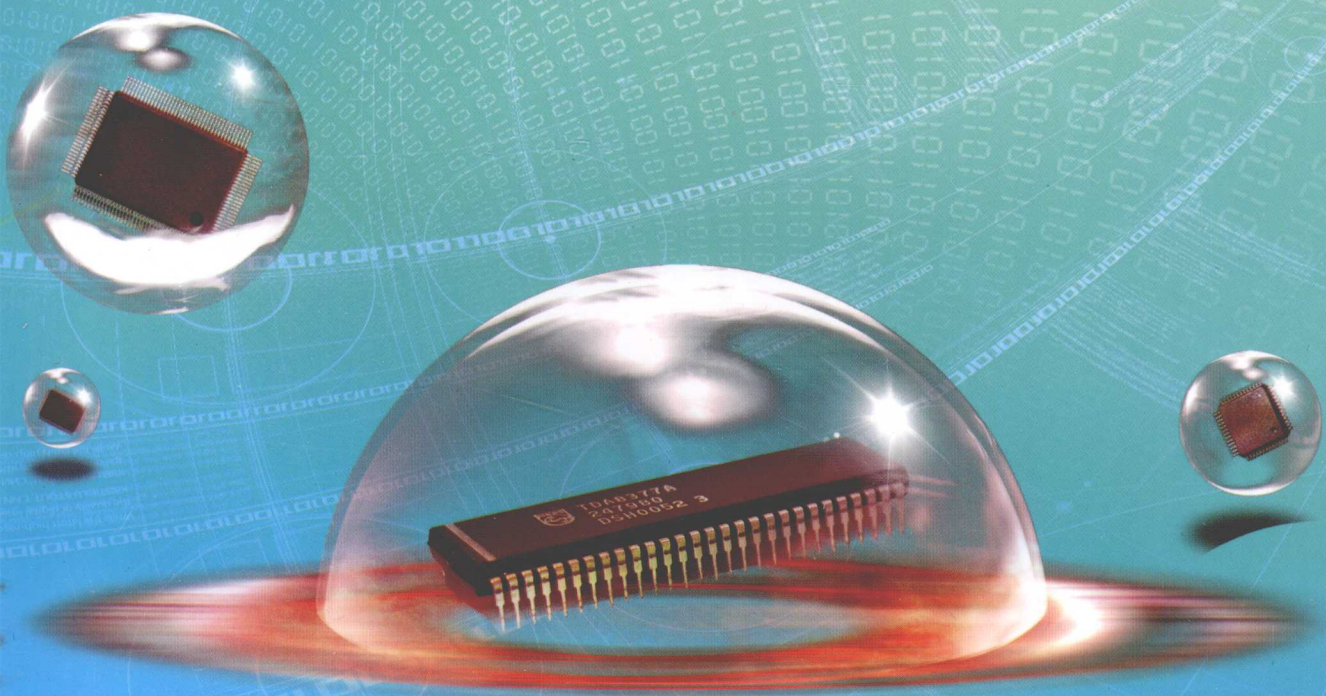


# 光电检测技术及应用

GUANGDIAN JIANCE JISHU JI YINGYONG

主编 王立刚



哈尔滨地图出版社

# 光电检测技术及应用

GUANGDIAN JIANCE JISHU JI YINGYONG

主 编 王立刚  
副主编 刘 洋 张 华 刘丽群  
刘松江 杨 旭  
主 审 牟海维

哈尔滨地图出版社

· 哈尔滨 ·

# 内 容 简 介

本书主要介绍光电检测的基础知识、常用光电传感器的工作原理及性能指标,对光电检测电路的设计进行了比较全面的介绍,重点介绍了单片机技术在光电检测电路中的应用。全书共分7章,第1章介绍了光电检测技术的基本概念,第2章介绍了光电检测技术的基础知识,第3~4章介绍了常用光电传感器的基本工作原理和性能指标,第5章介绍了光电检测电路的设计方法,第6章介绍了光电信号的数据采集与单片机接口技术,第7章介绍了光电检测技术的具体应用。上述理论与技术广泛地应用于信息、工业、军事、农业、安全等多个领域。

本书可作为电子科学与技术、应用物理、测控技术与仪器仪表、光电信息工程及光电一体化等专业的教材,也可作相关专业的本科生、研究生的教学参考书,亦可供相关工程技术人员的参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术及应用/王立刚主编. —哈尔滨:哈尔滨  
地图出版社,2009.7  
ISBN 978-7-5465-0111-6

I. 光… II. 王… III. 光电检测 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 129266 号

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址:哈尔滨市南岗区测绘路2号 邮政编码:150086)

哈尔滨海天印刷设计有限公司印刷

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:16.5 字数:420 千字

2009年7月第1版 2009年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5465-0111-6

印数:1~1 000 定价:28.00 元

# 前 言

随着微电子技术、微处理器技术、激光技术、人工智能技术及光电转换技术的不断发展和提高,光电检测技术在理论及应用方面都取得了巨大的进展。光电检测技术与微电子技术相结合、相互交叉、相互渗透,成为一门新兴的高新技术研究学科,成为现代信息科学的一个极为重要的组成部分。它将多方面技术相结合,广泛应用于工业、农业、家庭、医学、军事和空间科学等领域。掌握光电检测技术显得十分重要,光电检测技术主要研究光电信息的变换、获取、传输、处理和应用等。

本书根据电子科学与技术及应用物理专业的教学大纲的要求编写的。在编写的过程中本着科学、先进及实用的原则,注重实用性,注重现代技术的应用等。全书共分7章,全面地介绍了光电检测的基本概念,光电转换器件的工作原理与理论基础,光敏电阻、光电池、光电二(三)极管、PSD、光电倍增管、热电检测器件及CCD器件的特性,光电信号检测电路的设计,光电信号的数据采集与单片机接口电路,光电检测技术的典型应用等。

本书是以光电检测电路设计为核心,对光电检测的基本概念、光辐射的性质、光电器件的工作原理、常用光电器件的特性、光电检测电路的设计方法、数据采集与单片机接口及光电信息变换等内容进行了详细的讲解,同时列举了大量的实例,具有一定的实用和参考价值。

在本书的编写过程中,注意到以下几点:新思想及新技术的应用,如单片机及人工智能技术等;实用性强,如具体的光电转换电路及基于单片机的光检测电路的设计等;学生学完相关知识就能设计简单的光电检测电路;内容丰富,教师可根据课时的要求有选择地讲授相关内容,其他内容可供学生课外阅读,扩展学生的视野。

王立刚主编主要编写了第一章、第七章及各章的书后习题的内容,并对全书的内容进行统稿和设计;刘洋副主编主要编写了第二章和第三章的内容;张华副主编主要编写了第四章的4.1节至4.5节的内容;刘丽群副主编主要编写了第四章的4.6节至4.7节的内容以及第五章的5.1节至5.5节的内容;刘松江副主编主要编写了第五章的5.5节至5.9节的内容;杨旭副主编主要编写了第五章的5.10节至5.11节和第六章的内容。最后由牟海维教授进行审定,并提出了宝贵的修改意见。

本书在编写的过程中参考了近年出版的多部有关光电检测技术的教材及相关论文,在此对相关作者表示感谢。

作者:王立刚  
2009年6月

## 目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 基本的光电检测技术	(1)
1.1.1 光电检测的意义	(1)
1.1.2 光电检测技术的基本概念	(1)
1.1.3 光电检测系统的基本结构	(2)
1.1.4 光电检测技术的特点及发展趋势	(4)
1.2 光电信息变换的分类	(5)
1.2.1 光电信息变换的基本形式	(6)
1.2.2 光电信息变换的类型	(8)
1.3 智能光电检测技术的研究	(9)
1.3.1 智能光电检测	(9)
1.3.2 智能光电检测的可行性研究	(10)
1.3.3 智能光电检测电路的设计步骤	(11)
1.3.4 智能光电检测电路的优点	(12)
思考题与习题	(13)
第2章 光的基本知识	(14)
2.1 光的基本性质	(14)
2.1.1 光是一种电磁波	(14)
2.1.2 电磁波的波长范围	(14)
2.2 光辐射度量	(15)
2.2.1 光辐射度量	(15)
2.2.2 光谱辐射度量(辐射量的光谱密度)	(16)
2.3 温度辐射源及辐射特性	(17)
2.3.1 温度辐射与黑体辐射定律	(17)
2.3.2 维恩位移定律——黑体辐射谱的移动	(19)
2.3.3 朗伯余弦定律与朗伯余弦体	(20)
2.3.4 照度与距离平方反比定律	(21)
2.4 光度量	(21)
2.4.1 光谱光视效率	(21)

2.4.2 光度量的基本物理量	(22)
2.5 光辐射在空气中的传播	(24)
2.5.1 大气衰减	(24)
2.5.2 空气湍流效应	(25)
2.6 光电检测中的常用光源	(25)
2.6.1 光源的基本参数	(26)
2.6.2 光电检测中的常用光源	(27)
思考题与习题	(36)
第3章 常用光电检测器件工作原理及特性	(38)
3.1 常用光电器件的工作原理	(38)
3.1.1 半导体物理基础	(38)
3.1.2 能带理论	(39)
3.1.3 光电导效应	(39)
3.1.4 外光电效应	(42)
3.1.5 光生伏特效应	(43)
3.1.6 光热效应	(46)
3.2 光电检测器件的特性参数	(50)
3.2.1 有关响应方面的参数	(51)
3.2.2 光电器件的噪声参数	(52)
3.2.3 与噪声有关的参数	(54)
3.2.4 其他参数	(54)
思考题与习题	(56)
第4章 常用的光电器件	(57)
4.1 光敏电阻	(57)
4.1.1 光敏电阻的工作原理及结构	(57)
4.1.2 光敏电阻的参数	(58)
4.1.3 光敏电阻的特点	(63)
4.1.4 光敏电阻的应用	(63)
4.2 光电池	(64)
4.2.1 光电池的结构和工作原理	(64)
4.2.2 光电池的基本特性	(65)
4.2.3 光电池应用	(69)
4.3 光电二、三极管	(70)
4.3.1 结型光电器件工作原理	(71)
4.3.2 硅光电二极管	(72)
4.3.3 光敏二极管的类型	(77)

4.3.4	硅光电三极管	(78)
4.3.5	硅光电三极管与硅光电二极管特性比较	(79)
4.4	光电位置传感器	(83)
4.4.1	象限探测器	(83)
4.4.2	特殊结构的 PIN 型光电二极管——光电位置传感器(PSD)	(83)
4.5	光电倍增管	(88)
4.5.1	光电发射材料	(88)
4.5.2	光电倍增管(PMT)	(89)
4.5.3	PMT 的供电路	(94)
4.5.4	光电检测器件的选取	(96)
4.6	固体摄像器件工作原理及其参数	(97)
4.6.1	电荷耦合器件的工作原理	(97)
4.6.2	电荷耦合摄像器件(CCID)	(102)
4.6.3	电荷耦合器件的特性参数	(104)
4.7	热释电红外线传感器	(106)
4.7.1	热释电器件的优点与工作原理	(106)
4.7.2	热释电器件的性能指标	(108)
4.7.3	热释电器件的噪声	(109)
4.7.4	热释电器件的类型	(110)
4.7.5	典型的热释电器件	(112)
	思考题与习题	(115)
第5章	光电检测电路的设计	(119)
5.1	周期矩形脉冲信号的频谱分析	(119)
5.1.1	对脉冲信号波形进行分析	(120)
5.2	常用光电检测器件的性能比较和选择	(123)
5.2.1	光电器件性能的比较与选择	(123)
5.2.2	常用光电器件的主要特性参数的比较	(124)
5.3	放大器的特性	(127)
5.3.1	频率响应概述	(127)
5.3.2	单管共射放大电路的频率响应	(130)
5.3.3	多级放大电路的频率响应	(135)
5.3.4	电容的频率特性	(138)
5.4	集成放大器	(138)
5.4.1	信号放大器	(138)
5.4.2	仪用放大器	(142)
5.4.3	可变增益放大器	(143)

5.5 信号变换电路 .....	(144)
5.5.1 电压/电流变换器和电流/电压变换器 .....	(145)
5.6 缓变光信号检测电路设计 .....	(149)
5.6.1 缓慢变化信号常采用直流电路进行测量 .....	(149)
5.6.2 光伏型光电检测电路的静态计算 .....	(156)
5.6.3 可变电阻型光电检测电路的计算 .....	(160)
5.6.4 电桥输入电路的计算 .....	(162)
5.7 交变光信号检测电路设计 .....	(163)
5.7.1 光电信号输入电路动态工作状态的计算 .....	(164)
5.7.2 光电检测电路的频率特性 .....	(166)
5.8 交变光信号检测电路的设计 .....	(170)
5.8.1 单级交流放大电路的设计 .....	(171)
5.8.2 交变光电信号检测电路的设计 .....	(172)
5.9 光电信号检测电路的噪声估算 .....	(175)
5.9.1 检测电路的噪声等效处理 .....	(175)
5.9.2 典型光电检测电路的噪声估算 .....	(178)
5.10 前置放大器的噪声设计 .....	(179)
5.10.1 放大器噪声 .....	(180)
5.10.2 前置放大器的低噪声设计 .....	(181)
5.10.3 无源噪声的选取 .....	(183)
5.10.4 低噪声放大器的屏蔽与接地 .....	(183)
5.10.5 低噪声电路对电源电路的要求 .....	(184)
5.11 检测器件和放大电路的连接 .....	(184)
5.11.1 电流放大型 .....	(184)
5.11.2 电压放大型 .....	(184)
5.11.3 阻抗变换型 .....	(185)
<b>思考题与习题</b> .....	(185)
<b>第6章 光电信号的数据采集与微处理器接口技术</b> .....	(188)
6.1 光电信号处理 .....	(188)
6.1.1 光电信号的二值化处理 .....	(188)
6.1.2 视频信号的二值化处理 .....	(189)
6.1.3 光电信号二值化数据采集与接口 .....	(190)
6.2 模数转换 .....	(192)
6.2.1 采样 .....	(193)
6.2.2 A/D 转换的预处理电路 .....	(193)
6.3 A/D 转换器(ADC) .....	(195)



6.3.1	ADC 转换原理 .....	(195)
6.3.2	A/D 转换技术指标 .....	(197)
6.3.3	A/D 转换器选择原则 .....	(199)
6.3.4	ADC0809 芯片介绍 .....	(199)
6.4	ADC0809 与 AT89S51 接口电路的设计 .....	(202)
6.4.1	硬件电路的连接 .....	(202)
6.4.2	软件接口数据采集系统设计 .....	(203)
6.5	用 A/D 芯片进行电压测量 .....	(204)
6.5.1	实例功能 .....	(204)
6.5.2	器件和原理 .....	(204)
6.5.3	电路 .....	(211)
6.5.4	程序设计 .....	(212)
6.6	单片机系统中的电流检测 .....	(215)
6.6.1	实例功能 .....	(215)
6.6.2	器件和原理 .....	(215)
6.6.3	电路 .....	(217)
6.6.4	程序设计 .....	(219)
	思考题与习题 .....	(221)
第7章	光电检测技术的应用实例 .....	(222)
7.1	常用光电器件的简单应用 .....	(222)
7.1.1	光电二、三极管光电转换电路 .....	(222)
7.1.2	几种光电器件的简单应用 .....	(227)
7.2	基于单片机的光电检测电路设计应用实例 .....	(237)
7.2.1	特殊尺寸检测 .....	(237)
7.2.2	热敏电阻式温度检测 .....	(241)
7.3	基于光电二极管检测电路的噪声分析与电路设计 .....	(245)
7.3.1	光电二极管的噪声 .....	(245)
7.3.2	低噪声光电检测电路的设计 .....	(248)
	思考题与习题 .....	(250)
	参考文献 .....	(251)

# 第1章 绪 论

## 1.1 基本的光电检测技术

### 1.1.1 光电检测的意义

随着微电子技术、微处理器技术、激光技术、人工智能技术及光电转换技术的不断发展和提高,光电检测技术已成为一门新兴的高新技术研究学科,为现代信息科学的一个极为重要的组成部分。光电检测技术具有测量精度高、速度快、非接触、频带宽和信息容量极大、信息效率极高及自动化程度高等突出的特点,其发展十分迅速并推动着信息科学技术的发展。它将多方面技术相结合,广泛应用于工业、农业、医学、军事和空间科学等领域。在这些应用领域中,几乎都涉及将光辐射信息转换为电信息检测问题,表现出了其独特的优势。光电检测技术也是一门正在发展的技术,已成为信息技术中最活跃的高新技术之一。

随着激光技术的不断发展,光电检测技术在理论及应用方面都取得了巨大的进展,光电检测技术与微电子技术相互结合、相互交叉、相互渗透,形成了光电检测信息技术。通信中使用了光纤技术,促进了光技术的发展;激光器的发明使光波的调制与解调成为可能,进而使电子检测技术的各种基本知识,如放大与振荡、调制与解调等概念几乎都移植到了光频段。电子学与光子学之间的鸿沟在概念上正在逐渐消失,进而产生了光频段的光电检测技术。这一先进技术使人类能更有效地扩展自身的视觉能力,使视觉的长波延伸到亚毫米波,短波延伸到紫外、X射线,并可在超快速条件下检测诸如核反应、航空器发射等变化过程。光电检测技术具有非常广阔的发展空间,已经渗透到许多科学领域。

随着激光技术、半导体及微电子技术的发展,各种门类的光敏元件很多,如光敏二极管、光敏三极管、光电池、光控晶闸管、图像传感器、光纤位移传感器、光纤压力传感器、光纤光电开关、CCD器件和热释电传感器等。随着微处理器性能的提高和智能技术的发展,光电检测技术的智能性也在不断的提高,其应用范围越来越广,掌握光电检测技术显得十分重要。光电检测技术主要研究光电信息的变换、获取、传输、处理和应用等。

### 1.1.2 光电检测技术的基本概念

(1) 信息技术包括电子信息技术、光学信息技术和光电信息技术等。电子信息技术是以电子学方法来实现信息获取、加工、处理、传输、存储和显示的技术。目前,电子信息技术中最热而且影响最广泛的是微电子技术,它是通过控制固体内电子微观运动来实现对信息的加工和处理,即对信号处理与信号传播都是在微小尺寸内进行,也就是在微小的芯片上集成出来的。

(2) 光学信息技术是用纯光学方法实现信息获取、加工、处理、存储和显示的技术。如光

材料技术(光纤材料、激光材料等)、光器件技术(激光器、光耦合器、光调制器、光检测器、透镜、棱镜等)和光学系统技术。其中,光学系统技术包括光信息检测系统、光信息处理(光数据连接与交换、光联网、光图像处理等)、光计算(光计算机及与外围设备的连接)、光信息传输(远程传输、光空间通信等)和光存储(光盘)与显示技术(液晶显示、等离子显示)等。光学信息传输的速度快和容量大使光信息技术极具潜力,但现在还仍处于前期研究阶段。

(3)光电信息技术是将电子学与光学融为一体的技术,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(世界上运动速度最快的物质是光)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。

(4)光电检测技术是光电信息技术的主要技术之一,它主要包括光电变换技术、光信息获取与光信息测量技术以及测量信息的光电处理技术等。如用光电方法实现各种物理量的测量、微光弱光检测、红外检测、光扫描、光跟踪测量、激光测量、光纤测量、图像测量等。

(5)检测是分辨出被测参数所归属的某一范围带,以此来判断被测参数是否合格或现象是否存在。

(6)测量是把被测未知量与同性质的标准量进行比较,确定被测量相对标准量的倍数,并用数字表示这个倍数的过程。

测量方式:

1)间接测量 测量几个与被测量有关的物理量,通过函数关系计算出被测量值。如通过测量光电转换器件输出的电流和电压可计算出光的频率与波长等。

2)直接测量 在对被测量进行测量时,对仪表读数不经任何计算,直接得出被测的数值。如功率计可直接测量光的功率,测温仪可直接测量辐射场的温度等。

(7)传感器能接受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用于输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。

1)转换元件:指传感器中将敏感元件感受(响应)的被测量部分转换成适于传输和测量的电信号部分。

2)敏感元件:指传感器中能直接感受(响应)被测量部分的部件。

(8)光电传感器是基于光电效应,将光信号转换为电信号的一种传感器。广泛应用于自动控制、宇航和广播电视等各个领域。

### 1.1.3 光电检测系统的基本结构

(1)一般电子检测系统的基本结构,如图 1-1 所示。

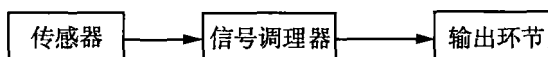


图 1-1 电子检测系统模型

由传感器、信号调理器及输出环节三部分组成。

传感器:处于被测对象与检测系统的接口处。

信号调理器:主要对检测到的信号进行放大、滤波、转换、数据处理等,最后传送给输出环节,数据类型由传感器和输出数据决定。

输出环节:主要包括显示、存储、通信接口、控制驱动等。

(2)一般光电检测系统的基本结构,如图1-2所示。

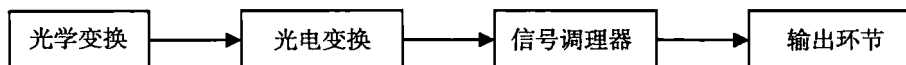


图1-2 光电检测系统模型

由光学变换、光电变换、信号调理器及输出环节四部分组成。

在图1-2中,光学变换通常是用各种光学元件及被测物来实现的,如平面镜、光狭缝、光楔、透镜、角锥棱镜、偏振器、波片、码盘、光栅、调制器、光成像系统、光干涉系统等,将被测量转换为光参量(振幅、频率、相位、偏振态、传播方向变化等);光电变换是用各种光电传感器来完成的,如光电二极管、光敏电阻、CCD器件、热释电器件、PSD器件等;信号调理器和输出环节与电子检测系统基本相同。

### (3)光电传感器接收光的形式

根据光源/光学系统和光电传感器放置的位置不同,光电传感器接收光的形式可分以下三种。

①直射型:光电传感器的光敏面对着光源放置,并使它们光轴重合,即光源为发射光通量最大方向,对于光电转换器件为灵敏度最高的方向。

使用时,因避免杂散光对测量的影响,一般可通过使用暗箱、提高光源强度、光通量调制和适当放置光源和光电传感器位置等办法。如在传送带上对物体计数测量、测量大物体时,应是杂散光方向与光源方向一致;如测量小物体时,应是杂散光方向与光源方向相反。

②反射型:可分为单项反射和漫反射两种。前者被测物表面光滑或贴上反射镜,光电传感器的光敏面正对着被测物的单向反射光;后者被测物表面粗糙,光电传感器接收被测物的漫反射光。

③辐射型:被测物本身就是一个辐射源,光电传感器的光敏面正对着被测物的辐射方向。

### (4)光电检测的基本方法

根据检测原理,光电检测的基本方法有直接作用法、差动测量法、补偿测量法和脉冲测量法等。

#### ①直接作用法

受被测量物理量控制的光通量,经光电传感器转换成电信号后,用检测电路可直接得到所求被测量物理量。此测量方法结构简单,但精度差,容易受环境、光源及电源波动等影响,适用于不需要测量精确数值的场合。如照明控制电路、各种报警电路等。

#### ②差动测量法

同一性质的光分成两路,一路进行标准测量,另一路是被测量通过检测电路,利用被测量与某一标准量相比较,所得差或数值比来反映被测量的大小。例如,用双光路差动测量法测量物体的长度。

#### ③补偿测量法

同一性质的光分成两路,一路进行标准测量,另一路是被测量通过检测电路,用光或电的方法补偿由被测量变化而引起的光通量变化,补偿器的可动元件连接读数装置指示出补偿量值,补偿的大小反映了被测量变化的大小,精度得到了提高,但速度受到了限制,适用于对速度要求不高的场合。

#### ④脉冲测量法

利用光或电的方法将通过被测量的光通量转换成相应脉冲,其参数(脉宽、相位、频率、脉冲数量等)反映了被测量的相关数值。

以上测量方法可参阅相关应用实例。

### 1.1.4 光电检测技术的特点及发展趋势

根据光电检测技术的原理和方法,其特点及发展趋势如下。

#### (1) 光电检测技术的特点

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 $0.05\ \mu\text{m}/\text{m}$ ;用激光测距法测量地球与月球之间距离的分辨率可达到 $1\ \text{m}$ 。

②高速度。光电检测以光为媒介,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。

#### (2) 光电检测技术的发展趋势

①发展纳米、亚纳米高精度的光电测量新技术。

②非接触、快速在线测量,以满足快速增长的商品经济的需要。

③发展小型的、快速的微型光、机、电检测系统。

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向目前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、遥测技术,激光制导,飞行物自动跟踪,复杂形体自动扫描测量等。

⑧向智能光电检测技术方向发展。

#### (3) 传感器技术的发展趋势

①传感器技术的共性:是利用物理定律和物质的物理、化学和生物特性,将非电量转换成电量(或它们之间的互相转换)。

②传感器技术总的趋势:是如何利用新技术、新材料以及探索新理论以达到高质量的转换性能。

#### ③传感器技术的主要发展趋势

A. 开展基础研究,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺。

发现新现象:物理现象、化学反应、生物反应是各种传感器工作的基本工作原理,发现新现象与效应是发展传感器技术的重要工作,是研究新传感器的重要基础。日本夏普公司利

用超导技术制造出高温超导磁传感器。

开发新材料:新材料是传感器技术的重要基础。

利用微细加工,如将半导体半加工方法(氧化、光刻、扩散、沉积平面电子工艺,各向异性腐蚀以及蒸镀、溅射薄膜工艺)应用于传感器,制造出各种新的传感器。

B. 实现传感器的高度集成化和智能化。

智能传感器:智能传感器是一种带微处理器的传感器,它兼有检测、判断和信息处理的功能,具有人工智能。

仿生传感器:模拟人的感觉器官的传感器,主要包括视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉等传感器。

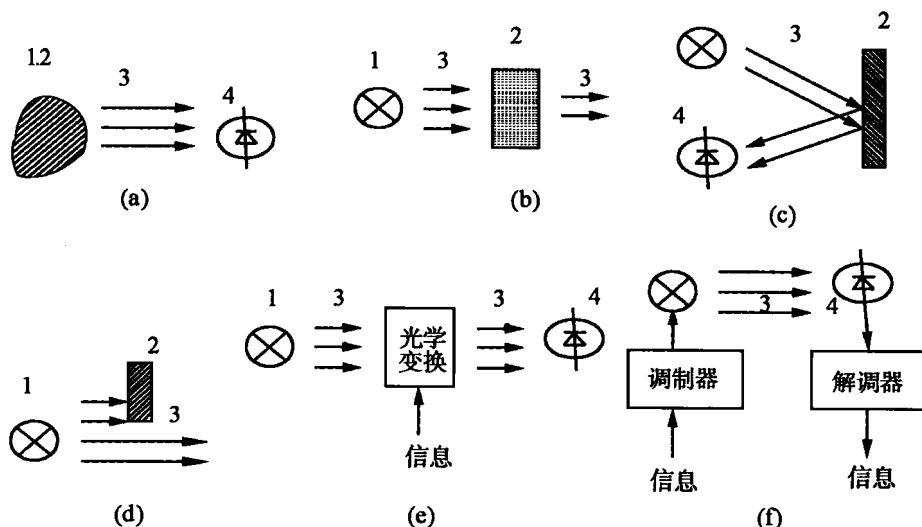
研究多功能集成传感器和新一代航天传感器。

传感器的性能和检测技术紧密相关,不同的传感器要求使用不同的检测方法,相反不同的检测技术对传感器的要求也不同。

## 1.2 光电信息变换的分类

光电信息变换可应用于许多技术领域,对于不同的应用,光电信息变换的内容、变换装置的组成和结构形式等均有所不同。可根据光学信息的类型,对光电信息变换的基本类型进行分类。

为了突出关键问题,我们将光学系统省略,用箭头表示光电信息的传输方向,并将所有类型的光电传感器都用光电二极管的符号代替,但是光电二极管符号中的正、负极将没有任何意义。可从两个方面来对光电信息变换进行分类:一方面根据信息载入光学信息的方式分为6种光电信息变换的基本形式(如图1-3所示)。



1. 光源;2. 变换对象;3. 光电信息;4. 光电器件

图1-3 光电信息变化的基本形式

另一方面,根据光电变换电路输出信号与信息的函数关系分为模拟光电变换与模-数光电变换两类。

### 1.2.1 光电信息变换的基本形式

#### (1) 信息载荷于光源的方式

图 1-3(a) 所示为信息载荷于光源中的情况(或光学信息为光源本身),如光源的温度信息、光源的频谱信息、光源的强度信息等。根据这些信息可以进行钢水温度的探测、光谱分析、火灾报警、武器制导、夜视观察、地形地貌普查和成像测量等。

物体自身辐射通常是缓慢变化的,因此,经光电传感器获得的电信号为缓变的信号或直流信号。为克服直流放大器的零点漂移、环境温度影响和背景噪声的干扰,常采用光学调制技术或电子斩波调制的方法将其变为交流信号,然后再解调出被测信息。

下面以全辐射测温为例讨论信息存在于光源中这类问题的处理方法。在全辐射测温应用中,温度信息存在于光源的辐射出射度  $M_{e,\lambda}$ , 物体的全辐射出射度  $M_{e,\lambda,s}$ , 与物体温度的关系为

$$M_{e,\lambda} = \varepsilon M_{e,\lambda,s} = \sigma T^4, \quad (1-1)$$

式中:  $M_{e,\lambda,s}$  为同温度黑体的辐射出射度;  $\varepsilon$  为物体的发射系数,与物体的性质、温度及表面状况有关;  $T$  为被测体的温度,即测量的信息量,  $\sigma$  是常数。

在近距离测量时,不考虑大气的吸收,光电传感器的变换电路输出的电压信号为

$$U_s = m\tau SGKM M_{e,\lambda} = \xi M_{e,\lambda}, \quad (1-2)$$

式中:  $m$  为光学系统的调制度;  $\tau$  为光学系统的透过率;  $S$  为光电器件的灵敏度;  $G$  为变换电路的变换系数;  $K$  为放大器的放大倍数;  $\xi = m\tau\varepsilon\sigma T^4$ , 称为系统的光电变换系数。

将式(1-1)代入式(1-2)得

$$U_s = \xi\varepsilon\sigma T^4. \quad (1-3)$$

表明变换电路输出的电压信号  $U_s$  是温度  $T$  的函数,温度变化必然引起电压的变化。因此,通过测量输出电压,并进行相应的标定就能够测出物体的温度。

#### (2) 信息载荷于透明体的方式

图 1-3(b) 所示为信息载荷于透明体中的情况。在这种情况下,透明体的透明度、透明体密度的分布、透明体的厚度、透明体介质材料对光的吸收系数等都可以载荷信息。

提取信息的方法,常用光通过透明介质时光通量的损耗与入射通量及材料对光吸收的规律求解。即

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\alpha l}, \quad (1-4)$$

式中:  $\alpha$  为透明介质对光的吸收系数,它与介质的浓度  $C$  成正比,即  $\alpha = \mu C$ 。显然,  $\mu$  为现介质性质有关的系数。式(1-4)可改写为

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\mu Cl}. \quad (1-5)$$

由式(1-5)可见,当透明介质的系数  $\mu$  为常数时,光通量的损耗与介质的浓度  $C$  及介质的厚度  $l$  有关,采用如图 1-3(b) 所示的变换方式,  $\xi$  为光电变换系数,则变换电路的输出信号电压为

$$U_s = \xi\varphi = \varphi_0 \xi e^{-\mu Cl}, \quad (1-6)$$

两边取自然对数后

$$\ln U_s = \ln U_0 - \mu Cl, \quad (1-7)$$

其中:  $U_0 = \Phi_0 \xi$ 。

即将变换电路的输出信号电压  $U_0$  送入对数放大器后, 便可以获得与介质的浓度  $C$  及介质的厚度  $l$  有关的信号。利用此信号可以方便地得到介质的浓度  $C$  (在介质的厚度  $l$  确定的情况下), 或得到介质的厚度 (在介质的浓度  $C$  确定的情况下)。

应用这种变换方式还可以测量液体或气体的透明度 (或混浊度), 检测透明薄膜的厚度、均匀度及杂质含量等质量问题。当然, 透明胶片的密度测量、胶片图像的判读等均可用这种方式。

### (3) 信息载荷于反射光的方式

图 1-3(c) 所示为信息载荷于反射光的方式。反射有镜面反射与漫反射两种, 各具有不同的物理性质和特点。利用这些性质和特点将载荷于反射光的信息检测出来, 实现光电检测的目的。镜面反射在光电技术中常用做合作目标, 用它来判断有无光信号等信息的检测。例如, 在光电准直仪中利用反射回来的十字叉丝图像与原十字叉丝图像的重叠状况判断准直系统的状况; 在迈克耳孙干涉仪中, 通过检测迈克耳孙干涉条纹的变化, 可以检测动镜位置的变化。另外, 镜面反射还用于测量物体的运动、转动的速度、相位等信息。而漫反射则不同, 物体的漫反射本身载荷物体表面性质的信息, 如反射系数、表面粗糙度及表面疵病的信息, 通过检测漫反射系数可以检测物体表面的粗糙度及表面疵病的性质。用这种方式可以对光滑零件表面的外观质量进行自动检测。

在检测产品外观质量时, 变换电路输出的疵病信号电压为

$$U_s = E(r_1 - r_2)B\xi, \quad (1-8)$$

式中:  $E$  为被测表面的照度;  $r_1$  为正品 (无疵病) 表面的反射系数;  $r_2$  为疵病表面的反射系数;  $B$  为光电器件有效视场内疵病所占的面积;  $\xi$  为光电变换系数。由式 (1-8) 可知, 当  $E$ ,  $r_1$  和  $\xi$  已知时, 输出电压  $U_s$  为  $r_2$  和  $B$  的函数, 因此, 可以通过输出信号电压  $U_s$  的幅度判断表面疵病的程度和面积。

除上述应用外, 这种方式还可应用于电视摄像、文字识别、激光测距、激光制导等方面。

### (4) 信息载荷于遮挡光的方式

图 1-3(d) 所示为信息载荷于遮挡光的方式。物体部分或全部遮挡入射光束, 或以一定的速度扫过光电器件的视场, 实现了信息载荷于遮挡光的过程。

例如, 设光电器件光敏面的宽度为  $b$ , 高度为  $h$ , 当被测物体的宽度大于光敏面的宽度  $b$  时, 物体沿光敏面高度方向运动的位移量为  $\Delta l$ , 则物体遮挡入射光束到光敏面上的面积变化为

$$\Delta A = b\Delta l. \quad (1-9)$$

变换电路输出的面积变化信号电压为

$$\Delta U = E\Delta A\xi = Eb\xi\Delta l. \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可见, 用这种方式既可以检测被测物体的位移量  $\Delta l$ 、运动速度  $v$  和加速度等参数, 又可以测量物体的宽度  $b$ 。例如, 光电测微仪和光电投影显微测量仪等测量仪器均属于这种方式。

当然, 这种方式也可用于产品的光电计数、光控开关和主动式防盗报警等。

### (5) 信息载荷于光学量化器的方式

光学量化是指通过光学的方法将连续变化的信息变换成有限个离散量的方法。光学量化器主要包括光栅摩尔条纹量化器、各种干涉量化器和光学码盘量化器等。

光信息量化的变换方式在位移量 (长度、宽度和角度) 的光电测量系统中得到广泛的应



用。长度或角度的信息量经光学量化装置(光栅、码盘、干涉仪等)变换为条纹或代码等数字信息量,再由光电变换电路变换为脉冲数字信号输出。如图 1-3(e)所示,光源发出的光经光学量化器量化后送给光电器件,转换成脉冲数字信号,再送给数字电路进行处理或送给计算机进行处理或运算。例如,将长度信息量  $L$  经光学量化后形成  $n$  个条纹信号,量化后的长度信息  $L$  为

$$L = qn。 \quad (1-11)$$

式中: $q$  称为长度的量化单位,它与光学量化器的性质有关,量化器确定后它是常数。例如,采用光栅摩尔条纹变换器时,量化单位  $q$  等于光栅的节距,在微米量级;而采用激光干涉量化器时, $q$  为激光波长的  $1/4$  或  $1/8$ ,视具体的光学结构而定。

目前,这种变换形式已广泛应用于精密尺寸测量、角度测量和精密机床加工测量的自动控制等方面。

### (6) 光通信方式的信息变换

目前,光通信技术正在蓬勃发展,信息高速公路的主要组成部分为光通信技术。光通信技术的实质是光电变换的一种基本形式,称为光信息通信的变换方式。如图 1-3(f)所示,信息首先对光源进行调制,发出载有各种信息的光信号,通过光导纤维传送到远方的目的地,再通过解调器将信息还原。由于光纤传输的媒体常为激光,它具有载荷量大、损耗小、速度快、失真小等特点,现已广泛地用于声音和视频图像等信息通信中。

## 1.2.2 光电信息变换的类型

从上面的六种变换方式可以看出,光电信息变换和信息处理方法可分为两类:一类称为模拟量的光电信息变换,如前四种变换方式;另一类称为数字量的光电信息变换,如后两种变换方式。

### (1) 模拟光电变换

被测的非电量信息(如温度、介质厚度、均匀度、溶液浓度、位移量、工件尺寸等)载荷于光信息量时,常以光度量(通量、照度和出射度等)的方式送给光电器件,光电器件则以模拟电流  $I_p$  或电压  $U_p$  信号的形式输出。即输出信号量是被测信号量  $Q$  的函数,或称输出信号量与被测信号量之间的关系为模拟函数关系。可表示为

$$I_p = f(Q), \quad (1-12)$$

或 
$$U_p = f(Q)。 \quad (1-13)$$

光电变换电路输出的电流  $I_p$  或电压  $U_p$  不仅与被测信息量  $Q$  有关,而且与载体光度量有关。因此,为保证光电变换电路输出信号与被测信息量  $Q$  的函数关系,载体光度量必须稳定。否则,载体光度量的变化直接影响被测信息量。另外,电路参数的变化,尤其是电源电压的波动、放大电路的噪声、放大倍率的变化等都将影响被测信号的稳定。而光度量的稳定又与光源、光学系统及机械结构等的性能有关。因此,实现稳定的、高精度的模拟光电信息变换常常遇到许多技术方面的困难,必须采用各种措施解决这些困难,才能获得高质量的模拟光电信息变换。

### (2) 模-数光电变换

在这类光电变换中,被测信息量  $Q$  通过光学变换量化为数字信息(包括光脉冲、条纹信号和数字代码等),再经光电变换电路输出。

模-数光电变换中的光电变换电路只要输出“0”和“1”(高、低电平)两种状态的脉冲即