



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

光电传感器 应用技术

王庆有 主编

第2版



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
普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

光电传感器应用技术

第2版

主 编 王庆有
副主编 陈晓冬
参 编 黄战华 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。内容围绕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的应用实例是本书的创新之处。

本书第2版在对全书内容进行修改的同时,侧重对第7章进行补充,补充了图像显示的内容,另外增加了第14章课程设计与毕业设计的内容,目的是提高学生的动手、动脑能力。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、光学技术与仪器、测绘工程、光电检测仪器、公安图像技术、生物医学工程、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. —2版. —北京:机械工业出版社, 2014. 1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-45051-1

I. ①光… · II. ①王… III. ①光电传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212. 14

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第293339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:刘丽敏 责任编辑:刘丽敏 王琪

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·25.5印张·630千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45051-1

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

第 2 版前言

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。

光电传感器俗称为“电眼”,是比人眼响应波长范围更宽,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,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,将那里发生的瞬间快速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,编写了本书,使它能为培养更多从事“为机器安装眼睛与大脑工程”的本科生与研究生服务。

本书综合了不同院校的教学特点,使用范围广,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 14 章。第 1 章介绍光电传感器技术基础。第 2 章介绍光电传感器应用技术中所用光源,第 3~6 章分别介绍光电导器件、光生伏特器件、光电发射器件和光电与太赫兹波的探测。第 7~10 章介绍图像扫描与图像显示技术、CCD 光电图像传感器、CMOS 光电图像传感器和彩色图像传感器与彩色数码相机概述。第 11 章介绍光电传感器输出信号的数据采集。第 12 章介绍特种图像传感器。第 13 章介绍光电传感器应用实例。第 14 章介绍光电传感器应用技术课程设计与毕业设计。

本书由天津大学王庆有主编。天津大学陈晓冬编写第 7、9、10 章和第 11 与 13 章的部分内容;天津大学黄战华编写第 14 章;首都师范大学冯立春编写第 2 章;首都师范大学张存林编写第 6 章;其余内容均由王庆有编写,并对全书进行统编。

本书聘请西安工业学院副院长刘缠牢博士进行了深入细致的审校，对刘院长认真细致的审校工作在此表示衷心的感谢。衷心感谢本书的责任编辑刘丽敏同志的辛勤工作和热情帮助，以及感谢机械工业出版社领导与其他编审人员的辛勤劳动！

本书编写过程中得到天津市耀辉光电技术有限公司全体同仁的帮助与支持，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所提供的技术资料表示感谢！

在本书的编写过程一直得到天津大学精密仪器与光电子工程学院领导和首都师范大学物理系领导与同事的支持，在此表示感谢！

本书第2版改编过程中得到闽南理工学院光电与机电工程系领导与同事们的支持，尤其是得到福建省教委“光学工程”和“省教改立项项目”的支持，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我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

于闽南理工学院

第 1 版前言

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

第 2 版前言

第 1 版前言

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 4
 - 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 10
 - 1.3.1 人眼的光视效率 11
 - 1.3.2 人眼的光谱光视效能 11
 - 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 15
- 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 22

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 氦 - 氖激光器 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 45
 - 2.7.1 光源的选择 45
 - 2.7.2 照度匹配 46
- 思考题与习题 2 47

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 53
 - 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 60
- 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 62
 - 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	6.2.5	典型热敏电阻简介	125
4.2.3	硅光电池	74	6.3	热释电器件	126
4.2.4	光敏晶体管	77	6.3.1	热释电器件的基本工作原理	126
4.2.5	色敏光生伏特器件	81	6.3.2	热释电器件的电压灵敏度	130
4.2.6	光伏器件组合器件	83	6.3.3	热释电器件的噪声	130
4.2.7	光电位置敏感器件	88	6.3.4	响应时间	131
4.3	光生伏特器件的偏置电路	92	6.3.5	热释电探测器的阻抗特性	132
4.3.1	反向偏置电路	92	6.3.6	热释电器件的类型	132
4.3.2	零伏偏置电路	95	6.3.7	典型热释电器件	134
	思考题与习题4	95	6.4	红外与热辐射探测技术	135
第5章	光电发射器件	97	6.5	太赫兹波的探测技术	136
5.1	光电发射阴极	97	6.5.1	太赫兹波脉冲探测	137
5.1.1	光电发射阴极的主要参数	97	6.5.2	太赫兹连续波探测	139
5.1.2	光电阴极材料	98	6.5.3	太赫兹波单光子探测	140
5.2	真空光电管与光电倍增管的工作原理	100		思考题与习题6	142
5.2.1	真空光电管的原理	100	第7章	图像扫描与图像显示技术	143
5.2.2	光电倍增管的原理	100	7.1	图像解析原理	143
5.3	光电倍增管的基本特性	102	7.1.1	图像的解析方法	143
5.3.1	灵敏度	102	7.1.2	图像传感器的基本技术参数	146
5.3.2	电流放大倍数	103	7.2	图像的显示与电视制式	147
5.3.3	暗电流	104	7.2.1	CRT 电视监视器及其扫描方式	147
5.3.4	噪声	105	7.2.2	电视制式	149
5.3.5	伏安特性	106	7.3	图像显示器的分类	150
5.3.6	线性	107	7.3.1	阴极射线管显示器	150
5.3.7	疲劳与衰老	108	7.3.2	液晶显示器	150
5.4	光电倍增管的供电电路	109	7.4	典型图像显示器	151
5.4.1	电阻链分压型供电电路	109	7.4.1	TFT-LCD 器件	151
5.4.2	末级的并联电容	110	7.4.2	TFT-LCD 图像显示器	152
5.4.3	电源电压的稳定度	110	7.4.3	LED 图像显示器	153
5.5	光电倍增管的典型应用	111		思考题与习题7	154
5.5.1	光谱探测领域的应用	112	第8章	CCD 光电图像传感器	155
5.5.2	时间分辨荧光免疫分析 中的应用	113	8.1	电荷存储	155
	思考题与习题5	115	8.2	电荷耦合	157
第6章	红外与 THz 的探测	116	8.3	CCD 电极结构	158
6.1	热辐射的一般规律	116	8.3.1	三相 CCD 的电极结构	158
6.1.1	温度变化方程	116	8.3.2	二相 CCD	159
6.1.2	热电器件的最小可探测功率	117	8.3.3	四相 CCD	160
6.2	热敏电阻与热电堆	118	8.3.4	体沟道 CCD	161
6.2.1	热敏电阻	118	8.4	电荷的注入和检测	162
6.2.2	热电偶探测器	122	8.4.1	光注入	162
6.2.3	热电堆探测器	124	8.4.2	电注入	163
6.2.4	热敏电阻的用途	124	8.4.3	电荷的检测	164
			8.5	典型线阵 CCD 图像传感器	164

8.5.1 单沟道线阵 CCD 图像传感器	165	11.1 光电传感器信号的二值化处理	245
8.5.2 双沟道线阵 CCD 图像传感器	170	11.1.1 单元光电信号的二值化处理	245
8.5.3 线阵 CCD 类型与发展	175	11.1.2 序列光电信号二值化处理	247
8.6 典型面阵 CCD 图像传感器	175	11.2 光电信号二值化数据采集	249
8.6.1 概述	175	11.3 光电信号的量化处理与 A/D	
8.6.2 典型帧转移型面阵 CCD 器件	178	数据采集	251
思考题与习题 8	186	11.3.1 单元光电信号的量化处理	251
第 9 章 CMOS 光电图像传感器	188	11.3.2 单元光电信号 A/D 数据采集	256
9.1 MOS 与 CMOS 场效应晶体管	188	11.3.3 序列光电信号的量化处理	258
9.1.1 MOS 场效应晶体管的基本结构	188	11.3.4 序列光电信号的 A/D 数据采集与	
9.1.2 场效应晶体管的主要性能参数	189	计算机接口	261
9.2 CMOS 图像传感器的原理与结构	193	11.4 面阵 CCD 的数据采集与计算机	
9.2.1 CMOS 图像传感器的组成	193	接口	264
9.2.2 CMOS 图像传感器的像敏单元		11.4.1 基于 PC 总线的图像采集卡	265
结构	194	11.4.2 典型图像数据采集卡	268
9.2.3 CMOS 图像传感器的工作流程	197	11.4.3 基于 USB2.0 的计算机接口	276
9.2.4 CMOS 图像传感器的辅助电路	198	11.4.4 基于嵌入式系统的 CCD 图像	
9.3 CMOS 图像传感器的特性参数	203	数据采集	278
9.4 典型 CMOS 图像传感器	208	思考题与习题 11	279
9.4.1 IBIS4 6600 型 CMOS 图像传感器	208	第 12 章 特种图像传感器	281
9.4.2 IBIS5-B-1300 型 CMOS 图像		12.1 微光图像传感器	281
传感器	210	12.1.1 微光图像传感器的发展概况	281
9.4.3 高速 CMOS 图像传感器	213	12.1.2 微光电视摄像系统	283
9.5 CMOS 图像传感器的应用实例	215	12.1.3 微光电视摄像系统观察距离	
9.5.1 IM28-SA 型 CMOS 摄像机	216	的估算	285
9.5.2 MC1300 高速 CMOS 摄像机	218	12.1.4 微光 CCD 摄像器件	287
思考题与习题 9	220	12.2 红外 CCD 图像传感器	296
第 10 章 彩色图像传感器与彩色		12.2.1 主动红外电视摄像系统	296
数码相机概述	221	12.2.2 被动红外电视摄像系统	298
10.1 彩色线阵 CCD 图像传感器	221	12.3 X 射线 CCD 图像传感器	300
10.1.1 ILX522K 器件	221	12.3.1 X 射线像增强器	301
10.1.2 TCD2252D 器件	223	12.3.2 医用 X 射线电视 CCD 摄像	
10.2 彩色面阵 CCD 图像传感器	226	系统	303
10.3 彩色面阵 CCD 摄像机概述	230	12.3.3 工业用 X 射线光电检测系统	304
10.3.1 三管彩色面阵 CCD 摄像机	231	思考题与习题 12	305
10.3.2 两管彩色面阵 CCD 摄像机	234	第 13 章 光电传感器应用实例	306
10.3.3 单管 CCD 彩色摄像机	235	13.1 光电传感器用于一维尺寸的测量	306
10.4 彩色面阵 CCD 数码相机概述	239	13.1.1 玻璃管内、外径尺寸测量控制	
10.5 彩色面阵 CMOS 数码相机概述	242	仪器的技术要求	306
思考题与习题 10	243	13.1.2 仪器的工作原理	306
第 11 章 光电传感器输出信号		13.1.3 线阵 CCD 的选择	307
的数据采集	245	13.1.4 光学系统设计	308
		13.1.5 外径、壁厚的检测电路	310

13.1.6	微机数据采集接口	313	13.10.2	激光制导	341
13.1.7	讨论	313	13.10.3	红外跟踪制导	342
13.2	CCD 的拼接技术在尺寸测量系统中的应用	313	13.11	CCD 光电传感器用于 ICP-AES 光谱探测	345
13.2.1	CCD 的机械拼接技术在尺寸测量中的应用	313	13.11.1	ICP-AES 探测器的基本原理	345
13.2.2	线阵 CCD 的光学拼接	315	13.11.2	实验结果分析	347
13.3	线阵 CCD 传感器用于二维位置的测量	317	13.12	扫描成像技术在表面质量检测中的应用	349
13.3.1	高精度二维位置测量系统	317	13.12.1	宽幅面物体表面质量的检测与分析	349
13.3.2	光学系统误差分析	319	13.12.2	汽车制动钳内凹槽表面质量的检测	352
13.4	CCD 在 BGA 引脚三维尺寸测量中的应用	320	13.13	面阵 CCD 图像传感器用于钢板长宽尺寸测量系统	353
13.4.1	测量原理	320	13.14	医用电子内窥镜系统	356
13.4.2	数学模型	321	13.14.1	工作原理	356
13.4.3	系统的标定	322	13.14.2	系统的设计	357
13.4.4	BGA 芯片测量实验	323	13.14.3	CCD 驱动、图像采集、编码电路	358
13.5	CCD 图像传感器用于平板位置的检测	324	13.14.4	内窥镜视频驱动亮度控制系统的研制	359
13.5.1	平板位置检测的基本原理	324	13.14.5	电子内窥镜标准视频图像的畸变实时校正	360
13.5.2	平板位置检测系统	325	13.14.6	基于 PCI 总线的内窥镜图像实时采集系统	360
13.6	利用线阵 CCD 非接触测量材料变形量的方法	326	13.14.7	电子内窥镜图像处理软件系统的设计	361
13.7	激光光斑的尺寸测量系统	329		思考题与习题 13	361
13.7.1	激光光斑的尺寸测量原理	330	第 14 章 课程设计与毕业设计		362
13.7.2	系统的总体设计	330	14.1	辐度学和光度学物理量测量的波长问题	362
13.7.3	系统的基本组成及工作流程	331	14.1.1	被测辐射体的光谱分布与探测器的光谱响应	362
13.7.4	系统硬件设计	332	14.1.2	辐射量的测量	363
13.7.5	系统软件设计	332	14.1.3	光度学参数的测量	364
13.8	CCD 图像传感器用于物体振动的非接触测量	333	14.1.4	辐度学和光度学参数测量的精度影响因素	365
13.8.1	工作原理	334	14.2	光功率测量方法与光功率计的设计	365
13.8.2	振动测量的硬件电路	335	14.2.1	主要掌握的内容	365
13.8.3	软件设计	335	14.2.2	光功率	365
13.8.4	振动台测试实验结果	336	14.2.3	光纤光功率的测量方法	366
13.9	利用激光准直技术测量物体的直线条度与同轴度	336	14.2.4	光纤光功率计的设计	366
13.9.1	激光准直测量原理	336			
13.9.2	不直度的测量	338			
13.9.3	不同轴度的测量	338			
13.10	光电信息变换技术在搜索、跟踪与制导中的应用	339			
13.10.1	搜索仪与跟踪仪	339			

14.2.5 课程设计内容	367	14.6 红外遥控开关的设计	376
14.3 照度测量方法与照度计的设计	368	14.6.1 设计思路	376
14.3.1 主要内容	368	14.6.2 密码的编制方法	377
14.3.2 照度的概念	368	14.6.3 红外遥控多功能开关的技术 要求	378
14.3.3 照度的测量方法	369	14.6.4 对器材的需求	379
14.3.4 照度计的设计原则	369	14.6.5 密码光电遥控多功能开关的 设计	379
14.3.5 照度计的设计内容	370	14.6.6 典型红外遥控发射器	382
14.4 发光强度测量仪设计	370	14.6.7 典型红外遥控接收器	384
14.4.1 发光强度	370	14.6.8 译码与功能控制器	387
14.4.2 发光强度的测量方法	371	14.7 红外测温仪的设计	388
14.4.3 发光强度测量仪的设计内容	371	14.7.1 物体热辐射的概念	388
14.4.4 发光强度测量中应注意的 问题	372	14.7.2 红外测温方法	389
14.5 亮度测量方法与亮度计的设计	373	14.7.3 红外测温仪的设计原则	390
14.5.1 亮度的概念	373	14.7.4 红外测温仪的设计内容	390
14.5.2 亮度的测量方法	373	参考文献	392
14.5.3 亮度计的设计原则	375		

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，涉及的基础知识较宽，需要掌握光与电两方面的基本理论与基本参数。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，而主要探讨光的基本理论和基本度量参数。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， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ； ν 为光的振动频率 (s^{-1})； c 为光在真空中的传播速度， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

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 ($10^6 \sim 10^{25} \text{ Hz}$) 的广阔频段。图 1-1 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，它的波长区域包括从纳米到毫米 (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)。

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

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。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虽在概念上不一样, 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. 辐能和光能

以辐射形式发射、传播或接收的能量称为辐能, 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间隔 dt 来除, 定义为光通量, 计为 Φ_v , 有

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

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 $[W/(sr \cdot m^2)]$ 。

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

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

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, $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ (φ 为立体角锥平面角)。

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

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

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

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

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

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

2. 曝辐量和曝光量

曝辐量与曝光量是光电接收器接收辐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