

普通高等教育规划教材

光电检测技术与系统

Optoelectronic Measurement Technology and System

刘铁根 ○ 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材

光电检测技术与系统

刘铁根 主 编



机械工业出版社

利用光学原理进行精密检测的光学检测技术与光电变换相结合构成光电检测技术。光电检测技术是对光学量及大量非光学物理量转换成光学量进行测量的重要手段。本书从光电检测系统的角度编写, 主要强调光电检测方法和系统, 如各种光电检测方法、系统选择、系统构成、系统实现及系统应用等。

本书以应用光学和物理光学为基础, 介绍了光电检测技术与系统的主要知识体系, 共分 10 章。主要内容包括: 光电检测技术与系统的基本概念、发展现状及常用的检测方法; 光电检测系统的发光光源和光电接收系统; 分别从光电信息检测、光电图像检测、光电干涉检测、光电衍射检测、光学扫描检测、光纤传感检测、光谱检测七个方面介绍了各光电检测领域的基本知识、检测方法、检测系统构成及应用。每章后面均附有本章参考文献, 以便读者查阅。

本书内容新颖、全面, 论述翔实, 深入浅出, 理论与实践相结合, 实用性强, 可作为光学工程、光科学与技术、光电子技术、测控技术专业的本科生、研究生的教材, 同时也可供相关专业的科研及工程技术人员在工作中学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

光电检测技术与系统/刘铁根主编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 9

(普通高等教育规划教材)

ISBN 978-7-111-28116-0

I. 光… II. 刘… 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 148463 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: 王小东 贡克勤 责任编辑: 王小东

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 王伟光 责任印制: 杨 曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2009 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·465 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-28116-0

定价: 34.00 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

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着现代科学技术和工业技术以及信息处理技术的发展,光电检测技术与系统作为一门研究光与物质相互作用发展起来的新兴学科,已经成为现代信息科学的一个极为重要的组成部分。光电检测技术利用光学原理和光电变换技术进行精密检测,具有精度高、速度快、非接触、信息量大、自动化程度高等突出特点,发展十分迅速,并推动着信息科学技术的发展,广泛应用于工业、农业、国防、科教等领域,以及家庭、医疗等社会生活的各个方面,是研究和应用的热点。本书是作者在近年来从事光电检测技术研究的基础上,吸收了国内外同仁相关研究成果,根据教学与科研工作的需要,从光电检测系统的角度编写而成的。

本书首先以光学知识为基础,系统地讲解了光电检测技术与系统的主要知识体系。第1章介绍了光电检测技术与系统的基本概念、发展现状和常用的检测方法,使读者对光电检测技术与系统有基本的了解。第2章介绍了常用光源的分类、光源特性参数和各种相干与非相干光源。第3章介绍了光电接收系统和各种光电接收器件。第4章主要介绍了像传感技术、信息扫描(主要是三维信息扫描)技术和光信息处理技术。第5章重点介绍了基于PC的图像检测系统的原理及应用,以及基于DSP和FPGA的嵌入式图像检测系统。第6章主要介绍了光干涉的基本理论、典型的光干涉检测技术与系统及其应用。第7章重点介绍了激光衍射检测技术、激光衍射检测系统及其应用。第8章介绍了光学扫描检测技术与系统及其应用。第9章详细介绍了光纤传感检测理论和典型的光纤传感检测系统。第10章主要介绍了光谱检测技术和新型的激光光谱检测技术及其应用。

本书由刘铁根教授主编,江俊峰副教授、田庆国、李秀艳、张明江、陈信伟、邓仕超、李志宏、梁燕、侯丽丽、李元耀、周怡洁、兰寿峰、阳鑫、李海伟、梁雨、丁振扬、徐铁龙、霍晓飞、万木森、郭晶晶、刘琨等参与了编写。在编写过程中得到了机械工业出版社的大力帮助,在此表示衷心感谢。

在编写中,我们努力使得本书所有的内容都是最新的和实用的,在理论方面力求简明易懂,力求紧跟技术发展方向,以激发学生的学习兴趣,培养学生的实际应用能力。

由于编写的时间仓促以及光电检测技术的不断发展,书中难免有不足或者错误之处,诚恳希望读者给予批评和指正,以便于提高水平,把更好更新的内容呈献给大家。

编著者

目 录

前言

第 1 章 综述 1

1.1 光电检测技术的研究领域与特点 2

1.1.1 光电检测技术的研究领域 2

1.1.2 光电检测技术的特点 3

1.2 光电检测技术的发展现状 4

1.3 光电检测的方法 5

1.4 学习要求 7

本章参考文献 7

第 2 章 光电检测系统的发光光源 8

2.1 光源的分类以及光源的特性参数 8

2.1.1 光源的分类 8

2.1.2 光源的特性参数 9

2.2 非相干光源 11

2.2.1 气体放电光源 11

2.2.2 场致发光光源 14

2.3 相干光源 16

2.3.1 氦-氖激光器 16

2.3.2 半导体激光器 20

2.3.3 可调谐激光器 31

2.4 宽带低相干光源 36

2.4.1 发光二极管 36

2.4.2 超辐射发光二极管 41

2.4.3 掺杂光纤超荧光宽带光源 44

本章参考文献 46

第 3 章 光电检测系统的光电

接收器件 47

3.1 光电接收系统概述 47

3.1.1 光电效应 47

3.1.2 光电器件的特性参数 49

3.2 光电接收系统的分类 53

3.2.1 常用光电接收器件的分类 53

3.2.2 外光电效应器件 53

3.2.3 光电导效应器件 57

3.2.4 光生伏特效应器件 60

3.2.5 红外热释电器件 70

3.2.6 固态图像传感器器件 74

本章参考文献 83

第 4 章 光电信息检测技术与系统 85

4.1 光电信息检测技术与系统概述 85

4.1.1 光电信息检测系统的基本组成 85

4.1.2 光电信息检测技术的主要用途 86

4.1.3 光电信息检测技术的发展趋势 87

4.2 像传感检测技术 87

4.2.1 像传感检测技术的基本原理 87

4.2.2 像传感检测技术的应用 88

4.3 信息扫描检测技术 91

4.3.1 图像信息扫描技术 91

4.3.2 医用信息扫描技术 92

4.3.3 三维信息扫描技术 94

4.4 光信息处理检测技术 98

4.4.1 光信息处理检测技术简介 98

4.4.2 光信息处理检测的基本知识 98

4.4.3 光信息处理检测技术的应用 105

本章参考文献 114

第 5 章 光电图像检测技术与系统 117

5.1 光电图像检测系统 117

5.1.1 光电图像检测系统概述 117

5.1.2 光电图像检测技术的发展 119

5.1.3 光电图像检测系统中的 光源选取 120

5.2 基于 PC 的光电图像检测系统 123

5.2.1 计算机视觉图像检测系统的 原理 125

5.2.2 计算机视觉图像检测系统的 举例及应用 128

5.3 嵌入式光电图像检测系统 134

5.3.1 嵌入式图像检测技术的原理 134

5.3.2 嵌入式图像检测系统的 应用实例 140

本章参考文献 147

第 6 章 光电干涉检测技术与系统 148

6.1 光干涉的基本理论 148



6.1.1 光波干涉的基本公式与 相干光的获得	148	8.4.3 激光扫描定位技术	219
6.1.2 部分相干理论	149	8.4.4 表面特征扫描检测技术	221
6.2 典型的光学干涉系统	154	8.5 光学扫描检测技术的应用	223
6.2.1 迈克尔逊干涉仪	154	8.5.1 激光打印机	223
6.2.2 法布里-珀罗干涉仪	155	8.5.2 条形码扫描	224
6.2.3 马赫-曾德尔干涉仪	155	8.5.3 空间 OCT 三维扫描	225
6.2.4 塞纳克干涉仪	156	本章参考文献	225
6.3 现代光电干涉检测技术与系统的 应用	157	第 9 章 光纤传感检测技术与系统	226
6.3.1 典型的光电干涉检测技术	157	9.1 光纤传感检测技术与系统概述	226
6.3.2 微表面形貌检测技术	158	9.2 光纤的传输理论	228
6.3.3 激光散斑干涉检测技术	164	9.2.1 光纤的结构和分类	228
6.3.4 激光偏振干涉仪	168	9.2.2 光纤中光的传输及性质	230
6.3.5 干涉光谱仪	170	9.3 光纤传感检测原理	235
6.3.6 激光瞬态干涉仪	176	9.3.1 光纤传感检测技术	235
6.3.7 白光干涉	180	9.3.2 光纤传感检测系统的光源和 无源器件	237
6.3.8 OCT 技术	184	9.4 光纤传感检测的应用与典型的 光纤传感检测系统	242
本章参考文献	186	9.4.1 光纤传感检测系统的应用	242
第 7 章 光电衍射检测技术与系统	188	9.4.2 典型的光纤传感检测 系统——光纤光栅	245
7.1 激光衍射检测的原理	188	9.4.3 光纤传感检测的发展趋势	251
7.2 激光衍射检测技术	189	本章参考文献	252
7.2.1 激光衍射检测技术的基本方案 及其分析	189	第 10 章 光谱检测技术与系统	257
7.2.2 激光衍射检测技术的具体方法 及其分析	190	10.1 激光光谱学和激光光谱检测 技术概述	257
7.2.3 测量精度与最大量程	201	10.2 激光喇曼光谱检测技术	257
7.3 激光衍射检测系统	203	10.2.1 激光喇曼光谱	257
7.4 激光衍射检测技术与系统的实际 应用	204	10.2.2 几种激光喇曼光谱技术	258
7.4.1 微小尺寸的测量及传感器的 构造	204	10.2.3 激光喇曼光谱检测技术的 应用简介	264
7.4.2 液体表面波特性检测	205	10.3 荧光光谱检测技术	268
7.4.3 粒度分布的测量	207	10.3.1 荧光光谱的基本原理	268
7.4.4 红细胞几何尺寸的测量	208	10.3.2 X 射线荧光光谱检测技术	269
本章参考文献	209	10.3.3 激光原子荧光光谱检测	270
第 8 章 光学扫描检测技术与系统	210	10.3.4 激光离子荧光光谱检测	273
8.1 光学扫描检测技术与系统概述	210	10.4 THz 检测技术	277
8.2 光学扫描系统	210	10.4.1 THz 辐射的基本情况和 主要特征	277
8.3 扫描物镜—— $f\theta$ 物镜	212	10.4.2 THz 时域光谱探测技术	280
8.4 光学扫描检测技术	215	10.4.3 THz 相关探测技术	282
8.4.1 激光扫描检测技术	215	10.4.4 THz 成像技术	284
8.4.2 相位调制扫描技术	217	10.4.5 THz 检测技术存在的	



问题及展望	285	10.5.2 超短光脉冲光谱检测技术	287
10.5 其他实用激光光谱检测技术		10.5.3 光电流光谱检测技术	288
和应用	286	10.5.4 激光光谱用在大气污染监测	290
10.5.1 激光光声光谱检测技术	286	本章参考文献	292

第 1 章 综 述

所谓光电检测技术与系统，是指对待测光学量或由非光学待测物理量转换成光学量，通过光电变换和电路处理的方法进行检测的技术与系统。光电检测技术是各种检测技术的重要组成部分。现代控制的自动化程度高、速度快、精度高，而且越来越依赖于非接触测量，而光电检测技术具有上述突出特点，令其发展十分迅速。20 世纪 70 年代的传统光学仪器（照相、光谱、色度、计量、检测）已发展到今天的光、机、电、算一体的智能仪器，出现了光电信息技术，而且从仪器设计转变为强调技术研究。信息时代，光电检测更是不可或缺的，它关系到信息的提取（获得）。特别是近年来，各种新型光电接收器件的出现，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愈加丰富，应用越来越广，目前已渗透到几乎所有工业和科研部门。

典型的光电检测系统的组成结构示意图如图 1-1 所示。光电检测系统的功能框图如图 1-2 所示。

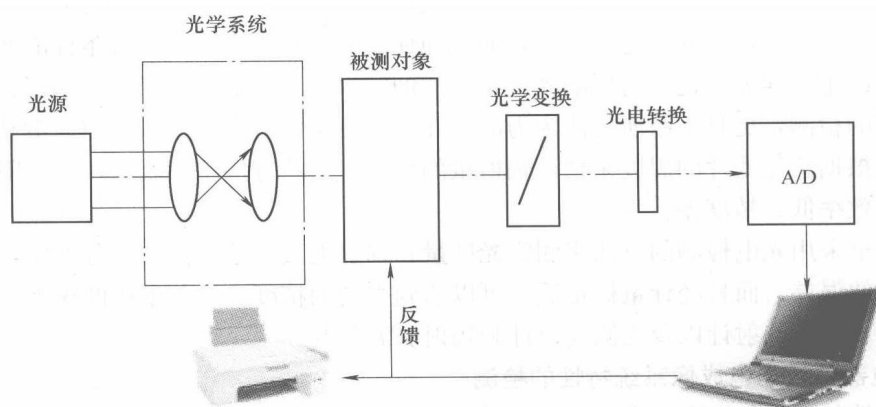


图 1-1 典型的光电检测系统的组成结构示意图

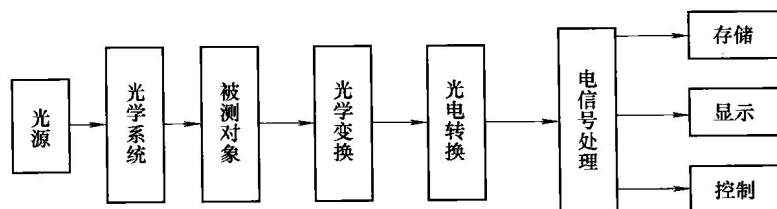


图 1-2 光电检测系统的功能框图

由图 1-1、图 1-2 中可以看出：光源以及光学系统一起获得测量所需的光载波，如激光、平行光照明乃至均匀光照明等；光载波与被测对象相互作用而将被测量载荷到光载波上，称为光学变换，光学变换可用各种调制方法实现；光载波上载荷的各种被测信息经光电器件实现光向电的转换，称为光电转换；然后被测信息通过各种电信号处理的方法实现解调、滤

波、整形、判向、细分等，送到计算机进一步运算处理，最后直接显示或存储被测量^[1]，或者去控制相应的装置。

本书将要阐述的不是某个局部而是整体，即强调光电检测的技术与系统，侧重整体的功能，因此，图 1-2 所示框图各个部分的更进一步的原理或器件介绍，可参看专门的书籍。

1.1 光电检测技术的研究领域与特点

1.1.1 光电检测技术的研究领域

光电检测技术是光电信息技术之一，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。例如，用光电方法实现各种物理量的测量，微光、弱光、红外光测量，光扫描、光电跟踪测量，激光测量，光纤测量，图像测量，光谱检测等。光电检测技术已应用到各个科技领域中，可实现各类物理量的在线和自动检测，是近代科技发展中最重要方面之一。根据检测对象性质，光电检测技术的研究领域可分为直接光学量检测领域和非光学量检测领域。

1. 光度量和辐射度量的检测

光度量是以平均人眼视觉为基础的量，即利用人眼的观测，通过对比的方法确定光度量的大小。但由于人与人之间视觉的差异，而且即使是同一个人，由于自身条件的变化，也会引起视觉上的主观误差，这都将影响光度量检测的结果。至于辐射度量的检测，特别是对不可见光辐射的检测，更是人眼所无能为力的。在光电方法没有发展起来之前，常利用照相底片感光法，根据感光底片的黑度来估计辐射量的大小。这些方法手续复杂，且局限在一定光谱范围内，效率低、精度差。

目前大量采用光电检测的方法来测定光度量和辐射度量。这种方法十分方便，能消除主观因素带来的误差，而且经计量标定后，可以达到很高的精度。目前常用的这类仪器有光强度计、光亮度计、辐射计以及光测高温计和辐射测温仪等。

2. 光电器件及光电成像系统特性的检测

光电器件包括各种类型的光电、热电探测器和各种光电成像器件。它们本身就是一个光电转换器件，其使用性能由它们的特性参量来决定，如光谱特性、光灵敏度、亮度增益等。这些参量的具体数值必须通过检测来获得。实际上，每个特性参量的检测都是一个光电检测系统，只是这时被检测的对象就是光电器件本身罢了。

光电成像系统包括各种方式的光电成像装置，如直视近红外成像仪、立视微光成像仪、微光电视、热释电电视、CCD 成像系统和热成像系统等。在这些系统中，各自都有一个实现光电图像转换的核心器件。这些系统的性能也是由表征系统的若干特性参量来确定的，如系统的亮度增益、最小可分辨温差等。这些特性参量的检测也是由一个光电检测系统来完成的。

3. 光学材料、光学元件及系统特性的检测

光学仪器及测量技术中所涉及的材料、元件和系统的测量，过去大多采用目视检测仪器来完成，它们是以手工操作和目视为基础的。虽然这些方法有的仍然有很大的作用，但是大部分都存在着效率低和精度差的缺点，而且随着工程光学系统的发展，有一些特征检测已经很难用手工和目视方法来完成了。因此，这就要求用光电检测的方法来代替，以提高检测性

能。例如,材料、元件的光谱特性,光学系统的调制传递函数,大倍率的减光计等,这些都需要通过光电检测的方法来实现测量。另外,随着光学系统光谱工作范围的拓宽,紫外、红外系统的广泛使用,对这些系统的性能及其元件、材料等的特性也不可能用目视的方法检测,而只能借助于光电检测系统来实现。

光电检测技术引入光学测量的领域后,许多古典光学的测量仪器得到了改造,如光电自准直仪、光电瞄准器、激光导向仪等,使这一领域产生了深刻的变化。

4. 非光学物理量的光电检测

这是光电检测技术当前应用最广,发展最快的领域。这类检测技术的核心是如何把非光学物理量转换为光信号。主要方法有两种:

- 1) 将非光学量转换为光学量,通过对光学量的检测,实现对非光学物理量的检测。
- 2) 使光束通过被检测对象,让其携带待测物理量的信息,通过对带有待测信息的光信号进行光电检测,实现对待测非光学物理量的检测。

这类光电检测所能完成的检测对象十分广泛。例如,各种射线检测;各种几何量的检测,包括长、宽、高、面积等参量;各种物理量的检测,包括质量、应力、压强、位移、速度、加速度、转速、振动、流量,以及材料的硬度和强度等参量;各种电量与磁量的检测;温度、湿度,材料浓度、成分等参量的检测。

光电检测技术的出现适应了近代科学和工业技术提出的高灵敏度、高效率、自动化的测量要求,实现了测量的三维性、实时性和相关性。例如,亚微米、纳米级灵敏度的测量,以及无损检测、在线光学诊断等新技术。

1.1.2 光电检测技术的特点

利用光学进行精密测量,是计量测试技术领域中的主要方法。由于光学测量方法的非接触性、高灵敏性和高精度性,而且光电检测技术将光学技术与电子技术相结合,可实现多种量的测量,因此,其在近代科学研究、工业生产、空间技术、国防技术等方面得到了广泛应用,已成为一种无法取代的技术。特别是激光技术、微电子技术与计算机技术的发展,使光电检测技术有了飞速的发展。

光电检测技术具有如下特点^[2]:

- 1) 高精度。光电检测的精度是各种检测中精度最高的一种。例如,激光干涉法检测长度的精度可达 $0.05\mu\text{m}/\text{m}$;光栅莫尔条纹法测角可达 $0.04''$;用激光测距法测量地球与月球之间的距离的分辨率可达 1m 。
- 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、电视遥控等。
- 4) 非接触检测。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,是各种检测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,就可以永久地使用。
- 6) 具有很强的信息处理和运算能力,可以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。



7) 高灵敏度。可以达到波长及亚波长级以下的灵敏度，可进行实时监测微变形、微振动、微位移、微应变等超精密测量、在线检测和纳米测量。

8) 三维性。利用光电技术可检测任意距离、任意表面状态、真实的或模拟的空间，进行 3D 测量。

9) 实时性。可通过数字方式或反馈控制，进行质量监控，实现生产的自动化。

10) 微弱信号检测^[3]。

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高新技术，是光、机、电、计算机相结合的新技术，是最具有应用潜力的技术之一。随着二元光学及微光学的发展，光学系统的微型化、集成化，光电检测技术将更上一个层次，成为现代科学技术、现代工业生产的眼晴，成为保证科学技术、工业生产日新月异发展的主要高新技术之一。

1.2 光电检测技术的发展现状

光电检测技术是现代检测技术的重要组成部分。其主要原因是，光电检测技术的特点完全适应现代检测技术发展的方向和需要。

1) 现代检测技术要求向非接触化方向发展，这样就可以在不改变被测物性质的条件下进行检测，而光电检测的最大优点就是非接触测量。

2) 现代检测技术要求获得尽可能大的信息量，而光电检测中的光电成像型检测系统，恰能提供待测对象信息含量最多的图像信息，使检测从逐点测量发展成为全场测量。

3) 现代检测技术所用电子元器件及电路向集成化发展，检测技术向自动化发展，检测结果向数字化发展，检测系统向“智能”化发展，所有这些发展方向也正是光电检测技术的发展方向。

4) 光电检测技术的应用面不断扩大，使其能检测更多的被测对象，这就要求光电传感器的品种不断增多，同时要求检测光信号的获得方式不断增加。

5) 光电检测技术的另一个重要发展方面是各种微机在系统中的应用。一方面，微机的应用极大地提高了检测效率，也使十分复杂的计算、修正和控制关系的实现变得轻而易举。另一方面，微机的应用，使调节和执行机构的控制方式变得多种多样，能完成许多高难度的控制过程。

例如，应用微机的光电检测系统与人的操作功能相比较^[4]，如图 1-3 所示。图中，光电

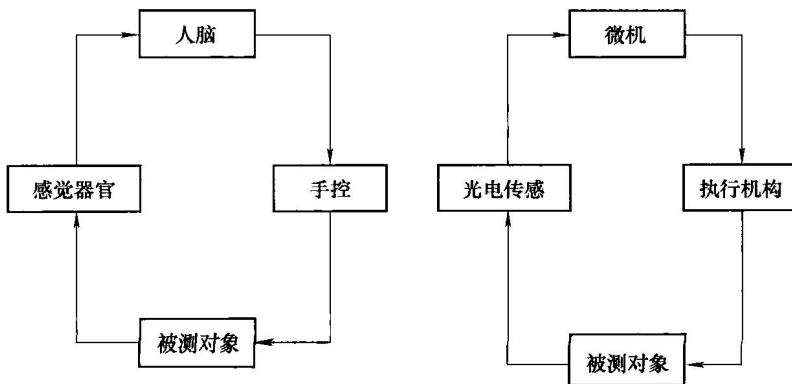


图 1-3 光电检测系统与人的操作功能相比较

传感部分相当于人体的感觉器官；将传感部分获得的信息经微机处理，这一功能相当于人脑分析、判断过程；微机输出的控制信号驱动执行机构，使之完成所要求的动作或控制被测对象，该过程相当于人的手控动作。

总之，光电检测技术的发展离不开现代科技的发展，而光电检测技术的发展必将进一步促进现代科技的发展。

1.3 光电检测的方法

光电检测技术包含十分丰富的内容，从光信息的获得和光电转换到电信号处理和智能化控制，在各个方面都有很大的差异。光电检测系统没有固定的模式，同一目的的检测可以用不同的方法实现，关键是根据具体情况，设计并选择出能满足检测精度、检测范围、使用场合、操作难易、自动化水平等要求的最廉价的系统方案。

光电检测以光信息携带物理量的方式不同分类，大致可分为光强型、频率型、相位型、脉冲型、偏振型和其他型。脉冲型又可利用脉冲信号的脉冲数、脉冲频率和脉冲宽度等变化携带信息。各种类型互相之间也有关系，有的是几种类型的结合。

光电检测根据所应用的光学现象分为衍射计量、干涉计量、全息法、散斑检测法、光谱检测法、莫尔与拓扑法、光扫描法以及纳米计量等。

根据基本原理，光电检测的方法可分为直接作用法、差动测量法、补偿测量法。

下面主要从光电检测系统的角度作简要叙述。

1. 直接作用法

受被测物理量控制的光通量，经光电器件转换成电量以后由检测机构可直接得到所求被测物理量。图 1-4 所示为直接作用法光电检测系统框图。

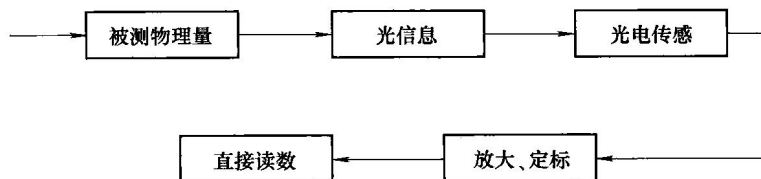


图 1-4 直接作用法光电检测系统框图

图 1-4 中，定标是指用基准量调整系统的放大倍数或比例系数，使输出值与基准量相同。直接测量法的最大优点是简单方便，仪器设备造价低廉。这种方法的缺点是各环节的误差均直接加入到总误差中，也就是说检测结果受参数、环境、电压波动等影响较大，精度及稳定性较差。为克服或减弱这些影响，必须认真设计每个环节，选用稳定性好的元器件和电路方案。直接测量法的另一个缺点是光电器件的线性范围和测量机构限制了它的量程，可通过光衰减器，如光楔、光阑等来扩展量程，或通过电衰减，如改变电路的放大倍数来扩展量程，也可通过改变测量机械灵敏度等来扩展量程。

2. 差动测量法

被测量与某一标准量相比较，所得的差或数值比可反映被测量的大小，利用它们之间的差或数值比，经放大后去控制检测机构。例如，由双光路和双电桥组成的差动测量法光电检

测系统,如图 1-5 所示。光源发出的光束经两组由反射镜和准直镜构成的镜组,形成两束相等的平行光。一束为标准光路,用光楔定出标准光通量 Φ_2 ,并通过会聚透镜由光电探测器 VL_2 接收;另一束为待测光路,光束经待测物后获得信息光通量 Φ_1 ,由会聚透镜将其送到光电探测器 VL_1 接收。接收电桥由 VL_1 、 VL_2 、电阻 R_1 、电位器 RP 组成。差值信号经放大后由测量仪表读出。 RP 是电桥平衡的调节电阻,即检测仪表的零位调节电阻。

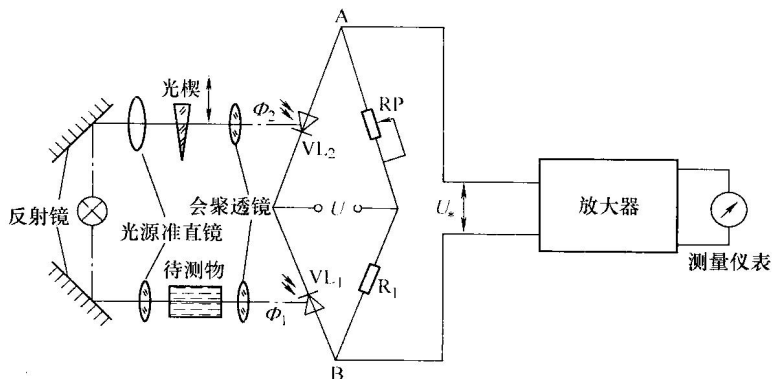


图 1-5 双光路和双电桥组成的差动测量法光电检测系统

双光路和双电桥测量可以消除杂散光、光源波动、温度变化和电源电压波动带来的测量误差,使测量精度和灵敏度大大提高。

3. 补偿测量法

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,补偿量值的大小反映了被测量变化的大小。而补偿量读数与待测量的关系应预先标定。

在光电差动测量法中,光通量的相应变化不引起检测原理的误差,这恰是两光路平衡光通量得到完全补偿的极限情况。因此,只要对光电差动装置作适当的改进就可以构成双通道光电补偿式测量。例如,把图 1-5 中的调整光楔作为补偿器,并使补偿器的可动部分与相应的读数装置相联系,通过补偿器的补偿使测量仪表指零,达到平衡检测的目的。这类装置中可用一个或两个光电探测器。采用一个光电探测器时,又可以减少由于采用两个探测器的一致性所造成的误差。

双通道差动式测量和双通道补偿式测量都是通过比较两束光通量的大小进行检测,都可叫做比较法。差动式装置两光束光通量不等,由测量仪表读出差值,所以是非平衡比较法;而补偿式装置是使测量仪表指零,由补偿器读出数据,所以是平衡比较法,或称“零”状态比较法。

双光路补偿法检测的优点是:①双光路的作用可互相抵消光通量的波动及周围环境的影响;②受电源电压、放大器参数和探测器特性随时间变化的影响小;③不受光电探测器光特性非线性的影响,在光特性弯曲部分也可正常工作,但应注意不能在饱和区域中工作。双光路补偿法检测的主要缺点是:①机构复杂、相对造价高;②当调制补偿器有惯性时,对较快的变化量测量不利。

1.4 学习要求

本书以应用光学和物理光学为基础，侧重于从系统角度介绍光电检测技术。内容在整体上强调光电检测的方法和系统，如各种光电检测方法，系统选择、系统构成、系统实现和系统应用等。系统包括光源、光学系统、被检测对象技术处理、光电接收和信息处理等，即光接收前端、光电器件和后续处理^[5]。

本书比较全面系统地介绍了光电检测系统的理论及应用基础，紧跟技术发展方向，富有启发性。据此，本门课程的学习要求如下：

- 1) 了解并掌握典型光电器件的原理及特点，学会正确选用光电器件。
- 2) 学会根据光电器件的特点选择和设计光电检测系统的有关参数。
- 3) 依据光学基础知识，学会各种光电检测方法和原理，掌握各种光电检测技术。
- 4) 能根据被测对象的具体要求，合理设计光电检测系统。

本章参考文献

- [1] 郭培源，付扬．光电检测技术与应用 [M]．北京：北京航空航天大学出版社，2006．
- [2] 浦昭邦．光电测试技术 [M]．北京：机械工业出版社，2004．
- [3] 雷玉堂，王庆友，等．光电检测技术 [M]．北京：中国计量出版社，1997．
- [4] 高雅允，高岳．光电检测技术 [M]．北京：国防工业出版社，1995．
- [5] 安毓英，曾晓东．光电探测原理 [M]．西安：西安电子科技大学出版社，2004．

第 2 章 光电检测系统的发光光源

2.1 光源的分类以及光源的特性参数^[1]

2.1.1 光源的分类

所谓光源就是一切能产生光辐射的辐射源，无论是天然的，还是人造的。天然光源是自然界中存在的，如太阳、恒星等。人造光源是人为地将各种形式能量（热能、电能、化学能）转化为光辐射能的器件，其中利用电能产生光辐射的器件称为电光源。在防伪标志的检测中，电光源是最常见的光源。

按照光波在时间、空间上的相位特征，一般将光源分成相干光源、非相干光源和低相干光源。光源的分类如图 2-1 所示。

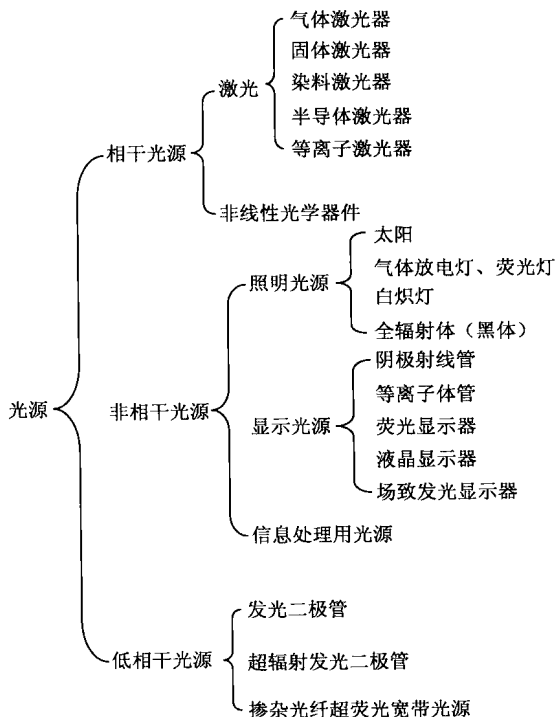


图 2-1 光源的分类

按照发光机理，光源又可以分成热辐射光源、气体发光光源、固体发光光源和激光器 4 种。

1) 热辐射光源。电流流经导电物体，使之在高温下辐射光能的光源。包括白炽灯和卤钨灯两种。

2) 气体发光光源。电流流经气体或金属蒸气，使之产生气体放电而发光的光源。气体



放电有弧光放电和辉光放电两种。弧光放电光源包括荧光灯、钠灯、汞灯、金属卤化物灯，以及碳弧灯、氙灯等。辉光放电光源包括利用负辉区辉光放电的辉光指示光源和利用正柱区辉光放电的霓虹灯。

3) 固体发光光源。在电场作用下使固体物质发光的光源，电能直接转变为光能。包括场致发光光源和发光二极管两种。

4) 激光器。按工作物质分类，可分为气体激光器、固体激光器、染料激光器和半导体激光器。气体激光器采用的工作物质很多，激励方式多样，发射波长范围也最宽。对于激光器，本章将主要介绍氦-氖激光器和半导体激光器。

2.1.2 光源的特性参数^[2]

1. 辐射效率和发光效率

在给定的 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内，某一辐射源发出的辐射通量与产生这些辐射通量所需的电功率 P 之比，称为该辐射源在规定光谱范围内的辐射效率，即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2-1)$$

式中， Φ_e 为辐射通量； K_m 为光谱光视效能 $K(\lambda)$ 的最大值，为一常数 683lm/W。

在给定的 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内，某一光源所发射的辐射通量与产生这些辐射通量所需的电功率 P 之比，就是该光源的发光效率，即

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) U(\lambda) d\lambda}{P} \quad (2-2)$$

式中， η_v 为发光效率，单位为 lm/W（流明每瓦）； $U(\lambda) = K(\lambda)/K_m$ 为光谱光视效率。

表 2-1 中所列的为一些常用光源的发光效率。

表 2-1 常用光源的发光效率

光源种类	发光效率/(lm/W)	光源种类	发光效率/(lm/W)
白炽灯	8~18	高压汞灯	30~40
卤钨灯	14~30	高压钠灯	90~100
普通荧光灯	35~36	球形氙灯	30~40
三基色荧光灯	55~90	金属卤化物灯	60~80

2. 光谱功率分布

光源发出的大都是由单色光组成的复色光，而且在不同频率上辐射出的光功率大小不同。常用光谱功率分布来描述光功率和频率的这种关系，经过归一化后的光功率分布称为相对光谱功率分布。如果被考虑的光源是一个全辐射体（也称黑体，后同），它的光谱功率分布可以用普朗克公式计算出来。

光源光谱功率分布形式有四种情况，如图 2-2 所示。图 2-2a 称为线状光谱，由若干条明显分隔的细线组成；图 2-2b 称为带状光谱，由一些分开的谱带组成，每一谱带中又包含许多连续的细谱线；图 2-2c 为连续光谱，光源发出的谱线连成一片；图 2-2d 是混合光谱，由

连续光谱与线、带光谱混合而成。

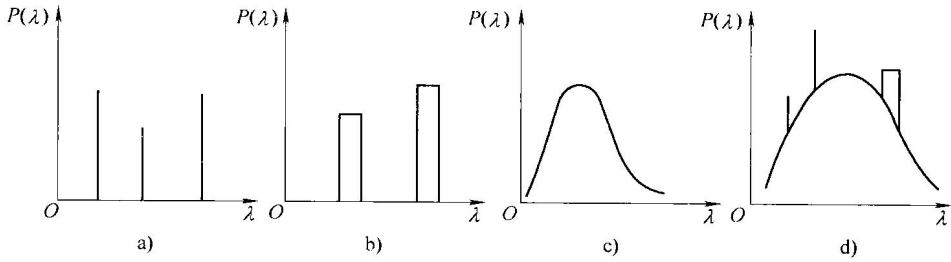


图 2-2 典型的光源光谱功率分布形式
a) 线状光谱 b) 带状光谱 c) 连续光谱 d) 混合光谱

在选择光源时，它的光谱功率分布应由测量对象的要求来决定。在目视光学系统中，一般采用可见光谱辐射比较丰富的光源。对于彩色摄影用光源，为了获得较好的色彩还原，应采用类似于日光色的光源，如卤钨灯、氙灯等。在紫外光光度计中，通常使用氙灯、汞氙灯等紫外辐射较强的光源。

3. 空间发光强度分布

一般光源的发光强度在空间各个方向上是不相同的。常用发光强度矢量和发光强度曲线来描述光源的这种特性。在空间某一截面上自原点向各径向取矢量，矢量的长度与该方向的发光强度成正比，称其为发光强度矢量。将各矢量的端点连起来，就得到光源在该截面上的发光强度分布曲线，也称配光曲线。图 2-3 所示为气体发光光源发光强度分布。

为了提高光的利用率，一般选择发光强度高的方向作为照明方向。为了进一步利用背面方向的光辐射，还可以在光源的背面安装反光罩，反光罩的焦点位于光源的发光中心上。

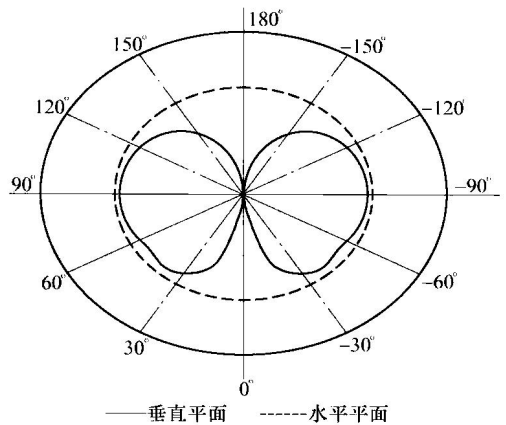


图 2-3 气体发光光源发光强度分布

4. 光源的颜色

光源的颜色包括两方面的含义，即色表和显色性。用眼睛直接观察光源时所看到的颜色称为光源的色表。例如，高压钠灯的色表呈黄色，荧光灯的色表呈白色。当用光源照射物体时，物体呈现的颜色（也就是物体反射光在人眼内产生的颜色感觉）与该物体在全辐射体照射下所呈现的颜色的一致性，称为该光源的显色性。国际照明委员会（CIE）规定了 14 种特殊物体作为检验光源显色性的“试验色”。白炽灯、卤钨灯等几种光源的显色性较好，适用于辨色要求较高的场合，如彩色电影、彩色电视的拍摄和放映、染料、彩色印刷等行业。高压汞灯、高压钠灯等光源显色性较差一些，一般用于道路、隧道、码头等辨色要求较低的场合。

5. 光源的色温

黑体的温度与它的辐射性是一一对应的。从光源的颜色与温度的这种关系，引出了颜色