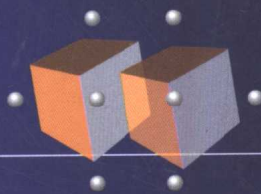


高等学校电子信息科学与工程类专业教材



# 图像传感器应用技术

王庆有 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高等学校电子信息科学与工程类专业教材

# 图像传感器应用技术

王庆有 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从应用的角度讲述 CCD、CMOS 半导体图像传感器和热像图像传感器等的基本工作原理;典型图像传感器的基本特性与特性参数;典型图像传感器的驱动方式及其与计算机的接口方法;典型图像传感器应用中的光源、光学系统的基本概念与计算方法等。最后列举了一些典型的应用实例。

本书可作为光电信息工程、计量测试仪器、测控技术与仪器、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工作参考书。

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/王庆有主编. —北京:电子工业出版社,2003.9

高等学校电子信息科学与工程类专业教材

ISBN 7-5053-9199-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 088154 号

责任编辑:韩同平

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 [www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:27 字数:656.6 千字

版 次:2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:34.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn),盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

## 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。图像传感器可以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发生的事情,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。

图像传感器是在光电技术基础上发展起来的、将光学图像转换成一维时序信号的器件。它包括电子束摄像管、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。

本书共分 12 章,主要内容包括光电技术理论基础,各种图像传感器的工作原理、基本特性、特性参数及其与计算机的接口技术,典型图像传感器在工业非接触尺寸检测、图像传感、图像分析、光谱分析、天文观测和安全监控等方面的典型应用实例。书中收集了许多典型图像传感器的特性参数和特性曲线,典型驱动电路和各种不同类型的应用。这样,它不但是一本讲授图像传感器知识的教科书,更是从事光电工程和现代测试技术工作的科技人员的有益参考书。

本书由王庆有主编。参加编写工作的还有林家明,编写第 6 章的第 6,7,8 节,第 10 章的第 7 节和第 12 章的第 9,14,18 节等;蔡怀宇编写第 10 章;杨艺编写第 8 章;杨森编写第 9 章第 4 节的部分内容;何流编写第 9 章第 3 节的部分内容。最后由王庆有统稿。

本书聘请天津理工学院龚正烈教授进行了深入细致的审校,对龚教授的认真细致的审校工作在此表示衷心的感谢。

另外,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,为本书提供了大量的素材和技术资料。在此衷心感谢清华大学的孙培懋,天津大学的叶声华、孙长库、苗振魁,北京理工大学的张忠廉、周仁忠,长春理工大学的纪明,南京理工大学的李开明,空军第一航空学院的黄宜军,中科院西安光机所的陈良益、孙传东,中科院光电技术研究所的沈忙作、陈旭南,中国计量科学研究院的李长贵,北京凌云光视数字图像技术公司的姚毅博士,北京嘉恒中自图像技术有限公司的吴小宁经理,天津市耀辉光电技术有限公司的吴金章、王雪峰等同志的大力支持。在本书的编写过程中天津大学光电信息

工程教研室的许多同志给予了很大的支持和帮助,特别是蔡锐、马愈昭和朱晓华硕士研究生的大力支持和帮助,在此也表示诚挚的谢意!

作 者  
于天津大学

# 目 录

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 第 1 章 光辐射与光电技术基础 .....    | (1)  |
| 1.1 光辐射的度量 .....          | (2)  |
| 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 光源的辐射光谱分布参量 .....   | (7)  |
| 1.1.4 量子流速率 .....         | (8)  |
| 1.2 物体热辐射 .....           | (9)  |
| 1.2.1 黑体辐射定律 .....        | (9)  |
| 1.2.2 辐射体的分类及其温度表示 .....  | (11) |
| 1.3 辐射度参数与光度参数的关系 .....   | (15) |
| 1.3.1 人眼的视觉灵敏度 .....      | (15) |
| 1.3.2 人眼的光谱光视效能 .....     | (15) |
| 1.3.3 两种辐射体光视效能的计算 .....  | (18) |
| 1.4 半导体对光的吸收 .....        | (19) |
| 1.4.1 物质对光吸收的一般规律 .....   | (19) |
| 1.4.2 半导体对光的吸收 .....      | (20) |
| 1.5 光电效应 .....            | (22) |
| 1.5.1 内光电效应 .....         | (22) |
| 1.5.2 光电发射效应 .....        | (27) |
| 思考题与习题 1 .....            | (28) |
| 第 2 章 光源 .....            | (30) |
| 2.1 自然光源 .....            | (30) |
| 2.2 钨丝灯光源 .....           | (32) |
| 2.2.1 钨丝白炽灯 .....         | (32) |
| 2.2.2 卤钨灯 .....           | (35) |
| 2.3 气体放电灯 .....           | (36) |
| 2.4 半导体发光二极管(LED)光源 ..... | (40) |
| 2.4.1 发光二极管的发光机理 .....    | (41) |
| 2.4.2 发光强度-电流特性 .....     | (42) |
| 2.4.3 发光光谱和发光效率 .....     | (42) |
| 2.5 激光光源 .....            | (45) |
| 2.5.1 激光的产生机理 .....       | (45) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 2.5.2 氦氖激光器 .....                  | (47)  |
| 2.5.3 半导体激光器(LD) .....             | (50)  |
| 2.6 图像传感器应用系统中光源和照度的匹配 .....       | (51)  |
| 思考题与习题 2 .....                     | (54)  |
| <b>第 3 章 热成像技术</b> .....           | (55)  |
| 3.1 热辐射的一般规律 .....                 | (55)  |
| 3.1.1 温度变化方程 .....                 | (55)  |
| 3.1.2 热电器件的最小可探测功率 .....           | (57)  |
| 3.2 热探测器件 .....                    | (57)  |
| 3.2.1 热释电器件的基本工作原理 .....           | (58)  |
| 3.2.2 热释电探测器的灵敏度 .....             | (59)  |
| 3.2.3 热释电器件的噪声 .....               | (62)  |
| 3.2.4 热释电探测器的类型 .....              | (63)  |
| 3.3 图像传感器基本原理 .....                | (66)  |
| 3.3.1 图像传感器的基本结构 .....             | (67)  |
| 3.3.2 图像传感器的基本技术参数 .....           | (69)  |
| 3.4 图像的显示与电视制式 .....               | (70)  |
| 3.4.1 电视监视器的扫描 .....               | (70)  |
| 3.4.2 电视制式 .....                   | (72)  |
| 3.5 典型热成像仪 .....                   | (73)  |
| 思考题与习题 3 .....                     | (76)  |
| <b>第 4 章 电荷耦合摄像器件的基本工作原理</b> ..... | (78)  |
| 4.1 电荷存储 .....                     | (78)  |
| 4.2 电荷耦合 .....                     | (80)  |
| 4.3 CCD 的电极结构 .....                | (81)  |
| 4.4 电荷的注入和检测 .....                 | (85)  |
| 4.5 CCD 的特性参数 .....                | (88)  |
| 4.6 电荷耦合摄像器件 .....                 | (90)  |
| 4.6.1 工作原理 .....                   | (90)  |
| 4.6.2 CCD 的基本特性参数 .....            | (95)  |
| 4.6.3 动态范围 .....                   | (95)  |
| 4.6.4 暗电流 .....                    | (97)  |
| 4.6.5 分辨率 .....                    | (98)  |
| 思考题与习题 4 .....                     | (99)  |
| <b>第 5 章 典型线阵 CCD 图像传感器</b> .....  | (100) |
| 5.1 典型单沟道线阵 CCD .....              | (100) |
| 5.1.1 TCD1209D 的基本结构 .....         | (100) |
| 5.1.2 TCD1209D 的基本工作原理 .....       | (101) |

|              |                           |              |
|--------------|---------------------------|--------------|
| 5.1.3        | TCD1209D 的特性参数 .....      | (102)        |
| 5.1.4        | TCD1209D 的驱动电路 .....      | (104)        |
| 5.1.5        | TCD1209D 的外形尺寸 .....      | (105)        |
| 5.2          | 典型双沟道线阵 CCD 器件 .....      | (106)        |
| 5.3          | 具有积分时间调整功能的线阵 CCD .....   | (111)        |
| 5.3.1        | TCD1205D .....            | (111)        |
| 5.3.2        | IL-PI 型线阵 CCD .....       | (115)        |
| 5.4          | 具有采样保持输出电路的线阵 CCD .....   | (118)        |
| 5.5          | 并行输出的线阵 CCD .....         | (122)        |
| 5.5.1        | 并行输出的 TCD1703C .....      | (122)        |
| 5.5.2        | 分段式并行输出的线阵 CCD .....      | (123)        |
| 5.6          | 用于光谱探测的高性能线阵 CCD .....    | (128)        |
| 5.6.1        | RL1024SB .....            | (128)        |
| 5.6.2        | RL2048DKQ .....           | (132)        |
| 5.6.3        | TCD1208AP .....           | (135)        |
| 5.7          | 彩色线阵 CCD .....            | (135)        |
| 5.7.1        | TCD2000P .....            | (136)        |
| 5.7.2        | TCD2258D .....            | (137)        |
| 5.7.3        | TCD2901D .....            | (140)        |
| 5.8          | 环形线阵 CCD .....            | (142)        |
|              | 思考题与习题 5 .....            | (146)        |
| <b>第 6 章</b> | <b>典型面阵 CCD .....</b>     | <b>(148)</b> |
| 6.1          | DL32 型面阵 CCD .....        | (148)        |
| 6.1.1        | 结构 .....                  | (148)        |
| 6.1.2        | 工作原理 .....                | (149)        |
| 6.1.3        | DL32 型 CCD 的光电特性 .....    | (150)        |
| 6.2          | TCD5130AC 面阵 CCD .....    | (151)        |
| 6.3          | TCD5390AD 面阵 CCD .....    | (157)        |
| 6.4          | IA-D4 型面阵 CCD .....       | (161)        |
| 6.4.1        | IA-D4 的结构 .....           | (161)        |
| 6.4.2        | 工作原理 .....                | (162)        |
| 6.4.3        | IA-D4 的基本特性 .....         | (163)        |
| 6.5          | 特种面阵 CCD .....            | (165)        |
| 6.5.1        | IA-D9-2048 型面阵 CCD .....  | (165)        |
| 6.5.2        | IA-D9-5000 型面阵 CCD .....  | (169)        |
| 6.5.3        | 2620 万像素面阵 CCD .....      | (170)        |
| 6.6          | 面阵 CCD 摄像器件的特性 .....      | (171)        |
| 6.7          | 面阵 CCD 的电荷累积时间与电子快门 ..... | (176)        |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 6.8 MTV-2821 摄像机                 | (178) |
| 6.8.1 工作原理                       | (178) |
| 6.8.2 MTV-2821CB 特性参数            | (179) |
| 6.8.3 MTV-2821CB 的主要功能及其设置       | (182) |
| 6.8.4 帧累积功能                      | (184) |
| 思考题与习题 6                         | (187) |
| <b>第 7 章 CCD 彩色摄像机概述</b>         | (189) |
| 7.1 三管 CCD 彩色电视摄像机               | (189) |
| 7.1.1 三管 CCD 彩色电视摄像机的基本组成        | (189) |
| 7.1.2 光学系统和 CCD 摄像机中的重合调整        | (190) |
| 7.1.3 频谱混叠干扰在 $R, G, B$ 信号之间相互抵消 | (191) |
| 7.2 两管式 CCD 彩色电视摄像机              | (192) |
| 7.3 单管 CCD 彩色摄像机                 | (194) |
| 7.4 典型单片彩色 CCD                   | (198) |
| 7.4.1 Bayer 滤色器单片彩色 CCD          | (198) |
| 7.4.2 复合滤色器(或补色滤光片)型的彩色 CCD      | (199) |
| 7.5 彩色数码照相机简介                    | (202) |
| 思考题与习题 7                         | (206) |
| <b>第 8 章 CMOS 图像传感器</b>          | (207) |
| 8.1 MOS 场效应管                     | (207) |
| 8.1.1 MOS 场效应管的基本结构              | (207) |
| 8.1.2 场效应管的主要性能参数                | (208) |
| 8.2 CMOS 成像器件的原理结构               | (212) |
| 8.2.1 CMOS 成像器件的组成               | (213) |
| 8.2.2 CMOS 成像器件的像敏单元结构           | (214) |
| 8.2.3 CMOS 图像传感器的工作流程            | (216) |
| 8.2.4 CMOS 成像器件的辅助电路             | (218) |
| 8.3 CMOS 图像传感器的性能指标              | (224) |
| 8.4 典型 CMOS 图像传感器                | (229) |
| 8.4.1 IBIS4 SXGA 型 CMOS 成像器件     | (229) |
| 8.4.2 FUGA1000 图像传感器             | (234) |
| 8.4.3 高速 CMOS 图像传感器              | (236) |
| 8.5 CMOS 摄像机                     | (239) |
| 8.5.1 IM28-SA 型 CMOS 摄像机         | (240) |
| 8.5.2 MC1300 高速 CMOS 摄像机         | (242) |
| 思考题与习题 8                         | (244) |
| <b>第 9 章 视频信号处理与计算机数据采集</b>      | (245) |
| 9.1 CCD 视频信号的二值化处理               | (245) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 9.1.1 二值化处理方法 .....              | (246) |
| 9.1.2 二值化数据采集与计算机接口 .....        | (248) |
| 9.2 CCD 视频信号的量化处理 .....          | (251) |
| 9.3 线阵 CCD 输出信号的数据采集与计算机接口 ..... | (255) |
| 9.4 面阵 CCD 的数据采集与计算机接口 .....     | (266) |
| 9.4.1 图像采集卡的基本工作原理 .....         | (266) |
| 9.4.2 图像卡的基本结构 .....             | (267) |
| 9.4.3 典型图像数据采集卡 .....            | (271) |
| 思考题与习题 9 .....                   | (280) |
| <b>第 10 章 图像传感器的光学成像系统</b> ..... | (281) |
| 10.1 光学成像系统的基本计算公式 .....         | (281) |
| 10.1.1 理想光学系统的基本参数 .....         | (281) |
| 10.1.2 理想光学系统的物像位置公式 .....       | (283) |
| 10.1.3 理想光学系统的放大率 .....          | (283) |
| 10.2 光学元件的成像特性 .....             | (285) |
| 10.2.1 球面光学元件的成像特性 .....         | (286) |
| 10.2.2 平面光学元件的成像特性 .....         | (287) |
| 10.3 光学成像系统中的光阑 .....            | (293) |
| 10.4 常用光电图像转换系统的成像特性 .....       | (296) |
| 10.4.1 摄影系统及其物镜的光学成像特性 .....     | (297) |
| 10.4.2 显微系统及其物镜的光学成像特性 .....     | (299) |
| 10.4.3 望远系统及其物镜的光学成像特性 .....     | (301) |
| 10.5 照明系统 .....                  | (302) |
| 10.6 远心光路在动态测试中的应用 .....         | (304) |
| 10.7 面阵 CCD 摄像机光学镜头的类型及其参数 ..... | (305) |
| 10.8 线阵 CCD 常用的物镜 .....          | (310) |
| 思考题与习题 10 .....                  | (312) |
| <b>第 11 章 特种图像传感器</b> .....      | (315) |
| 11.1 微光图像传感器 .....               | (315) |
| 11.1.1 微光图像传感器的发展概况 .....        | (315) |
| 11.1.2 微光电视摄像系统 .....            | (317) |
| 11.1.3 微光电视摄像系统观察距离的估算 .....     | (320) |
| 11.1.4 微光 CCD 摄像器件 .....         | (322) |
| 11.2 红外 CCD 图像传感器 .....          | (332) |
| 11.2.1 主动红外电视摄像系统 .....          | (332) |
| 11.2.2 被动红外电视摄像系统 .....          | (334) |
| 11.3 X 光 CCD 图像传感器 .....         | (337) |
| 11.3.1 X 光像增强器 .....             | (337) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 11.3.2 医用 X 光电视摄像系统          | (340) |
| 11.3.3 工业用 X 光光电检测系统         | (341) |
| 思考题与习题 11                    | (342) |
| 第 12 章 图像传感器的典型应用实例          | (343) |
| 12.1 图像传感器用于一维尺寸的测量          | (343) |
| 12.1.1 玻璃管内、外径尺寸测量控制仪器的技术要求  | (343) |
| 12.1.2 仪器的工作原理               | (343) |
| 12.1.3 线阵 CCD 的选择            | (344) |
| 12.1.4 光学系统设计                | (345) |
| 12.1.5 对外径、壁厚的检测电路           | (348) |
| 12.1.6 微机数据采集接口              | (350) |
| 12.1.7 系统的长线传输               | (351) |
| 12.2 CCD 的拼接技术在尺寸测量系统中的应用    | (351) |
| 12.2.1 CCD 的机械拼接技术在尺寸测量中的应用  | (351) |
| 12.2.2 线阵 CCD 的光学拼接          | (354) |
| 12.3 线阵 CCD 图像传感器用于二维位置的测量   | (356) |
| 12.3.1 高精度二维位置测量系统           | (356) |
| 12.3.2 光学系统误差分析              | (359) |
| 12.4 CCD 在 BGA 管脚三维尺寸测试中的应用  | (359) |
| 12.4.1 测试原理                  | (359) |
| 12.4.2 数学模型                  | (360) |
| 12.4.3 系统的标定                 | (361) |
| 12.4.4 BGA 芯片测量实验            | (362) |
| 12.5 CCD 图像传感器用于平板位置的检测      | (364) |
| 12.6 利用线阵 CCD 非接触测量材料变形量的方法  | (366) |
| 12.7 CCD 图像传感器用于物体振动的非接触测量   | (370) |
| 12.8 图像传感器用于高精度细丝直径的测量       | (374) |
| 12.9 图像传感器用于透镜曲率半径的自动测量      | (377) |
| 12.9.1 测量原理和系统构成             | (377) |
| 12.9.2 测量系统的硬件与软件            | (379) |
| 12.9.3 系统测量误差                | (380) |
| 12.10 图像传感器用于成像物镜光学传递函数的测量   | (381) |
| 12.10.1 光学传递函数检测原理           | (381) |
| 12.10.2 光学传递函数检测系统           | (384) |
| 12.11 CCD 用于 ICP-AES 光谱探测与分析 | (386) |
| 12.11.1 ICP-AES 光谱探测器的基本原理   | (387) |
| 12.11.2 实验结果分析及结论            | (388) |
| 12.12 CCD 图像传感器用于光学系统像差测量    | (391) |

|         |                               |       |
|---------|-------------------------------|-------|
| 12.13   | 线阵 CCD 图像传感器在扫描复印技术中的应用 ..... | (395) |
| 12.14   | 面阵 CCD 图像传感器用于钢板尺寸测量系统 .....  | (397) |
| 12.15   | CCD 天文图像观测系统 .....            | (401) |
| 12.16   | 图像传感器用于光电显微分析仪 .....          | (403) |
| 12.17   | 图像传感器在内窥镜摄像系统中的应用 .....       | (406) |
| 12.17.1 | 工业内窥镜电视摄像系统 .....             | (406) |
| 12.17.2 | 医用电子内窥镜摄像系统 .....             | (408) |
| 12.17.3 | 侦察内窥镜摄像系统 .....               | (409) |
| 12.18   | 图像传感器用于数码照相机 .....            | (409) |
|         | 思考题与习题 12 .....               | (415) |
|         | <b>参考文献</b> .....             | (417) |

# 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。然而,光的本质是物质,它具有粒子性,又称为光子或光子。光子具有动量与能量,并分别表示为  $p = \frac{h\nu}{c}$  与  $E = h\nu$ , 式中  $h$  为普朗克常数( $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ );  $\nu$  为光的振动频率( $\text{s}^{-1}$ );  $c$  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 光到红外辐射甚至于远红外、毫米波的范围。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范围。

| 电磁波名称       | $\lambda (\text{m})$ |
|-------------|----------------------|
| 宇宙射线        | $10^{-14}$           |
|             | $10^{-13}$           |
| $\gamma$ 射线 | $10^{-12}$           |
|             | $10^{-11}$           |
| X 光         | $10^{-10}$           |
|             | $10^{-9}$            |
| 紫外辐射        | $10^{-8}$            |
|             | $10^{-7}$            |
| 可见光谱        | $10^{-6}$            |
| 红外辐射        | $10^{-5}$            |
| 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

## 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、光度的定量计量常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的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  $\Phi_e$  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

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

对可见光,光源表面在无穷小时间内发射、传播或接收所有可见光谱,光能被无穷短时间间隔  $dt$  来除,定义为光通量  $\Phi_v$ ,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

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

$\Phi_v$  的计量单位为流[明][lm]。

显然,辐射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. 辐射出射度和光出射度

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,定义为辐射出射度  $M_e$ ,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射通量为

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

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  $dA$  之比称为光出射度  $M_v$ ,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

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

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. 辐射强度和发光强度

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

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

辐射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  $\Omega$  内发射的辐射通量为

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

各向同性的点光源向所有方向发射的总辐射通量为

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

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,在此方向上的辐射强度为  $(1/683)\text{W/sr}$ ,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. 辐射亮度和亮度

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

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

式中,  $\theta$  为所给方向与面元法线之间的夹角。辐射亮度  $L_e$  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

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

$L_v$  的计量单位是坎德拉每平方米  $[\text{cd}/\text{m}^2]$ 。

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

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

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

## 6. 辐射效率与发光效率

光源所发射的总辐射通量  $\Phi_e$  与外界提供给光源的功率  $P$  之比称为光源的辐射效率  $\eta_e$ ; 光源发射的总光通量  $\Phi_v$  与提供的功率  $P$  之比称为发光效率  $\eta_v$ 。它们分别为

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

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

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

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

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

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

### 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

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