 电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

光电检测技术及应用

周秀云 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

光电检测技术及应用

周秀云 张 涛 尹伯彪 黄建国 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书共分 10 章,理论与实践相结合,主要内容有:光电检测技术概述、光电检测常用光源、光电探测器概述及光电导探测器、光伏特探测器、光电发射器件、光电成像器件、非相干检测方法与系统、相干检测方法、光电检测技术的典型应用。概括地讲,本书内容包含 4 部分,即理论基础、各类电光与光电器件、光电变换检测技术与方法、典型应用。本书配有免费电子课件。

本书实用性强,适用面广,可作为高等院校光学技术与光电仪器、检测技术与自动化仪表、光电子技术、测控技术与仪器、光电信息工程、光学工程等专业的本科生和研究生教材,也是从事以上相关专业的工程技术人员与科技人员的参考书。本教材所介绍的测试技术,不仅适用于光电、测控技术与仪器行业,对机械、轻工、航天、计量、测绘等相关行业也有使用价值。

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

光电检测技术及应用 / 周秀云等编著. —北京:电子工业出版社, 2009.7

(电子信息与电气学科规划教材)

ISBN 978-7-121-08997-8

I. 光… II. 周… III. 光电检测—高等学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 090249 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:秦淑灵

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 印张:15.5 字数:397 千字

印 次:2009 年 11 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

光电检测技术是将光学与电子学技术相结合而产生的一门新兴检测技术，它展现出测量精度高、速度快、非接触、自动化程度高等突出的特点。特别是近年来，各种新型光电探测器件的出现，以及电子技术和微计算机技术的发展，使光电检测技术的内容更加丰富，应用越来越广，目前已渗透到几乎所有工业和科研部门。

“光电检测技术”课程在许多高等工科院校的光学技术与光电仪器、检测技术与自动化仪表、光电子技术、测控技术与仪器、光电信息工程、光学工程等专业都被选定为主修课程。全国高等院校仪器仪表类教学指导委员会曾建议编写“光电检测技术”教材，因此，编者联合四川大学测控技术与仪器专业教师编写此教材。

考虑到篇幅有限，本书主要介绍：光电检测系统基本构成和原理（第1章）、光电检测用光源（第2章）、光电探测器（第3、4、5章）、光电成像器件（第6章）、光电检测方法及系统（第7章和第8章），另外，为加深理解及开拓视野，最后两章（第9、10章）介绍了光电检测技术目前较新的综合应用系统。

本书从几个实例出发，引出一般光电检测系统的基本结构组成，然后分章节从一般光电系统的单元器件、成像器件、非相干光电检测方法、相干检测方法和典型系统，到学科方向较为前沿的现代光电检测技术，均有系统的介绍，即采用从系统到单元技术再到系统的编排体系。在结构体系上，本教材根据多位长期任课教师的授课经验与专家的意见，并结合目前较新的实际应用编写，安排较为流畅，学生易于理解；在内容上，本教材将理论与应用密切结合，对比编排，图表结合，论述深入浅出，并收集了许多近年来光电检测技术的相关资料和科研成果，极具使用价值和参考价值。

本书由电子科技大学自动化工程学院周秀云主编，四川大学激光应用研究所张涛任副主编。第1、2、3、4、5、7、8章由周秀云编写；第6章由四川大学激光应用研究所尹伯彪编写；第9、10章由张涛、尹伯彪、黄建国和周秀云共同编写。全书由电子科技大学吴健教授主审，参加审稿的还有电子科技大学黄建国教授和四川大学张涛副教授。

本书参阅了大量的参考资料，这些资料中卓越的研究成果，使本书内容更加丰满，在此向有关作者表示感谢。

由于水平有限，加之时间仓促，现代技术发展很快，书中难免存在错漏或不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2009.11

目 录

| | |
|-----------------------------------|------|
| 第 1 章 概述 | (1) |
| 1.1 引言 | (1) |
| 1.2 光电检测系统的基本构成和工作原理 | (2) |
| 1.2.1 光电检测系统的基本构成 | (2) |
| 1.2.2 光电检测系统的基本工作原理 | (5) |
| 1.2.3 光电检测系统的基本结构形式 | (6) |
| 1.3 光电检测技术的发展 | (9) |
| 习题与思考题 | (11) |
| 第 2 章 光电检测用光源 | (12) |
| 2.1 光的产生及光源分类 | (12) |
| 2.1.1 光的本质及产生 | (12) |
| 2.1.2 光源分类 | (13) |
| 2.2 光源的基本特性参数 | (13) |
| 2.2.1 辐射效率和发光效率 | (14) |
| 2.2.2 光谱功率分布 | (14) |
| 2.2.3 空间光强分布 | (15) |
| 2.2.4 光源的色温 | (15) |
| 2.2.5 光源的颜色 | (16) |
| 2.3 光电检测常用光源 | (16) |
| 2.3.1 热辐射光源 | (16) |
| 2.3.2 气体放电光源 | (18) |
| 2.3.3 固体发光光源 | (19) |
| 2.3.4 激光器 | (26) |
| 习题与思考题 | (30) |
| 第 3 章 光电探测器概述及光电导探测器 | (31) |
| 3.1 光探测器的物理基础 | (31) |
| 3.1.1 光电效应和光热效应 | (32) |
| 3.1.2 光电转换定律 | (33) |
| 3.2 光电探测器的特性参数 | (33) |
| 3.2.1 量子效率 | (33) |
| 3.2.2 灵敏度 | (34) |
| 3.2.3 响应时间 | (35) |
| 3.2.4 噪声等效功率 NEP 和探测率 D^* | (36) |
| 3.2.5 线性度 | (37) |
| 3.2.6 探测器噪声 | (37) |

| | |
|------------------------------------|--------------|
| 3.2.7 其他参数 | (40) |
| 3.3 光电导探测器 | (40) |
| 3.3.1 光电导效应 | (40) |
| 3.3.2 光敏电阻 | (41) |
| 习题与思考题 | (51) |
| 第4章 光伏特探测器 | (53) |
| 4.1 光伏特效应 | (53) |
| 4.2 光伏探测器的工作模式 | (55) |
| 4.3 光电池 | (56) |
| 4.3.1 硅光电池的基本结构和工作原理 | (57) |
| 4.3.2 硅光电池的特性参数 | (58) |
| 4.3.3 光电池偏置电路 | (61) |
| 4.3.4 光电池的应用 | (65) |
| 4.4 硅光电二极管和硅光电三极管 | (66) |
| 4.4.1 硅光电二极管结构及工作原理 | (66) |
| 4.4.2 硅光电三极管结构及工作原理(又称光电晶体管) | (67) |
| 4.4.3 硅光电二极管与硅光电三极管特性比较 | (68) |
| 4.4.4 光电二极管和三极管的偏置电路 | (72) |
| 4.4.5 光电二极管和三极管的应用 | (77) |
| 习题与思考题 | (84) |
| 第5章 光电发射器件 | (85) |
| 5.1 光电发射(外光电)效应 | (85) |
| 5.2 光电管 | (86) |
| 5.3 光电倍增管 | (87) |
| 5.3.1 光电倍增管的结构 | (87) |
| 5.3.2 光电倍增管的主要特性参数 | (88) |
| 5.3.3 光电倍增管的供电和信号输出电路 | (92) |
| 5.3.4 微通道板光电倍增管 | (95) |
| 5.3.5 光电倍增管的应用 | (95) |
| 5.4 各种光电探测器件的性能比较和应用选择 | (97) |
| 5.4.1 接收光信号的方式 | (97) |
| 5.4.2 各种光电探测器件的性能比较 | (97) |
| 5.4.3 光电检测器件的应用选择 | (98) |
| 习题与思考题 | (99) |
| 第6章 光电成像器件 | (100) |
| 6.1 光电成像器件概述 | (100) |
| 6.1.1 光电成像器件的类型 | (100) |
| 6.1.2 成像原理 | (101) |
| 6.1.3 光电成像器件的基本特性 | (102) |
| 6.2 真空摄像管 | (105) |

| | | |
|--------------|------------------------|--------------|
| 6.2.1 | 摄像管的基本原理 | (105) |
| 6.2.2 | 摄像管的性能参数 | (105) |
| 6.2.3 | 光电导式摄像管 | (108) |
| 6.2.4 | 光电发射式摄像管 | (110) |
| 6.3 | 电荷耦合器件 (CCD) | (112) |
| 6.3.1 | 电荷耦合器件工作原理 | (112) |
| 6.3.2 | 电荷耦合器件的特性参数 | (116) |
| 6.3.3 | 电荷耦合摄像器件 (ICCD) | (118) |
| 6.4 | 自扫描光电二极管阵列 | (124) |
| 6.4.1 | SSPD 线阵列 | (124) |
| 6.4.2 | SSPD 面阵列 | (128) |
| | 习题与思考题 | (131) |
| 第 7 章 | 非相干检测方法 with 系统 | (132) |
| 7.1 | 光电信号变换及光电检测系统分类概述 | (132) |
| 7.2 | 直接检测系统 | (133) |
| 7.2.1 | 直接检测系统的基本原理 | (134) |
| 7.2.2 | 直接检测系统的基本特性 | (134) |
| 7.3 | 随时间变化的光电信号检测方法 with 系统 | (136) |
| 7.3.1 | 幅值法 | (137) |
| 7.3.2 | 频率法 | (141) |
| 7.3.3 | 相位和时间测量法 | (142) |
| 7.4 | 空间分布的光电信号检测方法 with 系统 | (145) |
| 7.4.1 | 光学目标和空间定位 | (145) |
| 7.4.2 | 几何中心检测法 | (146) |
| 7.4.3 | 亮度中心检测法 | (150) |
| | 习题与思考题 | (158) |
| 第 8 章 | 相干检测方法 with 系统 | (159) |
| 8.1 | 相干检测的基本原理 | (159) |
| 8.1.1 | 光学干涉和干涉测量 | (159) |
| 8.1.2 | 干涉测量技术中的调制和解调 | (160) |
| 8.2 | 基本干涉系统 with 应用 | (161) |
| 8.2.1 | 典型的双光束干涉系统 | (161) |
| 8.2.2 | 多光束干涉系统 | (163) |
| 8.2.3 | 光纤干涉仪 | (164) |
| 8.3 | 同频率相干信号的相位调制 with 检测方法 | (165) |
| 8.3.1 | 相位调制与检测的原理 | (165) |
| 8.3.2 | 同频相干信号的检测方法 | (166) |
| 8.4 | 光外差检测方法 with 系统 | (168) |
| 8.4.1 | 光外差检测原理 | (168) |
| 8.4.2 | 光外差检测的特性 | (171) |

| | | |
|---------------|----------------------------------|--------------|
| 8.4.3 | 光外差检测条件 | (174) |
| 8.4.4 | 光外差检测的调频方法 | (176) |
| 8.4.5 | 光外差检测方法与应用 | (181) |
| | 习题与思考题 | (187) |
| 第 9 章 | 光电检测技术在机械领域的典型应用 | (188) |
| 9.1 | 双频激光干涉仪 | (188) |
| 9.1.1 | 双纵模双频激光干涉仪的组成 | (188) |
| 9.1.2 | 工作原理分析 | (189) |
| 9.2 | 表面粗糙度测量仪 | (191) |
| 9.2.1 | 光点变位法(三角法) | (192) |
| 9.2.2 | 临界角法 | (192) |
| 9.2.3 | 光纤传感器检测法 | (194) |
| 9.2.4 | 激光散射法 | (196) |
| 9.3 | 同轴式高分辨率激光轮廓仪 | (198) |
| 9.3.1 | 同轴式干涉轮廓仪工作原理 | (199) |
| 9.3.2 | 同轴式高分辨率激光干涉轮廓仪测量形状误差分析 | (199) |
| 9.3.3 | 测量精度分析 | (200) |
| 9.4 | 工业 CT(探伤) 涡流成像系统 | (203) |
| 9.5 | CCD 成像测量技术 | (205) |
| 9.5.1 | CCD 传感器检测玻璃管外径和壁厚 | (206) |
| 9.5.2 | CCD 钢板计数器 | (207) |
| 9.5.3 | 用 CCD 检测外圆直径 | (207) |
| | 习题与思考题 | (209) |
| 第 10 章 | 光电检测技术在其他方面的典型应用(二) | (210) |
| 10.1 | 光电检测技术在环保科学研究及工程领域的应用 | (210) |
| 10.1.1 | 光谱测试技术基础 | (210) |
| 10.1.2 | 大气质量中烟尘量检测 | (214) |
| 10.1.3 | 大气中有害气体含量监测 | (220) |
| 10.1.4 | 水质污染监测 | (222) |
| 10.2 | 光电检测技术在军事领域的应用 | (228) |
| 10.2.1 | 光电制导 | (228) |
| 10.2.2 | 激光雷达 | (229) |
| 10.3 | 光电检测技术在生物科学研究及医疗工程领域的应用 | (233) |
| 10.3.1 | 生物芯片检测技术概述 | (233) |
| 10.3.2 | 生物芯片检测装置 | (234) |
| 10.3.3 | 光电式血糖仪 | (237) |
| | 参考文献 | (239) |

第1章 概述

内容概要

光电检测技术将待测量转换成光学量，再经光电转换变成电信号，然后进一步处理得到测量结果，是检测技术的一个重要组成部分。常见的光电检测系统包括光源和照明光学系统、被测对象及光学变换、光信号的匹配处理、光电转换和电信号处理几个环节。根据工作原理可分为基于几何光学原理的光电检测系统和基于物理（波动）光学原理的光电检测系统。

学习目标

- 了解光电检测技术及系统的定义；
- 掌握光电检测系统的组成及各组成环节的主要功能；
- 掌握光电检测系统的主要分类。

1.1 引言

光电检测技术是研究光电检测系统的技术，所谓光电检测系统，是指对待测光学量或非光学待测物理量转换成的光学量，通过光电变换和电路处理的方法进行检测的系统。光电检测技术是检测技术的一个重要组成部分，是光学与电子学技术相结合而产生的一门新兴检测技术，其功能是利用电子技术对光学信息进行检测，并进一步传递、存储、控制、计算和显示等，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。

从原理上讲，光电检测技术可以检测一切能够影响光电或光特性的非电量，如位移、振动、力、转矩、转速、温度、压力、流量、液位、湿度、液体浓度、混浊度、成分、角度、表面粗糙度，乃至图像等。通过光学系统把待检测的非电量信息变换为便于接收的光学信息，然后用光电探测器件将光学信息量变换成电量，并进一步经电路放大、处理等，达到电信号输出的目的，这些信息变换技术和电信号处理技术便是光电检测技术的主要内容。它们包括各种类型的光学系统，种类繁多、功能各异的光电探测器件，以及各种电信号处理系统。

近年来，随着半导体工业的迅速发展，研究光电器件的光电子技术取得了巨大进展，各种新型光电探测器件应运而生，加之伴随出现的电子技术和微电脑技术的快速发展，光电检测系统的内容更加丰富，应用越来越广，目前已渗透到几乎所有的工业和科研部门。

1.2 光电检测系统的基本构成和工作原理

1.2.1 光电检测系统的基本构成

一个完整的检测系统，应包括信息的获取、变换、处理和显示四部分。下面通过一些例子来说明光电检测系统的主要构成。

1. 红外防盗报警系统

这是一种利用行动中人体自身的红外辐射，经菲涅耳透镜产生调制光信号，再经光电变换及电路处理，从而获得信息、产生报警的装置。其原理框图如图 1-1 所示。人体红外辐射经红外菲涅耳透镜 L 会聚到光电探测器 GD 上，并随着人的运动，进一步转换为交变的电信号输出。电信号经放大、鉴别后，控制警灯、警铃等装置进行报警。同时也可以利用报警信号进行其他后处理的控制，如关门、摄像、开高压等。

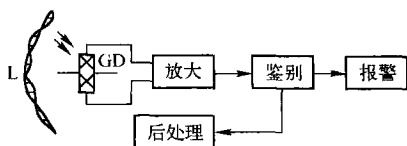
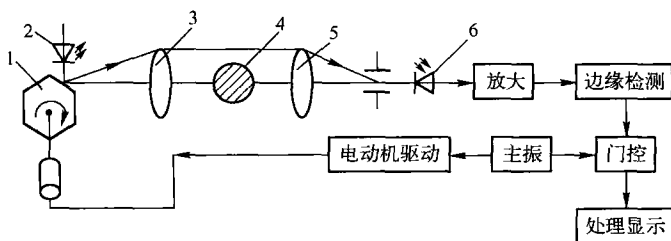


图 1-1 红外防盗装置原理框图

2. 激光外径扫描仪

图 1-2 所示为激光外径扫描仪原理图。它以半导体激光器 2 为光源，光源发出的光经过旋转多面反射棱镜体进行调制，形成一维扫描的光束，该扫描光束经过 $f(\theta)$ 透镜 3 以改善平行度，扫描被测工件 4；当光扫描至工件边缘时光通量发生变化，该变化的光通量被光电器件 6 转换为电信号，经过放大器和边缘检测而获得一个跳变的脉冲信号。当光继续扫描至工件 4 的另一个边缘时，光通量又出现从暗到亮的跳变，该光通量变化又被光电器件转换为跳变的电信号，同样经过边缘检测而获得另一跳变脉冲，由主振向两跳变脉冲间填充测量脉冲便可测出光扫描工件上下边缘的时间 Δt ，若光扫描工件的线速度 v 不变，则可测出被测工件尺寸 $D = v\Delta t$ 。



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

图 1-2 激光外径扫描仪原理图

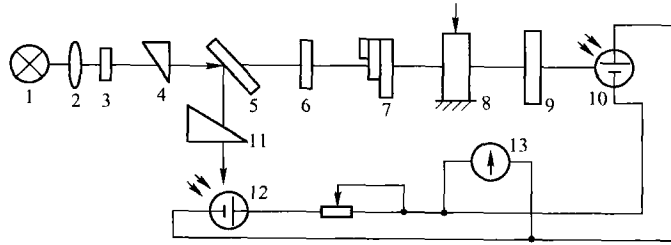
3. 光弹性效应测力计

光弹性效应测力计（或称光电测力计）的基本结构如图 1-3 所示。白炽灯 1 所发出的光经聚光镜 2、滤光片 3、减光楔 4、分束镜 5、起偏振镜 6、云母片 7，投射到测力元件 8

上。入射的线偏振光被待测外力所致双折射分成两个等幅的正交分振动，其中透过检偏振镜 9 的光信号，由光电池 10 转换为电信号，在检流计 13 上读数。根据光弹性效应测力原理可知，照射到光电池上的光强 I 为

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} CF \right)$$

式中， I_0 为起偏振镜 6 输出的光强； λ 为入射光波长； C 为与材料性质有关的系数， CF 为测力元件在外力 F 作用下产生的光程差。



1—白炽灯；2—聚光镜；3—滤光片；4,11—减光楔；5—分束镜；6—起偏振镜；7—云母片
8—测力元件；9—检偏振镜；10,12—光电池；13—检流计

图 1-3 光弹性效应测力计基本结构示意图

为了使 I 与 F 呈线性关系，光电测力计光路中放有若干云母片 7，用以产生附加光程差 Δ ，此时，光电池接收的光强为

$$I = K \frac{I_0}{2} \left[1 - \cos \frac{2\pi}{\lambda} (CF + \Delta) \right]$$

式中， K 为放入云母削弱光强的系数。如果使

$$\frac{2\pi}{3} \geq \frac{2\pi}{\lambda} (CF + \Delta) \geq \frac{\pi}{3}$$

即

$$\frac{\lambda}{3} \geq (CF + \Delta) \geq \frac{\lambda}{6}$$

则余弦函数在 $\pi/2$ 附近的变化率接近线性，即可得到预期的效果。

自分束镜 5 经减光楔 11 到光电池 12 的光路和自光电池 12 到检流计 13 的电路，构成补偿系统，其作用是抵消 $F = 0$ 时附加光程差 Δ 所产生的初始电流，使待测外力的读数从检流计标尺上的零值开始。

从上述几个简单的光电检测系统的例子中，可以大致归纳出这类系统的基本组成部分和原理框图，如图 1-4 所示，其基本组成部分可分为光源、照明光学系统、被测对象、光学变换、光信号匹配处理、光电转换、电信号的放大与处理、计算机、控制、存储和显示等部分。在该系统中，光是信息传递的媒介，它由光源产生。光源与照明光学系统一起获得测量所需的光载波。光载波与被测对象同时作用在光学系统上而将待测量载荷到光载波上，这称为光学变换。光学变换是用各种调制的方法来实现的。光学变换后的光载波上载荷有各种被测信息，称为光信息。光信息经光电器件实现由光向电的信息转换，称为光电转换。然后被测信息就可用各种电信号处理方法实现解调、滤波、整形、判向、细分等，或送到计算机进

行进一步的运算，直接显示待测量、存储或者控制相应的装置。

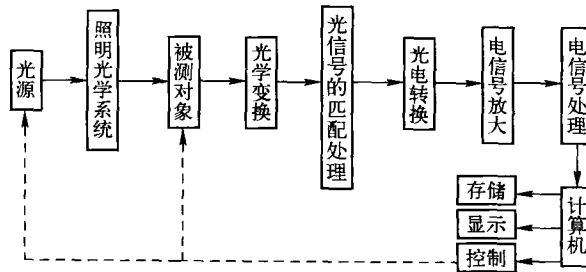


图 1-4 光电检测系统原理框图

按照不同的需要，实际的光电检测系统可能简单些，也可能还要增加些环节；有些系统可能前后排列不同，也可能几个环节合在一起，难以分开。图 1-4 只表征基本原理，而实际系统的形成是多样的、复杂的。

为了对光电检测系统有个大致的认识，下面对框图中的主要部分进行简单说明。

(1) 光源和照明光学系统

这是光电检测系统中必不可少的一部分。在许多系统中根据需选择一定辐射功率、一定光谱范围、一定发光空间分布的光源，以该光源发出的光束作为载体携带被测信息，如图 1-2 和图 1-3 所示的系统。有时光源本身就是待测对象，如图 1-1 所示的系统中，人体辐射就是光源。一般光源可以采用白炽灯、气体放电灯、半导体发光器、激光器等器件。有时光电系统需要足够的光照度，必须应用大孔径角的照明系统和适当的光源。照度的大小与光源的发光强度和光源的尺寸及聚光系统的特性有关。照明系统根据结构不同又可分为透射照明系统、反射照明系统和折反照明系统。图 1-2 中的 3 和图 1-3 中的 2 都是照明透镜，又称为聚光镜。

(2) 被测对象及光学变换

被检测对象即待测物理量，它们是千变万化的。光学变换所指的是上述光源所发出的光束在通过这一环节时，利用各种光学效应，如反射、吸收、折射、干涉、衍射、偏振等，使光束携带上被检测对象的特征信息，形成待检测的光信号。光学变换通常是用各种光学元件和光学系统（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）来实现将待测量转换为光参量（振幅、频率、相位、偏振态、传播方向变化等）的。在图 1-2 和图 1-3 所示的例子中，检测对象的待测物理量是工件尺寸和待测外力，它们分别通过光扫描至工件边缘时光通量的变化和外力，使测力元件发生光弹性效应而产生光信号。

光通过被检测对象这一环节，能否使光束准确地携带上所要检测的信息，是决定所设计检测系统成败的关键（实际上是用待测信息对光载波进行调制的）。

(3) 光信号的匹配处理

这一工作环节可以设置在被检测对象前面，也可以设置在光学变换后面，应按实际要求来决定。通常，在检测中，表征待测量的光信号可以是光强度的变化、光谱的变化、偏振性的变化、各种干涉和衍射条纹的变化，以及脉宽或脉冲数等。要使光源发出的光或产生的携带各种待测信号的光与光电探测器等环节间实现合理的、甚至最好的匹配，经常需要对光

信号进行必要的处理。例如，当光信号过强时，需要进行中性减光处理；当入射信号光束不均匀时，则需要进行均匀化处理；当进行交流检测时，需要对信号光束进行调制处理，等等。总之，光信号匹配处理的主要目的是为了地更好地获得待测量的信息，以满足光电转换的需要。光信号的处理主要包括光信号的调制、变光度、光谱校正、光漫射，以及会聚、扩束、分束等。使用的光学器件可以是透镜、滤光片、光阑、光楔、棱镜、反射镜、光通量调制器、光栅等。

以上讨论的三个环节往往紧密结合在一起，目的是把待测信息合理地转换为适于后续处理的光信息。

(4) 光电转换

该环节是实现光电检测的核心部分，其主要作用是以光信号为媒质，以光电探测器为手段，将各种经待测量调制的光信号转换成电信号（电流、电压或频率等），以利于采用目前最为成熟的电子技术进行信号的放大、处理、测量和控制等。光电检测不同于其他光学检测的本质就在于此。它将决定整个检测系统的灵敏度、精度、动态响应等，完成这一转换工作主要依靠各种类型的光电探测器，如光敏电阻、半导体光电管、光电池、真空管、光电倍增管、电荷耦合器件及光位置敏感器件等。各类探测器的发展和新型探测器的出现，都为光电检测技术的发展提供了有力的基础。

(5) 电信号的放大与处理

本部分主要由各种电子线路所组成。光电检测系统处理电路的主要任务是解决两个问题：①实现对微弱信号的检测；②实现光源的稳定化。其余方面与其他检测技术中的测量电路无太大区别。应当注意的是，虽然电路处理方法多种多样，但必须注意整个系统的一致性，也就是说，电路处理与光信号获取、光信号处理以及光电转换均应统一考虑和安排。

(6) 存储、显示与控制系统

许多光电检测系统只要求给出待测量的具体值，即将处理好的待测量电信号直接经显示系统显示。

在需要利用检测量进行反馈后实施控制的系统中，就要附加控制部分。如果控制关系比较复杂，则可采用微机系统给予分析、计算或判断等处理后，再由控制部分进行控制，这样的系统又称为智能化的光电检测系统。

1.2.2 光电检测系统的基本工作原理

光电检测系统是以光信息变换为基础，把待测量调制的光信号变换为电量来进行测量的，它的基本工作原理有以下两种。

1. 把待测量变换为光信息模拟量

它以光通量的大小来反映待检测量的大小。光电探测器的输出往往与入射到其光敏面上的光通量成正比，所以，光电探测器的光电流大小可以反映出待检测量的大小，即光电流 I 是待检测信息量 Q 值的函数：

$$I = f(Q) \quad (1-1)$$

这是一种模拟量信息变换。

显然，光电探测器输出的光电流 I 的大小，不仅与待检测信号的大小有关，而且与光源

的强度、光学系统和光电探测器的性能有关。为了使光电流 I 仅为待测信号 Q 的单值函数，首先要求光源的发光强度稳定，其次要求光电探测器的特性稳定，因此，基于这种工作原理的光电探测器，必须相应地采取一些稳定化措施，如采用差动式电路、光源供电电源的稳定化、光电探测器的筛选、光学系统和机构结构的可靠性设计等。

2. 把待检测量变换为光信息脉冲量

它以光脉冲或条纹数的多少来反映待测量的大小，光电探测器的输出为由低电平和高电平两个状态组成的一系列脉冲数字信息，这些数字信息量 T 是待测信息量 Q 的函数，即

$$T = f(Q) \quad (1-2)$$

这是一种模数信息转换。

显然，数字信息量只取决于光通量的有无，而与光通量的大小无关。因此，基于这种工作原理的光电检测装置，对光源和光电探测器的要求较低，只要有足够的光通量，能区分“0”和“1”两个状态即可。

1.2.3 光电检测系统的基本结构形式

对于不同的光电检测系统，光电变换装置的组成和结构形式有所不同。为了与人们已习惯的几何光学和物理光学的体系相对应，我们把光电变换的结构形式按几何光学变换的光电检测方法和物理光学变换的光电检测方法进行分类，基于上述两种工作原理，可归纳出以下基本结构形式。

1. 几何光学变换的结构形式

利用几何光学变换的光电检测方法，指将光学现象看做直线光束传输的结果，在几何光学意义上，利用光束传播的直线性、遮光、反射、折射、成像等光学变换方法进行的光电检测和控制。它主要包括光开关、光电编码、准直定向、瞄准测长、成像检查等方面。因此，相对应的结构形式有辐射式、反射式、遮挡式、透射式等。

(1) 辐射式

如图 1-5 所示，待测物 1 本身就是辐射源，根据辐射出的功率、光谱分布及温度等参数可以确定待测物的存在、所处的方位，根据光谱的分布情况等可以分析待测物的物质成分及性质，如辐射高温计、火警报警器、热成像仪、太阳能利用，侦察、跟踪、武器制导，地形地貌普查分析、光谱分析等。物体的辐射一般为缓慢变化量，所以经光电转换后的电信号也是缓慢变化量。为了克服直流放大器中零点漂移和环境温度的影响，减小背景辐射的噪声干扰，常采用光学调制技术或电子斩波器调制，然后通过滤波器可提高信噪比。

下面以全辐射测温为例说明这种方式的应用情况。

由斯忒藩-玻耳兹曼 (Stefan-Boltzman) 定律可知，物体的全辐射出射度为

$$M_e = \epsilon \sigma T^4 \quad (1-3)$$

式中， ϵ 为比辐射率，对于某一物体 ϵ 值为常数； σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数； T 为绝对温度。在近距离测量时，可不考虑大气对辐射的吸收作用，则光电探测器输出的电压信号为

$$U_s = M_e \beta$$

式中， β 为光电变换系数。将式 (1-3) 代入上式得

$$U_s = \varepsilon\sigma\beta T^4 \quad (1-4)$$

式(1-4)表明,光电探测器输出的电压信号 U_s 是温度 T 的函数,与温度 T 的4次方成正比。因此,可以通过测量输出电压 U_s 来测量辐射体的温度,也可以再经过对数放大器后,得到与温度 T 成线性关系的电压信号。

(2) 反射式

如图1-6所示,由待测物把光反射到光电接收器。反射面的状态可以呈光滑的镜面,也可以呈粗糙状。相应地,光的反射形式有镜面反射和漫反射两种。它们反射的物理性质不同,在光电检测技术中的应用机理也就不同。镜面反射的光按一定方向反射,它往往用来判断光信号的有无,因此可用于光电准直、电动机等转动物体的转速测量等方面。图1-7所示即为一个测量转速的应用实例,轴转动一周,光电探测器4就获得一个由光源1发出的反射光的脉冲,此脉冲数反映了轴的转速。为了加强光在待检测物上的反射作用,往往在待测物体上另加反射镜,图1-7中小平面镜3的作用就是增强反射性能。所谓漫反射,是指一束平行光照射到某一表面上时,光向各个方向反射出去的现象。因此,在漫反射某一位置上的光电探测器只能接收到部分反射光,接收到的光通量大小与产生漫反射的表面材料的性质、表面粗糙度以及表面缺陷等因素有关,因而采用这种方式可检测物体的外观质量。

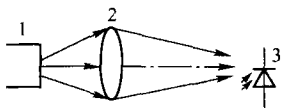


图 1-5 辐射式

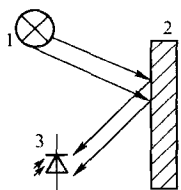


图 1-6 反射式

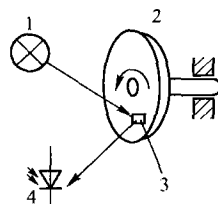


图 1-7 转速测量原理图

1—光源；2—转轴；3—小平面镜；4—光电探测器

在产品外观质量检测时,光电探测器的输出信号可表示为

$$U_s = E_v(r_2 - r_1)S\beta \quad (1-5)$$

式中, E_v 为被检测表面的光照度; r_2 为无缺陷表面的反射率; r_1 为缺陷表面的反射率; S 为光电探测器有效视场内缺陷所占面积; β 为光电变换系数。

由式(1-5)可知,当 E_v , r_2 和 β 为确定值时, U_s 仅与 r_1 和 S 有关,而缺陷表面反射率 r_1 与缺陷的性质有关。所以,从 U_s 的大小可以判断出缺陷的大小和面积。

这种光反射式检测原理,除上述应用实例外,还有激光测距、激光制导、主动式夜视、电视摄像、文字判度等方面的应用。

(3) 遮挡式

待测物遮挡部分或全部光束,或周期性地遮挡光束,如图1-8所示。根据被遮挡光通量的大小就可确定待测物的大小或待测物的位移量。设待测物体宽度为 b , 物体遮挡光的位移量为 Δl , 则物体遮挡入射到光电探测器上的光面积的增量 ΔS 为

$$\Delta S = \alpha^2 b \Delta l$$

式中, α 为光学系统的横向放大倍数。光电探测器输出位移量的电信号为

$$U_s = E_v \Delta S \beta = E_v \alpha^2 b \Delta l \beta \quad (1-6)$$

由式(1-6)可知,应用此种方式,可对物体的位移量和物体的尺寸进行检测,光电测微计和光电投影尺寸检测仪等均为此种方式。

如果待测物扫过入射光束,光电探测器接收到的光通量就要发生有、无两种状态的变化,输出的电信号为脉冲形式,根据被遮挡光束的次数就可确定待测物体的个数,或者待测物体的运动速度等,相应地可用于产品计数、光控开关以及防盗报警等。

(4) 透射式

光透过待测物体,其中一部分光通量被待测物体吸收或散射,另一部分光通量透过待测物体由光电探测器接收,如图1-9所示。被吸收或散射的光通量的数值决定于待测物的性质。例如,光透过均匀介质时,光被吸收,透过的光强可由朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律表示,即

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (1-7)$$

式中, I_0 为入射到待测介质表面的光强; α 为介质吸收系数; d 为介质厚度。

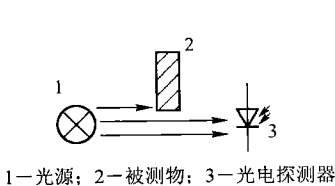


图 1-8 遮挡式

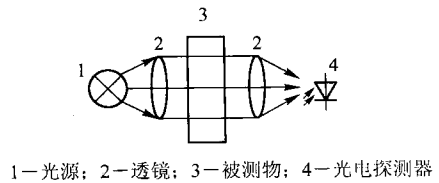


图 1-9 透射式

液体或气体介质的吸收系数 α 与介质的浓度成正比,因此,当介质(待检测物)的厚度 d 一定时,光电探测器上接收的光通量仅与待测介质的浓度有关。

这种方式可以用于检测液体或气体的浓度、透明度或浑浊度,检测透明薄膜厚度和质量,检测透明容器的缺陷,测量胶片的密度,以及胶片图像的判读等。

2. 物理光学变换的结构形式

利用物理变换的光电检测方法指将光学现象看做电磁波振荡传输的结果。在物理光学的意义上,利用光的衍射、干涉、光谱、能量、波长及频率等光学变换的现象和参量进行光电检测,主要包括光度、色度、光栅和干涉度量、衍射和散斑测量、光谱分析等方面。因此,相对应的常见结构形式有以下两种。

(1) 干涉式

如图1-10所示,由光源1发出的光线经过透镜2照射到分束器3(可以是半透明半反射的平面镜或棱镜)上,经分光面把光线分成两路,一路光线a射向平面反射镜4作为参考光,另一路光线b射向待测物5,从待测物中得到待测信息。例如,图1-10(a)中的待测信息可以是位移或振动等;图1-10(b)中的待测信息可以是待测物体折射率的变化,即浓度或成分变化的信息。光线a和b经过4和5后又一起射向光电探测器6,在光电探测器上可检测到干涉条纹信号。

因此,干涉法可用于检测位移、振动、液体的浓度、折射率等,它的检测灵敏度和精度很高,动态范围大,但结构和检测电路复杂,成本也很高。

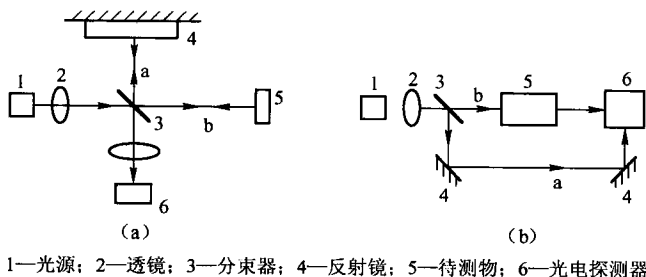


图 1-10 干涉式

(2) 衍射式

图 1-11 所示为衍射测量的基本原理。准直的平行激光束照射被测物体与固体参考物体之间所形成的间隙，当激光束通过间隙后，在远场接收屏上形成夫琅禾费衍射条纹。设激光波长为 λ ，激光通过的间隙为一宽度为 b 的单缝，当观察屏距离 $L \geq b^2/\lambda$ 时，所得到的衍射条纹光强分布为

$$\begin{cases} I = I_0 \frac{\sin^2 \varphi}{\varphi^2} \\ \varphi = \frac{\pi b}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \end{cases} \quad (1-8)$$

式中， θ 为衍射角； I_0 为 $\theta=0^\circ$ 时的光强。式 (1-8) 表示，衍射光强随 $\sin \varphi$ 的平方而衰减。当 $\varphi = \pm\pi, \pm 2\pi, \dots, \pm n\pi$ 时， $I = 0$ ，即出现衍射条纹的暗纹位置，且满足

$$b \operatorname{tg} \theta = n\lambda, n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-9)$$

而 $\operatorname{tg} \theta = x_n/L$ ， x_n 为第 n 级暗条纹与零级亮条纹中心的间距，因此由式 (1-9) 可知

$$b = \frac{Ln\lambda}{x_n} \quad (1-10)$$

该式即为测量狭缝间距的常用公式。

如果用光电转换元件在衍射场的确定位置监视条纹的移动，就像对干涉条纹计数一样，就可以利用式 (1-10) 测量尺寸 b 的变化量或者位移。

因此，应用这种方法可以进行大尺寸的比较测量、工件形状的轮廓测量以及位移应变测量等。

1.3 光电检测技术的发展

可以说科学技术由测量开始，至测量结束，其测量目的是获得关于研究对象的各种信息，以便根据所得的信息控制研究对象。随着现代科学技术的发展，在测量和控制方面，测量的对象显著增加，测量的要求越来越高，它们都要求迅速而正确地获得多个不同性质的信息参量，对检测技术提出了非接触化、小型化、集成化、数字化、智能化等要求。非接触化正是光电检测技术的特点所在，其他几个方面的要求，随着光电子技术的发展以及各种新型