



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光电传感器 应用技术

王庆有 主编

免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光电传感器应用技术

主 编 王庆有

副主编 陈晓冬

参 编 王晋疆 冯立春 张存林

主 审 刘缠牢 龚正烈



机械工业出版社

本书系统地介绍了各种光电传感器的基本原理、特性、发展趋势与应用等。内容以单元光电器件与集成光电器件为主线展开,突出外特性与应用问题,特别注重光电成像,图像、图形检测与分析等技术的讲授。光电信息变换、光电信号的数据采集与计算机接口技术是本书的核心,光电技术的新发展和新应用实例是本书的创新之处。

本书可作为光电信息工程、测控技术与仪器、测绘工程、公安图像技术、生物医学工程、电子信息工程、环境工程和机械电子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参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电传感器应用技术/王庆有主编. —北京:机械工业出版社, 2007.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 22038 - 1

I. 光… II. 王… III. 光电传感器—高等学校—教材 IV. TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 116460 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:韩雪清 刘丽敏

责任编辑:刘丽敏 版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

封面设计:张 静 责任印制:洪汉军

北京双青印刷厂印刷

2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·23.25 印张·576 千字

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 22038 - 1

定价:33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面防伪标均为盗版



王庆有

黑龙江省牡丹江市人,天津大学精密仪器与光电子工程学院教授,中国光学学会光电技术专业委员会委员,长期从事光电传感器技术的教学与科研工作,先后编写《CCD应用技术》、《图像传感器应用技术》、《光电技术》和《光电传感器应用技术》等教材,发表学术论文几十篇,持有发明专利和省部级科技进步奖励,创建了天津市耀辉光电技术有限公司,该公司成为光电传感器教学仪器设备研发的高新技术企业。在全国范围内连续举办20届CCD应用技术讲习班,使几百名科技人员受益。

前 言

光电传感器应用技术为信息科学的一个分支,是将传统光学技术与现代微电子技术以及计算机技术紧密结合的纽带,是获取光信息或借助光提取其他信息的重要手段。

光电传感器俗称“电眼”,是比人眼响应波长更为宽广,灵敏度更高,响应速度更快,性能更优越,抗恶劣环境能力更强的“眼睛”。尤其是它容易与各种微型计算机结合完成人脑的功能,它与电脑的结合容易构成“智慧的眼睛”。因此,它是实现“为机器安装眼睛与大脑工程”的重要环节。

光电传感器使人类有效地扩展了自身的视觉能力,使视觉的长波限延伸到亚毫米波(THz波),短波限延伸至紫外线、X射线、 γ 射线,乃至高能粒子,响应速度达到纳秒级,能检测飞秒量级的暂短光脉冲图像和其他超快速现象(如核反应、航空器发射)的变化过程。能够到人们目前无法到达的场所,将那里发生的瞬间变化过程与长时间历史经历过程记录下来,供人类研究之用。

目前,光电传感器已经深入到国民经济各个部门,成为跨行业应用的器件,它被广泛应用于工业生产的许多方面,凡是需要观察与检测的场所都有应用的可能。它的非接触、无损害、不受电磁干扰、能够远距离传送信息与远距离操纵控制等优点是得到广泛应用的保障。它在航天、航空、石油、化工、国防、安全、旅游、交通、城市建设和农业生产等领域都得到广泛的应用。

随着信息技术的迅猛发展,光电传感器应用技术也在飞速发展,新器件不断涌现,新的应用技术呈现出爆炸式的发展。昨日,百万像元的CCD固体摄像器为先进水平;今日,千万像元的传感器已在工业和民用领域得到推广应用。为适应飞速发展的时代,掌握发展规律,跟上世界技术进步的步伐,编者总结多年的教学与科研经验并跟踪现代科学技术的发展编写了本教材,使它能为培养更多从事“为机器安装眼睛与大脑工程”的本科生和研究生服务。

本书综合了不同院校的教学特点,充分反映当前光电传感器应用技术的发展。在理论方面力求清晰易懂,选材方面力求紧跟技术发展动向。为帮助学生及教师深入掌握教材内容,各章都配备了思考题与习题。

本书共13章。第1章介绍光电传感器技术基础理论。第2章介绍光电传感器应用技术中所用的光源,第3~6章分别介绍光敏电阻、光生伏特器件、光电发射器件和热电器件等单元光电传感器的基本工作原理、特性、变换电路和应用。第7~10章介绍集成光电传感器和图像传感器。第11章介绍光电传感器输出信号的数据采集与计算机接口技术。第12章介绍特种图像传感器。第13章介绍光电传感器的典型应用。

本书由天津大学王庆有教授任主编。天津大学陈晓冬副教授编写第7、9、10章和第11、13章部分内容;天津大学王晋疆副教授编写第3~5章和第13章第12节部分内容;首都师范大学冯立春副教授编写第2章;首都师范大学张存林教授编写第6章;王庆有教授编写第1、8、12章与第11、13章部分内容,并对全书进行统稿。

西安工业学院副院长刘缠牢博士、天津理工大学龚正烈教授任主审，对本书进行了深入细致的审校，对他们认真细致的审校工作在此表示衷心的感谢！

编写过程中天津市耀辉光电技术有限公司的全体同仁给予很大的支持和帮助，特别是他们提供了许多宝贵的技术资料与信息，在此特向他们表示诚挚的谢意！同时向北京嘉恒中自图像技术有限公司、北京凌云光视数字图像技术公司等单位提供技术资料表示感谢！

本书编写过程中得到天津大学、天津大学精密仪器与光电子工程学院等校、院领导与同事们的帮助，得到首都师范大学有关朋友的帮助，在此表示感谢！

本书在编写过程中参考了大量的国内外资料，特对这些文献的作者表示衷心感谢！

此外，特别感谢我的家人在著书期间对我的精心照顾！

虽然我们竭力认真编写，但由于水平有限，书中难免出现缺点与错误，诚望读者批评指正。

王庆有
于天津大学

目 录

前言

第 1 章 光电传感器技术基础..... 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 5
 - 1.1.3 辐射源的光谱辐射分布 6
 - 1.1.4 量子流速率 7
 - 1.2 物体热辐射 8
 - 1.2.1 黑体辐射定律 8
 - 1.2.2 辐射体的分类 10
 - 1.3 辐射度量参数与光度量参数的关系 11
 - 1.3.1 人眼的光视效率 11
 - 1.3.2 人眼的光谱光视效能 12
 - 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 光吸收的一般规律 15
 - 1.4.2 半导体对光的吸收 16
 - 1.5 光电效应 17
 - 1.5.1 内光电效应 17
 - 1.5.2 光电发射效应 21
- 思考题与习题 1 23

第 2 章 光源 24

- 2.1 光源的分类 24
- 2.2 钨丝灯 26
 - 2.2.1 钨丝白炽灯 26
 - 2.2.2 卤钨灯 30
- 2.3 气体放电灯 31
 - 2.3.1 气体放电 31
 - 2.3.2 氙灯 33
- 2.4 金属蒸气灯 34
 - 2.4.1 水银蒸气灯 34
 - 2.4.2 钠灯 36
- 2.5 半导体发光二极管光源 36
 - 2.5.1 发光二极管的发光机理 36
 - 2.5.2 发光强度 - 电流特性 37
 - 2.5.3 发光光谱和发光效率 38
- 2.6 激光光源 40

2.6.1 激光的产生机理 40

2.6.2 氮 - 氛激光器 42

2.6.3 半导体激光器 44

2.7 光电传感器应用系统中光源与

照度的匹配 46

2.7.1 光源的选择 46

2.7.2 照度匹配 46

思考题与习题 2 48

第 3 章 光电导器件 49

3.1 光敏电阻的原理与结构 49

3.1.1 光敏电阻的基本原理 49

3.1.2 光敏电阻的基本结构 49

3.1.3 典型光敏电阻 50

3.2 光敏电阻的基本特性 52

3.2.1 光电特性 52

3.2.2 伏安特性 53

3.2.3 温度特性 54

3.2.4 时间响应 54

3.2.5 噪声特性 56

3.2.6 光谱响应 57

3.3 光敏电阻的偏置电路 58

3.3.1 基本偏置电路 58

3.3.2 恒流电路 59

3.3.3 恒压电路 60

3.3.4 举例 61

3.4 光敏电阻的应用实例 62

3.4.1 照明灯的光电控制电路 63

3.4.2 火焰探测报警器 63

3.4.3 照相机电子快门 64

思考题与习题 3 65

第 4 章 光生伏特器件 67

4.1 硅光敏二极管 67

4.1.1 硅光敏二极管的工作原理 67

4.1.2 光敏二极管的基本特性 68

4.2 其他类型的光生伏特器件 71

4.2.1 PIN 型光敏二极管 71

4.2.2 雪崩光敏二极管 72

4.2.3 硅光电池	74	6.2.5 典型热敏电阻简介	126
4.2.4 光敏晶体管	77	6.3 热释电器件	127
4.2.5 色敏光生伏特器件	81	6.3.1 热释电器件的基本工作原理	127
4.2.6 光伏器件组合器件	83	6.3.2 热释电器件的电压灵敏度	131
4.2.7 光电位置敏感器件	88	6.3.3 热释电器件的噪声	132
4.3 光生伏特器件的偏置电路	92	6.3.4 响应时间	133
4.3.1 反向偏置电路	93	6.3.5 热释电探测器的阻抗特性	133
4.3.2 零伏偏置电路	95	6.3.6 热释电器件的类型	134
思考题与习题 4	96	6.3.7 典型热释电器件	136
第 5 章 光电发射器件	98	6.4 红外与热辐射的探测技术	137
5.1 光电发射阴极	98	6.5 THz 的探测技术	138
5.1.1 光电发射阴极的主要参数	98	6.5.1 THz 脉冲探测	139
5.1.2 光电阴极材料	99	6.5.2 THz 连续波探测	140
5.2 真空光电管与光电倍增管的 工作原理	101	6.5.3 THz 单光子探测	142
5.2.1 真空光电管的原理	101	思考题与习题 6	143
5.2.2 光电倍增管的原理	101	第 7 章 图像扫描与图像传感器	145
5.3 光电倍增管的基本特性	103	7.1 图像传感器基本原理	145
5.3.1 灵敏度	103	7.1.1 图像传感器的基本结构	145
5.3.2 电流放大倍数	104	7.1.2 单元光电器件扫描成像实例	147
5.3.3 暗电流	105	7.1.3 图像传感器基本技术参数	148
5.3.4 噪声	106	7.2 图像的显示与电视制式	150
5.3.5 伏安特性	107	7.2.1 电视监视器的扫描	150
5.3.6 线性	108	7.2.2 电视制式	152
5.3.7 疲劳与衰老	109	思考题与习题 7	153
5.4 光电倍增管的供电电路	110	第 8 章 CCD 光电图像传感器	154
5.4.1 电阻链分压型供电电路	110	8.1 电荷存储	154
5.4.2 末极的并联电容	111	8.2 电荷耦合	156
5.4.3 电源电压的稳定度	111	8.3 CCD 电极结构	157
5.5 光电倍增管的典型应用	112	8.3.1 三相 CCD 的电极结构	157
5.5.1 光谱探测领域的应用	113	8.3.2 二相 CCD	158
5.5.2 时间分辨荧光免疫分析 中的应用	114	8.3.3 四相 CCD	159
思考题与习题 5	116	8.3.4 体沟道 CCD	160
第 6 章 红外与 THz 的探测	117	8.4 电荷的注入和检测	161
6.1 热辐射的一般规律	117	8.4.1 光注入	161
6.1.1 温度变化方程	117	8.4.2 电注入	162
6.1.2 热电器件的最小可探测功率	118	8.4.3 电荷的检测	163
6.2 热敏电阻与热电堆	119	8.5 典型线阵 CCD 图像传感器	164
6.2.1 热敏电阻	119	8.5.1 单沟道线阵 CCD 图像传感器	164
6.2.2 热电偶探测器	123	8.5.2 双沟道线阵 CCD 图像传感器	170
6.2.3 热电堆探测器	125	8.5.3 线阵 CCD 类型与发展	174
6.2.4 热敏电阻的用途	125	8.6 典型面阵 CCD 图像传感器	175
		8.6.1 概述	175
		8.6.2 典型帧转移型面阵 CCD 器件	177

思考题与习题 8	186	11.3.1 单元光电信号的量化处理	250
第 9 章 CMOS 光电图像传感器	187	11.3.2 单元光电信号 A/D 数据采集	255
9.1 MOS 与 CMOS 场效应晶体管	187	11.3.3 序列光电信号的量化处理	257
9.1.1 MOS 场效应晶体管的基本结构	187	11.3.4 序列光电信号的 A/D 数据采集与 计算机接口	260
9.1.2 场效应晶体管的主要性能参数	188	11.4 面阵 CCD 的数据采集与计算机 接口	263
9.2 CMOS 图像传感器的原理与结构	192	11.4.1 基于 PC 总线的图像采集卡	264
9.2.1 CMOS 图像传感器的组成	192	11.4.2 典型图像数据采集卡	267
9.2.2 CMOS 图像传感器的像敏单元 结构	193	11.4.3 基于 USB2.0 的计算机接口	275
9.2.3 CMOS 图像传感器的工作流程	196	11.4.4 基于嵌入式系统的 CCD 图像 数据采集	277
9.2.4 CMOS 图像传感器的辅助电路	197	思考题与习题 11	278
9.3 CMOS 图像传感器的特性参数	202	第 12 章 特种图像传感器	280
9.4 典型 CMOS 图像传感器	207	12.1 微光图像传感器	280
9.4.1 IBIS4 6600 型 CMOS 图像传感器	207	12.1.1 微光图像传感器的发展概况	280
9.4.2 IBIS5—B—1300 型 CMOS 图像 传感器	209	12.1.2 微光电视摄像系统	282
9.4.3 高速 CMOS 图像传感器	212	12.1.3 微光电视摄像系统观察距离 的估算	284
9.5 CMOS 图像传感器的应用实例	214	12.1.4 微光 CCD 摄像器件	286
9.5.1 IM28—SA 型 CMOS 摄像机	215	12.2 红外 CCD 图像传感器	295
9.5.2 MC1300 高速 CMOS 摄像机	217	12.2.1 主动红外电视摄像系统	295
思考题与习题 9	219	12.2.2 被动红外电视摄像系统	297
第 10 章 彩色图像传感器与彩色 数码相机概述	220	12.3 X 射线 CCD 图像传感器	299
10.1 彩色线阵 CCD 图像传感器	220	12.3.1 X 射线像增强器	300
10.1.1 ILX522K 器件	220	12.3.2 医用 X 射线电视 CCD 摄像 系统	302
10.1.2 TCD2252D 器件	222	12.3.3 工业用 X 射线光电检测系统	303
10.2 彩色面阵 CCD 图像传感器	225	思考题与习题 12	304
10.3 彩色面阵 CCD 摄像机概述	229	第 13 章 光电传感器应用实例	305
10.3.1 三管彩色面阵 CCD 摄像机	230	13.1 光电传感器用于一维尺寸的测量	305
10.3.2 两管彩色面阵 CCD 摄像机	233	13.1.1 玻璃管内、外径尺寸测量控制 仪器的技术要求	305
10.3.3 单管 CCD 彩色摄像机	234	13.1.2 仪器的工作原理	305
10.4 彩色面阵 CCD 数码相机概述	238	13.1.3 线阵 CCD 的选择	306
10.5 彩色面阵 CMOS 数码相机概述	241	13.1.4 光学系统设计	307
思考题与习题 10	242	13.1.5 外径、壁厚的检测电路	309
第 11 章 光电传感器输出信号 的数据采集	244	13.1.6 微机数据采集接口	312
11.1 光电传感器信号的二值化处理	244	13.1.7 讨论	312
11.1.1 单元光电信号的二值化处理	244	13.2 CCD 的拼接技术在尺寸测量系统 中的应用	312
11.1.2 序列光电信号二值化处理	246	13.2.1 CCD 的机械拼接技术在尺寸测量 中的应用	312
11.2 光电信号二值化数据采集	248		
11.3 光电信号的量化处理与 A/D 数据采集	250		

13.2.2 线阵 CCD 的光学拼接	314	13.9.3 不同轴度的测量	337
13.3 线阵 CCD 传感器用于二维位 置的测量	316	13.10 光电信息变换技术在搜索、跟踪与 制导中的应用	338
13.3.1 高精度二维位置测量系统	316	13.10.1 搜索仪与跟踪仪	338
13.3.2 光学系统误差分析	318	13.10.2 激光制导	340
13.4 CCD 在 BGA 管脚三维尺寸测量 中的应用	319	13.10.3 红外跟踪制导	341
13.4.1 测量原理	319	13.11 CCD 光电传感器用于 ICP—AES 光谱探测	344
13.4.2 数学模型	320	13.11.1 ICP—AES 探测器的基本原理 ..	344
13.4.3 系统的标定	321	13.11.2 实验结果分析	346
13.4.4 BGA 芯片测量实验	322	13.12 扫描成像技术在表面质量 检测中的应用	348
13.5 CCD 图像传感器用于平板位置 的检测	323	13.12.1 宽幅面物体表面质量的 检测与分析	348
13.5.1 平板位置检测的基本原理	323	13.12.2 汽车制动钳内凹槽表面 质量的检测	351
13.5.2 平板位置检测系统	324	13.13 面阵 CCD 图像传感器用于钢板 长宽尺寸测量系统	352
13.6 利用线阵 CCD 非接触测量材料 变形量的方法	325	13.14 医用电子内窥镜系统	355
13.7 激光光斑的尺寸测量系统	328	13.14.1 工作原理	355
13.7.1 激光光斑的尺寸测量原理	329	13.14.2 系统的设计	356
13.7.2 系统的总体设计	329	13.14.3 CCD 驱动、图像采集、编码 电路	357
13.7.3 系统的基本组成及工作流程	330	13.14.4 内窥镜视频驱动亮度控制系 统的研制	358
13.7.4 系统硬件设计	331	13.14.5 电子内窥镜标准视频图像的 畸变实时校正	359
13.7.5 系统软件设计	331	13.14.6 基于 PCI 总线的内窥镜图像实 时采集系统	359
13.8 CCD 图像传感器用于物体振动 的非接触测量	332	13.14.7 电子内窥镜图像处理软件系统 的设计	360
13.8.1 工作原理	333	思考题与习题 13	360
13.8.2 振动测量的硬件电路	334	参考文献	361
13.8.3 软件设计	334		
13.8.4 振动台测试实验结果	335		
13.9 利用激光准直技术测量物体的直 线度与同轴度	335		
13.9.1 激光准直测量原理	335		
13.9.2 不直度的测量	337		

第 1 章 光电传感器技术基础

光电传感器不仅完成光与电能量间的转换，而且更为重要的是完成光信息与电信息的变换。为此，光电传感器所涉及的基础知识较宽，必须掌握光与电两方面的基本理论与基本参数的知识。关于电的基本理论和基本度量参数在许多课程中都阐述得非常清晰，本书不再讨论，而对光的基本理论和基本度量参数的讲解相比之下显得有些不足，本章进行较为详实的探讨。另外，本章还必须建立起光电转换的基本理论基础，便于读者能够深入掌握光电传感器应用技术。

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，为光电传感器应用技术的学习打下基础。

光电传感器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与反射规律，得到了许多关于光学成像和像差的理论。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。它们从两个方面描述了光的本质，光是以一定频率振动的物质，它既具有波动性又具有物质性，其本质是粒子，称为光子或光子。光子具有动量与能量，并分别表示为

$$p = \frac{h\nu}{c} \text{ 与 } E = h\nu$$

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 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。

光是以电磁波方式传播的物质。电磁波谱的频率范围很宽，涵盖了由宇宙射线到无线电波 ($10^6 \sim 10^{25} \text{ Hz}$) 的宽阔频段。如图 1-1 所示为电磁波谱的分布。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纳米到毫米，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，而人们希望光电传感器所感知的范围要远远大于人眼能见的波长范围，要求从 X 射线到红外、远红外、THz (10^{12} Hz) 波与毫米波的范围，而且要求能够观测到人所无法到达的场所（如特别危险和特别遥远的地方）。

1.1 光辐射的度量

为了定量分析光与物质相互作用所产生的光电效应，分析光电传感器的光电特性，以及用光电传感器进行光谱、光度的定量计量，常需要为辐射量规定出相应的计量参数和量纲。

电磁波名称	波长/m
宇宙射线	10^{-14} 10^{-13}
γ 射线	10^{-12} 10^{-11}
X射线	10^{-10} 10^{-9}
紫外辐射	10^{-8} 10^{-7}
可见光谱	10^{-6}
红外辐射	10^{-5}
THz波 (10^{12}Hz) 毫米波	10^{-4}
厘米波	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

光辐射的度量方法有两种，一种是物理（或客观）的度量方法，与之相应的为辐射度量参数。它适用于整个电磁辐射谱区域，能对辐射量进行物理的计量；另一种是从人眼生理（主观）上对辐射量进行计量的方法，是以人眼所能见到的辐射对大脑的刺激程度进行辐射计量的方法，与之对应的为光度量参数。显然光度量参数只适用于 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 内的可见光谱区，是人眼对辐射强度的主观评价，超过这个谱区，人眼不再有反应，光度量参数也就没有任何意义。

辐射度量参数与光度量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”表示辐射度量参数，标以“v”表示光度量参数。

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. 辐通量和光通量

辐通量或辐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变化，则式(1-1)可简化为

$$\Phi_e = \frac{Q_e}{t} \quad (1-2)$$

对于可见光，光源表面在无穷小时间内发射、传播或接收所有可见光谱光能被无穷短时间段间隔 dt 来除，定义为光通量，计为 Φ_v 。

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

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

$$\Phi_v = \frac{Q_v}{t} \quad (1-4)$$

式中， 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射能，而光通量对时间的积分称为光能。

3. 辐出度和光出度

对于有限大小面积 A 的面辐射源表面某点处的面元 dA 向半球面空间发射的辐通量 $d\Phi_e$ ，则定义该面辐射源表面在面元 dA 处的辐出度为 M_e ，它在数值上等于面元 dA 辐射出的辐通量 $d\Phi_e$ 与元面积 dA 之比，即

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

式中, M_e 的计量单位是瓦 [特] 每平方米 (W/m^2)。

由式 (1-5) 得出面光源 S 向半球面空间发射的总辐通量为

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

对于可见光, 面光源 S 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, 记为 M_v , 显然有

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

其计量单位为勒克斯 (lx) 或 (lm/m^2)。

对于均匀发射辐射的面光源, 则有

$$M_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (1-8)$$

由式 (1-7), 面光源向半球面空间发射出的总光通量为

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

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 内发射的总辐通量为

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

对于各向同性的点光源, 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(1-10)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 (candela), 简称为坎 (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 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色辐射源, 在此方向上的辐强度为 $(1/683) \text{ W}/\text{sr}$, 其发光强度定义为一个坎德拉 (cd)。

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 (流明)。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, 称为光源表面的辐亮度, 计为 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] 每球面度平方米 [$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$]。

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

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

式中, 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, 可以由式 (1-15) 和式 (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, 而一般光源的亮度大小与方向有关。粗糙表面的辐射体或反射体以及太阳等都是近似的余弦辐射体。

余弦辐射体表面某一点处面元在 dA 处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

$$d\Phi = L dA \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi L dA$$

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

$$L_e = \frac{M_e}{\pi} \quad (1-17)$$

$$L_v = \frac{M_v}{\pi} \quad (1-18)$$

6. 辐效率与光效率

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, 计为 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, 计为 η_v 。它们分别为

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

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} \quad (1-20)$$

式中, η_e 为辐效率, 无量纲; η_v 为发光效率, 计量单位是流明每瓦 (lm/W)。

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

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

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全吸收的探测器，也可以是反射辐射的探测器，或两者兼有的探测器。对接收器的有关度量参数定义如下：

1. 辐照度与照度

辐照度 E_e 的定义为入射到物体表面某处点面元 dA 的辐通量 $d\Phi_e$ 值，它在数值上等于该面元接收的辐通量 $d\Phi_e$ 与面积 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 (W/m^2)。

若辐通是均匀地照射在物体表面上，则式(1-22)将简化为

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (1-23)$$

注意，不要把辐照度 E_e 与辐出度 M_e 混淆起来。虽然两者单位相同，但定义不一样。辐照度是从物体表面接收辐通量的角度来定义的，辐出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。若把反射体当作辐射体，则光谱辐出度 $M_{er}(\lambda)$ (r 代表反射) 与辐射体接收的光谱辐照度 $E_e(\lambda)$ 的关系为

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

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，得到反射体的辐出度为

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

对应于可见光，照度 E_v 定义为照射到物体表面某一面元的光通量 $d\Phi_v$ 与该面元面积 dA 之比，即

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

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (1-26)$$

E_v 的计量单位为勒 [克斯] (lx)。

对接收光的反射体，同样有

$$M_{vr}(\lambda) = \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) \quad (1-27)$$

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

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

2. 曝辐量和曝光量

曝辐量与曝光是光电接收器接收辐射能量的重要度量参数，尤其对于光电图像传感器来讲更为重要，光电图像传感器的光敏单元输出的信号常与所接收的入射辐射能量成线性关系。

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

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

曝辐量 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, 则式 (1-29) 可简化为

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

与曝辐量 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 在时间段 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, 则式 (1-31) 可简化为

$$H_v = E_v t$$

上面讨论的辐射度量参数和光度量参数的基本定义与基本计量公式, 都是从辐射源发出辐射能量的角度出发进行度量的, 是从物理与人眼不同的角度定义的, 为了便于学习掌握这些参数, 将其汇总制成如表 1-1 所示的辐射度量参数与光度参数基本计量公式表。

表 1-1 辐射度量参数与光度量参数基本计量公式表

辐射度量参数				光度参数			
名称	符号	定义	单位	名称	符号	定义	单位
辐射能	Q_e		J[焦(耳)]	光量	Q_v		$lm \cdot s$ [流(明)秒]
辐射通量 辐射功率	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)]
辐射出度	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]
辐射强度	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]
辐射亮度	L_e	$L_e = \frac{I_e}{dA \cos\theta}$ $= \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta}$	W/(sr·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]
辐射照度	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)]
曝辐量	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·s[勒(克斯)秒]

1.1.3 辐射源的光谱辐射分布

通常辐射源发射的辐射能是按波长分布在辐射光谱范围内的。在单位波长范围内发射的辐射量称为辐射的光谱密度 $X_{e,\lambda}$, 简称为光谱辐射量, 即

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

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 $E_{e,\lambda}$ 等。

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集度,简称为光谱光度量,即

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

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

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。该曲线对任意波长 λ 的 $X_{e,\lambda}$ 除以峰值波长 λ_{\max} 处的光谱辐射量的最大值 $X_{e,\lambda_{\max}}$ 所得的商 X_{e,λ_r} , 称为光源的相对光谱辐射量,即

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

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

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

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

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

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

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

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

式中, q_e 没有量纲,它反映了光源发出我们关注的波长范围。

1.1.4 量子流速率

光源发射的辐功率是每秒钟发射光子能量的总和。在给定波长 λ 处的很小波长范围 $d\lambda$ 内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该波长 λ 的光子能量 $h\nu$ 的商为光源在该波长 λ 处每秒钟发射的光子数,称其为光谱量子流速率,计为 $dN_{e,\lambda}$,

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

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

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

对可见光区域,光源每秒发射的总光子数

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

量子流速率 N_e 或 N_v 的计量单位为光子数每秒 (1/s)。