接近于 1。被空腔体吸收的能量都转变为热能, 应引起腔体的温升。腔体处于恒温槽内, 所吸收的辐射能只能以温度辐射的方式通过小孔向外发出任何波长的辐射。

2. 普朗克辐射定律

黑体是余弦辐射体, 其光谱辐射出射度 $M_{e,s,\lambda}$ (角标“s”表示黑体) 由普朗克公式表示为

$$M_{e,s,\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-40)$$

式中, k 是玻尔兹曼常数; h 是普朗克常数; T 是绝对温度; c 是真空中光速。

式(1-40)表明, 黑体表面 A 向半球面空间发射波长为 λ 的光谱, 辐射出射度 $M_{e,s,\lambda}$ 是黑体温度 T 和波长 λ 的函数, 这就是普朗克辐射定律。

黑体光谱辐亮度 $L_{e,s,\lambda}$ 和光谱辐强度 $I_{e,s,\lambda}$ 分别为

$$L_{e,s,\lambda} = \frac{2c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}, \quad I_{e,s,\lambda} = \frac{2c^2 h A \cos\theta}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-41)$$

图 1-2 所示为黑体辐射的相对光谱辐射亮度 L_{e,s,λ_r} 与波长的等温度关系曲线。图中每一条曲线都有一个最大值, 最大值的位置随温度升高向短波方向移动。

3. 斯忒藩-玻尔兹曼定律

将式(1-39)对波长 λ 求积分, 得到黑体向外发出的总辐出度

$$M_{e,s} = \int_0^\infty M_{e,s,\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-42)$$

式中, σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数, 它由下式决定

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

由式(1-42), $M_{e,s}$ 与 T 的四次方成正比, 这就是黑体辐射的斯忒藩-玻尔兹曼定律。

利用这个定律很容易计算出一定温度黑体的辐出度。例如, 人体温度 310K、纯铂的凝固点温度 2045K、色温 2856K 的钨丝白炽灯等的总辐射出射度 $M_{e,s}$ 和辐射亮度 $L_{e,s}$ (设它们是黑体) 分别为

$$\begin{aligned} M_{e,s,310K} &= \sigma \times 310^4 = 523.6 (\text{W/m}^2) \\ L_{e,s,310K} &= M_{e,s,310K} / \pi = 1.667 (\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)) \\ M_{e,s,2045K} &= \sigma \times 2045^4 = 9.92 \times 10^5 (\text{W/m}^2) \\ L_{e,s,2045K} &= M_{e,s,2045K} / \pi = 3.16 \times 10^5 (\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)) \\ M_{e,s,2856K} &= \sigma \times 2856^4 = 3.77 \times 10^6 (\text{W/m}^2) \\ L_{e,s,2856K} &= M_{e,s,2856K} / \pi = 1.2 \times 10^6 (\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)) \end{aligned}$$

4. 维恩位移定律

将普朗克公式(1-39)对波长 λ 求微分后令其等于 0, 则可以得到峰值光谱辐出度 $M_{e,s,\lambda_{\max}}$ 所对应的波长 $\lambda_{\max}$ 与绝对温度 T 的关系为

$$\lambda_{\max} = 2898/T (\mu\text{m}) \quad (1-43)$$

可见, 峰值光谱辐出度对应的波长与绝对温度的乘积是常数。当温度升高时, 峰值光谱辐出度对应的波长向短波方向位移, 这就是维恩位移定律。

将式(1-43)代入式(1-39), 得到黑体的峰值光谱辐出射度

$$M_{e,s,\lambda_{\max}} = 1.309 T^5 \times 10^{-15} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5}$$

例如, 人体正常体温的峰值光谱辐出射度 $M_{e,s,\lambda_{\max}} = 31.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 对应 $T = 310 \text{ K}$ 的波长 $\lambda_{\max} = 9.65 \mu\text{m}$ 。

以上三个定律统称为黑体辐射定律。

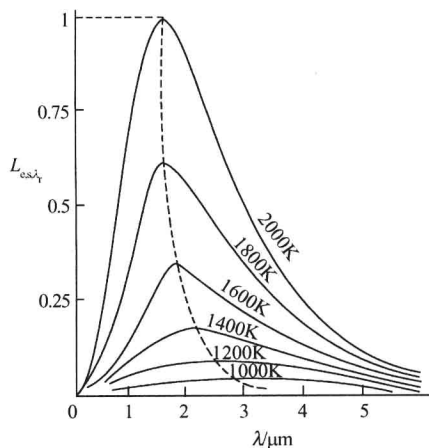


图 1-2 L_{e,s,λ_r} 与 λ, T 的关系