

文章编号: 1005-0523(2010)06-0036-11

无损光电检测技术原理及应用

刘燕德, 郝 勇, 蔡丽君

(华东交通大学 光机电技术及应用研究所, 江西 南昌 330013)

摘要: 无损光电检测技术已被广泛应用于工业、农业及其他领域中。文章介绍了红外光谱、拉曼光谱、机器视觉、超声波、X 射线以及电子鼻和电子舌等 6 个方面的无损光电检测技术原理, 分析了无损光电检测技术的国内外研究现状、化学计量学实现算法和应用过程中要解决的关键技术, 在此基础上, 展望了无损光电检测技术的应用前景。

关 键 词: 光电技术; 无损检测; 工农业生产; 应用

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

在现代工农业生产中, 针对不同的研究对象选择适宜的无损光电检测技术已成为人们关注的焦点, 为了将无损光电检测技术更好地应用于工农业实际生产, 本文对无损光电检测技术原理及应用进行全面概述非常必要。

无损检测技术是随着高科技发展应运而生的一门新技术, 该技术不同于传统的物理化学分析方法, 它主要运用物理学方法如光学、电学和声学等手段对产品进行分析, 且不破坏样品, 在获取了样品信息时保证了样品的完整性, 无损检测技术检测速度较传统的物理化学方法迅速, 又能有效地判断出从外观无法得出的样品内部品质信息。随着计算机技术的迅速发展, 带动了化学计量学的发展, 极大地促进了无损检测技术在工农业生产中的广泛应用。

无损光电检测技术根据其分析对象的某些特征对热、声、光、电以及磁等的反应变化情况, 大致可分为红外光谱检测技术、拉曼光谱检测技术、机器视觉检测技术、超声波检测技术、X 射线检测技术以及电子鼻和电子舌检测技术等。根据不同的应用对象和用户场合可采用不同的无损光电检测技术和相应的检测装置来实现。

1 红外光谱无损检测技术

1.1 无损检测原理及装置

红外光谱(infrared spectroscopy)主要包括近红外光谱(NIR, near-infrared spectroscopy)和中红外光谱(MIR, mid-infrared spectroscopy)。近红外光谱是指波长在 $780 \sim 2\,526\text{ nm}$ 范围内的电磁波, 中红外光谱的波长范围为 $2\,500 \sim 50\,000\text{ nm}$ (见图 1)。近红外光谱检测技术具有快速、无损、无需样品前处理等优点, 广泛应用于含氢基团化合物的定性和定量分析^[1]。中红外光谱检测技术具有分辨率高、精密度高、光通量大、扫描速度快、可测波长范围宽以及样品用量少等特点, 广泛应用于有机化合物、高聚物结构研究以及分析鉴定等^[2]。

红外光谱区主要是有机分子含氢基团(C—H, N—H, O—H 等)的伸缩振动的各级倍频及其伸缩振动与弯曲振动的合频吸收, 几乎包括了有机物中所有含氢基团的信息, 包涵有分子的结构、组成状态等信息,

收稿日期: 2010-10-25

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAD96B04); 江西省主要学科学术带头人计划项目(2009DD00700); 江西省对外科技合作项目(2009BHB152000)

作者简介: 刘燕德(1967—), 女, 教授, 博士, 研究方向为光机电技术及应用。

信息量极为丰富。从而为红外光检测技术分析样品的物理性质(如物质的密度、粘度、粒度、硬度等)以及化学成分(如蛋白质、氨基酸、脂肪、淀粉、水分以及其它营养成分等)提供了可能。

朗伯比尔定律(the Lambert-Beer law)为红外光检测技术奠定了基础;样品组分的浓度值与通过仪器测量得到的光谱响应值之间具有一定的关联关系,即

$$A_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} b C \tag{1}$$

其中: A_{λ} 为样品在特定波长(或频率)的吸光度; ϵ_{λ} 为该样品的待测组分在该特定波长下的吸光系数; b 为光程; C 为该样品的待测组分的浓度值。对于特定物质, ϵ_{λ} 和 b 定义为常数,则可以求出浓度 C 和光谱响应值 A_{λ} 的关系。

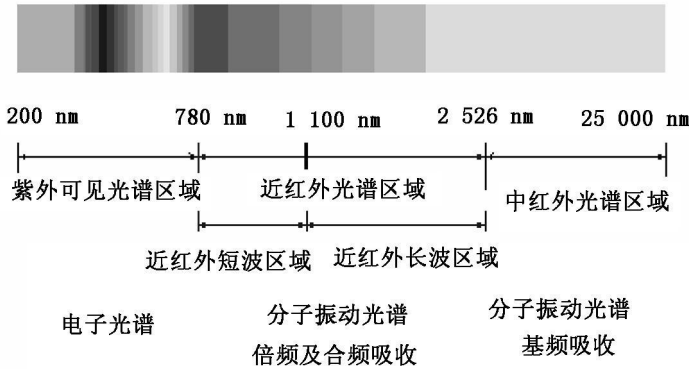


图 1 光谱分布区间

傅立叶变换红外光谱仪是目前红外光谱仪器中的主导产品,具有较高的分辨率和扫描速度,减少了对振动、温度和湿度的敏感性。此类仪器以迈克尔逊干涉仪为核心,如图 2。傅立叶变换型仪器的扫描速度快、波长精度高、分辨率好,由于短时间内即可进行多次扫描,使信号作累加处理,加之光能利用率高、输出能量大,因而仪器的信噪比和测定灵敏度较高,可对样品中的微量成分进行分析;傅里叶变换型红外光谱仪由于得到全波长的光谱信息,因此其定性和定量分析采用全光谱校正技术。这类仪器的弱点是由于干涉仪中动镜的存在,使仪器的在线长久可靠性受到一定的限制,另外,对仪器的使用和放置环境也有较高的要求。

1.2 国内外研究现状分析

目前,全世界多个国家和地区开展了 NIR 检测技术的研究和应用工作。它们都拥有各种研究型或商用型的 NIR 分析仪器和专门的研发机构,其应用已涉及到国民经济与生活的各个领域。在粮油方面已有研究型、专用型 NIR 分析仪和巡回用 NIR 分析车,以及直接安装在生产线的某个环节进行生产过程质量检验监控或产品分级。NIR 检测技术在分析农牧产品和食品中的蛋白质、水分、脂肪、纤维素、淀粉、氨基酸等营养成分方面已十分成熟,并在农业品质育种、农牧产品品质评价、储藏过程中的农产品安全检测、食品品质和加工过程监控中得到了广泛应用,NIR 检测技术的许多方法已成为 AOAC, AACC 和 ICC 的标准方法^[3]。Khanmohammadi 等^[4]采用近红外漫反射光谱技术结合人工神经网络估算纳米二氧化钛粒子的颗粒度,Oliveira dos Santos 等^[5]采用近红外漫反射光谱结合多元校正技术对纸张的聚合度进行了评价等。

中红外光谱检测技术具有多样化的采样方式,广泛应用于工农业生产。Wu 等^[6]利用中红外漫反射光谱结合主成分分析和 SIMCA 方法对不同海域的同一品种干海参样品进行了地域性的判别分析。Heise

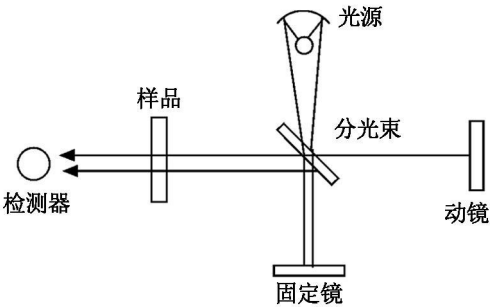


图 2 傅里叶变换型红外光谱检测仪原理图

等^[7]利用中红外漫反射光谱对纺织品中两种常用的助剂进行了定量分析。Viscarra Rossel 等^[8]利用中红外漫反射光谱对各种土壤性质同时进行了评价。Santosh Kumar Verma 等^[9]采用中红外漫反射光谱对土壤、沉积物和气溶胶中的硝酸盐进行了无损快速定量分析。Gregor Kos 等^[10]利用中红外光谱结合 ATR 技术对玉米中的镰胞真菌进行定量监测。

1.3 应用过程中要解决的关键问题及展望

由于大多数有机化合物和高聚物都有红外响应,对于组成复杂的化合物进行定性定量分析时,需要解决多组分中红外光谱相互重叠,影响分析精度等。近年来,随着分离技术的发展,为红外光谱的准确分析提供保障。毛细管电泳(capillary electrophoresis, CE)和液相色谱(liquid chromatography, LC)是两种最有效的分离技术,广泛应用于环境分析和生命科学领域,通过将 CE 和 LC 系统用于组分分离结合中红外光谱技术,实现分离组分的准确分析^[11-12]。

2 拉曼光谱无损检测技术

2.1 无损检测原理及装置

拉曼光谱(Raman Spectroscopy)检测技术是一门基于拉曼散射效应而发展起来的光谱分析技术,体现的是分子的振动或转动信息。拉曼光谱提供的是分子内部各种简正振动频率及有关振动能级的信息,与红外光谱产生的机制不同,拉曼光谱是由于分子极化率变化诱导产生,而红外光谱是由于分子偶极矩变化而产生。二者在分子结构的分析中相互补充。极性基团如 C=O, N-H 及 O-H 等具有很强的红外活性,而非极性基团如 C=C, C-C, N=N 及 S-S 等具有很强的拉曼活性。一些在红外光谱仪无法检测的信息在拉曼光谱中能很好地表现出来。拉曼光谱更适用于含水生物系统的在线分析。

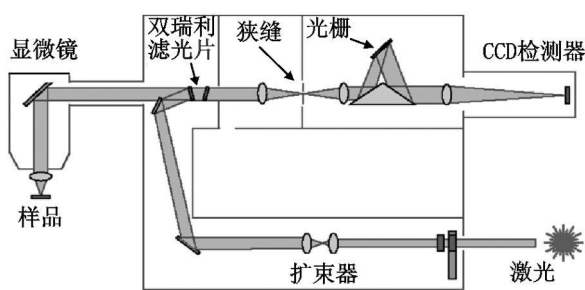


图3 拉曼光谱仪检测原理图

拉曼光谱仪检测原理如图3所示。拉曼光谱包含了谱线数目、位移大小和谱线强度等信息,这些信息与入射光的频率无关,只与被测物质的分子振动和转动能级有关,而每一种物质都有自己的特征拉曼光谱,因此通过所获得的拉曼光谱与数据库中的拉曼光谱进行比对,即可判定被测物质的组成。除此定性分析之外,还可根据光谱谱带的分析对被测物质进行结构分析,以及利用拉曼峰强度与被测物质浓度成正比的关系进行半定量分析。

2.2 国内外研究现状分析

由于拉曼光谱检测技术与常规化学分析技术相比,具有无损、快速、环保、无需制备试样、无需消耗化学试剂和所需样品量少等特点,并且随着激光光源的出现,其方向性强、单色性好、亮度高、相干性好等优点使得拉曼光谱检测技术已广泛应用于石油化工、生物医学、地质考古、刑事司法、宝石鉴定等诸多领域。Berg 等^[13]利用傅里叶变换拉曼光谱对聚乙烯塑料中的己二酸酯进行了分析。Healay 等^[14]利用拉曼光谱对橡胶及其结晶化程度进行了分析。El-Abassy 等^[15]利用拉曼光谱结合偏最小二乘回归对牛奶中的脂肪含量进行了定量分析,为牛奶的在线分析提供了有用的参考。Elbagerma 等^[16]采用拉曼光谱对 pH 滴定进行原位监控。

在过程分析方面,现代拉曼光谱技术已不仅仅局限于物质的静态研究,可实现动态过程的在线观察,比如高温高压状态下物质的分子间、分子内结构变化及晶形的转变,药物生产过程中的在线监测等。随着科学技术的进一步发展,拉曼技术的科研前景将越来越广阔^[17]。

2.3 应用过程中要解决的关键问题及展望

拉曼散射是光子与分子的相互作用,当激发光子的能量接近两个电子态之间的跃迁能量时,就会出现

共振拉曼或者共振荧光。因此, 需要解决共振效应(共振拉曼或共振荧光)问题。如果激发光子不能给分子提供足够的能量, 相应的产生荧光的跃迁将不能发生, 然而, 如果产生了荧光, 其强度将远远大于拉曼散射光, 从而会掩盖拉曼信号的特征。有时, 荧光还来自于被污染的样品中所存在的杂质, 或者来自于一种包裹物周围的本底物质。因此选择激发激光波长是避免荧光辐射一种行之有效的方法, 同时数据预处理方法也是一种消除荧光的有效方法^[18]。

激光拉曼光谱检测技术是研究分子结构最重要的光谱方法之一。然而, 常规拉曼光谱的信号强度很低, 限制了其在各个领域的应用。随着表面增强拉曼光谱(surface-enhanced raman scattering, SERS)技术的发展, 使拉曼光谱在分析应用方面突飞猛进^[19]。

3 机器视觉无损检测技术

3.1 无损检测原理及装置

机器视觉(machine vision, MV)又称为图像理解和图像分析, 是指由人类设计并在计算机环境下实现的模拟或再现与人类视觉有关的某些智能行为。机器视觉检测技术是多学科的交叉与结合, 它涉及到计算机、数学、光学、色度学、最优控制、人工智能、数学形态学、数字图像处理、模式识别、信息论、神经网络及遗传算法等诸多学科, 是当今世界上最为活跃的学科之一。机器视觉技术的研究范围包括图像采集、图像数字化、数字图像处理、数字图像分析的模式识别等内容。图像处理和分析是机器视觉的核心, 从逻辑上可分为三个阶段: 图像的预处理、特征提取、模式识别和理解^[20]。图像的预处理是将由成像设备获得的低质量数字图像(反差小、模糊、变形等)经过噪声过滤、平滑处理、图像增强等处理变成易于进行特征提取等后续操作的过程。图像特征提取就是从经过底层处理的图像中, 提取有利于图像识别和理解的主要特征量, 用有限的特征来描述原始图像中的目标, 图像的特征包括形状特征、纹理特征、结构特征、颜色特征和分形特征等。特征提取主要方法有区域分割、边缘检测和纹理分析等^[21]。

工业机器视觉应用系统包括光源、光学系统、图像捕捉系统、图像数字化模块、数字图像处理模块、智能判断决策模块和机械控制执行模块, 如图 4 所示。首先采用 CCD 相机或其它图像拍摄装置将目标转换成图像信号, 然后转变成数字化信号传送给专用的图像处理系统, 根据像素分布、亮度和颜色等信息进行各种运算来抽取目标的特征, 根据预设的容许度和其他条件输出判断结果。

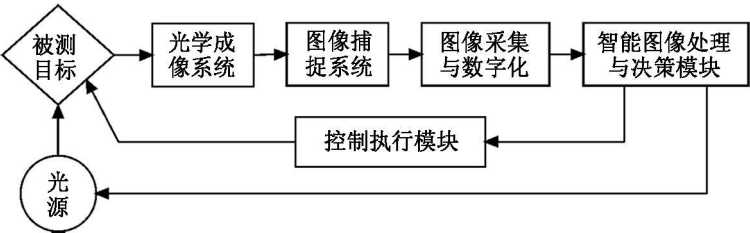


图 4 工业计算机视觉系统结构

在机器视觉系统的研究和应用中, 为了从采集的图像中获取对象的物理、统计以及动态等特性, 相关信息提取方法是非常重要的, 常用的机器视觉系统信息提取方法如图 5 所示。

3.2 国内外研究现状分析

机器视觉技术是 20 世纪 70 年代在遥感图像处理和医学图像处理技术成功应用的基础上, 随着图像处理技术的专业化、计算机成本的下降和速度的提高逐渐兴起的, 并已经广泛应用于各种领域, 如医学辅助诊断, 气象、资源调查, 灾害监测中的航拍和卫星图像的解释, 工业机器人的手眼系统, 工业产品外观检测与筛选及军事上的精确制导等。目前机器视觉在工业上的应用已经相当普遍与成熟, 而在农业上的应用相对滞后一些^[22-24]。

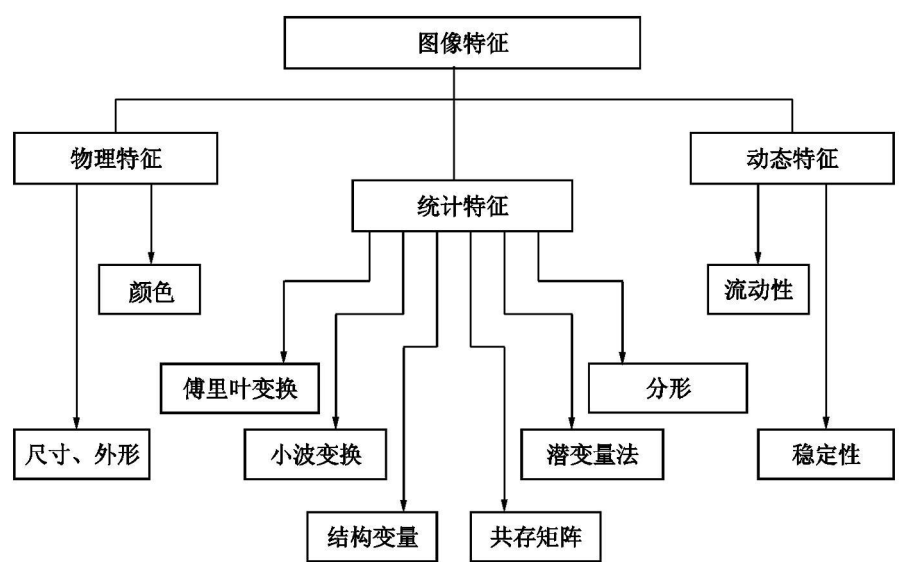


图 5 常用的机器视觉系统信息提取方法

3.3 应用过程中要解决的关键问题及展望

随着自动控制技术的发展,工况过程监控是制造业必不可少的环节,在现代机械制造行业,20%的停工检修都是由于机械故障造成的,从而导致生产能力下降和经济损失^[25]。

尽管机器视觉检测技术经过了多年发展,然而采用机器视觉技术实现全自动控制系统仍然面临很多问题——如何实现高分辨率图像的实时处理以及图像特征快速提取算法的编制。随着计算技术的发展,机器视觉检测技术正逐步发展为一种准确、实时、高效的检测技术。

4 超声波无损检测技术

4.1 无损检测原理及装置

超声波检测技术是一门以物理、电子、机械及材料学为基础,各行各业都要使用的通用技术之一,它是通过超声波的产生、传播及接收的物理过程完成。依照不同的应用领域,超声波检测装置也有所不同。超声波检测技术是工业无损检测技术中应用最为广泛的检测技术之一,也是无损检测领域中应用和研究最为活跃的技术之一。超声波测量的基本原理是利用介质的声学特征(如声速、衰减系数、声阻抗等)与某些待测的工业非声学量(如强度、弹性、硬度、密度、温度、粘度、浓度、流量、流速和厚度等)之间存在的函数关系或相关性,探索这些关系的规律,以便于通过测量这些声学量来测定那些工业非声学量。工业超声波检测常用的工作频率为 0.5~10 MHz,较高的频率主要用于细晶材料和高灵敏度的检测,而较低的频率则常用于衰减较大和粗晶材料的检测。超声波检测技术可单独使用,也可与其他无损光电检测技术联合使用,因而在工业生产中占有十分重要的地位,是不可替代的无损检测技术之一^[26-28]。

4.2 国内外研究现状分析

超声波检测技术广泛应用于工业(探伤、距离和厚度测量、流量和密度测量、超声清洗、超声焊接等)、农业(成熟度和内部损伤等)和以超声诊断专治为代表的医疗仪器及海洋探测(鱼群探测、深度测量、水中摄影等海洋测量用装置)等领域^[29-30]。

由于待测非声量与描述媒介声学特性物理量关系的多样性,可以充分地利用超声波的各种特性来研制超声波传感器,配合不同的信号处理与显示电路完成许多带测量的检测工作。目前各种超声波仪器和装置已经广泛应用在工业、农业、通信、医疗等许多行业中^[31],超声波检测技术的应用如表 1 所示。

表 1 超声波技术的应用

用途		备注	用途		备注
工 业	金属材料及部分非金属材料 的探伤	各种制造业	海 洋	鱼群探测	
	测量金属和非金属材料的 厚度	板材管材		深度探测	
	超声振动切削加工	钟表业、精密仪表、 轴承		声纳	
	超声波清洗零件	半导体器件生产	通 信	水中摄影	
	超声波焊接			定向通信	
农 业	超声波流量计	化工、石油、轻工、污 水处理	医 疗	超声波诊断仪	断层图像
	成熟度	农产品		超声波胎儿状态检测仪	
	内部缺陷	农畜产品			
	异物检测	畜产品		超声波洁牙器	

4.3 应用过程中要解决的关键问题和研究展望

在超声波检测中,波谱分析方法的应用是必不可少的。因此,如何实现超声波谱图信息的有效提取是关键,常用的算法功能主要包括:峰位检测、基于物料性质的距离测算、波形校正和统计、快速傅里叶变换以及小波变换用于滤波等^[32]。为了将超声波检测方法用于各行各业,相应的谱图信息提取和模型优化软件仍需进行研究。

5 X 射线无损检测技术

5.1 无损检测原理及装置

X 射线是一种类似于光、热和无线电波的电磁辐射波,它的特点是波长短(工业 X 射线探伤中常用的波长范围约在 0.1~0.001 nm 之间)。由于辐射物质的波长越短,它穿透物质的能力也愈大,所以 X 射线具有极大的穿透物质的能力,正是利用这一特性进行 X 射线检测^[33]。

全反射 X 射线是利用 X 射线束的掠入射光速进行检测,其检测系统组成如图 6 所示^[31]。与传统的 X 射线光谱相比,全反射 X 射线光谱具有以下突出特点:(1) 具有更好的表面响应灵敏度;(2) 更低的非弹性散射背景;(3) 具有更好的信号强度;(4) 利用 X 射线的驻波实现多层分析。

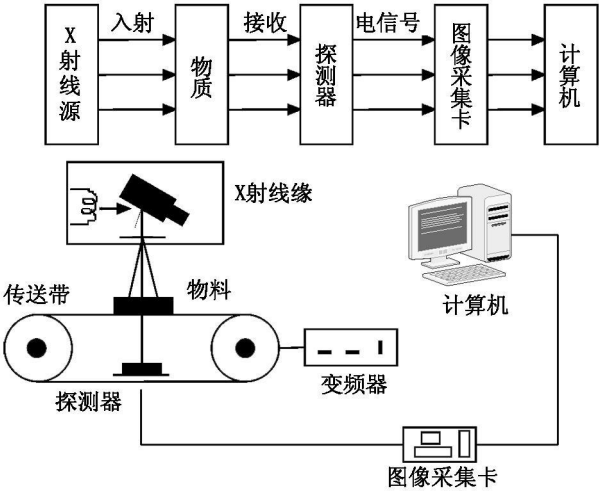


图 6 X 射线检测系统组成示意图

按照全反射 X 射线光谱产生的特殊光学机理,X 射线检测仅需要很少的样品量,从而可以极大地克服检测过程的基体效应^[34-35]。如果待检测元素间不存在相互作用,那么所有的离子都可以同时被检测并进

行定量分析。

在均匀介质中,多种元素同时定量分析公式如式(2)所示:

$$C_x = \frac{I_x/S_x}{I_{\text{int}}/S_{\text{int}}} \cdot \frac{m_{\text{int}}}{m_{\text{sample}}} \quad (2)$$

其中: C 是质量分数; I 是荧光的强度; S 是相对强度; x 是待测元素; int 是添加的内标元素; m 是质量。如果待测元素的质量未知,可采用相对质量分数进行计算:

$$C_x = \frac{I_x/S_x}{\sum_i I_i/S_i} \cdot 100\% \quad (3)$$

其中: i 为待测的所有元素。对于非均匀分布的介质,由于基体效应的存在影响定量分析,需采用数据处理方法进行校正。

5.2 国内外研究现状分析

X 射线检测技术是研究内部物理结构的重要方法之一。X 射线具有极强的穿透能力,其图像灰度值与材料、厚度和内部结构密切相关,因此 X 射线作为无损检测技术被广泛用于工业探伤、农产品检测、医学、航空航天、国防、造船和林业等众多领域。

曾祥照等^[36]在“气瓶钢焊缝 X 射线实时成像检测研究”课题中,对焊缝缺陷的定位、定量和定级通过计算机来完成,而定性则用人工方式来识别。课题组从对比试验开始,逐渐了解气瓶钢焊缝缺陷的个性特征。试验挑选 50 个有各种缺陷的钢瓶,分别对焊缝进行 X 射线照相和 X 射线实时成像检测。将在 X 射线照相底片中得到的焊缝缺陷信息与 X 射线实时成像检测图像对比,逐渐建立起图像评定人员对缺陷图像识别的感性认识,再综合上升到理性认识。统计结果表明:图像与底片识别的相符率达 90 % 以上。孙丽娜等^[37]对 X 射线探测违禁品的几种方法做了总结,阐述了单能量法、双能量法、双视角、CT 及散射法的探测原理及优缺点,最后对安检技术的未来发展趋势进行了预测。Neethirajan 等^[38]应用 X 射线图像技术,检测小麦种子是否发芽,无损评价麦种品质。Haff 等^[39]以圆形为分析对象,提出了获取平滑农产品 X 射线图像的方法。Karunakaran 等^[40]对 X 射线图像和近红外光谱判别谷物虫害损伤的结果进行了比较,结果表明 X 射线图像适合检测损伤存在与否,而近红外光谱适合检测不同损伤的种类。

5.3 应用过程中要解决的关键问题及展望

随着样品预处理方法和校正技术的发展,全反射 X 射线光谱技术逐步趋于痕量和超痕量检测。首先,可直接用于水或酸溶液样品中多种元素的同时测定,通过与其它分离方法结合,实现多元素的准确分析。其次,可用于粉末样品的分析,如颜料、油漆以及空气中的颗粒物、环境分析以及考古研究等。第三方面的应用是进行金属损伤检测,然而,由于金属合金中金属的损伤差异较大,无法实现重复采样,导致平行分析误差较大,需采用一定的样品预处理方法进行前处理。

全反射 X 射线光谱检测技术,一个重要的应用领域是进行表面分析,该技术的优点是仅直接在很小的表面就可以进行分析,而且不会损伤样品,样品不经预处理直接测定检测限可达到 pg 级别,与在真空中离子色谱法测量的结果相当^[41]。

6 电子鼻和电子舌无损检测技术

6.1 无损检测原理及装置

随着阵列气体和液体传感器的发展,基于生物系统机理的电子鼻(electronic noses)和电子舌(electronic tongues)也取得了巨大的发展。电子鼻和电子舌实际上是基于化学传感器阵列和模式识别方法的气体 and 液体多传感器系统。广义上,电子鼻和电子舌主要由四部分组成^[42],如图 7 所示。

近几年,关于电子鼻应用的报道较多,主要集中于食品、环境、农业、医药行业以及汽车工业等,其中在食品中的应用最为广泛。电子鼻的定义源于其检测原理类似于哺乳动物的嗅觉系统。在嗅觉系统中,众多的神经元将获取的香气成分信息转换为生物电信号传送给大脑,通过大脑记忆的帮助,进一步将获取的

信息进行识别和分类。在电子鼻检测系统中,分析操作是基于一组具有半选择性的传感器之间相互交叉作用实现的,因此相似的香气成分具有相似的传感响应结果;而不同的香气成分,其传感响应也不同。正如嗅觉系统一样,电子鼻的传感器不需要专门设计,只需要对新的识别模式进行训练和存储^[43]。

6.2 国内外研究现状分析

人类主要通过嗅觉与味觉系统来辨别食品的好坏与新鲜程度,因此,电子鼻与电子舌在食品检测中有其自身的应用价值。

在食品生产过程中,产品质量的控制以及生产过程(如混合、加热、干燥、烘烤、发酵等)的监控都是通过测量生产过程中原料的理化参数的变化来实现,主要包括:pH值、颜色以及特定组分的浓度等。而对于反映产品质量和稳定性的香气成分指标的检测开展较少,主要是因为缺少可靠的香气成分评价仪器和切实可行的连续香气成分监控的专家小组。电子鼻的产生为过程香气成分的监控提供了可能。与传统的人工评判方法相比,电子鼻可以实现香气成分准确、客观以及稳定的评价^[44]。

传统鱼肉新鲜度评价可以通过电流计生物传感器来测定胺或用酶反应来测定。这些方法在实际检测中采用不是很合适。Connell等^[45]采用11个费加罗公司生产涂锡金属氧化物传感器阵列构成的电子鼻系统来评价和分析阿根廷鳕鱼肉的新鲜度。从同一个市场得到新鲜的阿根廷鳕鱼肉后,切成20—60 g不同质量的鱼片,放入冰箱内贮藏。每次实验都从冰箱内取样品进行分析,他们探讨了贮藏天数、样品质量对鱼肉新鲜度的影响。研究结果表明电子鼻可以区分不同贮藏天数的鱼肉,不同质量的鱼肉样品对电子鼻评价其新鲜度影响无关。

Benady等^[46]发明了一种水果成熟的传感器,根据挥发的气味或是没有气味的电子感应。传感器中利用了气体探测半导体,一个小帽子被安置在水果的表面上,成熟水果的气味散发出来被帽子积累,引起了传感器传导率的改变,然后通过计算机数据系统进行计算。在实验室测试时,判断出成熟或未成熟的功率为90%以上。分为3组(未成熟、半成熟、成熟),成功率是83%。

在电子舌的发展上,味觉传感器也已经能够很容易区分几种饮料,比如咖啡、离子饮料等。Larisa Lvo-va等^[47]研究电子舌在茶叶滋味分析中的运用。他们首先研究了电子舌区分常见饮料的能力。他们对立顿红茶、4种韩国产的绿茶和咖啡的研究表明:采用PCA分析方法的电子舌技术可以很好地区分红茶、绿茶和咖啡,并且也能很好地区分不同品种的绿茶。

米酒的品质评价主要基于口感、香气和颜色这3个因素。而对于口感的评价是这三者中最难做到的。Satoru Iiyama等^[48]利用味觉传感器和葡萄糖传感器对日本米酒的品质进行检测,这个味觉传感器阵列由8个类脂膜电极组成,利用主成分分析法进行模式识别和降维功能,最后显示出两维的信号图,分别代表了滴定酸度和糖度含量。从模式识别分析上看:电子舌的通道输出值与滴定酸度、糖度之间具有很大的相关性,由此,对米酒的甜度预测作出了数学模型。

6.3 应用过程中要解决的关键问题及展望

由于电子鼻和电子舌系统都是开放系统,使得多种传感技术联合使用成为可能,从而可以获得待测组分的互补信息。近几年,将电子鼻和电子舌系统联合使用也被广大学者所推崇,结果表明每一个子系统都可以单独实现不同样品的辨识,通过数据融合方法,可以提高识别精度。

对于在多传感分析系统电子鼻和电子舌的应用过程中,传感器的选择和传感数据的后续处理是该技术应用的關鍵。传感信号的稳定性和重现性是保证准确分析的前提,信号处理方法的应用同样是必不可

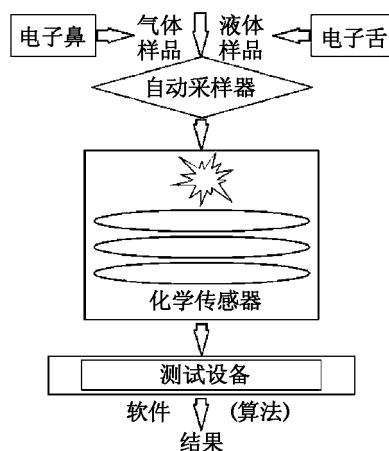


图7 电子鼻和电子舌的主要组成部件

少的。常用的信号处理方法主要包括模式识别方法(主要包括主成分分析和人工神经网络)和多元校正方法(主要包括人工神经网络和偏最小二乘回归),这些方法都可以实现多源信息的综合分析。

7 结束语

无损光电检测技术可以在不破坏被测对象的前提下完成产品的检测任务,因此已深入到日常生活的各个方面。然而无损光电检测技术也不能完全取代破坏性试验,有时需要采用破坏性检测方法对无损检测的结果进行验证和对比。在工农业生产中,可以根据检测对象和检测要求选择合适的无损光电检测技术,才能有效达到检测目的,每种无损光电检测技术有其自身的优点和局限性,对检测重要设备或高检测要求的场合,往往要求采用多种无损光电检测技术完成检测任务,以发挥各自的优点,达到全面检测的目的。

随着计算技术、信号处理技术和信号计量方法的不断发展,各种检测方法产生的多维谱图信息提取技术将会得到进一步发展,从而为无损光电检测技术的应用提供了良好的软件支持。

参考文献:

- [1] STORME PARIS I, REBIERE H, MATOGA M, CIVADE C, et al. Challenging near infrared spectroscopy discriminating ability for counterfeit pharmaceuticals detection[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 658(2): 163-174.
- [2] CHENG HONGFEI, YANG JING, LIU QINFU, et al. A spectroscopic comparison of selected Chinese kaolinite, coal bearing kaolinite and halloysite—A mid-infrared and near-infrared study[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2010, 77(4): 856-861.
- [3] 孙通, 徐惠荣, 应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 122-126.
- [4] KHANMOHAMMADI M, GARMARUDI A B, GHASEMI K, et al. Artificial neural network for quantitative determination of total protein in yogurt by infrared spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2009, 91(1): 47-52.
- [5] OLIVEIRA DOS SANTOS E, MONTEIRO SANTANA SILVA A, DUARTE FRAGOSO W, et al. Determination of degree of polymerization of insulating paper using near infrared spectroscopy and multivariate calibration[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2010, 52(2): 154-157.
- [6] WU ZHONGCHEN, TAO LIN, ZHANG PENGYAN, et al. Diffuse reflectance mid-infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFTS) for rapid identification of dried sea cucumber products from different geographical areas[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2010, 53(2): 222-226.
- [7] HEISE H M, KUCKUK R, BERECK A, et al. Mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy of textiles containing finishing auxiliaries[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2004, 35(2): 213-218.
- [8] VISCARRA ROSSEL R A, WALVOORT D J J, MCBRATNEY A B, et al. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties[J]. *Geoderma*, 2006, 131(1): 59-75.
- [9] SANTOSH KUMAR VERMA, MANAS KANTI DEB. Nondestructive and rapid determination of nitrate in soil, dry deposits and aerosol samples using KBr-matrix with diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (DRIFTS)[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 582(2): 382-389.
- [10] GREGOR KOS, HANS LOHNINGER, RUDOLF KRSKA. Fourier transform mid-infrared spectroscopy with attenuated total reflection (FT-IR/ATR) as a tool for the detection of Fusarium fungi on maize[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2002, 29(1): 115-119.
- [11] RICHARD VONACH, BERNHARD LENDL, ROBERT KELLNER. Hyphenation of Ion exchange high-performance liquid chromatography with fourier transform infrared detection for the determination of sugars in nonalcoholic beverages[J]. *Analytical Chemistry*, 1997, 69(20): 4286-4290.
- [12] KULIGOWSKI J, QUINTAS G, DE LA GUARDIA M, LENDL B. Analytical potential of mid infrared detection in capillary electrophoresis and liquid chromatography: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 679(1): 31-42.
- [13] BERG R W, AMALIA DOPAZO OTERO. Analysis of adipate ester contents in poly(vinyl chloride) plastics by means of FT-Raman spectroscopy[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, 42(2): 222-225.
- [14] HEALEY A M, HENDRA P J, WEST Y D. A Fourier transform Raman study of the strain-induced crystallization and cold crystalliza-

- tion of natural rubber[J]. *Polymer*, 1996, 37(18): 4 009-4 024.
- [15] EI-ABASSY R M, ERAVUCHIRA P J, DONFACK P, et al. Fast determination of milk fat content using Raman spectroscopy[EB/OL]. *Vibrational Spectroscopy*, 2010, [2010-10-25]. <http://doi:10.1016/j.vibspec.2010.07.001>.
- [16] ELBAGERMA M A, CHOLAMHASSAN AZIMI, EDWARDS H G M, et al. In situ monitoring of pH titration by Raman spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2010, 75(5): 1 403-1 410.
- [17] 张雁, 尹利辉, 冯芳. 拉曼光谱分析法德应用介绍[J]. *药物分析杂志*, 2009, 29(7): 1 236-1 241.
- [18] 施玉珍, 陈志春, 林贤福. 拉曼光谱与红外光谱无损检测技术新进展[J]. *分析化学*, 2005, 33(2): 272-276.
- [19] 徐燕慧, 崔颜, 刘必聚, 任斌, 石巍. 干净、均一的表面增强拉曼基地的制备和表征[J]. *光散射学报*, 2009, 4(21): 295-299.
- [20] 刘焕军. 应用视觉技术的液体质量智能检测系统研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(24): 26-29.
- [21] 李国辉, 苏真伟, 夏心怡. 基于不规则成像机器视觉的棉花白色异纤检测算法[J]. *农业机械学报*, 2010, 24(5): 164-167.
- [22] ALDRICH C, MARAIS C, SHEAN B J, CILLIERS J J. Online monitoring and control of forth flotation systems with machine vision: A review[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 96(1): 1-13.
- [23] 刘金桥, 吴金强. 机器视觉系统发展及其应用[J]. *机械工程与自动化*, 2010(1): 215-216.
- [24] ANDRZEJ SLUZEK. Novel machine vision methods for outdoor and built environments[J]. *Automation in Construction*, 2010, 19(3): 291-301.
- [25] KURADA S, BRADLEY C. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring[J]. *Computers in Industry*, 1997, 34(1): 55-72.
- [26] IRENE ARIAS, JAN D ACHENBACH. A model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks by the scanning laser source technique[J]. *Wave Motion*, 2004, 39(1): 61-75.
- [27] ELVIRA L, SAMPEDRO L, MATE SANZ J, et al. Non-invasive and non-destructive ultrasonic technique for the detection of microbial contamination in packed UHT milk[J]. *Food Research International*, 2005, 38(6): 631-638.
- [28] ABDESSALEM BENAMMAR, REDOUANE DRAI, ABDERREZAK GUESSOUM. Detection of delamination defects in CFRP materials using ultrasonic signal processing[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(8): 731-738.
- [29] ORAZIO T D, LEO M, DISTANTE A, et al. Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials[J]. *NDT & E International*, 2008, 41(2): 145-154.
- [30] ZHANG JIE, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays; the multi-mode total focusing method[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(2): 123-133.
- [31] 刘燕德. 无损智能检测技术及应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 171.
- [32] RUIZ REYES N, VERA CANDEAS P, CURPIAN ALONSO J, et al. New matching pursuit-based algorithm for SNR improvement in ultrasonic NDT[J]. *NDT & E International*, 2005, 38(6): 453-458.
- [33] ALES VON B. Total reflection X-ray fluorescence and grazing incidence X-ray spectrometry tools for micro- and surface analysis: a review[J]. *Spectrochimica Acta: Part B*, 2009, 64(9): 821-832.
- [34] DE BOER D K G. Glancing-incidence X-ray fluorescence of layered materials[J]. *Phys Rev B*, 1991, 44(2): 498-511.
- [35] FERNANDO R, ESPINOZA QUIÑONES, APARECIDO N MÓDENES, et al. Application of high resolution X-ray emission spectroscopy on the study of Cr ion adsorption by activated carbon[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2010, 68(12): 2208-2213.
- [36] 曾祥照. 浅谈对 X 射线实时成像图像的识别[J]. *无损检测*, 2005, 27(1): 41-42.
- [37] 孙丽娜, 原培新. X 射线安检设备中探测技术研究[J]. *中国测试技术*, 2006, 32(3): 20-23.
- [38] NEETHIRAJAN S, JAYAS D S, WHITE N D G. Detection of sprouted wheat kernels using soft X-ray image analysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 8(13): 509-513.
- [39] HAFF R P. Obtaining flat X-ray images from round objects[J]. *ASAE ASABE*, 2007.
- [40] CHITHRA KARUNAKARAN, JITENDRA PALIWAL, DIGVIR S JAYAS, et al. Comparison of soft X-rays and NIR spectroscopy to detect insect infestations in grain[C]// *ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE Tampa Convention Center Tampa, USA Florida*; 2005.
- [41] JUN KAWAI. Total reflection X-ray photoelectron spectroscopy: a review[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2010, 178(1): 268-272.

- [42] AMPUERO S, BOSSET J O. The electronic nose applied to dairy products: a review[J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 94(1): 1-12.
- [43] CHRISTINA KRANTZ RULCKER, MARIA STENBERG, FREDRIK WINQUISTT, et al. Electronic tongues for environmental monitoring based on sensor arrays and pattern recognition: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 426(2): 217-226.
- [44] LAURA ESCUDER GILABERT, MIGUEL PERIS. Review: highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 665(1): 15-25.
- [45] MANUELA O'CONNELL, GABRIEL VALDORA, GUSTAVO PELTZER. A practical approach for fish freshness determinations using a portable electronic nose[J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 80(2): 149-154.
- [46] BENADY M, SIMON J E, CHARLES D J, et al. Fruit ripeness determination by electronic sensing of aromatic volatiles[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(1): 251-257.
- [47] LARISA LVOVA, ANDREY LEGIN, YURI VLASOV, et al. Multicomponent analysis of Korean green tea by means of disposable all-solid-state potentiometric electronic tongue microsystem[J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 95(3): 391-399.
- [48] SATORU IYAMA. Application of taste sensor to the study on taste qualities other than basic tastes[J]. *Japanese Sensor Newsletter*, 1996, 10(3): 28-33.

Principle and Application of Opto-electronics Non-destructive Testing Technology

Liu Yande, Hao Yong, Cai Lijun

(Institute of Opto-mechatronics Technology and Application, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Opto-electronics non-destructive testing technology is widely used and plays an important role in the fields of industry, agriculture and other fields. This paper introduces the opto-electronics non-destructive testing principles of infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, machine vision, ultrasonic testing technology, X-ray technology, electronic noses and tongues. The research status at home and abroad, chemometrics algorithm and the existing problems of these six testing technologies are discussed. Then, the developing trend of opto-electronics non-destructive testing technology is proposed.

Key words: opto-electronics; non-destructive testing; agriculture and industry; application

(责任编辑 刘棉玲)