



航空航天工程类专业规划教材

# 光电检测技术 与系统设计

GUANGDIAN JIANCE JISHU YU XITONG SHEJI

徐贵力 陈智军 郭瑞鹏 朱珠 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空航天工程类专业规划教材

# 光电检测技术与系统设计

徐贵力 陈智军 郭瑞鹏 朱 珠 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

光电检测技术飞速发展,应用也越来越广泛,特别是在航空航天与工业领域。

本书较全面和系统地介绍了光电检测技术所涉及的基本光学知识,常用的光电检测器件,光电信号的拾取、处理,光电系统设计以及光电检测系统的典型应用,重点在于使读者掌握光电检测技术与系统的基础知识,掌握典型的光电检测系统设计实例,并且在编写时尽可能通过实例使读者学会在光电检测科研实践中善于发现问题、分析问题和解决问题,能够利用光电检测技术设计出一般的检测系统,从而一定程度上提高其科研创新能力和解决实际工程技术问题的能力。

本书可作为高等工科院校“测控技术与仪器”、“检测技术与自动化装置”、“导航制导”、“光电信息工程”、“机械电子工程”和“生物医学工程”等专业的教材,也可供其他相关专业的师生及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术与系统设计/徐贵力等编著. —北京:国防工业出版社,2013. 8

航空航天工程类专业规划教材

ISBN 978-7-118-08889-2

I. ①光… II. ①徐… III. ①光电检测—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 189965 号

※

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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 435 千字

2013年8月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 35.00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



# 前 言

光电检测技术是信息科学的一个分支,具有非接触测量、测量精度高、速度快和自动化程度高等突出特点,发展十分迅速。它将光学技术与电子技术相结合,展现出独特的优势。

“光电检测技术”课程是高等工科院校“测控技术与仪器”、“检测技术与自动化装置”、“导航制导”、“光电信息工程”、“机械电子工程”和“生物医学工程”等专业的重要课程。

本书是参考现有十几本光电检测技术类书籍并总结多年教学和科研经验编著的。全书总体上分为光电检测基础篇和应用与设计篇,共分为 12 章,分别为光电检测技术概述、光和光电检测调制原理、光电检测用光源、光电检测器及其检测电路、光探测技术、光强度调制检测系统、光相位调制检测系统、光频率与波长调制检测系统、光偏振调制检测系统、基于光纤的光电检测技术以及光电检测系统设计。本书在内容上将理论与应用密切结合,论述深入浅出。

本书既可以作为大学本科教学内容,也可以作为研究生教学内容,根据学生基础可以自行挑选部分内容进行学习。

为了便于教师教学和学生学习,书中要求学生重点掌握、理解的内容和知识点都已经用黑斜体标出。

本书参阅了大量的参考资料,这些资料作者的卓越研究成果,使本书内容更加充实,在此向有关作者表示感谢。

由于编者的学识有限,一定存在许多不足之处,望广大读者不吝指正,以便今后改进完善。

徐贵力  
2013 年 4 月

# 目 录

上篇(技术基础篇)	1
第1章 光电检测技术概述	3
1.1 光电检测技术定义	3
1.2 光电检测系统的组成	4
1.3 光电检测技术应用	4
1.4 光电检测技术发展及其特点	7
习题	8
第2章 光和光调制原理	9
2.1 光波	9
2.2 光的偏振态	13
2.3 光调制的基本概念	15
2.4 光强度调制	26
2.5 光相位调制	28
2.6 光的偏振调制	39
2.7 光的频率和波长调制	43
习题	47
第3章 光电检测系统中常用光源和照明方式	48
3.1 光的产生和光源的基本参数	48
3.2 光电检测中常用光源及光源选用注意事项	51
3.3 光源的照明方式	59
习题	61
第4章 光电检测器和检测电路	62
4.1 光电检测器原理、特性和噪声	63
4.2 基于光电子发射的光电检测器	69

4.3	光敏电阻	75
4.4	光伏检测器件	79
4.5	光电成像器件	87
4.6	热电检测器件	95
4.7	光电检测电路	99
	习题	106
<b>第5章</b>	<b>光电检测技术</b>	107
5.1	光直接检测方法	107
5.2	光外差检测方法	109
5.3	弱光信号检测	115
	习题	125
<b>下篇(应用技术篇)</b>		125
<b>第6章</b>	<b>基于光强度调制的检测系统</b>	127
6.1	光电开关与光电转速计	127
6.2	光电编码器	132
6.3	莫尔条纹测长仪	136
6.4	激光测距仪	142
6.5	激光三角测量技术	147
6.6	激光准直仪	150
6.7	基于计算机视觉的测量系统	154
6.8	红外方位检测系统	158
	习题	162
<b>第7章</b>	<b>基于光相位调制的检测系统</b>	164
7.1	光相位调制及其调制度和影响因素	164
7.2	干涉测量技术	165
7.3	激光衍射测量技术	176
	习题	182
<b>第8章</b>	<b>光偏振调制检测系统</b>	183
8.1	光偏振检测有关光学器件	183
8.2	光弹性效应测力	186
8.3	光纤电流电压测试系统	188
	习题	189
<b>第9章</b>	<b>光频率调制检测系统</b>	190
9.1	激光多普勒测速仪	190
9.2	双频激光测长仪	195

习题	200
<b>第 10 章 基于光波长调制的检测系统</b>	<b>201</b>
10.1 光电比色温度计	201
10.2 光电荧光计	206
习题	208
<b>第 11 章 光纤和基于光纤的检测系统</b>	<b>209</b>
11.1 光纤基础知识	209
11.2 光导的应用	211
11.3 光纤传输特性	214
11.4 光纤传感器的分类、构成和特点	215
11.5 基于光纤传感器的检测系统	216
习题	229
<b>第 12 章 光电检测系统设计实例</b>	<b>230</b>
12.1 太阳传感器的设计	230
12.2 面向太阳能发电的新型太阳方位传感器设计	233
12.3 基于光电检测的油、水混合液分层自动检测系统设计	240
12.4 基于偏振分束的磁光成像系统设计	244
12.5 基于红外传感器和 ARM 的大气有害气体浓度监测系统	250
12.6 基于计算机视觉的无人机自动着陆系统设计	254
12.7 面向智慧城市的智能监控系统设计	267
12.8 复杂形状物体面积测量系统设计	271
12.9 线纹尺测量系统设计	274
<b>参考文献</b>	<b>279</b>

# 上篇(技术基础篇)





# 第1章

## 光电检测技术概述

### 1.1 光电检测技术定义

物质、能量和信息是人类发展的三大基本要素。信息作用于物质和能量之间,使人类能够更好地认识物质与能量之间的关系。

信息技术是一种综合技术,它包括四个基本内容,即感测技术、通信技术、人工智能与计算机技术和控制技术。

感测技术包括传感技术和测量技术以及遥感、遥测技术,它使人类能更好地从外部世界获取各种有用的信息。

通信技术的作用是传递、交换和分配信息,可以消除或克服空间上的限制,使人们能更有效地利用信息资源。

人工智能与计算机技术使人能更好地加工与再生信息。

控制技术的作用是根据输入的指令,对外部事务的运动状态实施干预。

因此一切与信息的收集、加工、存储、传输有关的各种技术可称为信息技术。在当今时代,信息技术包括微电子信息、光子信息技术和光电信息技术等。

作为核心的微电子信息是在传统的电子技术基础上发展起来的一种渗透性最强、影响面最广的电子技术,它通过控制固体内电子的微观运动来实现对信息的加工处理,并在固体的微区内进行,可以把一个电子功能部件,甚至一个系统集成在一个很小的芯片上。

光子信息技术和微电子技术一样,是一种渗透性极强的综合技术,是以光集成技术为核心的有关光学元器件制造的应用技术。与微电子技术类似,它利用外延、扩散、注入、蒸发工艺,将各种有源和无源光学器件(激光器、光耦合器、光分路器、光调制器、光检测器等)集成在一起,构成能完成光学信息获取、处理和储存等功能的系统。光子信息技术涉及光器件技术(激光技术、光调制器技术等)、光信息检测、光处理技术(光数据交换、光联网、光图像处理等)、光信息传输技术(远程传输、光空间通信等)、光存储(光盘)技术与显示技术(液晶显示、等离子显示)等。

光电信息技术是将电子学与光学集成为一体的技术,是光与电子转换及其应用的技术。

从广义上讲,光电信息技术就是在光频段的微电子技术,它将光学技术与电子技术相结合实现信息的获取、加工、传输、控制、处理、存储与显示。它将光的快速与电子信息处理的方便、快速相结合,因而具有许多无可比拟的优点。

光电检测技术是光电信息技术的主要技术之一,是利用光电传感器(光电检测器件,如光电二极管、光电倍增管、CCD等)实现各类检测,即将被测量(温度、压力、距离、位移等)转换成光学量(光强、光频率、光相位、波长和偏振态等),再将光学量转换成电量(电压、电流、电荷等),并综合利用信息传送技术和信息处理技术,最后完成对物理量进行在线和自动检测。比如光电转速计、光电浊度测量、激光脉冲式测距仪、激光干涉测量仪、利用光的衍射测量狭缝(0.01~0.5mm)、基于法拉第效应的光电测量大电流、基于计算机视觉技术的智能监控等。

## 1.2 光电检测系统的组成

由于被测对象多种多样,所以光电检测系统也不尽相同,一般的光电检测系统包括光源、被测对象、光电检测器及其检测电路、计算机分析处理部分和执行部分。如图1-1所示。

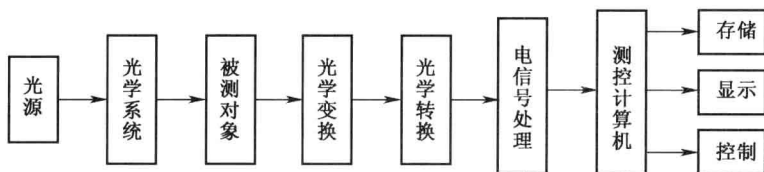


图 1-1 光电检测系统组成框图

## 1.3 光电检测技术应用

光电检测技术的应用例子可以说随处可见,比如在生活中常见的基于热释光电探测器探测人体红外辐射的自动门(系统结构示意图如图1-2所示)、含有商品身份等信息的条形码、基于人眼看不见的红外线监控报警装置、视觉监控装置;医学上的X光成像检测设备(如图1-3所示的小儿心脏病X光图像)、用于手术的激光刀、非接触测量的红外温度计、小儿黄疸光电检测仪、基于偏振光检测的血糖光电检测仪;军事上的激光枪、激光制导导弹、视觉精确制导导弹(巡航导弹,图1-4)、红外告警装置、激光陀螺(图1-5)、光纤陀螺(图1-6)、坦克上的光电测距和光电报警系统、潜艇上的基于激光干涉原理的声探测仪、基于激光编码识别原理的军事演习系统、飞机上的轻质光纤通信、激光雷达等;空间技术上的反间谍卫星武器、卫星探测器(CCD)、探月着陆技术(激光测距、冗余CCD)、激光通信技术;环境科学上光电探测大气污染、毒气探测、遥感图像、能见度测量等;工农业上的生产线监控(烟盒包装检测系统)、光电开关计数、计算机视觉在线检测产品质量(图1-7)、精密测量、机床的三轴定位、测温、测

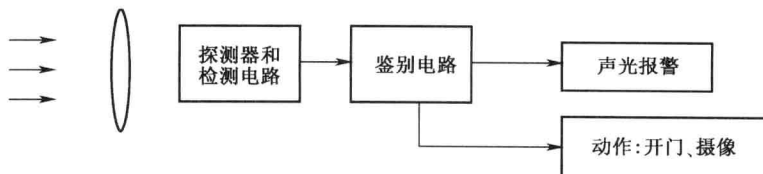
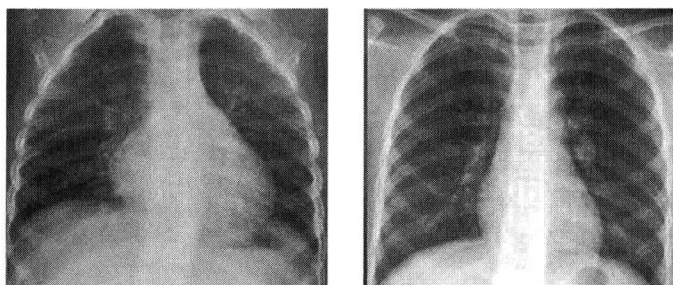


图 1-2 红外线光电报警装置原理图

压、线纹尺光电测量仪(图 1-8)、激光外径扫描仪(图 1-9)、基于光电传感器自动跟踪太阳的斯特林太阳能发电系统(图 1-10)、基于光电视觉传感器的无人机自动精确打击技术(图 1-11)和基于光电传感器的空天飞行器自动交互对接技术(图 1-12)等。



(a) 有病图像

(b) 正常图像

图 1-3 小儿心脏病 X 光图像

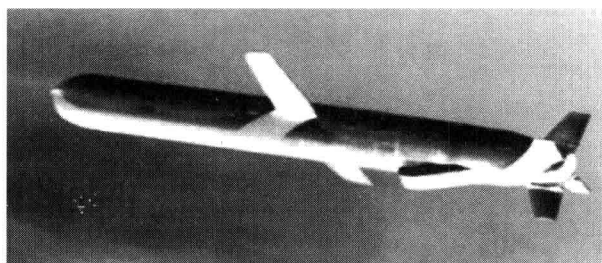


图 1-4 基于视觉技术的巡航导弹

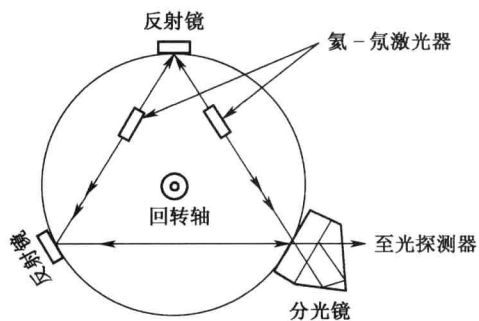


图 1-5 激光陀螺

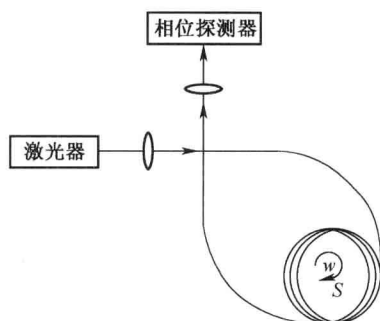


图 1-6 光纤陀螺

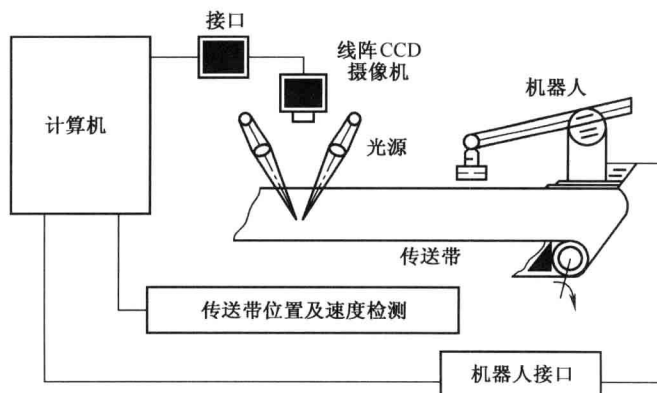


图 1-7 工业机器人视觉检测产品质量

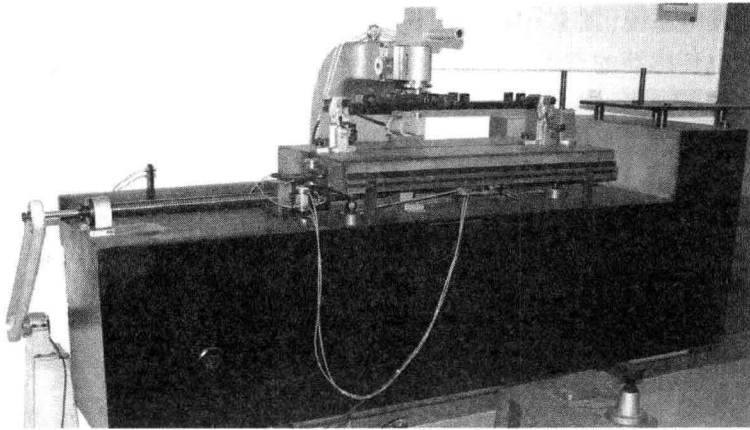


图 1-8 线纹尺光电测量仪

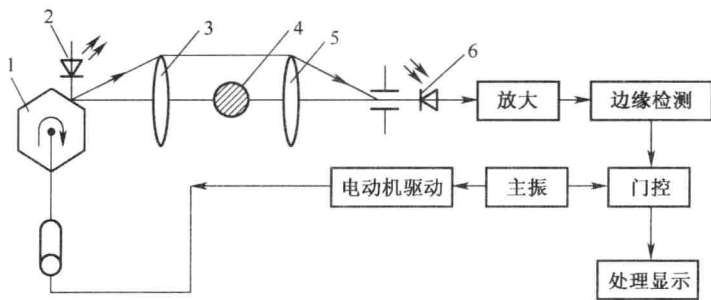


图 1-9 激光外径扫描仪

1—旋转多面体;2—半导体激光器;3— $f(\theta)$ 镜;4—工件;5—物镜;6—光电器件。

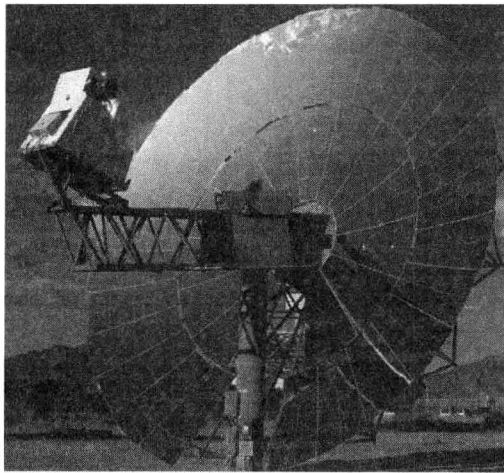


图 1-10 基于光电传感器自动跟踪太阳的斯特林太阳能发电系统

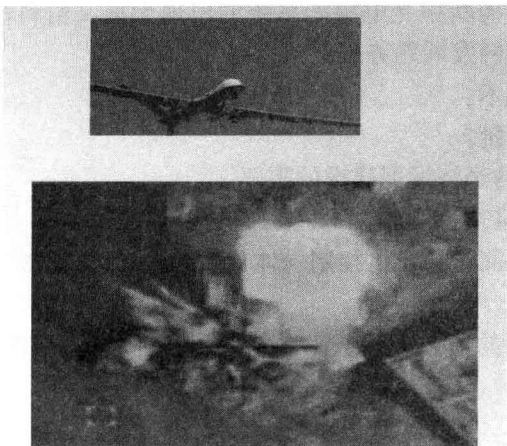


图 1-11 基于光电视觉传感器的  
无人机自动精确打击技术

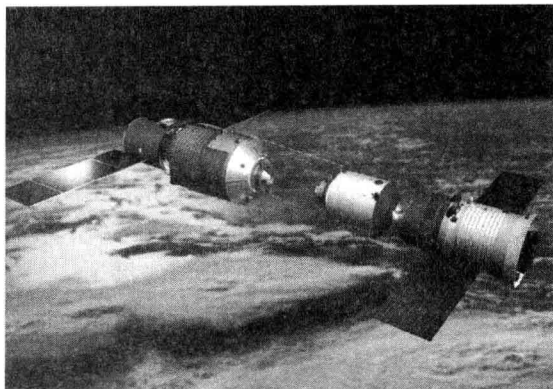


图 1-12 基于光电传感器的空天  
飞行器自动交互对接技术

## 1.4 光电检测技术发展及其特点

光电检测技术的发展与新型光源、新型光电器件、微电子技术、计算机技术的发展密不可分,自从 1960 年世界上第一台红宝石激光器与氦-氖激光器问世以来,由于激光光源的单色性、方向性、相干性和稳定性极好,人们在很短时间内就研制出各种激光干涉仪、激光测距仪、激光准直仪、激光跟踪仪和激光雷达等,大大推动了光电测试技术的发展。

1970 年贝尔实验室研制出第一个固体摄像器件 (CCD),由于它的小巧、坚固、低功耗、失真小、工作电压低,重量轻、抗振性好、动态范围大和光谱范围宽等特点,使得视觉检测进入一个新的阶段,它不仅可以完成人的视觉触及区域的图像测量,而且对于人眼无法涉及的红外和紫外波段的图像测量也变成了现实,从而把光学测量的主观性(靠人眼瞄准与测量)发展成客观的光电图像测量。

光导纤维自从 20 世纪 60 年代问世以来,在传递图像和检测技术方面又发展出一个新的天地,光纤通信已经风靡全球,而光纤传感几乎可以测量各种物理量,尤其在一些强电磁干扰、危及人生命安全的场合可以安全地工作,而且具有高精度、高速度、非接触测量等特点。可以说一个新的光源、一个新的光电器件的发明都大大推动了光电检测技术的发展。

近十几年来工程领域的加工精度已达到  $0.1\mu\text{m}$ ,甚至  $0.01\mu\text{m}$  的水平。它对测量技术提出了更高的要求,迫切需要开拓新的测量手段,因此先后出现了各种纳米测量显微镜,如隧道显微镜的问世、原子显微镜的研制成功。为了准确测出这些纳米尺度测量显微镜的精度,还必须溯源到光的波长上,因此,迫切需要研制精度达到纳米和亚纳米级的干涉仪来实现纳米尺度的测量和标定,因而,又相继出现了精度可达到  $0.1\text{nm}$  的激光外差干涉仪和精度可达  $0.01\text{nm}$  的 X 光干涉仪。

微电子技术的问世,不仅使计算机技术突飞猛进,也使光电检测技术有了更为广阔的应用空间。当前人们在生物、医学、航天、灵巧武器、数字通信等许多领域越来越多地要求微系统,因此微机电系统成为当前研究的一个热点。而微机电系统要求有微型测量装置,这样,微型光、机、电检测系统也就毫无疑问地成为重要研究方向。

科学技术的进步推动了光电检测技术的发展,而新型光电检测系统的出现无疑又给科学技术的发展注入了新鲜血液。因此,光电检测技术的发展趋势是:

- (1) 发展纳米、亚纳米高精度的光电检测新技术。
- (2) 发展小型的、快速的微型光、机、电检测系统。
- (3) 非接触、快速在线测量,以满足快速增长的经济发展建设的需要。
- (4) 向微空间三维测量技术和大空间三维测量技术发展。
- (5) 发展闭环控制的光电检测系统,实现光电测量与光电控制一体化。
- (6) 向人们无法触及的领域发展。
- (7) 发展光电跟踪与光电扫描技术,如远距离的遥控、遥测、激光制导、飞行物自动跟踪、复杂形体自动扫描测量等。

光电检测技术具有如下特点:

(1) 高精度。光电测量的精度是各种测量技术中精度最高的一种,如用激光干涉法测量长度的精度可达  $0.05\mu\text{m}/\text{m}$ 、光栅莫尔条纹法测角可达到  $0.04''$ 、用激光测距法测量地球与月球之间距离的分辨力可达到  $1\text{m}$ 。

(2) 高速度。光电测量以光为媒介,而光是各种物质中传播速度最快的,无疑用光学的方法获取和传递信息是最快的。

(3) 远距离、大量程。光是最便于远距离传播的介质,尤其适用于遥控和遥测,如武器制导、光电跟踪、电视遥测等。

(4) 非接触测量。光照到被测物体上可以认为是没有测量力的,因此也无摩擦,可以实现动态非接触测量,是各种测量方法中效率最高的一种。

(5) 寿命长。在理论上光波是永不磨损的,只要复现性做得好,可以永久地使用。

(6) 具有很强的信息处理和运算能力,可将复杂信息并行处理。用光电方法还便于信息的控制和存储,易于实现自动化,易于与计算机连接,易于实现智能化等。

光电检测技术是现代科学、国家现代化建设和人民生活中不可缺少的新技术,是机、光、电、计算机相结合的新技术,是最具有潜力的信息技术之一。

本门技术的学习要求如下:

- (1) 掌握光电检测技术的测量调制原理;
- (2) 理解常用的光电检测光源原理和特点,会正确选择和使用;
- (3) 理解典型的光电器件的原理和特点,会正确选择和使用;
- (4) 掌握一些典型的光电检测系统设计技术。



## 习题

画出光电检测系统组成框图。

## 第2章

# 光和光调制原理

## 2.1 光 波

### 2.1.1 光是一种电磁波

物质是由大量的带电粒子组成的,粒子在不断地运动,当它们的运动受到干扰时就可能发射出电磁波。光是一种电磁波。自然界中的电磁辐射覆盖从无线电波到 $\gamma$ 射线的整个电磁波谱。电磁波谱如图2-1所示。

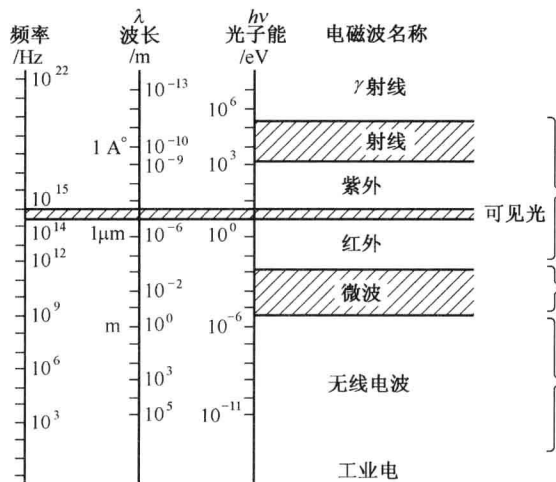


图2-1 电磁波谱

光学辐射是指波长为1nm~1mm范围的电磁辐射,它包括紫外辐射、可见光(380nm紫~420nm蓝~450nm青~490nm绿~560nm黄~590nm橙~620nm红~780nm)和红外(780nm~1500nm~10000nm~100000nm)辐射。表2-1为电磁波段的详细划分及用途。



表 2-1 电磁波段的详细划分及用途

波段/nm	名称	用途	波段/nm	名称	用途
$10^{-5} \sim 30$	$\gamma$ 射线	金属探伤、研究核结构	$10^9 \sim 10^{10}$	米波	调频广播、电视、导航等
$10^{-4} \sim 100$	X 射线	医用、探伤、分析晶体结构	$10^{10} \sim 5 \times 10^{10}$	短波	无线电广播、电报通信
$1 \sim 390$	紫外线	医用、照相制版	$5 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{11}$	中短波	电报通信
$390 \sim 770$	可见光		$2 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{12}$	中波	无线电广播
$770 \sim 10^6$	红外线	雷达、光纤通信、导航	$3 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{13}$	长波	越洋长距离通信和导航
$10^6 \sim 10^9$	微波	电视、雷达、无线电导航			

## 2.1.2 辐射度学和光度学基本知识

辐射度学是对光学辐射进行评价的一门科学。

光度学是可见辐射作用于人眼引起光的感觉,是一种生理效应,它与辐射的组成、强弱以及人的视觉器官的生理特性和人的心理活动都有关系。比如,人的眼睛可以感受到五颜六色的可见光,而狗的眼睛只能辨别亮度,也就是灰度。

为了对光辐射进行定量描述,需要引入计量光辐射的物理量。而对于光辐射的探测和计量,存在着辐射度学单位和光度学单位两套不同的体系。在辐射度学单位体系中,辐通量(又称为辐射功率)或者辐射能是基本量,是只与辐射客体有关的量。其基本单位是瓦特(W)或焦耳(J)。辐射度学适用于整个电磁波段。

光度单位体系是一套反映人类视觉亮暗特性的光辐射计量单位,被选作基本量的不是光通量而是发光强度,其基本单位是坎德拉。光度学只适用于可见光。

以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的,但所用的物理符号一一对应(表 2-2)。物理量符号角标“e”表示辐射度物理量,角标“v”表示光度物理量。

表 2-2 常用的光度量度和辐射度量

辐射度量				光度量			
名称	符号	定义	单位	名称	符号	定义	单位
辐射功率 辐通量	$\Phi_e, P$	以辐射的形式发射、传播或接收的功率	瓦	光通量	$\Phi_v$	根据辐射作用于人眼所产生的视觉效应来评价的辐射功率	流明
辐射强度 (点辐射源在给定方向的)	$I_e$	$I_e = d\Phi_e / d\Omega$ , $d\Omega$ 为包含 $d\Phi_e$ 的立体角元	瓦/球面度	发光强度 (点光源在给定方向的)	$I_v$	$I_v = d\Phi_v / d\Omega$ , $d\Omega$ 为包含 $d\Phi_v$ 的立体角元	坎德拉
辐射亮度 (辐射源表面一点在给定方向的)	$L_e$	$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos\theta}$ , $dS$ 为发出辐射的面元, $\theta$ 为 $dS$ 法线与给定方向间的夹角	$\frac{\text{瓦}}{(\text{球面度} \cdot \text{米}^2)}$	光亮度 (光源表面一点在给定方向的)	$L_v$	$L_v = \frac{dI_v}{dS \cdot \cos\theta}$ , $dS$ 为发光面元, $\theta$ 为面元法线与给定方向间的夹角	坎德拉/米 <sup>2</sup>
辐射出射度	$M_e$	$M_e = d\Phi_e / dS$ , $dS$ 为 $d\Phi_e$ 离开处的面元	瓦/米 <sup>2</sup>	光出射度	$M_v$	$M_v = d\Phi_v / dS$ , $dS$ 为 $d\Phi_v$ 离开处的面元	流明/米 <sup>2</sup>
辐射照度	$E_e$	$E_e = d\Phi_e / dS$ , $dS$ 为 $d\Phi_e$ 所照射的面元	瓦/米 <sup>2</sup>	光照度	$E_v$	$E_v = d\Phi_v / dS$ , $dS$ 为 $d\Phi_v$ 所照射的面元	流明/米 <sup>2</sup> , 勒克斯

注:在不会引起混淆的情况下,各种符号的下标“e”和“v”可以省去