

嵌入式光电检测系统设计及应用

Design and Application of Embedded
Photoelectric Detection System

邱选兵 著

非外借

嵌入式光电检测系统 设计及应用

邱选兵 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以高灵敏度激光吸收光谱、FBG 传感系统、脉冲涡流无损检测系统等嵌入式光电检测系统为对象,从光源、光学器件出发,阐述了嵌入式光电检测系统中涉及的光电检测原理、嵌入式技术,并从嵌入式光电检测系统构成和实际工程应用出发,详细地分析和介绍了布拉格光纤光栅检测系统、电磁脉冲涡流检测系统、激光光谱检测系统的系统设计、硬件和软件实现,最后通过光电检测系统的实际应用案例,介绍了光电检测系统在火灾探测中的应用。

本书可供光电检测和嵌入式开发应用等领域的科技工作者、教师、研究生和高年级本科生阅读,也可供高等院校物理学、光学技术与光电仪器、检测技术与自动化仪表、光电信息科学与工程、光电子等相关专业的师生参考。

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

嵌入式光电检测系统设计及应用/邱选兵著. —北京:电子工业出版社, 2018.12

ISBN 978-7-121-35289-8

I. ①嵌… II. ①邱… III. ①光电检测—系统设计 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 242575 号

责任编辑:李 敏

文字编辑:赵 娜

印 刷:北京捷迅佳彩印刷有限公司

装 订:北京捷迅佳彩印刷有限公司

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:787×1 092 1/16 印张:17.25 字数:400 千字

版 次:2018 年 12 月第 1 版

印 次:2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价:89.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: limin@phei.com.cn 或 (010) 88254753。

前 言

嵌入式光电检测系统是将光学、电子学和嵌入式技术相结合而产生的一种新兴检测系统，具有测量精度高、速度快、非接触、智能化、便携式等突出特点，已经成为 21 世纪各种精密测量与分析的重要组成部分之一。特别是近年来各种新型激光器和探测器的出现，以及人工智能、嵌入式技术、电子技术和网络技术的发展，使得嵌入式光电检测系统的内容越来越丰富，应用越来越广泛，目前已经渗透到几乎所有的国防、工业和科研部门。例如，2016 年我国在贵州建立的全球最大的 500 米口径球面射电望远镜就是一个复杂的光电检测系统。

本书内容主要建立在著者及科研团队所从事的光纤传感、电磁脉冲涡流检测及高灵敏度激光光谱技术研究的理论、实验和工程应用研究的相关成果，以及近年来承担的相关科研项目和本科生及研究生教学的基础上，本书对嵌入式光电检测技术及系统进行了归纳、分析和总结。

全书共 8 章。第 1 章主要阐述了光电检测系统的主要构成、工作原理、基本特性及发展趋势；第 2 章介绍了本书涉及的光电检测理论基础：高灵敏度激光吸收光谱理论、布拉格光纤光栅传感理论及电磁脉冲涡流检测理论基础；第 3 章介绍了光电检测系统主要涉及的各种技术，特别是光源技术、光电探测技术、光电信号预处理技术及光电微弱信号处理技术；第 4 章主要阐述了嵌入式系统原理及其在光电检测中的应用，重点介绍了嵌入式系统的基本概念、特点、组成，尤其是嵌入式处理器的开发平台、接口电路，并介绍了两个典型的嵌入式光电检测系统实例；第 5 章围绕光纤光栅传感技术展开，主要介绍了基于布拉格光纤光栅的嵌入式光电检测系统的硬件和软件开发，以及基于布拉格光纤光栅的高温瞬态温度测量、爆轰速度和压力测量应用；第 6 章介绍了嵌入式脉冲涡流驱动技术、嵌入式脉冲涡流缺陷分类和检测系统、脉冲涡流响应信号处理技术，重点介绍了基于频率特征量的缺陷分类算法；第 7 章在引入高稳定的激光驱动模块的基础上，介绍了几种新型的多

光程技术、信号处理技术，并且介绍了著者所在的课题组开发的两种嵌入式激光光谱检测仪器；第8章为光电检测系统在火灾探测中的应用，分别应用图像处理技术、自由基发射光谱技术、激光吸收光谱技术实现早期火灾的探测和预警。

本书涉及的理论及理论模型的描述，都节选自国内外本领域专家、学者公开发表的参考文献，在写作中不可避免地参考资料在形式和内容上进行了不同程度的取舍或修改，书中也尽可能地对引用的参考文献加以标注，但由于种种原因的限制，很难保证没有遗漏或错误，敬请各位有识之士不吝赐教、指正。著者在此感谢所有参考文献的作者，因为是他们多年辛勤及卓有成效的工作，才使著者近年来对原子分子光谱与检测技术的许多理论问题有了一些肤浅的认识。

本书是著者在太原科技大学给本科生讲授“光电微机接口技术”“嵌入式系统设计与应用”“光电技术”“传感器技术”“数字信号处理”课程，以及给研究生讲授“光电接口技术”课程的基础上完成的，感谢太原科技大学对著者工作的支持。

本书是在国家自然科学基金委员会-山西省人民政府煤基低碳联合基金（项目批准号：U1610117）、国家自然科学基金（项目批准号：11504256、61573323）、太原科技大学校博士启动基金（20132011）、江西中医药大学现代中药制剂教育部重点实验室开放基金、有机地球化学国家重点实验室开放基金（SKLOG-2017-18）、山西省“1331工程”重点创新团队建设计划、太原科技大学重型机械教育部工程研究中心“重型机械”开放基金（20173001）、横向课题（201455）、晋城市科技攻关项目（20151004-22）等研究成果的基础上撰写的，在此对国家自然科学基金委员会、山西省科技厅和教育厅、太原科技大学和太原科技大学重型机械教育部工程研究中心、江西中医药大学、晋城市科技局等表示衷心的感谢。本书能够问世，首先感谢曾经为我提供学习机会和实验条件的重庆大学、太原理工大学，感谢各位老师将我引入机械、光电子领域的大门，感谢太原科技大学的魏计林教授对我工作、学习、生活的照顾和帮助。感谢我的博士生导师崔小朝教授，他指导我在电磁涡流方向上取得成果，愿您在天堂没有病痛折磨，一切安好！感谢靳宝全师兄给予我的帮助，还记得第一次来到太原就是您接待和帮助的。感谢我的硕士生导师熊诗波教授，感谢太原理工大学机电研究所的熊晓燕、杨洁明、权龙、程桁等老师给予的实验指导、论文审阅等方面的帮助。感谢博士期间同组的张雪霞、晋艳娟、张俊婷、彭英、马腾、李坤、孙晓思等同学的帮助和支持。感谢中北大学的王高教授给予我们课题组的帮助和支持！

在此我要特别感谢课题组的李传亮老师，是您带领我进入了量子世界，让我结识了激光光谱，从而使本书内容能够更加丰富和饱满！感谢儒雅学者陈扬骏教授给予我们课题组的帮助和支持！

一路走来，非常之不易！感谢大连化学物理研究所韩克利老师在学术道路上对我的鼓励，感谢吉林大学许海峰老师和闫冰老师在光谱理论计算和实验过程中给予的帮助，感谢

西北大学邹文利老师及鲁东大学杨传路老师、王美山老师在 MOLPRO 计算中给予的指导，感谢山西大学激光光谱所马维光、赵延霆、董雷、张雷、姬中华和秦成兵老师在实验中对我的帮助，感谢西安授时中心刘涛老师的热情帮助，感谢安徽光机所高晓明、赵卫雄老师和浙江师范大学邵杰老师在 TDLAS 实验中不厌其烦的解释，感谢上海理工大学沈建琦老师在 Mie 散射光谱方面的帮助。

感谢太原科技大学物理系同事对我工作的关心和支持，尤其我们团队的魏计林、李传亮、李坤、李晋红、和小虎等老师，以及正在我们团队工作的邵李刚、阴旭梅、郭心骞、孙冬远、席廷宇、杨晓飞、郑飞、李宁、魏永卜、卢丹华、郭宇晨、张恩华、李杰、常虹、王泽育等同学和已经毕业的李百鹤、刘军、卜凡亮、杨牧、张棚、刘路路、卢艮萍、吴应发、史维新、吴飞龙、周锐、郝玺、蒋利军、贾皓月、李亚超等同学。另外，感谢电子工业出版社编辑在本书出版过程中付出的辛勤劳动。还有许多老师、同学和朋友对我们课题组给予了很多的帮助，在此恕不一一列出，但对你们表示衷心的感谢和祝福。

感谢家人对我工作的理解和宽容，尤其是妻子对家庭的无私奉献，同时也感谢儿子对我的理解和包容。

感谢我的父母、岳父母，是你们的理解和支持才成就了的今天，谢谢你们！

由于著者学识水平有限，加之光电检测技术的研究涉及面太宽，书中难免有许多不妥和错误之处，希望相关领域的专家、学者及参阅本书的各位老师、同学不吝赐教。

邱选兵

2018年6月

目 录

第 1 章 光电检测系统概述	1
1.1 引言.....	2
1.2 光电检测系统的主要构成.....	2
1.2.1 光源和照明光学系统.....	3
1.2.2 被测对象和光学变换.....	3
1.2.3 光信号的匹配处理.....	4
1.2.4 光电转换.....	4
1.2.5 电信号的放大与处理.....	4
1.2.6 计算机的存储、显示与控制.....	4
1.3 光电检测系统的工作原理.....	5
1.3.1 把待测量变换为光信息模拟量.....	5
1.3.2 把待测量变换为光信息脉冲量.....	5
1.3.3 光电检测系统的基本结构形式.....	6
1.4 光电检测系统的基本特性.....	7
1.4.1 光电检测系统的静态特性.....	7
1.4.2 光电检测系统的动态特性.....	10
1.5 光电检测系统的发展趋势.....	12
参考文献.....	13
第 2 章 光电检测理论基础	15
2.1 概述.....	16

2.2	激光吸收光谱检测原理	16
2.2.1	Lambert-Beer 定律及测温原理	16
2.2.2	分子吸收线型与线宽	17
2.2.3	TDLAS 测量技术	19
2.3	光纤光栅分布式检测原理	22
2.3.1	光纤光栅特性及传感原理	22
2.3.2	FBG 传感器解调原理	26
2.4	基于脉冲涡流的平板导体无损检测原理	28
2.4.1	Dodd-Deeds 涡流解析模型	28
2.4.2	平板导体的脉冲涡流模型	33
2.4.3	基于脉冲涡流平板导体表面缺陷的解析模型	36
	参考文献	41
第 3 章	光电检测系统	45
3.1	光电检测系统的基本构成	46
3.2	光源及光学器件	46
3.3	光电探测技术	55
3.3.1	光电效应和光热效应	55
3.3.2	常见光电探测器	56
3.4	光电信号的预处理技术	57
3.4.1	光电流模式	57
3.4.2	光电导模式	59
3.5	光电微弱信号处理技术	61
3.5.1	光电检测系统的噪声	61
3.5.2	噪声的统计特征	64
3.5.3	微弱光电信号检测常用技术	66
	参考文献	69
第 4 章	嵌入式系统原理及其在光电检测中的应用	71
4.1	嵌入式系统的基本概念	72
4.2	嵌入式系统的特点	72
4.2.1	嵌入式系统的要求	73

4.2.2	嵌入式系统的特征	73
4.2.3	嵌入式系统的发展	74
4.3	嵌入式系统的组成	74
4.3.1	嵌入式系统的硬件组成	75
4.3.2	嵌入式系统的软件组成	76
4.4	嵌入式光电检测系统硬件开发平台	77
4.4.1	嵌入式 8 位单片机硬件开发平台	78
4.4.2	嵌入式 32 位 STM32F103 单片机硬件开发平台	78
4.4.3	嵌入式光电检测系统外设接口	80
4.5	嵌入式光电检测系统开发应用	96
4.5.1	基于 C8051F340 高速单片机的高精度定时装置的设计	96
4.5.2	基于 STM32F103 的太阳跟踪控制系统的设计	100
	参考文献	105
第 5 章	布拉格光纤光栅检测系统	107
5.1	检测系统总体结构	108
5.1.1	设计要求与系统功能	108
5.1.2	FBG 传感系统测量方案	108
5.2	检测系统的主要仪器及特性	109
5.2.1	宽带光源	109
5.2.2	光隔离器	110
5.2.3	光耦合器	110
5.2.4	FBG 传感器	111
5.2.5	光纤 FP 可调谐滤波器	111
5.2.6	PIN 光电二极管	112
5.3	PIN 光电二极管检测电路	112
5.3.1	光电二极管的工作模式	112
5.3.2	光电二极管检测电路的设计	113
5.4	光纤 FP 可调谐滤波器驱动电路	117
5.4.1	DAC 输出电路	117
5.4.2	驱动电压调理电路	118

5.5	分布式 FBG 温度和压力测量	119
5.5.1	温度测量	119
5.5.2	压力测量	121
5.6	FBG 瞬态温度测量法	123
5.6.1	研究背景	123
5.6.2	装置结构	124
5.6.3	信号处理算法	125
5.7	基于 FBG 传感器的爆轰速度和压力测量	126
5.7.1	爆轰波的基本概念	126
5.7.2	测量爆轰速度和压力的背景技术	127
5.7.3	基于 FBG 传感器的爆轰速度测量原理	127
5.7.4	基于 FBG 传感器的爆轰压力测量原理	128
5.7.5	基于 FBG 传感器的爆轰速度和压力测量系统	130
	参考文献	131
第 6 章	电磁脉冲涡流检测系统	133
6.1	电磁脉冲涡流探头设计	134
6.1.1	GMR 脉冲涡流探头	134
6.1.2	Hall 脉冲涡流探头	135
6.2	嵌入式脉冲涡流驱动技术	135
6.2.1	系统构成	135
6.2.2	嵌入式脉冲涡流激励源软件设计	138
6.2.3	实验测试	140
6.3	嵌入式脉冲涡流缺陷检测	143
6.3.1	系统构成	143
6.3.2	嵌入式脉冲涡流自动缺陷检测仪器硬件设计	143
6.3.3	嵌入式脉冲涡流自动缺陷检测仪器软件设计	147
6.4	脉冲涡流信号处理	149
6.4.1	小波理论的脉冲涡流快速预处理算法研究	149
6.4.2	小波去噪理论	150
6.4.3	脉冲涡流响应信号的实时预处理	151

6.4.4	脉冲涡流响应信号的快速小波去噪算法研究	156
6.4.5	实验结果与讨论	158
6.5	缺陷分类算法	158
6.5.1	脉冲涡流缺陷识别与定量检测平台	159
6.5.2	基于频谱分析的脉冲涡流缺陷识别研究	161
6.5.3	基于小波变换与频谱分析的脉冲涡流缺陷识别研究	169
6.5.4	基于功率谱密度分析和小波变换的脉冲涡流缺陷识别研究	173
6.5.5	基于功率谱密度和经验模态分解的脉冲涡流缺陷识别研究	180
	参考文献	189
第7章 激光光谱检测系统		193
7.1	测量总体机构	194
7.2	激光驱动技术	195
7.2.1	基于 Wavelength 模块的激光驱动器	195
7.2.2	自主研发的激光驱动器	204
7.3	多光程技术	210
7.3.1	Herriott 型长光程池设计理论	211
7.3.2	新型 Herriott 长光程模拟	212
7.3.3	螺旋多光程池	215
7.4	信号处理技术	218
7.4.1	锁相放大器的工作原理	218
7.4.2	锁相放大器的基本组成和部件	219
7.5	仪器实现与应用	222
7.5.1	基于 TDLAS 的小型化 C ₂ H ₂ 测量系统研究	222
7.5.2	基于激光双吸收谱线的氨气温度测量研究	225
	参考文献	229
第8章 光电检测系统在火灾探测中的应用		233
8.1	概述	234
8.2	图像处理技术在火灾探测中的应用	234
8.2.1	多特征量对数回归的火灾识别算法	235
8.2.2	实验结果与分析	237

8.3 多特征量数据融合的嵌入式火灾早期预警系统	240
8.3.1 早期火灾发生特点及特征量的选择	241
8.3.2 火灾早期预警系统	241
8.3.3 火灾模拟实验	243
8.3.4 实验结果与讨论	245
8.4 自由基发射光谱技术在火灾探测中的应用	245
8.4.1 实验系统	246
8.4.2 基于图像处理的火灾识别算法	247
8.4.3 自由基光谱测温原理	248
8.4.4 CH 自由基光谱测温	250
8.4.5 丁烷在大气中燃烧的火焰光谱标定	251
8.4.6 实验结果与讨论	251
8.5 激光吸收光谱技术在火灾探测中的应用	252
8.5.1 吸收光谱的谱线选择	252
8.5.2 实验装置	253
8.5.3 微控制器和数字锁相放大器	254
8.5.4 传感器的校准	257
8.5.5 火灾早期探测应用实验	259
8.5.6 小结	261
参考文献	261

第 1 章

Chapter 1

光电检测系统概述

1.1 引言

所谓光电检测系统，是指对待测光学量或由待测非光学物理量转换成的光学量，通过光电变换、探测、转换及电路处理方法进行信号检测的系统^[1-3]。嵌入式光电检测技术是采用光电驱动、光电探测、计算机技术及信号处理等方法来进行光学测量的，是检测技术的一个重要组成部分，是光学、电子学及嵌入式技术相结合而产生的一种新型检测技术。光电检测系统的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、控制和显示等，主要采用的技术包括光电变换技术、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^[4,5]。

从原理上讲，光电检测系统可以检测一切能够影响光特性的非电量，如长度、位移、振动、力、转矩、转速、温度、压强、压力、流量、液位、浓度、混浊度、成分、角度、表面粗糙度、图像等参量。首先，在光电检测系统中往往还需要用于光学测量的驱动光源；其次，通过光学接收系统（光学成像系统）将待检测的非电量信息变换为便于接收和处理的光学信息；再次，采用光电探测器将光学信息量变换成电量，并进一步经电路放大、滤波和转换处理等信号调理，以实现电信号输出的目的。这些信息变换技术和电信号处理技术便是研究光电检测系统的主要技术。光电检测系统包括：各种类型的光学系统（发射和接收），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^[5]。

近年来，随着半导体工业的迅速发展，特别是半导体激光技术的高速发展，研究光电器件的光电子技术取得了巨大进展，各种新型激光器和光电探测器应运而生，加之伴随出现的电子技术和微电子技术的快速发展，光电检测内容及检测技术的内容更加丰富，应用也越来越广，目前已渗透到几乎所有的工业和科研部门^[6]。

1.2 光电检测系统的主要构成

一个完整的光电检测系统应包括光学信号的获取、变换、处理、显示和存储 4 个部分。可以大致归纳出这类系统的基本组成和原理框架，如图 1.1 所示。其基本组成可分为光源、照明光学系统、被测对象、光学变换、光信号的匹配处理、光电转换、电信号的放大、电信号的处理，以及计算机中的存储、显示和控制等部分。在该系统中，光是信息传递的媒介，它由光源产生，可以是激光光源，也可以是其他各种光源。光源与照明光学系统一起产生测量所需的光载波。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，称为光学变换。光学变换是用各种调制方法实现的。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。

之后,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,或送到计算机进行数字处理和运算,直接显示待测量、存储或者控制相应的输出装置。

按照不同的需要,实际的光电检测系统可能简单一些,也可能还要增加一些部分,有些系统可能排列顺序不同,也可能几个部分合在一起,难以分开。图 1.1 只表征基本原理,而实际系统的形成是多样的、复杂的。

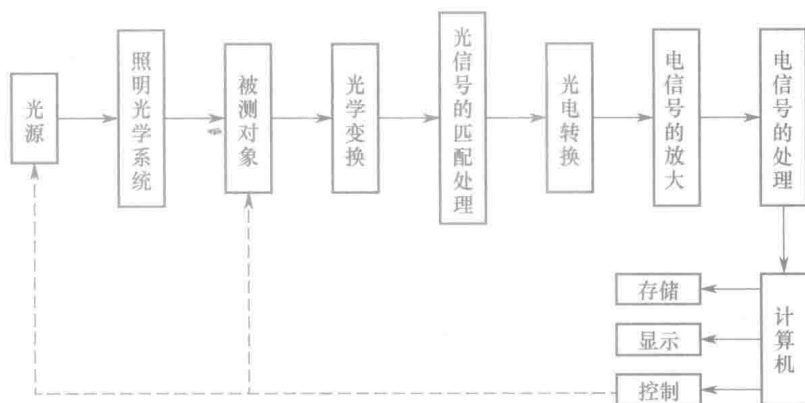


图 1.1 光电检测系统的基本组成和原理框架

为了使读者对光电检测系统有个大致的认识,下面对框架中的主要部分进行简单说明。

1.2.1 光源和照明光学系统

光源和照明光学系统是光电检测系统中必不可少的一部分。在实际情况下,可以根据需要选择一定辐射功率、光谱范围、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^[3,5]。有时光源本身就是待测对象,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。有时光电检测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。光照度的大小与光源的发光强度、光源的尺寸及聚光系统的光学特性有关。照明光学系统根据结构不同又可分为透射照明光学系统、反射照明光学系统、折射照明光学系统。

1.2.2 被测对象和光学变换

被测对象即待测物理量,它们是千变万化的。光学变换指的是上述光源所发出的光束在通过被测物理量时,利用各种光学效应,如反射、吸收、折射、干涉、衍射、偏振等,使光束携带上被测对象的特征信息,形成待检测的光信号。光学变换通常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)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)。被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。当光通过被测对象时，能否使光束准确地携带待测对象所要检测的信息，是决定一个光电检测系统成败的关键之一（实际上是用待测信息对光载波进行调制）。

1.2.3 光信号的匹配处理

光信号的匹配处理可以位于被检测对象之前，也可以位于光学变换之后，按实际要求来决定。通常，在光电检测系统中，表征待测量的光信号可以是光强变化、光谱变化、偏振性变化、各种干涉和衍射条纹变化，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部分之间实现合理甚至最好的匹配，经常需要对光信号进行必要的前置处理。例如，当光信号过强时，需要进行中性减光；当光信号不均匀时，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，光信号的匹配处理是为了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3个部分往往紧密结合在一起，主要目的是将待测信息转换为适合后续处理的光信息。

1.2.4 光电转换

光电转换是光电检测系统的核心部分，其以光信号为媒质，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）。它决定整个光电检测系统的灵敏度、精度、动态响应等特性。各种类型的光电探测器用来实现光电转换，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、光位置敏感器件等。各类光电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奠定了良好的基础。

1.2.5 电信号的放大与处理

电信号的放大与处理主要由各种电子电路组成。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。需要注意的是，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、光信号处理及光电转换均应统一考虑和安排。

1.2.6 计算机的存储、显示与控制

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，需要有附加控制部分。特别是在移动互联网时代，具有大容量的存储系统、友好的交互界面、灵活的通信接口方式已逐渐成为光电检测系统的标配。如果控制系统比较复杂，则可在采用微机系统进行分析、计算或判断等处理后，再由控制部分进行控制，这样的系统又被称为智能化的光电检测系统。

1.3 光电检测系统的工作原理

光电检测系统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，其基本工作原理有以下两种。

1.3.1 把待测量变换为光信息模拟量

光电检测系统以光通量的大小来反映待测量的大小。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，所以光电探测器输出的光电流大小反映了待测量的大小，即光电流 I 是待测信息量 Q 的函数：

$$I = f(Q) \quad (1.1)$$

这是一种将待测量直接转换为电流大小的变换，是一种模拟量的信息变换。在实际情况下，光电探测器输出的光电流大小，不仅与待测信号的强弱有关，而且与光源的强度、光学发射和接收系统及光电探测器的性能参数有关。在理想状态下，光电流 I 是待测信号 Q 的单值函数，那么光电检测系统就要求：①具有稳定发光强度的光源；②具有稳定的光学发射和接收系统；③具有稳定的光电探测器。因此，基于这种工作原理的光电检测系统，必须相应地采取一些稳定性措施，如采用差动式电路、光源供电电压的稳定、光电探测器的筛选、光学系统和机械结构的可靠性设计等^[7]。

1.3.2 把待测量变换为光信息脉冲量

光电检测系统可由光脉冲或条纹数的多少来反映待测量的大小。光电探测器的输出是由低电平和高电平两个状态组成的一系列脉冲数字信息。这些脉冲数字信息量是待测信息的函数。实际上，这是一种将待测模拟量转换为数字串的模数信息转换测量方式。

在脉冲量测量中，光电检测系统输出的数字信息量只取决于光通量的有和无，而与光通量的大小无关^[8]。因此，基于这种工作原理的光电检测系统，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。有些测量还需要将这两个状态量按照一定的组合和逻辑输出来表征特定的测量结果，例如，旋转编码器和对射式的风向测量编码器，在输出的结果中利用多对光电对射管实现方向的辨识和测量。