

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

现代光信息传感原理

Principles of Contemporary Optical Information Sensing

廖延彪 黎敏 阎春生 编著

Liao Yanbiao Li Min Yan Chunsheng

清华大学出版社

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

现代光信息传感原理

Principles of Contemporary Optical Information Sensing

廖延彪 黎敏 阎春生 编著

Liao Yanbiao Li Min Yan Chunsheng

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面介绍了各类现代光信息传感器的原理,重点是光电传感器和光纤传感器。深入分析和讨论了各类现代光信息传感器中要注意的一些基本问题。本书内容包括光电传感器、波前传感器、光纤传感器、激光全息检测技术、光层析传感器、光电微型传感器、纳米传感器等。

本书选材广泛,它既全面反映了现代光信息传感的最新发展,又有一定深度。本书可作为高校物理电子和光电子、光学、光学仪器等专业的本科生和研究生的教材或参考书,也可供相关专业技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代光信息传感原理/廖延彪,黎敏,阎春生编著. —北京:清华大学出版社,2009.2
(清华大学信息科学技术学院教材·微电子光电子系列)

ISBN 978-7-302-18643-4

I. 现… II. ①廖… ②黎… ③阎… III. 光电传感器—高等学校—教材 IV. TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 149728 号

责任编辑:陈国新

责任校对:白 蕾

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:27 字 数:555 千字

版 次:2009 年 2 月第 1 版 印 次:2009 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:019649-01

前言

Preface

信息的提取,即传感技术是信息化时代的重要内容之一,光电信息传感则是 21 世纪传感技术的一个重要领域,其发展直接影响到许多行业的进步,但是目前缺少一本较全面反映光电信息传感进展的教材。本教材使读者既能了解光电信息传感的基本理论,又能为光电传感器的选用和设计打下一个良好的基础。作者希望根据自己和所在的课题组近三十年从事光学、光电子学以及光电传感器方面的教学和科学研究的经验,能对此做一些微薄的贡献。

本书较全面地介绍现代光信息传感的主要内容——经典的和现代的,其中包括光电传感器、波前传感器、光纤传感器、激光全息检测技术、光层析传感器、光电微型传感器、纳米传感器。

本书既可以作为教材,也可以作为参考书。作为教材,书中内容可按教学大纲有所取舍。其中光电传感器和光纤传感器可作为基本内容,重点讲述;光层析传感器、激光全息检测技术和波前传感器作为一般了解内容,可仅做简要介绍;光电微型传感器和纳米传感器则可作为自学内容,目的是扩大眼界。建议教师以讲清楚物理概念为主,使学生了解各类光传感器的基本原理,为学生在今后工作中选用或设计所需的传感器打下必要的基础,其余内容可作为自学的阅读材料。作为参考书,本书可作为各领域相关读者系统而全面地了解光传感器的参考读物。

本书有以下特点。

(1) 较全面地介绍了各类光电信息传感器,不仅包括传统的光电传感器,还包括光纤传感器、全息干涉传感器、散斑干涉传感器、荧光传感器、衍射传感器,以及近代出现的光层析传感器、波前传感器、MEMS 传感器、纳米传感器等。

(2) 本书着重讨论了一些重要的光电传感器的原理,即其物理模型的建立过程和结果的分析,着重物理概念及其数学表达方式,便于读者在今后工作过程中能自己建立有关传感过程的物理模型,对所得传感结果能给予正确、合理的解释。

(3) 作者还根据多年科研和教学工作的经验,提供了对于不同的使用环境,如何选用和设计光电传感器,在使用和设计中应如何考虑实际使用中的一些问题,如何研究和开发新的光电传感器,以满足工作的需要。

参加本书编写的有:黎敏教授,负责编写第6章(光电微型传感器)和第7章(纳米传感器);阎春生副教授,负责编写第5章(光层析传感器);其余由廖延彪编写。全书由廖延彪定稿。

本书得以出版,要感谢课题组的同仁赖淑蓉老师和张敏博士,以及家人给予的大力支持和帮助。

本书内容涉及面广,作者知识有限,书中缺点和错误难免,恳请读者批评指正。

作 者

2008年8月于清华园

lyb-dee@mail.tsinghua.edu.cn

目 录

Contents

1	光电传感器	1
1.1	概述	1
1.2	强度调制型光电传感器	1
1.2.1	反射型光电传感器	2
1.2.2	透射型光电传感器	3
1.2.3	CCD 在光电信号测量中的应用	4
1.2.4	强度调制型光电传感器的设计	7
1.3	相位调制光电传感器	8
1.3.1	概述	8
1.3.2	光波的叠加	9
1.3.3	典型的干涉	11
1.3.4	低相干光源干涉	24
1.3.5	典型相位型光电传感器	28
1.3.6	典型相位型光电传感器的设计	31
1.3.7	典型相位型光电传感器的性能	34
1.3.8	光的相干性	38
1.3.9	激光的相干性	46
1.4	偏振调制光电传感器	47
1.4.1	概述	47
1.4.2	弹光效应的应用	48
1.4.3	法拉第效应的应用	49
1.4.4	电光效应的应用	51
1.4.5	光学电功率传感系统	54

1.4.6	椭偏仪在薄膜测量中的应用	57
1.4.7	偏振调制型光电传感器的设计	61
1.5	波长调制型光电传感器	62
1.5.1	概述	62
1.5.2	激光多普勒测速	63
1.5.3	激光感生荧光测温	65
1.5.4	激光拉曼散射光谱测温	67
1.5.5	相干反斯托克斯拉曼光谱测温技术	70
1.6	光测高温术	74
1.6.1	维恩位移定律	75
1.6.2	光测高温	76
1.7	衍射型光电传感器	78
1.7.1	概述	78
1.7.2	衍射的基本理论	79
1.7.3	衍射型光电传感器的设计	82
1.7.4	光波空间频率检测法	87
1.7.5	激光衍射传感的应用实例	91
1.7.6	基于单缝衍射的测量精度与最大量程分析	99
1.8	小结	101
	习题与思考题	108
	参考文献	108
2	波前传感器	110
2.1	引言	110
2.2	波前传感器的基本原理	112
2.3	剪切干涉波前传感技术	113
2.3.1	剪切干涉波前传感器的基本原理	113
2.3.2	动态交变剪切干涉波前传感器	114
2.3.3	动态交变剪切干涉波前传感器的特点	116
2.4	动态哈特曼-夏克波前传感器技术	116
2.4.1	哈特曼-夏克波前传感器工作原理	116
2.4.2	哈特曼-夏克波前传感器的子孔径光斑质心探测误差	118
2.5	曲率传感器技术	118
2.6	像清晰化波前传感技术	119

2.7	波前校正器	119
2.7.1	变形反射镜	120
2.7.2	变形反射镜结构	124
2.7.3	高速倾斜反射镜	127
2.8	波前传感器在自适应光学系统中的应用	127
2.8.1	激光核聚变装置波前校正系统	127
2.8.2	高分辨率自适应光学望远镜	129
2.8.3	人眼视网膜成像自适应光学系统	130
2.8.4	其他应用	132
2.9	小结	133
	习题与思考题	135
	参考文献	135
3	光纤传感器	137
3.1	概述	137
3.1.1	光纤传感器的定义及分类	137
3.1.2	光纤传感器的特点	138
3.2	振幅调制传感型光纤传感器	138
3.2.1	光纤微弯传感器	138
3.2.2	光纤受抑全内反射传感器	140
3.2.3	光纤辐射传感器	141
3.3	振幅调制型光纤传感器的补偿技术	142
3.3.1	双波长补偿法	142
3.3.2	旁路光纤监测法	144
3.3.3	光桥平衡补偿法	144
3.4	相位调制传感型光纤传感器	146
3.4.1	引言	146
3.4.2	马赫-曾德尔光纤干涉仪和迈克尔孙光纤干涉仪	147
3.4.3	Sagnac 光纤干涉仪	148
3.4.4	光纤法布里-珀罗干涉仪	157
3.4.5	光纤环形腔干涉仪	162
3.4.6	白光干涉型光纤传感器	164
3.4.7	外界压力对光纤干涉仪的影响	170
3.4.8	温度对光纤干涉仪的影响	174

3.4.9	光纤干涉仪的传感应用	175
3.5	偏振态调制型光纤传感器	175
3.5.1	光纤电流传感器	175
3.5.2	双折射对光纤传感的影响	177
3.5.3	对光纤电流传感器探头的进一步分析	177
3.5.4	光纤偏振干涉仪	181
3.6	波长调制型光纤传感器	182
3.6.1	引言	182
3.6.2	光纤光栅的分类	182
3.6.3	光纤布拉格光栅应变传感模型分析	185
3.6.4	光纤布拉格光栅温度传感模型分析	191
3.6.5	光纤布拉格光栅在光纤传感领域中的典型应用	193
3.6.6	长周期光纤光栅在传感领域的应用	195
3.6.7	光纤光栅折射率传感技术	196
3.6.8	LPG M-Z 干涉仪折射率传感器	201
3.7	光纤荧光温度传感器	204
3.7.1	光纤荧光温度传感原理	204
3.7.2	荧光寿命测温	204
3.7.3	荧光强度比测温	206
3.7.4	荧光传感材料	206
3.7.5	荧光测温系统	209
3.7.6	荧光测温系统在工业界的应用	210
3.8	分布式光纤传感器	212
3.8.1	概述	212
3.8.2	散射型分布式光纤传感器	214
3.8.3	偏振型分布式光纤传感器	219
3.8.4	相位型分布式光纤传感器	219
3.8.5	微弯型分布式光纤传感器	220
3.8.6	荧光型分布式光纤传感器	221
3.8.7	其他类型的分布式光纤传感器	223
3.8.8	应用	224
3.9	聚合物光纤传感器	224
3.9.1	概述	224
3.9.2	多模聚合物光纤传感器及其应用	226

3.9.3 聚合物光纤光栅传感·····	235
3.10 光子晶体光纤及其在传感中的应用·····	236
3.10.1 概述·····	236
3.10.2 光子晶体光纤在传感中的应用·····	237
3.10.3 高双折射光子晶体光纤·····	239
3.10.4 双模光子晶体光纤传感器·····	240
3.10.5 掺杂的微结构聚合物光纤传感器·····	242
3.10.6 其他传感应用·····	242
3.11 传光型光纤传感器·····	242
3.11.1 振幅调制传光型光纤传感器·····	243
3.11.2 相位调制传光型光纤传感器·····	245
3.11.3 偏振态调制传光型光纤传感器·····	247
3.12 光纤传感技术的发展趋势及课题·····	248
3.13 小结·····	249
习题与思考题·····	249
参考文献·····	250
4 激光全息检测技术 ·····	252
4.1 概述·····	252
4.2 全息原理·····	255
4.2.1 基元全息图·····	255
4.2.2 基本公式·····	256
4.3 物像关系·····	257
4.3.1 基元全息图条纹的分布·····	258
4.3.2 点光源照明的波前再现·····	260
4.4 全息干涉计量·····	262
4.4.1 概述·····	262
4.4.2 二次曝光法·····	264
4.4.3 单次曝光法·····	270
4.4.4 时间平均法·····	271
4.5 全息干涉条纹的实验数据处理·····	273
4.5.1 全息干涉条纹的定位与解释·····	273
4.5.2 折射率二维分布位相物体的数学反演·····	275
4.5.3 折射率轴向对称分布位相物体的数学反演·····	276

4.5.4	折射率三维分布位相物体的数学反演·····	277
4.6	激光散斑检测技术·····	279
4.6.1	概述·····	279
4.6.2	激光散斑现象与散斑检测技术·····	279
4.6.3	激光散斑照相测量位相物体折射率分布·····	282
4.6.4	二维密度场与温度场的测量·····	283
4.7	小结·····	283
	习题与思考题·····	285
	参考文献·····	286
5	光层析传感器·····	287
5.1	概述·····	287
5.2	计算机层析成像的原理·····	289
5.2.1	概述·····	289
5.2.2	投影数据和拉冬变换·····	290
5.2.3	投影的中心频谱定理·····	293
5.2.4	回投影、取和与模糊图像的重现·····	294
5.2.5	OFPT 图像重建算法·····	296
5.3	医用射线 CT 成像技术·····	302
5.3.1	医用 X-CT 成像技术·····	302
5.3.2	核辐射 CT 成像技术·····	303
5.4	工业 CT 成像技术·····	307
5.4.1	工业 CT 成像的原理·····	307
5.4.2	工业 CT 成像系统的组成·····	307
5.4.3	工业 CT 成像系统的主要性能·····	308
5.4.4	工业 CT 成像的应用·····	309
5.5	中子成像技术·····	309
5.6	光学层析成像·····	310
5.6.1	概述·····	310
5.6.2	光在介质中的传输特性·····	311
5.6.3	光学 CT 发展现状·····	312
5.6.4	光相干成像技术(OCT)·····	316
5.6.5	光弥散层析成像技术(DOT)·····	318
5.6.6	光过程层析成像(OPT)·····	319

5.7 小结	322
习题与思考题	325
参考文献	325
6 光电微型传感器	330
6.1 MEMS 与微系统简介	330
6.1.1 概述	330
6.1.2 典型的 MEMS 产品	332
6.1.3 微制造业的演变与微传感器的发展	334
6.1.4 微系统设计与制造的多学科交叉本质	335
6.1.5 MEMS 传感器和微系统在各工业领域的应用与市场	336
6.2 微光机电系统与光电微型传感器	337
6.2.1 微光机电系统	337
6.2.2 微光电传感器、执行器	342
6.3 微(光机电)系统设计与制造理论	351
6.3.1 微系统设计与制造的工程学	351
6.3.2 微系统设计的工程力学基础	352
6.3.3 微系统设计与热传工程理论	353
6.3.4 微型化的缩放比例定律	353
6.3.5 微系统光学理论	354
6.3.6 MEMS 与微系统常用材料	354
6.4 微制造技术与微制造业	354
6.4.1 MEMS 基本工艺	355
6.4.2 MEMS 技术与微传感器性能的关系	358
6.5 微型系统的封装	359
6.5.1 微系统封装设计中通常应考虑的问题	359
6.5.2 微系统封装的关键问题	360
6.5.3 光微加工封装技术	362
6.6 光电微型传感器的典型结构	366
6.6.1 器件集成	366
6.6.2 精确预/后对准	366
6.6.3 阵列和重复结构	366
6.6.4 近场光学元件	367
6.6.5 光学镊子	367

6.6.6	局部伺服反馈	367
6.7	光电微型传感器典型器件	367
6.7.1	MEMS“元器件”的定义	367
6.7.2	带有微机械加工 IO 结构的光纤传感器	367
6.7.3	可调光学传感器	369
6.7.4	微机械加工的布拉格光栅传感器	370
6.7.5	微机械加工的纳米级 SNOM 传感器	371
6.8	微系统设计	371
6.8.1	设计关注的主要问题	371
6.8.2	微光机电系统的设计举例	376
6.8.3	计算机辅助设计 CAD	378
6.9	小结	381
	习题与思考题	381
	参考文献	382
7	纳米传感器	385
7.1	纳米传感器原理	385
7.1.1	纳米器件、纳米系统与纳米技术	385
7.1.2	纳米传感器的基本原理	387
7.2	NEMS 的设计与建模	390
7.2.1	NEMS 系统的设计	390
7.2.2	纳米系统的结构	391
7.2.3	纳米级机电系统、装置与结构的建模	393
7.3	NEMS 设计举例——生物纳米马达	402
7.3.1	NEMS 设计概述	402
7.3.2	生物纳米马达	402
7.4	纳米制造技术	406
7.4.1	概述	406
7.4.2	物理蒸汽合成	406
7.4.3	分子束取向附生和有机金属蒸汽取向附生	407
7.5	纳米传感器的典型结构	407
7.5.1	纳米探针	407
7.5.2	碳纳米管	408
7.5.3	近场光学元件	409

7.5.4 纳米操纵器.....	411
7.6 典型纳米传感器	412
7.6.1 概述.....	412
7.6.2 基于共振隧穿、介观压阻等纳效应的 NEMS 传感器	414
7.6.3 基于一维纳米结构的 NEMS 传感器	414
7.6.4 微机械加工的纳米级 SNOM 传感器	415
7.7 小结	415
习题与思考题.....	416
参考文献.....	416

1

光电传感器

1.1 概 述

光电传感器是指利用光波的特性作为信息采集的媒介或敏感元器件,再通过光电转换单元和数据处理单元把光信息变成电信号而加以利用(例如用于显示或控制等)的器件。

利用光波采集信息的方式主要有两类,即无源方式和有源方式。无源方式是指被采集对象自身发光,所以传感器不需光源。例如,具有一定温度的物体会向外辐射光波,其辐射特性和物体的温度有关。利用物体的这种辐射特点,可以测量物体的温度,这就是光测高温的方法。又如,利用物质发光的特性可以检测物质的成分、含量等。这就是荧光分析法和光谱分析法。有源方式则是指被采集对象自身不发光,因此光电检测系统需利用外界输入的光波通过它对光波特性的变化检测出所需信息。例如利用光波频率的变化可检测运动物体的速度(多普勒测速法)。再如,利用光波通过透明媒质(例如光学玻璃、透明塑料等)时偏振态的变化,可检测到此透明媒质的受力大小和方向。这已形成光测弹性力学的一个研究领域。依据所用光波的特性参量,有源方式又可分为:振幅调制型、相位调制型、偏振调制型和波长/频率调制型几类。本章将对上述几类光电传感器作简要介绍。

1.2 强度调制型光电传感器

强度调制型光电传感器是指通过对传输光波的振幅(或强度)检测所需信息(例如位移、温度等物理量)的光传感器。调制光强的方式有多种,可以调制反射光或透射光,也可以通过吸收或散射来调制

光强。

强度调制型光电传感器的优点：系统结构简单，易于实现，一般情况下成本较低。其不足之处：对光源和光探测器要求较高，系统抗干扰能力较差。由于这类传感器是根据光强的变化来反映被测量的变化，因此，传感器所用光源和光探测器应十分稳定，其稳定度应高于对传感器测量误差的要求，也就是光源自身光强的波动和光探测器响应的起伏对测量结果的影响可以忽略不计，并且外界杂散光的影响也应降到最低。此外，光电传感器的动态范围和灵敏度也受光探测器的限制。

为提高光电传感器性能，一般应采用光功率输出稳定的光源，噪声低、动态范围大的光电探测器。为降低外界杂散光对传感器测量的影响，可采取光屏蔽和/或采用匹配滤光片。很多情况下，只需通过检测光强的有无（即有光 and 没有光）来确定物理量的变化（例如位置的变化等），这时对光强稳定性的要求可大大降低。

光强调制型光电传感器调制光束的方式有两种，即调制光强和调制光束方向。前者如吸收型（或散射型）光电传感器（通过传输媒质对光强吸收和/或散射的强弱来测定媒质的浓度或含量），后者如测定位移的光电传感器。

1.2.1 反射型光电传感器

反射型光电传感器是利用反射光强的变化来检测被测量的待测量（物理量、化学量等）。图 1-2-1 是反射型光电传感器的几个典型例。利用图 1-2-1(a) 中的装置可测反射面的粗糙度：表面光洁度好，反射光强；反之，则反射光弱。利用此装置也可测反射面的位移，因为光强的变化反映反射面和光探测器之间的距离变化。图 1-2-1(b) 中，如果棱镜置于空气中，则反射光强（因为底面产生全反射）；如果置于水中，则反射光弱。由此即可构成一个光电液位计，如图 1-2-2 所示。此液位计可用于液位报警。如果提高光电探测器的检测灵敏度，则由反射光强的变化可测出棱镜底面液体折射率的变化，从而可检测液体的浓度等参量。例如，由此可构成测量水中酒精含量的酒精浓度计，水中蔗糖含量的糖分计等。

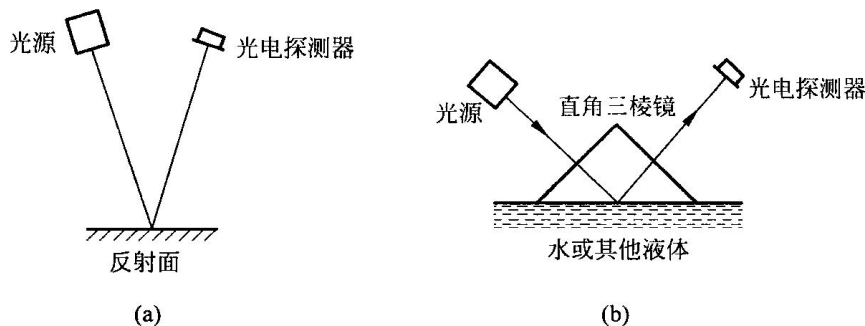


图 1-2-1 调制反射光强的原理图

上述诸例是定点调制光强的方法,如果上述诸例的装置中再配以光束扫描装置,则可在大空间范围内进行检测。

反射扫描光检测法的原理如图 1-2-3 所示。激光通过旋转的反射镜入射到被测表面上,如果表面有缺陷,在缺陷处反射光必有明显变化,利用此法可在较大空间范围内检测表面缺陷。这种方法适于自动检测直径 $0.1 \sim 1\text{mm}$ 的缺陷。典型表面伤痕检测装置如图 1-2-4 所示。其中图 1-2-4(a)为飞点成像式,在被检表面的行进方向(x 方向)的垂直方向(y 方向)上,用线光束照明,反射光用旋转多面体沿 y 方向扫描接收,在被测表面的像面上设置针孔以检测反射光的变化,从而评定表面有否损伤与划痕。图 1-2-4(b)是飞点扫描式,直接用激光束扫描表面,扫描方向与被检表面的行进方向垂直。反射光由阵列光电器件检测,此法已用于高速行进的冷轧钢板表面的检测。

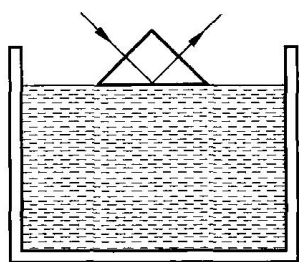


图 1-2-2 光电液位计原理图

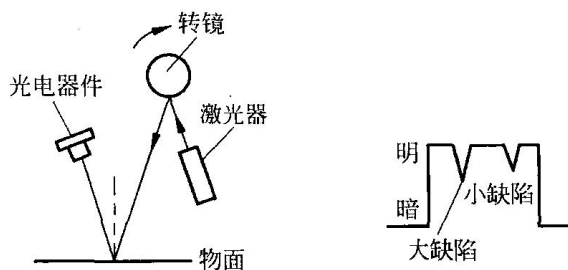


图 1-2-3 反射光扫描检测原理

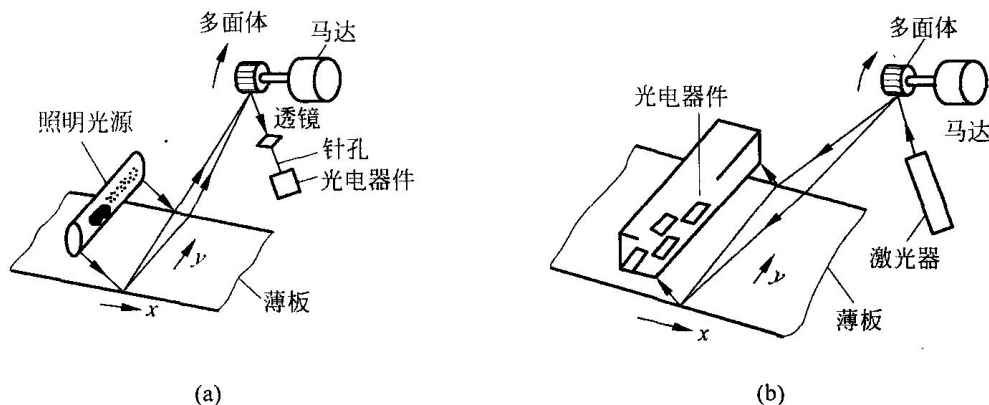


图 1-2-4 典型的表面缺陷检测装置

(a) 飞点成像式; (b) 飞点扫描式

1.2.2 透射型光电传感器

透射型光电传感器是利用透射光强的变化来检测被测量的待测量。它和上述反射型光传感器的结构类似,只是光路由反射式变成透射式。图 1-2-5 是一种最简单也是最典