

# 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述

卢荣胜<sup>1\*</sup>, 吴昂<sup>1,2</sup>, 张腾达<sup>1</sup>, 王永红<sup>1</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

<sup>2</sup>河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002

**摘要** 以智能制造业表面缺陷在线自动检测为应用背景,系统地综述了自动光学(视觉)检测(以下统称自动光学检测,AOD)技术。内容涉及 AOI 技术的基本原理、光学成像方法、系统集成关键技术、图像处理与缺陷分类方法等。对 AOI 系统集成中的关键技术,如视觉照明技术、大视场高速成像技术、分布式高速图像处理技术、精密传输和定位技术和网络化控制技术等进行了概述;对表面缺陷 AOI 主要光学成像方法的基本光学原理、功能和应用场合进行了总结;对表面缺陷检测中的图像处理、缺陷几何特征定义、特征识别与分类算法进行了系统阐述,重点介绍了周期纹理表面缺陷图像中的纹理背景去除方法,复杂和随机纹理表面缺陷的深度学习检测、识别与分类方法。

**关键词** 机器视觉; 表面缺陷; 自动光学检测; 视觉检测; 图像处理; 分类

中图分类号 TP74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815002

## Review on Automated Optical (Visual) Inspection and Its Applications in Defect Detection

Lu Rongsheng<sup>1\*</sup>, Wu Ang<sup>1,2</sup>, Zhang Tengda<sup>1</sup>, Wang Yonghong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

<sup>2</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China

**Abstract** The authors comprehensively review technique of automated optical (visual) inspection(AOI) technique from aspects of the basic principle, optical imaging method, key techniques of system integration, image processing and defect classification at the application background of automated online surface defect inspection in intelligent manufacturing industry. The key technologies of system integration in automated optical inspection, such as visual lighting, high speed imaging in a large field of view, distributed high-speed image processing, precision transmission and positioning for the inspected objects, and networked control, are briefly summarized. The basic optical principles, functions and applications of the optical imaging methods commonly used in automated optical defect inspection are comprehensively reviewed. The image processing, defect geometric feature definition, feature recognition and classification algorithm for surface defect inspection are systematically summarized. Particularly, the methods of texture background removal in the images with periodic textures, and the detect detection, recognition and classification methods for complex and random texture surface based on depth learning are reviewed.

**Key words** machine vision; surface defect; automated optical inspection; vision inspection; image processing; classification

**OCIS codes** 120.4630; 150.0155; 100.2000

## 1 引言

在产品生产制造过程中,由于生产环境不理想、制造工艺不规范等各种技术原因,产品表面难免会

产生多种缺陷,如印制电路板上出现错孔、划伤、断路、短路和污染<sup>[1-2]</sup>,液晶面板的基板玻璃和滤光片表面含有针孔、划痕、颗粒<sup>[3]</sup>,带钢表面产生裂纹、辊印、孔洞和麻点<sup>[4]</sup>,铁路钢轨出现凹坑、鼓包、划痕、

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-06-05; 录用日期: 2018-06-11

基金项目: 国家重大科学仪器开发与应用专项(2013YQ220749)、国家重点研发计划(2016YFF0101803)

\* E-mail: rslu@hfut.edu.cn

擦伤、色斑和锈蚀<sup>[5]</sup>,这些缺陷不仅影响产品外观,更重要的是影响产品性能,严重时甚至危害生命安全,对用户造成巨大经济损失。因此,制造业对产品的表面质量控制非常重视。

表面缺陷的传统检测方法为人工目视检测法,如手机盖板与外壳、软包锂电池外表面、手机背光源模组、液晶显示屏 cell 段和 module 段半成品表面等,国内很多厂家主要采用人工目视法检测<sup>[6]</sup>,但该方法存在主观性强、人眼空间和时间分辨率有限、不确定性大、易产生歧义和效率低下等缺点,很难满足现代工业高速、高准确度的检测要求。随着电子技术、图像传感技术和计算机技术的快速发展,利用基于光学图像传感的表面缺陷自动光学(视觉)检测(以下统称自动光学检测,AOD)技术取代人工目视检测表面缺陷,已逐渐成为表面缺陷检测的重要手段,因为这种方法具有自动化、非接触、速度快、精度高、稳定性高等优点。

表面缺陷 AOI 技术目前广泛应用于工业、农业、生物医疗等行业,尤其在精密制造与组装行业,如手机、液晶面板、硅片、印制电路板等领域,表面缺陷 AOI 技术发展异常迅速,各种高新技术检测装备层出不穷。鉴于篇幅限制,本文只对精密制造与组装行业的表面缺陷 AOI 技术进行综述,并只涉及二

维(2D)AOI 技术。

## 2 AOI 基本原理与关键技术

AOI 技术是集成光学传感技术、运动控制技术与信号处理技术,在工业生产过程中执行测量、检测、识别和引导等任务的新兴科学技术<sup>[7-8]</sup>。

图 1 为薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)液晶显示面板剖面示意图。由图可知,TFT-LCD 显示器主要由多层二维或 2.5 维平板类零件组成,如底部背光源模组、TFT-LCD 基板玻璃、光刻在基板玻璃上的 TFT-LCD 阵列、氧化铟锡(ITO)导电膜、滤光片、偏振片、表面基板玻璃等。图中还给出了部分缺陷示例。为了提高产品的合格率,降低生产成本,在生成过程中,需要将加工、检测、返修、组装、检测、返修等工序交织在一起,组成整个制造工艺链。其中检测工序离开不了 AOI 技术,正是利用这种技术,才能保证制造过程中产品质量的 100% 控制。

鉴于液晶面板制造过程对表面缺陷检测要求高,实现难度大,采取的 AOI 技术具有非常好的代表性。本节以液晶面板表面缺陷在线检测为例,概述 AOI 技术的基本原理、系统集成中的主要关键技术。

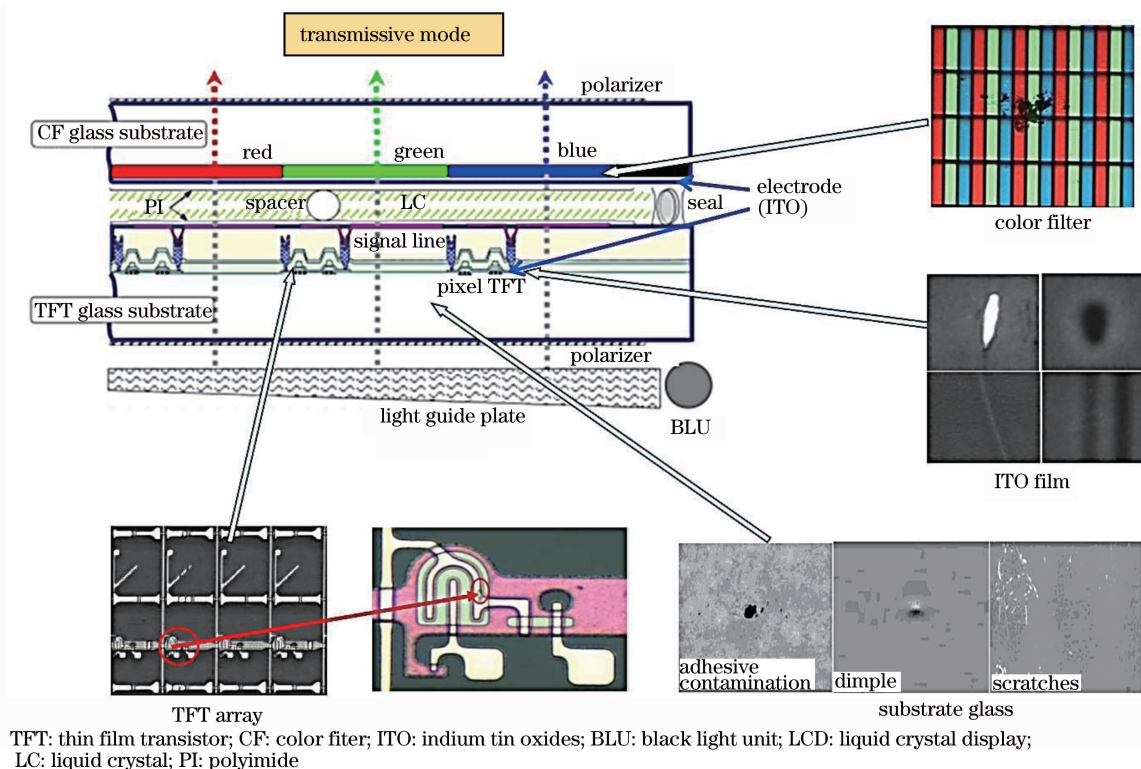


图 1 TFT-LCD 模组结构及缺陷示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of TFT-LCD module and the defects on different layers



### 2.1 AOI 的基本组成原理

AOI 技术是基于人眼视觉成像与人脑智能判别的原理,采用光学照明与图像传感技术获取被测对象的信息,通过数字图像处理增强目标特征,再采用模式识别、机器学习、深度学习等算法从背景图像中提取特征信息,并进行分类与表征,然后反馈给执行控制机构,实现产品的分类、分组或分选、生产过程中的质量控制等<sup>[6, 9]</sup>。

AOI 的基本原理如图 2 所示,在工业应用领域,AOI 实际上是一种智能化的自动光学成像与处理系统,即用各种光学成像技术与系统(如相机)模拟人眼的视觉成像功能,用计算机处理系统代替人脑执行实时图像处理、特征识别与分类等任务,最后把结果反馈给执行机构,代替人手进行操作。AOI 能够实现的主要功能包括测量、检测、识别与引导 4 个方面。对于尺寸比较小的零部件,用图 2 所示的基本单元就可以解决实际问题。但在很多情况下,为了实现大视场、高分辨率、快速的在线 AOI 任务,往往需要多个基本单元组合共同实现高要求、复杂功能。

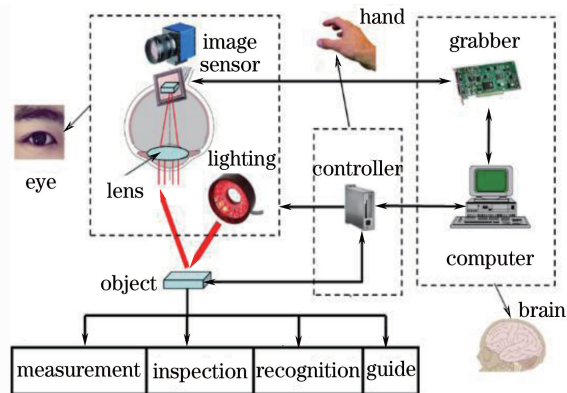


图 2 AOI 基本原理

Fig. 2 AOI basic principle

例如图 1 所示的高世代液晶基板玻璃、滤光片、TFT 阵列、ITO 膜、背光模组等表面缺陷检测 AOI 系统,可能需要由多个图 2 所示的基本单元集成在一起,协同工作,共同完成高难度检测任务。图 3 为常用的多传感器成像、高速分布式处理 AOI 系统原理架构,由光源、相机阵列、显微复检、集群并行处理系统、控制系统、主控计算机、服务器组成,以及与工厂数据中心互联的工业局域网组成。

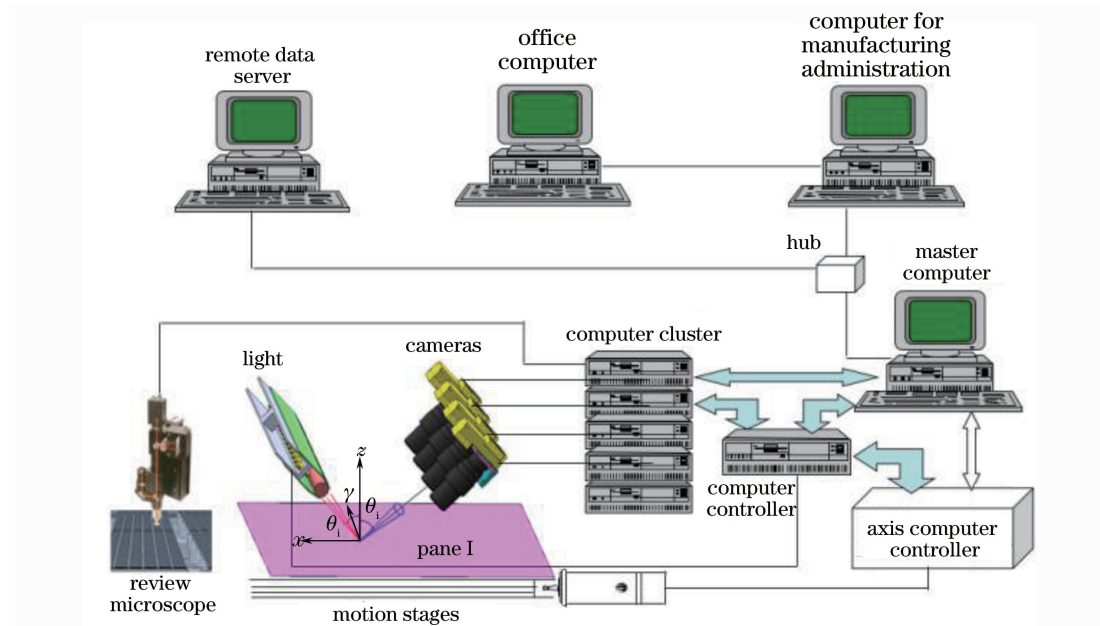


图 3 多传感器 AOI 系统组成原理图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-sensor AOI system

图 4 为液晶基板玻璃检测 AOI 系统结构示意图,其具有表面缺陷检测、显微复检等功能。从图中可以看出,完整的 AOI 系统不仅集成了照明与光学成像单元,还需要有被测件支撑传输单元、精密运动机构与控制单元、高速并行图像处理单元等。

### 2.2 大视场高分辨率高速成像技术

AOI 系统的成像技术可以分为点扫描成像、线

扫描成像和帧成像三种方式,光学成像视场与检测分辨率之间始终是一对矛盾体,要解决大视场高分辨检测带来的挑战,可行的应对方法有扫描成像方法和阵列成像方法,或者通过两者之间的组合来实现。扫描成像方法又可以分为点扫描、行扫描和帧扫描方法。

点扫描方法可以通过缩小扫描点光斑的大小和

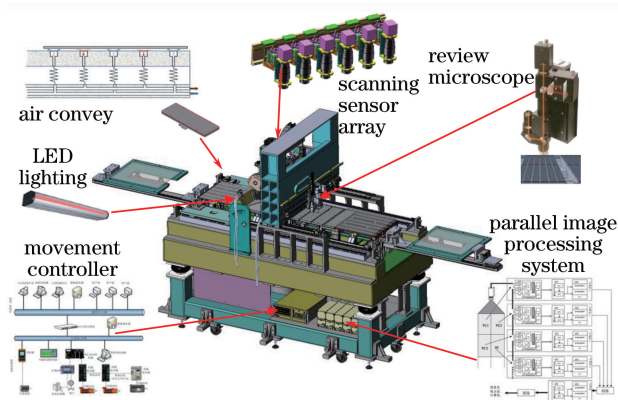


图 4 TFT 和 Filter 阵列 AOI 系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of AOI system

structure for inspecting TFT and filter array substrates

提高扫描采集密度实现大视场高分辨率检测, 视场越大, 分辨率越高, 检测时间就越长, 因此有时难以满足生产节拍对检测速度的要求, 但是点扫描成像方法由于在各个扫描点成像状态一致, 可以分辨出比其他方法更多的特征, 通过布置多个传感器[如雪崩二极管或光电倍增管(PMT)], 实现多通道角度分辨成像。如图 5(a)所示, 利用不同的通道检测不同的特征, 不仅能检测表面缺陷, 还可以检测表面微观曲率的变化, 实现特征光学方法分离, 减少后续图像处理的难度<sup>[10-11]</sup>。通过在表面法线两侧不同的角度方向放置多个接收器, 可以用不同的接收器分别检测表面图案、油污、指纹、划痕、表面曲率变化等, 图 5(b)为常规扫描仪扫描得到的图像, 只能看到表面图案, 图 5(c)~(e)展示了瓷砖表面点扫描多通道成像检测结果, 通过比较可以看出点扫描角度分辨多通道成像检测的优势。需要说明的是: 图 5(c)~(e)是伪彩色图像, 每个图像由邻近三个通道三幅图像合成得到。

行扫描和帧扫描属于阵列扫描方法, 虽然成本较高, 但极大地提高了检测速度, 因此在自动生产线上得到广泛应用, 如图 4 所示的检测系统采用一排线阵相机实现大视场高分辨高速扫描检测。所有的相机具有相同的参数且在远程主机的控制下同步工作, 对于单台相机检测视场小于相机外形尺寸的情况, 需要线阵相机多次来回扫描, 采取图像拼接技术实现整个幅面的检测。尤其在 OLED (organic light-emitting diode) 和晶圆检测制造行业, 对表面缺陷在线检测分辨率和检测速度提出苛刻的要求, 其中分辨率要求优于  $1 \mu\text{m}$ 。采用线阵相机阵列扫描有时都难以同时满足高分辨率和高速度的指标, 或者在光学系统上不容易实现, 因此需要采用高速

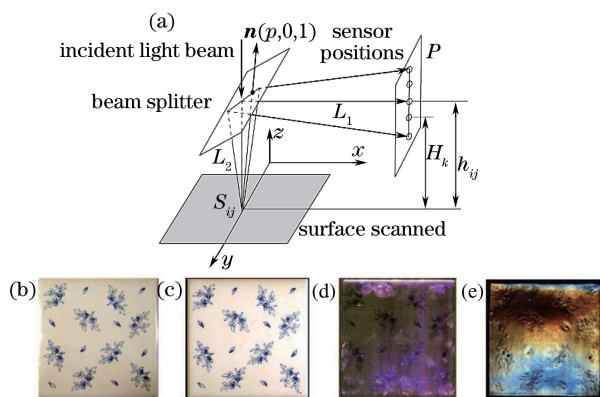


图 5 点扫描角度分辨多通道成像检测。(a)多通道成像原理; (b)文档扫描仪扫描得到的图像; (c)点扫描暗场成像获得的表面图案; (d)点扫描低角度成像获得的表面油污与指纹图案; (e)点扫描同轴明场成像获得的表面梯度图

Fig. 5 Angle resolution inspection with the techniques of spot scanning and multi-channel imaging. (a) Multi-channel scanning imaging principle; (b) image from a document scanner; (c) surface patterns obtained by point scanning with dark field imaging; (d) surface oil stain and fingerprint pattern obtained by point scanning with low angle imaging; (e) surface gradient map obtained by spot scanning with coaxial brightfield imaging

面阵相机进行帧扫描。

为了提高生产效率, 对 AOI 的检测速度和分辨率要求不断提高, 导致需要更大靶面更快速的线阵和面阵相机, 因而产生了新一代的线阵与面阵图像传感器。目前商用的用于机器视觉行业的线阵相机像素可达 16 K ( $K=1024, 16 K=16 \times 1024$ ), 有的线阵相机还采用 TDI (time delay integration) 多线积分的方式提高感光灵敏度和扫描速度; 面阵相机在 500 万像素分辨率、位深 10 bit 时也能达到近 600 frame/s。这些新型 CMOS 传感器可以在极高的速度下拍摄高分辨率影像, 因此对数据传输率也提出了极高的要求, 这促使数据传输接口从传统的 GigE Vision 和 CameraLink 接口标准升级到 CoaxPress 接口标准, 单根同轴电缆中传输数据的速度高达  $6.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ , 传输速度得到极大改善, 为开发高速扫描成像系统提供了技术保障。

对于像 TFT-LCD 玻璃基板与彩色滤光片这样大幅面表面缺陷的检测, 为了解决高速高分辨率之间的矛盾, 有时还需要采取全视场扫描成像和局部显微复检 (review) 成像两种成像方式。全视场扫描成像是将多个线阵相机排列成一行, 进行一个来回或多个来回高速扫描, 扫描分辨率一般大于  $10 \mu\text{m}$ , 通过高速线阵扫描成像, 初步确定缺陷的种类与位

置。为了解缺陷产生的原因,再采取显微复检成像技术,局部观察缺陷的微观信息。为了克服被测件平整度的变化,以及克服机台微小振动对显微镜成像清晰度的影响,需要采用具有自动对焦功能的显微成像技术及系统。典型的自动对焦方法有光学三角法、临界角法、傅科刀口法、共焦法、投影条纹法和像散法等<sup>[12]</sup>,这些方法各有优缺点,目前 AOI 系统中,在业界得到广泛应用的是激光三角法和投影条纹法。

### 2.3 分布式高速并行图像处理技术

图像高速并行处理速度决定了整个系统的检测效率,例如 6 代液晶屏生产线的玻璃基板尺寸为  $1500\text{ mm} \times 1800\text{ mm}$ ,要求在 10 s 内完成扫描检测过程。假设选用 4 线 16 K 像素的线扫描相机,输出位深为  $8\text{ bits} \cdot \text{pixel}^{-1}$ ,像元大小为  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,缺陷检测分辨率为  $20\text{ }\mu\text{m}$ ,根据采样定理,要检测  $10\text{ }\mu\text{m}$  大小的缺陷,必须至少对应 2 个像素间距,因此选用 10 台相机同时扫描一行,这样检测一块玻璃基板在 10 s 内需要处理的图像数据量为 109 GByte。

一台计算机很难完成如此庞大的图像数据采集与处理量,可行的办法是采用网络聚合大量的计算资源和存储资源形成虚拟超级计算机。因此,可以采用现场可编程门阵列(FPGA)图像采集与预处理卡+多核电脑中央处理器(CPU)分布式机群的二级主从式并行处理技术方案,或采用普通图像采集卡+图形处理器(GPU)多核处理器+多核 CPU 分布式机群的三级并行处理方案,如图 3 和图 6 所示。在这种处理技术中,相机输出的图像先由图像预处理卡分为  $2^n$  块,因此每块卡只采集相应的  $1/2^n$  图像(通常  $n$  取 0、1 或 2),由 FPGA 图像处理模块进行高速硬件预处理(如傅里叶和小波变换),然后再传给工控机 CPU 作进一步处理。

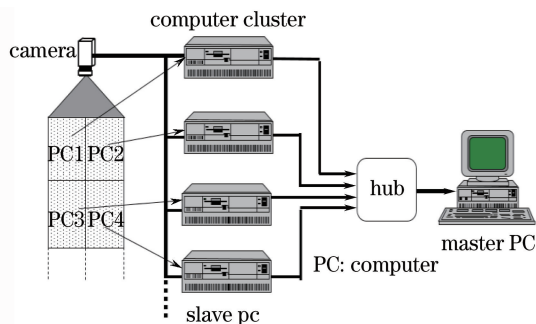


图 6 分块并行高速处理原理架构

Fig. 6 Principle architecture of block parallel high-speed processing

多级并行处理的最底层是集成有图像采集卡的分布式机群,负责采集相机传来的图像,并进行分块

和预处理,以提高处理速度和减轻后面处理单元的负担。分布式机群由多台工控机通过高速千兆网络链接起来,每个工控机中安装一个图像采集预处理卡进行图像采集和预处理。多级并行的中间层是多核 CPU,执行的是中粒度计算,处理算法中逻辑较强的部分以及算法中不能并行执行的部分。

### 2.4 精密传输、定位与运动控制技术

在 AOI 系统中,上下料机构、精密传输机构、定位机构与运动控制技术等是整个检测系统中极其重要的部分,直接影响整个系统的检测性能。如图 7 所示的手机显示屏背光模组表面缺陷检测系统,包含了自动上料、编码、对准、检测、分选、返修识别等几个部分<sup>[6]</sup>,各个部位对被测工件准确定位并协同工作,保证了检测的顺利进行。

对于清洁度要求特别高的场合,传输运载方法与机构的合理设计更加重要。常用的传输方法有转盘、圆皮带、平皮带、滚轮、气浮等。转盘、圆皮带、平皮带一般适合运载传输质量小、尺寸小的零件,其传输方式基本都是接触式,容易产生接触性损伤、杂质污染和基材变形等问题。滚轮和气浮传输承载系统适合大型零件的传输,如液晶屏基板玻璃的传输等。滚轮传输也是接触式传输,同样存在污染和划伤等问题,因而不能用于承载像高世代平板显示屏组件,如 6 代以上的液晶玻璃基板、滤光片、液晶模组等大尺寸零件。因为组件表面的粗糙度必须极小,任何  $3\text{ }\mu\text{m}$  以上的划痕和污物都会影响最终显示屏的显像质量并导致次品的产生,故最合适的方案是采用开放式静压气浮技术非承载方法。

## 3 AOI 中的光学成像技术

从广义上来说,任何以光学图像传感方式(如 X 光成像、太赫兹成像等)对被测物体进行自动测量或检测的技术都可被认为是 AOI 技术。AOI 技术不仅仅是简单地使用照明光源和相机直接对物体成像实施自动检测,在很多场合,是通过合理选用光学成像方法来获得物体被测特征,后者是实现 AOI 技术的前提。下文从光的物理特性出发,介绍 AOI 技术中的常用光学成像方法。

### 3.1 角度分辨检测技术

光束照射到被测表面后根据粗糙度的不同会发生镜面反射、方向散射和均匀散射三种现象。其中:镜面反射服从镜面反射定律,随着表面粗糙度和起伏程度的增加,其能量在空间分布将发生变化;方向散射发生在光线波长与表面粗糙度投影尺寸可比拟



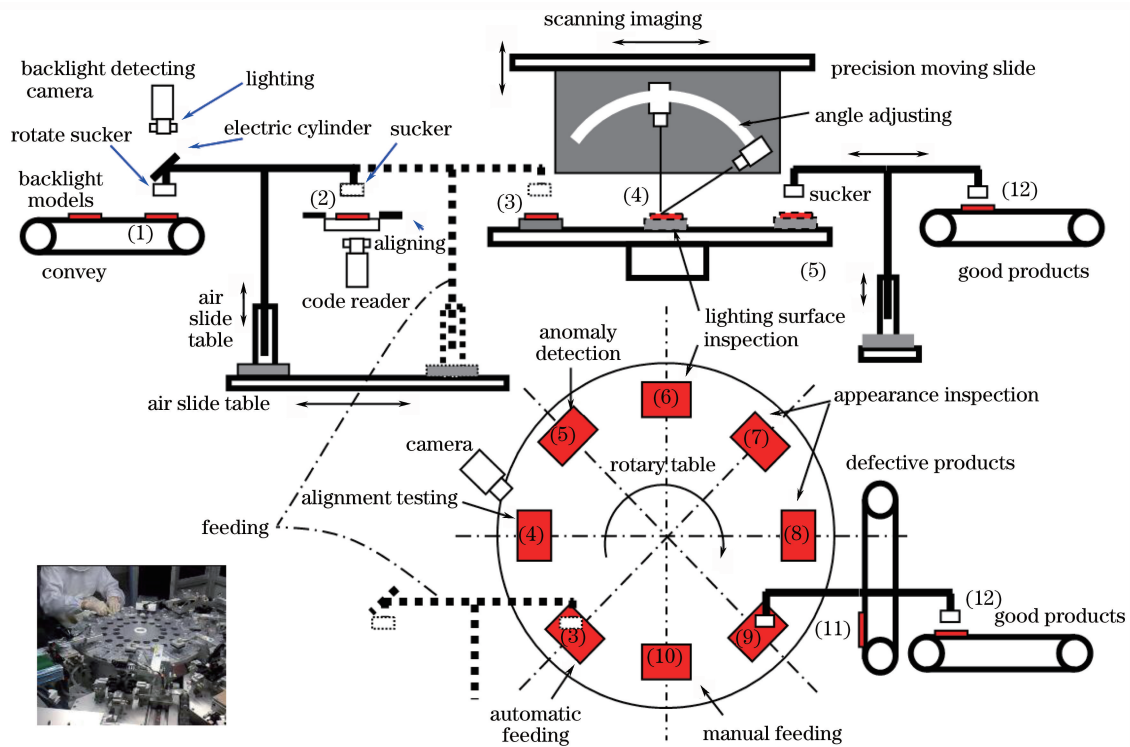


图 7 手机背光源在线 AOI 系统机构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of on-line AOI system mechanism for inspecting mobile backlight model

的情况下, 散射光在空间中的能量分布为非均匀分布, 在某一个空间角内具有能量分布的最大值; 均匀散射即朗伯散射, 在反射面以上的半空间球面中, 每个角度方向上的发光强度都相等, 可用双向散射分布函数(BSDF)来表述<sup>[10, 13-14]</sup>。

光线反射及散射过程不仅与表面微观纹理高度概率密度函数、方均根高度、方均根斜率和功率谱密度等粗糙度参数有关, 还受到表面光洁度和缺陷等表面微观几何尺度上峰谷起伏对光线传播遮挡的影响, 即阴影效应, 散射模型可用图 8 近似描述<sup>[15-17]</sup>。

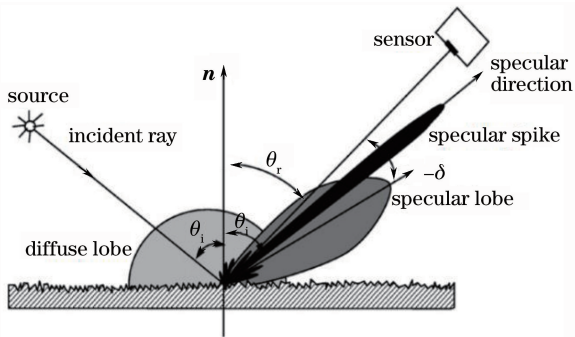


图 8 表面散射模型

Fig. 8 Light scattering model on surface

在图 8 中, 散射光场包含 4 个成分, 分别为漫反射光瓣 (diffuse lobe)、镜面反射光瓣 (specular lobe)、镜面反射峰 (specular spike) 和由微观纹理引

起的菊花瓣, 详细内容参考文献<sup>[18-19]</sup>。根据光的散射特性, 针对不同的表面缺陷, 产生了不同的光学散射角度分辨 AOI 技术, 分别为同轴、明场、暗场、漫反射、背光等照明检测技术, 如图 9 所示。

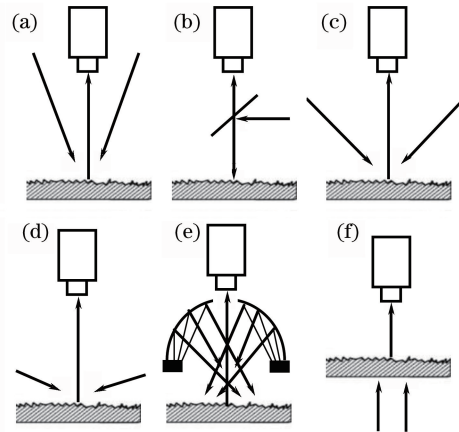


图 9 典型的照明方式。(a) 明场照明; (b) 同轴明场照明; (c) 暗场照明; (d) 低角度暗场照明; (e) 漫反射照明; (f) 背光照明

Fig. 9 Typical lighting types. (a) Brightfield lighting; (b) axial brightfield lighting; (c) darkfield lighting; (d) low angle darkfield lighting; (e) diffuse lighting; (f) back lighting

在明场照明成像方式中, 相机位于入射光的正对面, 大部分光线进入相机。如果表面是完美的漫

反射表面,则相机成像的是均匀的明亮图像。当被成像区域有缺陷时,反射光将在其他方向上散射,相机成像在明亮背景中产生暗点。相反,对于暗场照明成像,相机远离镜面反射方向,如果表面是镜面,进入相机的散射光非常微弱,相机抓取的是暗灰色图像。但是,如果照明区域存在缺陷,入射光在缺陷处向各个方向散射,相机拍摄的图像出现明亮的缺陷标记。明场照明常用于检测粗糙表面的缺陷,暗场照明常用于镜面检测,如检测光学表面的划痕<sup>[14]</sup>。背光照明光源和相机位于被测物的两侧,光线穿透被测物进入相机,如果被测物不透光,就会产生投影,形成高对比度和清晰的轮廓。背光照明主要用于检测不透明物体的外围轮廓特征,以及透明物体内部气泡、杂质异物等<sup>[20]</sup>。漫反射照明是照明光线从不同角度方向照明被测表面,用于压制表面纹理、皱褶可能在相机像面上形成阴影干扰,帮助均匀化背景表面的亮度。

两种被测表面不同的照明效果比较见图 10。图 10(a)为明场环形照明的效果图;图 10(b)为暗场照明的效果图,由于待测物体表面是突起部分,暗场照明对这种突起表现得更加清晰,背景也更加平滑;图 10(c)为明场照明对易拉罐瓶底的照明效果;图 10(d)为漫反射圆顶照明对同样的易拉罐瓶底的照明效果。从图 10 可以看出,由于易拉罐瓶底是曲面光滑的,明场照明的背景和特征反差很小,光线不

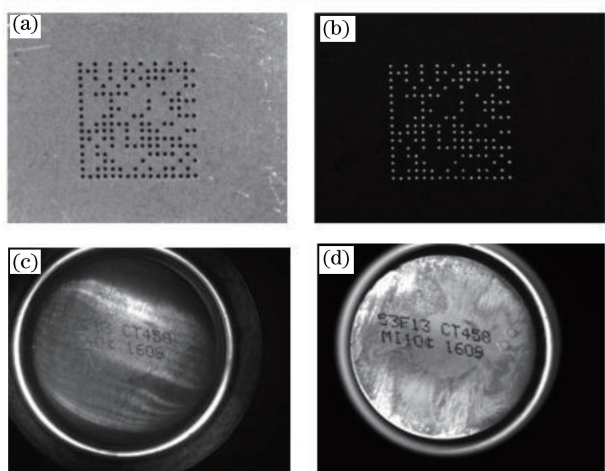


图 10 不同照明效果比较。(a)明场环形光照; (b)低角度线性暗场照明; (c)环形光明场照明; (d)漫反射照明

Fig. 10 Comparison of different lighting effects. (a) Brightfield ring light illumination; (b) linear darkfield lighting with low angle; (c) brightfield ring lighting; (d) diffuse lighting

均匀,有镜面反射;而漫反射照明背景光线很平滑,印在瓶底的数字可以很清楚地读出来<sup>[21]</sup>。

图 11 是一种冷轧钢板表面缺陷与相机、光源角度分辨关系实验统计结果<sup>[22]</sup>,图中 pit 为小的辊型凹陷, pinhead 为辊印造成的小痘疤像肿胀或肿块, hole 为材料缺陷引起的表面深度凸起, sticker 为退火后亚表面层黏连分离, lamination 为重辊压分离引起的亚表面缺陷, rust 为红色或白色表面氧化层, scale 为氧化物辊压嵌入材料里面, scratch 为沿着辊压行驶方向在表面形成的小豁口, rub 为分层滑动形成的多个方向的划痕群, silver 为来自层压的嵌入式的缺陷, pincher 为轧辊表面宽度不均匀引起的辊痕。

在角度分辨检测中,表面法线方向、相机光轴方向、照明入射光线方向之间的角度分布,会明显地影响相机对缺陷信息的灵敏度与分辨能力<sup>[9]</sup>,只有合理布置这些角度关系才能在相机获取的图像中得到所需的目标信息,并且能够抑制背景噪声、增强缺陷信号的信噪比。如何确定他们之间的关系,需要很强的实践经验,并且需要进行大量的实验验证。要得到符合要求的初步结果通常需遵从三个准则:最大化感兴趣特征的对比度、最小化其他不感兴趣特征(背景)对比度和具有一个解决稳健性的办法<sup>[21,23]</sup>。

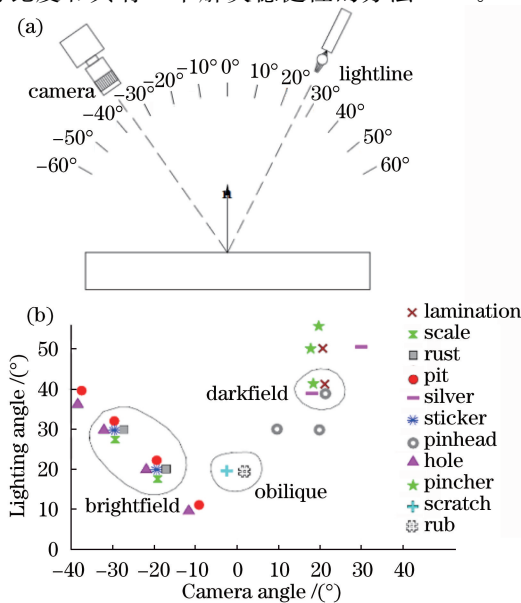


图 11 钢板表面缺陷与相机、光源的角度分辨关系。

(a)相机与光源之间的角度关系; (b)角度分辨缺陷种类  
Fig. 11 Angle resolution relationship of surface defects of steel plate with camera and light source. (a) Angle relationship between camera and light; (b) angle resolution of defects

### 3.2 色彩分辨检测技术

图像的颜色不仅与被测物表面的颜色有关,而且与光源的颜色有关,不同颜色的物体对不同颜色的光具有选择吸收性,如一束白光照射在红色物体上,只有红光被反射,其他颜色的光被吸收,物体呈红色;如果选用红光照射在红色物体上,则反射光线较强;如果选用与红光波长相距较远的单色光照射在红色物体上,则反射光线几乎没有<sup>[24-25]</sup>。

光源的颜色对表面缺陷 AOI 系统生成图像的分辨率有很大影响<sup>[26-27]</sup>。在 AOI 中,根据被检测对象颜色选择不同颜色的光源照明,可以有效提高图像的分辨率。光源颜色的选择主要取决于以下两个方面:被测物体的颜色和接收元件图像传感器的感色度。如果使用的是彩色图像传感器,那么用白色光源照明是最合适的,因为白光包含各种色光,能够反映更丰富的信息;如果使用的是黑白图像传感器,那么应该注意:在被测物体颜色比较复杂的情况下,如果要保证所有颜色都不丢失,选择白色光源最合适;如果需要滤除掉其中的某种颜色,增强目标色和背景色的对比度,需要考虑如何选择光源颜色。颜色的选择要遵循照明色与物体(色彩)之间的色相性:色温近则图像的颜色就亮,反之色温远图像的颜色就暗。光的三原色为红(R)、绿(G)、蓝(B),其叠加为白色,可见光颜色可以通过 RGB 三原色的不同比例组合得到;而色彩的三原色为青(C)、紫(M)、黄(Y),色彩的三原色叠加为黑色。光照在物体上只反射与自身颜色相同的色光,不同的色光照在互补色物体上完全不反光。

颜色可以分为冷色和暖色。暖色有红色、黄色和橙色;冷色有绿色、蓝色和紫色。如图 12 色盘所示。在色盘中,左边为暖色,右边为冷色。如果要增大对比度,那么在选用照明光源颜色的时候需要选择相反类型的颜色,比如暖色的光照射到冷色的物

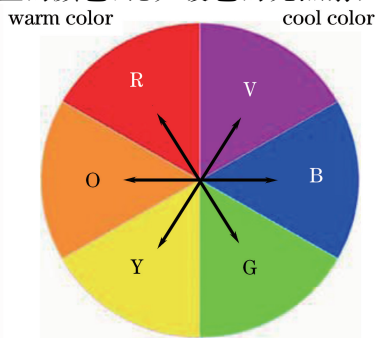


图 12 色温与色盘

Fig. 12 Color disk showing warm and cool colors

体上会使视野中物体颜色变暗;暖色的光照射到暖色的物体上会使视野中物体颜色变亮。要使对比度达到最大,需使用色盘中直接相对的颜色,比如当照射红色物体的时候,用绿光照射比用紫光照射使视野中物体颜色更深。

图 13 为红、绿、蓝三种颜色光源照射不同颜色物体表面,用黑白相机生成图像的灰度变化。红光照射红色、橙色、黄色或紫色,颜色变浅;红光照射橙色变浅灰色;红光照射绿色、青色或蓝色,颜色变深。绿光照射红色、蓝色或紫色,颜色变深;绿光照黄色、绿色或青,颜色变浅。蓝光照红色、橙色、黄色或绿色,颜色变深;蓝光照青色、蓝色或紫色,颜色变浅。选择合适的照明颜色,可以获取更高质量的图像,图 14 为铝合金瓶盖顶部在红色与蓝色光照明下,黑白成像产生的不同图像效果<sup>[28-29]</sup>。用红色照明,中心部位的生产日期和产品批号对比度非常大,

object/feature color	red	green	blue
red	pale	dark	dark
orange	pale	grey	dark
yellow	pale	pale	dark
green	dark	pale	dark
cyan	dark	pale	pale
blue	dark	dark	pale
magenta	pale	dark	pale

图 13 照明色彩、物体特征颜色和成像效果  
Fig. 13 Lighting color, object feature color and imaging effects

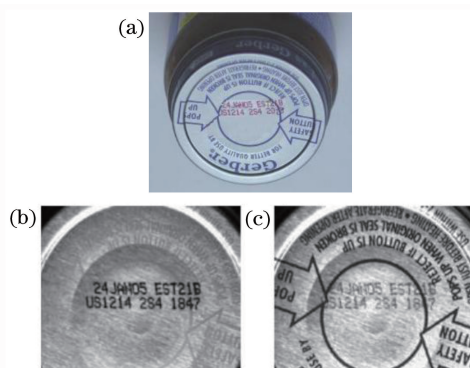


图 14 铝合金瓶盖红色与蓝色光照明成像效果。  
(a)待检瓶盖;(b)红色光照明结果;(c)蓝色光照明结果  
Fig. 14 Imaging effect of red and blue illumination on aluminum alloy bottle cap. (a) Bottle cap to be inspected; (b) effect with red light illumination; (c) effect with blue light illumination



周边的背景文字得到抑制,在判别时不会受到周围文字的干扰。而用蓝色成像照明成像时,周边文字图像清晰。

色彩分辨在工业 AOI 检测中应用广泛,如在印制电路板(PCB)回炉焊工序中,也用 RGB 分层彩色环形 LED 照明光源照明焊盘,检测焊接质量<sup>[7, 30-33]</sup>。

### 3.3 光谱分辨检测技术

在色彩分辨检测技术中,所用的彩色光源在

电磁波谱 0.4~0.74  $\mu\text{m}$  的可见光范围内,如图 15 所示<sup>[34]</sup>,该波段在整个电磁波谱范围内只是非常窄小的一部分。从图 15 可以看出,色彩与光源的波长或频率有密切联系,色彩分辨检测技术中的图像传感器是利用彩色光源在被测物体表面反射或散射的波谱能量成像的,大多数情况下没有用到物体本身的红外辐射能量成像,是一种主动照明成像技术。

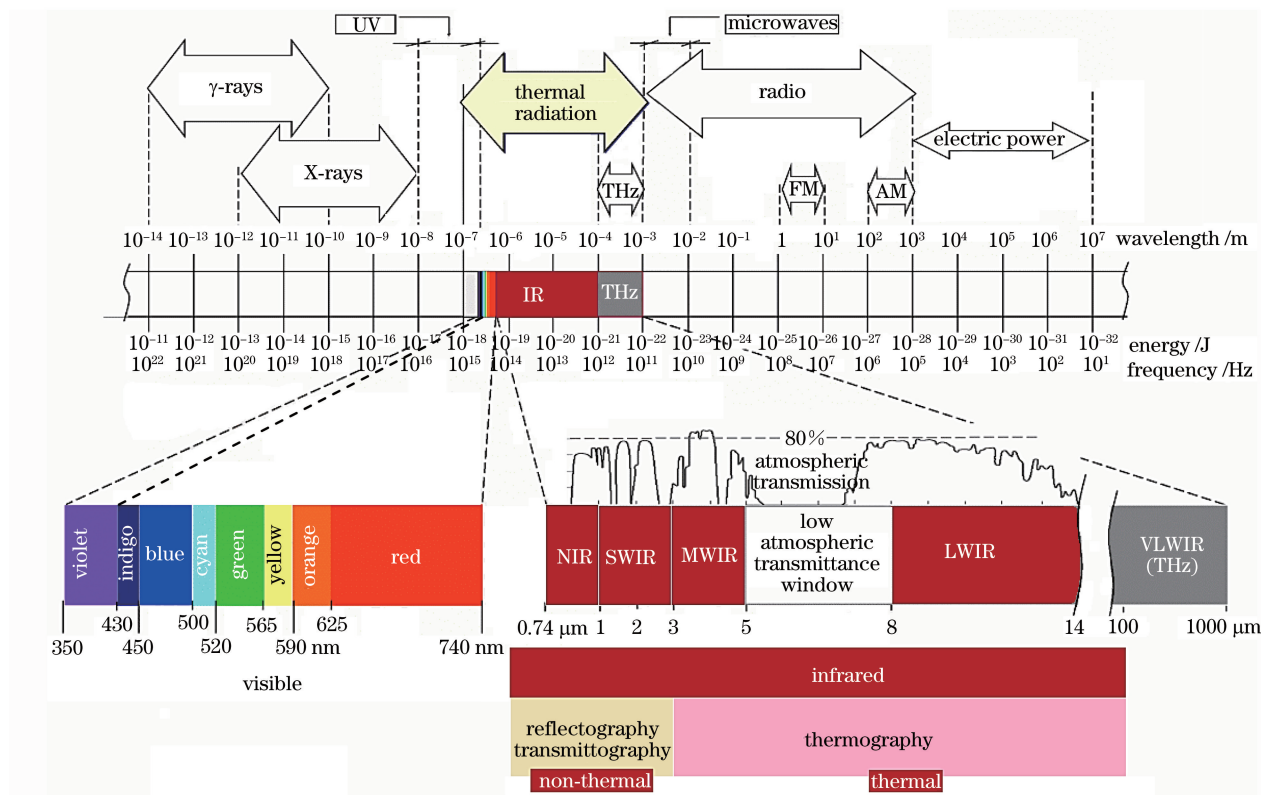


图 15 紫外、可见光和红外波段在电磁波谱中的位置

Fig. 15 Positions of ultraviolet, visible and infrared bands in electromagnetic spectrum

实际上所有物体在温度达到绝对 0 K 以上都会辐射红外光谱,红外辐射能量大小取决于物体的温度和和物体的发射率,发射的波谱范围从可见光红光波长最长的边缘 0.74  $\mu\text{m}$  到微波的开始端 1000  $\mu\text{m}$ 。物体温度越高,在辐射的所有波长范围内辐射能量越大,最大值对应的波长越短,如图 16 所示<sup>[35]</sup>。很多物体在可见光范围内看起来似乎一样,但在红外波段表现出非常大的差异,如图 17 所示<sup>[36]</sup>,通过红外成像可以实现可见光看不见的许多信息,实现红外视觉测量与检测<sup>[37]</sup>。

鉴于红外成像的对比度主要取决于被测表面材料的成分,而不是表面的颜色,可以采用红外分辨检测技术消除在色彩分辨情况下由于被测表面颜色不同造成的对比度变化的干扰,即红外成像具有较好

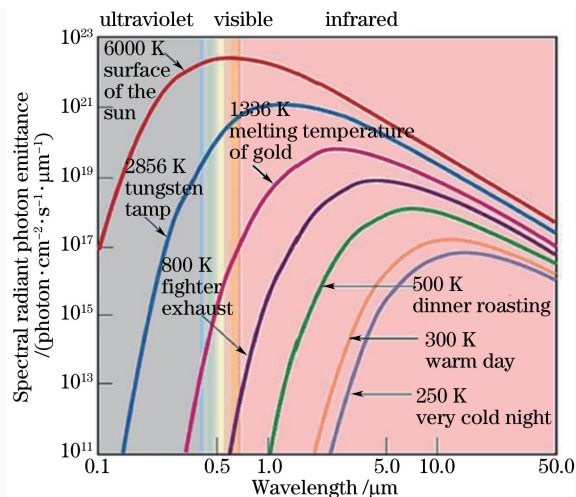


图 16 温度与红外辐射光谱曲线

Fig. 16 Temperature and infrared radiation spectrum curve

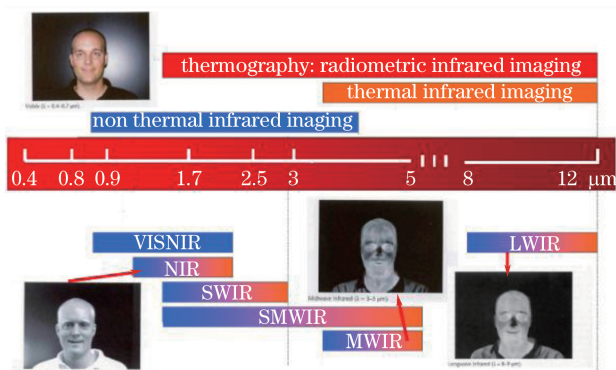


图 17 可见光与红外光谱成像比较

Fig. 17 Comparison of visible and infrared spectra imaging 的滤波作用, 图 18 展示了红外成像这种本领<sup>[21]</sup>。图 18(a)为漫反射纸张在白光照明下的成像结果, 纸张表面分成白色和黄色两个区域, 并且在黄色背景区域上有红色和黑色字母。图 18(b)为红外光照明下的成像结果, 背景得到均匀化, 并且红色文字也消失了, 红外光起到了非常好的滤波作用。

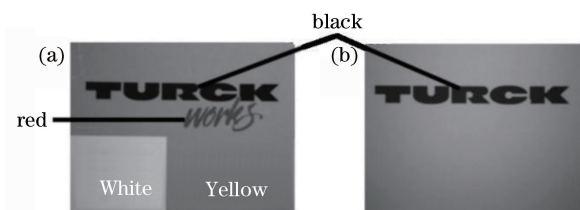


图 18 红外成像滤波效果。(a)白光照明效果;  
(b)红外光照明效果

Fig. 18 Infrared imaging filtering effect.

(a) Effect with white light; (b) effect with infrared light

图 19 展示了红外光穿透性能。图中被成像的物体是 PCB 板, 图 19(a)用的是 660 nm 红光背光照明, 图 19(b)用的是 880 nm 红外背光照明。由于红光波长比较短, 红光在绿色塑料板中更加容易散射和分散, 而红外光波长较长, 穿透性能比较好, 能穿透 PCB 板, 得到更清晰的图像, 所以图 19(b)明显比图 19(a)清晰。图中上端中部的圆孔成像效果也说明了这一点: 在红光照明下, 由于红光光线的散

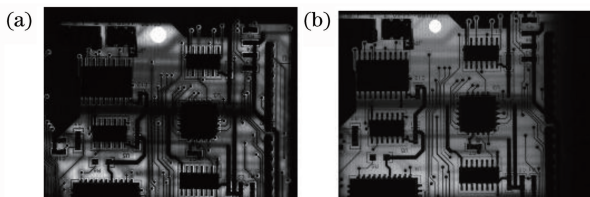


图 19 红外光穿透性能。(a) 660 nm 红光背光照明效果;  
(b) 880 nm 红外背光照明效果

Fig. 19 Infrared light penetration. (a) Effect using 660 nm red light; (b) effect using 880 nm infrared light

射溢出, 圆孔看上去比较大, 而红外成像的圆孔边缘清晰, 效果较好。

受红外探测器探测能力的限制, 红外辐射通常根据各种探测器的响应性能分为 4 个比较小的波段范围: 1) 近红外 NIR (near-infrared), 波长  $0.7 \sim 1 \mu\text{m}$ ; 2) 短波红外 SWIR (short-wave IR), 波长  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ; 3) 中波红外 MWIR (medium-wave IR), 波长  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ; 4) 长波红外 LWIR (long-wave IR), 波长  $7.5 \sim 14 \mu\text{m}$ 。常用的典型红外长传感器材料能感受的光谱范围参考文献[38-42]。根据红外辐射源是来自照射的光源还是来自被测物体自身热辐射, 红外 AOI 技术可以分为非热红外 AOI 技术和热红外 AOI 技术。

### 3.3.1 非热红外成像

非热红外 AOI 技术需要通过主动照明, 使用图像传感器探测从待测物体表面反射或从物体透射 NIR 和 SWIR 辐射能量进行成像, 成像方法与可见光成像非常相似。红外光谱具有如下的特性: 可以穿透有些材料, 并被其他材料反射, 如水蒸气、雾气、单晶硅等材料对 SWIR 透明。非热红外 AOI 常用的波段范围主要在 SWIR 波段, 即波长处在  $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ , 可用的光源有 850 nm、1064 nm 和 1550 nm 的激光光源, LED 和卤素灯 (halogen lamps), 如图 20 所示<sup>[36]</sup>。SWIR 波段的红外相机镜头需要精心设计优化, 并涂上抗反射膜, 典型的成像传感器是采用镓锑砷化物 InGaAs (indium gallium arsenide) 制造的, 光谱覆盖可以扩展到  $0.55 \sim 2.50 \mu\text{m}$ , 非热红外 AOI 还需要精心选择视觉照明光源和成像滤波器, 以获得更好的成像效果。

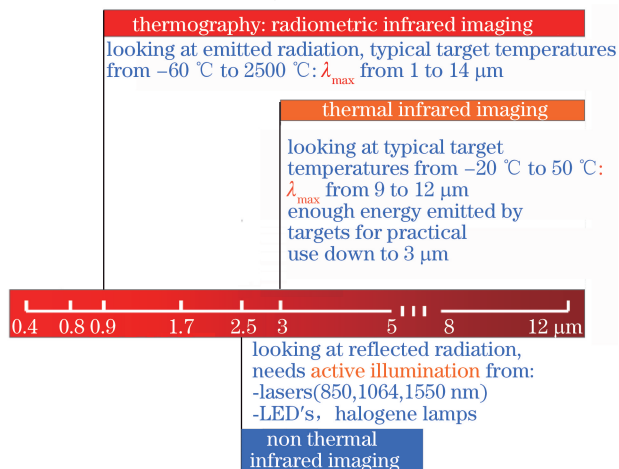


图 20 非热红外视觉与热红外 AOI 技术

Fig. 20 Non thermal infrared vision and thermal infrared AOI technology

许多应用在可见光范围内很难或者不可能实现视觉成像检测,但是可以采用非热红外成像技术实现,如食品、塑料、药物分选,垃圾分选,材料成分、涂层和其他特性的无损识别,半导体电路板、太阳能电池的缺陷检测、识别和分类,成像质量控制等<sup>[43-46]</sup>。

### 3.3.2 热红外成像

热红外 AOI 技术也称红外热成像技术,它是利用传感器接收物体自身红外辐射产生的热红外辐射实现成像的,波段范围涵盖图 15 中的 MWIR 和 LWIR 区域,波长范围 MWIR 为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ,LWIR 为  $7.5\sim 14\ \mu\text{m}$ 。图像质量的好坏主要取决于物体的温度和物体的红外发射率,物体温度越高,辐射能量越多,图像越明亮。红外热成像图像质量比 NIR、SWIR 波段的成像图像质量受环境和大气中的烟雾、霾、灰尘的影响更小。

MWIR 波段的热红外成像主要目的是获得高质量的图像,而不是聚焦在温度和迁移率的测量。由于黑体辐射的原因,该波段的辐射波谱对比度比 LWIR 大,这是因为 LWIR 容易受到地面物体的热辐射影响,而 MWIR 辐射波谱的变化不容易受到大气的影 响,因此常常用于目标探测和故障诊断,如飞机、轮船的探测等。根据 Planck 定律,地面物体主要辐射 LWIR 红外波谱,所以 LWIR 热成像系统常常用于温度测量与控制、故障预测和气体泄漏检测等。

同非热红外视觉成像通常使用单一图像执行检测相比,热红外成像在无损检测中需要在时间和空间中采集多幅图像。红外热成像检测可以采用主动和被动两种方式实现,即使用或不使用外部加热(或制冷)源激励提升被测物体的红外热谱图对比度。总的来说,在无损检测中主动方式比被动方式更常用,主动激励方法有:1)光学激励,使用闪光灯、卤素灯、红外灯、激光和其他产生热辐射光源对被测物体进行热激励<sup>[47]</sup>;2)超声激励,使用频率  $15\sim 40\ \text{kHz}$  的高频声波或超声波进行激励<sup>[48]</sup>;3)涡流激励<sup>[49-51]</sup>,基于涡流加热原理进行激励。激励能量的形式有:几毫秒范围的脉冲、方波、几秒到几分钟的阶跃、幅度或频率调制波、动态扫描(点、线或面)等<sup>[52-53]</sup>,建模方法可参考文献<sup>[54]</sup>。常用的主动红外成像激励方法与应用技术可参考文献<sup>[38, 55]</sup>。

### 3.3.3 紫外成像

1)紫外波谱波段。除了上述基于红外光谱分辨成像实现 AOI 以外,从图 15 所示的电磁波谱中可以看出,可见光的左侧是紫外波谱。紫外波谱

(UV)是波长  $100\sim 400\ \text{nm}$  的电磁辐射,紫外光具有比可见光更短的波长,能被许多材料吸收,受表面特征散射的能力更强。所以紫外光可用于机器视觉应用中,用于检测可见光无法检测到的特征。紫外波谱可分 4 个不同的波段。

①长波紫外。UV-A 波段,波长范围  $315\sim 400\ \text{nm}$ ,又称为长波黑斑效应紫外线。该波段的紫外线有很强的穿透力,可以穿透大部分透明的玻璃以及塑料。UV-A 可以直达肌肤的真皮层,破坏弹性纤维和胶原蛋白纤维,将我们的皮肤晒黑。可透过完全截止可见光的特殊着色玻璃灯管,仅辐射出以  $365\ \text{nm}$  为中心的近紫外光,可用于矿石鉴定、舞台装饰、验钞等场所。

②中波紫外。UV-B 波段,波长范围  $280\sim 315\ \text{nm}$ ,又称为中波红斑效应紫外线。中等的穿透力,其波长较短的部分会被透明玻璃吸收,日光中含有的中波紫外线大部分被臭氧层吸收,只有不足 2%能到达地球表面,在夏天和午后会特别强烈。紫外线保健灯、植物生长灯发出的就是使用特殊透紫玻璃(不透过  $254\ \text{nm}$  以下的光)和峰值在  $300\ \text{nm}$  附近的荧光粉制成。

③短波紫外。UV-C 波段,波长范围  $200\sim 280\ \text{nm}$ ,又称为短波灭菌紫外线。它的穿透能力最弱,无法穿透大部分的透明玻璃及塑料,日光中含有的短波紫外线几乎被臭氧层完全吸收。

④真空紫外。UV-D 波段,波长范围  $100\sim 200\ \text{nm}$ ,又称为真空紫外线。其穿透能力极弱,能使空气中的氧气氧化成臭氧,称为臭氧发生线。

2)紫外光源及选用。目前常用的 UV 光源有 UV-LED、激光器和水银灯,但相互之间的光谱能量分布差别比较大,如图 21 所示<sup>[56]</sup>,水银灯发射的光谱带宽大,UV-LED 的带宽比较窄。值得注意的是,UV-LED 在发射紫外线的同时,也向外辐射热能,超过额定温度使用范围会导致 LED 性能降低,发光能量减弱和使用寿命缩短。其基本规则是在典型的操作温度范围内,温度每增加  $1\ ^\circ\text{C}$ ,LED 发光流明数下降  $0.3\%\sim 0.5\%$ <sup>[57]</sup>。为了保证光输出稳定,减小工作温度是必要的。

波长较短的紫外光对人的身体是有害的,能够导致物体成分的化学变化,因此在食品工业中有些紫外波长是禁止使用的<sup>[58]</sup>。随着紫外 LED 光源的发展,光源成本越来越低,紫外成像 AOI 技术在工业领域逐步得到应用。尽管有许多发射光位于 UV-A、UV-B 和 UV-C 波段的 LED,但是在许多机



器视觉应用中,常用的紫外波长位于 UV-A 波段,最常用的 LED 还是发射波长为 365, 385, 395 nm 的 UV-LED<sup>[59]</sup>。然而,哪些波长最有效,只能通过照明待测产品来判断。

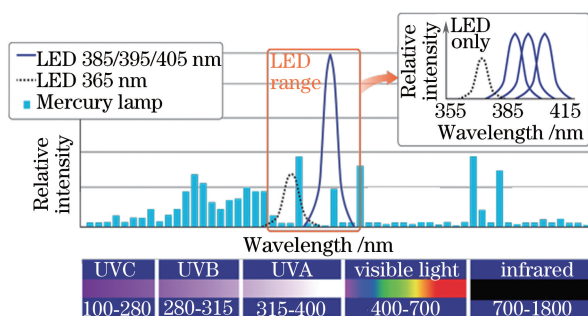


图 21 水银灯与 UV-LED 光谱分布

Fig. 21 Spectral distribution of UV-LED and mercury lamp

随着 LED 制造技术的进步,出现了大电流 UV-LED,单个封装可以高达 10 W 以上,并且其输出功率已经增加至前几代产品的 10~30 倍。这样的紫外大电流 LED 也可用选通方式增加光输出——这是高速机器视觉应用中一个重要因素。这种紫外大电流 LED 的另一个优势是可以带有抛物面镜和抛物透镜,以产生集中的聚焦光图案,因此可以在更长的工作距离下使用<sup>[60-61]</sup>。

紫外照明能以两种不同的方式应用到机器视觉系统中,即紫外反射/散射成像检测和紫外荧光成像检测。在紫外反射成像应用中,用紫外光照射物体,并使用对紫外光敏感的单色或彩色相机捕获图像。在紫外荧光成像中,用紫外光照射物体表面,在添加有荧光增白剂的涂料、塑料、印刷油墨和染料等产品中,这些荧光材料将吸收紫外辐射,然后发射出波长更长的荧光,实现荧光成像 AOI。

需要强调的是,紫外反射成像不同于紫外荧光成像,虽然二者都使用紫外光,但是两者在技术上有明显差异的。紫外反射成像虽然也使用紫外光源,但使用紫外图像传感器接收光源反射或散射的紫外光,光的波长不发生偏移。紫外荧光成像则使用的是可见或红外波段的图像传感器,接收由紫外光激发产生的比紫外光本身波长长的光波,激发产生的荧光不再发生反射,而是发生漫反射。

①紫外反射成像。在紫外散射成像应用中,紫外光与物体材料产生独特的相互作用,能够使物体的某些特征和特性变得可见,但在可见光和红外光下或使用其他方法难以探测。紫外光可以被许多材料强力吸收,这样可以用紫外光在没有进入物体表层的情况下可视化物体表面特性。紫外光由于波长

较短,容易被表面特征散射,散射能力强于可见光和红外。因此,表面较小的特征能够通过紫外反射/散射进行分辨。

紫外反射成像 AOI 在工业上有两种应用场合,主要取决于不同的紫外光谱范围,以及相机和光学系统的光谱响应特性。一种是在 UV-A 和 UV-B 近紫外波段,光谱范围大约 300~400 nm,常用的照明波长为 365~395 nm。另一种是小于 300 nm 的场合,常用的照明波长为 250~280 nm,也被称为深紫外 deep-UV(DUV) 或 UV-C 波段,标准的光学系统对紫外光具有很强的吸收性能。因此,紫外反射成像 AOI 需要精心配置光源、相机和镜头<sup>[62]</sup>。

紫外反射成像的典型应用是检测表面的划伤和微观颗粒,波长较短的紫外光比可见光和近红外有更强散射性能,在可见光与近红外难以成像的情况下,利用紫外光可获得比较清晰的图像,图 22 展示了不同波长情况下的成像效果<sup>[63]</sup>。在半导体领域,光刻流程需要检查掩模板上非常细小的线条与特征中的缺陷,利用紫外照明共焦显微检测是一个可行的途径,比可见光成像更能发现硅片上划痕和纳米颗粒<sup>[64]</sup>。

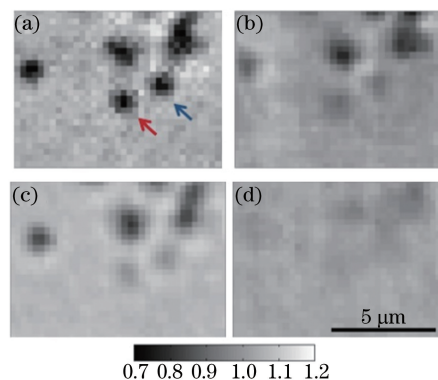


图 22 紫外光对颗粒物散射能力比较。

(a) 266 nm; (b) 470 nm; (c) 532 nm; (d) 633 nm  
Fig. 22 Comparison of the ability of ultraviolet light to particle scattering. (a) 266 nm; (b) 470 nm; (c) 532 nm; (d) 633 nm

紫外反射成像 AOI 的另一典型应用是检测表面小面积污染,其原理是 UV 光容易被有机物(如油、脂等)吸收,其中深紫外吸收性能更强。如图 23 所示,紫外反射成像 AOI 甚至能区分汽车外表新涂漆层与旧涂漆层的差异,虽然两者在可见光下显示同一种色彩。

大多数常规的 CCD 和 CMOS 相机对 UV 波段成像效果不好,这是由于图像传感器的光学带宽不能也没必要同时覆盖可见到紫外的范围,且紫外光

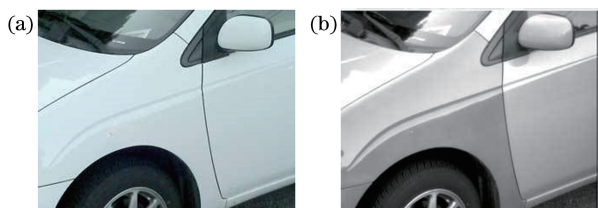


图 23 紫外反射喷漆差异检测。(a)在可见光下呈现相同颜色；(b)在紫外光下颜色有差异  
Fig. 23 Differential detection of spray paint on the car body with UV reflection method. (a) Same color presented under visible light; (b) color difference presented under ultraviolet light

对这些单色和彩色相机的成像质量会产生干扰,任何对 UV 敏感的图像传感器在点光源附件会产生紫晕,降低图像的锐度,故许多 CCD 和 CMOS 图像传感器在封装时,会植入吸收 UV 光的膜片,消除紫晕的影响。为了在 UV 波段成像,需要选择没有 UV 吸收膜的 CCD 或 CMOS 相机,即使用对紫外敏感的相机,而不是简单地选用可见光相机。标准镜头对深紫外波段的成像效果也不好,这是因为典型的镜头玻璃若要吸收 300 nm 以下的光波,通常需要特制熔融石英镜头或钙萤石镜头。

②紫外荧光成像。当紫外光或波长较短的可见光照射到某些物质时,被照射的光能量激发引起物质电子轨道向高能轨道跃迁,并最终释放能量回归到基态,在这个过程中这些物质会发射出各种颜色和不同强度的可见光,而当光源停止照射时,这种光线随之消失。这种在激发光诱导下产生的光被称为荧光,能发出荧光的物质被称为荧光物质。几乎所有物质分子都有吸收光谱,但不是所有物质都会发出荧光,只有当该物质分子与激发光具有相同的频率,并在吸收该能量后具有高的荧光效率而非将能量消耗于分子间碰撞过程中,才能激发出可被接收的荧光信号,如图 24 所示。激发出来的荧光波长比物质吸收的激发光波长长,二者间的差异被称为斯托克斯位移(Stokes shift),如图 25 所示。

紫外荧光成像与紫外反射成像不同,紫外荧光成像采用可见光相机成像。在紫外照明下,被测物体表面激发产生荧光,荧光漫反射到图像传感器成像。其优点是能够使用相对便宜的光源和对紫外敏感的可见光谱相机。为了获得更加清晰的图像,通常需要采取两种途径:1)增加照明光源的发光功率,产生尽可能大的光能照射在被测物体表面上,从而激发更强的荧光;2)在相机前面使用 UV 滤光片,

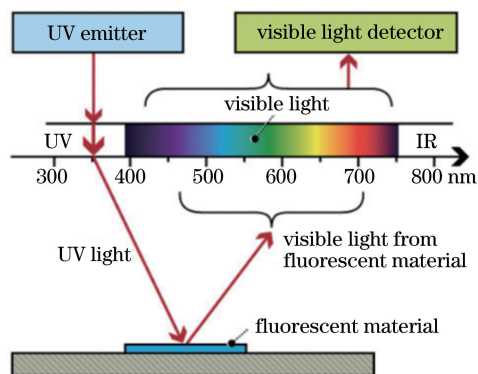


图 24 紫外荧光检测原理

Fig. 24 Principle of ultraviolet fluorescence detection

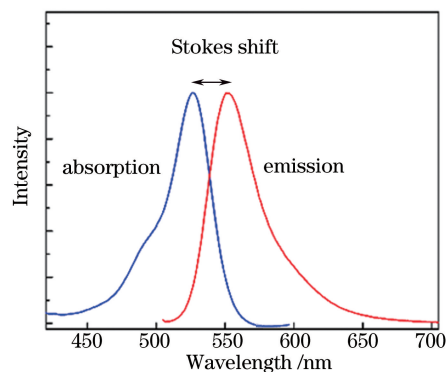


图 25 斯托克斯位移

Fig. 25 Stokes shift

阻挡从被测表面反射的紫外光<sup>[65]</sup>。在典型的荧光成像应用中,通常用紫外激发出青色光,470 nm 或 505 nm 带通滤光片将使青色光通过、同时阻挡所有其他波长,因此能够限制图像中不需要的光和环境光。最常用的紫外带通滤波器是 BP470、BP505、BP525、BP590 和 BP635。在面向机器视觉的荧光应用中,最常用的紫外带通滤波器是 BP470,当与黑白或彩色相机一起使用时,能够增强捕获图像的对比度<sup>[66]</sup>。

紫外荧光成像可以用于下列场合:1)制药行业可用于检查激素生物碱、维生素等各种能产生荧光的药品质量;2)染料涂料橡胶、石油等化学行业用于测定各种荧光材料、荧光指示剂及添加剂、原油和橡胶制品;3)纺织化学纤维中可测定不同种类的原材料,如羊毛、真丝人造纤维、棉花、合成纤维,并可检查成品质量;4)食品部门可用于检查毒素(如黄曲霉素等)、食品添加剂、变质蔬菜,鉴定水果、可可豆、巧克力、脂肪、蜂蜜、糖蛋等的质量<sup>[67]</sup>;5)地质、考古等部门,可用于发现各种矿物质、判别文物化石的真伪。

### 3.4 偏振分辨检测技术

光是物体辐射的电磁波,经典的电磁波理论把

原子发光看作原子内部的电偶极子的辐射过程,当电偶极子沿着某个特定方向振动时,辐射的光波就具有方向性,即偏振性。且由于原子间的不断碰撞,辐射过程不停地中断,因此发出的光是一段段有限长的波列,持续时间是原子两次碰撞的时间间隔。对于由大量原子和分子组成普通光源,电偶极子的振动方向杂乱无章,并不沿着某个特定的方向,因此发出的光波电磁场振动方向和初相位无规则,不具有偏振性,不过可以使用一些物理方法让非偏振光转变为偏振光,如选择性吸收(dichroism)、反射(reflection)、散射(scattering)和双折射(birefringence)等<sup>[68]</sup>。偏振光按偏振态划分为线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光、部分偏振光和非偏振光。

光本质是一种电磁波,当与物质相互作用时具有反射、折射、散射和吸收等现象,光与物质的相互作用可分为两类:1)光在电介质-电介质分界面的反射和折射;2)光在电介质-金属表面的反射和透射。与不导电的电介质相比,金属一般为良导体,存在大量的自由电子,在电场作用下可以产生电流,由此产生了金属/电介质两种物质的本质区别。根据麦克斯韦方程组(Maxwell's equations)可知,电介质的折射率为实数  $n$ , 金属的折射率  $\bar{n}$  为复数

$$\bar{n} = n(1 + i\kappa), \quad (1)$$

式中  $\kappa$  为衰减系数。

一束光在界面发生反射和折射(透射)时,可以将其振动分解为垂直于入射面(s分量)和平行于入射面(p分量)的两个分量,如图26所示<sup>[69]</sup>。

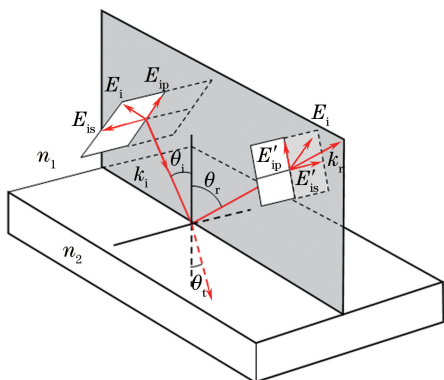


图 26 物体界面上光矢量的变化

Fig. 26 Change of light vector on medium interface

1)对于电介质-电介质界面,当光从光疏介质射到光密介质,从界面反射出的 p 分量相对很少,如光从空气( $n_1 = 1$ )进入折射率  $n_2 = 1.5$  的玻璃时,在入射角等于  $56.3^\circ$  时(布儒斯特角, Brewster's angle), p 分量的反射比为 0, 此时所有的反射光都是 s 分量

的光<sup>[70]</sup>。如果光从光密介质射到光疏介质,在一定的入射角度(临界角)时,发生全反射,如从光从玻璃射向空气中时,临界角约为  $41^\circ$ 。

2)对于介质-金属界面,光波入射到金属表面时,由于大多数金属都是良导体,自由电子在表面层形成表层电流,这一电流的存在使入射光产生强烈的反射,并使透入金属内部的波迅速地耗散为电流的焦耳热,导致光波只能透入很薄的一层金属表面,所以金属是不透明的<sup>[71]</sup>。

图 27 所示是银和铜两种金属的反射率随入射角  $\theta_i$  变化的曲线(入射光波长为  $450 \text{ nm}$ ),当入射角为  $90^\circ$  时,趋于 1,  $r_p$  有一个极小值,但不等于零。由于  $r_p$  和  $r_s$  均为复数,入射光中不同偏振分量的反射系数不同,最重要的是相位改变也不同。如果入射光为线偏振光,反射光很可能变为椭圆偏振光。另外,对于同一种金属,入射光波长不同,反射率也不同。

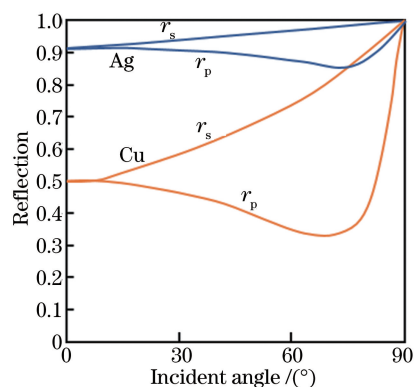


图 27 光在金属表面的反射与透射

Fig. 27 Reflection and transmission of light on metal surface

根据上面介绍的光与物质的相互作用机理,在表面检测中,可以实现下列功能。

1)偏振成像,提高特征清晰度。有些物体表面具有很强的反射特征,如抛光金属表面、玻璃和晶片等,或者从某个角度照明会产生强烈的反射,视场范围会产生极其明亮的区域或亮斑,此时相机如果直接成像,图像特征可能淹没在亮斑区域里,无法分辨。如果采用如下偏振分辨技术,能够有效解决以上成像带来的困扰。

①利用偏振片消除强反光。在对大多数非金属光滑表面进行缺陷检测时,从表面反射出的光线其偏振分量 s 部分大于 p 部分,如果照明光源的入射角为  $50^\circ \sim 60^\circ$ , 即接近布儒斯特角时,表面反射光基本上是 s 偏振光。若在相机镜头前安装一个偏振片,过滤掉强反射的 s 偏振光,就可以消除来自反射



表面的眩光或亮斑的影响,增强图像对比度,突出表面细节,得到一张满意的图像,如图 28 所示<sup>[72]</sup>。

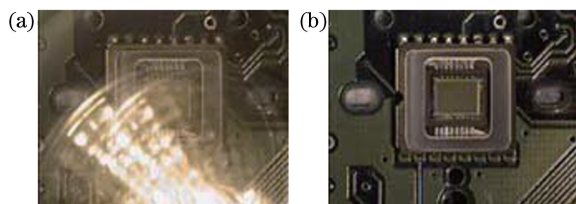


图 28 使用偏振片成像消除反射表面的眩光或亮斑的影响。  
(a)光滑表面非偏振照明反光现象;(b)偏振照明成像效果  
Fig. 28 Eliminating the influence of glare or bright spot on reflective surface by polarized imaging.

(a) Image without polarizer; (b) image with polarizer

②偏振光照明与成像。对于不透明材料(如半导体和金属等)表面缺陷的检测,如果有强反光干扰,可以采取图 29 反射式偏振照明与成像技术。如图所示,首先用偏振片把照明光源转变成线偏振光,照射在被测表面上,线偏振光经过被测表面反射后,一般形成椭圆偏振光。如果在相机前面放置一个偏振片和一个补偿滤波镜(如 1/4 波片),转动偏振片到合适位置,就可以消除强反光,得到效果理想的图像。

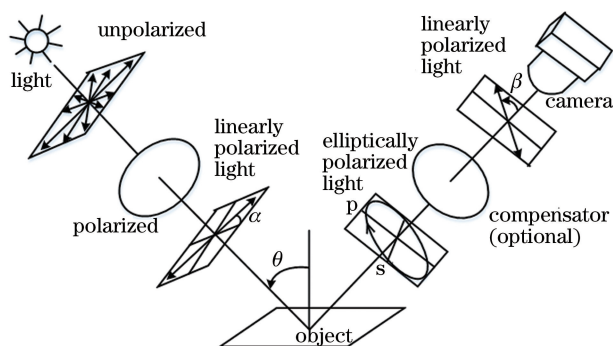


图 29 反射式偏振照明与成像

Fig. 29 Reflective polarized lighting and imaging

如图 30 所示<sup>[72]</sup>,图 30(a)是采用带有漫反射板的环形 LED 照明光源,这样可以得到均匀漫反射照明,如果不加偏振片,成像结果可能会发生眩光或镜面反射。若在光源和镜头上前加偏振片,即可减少这种影响并呈现出表面细节,如图 30(b)所示。

2)透明材料内部的应力与微裂纹检测。对于有些材质均匀、各向同性的透明材料,在自然状态下其折射率在各个方向上处处相等,但由于材料原因或者制造过程形成的应力,材料的结构发生形变或产生微裂纹,导致材料的折射率发生变化,即受到应力作用时,成为光学各向异性,出现双折射现象,这种双折射是暂时的,应力解除后即消失,称之为光弹性

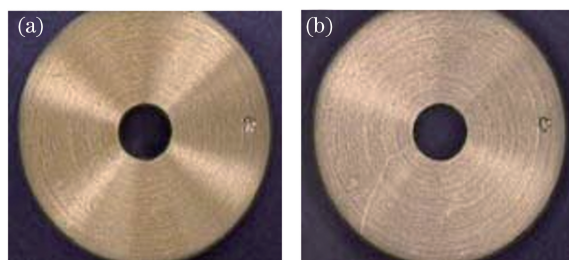


图 30 反射式偏振照明与成像效果图。

(a)一般光照明;(b)偏振光照明

Fig. 30 Reflective images using ordinary lighting and polarized lighting, respectively.

(a) Ordinary lighting; (b) polarized lighting

效应。具有明显光弹性效应的物质有环氧树脂、玻璃、塞璐珞等;对于各向异性的透明材料,如方解石和石英晶体,在机械应力的作用下也发生折射率的变化。这种外力作用下折射率的变化,在某些产品中是不允许的,另外应力集中也会产生微裂纹,导致产品开裂等。

材料在应力作用下发生折射率改变时,受力点透过的偏振光 o 光与 e 光折射率  $n_o$  与  $n_e$  的差异与该点内应力成正比<sup>[73]</sup>,即

$$n_o - n_e = k\sigma, \quad (2)$$

式中: $k$  为常数。若把被测材料放在透振方向正交的起偏镜、检偏镜之间,用单色光源照明,即可利用条纹分布情况检测被测件的应力的分布。条纹密处是应力较大的部位,条纹疏处是应力较小的部位,如图 31 所示<sup>[74]</sup>。

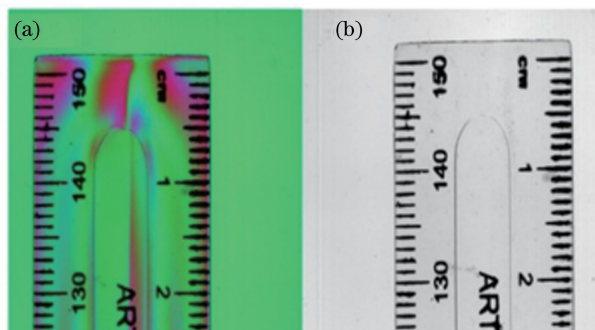


图 31 光弹效应。(a) 应力状态光弹检测结果;

(b) 普通成像效果

Fig. 31 Photoelastic effect. (a) Polarization image obtained by photoelastic method; (b) unfiltered image

这种应力变化的测量可以采用图 32 所示的偏振成像方法进行<sup>[68, 75-76]</sup>。首先利用起偏器 A 将照明光源转变成线偏振光对透明物体进行背光照明,光源经过被测物体 B 后,在应力的作用下变为椭圆偏振光,经过 1/4 波片 C 可将透过的椭圆偏振光再

次转换成线偏振光,与原偏振光偏振方向相比,二者之间存在一个角度差,角度大小与延迟量成正比,角度值可以通过旋转检偏器 D,使观测点处光透过强度达到最小来测定。

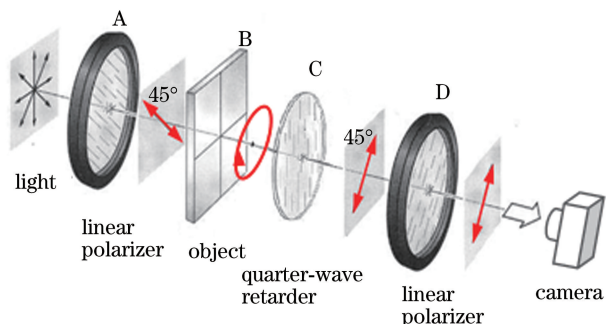


图 32 透射偏振成像应力与微裂纹测试  
Fig. 32 Stress and micro crack test with transmission polarization imaging

检偏器 B 与起偏器 A 之间的初始夹角为  $90^\circ$ , 在没有放入被测物体时,将会得到一幅黑色图像。当放入透明的被测物体时,应力的变化将导致局部产生明亮区域。对于物体上的垂直与水平方向的应力与起偏角的夹角为  $45^\circ$ ,光能量只有一部分能通过检偏器,转动检偏器,光强度会随之改变,当光的偏振面与检偏器的偏振方向相垂直时,光强度达到最小。延迟量表示为

$$R = \beta\lambda / 180, \quad (3)$$

式中: $\beta$  为检偏器相对于初始位置的旋转角; $\lambda$  为波长。只有与起偏器方向成  $45^\circ$  角的应力产生的偏折光通过  $1/4$  波片后才能获得正确的绝对光强度。

上述方法不足之处在于精度和重复性不高,只有与起偏器轴向成  $45^\circ$  角的应力才能被测量得到,其他方向将会衰减,并且测量前需将被测件对准。测量非均匀性的应力分布时,对于每一个测量点,需要将被测件旋转到正确的位置,或者被测件不动,改变起偏器的轴方向位置,自动化程度不高,难以用于在线自动测量。为了解决这些问题,已经发展出一些有效的自动测量方案,如通过线性偏振相机扫描,实现大面积测量,如图 33 所示<sup>[76-77]</sup>。

图 33(a)所示的传感器由 4 行 2048 个 CMOS 像元组成,用透光轴分别为  $0^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  的偏振片分别覆盖在每行的像元上,用来解析接收光线不同的偏振态,还有一行像元表面没有覆盖偏振片,用来接收未解析的光束。相机按行输出  $I_0, I_{90}, I_{135}, I_{uf}$  4 路光强信号图像,如图 33(b)所示,则被测件的偏振态可用(4)式所表述的 Stokes 参数评价<sup>[78]</sup>。

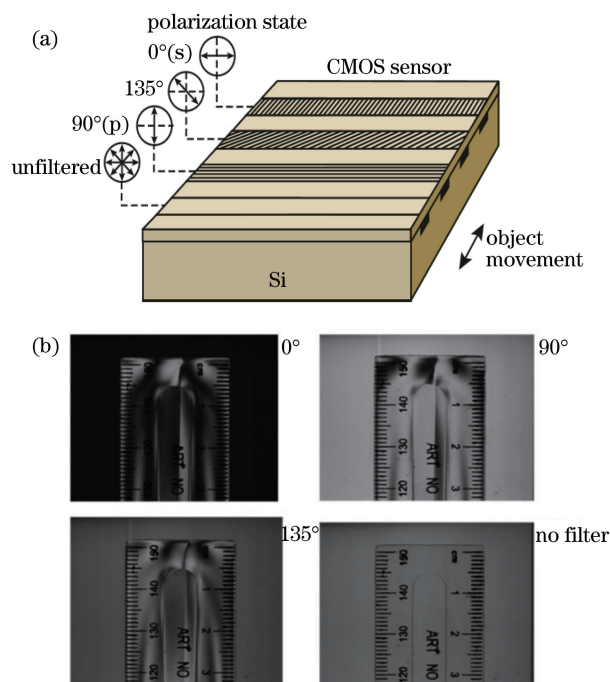


图 33 Teledyne Dalsa's 4 线 CMOS 偏振相机及成像示例。  
(a) Teledyne Dalsa 偏振相机; (b) 应力测试结果  
Fig. 33 Teledyne Dalsa's four line CMOS polarization camera and imaging results. (a) Teledyne Dalsa's polarized camera; (b) stress measurement results

$$\begin{cases} S_0 = I_{uf} = I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135} \\ S_1 = I_0 - I_{90} \\ S_2 = I_{45} - I_{135} = I_{uf} - 2I_{135} \\ D_{LP} = \sqrt{(S_1^2 + S_2^2)^2} / S_0 \\ A_p = 0.5 \arctan(S_2 / S_1) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $S_0, S_1, S_2$  为 Stokes 参数; $D_{LP}$  和  $A_p$  分别为线偏振度和偏振角,图 34 为测试结果示例。

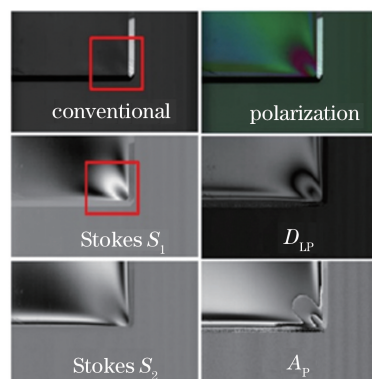


图 34 Stokes 参数评价结果示例  
Fig. 34 Stokes parameter evaluation results

### 3.5 纹影分辨检测方法

通过测量材料折射率变化检测透明材料的缺陷还有两种经典的方法:纹影成像与阴影成像方法,它

们是最早作为流体动力学研究可视化的工具,起源于17世纪罗伯特·胡克(Robert Hook)的热空气扰动实验。20世纪早期,德国科学家休伯特(Schardin H)进行了广泛的应用研究,常用于火焰探测、气体泄漏检测、流体动力学、透明材料缺陷检测等领域<sup>[79-86]</sup>。

### 3.5.1 纹影成像方法

纹影是光在变折射率透明介质中传播时,因光线折射角发生改变造成的,如图35所示,假设光在垂直分层流体介质中的传播,折射率  $n$  是  $y$  的函数,则光在传播时波前发生转动,转动角  $\Delta\alpha$  为<sup>[87-89]</sup>:

$$\Delta\alpha \approx \tan(\Delta\alpha) = \frac{\Delta^2 z}{\Delta z}, \quad (5)$$

$$\alpha = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz. \quad (6)$$

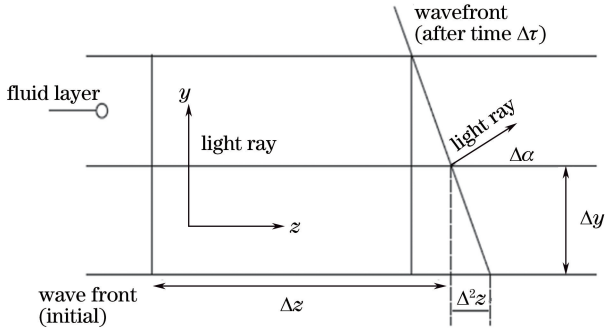


图 35 光在垂直分层流体介质中的传播特性  
Fig. 35 Propagation characteristics of light in a vertical stratified fluid medium

如果光线穿过介质后的折射率为  $n_a$ , 根据 Snell 定律可知,考虑到  $\alpha$  和光线射出后的折射角度  $\alpha''$  比较小,则

$$\alpha'' = \frac{n}{n_a} \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz, \quad (7)$$

在空气中,由于  $n_a \approx 1.0$ , 当  $1/n$  变化比较小时,则

$$\alpha'' = \int \frac{\partial n}{\partial y} dz. \quad (8)$$

纹影测量方法即测量角度  $\alpha$  的方法,典型的测量原理如图36所示。一个点光源通过透镜  $L_1$  准直后,后面的透镜  $L_2$  把平行光重新聚集在焦点上,形成光源的共轭像。在该焦点处放置一个刀口(可以用剃须刀),让刀口挡住光源的像,避免光源的光束继续传播到后面的屏幕上,屏幕放置在被测物体的光学共轭位置。在没有被测物体时,调整刀口的位置,使屏幕的亮度合适,根据需要形成明场或暗场照明。当放入被测透明物体时,如

果没有折射率扰动,光线将按照实线传播,光被刀口挡住。在有折射率的扰动时,光线将偏离原来的路径,投射在后面屏幕上,在屏幕上形成纹影图像。根据图中的光学关系,可计算得到屏幕上的图像对比度为

$$\frac{\Delta I}{I_k} = \frac{\Delta\alpha}{a_k} = \frac{f_2}{a_k} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz, \quad (9)$$

如果在整个厚度  $L$  范围内,沿着  $x, y$  方向折射率梯度变化保持不变,则

$$\frac{\Delta I}{I_k} = \frac{f_2}{a_k} \frac{\partial n}{\partial y} L. \quad (10)$$

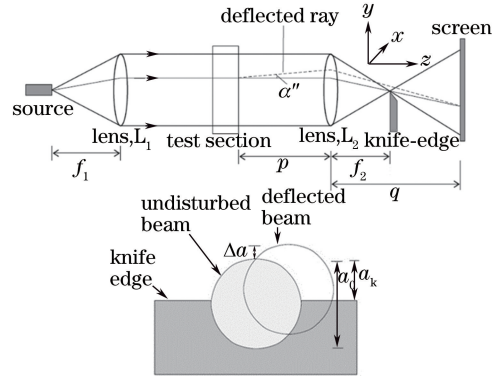


图 36 双场镜纹影测量原理图  
Fig. 36 Schematic diagram of double field mirror schlieren measurement

为了减小光源的大小对分辨率的影响,以及采用数码相机采集纹影图像,实现后续图像处理,可采用图37的光路设计。其他结构形式还有 Toepler 单场镜纹影成像系统和 Z-type 纹影成像系统。

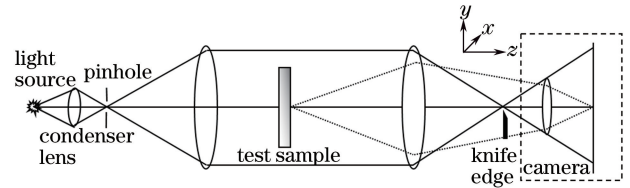


图 37 实际的双场镜纹影测量光路系统  
Fig. 37 Practical two field mirrors schlieren measurement optical system

### 3.5.2 阴影成像方法

阴影成像方法与纹影成像方法类似,更简单,但分辨率相对较差,其基本原理如图38所示。从图中可知,在点光源照明下的敏感度(对比度)为

$$\frac{\Delta\alpha}{d'} = \frac{\epsilon}{d} \cdot \frac{g(h-g)}{h}. \quad (11)$$

由于  $\epsilon/d$  与物体的大小有关,而  $g(h-g)/h$  反映了光学系统的整体效应,对  $g$  微分可知,当  $g/h = 0.5$  时敏感度最大。所以,获得高灵敏度的方法有两



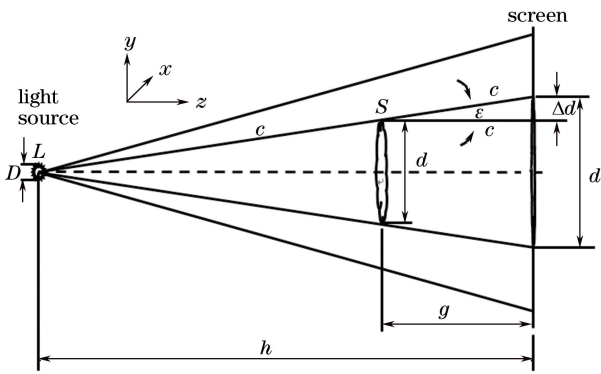


图 38 直接阴影成像技术原理图

Fig. 38 Schematic diagram of direct shadow imaging

个:使  $h$  尽可能大,或将物体放在光源与屏幕中间的位置。

(11) 式中的  $\epsilon/d$  可以用  $\partial\epsilon/\partial y$  ( $\partial\epsilon/\partial x$ ) 或  $\partial\epsilon/\partial y$  ( $\partial\epsilon/\partial x$ ) 代替,这表明阴影法的灵敏度不是折射角  $\epsilon = \partial n/\partial y$  在起作用,而是折射角的空间导数,即

$$\partial\epsilon/\partial y = \partial^2 n/\partial^2 y, \quad (12)$$

这也说明了阴影法与纹影法的本质区别:纹影法揭示的是被测物体折射率梯度  $\partial n/\partial y$  的变化,而阴影法揭示的是折射率二阶导数 (Laplacian)  $\partial^2 n/\partial^2 y$  的变化。

除了上述光学系统的参数外,还有两个因素影响图像敏感度,即光源尺寸和衍射效应。光源越大,

模糊越严重,但光源过分小,会产生衍射效应,同样也会导致图像模糊。在没有产生衍射的条件下,允许的光源最小直径为

$$D_{\min} = 1.33 \sqrt{\lambda h(h-g)/g}, \quad (13)$$

式中:  $\lambda$  为光源的中心波长。为了减小衍射干扰,光源不使用单色光,而是选用宽光谱光源。阴影法的最小分辨率为

$$\delta_{\min} = 1.33 \sqrt{\lambda g(h-g)/h}. \quad (14)$$

实验结果表明,物体放在  $0.3 < g/h < 0.7$  范围内,阴影法的灵敏度变化不大。需要注意的是,衍射效应在该区间具有峰值,几何模糊随着距离  $g$  的增大线性增大。为了减小模糊干扰,可以采用接触阴影法,即使  $g \approx 0 \sim 0.05$ 。

比直接阴影成像更好的光路系统如图 39 所示<sup>[87]</sup>,采用激光光源,透镜扩束准直;或者采用白光照明,抛物面反射镜扩束准直。阴影图像可以投射在白色屏和感光片上,或投在屏上之后用相机成像接收,转变成数字图像进行后续图像处理。另一种阴影成像方法为聚焦阴影法,如图 40 所示。假设在平面 M 处放置一个屏幕,距离待测区域距离为  $g$ ,则形成简单的阴影图像。但在图 39 中,用场镜  $L_2$  将平行光束聚焦,与纹影成像不同的是,在聚焦位置并不放置刀口,而是用另一个一聚焦镜将阴影图像平面 M 聚焦到屏幕  $M'$ 。

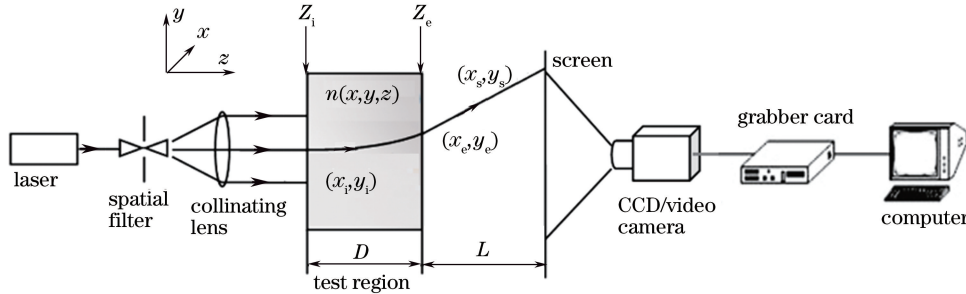


图 39 激光准直照明直接阴影成像光路图

Fig. 39 Optical path of laser collimation lighting direct shadow imaging

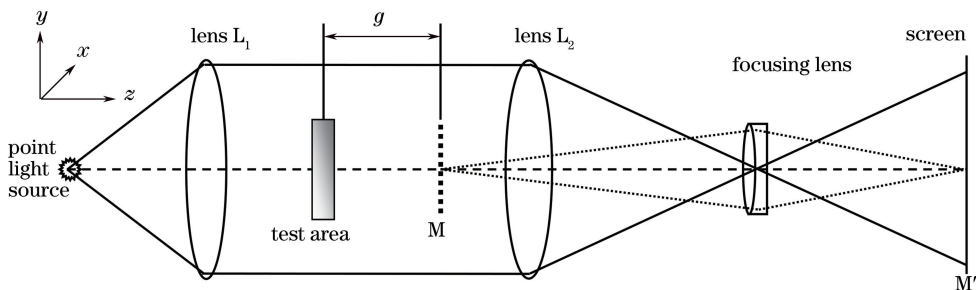


图 40 聚焦阴影成像光路图

Fig. 40 Optical path of focus shadow imaging

### 3.5.3 阴影与纹影成像方法的异同

阴影法最大的优点在于系统极其简单,可以用于大视场检测,且对光学系统的要求也比较低,在许多应用中,只要使用单个透镜、Fresnel 透镜和便宜的反射镜等即可。

阴影成像反映了折射率场的二阶导数变化,材料非均匀的边界越锐利,成像越清晰。对于纹影物体 (schlieren-object) 特征比较小情况,只要边界锐利,阴影成像仍然具有很高的灵敏度。因此,阴影法表达了材料均匀性发生变化的复杂特征的轮廓,而纹影成像方法注重于这种变化的细节。

阴影法的主要缺点在于其固有的模糊性,即“A shadowgram is not a focused optical image, it is a mere shadow”<sup>[88]</sup>。阴影不是一个聚焦图像,只是一个影子,物和像之间没有一对一的映射关系;而纹影法物体与像之间是光学共轭关系。

阴影法获得的图像并不能反映物体特征的尺度,仅阴影图中的黑色部分反映了光线折射的起点,明亮区域反映了光线的结束。阴影图可能是由光学的互叠、交错、相交造成,如果成像面与被测物体距离足够远,会形成非常强的焦散现象。这也是阴影成像技术的显著缺点,因为其容易造成特征之间的混迭。

如果被测特征在光轴方向延展较大,光轴方向上的远近特征在阴影图中的放大倍数差距将比较显著,与成像面近的特征放大倍数小,反之放大倍数大。这种差距造成的图像畸变在需要评价特征折射率引起的折射角度变化时,是一个非常严重的问题。

总的来说,阴影成像方法不适合定量检测,即不适合定量评估折射率的变化<sup>[83,88]</sup>。

### 3.6 干涉分辨检测技术

光学干涉测量以光源波长为基准,具有很高的灵敏度与检测分辨率,因此在几何量测量中得到广泛的应用。AOI 中常用的干涉检测方法有数字全息成像 (digital holographic imaging) 技术、散斑干涉 (speckle interferometry) 技术、微分干涉差 (differential interference contrast, DIC) 技术和大视场白光干涉 (white light interferometry) 技术等。

#### 3.6.1 数字全息成像技术

AOI 中典型的全息干涉成像技术如图 41 所示<sup>[86]</sup>,图 41(a)为参考干涉图生成与记录过程,图 41(b)为散斑干涉测试过程。在参考干涉图记录时,用相干光束照明标准参考物体,被物体表面反射形成物光;同时从激光器发出的相干光束被分光镜

分束直接反射形成参考光束;物光和参考光束在感光介质上交汇,形成参考干涉图被记录下来。感光介质可以是湿化学照相底片,也可以是 CCD/CMOS 等图像传感器。在测试过程中,参考物体被待测物体替换,如图 41(b)所示,待测物体的物光和参考物体的全息重建目标参考光在相机的感光面上形成干涉图案,通过干涉图案可以计算出对应的相位差和光程差,即可以测量出被测物体与参考物体之间的差异,并且具有亚波长分辨率和精度。

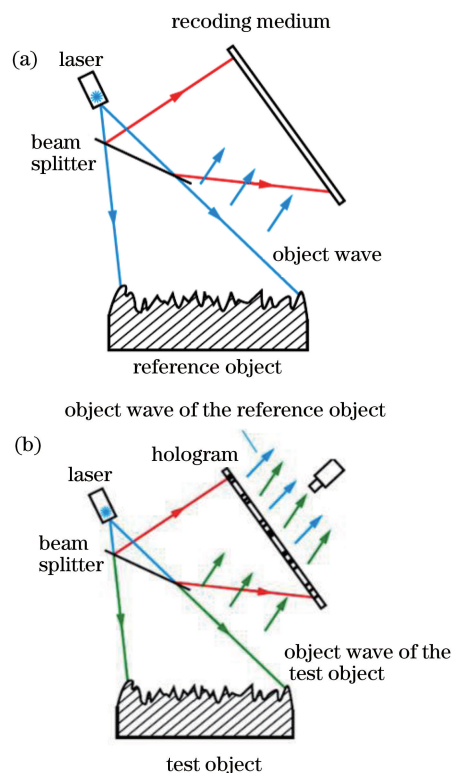


图 41 AOI 中的全息干涉技术。(a)参考干涉图生成与记录; (b)散斑干涉测试过程

Fig. 41 Holographic interferometry in AOI. (a) Reference interferogram generation and recording; (b) speckle interference test process

不同的干涉图案表征了不同的表面或亚表面缺陷,通过干涉图案的形状可以识别缺陷的种类,虽然干涉图案和缺陷种类千差万别,但大量实验和理论分析表明:表征缺陷的干涉条纹可以归纳成 5 个有限集,即所谓的 5 种基本形态:牛眼、沟槽、弯曲、位移、压缩,如图 42 所示<sup>[90]</sup>。

图 41 所示的光学结构缺点是体积较大,需要参考光路和测量光路两套装置。更简便的方法是采用数字全息技术<sup>[91-96]</sup>。常用的数字全息成像光路结构有数字 Gabor 全息术、数字同轴全息术、数字像面全息术和数字菲涅耳全息术<sup>[97]</sup>。在数字全息成像

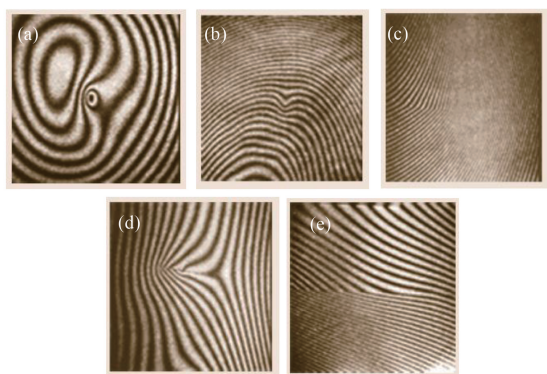


图 42 5 种基本干涉图案。(a)牛眼；(b)沟槽；(c)弯曲；(d)位移；(e)压缩

Fig. 42 Five basic holographic interferograms of the surface defect. (a) Bull's eye; (b) groove; (c) bend; (d) displacement; (e) compression

中,参考目标全息图和被测目标全息图均用图像传感器获取,没有物理干涉图案,干涉相位通过惠更斯原理逐点重构,可以定量计算被测目标与参考目标之间的差异。

在所有的数字全息系统中,被测件的最大空间频率必须与图像传感器的分辨率相匹配,空间频率过大就会导致整个全息图的对比度降低,极端情况下甚至丢失整个全息信息。遇到这种情况,需要调整系统的孔径大小,限制物光横向传播。如果被测物体较大,图像传感器与物体距离比较远(如几米),需要采取措施减小成像的视场角。一种可行的方案如图 43 所示<sup>[91]</sup>,在全息装置成像光路前放置一个发散透镜,产生一个比被测物体小的虚物,用来自这个虚物的光波与参考光叠加记录全息图,从而减小物体表面的空间频率而不改变被测视场的大小。

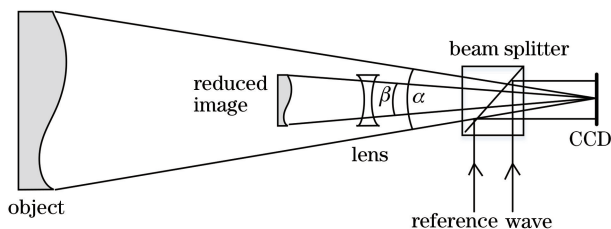


图 43 大视场的数字全息方案

Fig. 43 Digital holography scheme for large field of view

传统的数字全息要求表面微观结构一致,差别较大则无法形成干涉图案,此时可使用比较数字全息,如图 44 所示,参考物体的全息图采用图 44 (a) 的光路结构录制,在图 44 (b) 的光路中使用空间光调制器把参考全息图投射到被测物体上,再用相机接收全息图进行比较,相机安装在录制光路中的照明光源位置,保存方向一致。参考全息方法的最大

优点在于所有状态的全息图可以先存储,后重构处理和比较,不需要额外的参考光波来分离不同的全息图。粗糙表面的全息成像可能比较麻烦,因为参考图案将变成散斑图案,没有条纹结构,但可以通过参考相位的多步相移获得解析<sup>[98-99]</sup>。

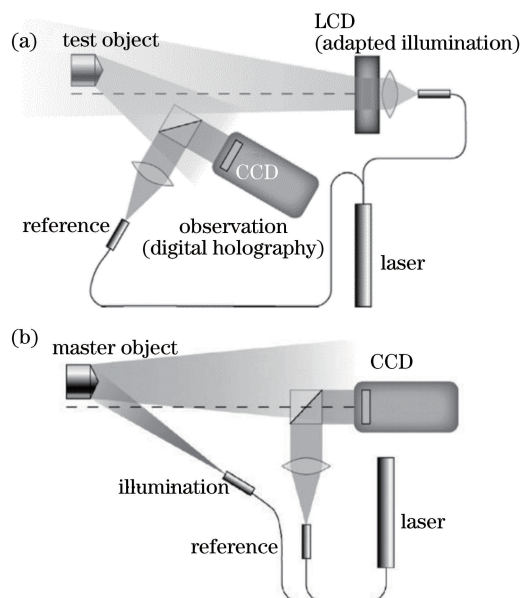


图 44 比较数字全息。(a)参考物体全息图记录；(b)测量物体全息图与参考物体全息图比较

Fig. 44 Comparative digital holography. (a) Recording of a reference object hologram; (b) comparison of the measured object hologram with the reference object hologram

### 3.6.2 数字散斑干涉技术

对粗糙表面的检测,还有一种比较有效的方法是采用电子散斑干涉技术(ESPI)。与全息干涉类似,ESPI 也是测量不透明物体变形的光程差或透明物体折射率的变化。ESPI 记录的散斑图可被认为是像平面全息图,因为它实际上是通过成像镜头对被测体进行聚焦成像的全息图。由于 ESPI 的散斑图采用了数字采集和处理,所以 ESPI 也被称为数字散斑干涉(DSPI),也称 TV 全息(TV-holography)。但与全息不同的是,全息采用全息图重构技术,而 ESPI 采用散斑图相关技术,有关数字散斑与数字全息之间的详细差异参考文献[100]。

ESPI 的基本原理如图 45 所示<sup>[91]</sup>,以激光散斑作为被测物变化信息的载体,利用被测物体在受激光照射后产生干涉散斑场的相关条纹来检测双光束前后之间的相位变化。若使图 45 中的 mirror 位置变动产生相移,即使用相移技术,ESPI 的测试灵敏度将提高了两个数量级。ESPI 在无损检测领域具有非常重要的地位<sup>[101]</sup>,尤其是相移 ESPI,近些年



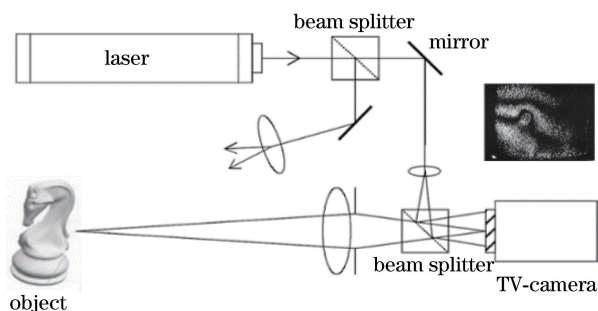


图 45 ESPI 数字散斑干涉测量系统示意图  
Fig. 45 Schematic diagram of ESPI digital speckle interferometry system

来得到迅猛发展,被广泛用于对复合材料、焊缝质量和粗糙表面进行无损检测<sup>[102-104]</sup>。

由于相移 ESPI 灵敏度极高,对测量系统的光束的相干性和抗震性能要求很高。为进一步提高 ESPI 的抗震性能,美国的 Hung<sup>[105]</sup> 将错位技术引入电子散斑中,提出了错位散斑干涉技术 (shearography),其基本原理如图 46 所示<sup>[91]</sup>,错位散斑干涉也被称为散斑剪切干涉,该技术的优点是两束物光相干,不需额外引入参考光,从而简化了光路,其所用的激光器相干长度较小,降低了对测量环境的隔震要求。

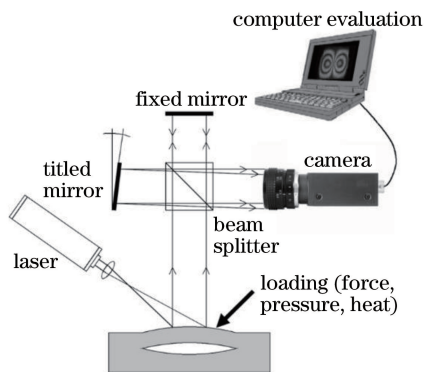


图 46 错位散斑干涉测量系统原理图  
Fig. 46 Schematic diagram of shearing speckle interferometry system

近年来,国内外研究人员围绕 shearography 技术做了大量研究,如在原有的剪切散斑光路中植入  $4f$  变换光路,扩大视场角,与传统剪切散斑系统相比,新系统的视场角不再受分光棱镜尺寸的影响,只取决于镜头焦距和 CCD 靶面尺寸。且镜头外置,通过更换镜头满足不同的测量要求<sup>[106]</sup>。图 47(a)为使用  $4f$  光路的大视场迈克耳孙剪切散斑干涉系统原理图,图 47(b)和图 47(c)展示了同等测试距离下,未使用  $4f$  的传统系统和使用  $4f$  的大视场迈克耳孙剪切散斑干涉系统测量得到的相位条纹结果,可

见  $4f$  系统的视场范围明显增大。

随着实时动态无损测量的需求越来越多,为了解决快速测量问题,空间域相位提取方法如空间相移法<sup>[106]</sup>、空间载波相移技术<sup>[107]</sup>和空间 Fourier 变换法等<sup>[108]</sup>,目前成为研究热点。

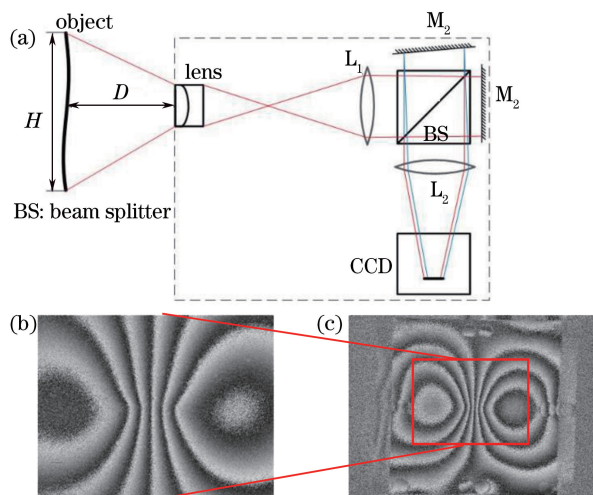


图 47 基于  $4f$  的剪切散斑干涉系统。(a)基于  $4f$  系统的剪切散斑参考光路基本原理;(b)传统散斑图案;(c)  $4f$  散斑图案

Fig. 47 Shearing speckle interference system based on  $4f$  optical system. (a) Principle of shearing speckle interference optical path based on  $4f$  optical system; (b) traditional fringe pattern; (c) fringe pattern based on  $4f$  optical system

错位散斑干涉技术目前已被广泛应用于无损检测,尤其是在线质量控制与跟踪<sup>[109]</sup>。国外已经有较成熟的剪切散斑干涉检测系统,在国内外航空航天等部门都有用户。经过不断的研究发展,该技术在航空、航天、材料和机械等领域得到广泛应用,可对航天飞行器和飞机机身、机翼控制面、游艇壳体、风力发电叶片及雷达罩等复合材料构件的分层、脱粘、假粘、皱折、裂纹、撞击损伤等缺陷进行无损检测<sup>[110-111]</sup>。Shearography 技术还可应用于残余应力表征、振动分析、应变测量和材料特性检测等。

目前在国内的一些高校和公司也开发了剪切散斑干涉系统,并将其应用于大学及实验室的教学和科研工作中,但该系统与国外剪切散斑无损检测仪器相比还有一定的差距。在国家重大科学仪器开发专项和国家重点研发计划的支持下,合肥工业大学研究团队等正在进行剪切散斑无损测量系统的研制与开发。图 48 为采用研制系统测量的航空多层复合蜂窝板缺陷图样。

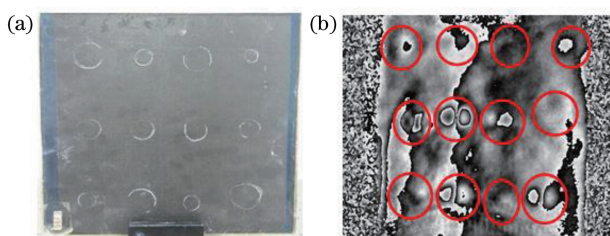


图 48 航空复合材料缺陷测量。(a)多层复合蜂窝板缺陷图样；(b)蜂窝板缺陷剪切散斑相位图  
Fig. 48 Defect inspection of aeronautical composite materials. (a) Defect specimen of multilayer composite honeycomb plate; (b) shearographic phase diagram of honeycomb plate defect

#### 4 图像处理、缺陷识别与分类

图像处理、缺陷识别及分类是 AOI 中的核心技术,关乎系统的功能能否成功实现。通常表面检测生成的图像含有大量噪声,有些表面图像还含有纹理背景,如太阳能电池阵列、薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)和彩色滤光片阵列等,会影响缺陷检测的速度和识别的准确性,对在线检测非常不利。

缺陷图像的处理通常需要经历图 49 所示的 6 个阶段,即缺陷图像获取、图像预处理、缺陷检测、缺陷标记、缺陷特征提取和 blob 分析、缺陷分类。

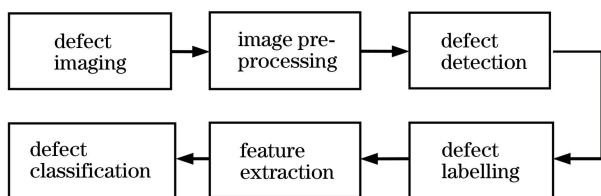


图 49 缺陷检测图像处理流程

Fig. 49 Image processing of defect detection

为了准确地检测出缺陷,一般要作一些预处理,如对图像进行增强,提高被检特征的对比度,减小背景噪声的影响,提高信噪比等。缺陷检测的方法可以分为三大类:统计方法、结构方法和滤波方法。统计方法有基于直方图缺陷方法和局部二值图案方法等;结构方法采用传统的形态学操作<sup>[4,112]</sup>;滤波可在空域或频域进行,空域滤波主要通过各种模板对图像进行卷积运算,频域滤波为间接处理方法,在频域中对图像进行运算处理。

根据图像背景情况和图像处理的难易程度,待处理的图像可以分为三种类型:均匀背景的图像、周期纹理背景的图像和复杂随机纹理背景的图像。均为背景的图像相对比较容易处理,因为从均匀背景中比较容易分割出缺陷,并进行识别和分类。从周

期纹理背景图像中分辨微小缺陷难度较大,首先需要通过滤波的方法去掉纹理,将其变成均匀背景的图像,再进行缺陷提取、识别与分类。随机纹理背景图像缺陷检测与识别最难,均匀背景和周期纹理背景图像中的算法不适用于随机纹理背景图像,不过目前可以采取深度学习等机器学习的方法解决。

#### 4.1 缺陷及其类型

表面缺陷(surface imperfection)是在加工、储存或使用期间,非故意或偶然生成的实际表面的单元体、成组的单元体和不规则体<sup>[113]</sup>。在缺陷检测中,不同产品有不同的缺陷定义,但对缺陷进行分类基本上都依据以下几个主要特征,即几何特征、灰度和颜色特征、纹理特征。

表面几何缺陷是工业产品表面最常见的缺陷类型,不同的产品和行业对缺陷的定义可能不同,常见的几何缺陷有亮点、暗点、针孔、凸起、凹坑、沟槽、擦痕和划痕等。有关缺陷的名词术语和图示可参考文献<sup>[113-114]</sup>。

颗粒物有灰尘、物体本体颗粒等,如液晶基板玻璃表面上的玻璃粉尘颗粒,大小一般在微米量级,通常颗粒物的 AOI 检测方法与异物、表面瑕疵和微观裂纹的检测方法不同,所采取的技术手段也有差异。

异物是指根据产品标准规定表面不应该含有的物质,是混入原料或产品里除对象物品以外的物质。在生产使用过程中,由于生产环境指标偏离规定标准,产品表面往往容易被污染、腐蚀、氧化,或者由于制造工艺不规范、设备老旧、人为疏忽等原因引入和形成异物,如产品表面附着毛发、绒线、塑料、手套毛线等异物。异物对产品的使用性能常有极大影响,是否为异物需要根据产品标准界定。如何减少表面异物一直是产品制造行业的一大难题。

表面微观裂纹通常是材料在应力或环境(或两者同时)作用下产生的裂隙,裂纹分为微观裂纹和宏观裂纹,已经形成的微观裂纹和宏观裂纹在应力或环境(或两者同时)作用下,不断长大,扩展到一定程度,即造成材料的断裂<sup>[115]</sup>。如液晶基板玻璃四周加工后容易使应力集中,产生微裂纹,导致运输和后续加工过程中发生延展。裂纹实际可归类为几何缺陷,将裂纹单独列为一类,主要是因为微观裂纹的检测通常非常困难,需要采取与常规的几何缺陷检测不同的方法。

需要指出的是,在实际表面上存在缺陷并不表示该表面不可用,缺陷的可接受程度取决于表面的用途

与功能,通过用适当的参数来表征,如长度、宽度、高度、深度、方向、单位面积上的缺陷数等<sup>[4,112-113]</sup>,并建立缺陷分类与评判标准。

#### 4.2 背景分离与缺陷分割

物体表面可分为均匀背景的表面、周期纹理背景的表面和随机纹理背景的表面,在工业产品中,均匀背景表面和周期纹理背景的表面非常常见,如玻璃、薄膜、硅片、液晶显示器 ITO 镀膜层等都是均匀背景的表面,太阳能电池阵列、液晶平板显示器中的 TFT-LCD 阵列、彩色滤光片阵列等都是周期纹理背景表面。在表面缺陷检测时,均匀背景表面中的缺陷比较容易提取,而周期纹理背景表面图像中含有重复的纹理背景,缺陷的灰度值和周期纹理背景的灰度值处于同一水平,严重干扰缺陷检测。传统的边缘检测和阈值分割等方法不能将缺陷准确地检测出来,必须在不影响缺陷原始特征的情况下,先消除周期纹理背景,转变成均匀背景的表面,然后再分割提取缺陷,才能提高检测缺陷的成功率。随机纹理背景表面缺陷的分割提取最困难,因为纹理背景是随机的,没有规律,这部分内容将在下文介绍。

周期纹理背景的表面缺陷检测主要有三种方法。

1) 频率滤波方法。频域滤波是滤除周期纹理背景的常用方法。将图像信号从空域变换到频域,在频域中滤除重复性纹理背景的频率信号,保留缺陷所在的局部异常信息,再进行相应的逆变换,重构图像,得到无重复纹理背景的图像。常用的频域滤波方法有傅里叶变换(DFT)、Gabor 变换、离散余弦变换(DCT)、小波变换(DWT)等,这些方法准确性、计算量、可靠性、对特征旋转和缩放的不变性、噪声敏感性、在线和离线使用的可操作性等方面的比较参考文献<sup>[116]</sup>。

傅里叶变换方法根据检测系统的实际情况可分为一维傅里叶变换<sup>[117]</sup>或二维傅里叶变换<sup>[118]</sup>,用来消除周期性重复的纹理背景,但算法中的关键参数高度依赖图像的分辨率,通常需通过实验确定,或采取一定的措施实现自动选取<sup>[119-122]</sup>。该方法对周期性纹理背景中的一般缺陷非常有效,但当缺陷接近背景纹理方向时,该方法不再有效;虽然可以利用对噪声和旋转不敏感的二维 DFT 重构法,但需要预先知道纹理方向的数目,且高能量阈值参数难以确定<sup>[123]</sup>。傅里叶变换的另一个缺点是其仅在频域有局部分析的能力,在时域里不存在局部分析的能力,因此容易受到表面图像上灰度局部不均匀性的干扰,遇到这种情况时通常不能很好地消除周期性重

复纹理背景。

Gabor 变换是窗函数为高斯窗的傅里叶变换,为特殊窗口傅里叶变换或短时傅里叶变换(STFT),不仅能在整体上提供信号的全部信息,还能提供任一局部时间内信号变化剧烈程度信息,即可同时提供时域和频域局部化的信息,克服了傅里叶变换不能局部化分析的缺点,有良好的频域描述能力,可在频域不同尺度、不同方向上提取相关的特征<sup>[124-126]</sup>。但 Gabor 变换的时频窗口的大小、形状不能随频率的变化而变化,不具备自适应能力;另外 Gabor 变换是非正交的,不同特征分量之间有冗余,分析计算量大。

小波分析方法是窗口大小(即窗口面积)固定但形状、时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法,克服了傅里叶变换的时域局部分析的缺点,被广泛用于消除周期性重复纹理背景。通过选择合适的小波参数,基于小波的多分辨率方法能够有效地去除图像上全局的周期性纹理背景。为了减小小波参数选择难度,可以利用小波分解将原始图像分解为不同频率的子图像,包括不同水平级的低频子图像(近似子图像)和高频子图像(细节子图像),而高频子图像包括水平高频、垂直高频和对角高频子图像,选择合适水平级的子图像进行重构,消除周期性纹理背景,保留缺陷信息<sup>[127-128]</sup>。但合适的子图像选择过程较复杂,且小波分析方法没有区分缺陷信号和噪声信号的频率差异,检测准确率有待研究。

离散余弦变换通过剔除代表纹理结构的主频率,保留其他频率来重构图像。该方法对图像上的光照变化不敏感,但图像上大尺寸缺陷中心部分在高通滤波时容易被剔除,且内嵌于纹理结构中的缺陷难以检测<sup>[129-130]</sup>。

频域滤波方法的基本流程如图 50 所示,包括图像获取、选取合适的变换函数将图像从空域变化到频域、选取合适的频域滤波器对频域图像进行滤波、滤除周期性成分、逆变换到空域和图像分割处理。

图 51 展示了频域滤波法的效果,图 51(a)为 TFT 阵列及其表面上的纤维缺陷,根据频域滤波法的基本原理,先将图像按行进行一维 DFT,在一维傅里叶频域中消除周期纹理背景中的频率成分,接着进行一维离散傅里叶逆变换(IDFT)得到空间域一维行图像。傅里叶重构方法能有效移除周期性背景图案,同时保留局部异常,最后利用传统的双阈值方法分离缺陷与背景。图 51(b)为二值化图像,可



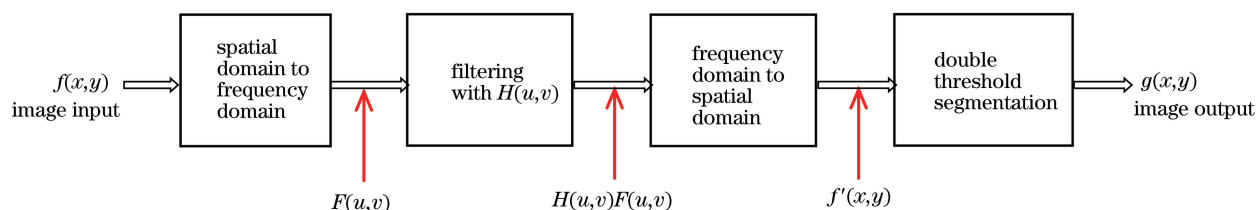


图 50 频域滤波流程示意图

Fig. 50 Schematic diagram of frequency domain filtering process

可以看出,纤维缺陷能够被很好地检测出来。图 51(c)为经过缺陷区域的第 92 行图像。图 51(d)为经过一维 IDFT 的第 92 行重构图像,此时周期纹理背景已经消除。

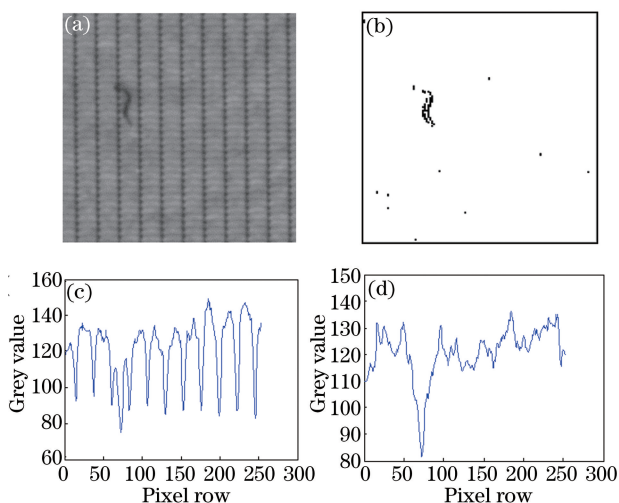


图 51 TFT 阵列纤维缺陷检测。(a)TFT 阵列及缺陷图像;(b)去掉周期背景后的图像;(c)时域中第 92 行灰度分布;(d)第 92 行滤波后重构的结果

Fig. 51 Inspecting the fiber defects on a TFT array surface. (a) TFT array image with a fiber defect; (b) image removed periodic background; (c) pixel grey of the 92<sup>th</sup> row in time domain; (d) reconstruction results of the 92<sup>th</sup> row pixels

2) 图像矩阵法。将图像视为矩阵,采用独立成分分析(ICA)或奇异值分解法(SVD)等进行分解,选择合适的分解值对相应矩阵进行改进,并重构图像。例如 TFT 阵列检测,可用 ICA 进行纹理剔除检测缺陷<sup>[131]</sup>。该方法首先对无缺陷 TFT 阵列表面图像运用 ICA,得到解混矩阵  $\mathbf{W}$  和相关的独立分量  $I_c$ ,然后选择合适的独立分量  $I_c$  来改善解混矩阵,最后通过改善的解混矩阵重构待测 TFT 阵列表面图像,即可消除 TFT 基板表面图像的重复纹理结构,并保留局部异常。但该方法只能在重构图像中确定缺陷的大概位置,不能保存待检缺陷的大小和形状,无法实现缺陷类型分类;也可采用稳健性

主成分分析(RPCA)的检测方法<sup>[132-133]</sup>,采用凸优化的方法对待测图像矩阵进行矩阵变换,使之分解成无缺陷的低秩矩阵图像和有缺陷的稀疏矩阵图像,RPCA 算法中参数  $\rho$  很重要,其值影响算法的收敛速度,同时也对分割结果产生影响。不同缺陷的参数  $\rho$  不同,难以自适应地选择合适的参数  $\rho$ 。在奇异值分解法中,不同的奇异值代表了纹理图像上不同程度的细节,图像的大部分信息由少数较大的奇异值来代表,如 TFT-LCD 面板图像中周期性重复纹理背景;而其余的小奇异值则代表图像中的局部细节信息,如噪声或缺陷。通过选定合适的奇异值个数,剔除代表周期纹理背景图像的奇异值,通过剩下的奇异值重构图像,最终得到的图像去除了周期性重复纹理背景,保留了缺陷<sup>[134-135]</sup>。但由于 SVD 是基于正交基的,对图像的旋转比较敏感,对不处于水平和垂直方向的周期性纹理背景,去除效果不理想。

图 52 列举了图 52(a)所示 TFT 阵列图像奇异值分解法的实例。图 52(a)为含有纤维缺陷的液晶平板显示器中的 TFT-LCD 阵列表面图像;图 52(b)为通过 SVD 处理的前 10 个最大的奇异值;图 52(c)为剔除代表周期纹理背景图像的奇异值,通过剩下的奇异值重构的图像;图 52(d)为二值化图像,可以看出,纤维缺陷能够被很好地分割出来。

3) 高级智能算法。基于人工智能、模式识别、机器学习和深度学习等高级智能化的缺陷提取算法是缺陷检测中的热门话题。例如利用多层神经网络学习算法,通过学习大量缺陷样本,得到训练样本与无缺陷模板之间的映射关系,然后利用重构图像与缺陷图像之间的对比,实现样本的缺陷检测<sup>[136]</sup>;利用稀疏性表示方法提取图像的主要正常纹理特征,即学习自适应训练库,且对原织物图像进行稀疏性重构,从而将原图像与重构图像作差,得到残差显著图,突出疵点部分<sup>[137]</sup>。基于限制式独立分量分析(ICA)模型和粒子群优化(PSO)方法,首先设计一

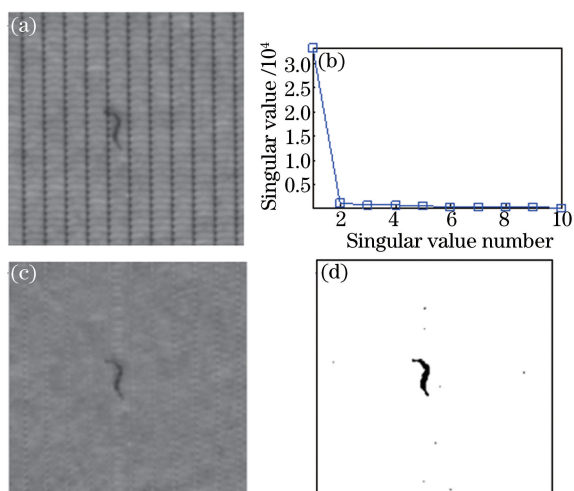


图 52 TFT 阵列奇异值分解法。(a)有缺陷的 TFT 图像；(b)前 10 个奇异值；(c)重构后的图像；(d)二值化图像

Fig. 52 TFT array singular value decomposition method.

(a) TFT images with defects; (b) the first 10 singular values; (c) reconstructed image; (d) binary image

种 ICA 滤波器,并使用具有多方向搜索特性的 PSO 算法求解 ICA 的分离矩阵,求解中加入限制式,使图像正常区域经滤波后有一致的反应值并有效凸显缺陷区域<sup>[138]</sup>。这些方法的共同特点是计算复杂,通常需要大数据量的待测图片进行训练或自学习,样本收集和训练过程耗时,但随着电子技术与计算机技术的发展,这些问题最终将得到解决。

#### 4.3 缺陷标记与特征参数化度量——blob 分析

缺陷图像进行背景分离与缺陷分割后,下一步需要对图像中的一块缺陷区域(即连通域)进行标记和 blob 分析(blob analysis)。blob 是“一滴”、“一抹”、“一团”、“弄脏”、“弄错”的意思,在计算机视觉中的 blob 是指图像中的具有相似颜色、纹理等特征所组成的一块连通区域。缺陷的 blob 分析即分析从背景中分割后缺陷的数量、位置、形状和方向等参数,还可以提供相关缺陷间的拓扑结构,以便后续对缺陷进行识别和分类处理。

1) 缺陷连通域 blob 标记。缺陷连通域标记也称为缺陷连通域分析、区域标记、blob 提取、局部区域提取等,即给图像中每个缺陷区域定义一个唯一的标识符,用以区分不同位置的缺陷,以便后续特征提取和分析。自 20 世纪 60 年代以来,人们开发出许多连通域标记算法,按照计算机架构和数据结构,这些算法可以归属为 5 大类:①由特殊结构表示的图像算法,如游程长度结构和层次树结构(例如 N 叉树,如二叉树、四叉树、OC-树等)算法;②并行机模型算法,如网状连接的大规模并行处理器或脉动

阵列处理器;③硬件实现算法;④ 3-D 和/或  $n$ -D 图像算法;⑤用于普通计算机体系结构(如冯诺依曼体系结构和二维图像)的算法。其中⑤的算法最常见,有关算法⑤的并行实现、硬件实现和  $n$  维图像中的连通域提取等方面的最新进展参考文献[139-140]。

2) 缺陷特征提取与 blob 参数化。缺陷特征可分为几何特征、颜色特征、光谱特征和纹理特征等,特征选择与提取严重影响缺陷分类的准确性,特征的选择需要根据被检测表面自身特点、光学成像方法和图像所代表的物理特性来确定。缺陷的特征可用 blob 参数来表征,并形成特征向量供后续特征分类使用。对于大多数工业产品表面缺陷检测,缺陷的各种特征中几何特征往往比颜色特征、纹理特征等更有用。

blob 参数分为元数据(metadata)和统计特征参数,元数据描述缺陷的属性,用来支持如指示存储位置、历史数据、资源查找和文件记录等功能。

元数据主要包含<sup>[141]</sup>:

- (1) 缺陷的名称(name): 缺陷的名字;
- (2) 缺陷的 ID 号(identification No): 缺陷唯一身份标识; 缺陷的类名(group name);
- (3) 缺陷分类: 如划伤、斑点、亮缺陷、暗缺陷等;
- (4) 缺陷 blob 显示标签(reporting status): 表示该 blob 是否包含在缺陷 blob 报告中,可以有三种状态(included, excluded, unflagged);
- (5) 与内部标准关联性: 表示缺陷是否与内控标准关联,未设置为 0,设置后为 1。

统计特征参数有<sup>[112,141]</sup>:

- (1) 面积(area): 缺陷 blob 区域  $\Omega$  像素个数;
- (2) 体积(volume): 缺陷 blob 区域  $\Omega$  像素灰度值的总和;
- (3) 峰值(peak): 缺陷 blob 区域  $\Omega$  最大灰度值;
- (4) 峰值的位置(peak location): 缺陷 blob 区域  $\Omega$  最大灰度值像素二维位置坐标;
- (5) 外接矩形(bounding boxes): 包含缺陷 blob 区域  $\Omega$  最小外接矩形;
- (6) 对称性(symmetry): 外接四边形相对峰值位置的对称性;
- (7) 未加权矩(unweighted moments): 表示区域的现状参数,  $u_{a,b} = \sum_{(x,y) \in \Omega} x^a y^b$ ,  $a, b$  表示矩的阶数;
- (8) 加权矩(weighted moments): 描述缺陷体积的形状,  $m_{a,b} = \sum_{(x,y) \in \Omega} x^a y^b p(x,y)$ , 式中:  $p(x,y)$

为 $(x, y)$ 处的灰度值;

(9)比值 (ratio):缺陷参数值与内控标准参数值的比值;

(10)信噪比(SNR):峰值与估计噪声标准差的比值;

(11)邻域 blob:描述在特定阈值下最近的blobs,如距离、个数等。

3)blob 最小外接矩形的计算。在 blob 分析中,最关键的是 blob 区域外接矩形的计算,计算最小外接矩形有两种方法:旋转法和霍特林变换(Hotelling)。旋转法是将 blob 的边界以每次若干角度的增量在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 旋转。每旋转一次,记录一次其坐标系方向上的外接矩形边界点 $(x, y)$ 的最大值和最小值,旋转到某个角度后,外接矩形的面积达到最小,取面积最小的外接矩形参数为主轴意义下的长度和宽度。此外,主轴可以通过矩计算得到,也可以用求物体的最佳拟合直线的方法求出。

霍特林变换也常称为主成分变换(PCA)或K-L变换。其主要思想是用坐标系转换,求出样本的主轴和纵轴,然后找出这些主轴和纵轴方向的最大值和最小值,以旋转后的坐标系将样本用框标出,霍特林变换是在均方误差最小的意义下获得最佳变化,消除了旋转变化带来的影响,霍特林变换的计算过程详见参考文献[142-145]。

#### 4.4 缺陷识别和分类方法

缺陷 blob 分析之后,选取主要的 blob 参数,组成缺陷特征向量,然后进行缺陷分类处理。缺陷的分类方法有模式识别方法、神经网络、机器学习和深度学习等方法。

模式识别又称模式分类,是一种经典方法,起初主要作为机器学习的代名词,模式识别有两种基本方法:统计模式识别方法和结构(句法)模式识别方法。统计模式识别是对模式的统计分类方法,又称为决策理论识别方法,是一种结合统计概率论的贝叶斯决策系统进行模式识别的技术。统计模式识别的主要方法有判别函数法、K近邻分类法、非线性映射法、特征分析法和主因子分析法等。结构模式识别(或句法模式识别)是把一个模式描述为较简单的分层子模式的组合,利用模式与子模式分层结构的树状信息完成模式识别工作。不存在对所有模式识别问题都适用的单一模型和解决识别问题的单一技术,很多情况下需要结合具体问题把统计模式和句法模式识别结合起来,并与人工智能中的启发式搜索结合起来,如把统计模式识别或句法模式识别与

支持向量机的机器学习结合起来,互相取长补短,提高识别准确性。

在统计模式识别中,贝叶斯决策规则从理论上解决了最优分类器的设计问题,但使用前必须解决更困难的概率密度估计问题,而神经网络分类算法直接从观测数据进行训练学习,是更简便有效的方法,在缺陷分类中得到广泛应用<sup>[146]</sup>,但其为启发式技术,缺乏指定工程实践的坚实理论基础。Vapnik<sup>[147-148]</sup>根据统计学理论建立的机器学习理论,有别于归纳学习等其他机器学习方法,在严格的数学基础上圆满地回答了人工神经网络中出现的理论问题,且发明了一种新的学习方法——支持向量机。支持向量机是非常有效的分类器,已在许多缺陷分类中得到成功应用<sup>[112,144-149]</sup>。

从处理问题的性质和解决问题的方法等角度来看,模式识别可分为有监督的分类和无监督的分类两种,二者的主要差别在于实验样本所属的类别是否预先已知。有监督的分类往往需要提供大量已知类别的样本,在已知类别标签的特征集(即训练集)基础上进行分类器构建;无监督的分类又称聚类分析,该方法不需要已知类别的训练集,分类器直接根据特征向量之间的相似性,将待分类的特征向量集合分为若干子集。

有监督的分类方法主要有朴素贝叶斯、决策树<sup>[150]</sup>、K-近邻、神经网络和支持向量机等;无监督学习识别中的聚类分组是将数据集划分为若干组或簇的过程,使同类数据对象之间的相似度较高,不同类数据对象相似度较低,主要的聚类算法有划分方法、层次方法、密度方法、网格方法以及模型方法等<sup>[151]</sup>。几种典型的分类器特点比较参考文献[4]。

缺陷检测分类方面的研究表明,C4.5 决策树比朴素贝叶斯效果更好<sup>[152]</sup>。传统的有监督分类方法需要大量训练数据,耗费大量的人力与物力;在学习过程中假设训练数据与测试数据服从相同的数据分布,然而在实际中这种分布相同的假设有时并不满足。为了提高训练速度,减小训练样本采集难度和降低成本,需要采用迁移学习(transfer learning)策略<sup>[153]</sup>,即把已经训练好的模型参数迁移到新的模型来帮助新模型训练。

#### 4.5 基于深度学习的缺陷检测与分类方法

近几年来,深度学习(deep learning)在许多领域取得了巨大成功,尤其在计算机视觉<sup>[154]</sup>、自然语言处理、字符识别、生物图像分类、敏捷制造<sup>[155]</sup>、农业<sup>[156]</sup>、故障诊断<sup>[157-158]</sup>、表面缺陷检测<sup>[159]</sup>、显微图



像分析<sup>[160]</sup>等领域受到人们的广泛关注。与传统的机器学习相比,深度学习能更有效地利用数据集,学习能力更强,非常适合作为特征提取和分类的工具。尤其对于复杂周期纹理表面和随机纹理表面中的缺陷提取、识别和分类,前述滤波和模式识别的方法可能无能为力,而深度学习却展现出强大威力。随着计算机性能的不不断提升,深度学习为机器视觉带来了更广阔的发展空间。

深度学习网络架构与特征学习架构综述参考文献[161-162],其中卷积神经网络(CNN)由于具有优良的性能,在表面缺陷检测中应用最广泛。CNN的层次结构如图53所示<sup>[163]</sup>,有三个主要神经层:卷积层(convolution layer)、池化层(pooling layer)和全连接层(fully connected layers)。各层作用不同,每层转换输入量到神经元激活的输出量,一直到最终的完全连接层,实现输入数据到一维特征向量的映

射。卷积层使用各种核卷积整幅图像,以及进行中间过程中的特征映射,产生各种特征映射输出;池化层负责对接收到的卷积层输出的图像进行降维,供后面的卷积层使用,池化层又称二次采样或下采样层,该层的主要目的是减少后续网络层的计算量,并防止过拟合,即防止网络过于复杂,导致学习数据中的每条信息包括错误信息;最常用的池化策略是平均池化和最大池化,最大池化能够导致计算快速地收敛。在CNN中,卷积层和池化层的数目根据实际使用情况确定,或通过迁移学习确定;若干个卷积层和池化层后是全连接层,其功能是在神经网络中进行高级推理,神经元在该层完全连接到前面一层,神经元的活动可以用矩阵乘法加上偏置偏移进行计算,全连接层最终将二维特征映射转换为一维特征向量,导出的矢量可以被馈送到一定数量的分类类别,或可视为用于进一步处理的特征向量<sup>[164]</sup>。

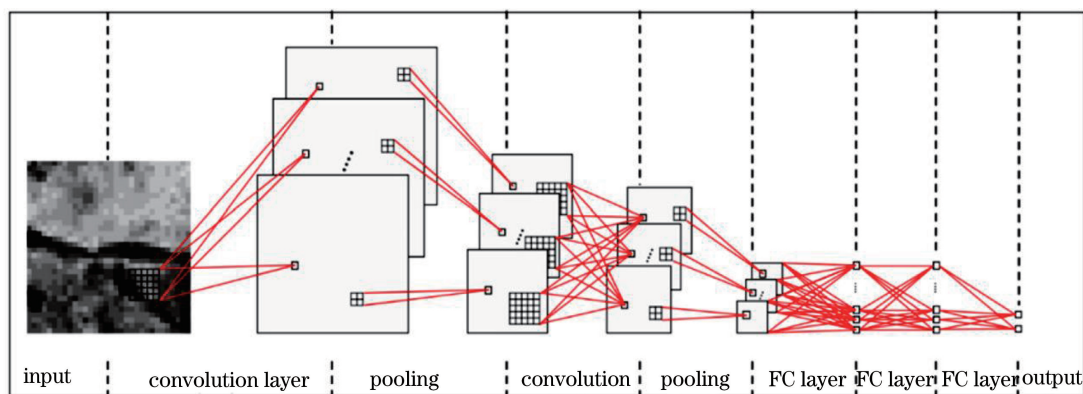


图 53 CNN 网络架构示意图

Fig. 53 Schematic diagram of CNN network architecture

已有的研究表明,CNN 比传统机器学习具有更杰出的性能,在计算机视觉和模式识别领域得到广泛应用。与玻尔兹曼机(Boltzmann machines)中的 DBNs、DBMs 和 SdAs 相比,CNN 具有独特的特征学习能力,即能自动地从样本数据集中学习特征;并且 CNN 对几何变换、形变和光照具有一定程度的不变性,因此在缺陷检测中具有广阔的应用前景。不像传统的机器学习方法,缺陷特征矢量的建模需要一事一议,而 CNN 直接从神经网络卷积层获得特征,因此可以用于比人工设计更高级别的特征识别,能够克服手工的局限性,展现出极强的可靠性。尤其不需要对个体特征进行建模以反映具有不同纹理的表面类型,可以直接从表面图像中检测缺陷,对于纹理表面不用提前将纹理除去,因为其具有很强的适应性。当新的表面加入时,CNN 不需要开发新的特

征,可在没有重新训练的情况下应用已有的网络参数<sup>[165]</sup>。CNN 具有这些优良特点,不仅可以用于背景均匀的表面和周期纹理表面,而且能胜任从事复杂和随机纹理表面的缺陷检测,如瓷砖表面缺陷的检测<sup>[166]</sup>、裂纹的检测<sup>[167]</sup>、地铁盾构隧道裂缝与渗漏缺陷的检测<sup>[159]</sup>、表面锈蚀的检测<sup>[168]</sup>、起皮、划痕等的检测<sup>[169-170]</sup>、贴片元器件焊接缺陷的检测等<sup>[171]</sup>。

CNN 的一个缺点是在实际应用中,由于检测图像中具有类标号的数据较少,而不具有类标号的数据非常丰富,因而在训练前为每幅图像人工设类标号非常费时、枯燥。为使 CNN 通过训练具有较高的泛化能力,需要大量具有类标号的训练样本,这是制约 CNN 在实践中应用的主要因素。为克服这个缺点,可采用迁移学习策略的 CNN 方法<sup>[153,165]</sup>。

## 5 结束语

基于视觉成像方法的自动光学检测技术及仪器目前在智能制造、生物医药、食品等行业,以及计算机、通信和消费性电子(3C)产业为代表的精密制造与组装过程中得到成功应用,也越来越受到产业界的广泛重视。任何以图像传感实现自动检测、测量、识别与机器人引导的技术都可以被认为是自动光学检测技术。基于自动光学检测技术开发的仪器不同于实验室光学仪器,必须满足以下条件:1)采用光学(视觉)成像技术感测被测特征;2)仪器运行与操作自动完成,无需人工参与;3)满足仪器现场对操作时间的要求。因此,自动光学检测仪器也是自动化装备,在制造领域其除了能作为独立模块在生产线上或线下运行外,还常常作为制造过程或智能装备中不可缺少的信息感知单元,通过信息反馈,引导制造过程按要求顺利运行。

自动光学检测技术可分为二维和三维两种类型,三维主要用于物体外形几何参数的测量、零件分组、定位、识别、机器人引导等场合;二维主要用于产品外观(色彩、缺陷等)检测、不同物体或外观分类、良品检测与分类等场合。目前在产业界用得最多的自动光学检测系统是由相机、镜头、光源、计算机等通用器件集成的简单光学成像与处理系统,通过相机直接成像,然后由计算机处理实现检测。这种简单系统的优点是成本低、集成容易、技术门槛相对不高,在制造过程中能够代替人工检测,满足多数场合的要求。但随着精密制造与组装产业智能制造过程对检测分辨率、精度、速度的要求越来越高,这种利用相机直接光学成像方式构成的简单视觉系统已经越来越无法满足要求。因为一方面几何光学直接成像的分辨率受镜头分辨率的限制,光学显微成像最高分辨率只有照明光源波长大小的四分之一,即约  $150\ \mu\text{m}$ ;另一方面,许多被检测特征不是简单用相机成像能够感知和探测的,必须利用和发展特殊的光学成像技术,这也是本综述的重点内容之一。

成像技术解决了信息感知问题,但要实现自动光学检测技术,系统集成技术尤为重要。系统集成技术牵涉到关键器件、系统设计、整机集成、软件开发等。自动光学检测系统中必不可少的关键器件有图像传感器(相机)、镜头、光源、采集与预处理卡、计算机(工控机、服务器)等。图像传感器最常用的是各种型号的 CMOS/CCD 相机,图像传感器、镜头、光源三者组合构成了大多数自动光学检测系统中感

知单元,器件的选择与配置需要根据检测要求进行合理设计与选型。光源的选择(颜色、波长、功率、照明方式等)可以参照第 3 节内容,除了分辨与增强特征外,还需考虑图像传感器对光源光谱的灵敏度范围。镜头的选择需要考虑视场角、景深、分辨率等光学参数,镜头的光学分辨率要和图像传感器的空间分辨率匹配才能达到最佳的性价比。一般情况下,镜头的光学分辨率略高于图像传感器的空间分辨率为宜,尽可能采用黑白相机成像,提高成像分辨能力。图像传感器(相机)采用面阵或线阵需根据具体情况而定,选型时需要考虑的因素有成像视场、空间分辨率、最小曝光时间、帧率、数据带宽等。对于运动物体的检测,要考虑图像运动模糊带来的不利影响,准确计算导致运动模糊的最小曝光时间,确定图像传感器的型号。图像传感器的曝光时间应小于导致运动模糊的最小曝光时间,快速曝光选择全局快门模式为宜,不采用卷帘式曝光模式;为了获得最佳的信噪比,图像传感器的增益尽可能为 1,图像亮度的提升尽可能用光源的能量(功率)来弥补,或者在不影响可用的成像景深情况下,增大镜头的孔径光阑。

在系统集成中,被测件的支撑方式、精密传输与定位装置也必须精心设计,这牵涉到精密机械设计技术,综述中虽有提及,但未详述。这对平板显示、硅片、半导体和 MEMS 等精密制造与组装产业中的自动光学检测系统非常重要。在这些领域,制造过程通常在超净间进行,要求自动光学检测系统具有很高的自洁能力,对系统构件的材料选型、气动及自动化装置选型、运动导轨的设计与器件选型都有严格要求,不能给生产环境尤其是被测工件本身带来二次污染。尤其是用于表面缺陷检测的自动光学检测系统不能在检测过程中,给被测件表面带来缺陷(如粉尘、划伤、静电等)。因此,对于大型零件(如高世代的液晶玻璃基板、硅片等)的在线检测,常常需要采取气浮支撑、定位与传输机构,运动部件(如轴承等)采用自润滑器件,利用风机过滤机组(FFU)对检测系统进行环境净化,并采取消静电装置,对工件进行防静电处理。

高速图像数据处理与软件开发是自动光学检测的核心技术。由于自动光学检测是以图像传感获取的被测信息,数据量大,尤其是高速在线检测,图像数据有时是海量的,为满足生产节拍需求,必须采用高速数据处理技术。常用的方法有共享内存式的多线程处理,共享内存或分布式内存多进程处理等;在

系统实现上采用分布式计算机集群,把巨大的图像分时、分块分割成小块数据流,并分散到集群系统各节点。对于耗时复杂的算法,有时仅靠计算机 CPU 很难满足时间要求,这时还需配备硬件处理技术,如采用 DSP、GPU 和 FPGA 等硬件处理模块,与 CPU 协同工作,实现快速复杂的计算难题。

## 参 考 文 献

- [1] Alaluf A, Birnbaum D. Inspection of PCBs by laser: induced fluorescence [J]. *Circuit World*, 2002, 28 (1): 21-28.
- [2] Mar N S S, Yarlalagadda P K D V, Fookes C. Design and development of automatic visual inspection system for PCB manufacturing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27 (5): 949-962.
- [3] Yang S W, Lin C S, Lin S K, *et al.* Automatic defect recognition of TFT array process using gray level co-occurrence matrix [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125 (11):2671-2676.
- [4] Neogi N, Mohanta D K, Dutta P K. Review of vision-based steel surface inspection systems [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2014, 2014(1): 50.
- [5] Min Y Z, Xiao B Y, Dang J W, *et al.* Real time detection system for rail surface defects based on machine vision[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018, 2018(1): 3.
- [6] Shi Y Q, Lu R S, Zhang T D. Defect inspection system design based on the automated optical inspection technique for LCD backlight modules[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28 (5): 768-773.  
史艳琼, 卢荣胜, 张腾达. 液晶显示屏背光源模组表面缺陷自动光学检测系统设计[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(5): 768-773.
- [7] Janoczki M, Becker A, Jakab L, *et al.* Automatic optical inspection of soldering, materials science[M]. Yitzhak Mastai: IntechOpen, 2013.
- [8] Smith A. Automated optical inspection and marking systems and methods: US09/941416 [P]. 2003-03-06.
- [9] Lu R S. State of the art of automated optical inspection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s1): 120-123.  
卢荣胜. 自动光学检测技术的发展现状[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s1): 120-123.
- [10] Lu R S, Forrest A K. 3D surface topography from the specular lobe of scattered light [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(10): 1018-1027.
- [11] Lu R S, Shi Y Q, Li Q, *et al.* AOI techniques for surface defect inspection [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 36: 297-302.
- [12] Dong J T. Study on the 3D micro/nano measurement system and techniques based on Linnik polarization-sensitive white light interferometry[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.  
董敬涛. 基于 Linnik 偏振白光干涉术的三维微纳米测量系统及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [13] Li Q. Surface defects AOI inspection technology and system architecture[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.  
李琪. 平板表面缺陷自动光学检测技术及系统架构[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [14] Tian G Y, Lu R S, Gledhill D. Surface measurement using active vision and light scattering[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(1): 131-139.
- [15] Smith B. Geometrical shadowing of a random rough surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, 15(5): 668-671.
- [16] Tsang L, Kong J A, Ding K H. Scattering of electromagnetic waves, theories and applications [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [17] Collin R E. Electromagnetic scattering from perfectly conducting rough surfaces (a new full wave method) [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(12): 1466-1477.
- [18] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 611-634.
- [19] Beckmann P, Spizzochino A. The scattering of electro-magnetic waves from rough surfaces [M]. New York: Pergamon, 1963.
- [20] Liu Y, Yu F H. Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 243-257.
- [21] Martin D. A practical guide to machine vision lighting[J]. Retrieved, 2007, 11(5): 2013.
- [22] Muehleemann M. Standardizing defect detection for the surface inspection of large web steel [M]. New York: Illumination Technologies Inc, 2000: 1-9.
- [23] Advanced Illumination. When “Adequate” lighting is not really good enough [EB/OL]. (2016-04-20) [2018-05-10]. [http://www.advancedillumination.com/sites/all/themes/advill/images/resource/files/Application\\_Notes/good-enough.pdf](http://www.advancedillumination.com/sites/all/themes/advill/images/resource/files/Application_Notes/good-enough.pdf).
- [24] Vriesenga M, Healey G, Peleg K, *et al.* Controlling



- illumination color to enhance object discriminability [C] // Proceedings 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 15-18, 1992, Champaign, IL, USA. New York: IEEE, 1992: 710-712.
- [25] Garcia-Lamont F, Cervantes J, López A, *et al.* Segmentation of images by color features: a survey [J]. *Neurocomputing*, 2018, 292: 1-27.
- [26] Healey G E, Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(3): 267-276.
- [27] Chang Y C, Reid J F. RGB calibration for color image analysis in machine vision[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A*, 1996, 5(10): 1414-1422.
- [28] Ludlow J. Advanced machine vision lighting[C/OL] // 2017 Conference on Automate, Chicago, Illinois, 2017[2018-05-12]. [https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP\\_Advanced-Vision-Lighting\\_Jonathan-Ludlow.pdf](https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP_Advanced-Vision-Lighting_Jonathan-Ludlow.pdf).
- [29] Technology white paper. Eight tips for optimal machine vision lighting: Tips for choosing the right lighting for machine vision application[R/OL]. 2013 [2018-05-12]. [https://www.vision-systems.com/content/dam/VSD/solutionsinvision/Resources/lighting\\_tips\\_white\\_paper.pdf](https://www.vision-systems.com/content/dam/VSD/solutionsinvision/Resources/lighting_tips_white_paper.pdf).
- [30] TRI white paper-introduction to AOI technology[EB/OL]. (2013-08-12) [2018-05-16]. [http://www.circuitnet.com/news/uploads/2/WP\\_TRI\\_Introduction\\_to\\_AOI\\_CN.pdf](http://www.circuitnet.com/news/uploads/2/WP_TRI_Introduction_to_AOI_CN.pdf).
- [31] Wu F P, Zhang X M. An inspection and classification method for chip solder joints using color grads and Boolean rules[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(5): 517-526.
- [32] Kim T H, Cho T H, Moon Y S, *et al.* Visual inspection system for the classification of solder joints [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(4): 565-575.
- [33] Hao W, Xianmin Z, Yongcong K, *et al.* Solder joint inspection based on neural network combined with genetic algorithm[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(20): 4110-4116.
- [34] Infrared vision [EB/OL] // Wikipedia, the free encyclopedia, (2018-03-19) [2018-05-16]. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Infrared\\_vision&oldid=831150773](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Infrared_vision&oldid=831150773).
- [35] Primer on IR theory. Introduction to infrared vision [EB/OL]. (2018-01-10) [2018-05-16] <https://www.opto-engineering.com/resources/infrared-theory>.
- [36] Ghillemyn M. Infrared in machine vision: from shortwave linear array to 2 dimensional thermal longwave [C/OL] // VISION 2009 [2018-04-28]. [http://spectronet.de/story\\_docs/vortraege\\_2009/091103\\_vision/091103\\_1030\\_ghillemyn\\_xenics.pdf](http://spectronet.de/story_docs/vortraege_2009/091103_vision/091103_1030_ghillemyn_xenics.pdf).
- [37] Flanagan D. Infrared machine vision: a new contender [J]. *Sensors-The Journal of Applied Sensing Technology*, 1998, 15(4): 29-33.
- [38] Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Genest M, *et al.* Infrared vision: visual inspection beyond the visible spectrum[M] // Liu Z, Ukida H, Ramuhalli P, *et al.* Integrated imaging and vision techniques for industrial inspection. London: Springer, 2015: 41-58.
- [39] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(3): 136-154.
- [40] Razeghi M, Nguyen B M. Advances in mid-infrared detection and imaging: a key issues review [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2014, 77(8): 082401.
- [41] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(4): 046501.
- [42] Malchow D. Shortwave IR imaging in machine vision: principles and practice-before you specify your next machine vision system, check out what SWIR cameras can do for your manufacturing process[J]. *Sensors-the Journal of Applied Sensing Technology*, 2004, 21(10): 19-25.
- [43] Kabouri A, Khabbazi A, Youlal H. Applied multiresolution analysis to infrared images for defects detection in materials[J]. *NDT & E International*, 2017, 92: 38-49.
- [44] Kim G. Micro defect detection in solar cell wafer based on hybrid illumination and near-infrared optics [C] // 2013 9th Asian Control Conference (ASCC), June 23-26, 2013, Istanbul, Turkey. New York: IEEE, 2013: 1-5.
- [45] Hamdi A A, Fouad M M, Sayed M S. Patterned fabric defect detection system using near infrared imaging [C] // 2017 Eighth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS), December 05-07, 2017, Cairo, Egypt. New York: IEEE, 2017:111-117.
- [46] Zhang X W, Ding Y Q, Yan P. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312004. 张学武, 丁燕琼, 闫萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312004.

- [47] Aldave I J, Bosom P V, Gonzalez L V, *et al.* Review of thermal imaging systems in composite defect detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 61: 167-175.
- [48] Chen D, Zhang X, Zhang G, *et al.* Infrared thermography and its applications in aircraft non-destructive testing [C] // 2016 International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things(IIKI), October 20-21, 2016, Beijing, China. New York: IEEE, 2016: 374-379.
- [49] Tang C Q, Tian G Y, Chen X T, *et al.* Infrared and visible images registration with adaptable local-global feature integration for rail inspection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 87: 31-39.
- [50] Liu J, Tian G Y, Gao B, *et al.* Investigation of thermal imaging sampling frequency for eddy current pulsed thermography [J]. *NDT & E International*, 2014, 62: 85-92.
- [51] He Y Z, Du B L, Huang S D. Non-contact electromagnetic induction excited infrared thermography for photovoltaic cells and modules inspection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018: 1.
- [52] Vavilov V P, Burleigh D D. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing[J]. *NDT & E International*, 2015, 73: 28-52.
- [53] Andonova A, Angelov G, Chernev P. Diagnostics of packaged ICs by infrared thermography [C] // Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology, May 07-11, 2014, Dresden, Germany. New York: IEEE, 2014: 261-266.
- [54] Vavilov V P. Modeling thermal NDT problems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 72: 75-86.
- [55] Yang R Z, He Y Z. Corrigendum for “Optically and non-optically excited thermography for composites: A review”. [*Infrared Phys. Technol.* 75 (2016) 26-50] [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 259-260.
- [56] [Cortelyou B. UV-LED advancements extend the promise in curing[EB/OL]. (2014-03-11)[2018-05-12]. <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-11/issue-3/features/science/uv-led-advancements-extend-the-promise-in-curing.html>.
- [57] Katila P. UV and industrial LED applications require efficient thermal substrates[EB/OL]. (2015-03-23)[2018-05-12]. <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-3/features/thermal/uv-and-industrial-led-applications-require-efficient-thermal-substrates.html>.
- [58] UV LED machine vision light application[EB/OL]. (2014-12-31)[2018-05-15]. [http://www.optmv.net/index.php/Servicecenter/act\\_detail/art\\_id/57](http://www.optmv.net/index.php/Servicecenter/act_detail/art_id/57).
- [59] Peters L. UV LEDs ramp up the quiet side of the LED market[EB/OL]. (2012-02-15)[2018-05-12]. <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-9/issue-2/features/uv-leds-ramp-up-the-quiet-side-of-the-led-market-magazine.html>.
- [60] Pinter M. Applying ultraviolet lighting in machine vision applications[EB/OL]. (2017-09-12)[2018-05-12]. <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-22/issue-8/features/applying-ultraviolet-lighting-in-machine-vision-applications.html>.
- [61] Kuo S H, Chen C F. Design of a collimated UV-LED exposure unit based on light spread function method [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5542-5549.
- [62] Richards A. UV imaging opens new applications [EB/OL]. (2006-07-01)[2018-05-12]. <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-11/issue-7/features/component-integration/uv-imaging-opens-new-applications.html>.
- [63] Daloglu M U, Ray A, Gorocs Z, *et al.* On-chip microscopy and nano-particle detection using ultraviolet light[C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 14-19, 2017, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2017: 1-2.
- [64] During A, Fossati C, Commandré M. Multiwavelength imaging of defects in ultraviolet optical materials[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(16): 3118-3126.
- [65] Chen J, Tretiak O J. Fluorescence imaging for machine vision[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(11): 1871-1877.
- [66] Wilson A. UV lighting targets machine vision applications[EB/OL]. (2015-07-21)[2018-05-12]. <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-19/issue-3/features/uv-lighting-targets-machine-vision-applications.html>.
- [67] Rady A M, Guyer D E. Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes: A review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 117: 31-48.
- [68] Hecht E. *Optics*[M]. 4th ed. New Jersey: Addison Wesley, 2002.
- [69] Liang S K. *Physical optics* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 1986.  
梁栓庭. *物理光学* [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [70] Fresnel equations [EB/OL] // Wikipedia, the free

- encyclopedia. [2018-05-12]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations).
- [71] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [72] Successful Light Polarization Techniques [EB/OL]. (2014-03-11) [2018-05-12]. <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/illumination/successful-light-polarization-techniques/>.
- [73] Tianjin University, Teaching and Research Office of Material Mechanics, Photoelastic Group. Photoelastic principle and testing technology [M]. Beijing: Science Press, 1982.  
天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理及测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [74] Piranha 4 polarization camera user's manual, 2K high speed polarization line scan [EB/OL]. (2016-11-22) [2018-05-12]. <https://info.teledynedalsa.com/acton/attachment/14932/f-081d/1/-/-/1-0042/1-0042/03-032-2024500%20Piranha4%20Polarization%20K%20Mono%20Camera%20User%20Manual.pdf>.
- [75] Wei X H, Gao B, Li Q, *et al.* Study of the stress birefringence measurement of optical glass [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s212002.  
魏小红, 高波, 李强, 等. 光学玻璃应力双折射检测方法研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s212002.
- [76] Yoshizawa T. Handbook of optical metrology, principles and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [77] He X F. Focus on polarization [EB/OL]. (2011-10-22) [2018-05-12]. <https://www.photonics.com/WA60734>.
- [78] Stokes parameters [EB/OL] // Wikipedia, the free encyclopedia. [2018-05-12]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes\\_parameters](https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_parameters).
- [79] Lekholm V, Rämme G, Thornell G. Seeing the invisible with schlieren imaging [J]. Physics Education, 2011, 46(3): 294-297.
- [80] Gross H, Hofmann M, Jedamzik R, *et al.* Measurement and simulation of striae in optical glass [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7389: 73891C.
- [81] Raffel M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques [J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(3): 56-60.
- [82] Settles G S. Smartphone schlieren and shadowgraph imaging [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104: 9-21.
- [83] Hargather M J, Settles G S. A comparison of three quantitative schlieren techniques [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(1): 8-17.
- [84] Meyer J, Gruna R, Längle T, *et al.* Simulation of an inverse schlieren image acquisition system for inspecting transparent objects [J]. Electronic Imaging, 2016(19): 1-9.
- [85] Batchelor B G. Machine vision handbook [M]. London, UK: Springer, 2012.
- [86] Beyerer J, Leon F P, Frese C. Machine vision, automated vision inspection: theory, practice and application [M]. London, UK: Springer, 2016.
- [87] Panigrahi P K, Muralidhar K. Schlieren and shadowgraph methods in heat and mass transfer [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [88] Settles G S. Schlieren and shadowgraph techniques [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [89] Mazumdar A. Principles and techniques of schlieren imaging systems [J]. Columbia University Computer Science Technical Reports, 2013: 14.
- [90] Osten W. Digital image processing for optical metrology [M] // William Sharpe, Springer handbook of experimental solid mechanics. Boston: Springer, 2008: 481-564.
- [91] Schnars U, Jueptner W. Digital holography, digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [92] Kreis T. Application of digital holography for nondestructive testing and metrology: a review [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 240-247.
- [93] Acharya I, Upadhyay D. Comparative study of digital holography reconstruction methods [J]. Procedia Computer Science, 2015, 58: 649-658.
- [94] Lu J P, Tahara T, Hayasaki Y, *et al.* Incoherent digital holography: a review [J]. Applied Sciences, 2018, 8(1): 143.
- [95] Pedrini G, Tiziani H J. Quantitative evaluation of two-dimensional dynamic deformations using digital holography [J]. Optics & Laser Technology, 1997, 29(5): 249-256.
- [96] Osten W, Faridian A, Gao P, *et al.* Recent advances in digital holography [invited] [J]. Applied Optics, 2014, 53(27): G44-G63.
- [97] Kim M K. Digital holographic microscopy, principles, techniques, and applications [M]. New York: Springer, 2011.
- [98] Yamaguchi I. Contouring of rough surfaces by digital holography [C] // 10th IMEKO TC14 Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry, September 12-14, 2011. Braunschweig, Germany. 2011 [2018-05-12]. <http://www.imeko.org/publications/tc14-2011/IMEKO-TC14-2011-10.pdf>.



- [99] Yamaguchi I. Holography, speckle, and computers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 39(4): 411-429.
- [100] Jacquot P. Speckle interferometry: A review of the principal methods in use for experimental mechanics applications[J]. *Strain*, 2008, 44(1): 57-69.
- [101] Yang L X, Siebert T. Digital speckle interferometry in engineering[J]. *New Directions in Holography and Speckle*, 2008: 405-440.
- [102] Groves R M, Pradarutti B, Kouloumpi E, *et al.* 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging [J]. *NDT & E International*, 2009, 42(6): 543-549.
- [103] Rao M V, Samuel R, Ananthan A. Applications of electronic speckle interferometry (ESI) techniques for spacecraft structural components [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 40(5/6): 563-571.
- [104] Raman R K S, Bayles R. Detection of decohesion/failure of paint/coating using electronic speckle pattern interferometry [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13(7): 1051-1056.
- [105] Hung Y Y. Shearography: A novel and practical approach for nondestructive inspection[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1989, 8(2): 55-67.
- [106] Feng J Y, Wang Y H, Wang X, *et al.* Design of digital shearography with wide angle of view based on 4f system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 188-193.  
冯家亚, 王永红, 王鑫, 等. 基于4f的大视角剪切散斑干涉系统设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(2): 188-193.
- [107] Xie X, Yang L X, Xu N, *et al.* Michelson interferometer based spatial phase shift shearography [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17): 4063-4071.
- [108] Liu P, Wang Y H, Feng J Y, *et al.* Phase detection technology in spatial carrier based on deflection angle [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(3): 39-43.  
刘佩, 王永红, 冯家亚, 等. 偏转角空间载波相位检测技术[J]. *光电工程*, 2015, 42(3): 39-43.
- [109] Steinchen W, Yang L X. Digital shearography-theory and application of digital speckle pattern interferometry[M]. Bellingham: SPIE Press, 2003.
- [110] Wang Y H, Thomsa D, Zhang P, *et al.* Whole field strain measurement on complex surfaces by digital speckle pattern interferometry [J]. *Materials Evaluation*, 2008, 66(5): 507-512.
- [111] Wang Y H, Lü Y B, Gao X Y, *et al.* Research progress in shearography and its applications [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(3): 300-309.  
王永红, 吕有斌, 高新亚, 等. 剪切散斑干涉技术及应用研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 300-309.
- [112] Hanzaei S H, Afshar A, Barazandeh F. Automatic detection and classification of the ceramic tiles' surface defects [J]. *Pattern Recognition*, 2017, 66: 174-189.
- [113] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Geometrical Product Specification (GPS)-Surface imperfections-Terms, definitions and parameters: GB/T15757-2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 产品几何量技术规范(GPS)表面缺陷 术语、定义及参数: GB/T15757-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [114] Whitehouse D J. Handbook of Surface and Nanometrology[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press Inc, 2010.
- [115] Crack[EB/OL]//baike.baidu. [2018-05-12]. <https://baike.baidu.com/item/%E8%A3%82%E7%BA%B9/10776905?fr=aladdin>.  
裂纹[EB/OL]//百度百科. [2018-05-12]. <https://baike.baidu.com/item/%E8%A3%82%E7%BA%B9/10776905?fr=aladdin>.
- [116] Hanbay K, Talu M F, Özgüven O F. Fabric defect detection systems and methods—A systematic literature review[J]. *Optik*, 2016, 127(24): 11960-11973.
- [117] Tsai D M, Hung C Y. Automatic defect inspection of patterned thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) panels using one-dimensional Fourier reconstruction and wavelet decomposition [J]. *International Journal of Production Research*, 2005, 43(21): 4589-4607.
- [118] Tsai D M, Chuang S T, Tseng Y H. One-dimensional-based automatic defect inspection of multiple patterned TFT-LCD panels using Fourier image reconstruction [J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(6): 1297-1321.
- [119] Zhang T D, Lu R S. Automatic period selection for DFT method in the application of TFT-LCD panel detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(3): 361-373.  
张腾达, 卢荣胜. 自动周期选取的DFT方法在TFT-LCD平板检测中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(3): 361-373.
- [120] Zhang T D, Lu R S, Dang X M. Automatic neighbor selection for one-dimensional DFT method in the surface defect inspection of TFT-LCD [J]. *China*

- Mechanical Engineering, 2016, 27(21): 2895-2901.  
张腾达, 卢荣胜, 党学明. TFT-LCD 表面缺陷检测中一维 DFT 方法中邻域  $r$  的自动选取[J]. 中国机械工程, 2016, 27(21): 2895-2901.
- [121] Zhang T D, Lu R S. Surface defect inspection of TFT-LCD panels based on 1D Fourier method [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9903: 990308.
- [122] Zhang T D, Lu R S, Zhang S Z. Surface defect inspection of TFT-LCD panels based on 2D DFT[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(3): 7-15.  
张腾达, 卢荣胜, 张书真. 基于二维 DFT 的 TFT-LCD 平板表面缺陷检测[J]. 光电工程, 2016, 43(3): 7-15.
- [123] Tsai D M, Hsieh C Y. Automated surface inspection for directional textures [J]. Image and Vision Computing, 1999, 18(1): 49-62.
- [124] Bissi L, Baruffa G, Placidi P, *et al.* Automated defect detection in uniform and structured fabrics using Gabor filters and PCA [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2013, 24(7): 838-845.
- [125] Tsa D M, Wu S K. Automated surface inspection using gabor filters [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(7): 474-482.
- [126] Tsai D M, Lin C P. Fast defect detection in textured surfaces using 1D gabor filters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(9): 664-675.
- [127] Tsai D M, Chiang C H. Automatic band selection for wavelet reconstruction in the application of defect detection[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(5): 413-431.
- [128] Tsai D M, Hsiao B. Automatic surface inspection using wavelet reconstruction[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(6): 1285-1305.
- [129] Perng D B, Chen S H. Directional textures auto-inspection using discrete cosine transform[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(23): 7171-7187.
- [130] Chen S H, Perng D B. Automatic surface inspection for directional textures using discrete cosine transform[C] // 2009 Chinese Conference on Pattern Recognition, November 04-06, 2009, Nanjing, China. New York: IEEE, 2009:1-5.
- [131] Lu C J, Tsai D M. Independent component analysis-based defect detection in patterned liquid crystal display surfaces[J]. Image and Vision Computing, 2008, 26(7): 955-970.
- [132] Yao M H, Li J, Wang X B. Solar cells surface defects detection using RPCA method [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(9): 1943-1952.  
姚明海, 李洁, 王宪保. 基于 RPCA 的太阳能电池片表面缺陷检测[J]. 计算机学报, 2013, 36(9): 1943-1952.
- [133] Cen Y G, Zhao R Z, Cen L H, *et al.* Defect inspection for TFT-LCD images based on the low-rank matrix reconstruction [J]. Neurocomputing, 2015, 149: 1206-1215.
- [134] Lu C J, Tsai D M. Automatic defect inspection for LCDs using singular value decomposition [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(1/2): 53-61.
- [135] Lu C J, Tsai D M. Defect inspection of patterned thin film transistor-liquid crystal display panels using a fast sub-image-based singular value decomposition [J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(20): 4331-4351.
- [136] Wang X B, Li J, Yao M H, *et al.* Solar cells surface defects detection based on deep learning[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 27(6): 517-523.  
王宪保, 李洁, 姚明海, 等. 基于深度学习的太阳能电池片表面缺陷检测方法[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(6):517-523.
- [137] Liu Z F, Yan L, Li C L, *et al.* Fabric defect detection algorithm based on sparse optimization[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(5): 56-61, 74.  
刘洲峰, 闫磊, 李春雷, 等. 基于稀疏优化的织物疵点检测算法[J]. 纺织学报, 2016, 37(5): 56-61, 74.
- [138] Gong F, Zhang X W, Sun H. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0415002.  
龚芳, 张学武, 孙浩. 基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0415002.
- [139] He L F, Ren X W, Gao Q H, *et al.* The connected-component labeling problem: A review of state-of-the-art algorithms [J]. Pattern Recognition, 2017, 70: 25-43.
- [140] Connected component labeling [EB/OL]. (2007-06-13)[2018-05-10]. <https://blogs.mathworks.com/steve/category/connected-components/>.
- [141] GC image user's guide[EB/OL]. (2007-07-18)[2018-05-10]. <http://cse.unl.edu/~reich/gcimage/V1.3/analysis.html>.
- [142] Wang C S, Lu R S, Li Q, *et al.* Mark defects based on hotelling transform and CUDA architecture [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(11): 2556-2560.

- 王成顺, 卢荣胜, 李琪, 等. 基于霍特林变换与 CUDA 架构的缺陷标记方法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(11): 2556-2560.
- [143] Borghese N A, Fomasi M. Automatic defect classification on a production line [J]. *Intelligent Industrial Systems*, 2015, 1(4): 373-393.
- [144] Chiu Y S P, Lin H D. A hybrid approach based on hotelling statistics for automated visual inspection of display blemishes in LCD panels[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(10): 12332-12339.
- [145] Sánchez-Marín F J. Automatic recognition of biological shapes with and without representations of shape[J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2000, 18(2): 173-186.
- [146] Zhou S Y, Chen Y P, Zhang D L, *et al.* Classification of surface defects on steel sheet using convolutional neural networks[J]. *Materiali in Tehnologije*, 2017, 51(1): 123-131.
- [147] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. Berlin: Springer, 1999.
- [148] Vapnik V N. Estimation of dependences based on empirical data[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2006.
- [149] Jia H, Murphey Y L, Shi J, *et al.* An intelligent real-time vision system for surface defect detection[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, August 26, 2004, Cambridge, UK. New York: IEEE, 2004: 239-242.
- [150] Akbar H, Suryana N, Akbar F. Surface defect detection and classification based on statistical filter and decision tree[J]. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 2013: 774-779.
- [151] Tang B, Kong J Y, Wu S Q. Review of surface defect detection based on machine vision[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(12): 1640-1663.  
汤勃, 孔建益, 伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述 [J]. *中国图象图形学报*, 2017, 22(12): 1640-1663.
- [152] Ravikumar S, Ramachandran K I, Sugumaran V. Machine learning approach for automated visual inspection of machine components[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(4): 3260-3266.
- [153] Weiss K, Khoshgoftaar T M, Wang D D. A survey of transfer learning[J]. *Journal of Big Data*, 2016, 3(1): 1-40.
- [154] Islam S M S, Rahman S, Dey E K. Application of deep learning to computer vision: a comprehensive study[C] // 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), May 13-14, 2016, Dhaka, Bangladesh, 2016: 592-597.
- [155] Wang J J, Ma Y L, Zhang L B, *et al.* Deep learning for smart manufacturing: methods and applications [J/OL]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018 [2018-05-12]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612518300037>. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.003.
- [156] Kamilaris A, Prenafeta-Boldú F X. Deep learning in agriculture: a survey[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 147: 70-90.
- [157] Khan S, Yairi T. A review on the application of deep learning in system health management[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 107: 241-265.
- [158] Nguyen V N, Jenssen R J, Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: a review of current status and the potential role of deep learning[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 99: 107-120.
- [159] Huang H W, Li Q T, Zhang D M. Deep learning based image recognition for crack and leakage defects of metro shield tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 77: 166-176.
- [160] Xing F Y, Xie Y P, Su H, *et al.* Deep learning in microscopy image analysis: a survey[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017: 1-19.
- [161] Krig S. Computer vision metrics, survey, taxonomy and analysis[M]. Berlin: Springer, 2016.
- [162] Li D. A tutorial survey of architectures, algorithms, and applications for deep learning [J]. *APSIPA Transactions on Signal & Information Processing*, 2014, 3(2): 1-29.
- [163] Park J K, Kwon B K, Park J H, *et al.* Machine learning-based imaging system for surface defect inspection [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2016, 3(3): 303-310.
- [164] Voulodimos A, Doulamis N, Doulamis A, *et al.* Deep learning for computer vision: a brief review[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2018, 2018: 1-13.
- [165] Ren R X, Hung T, Tan K C. A generic deep-learning-based approach for automated surface inspection [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(3): 929-940.
- [166] Król D, Nguyen N T, Shirai K. Advanced topics in intelligent information and database systems [M]. Berlin: Springer, 2017: 235-247.
- [167] Cha Y J, Choi W, Büyüköztürk O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(5): 361-378.



- [168] Atha D J, Jahanshahi M R. Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection [J]. Structural Health Monitoring: An International Journal, 2017: 1475921717737051.
- [169] Yu Z, Wu X, Gu X. Fully convolutional networks for surface defect inspection in industrial environment [C]//Liu M, Chen H, Vincze M. Computer Vision Systems. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2017, 10528: 417-426.
- [170] Ye R F, Pan C S, Chang M, *et al.* Intelligent defect classification system based on deep learning [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(3): 168781401876668.
- [171] Zhang M, Wu J L, Lin H F, *et al.* The application of one-class classifier based on CNN in image defect detection [J]. Procedia Computer Science, 2017, 114: 341-348.