涂装漆膜缺陷自动检测技术的缺陷识别率影响因素分析

张艳芬　李飞　郭家　王云飞

吉利汽车集团有限公司

摘要：汽车涂装质量控制中，颗粒等缺陷主要靠工作人员目视识别，受人的因素影响较大，如人眼疲劳时，缺陷容易流入下道工序。缺陷自动检测技术主要用于替代人对漆膜外观缺陷进行识别。本文主要对自动缺陷识别技术及缺陷识别率影响因素进行讨论及分析。

关键词：涂装漆膜缺陷检测；相位偏折法（PDM）；算法

0　前言

在汽车涂装生产过程中，由于喷涂环境等因素的影响，涂层可能会产生颗粒等缺陷，目前主要靠工作人员目视识别。由于人员作业过程中，存在视觉疲劳等不可控因素，缺陷容易流入下道工序，造成不合格品流出。

采用视觉技术自动检测漆膜缺陷的技术，可以替代人员对漆膜外观缺陷进行识别，降低不可控因素的发生概率，降低不合格品的流出率。本文通过分析缺陷检测设备的工作原理，对自动识别技术及缺陷识别率影响因素进行讨论及分析，为生产线规划及设备选型时提供一定的依据。

1　视觉技术的应用现状

随着人工智能的发展，视觉技术已成为实现工业自动化和智能化的关键核心技术，在手机摄像头、3D人脸识别、三维场景重建、车载激光雷达及无人机等方面均有应用。

根据汽车行业的应用场景，视觉检测技术主要具备测量、引导、检测以及识别四大功能（图1）。其中，焊装车间的在线测量、质保间的蓝光检测等，主要采用结构光视觉实现测量功能；冲压车间的自动装箱、焊装车间的视觉抓件、涂装车间的车身定位以及总装车间的风窗玻璃自动安装等，主要采用多目视觉实现引导功能；焊装车间的涂胶、焊缝检测以及涂装车间的漆面检测主要实现视觉的检测功能；物流领域读码作业、焊装钢印识别等主要实现视觉的识别功能等。目前，视觉检测技术已经在汽车行业各专业有广泛应用，其中，涂装车间的漆面检测作为代替人眼识别漆面缺陷的技术，在国内已有多个案例，可以有效代替人眼作业，

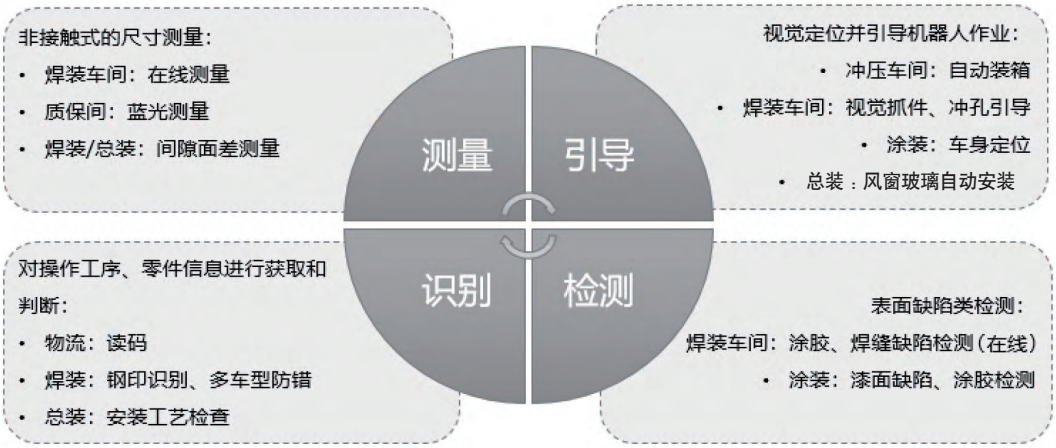

图1　视觉检测技术的四大功能

减少因人员视觉疲劳因素引起的缺陷流出。

2 视觉技术检测缺陷的原理

根据图像处理系统的不同以及光源的不同等，汽车行业应用的视觉技术主要有图像融合技术、相位偏折技术以及深度检测技术。在汽车涂装漆膜缺陷检测领域，主要应用的技术为图像融合技术以及相位偏折技术。本文重点以相位偏折技术为例阐述其原理。

相位偏折技术是将光源投射到待测面上，利用反射图像相位在待测面微小变化敏感特点，根据相位解析及重建算法实现三维形貌及缺陷检测，如图 2 所示。

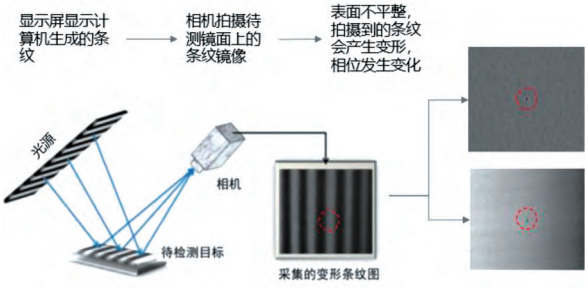

图 2 相位偏折技术

由于此技术需要根据光的折射来采集图片信息，因此，只适用于镜面或类镜面。对于汽车涂装各涂层，电泳涂层及中涂层光泽度低，不适用于此方法检测缺陷；面漆层高光泽度及其镜面效果，适用于此法对缺陷进行检测及筛查。

与电磁波、光波和声波信号一样，相位解析法是将图片当作一种信号处理。经过傅里叶变换成正弦波曲线后，通过识别相位的变换，进而识别曲线的变化，以实现缺陷的有效识别。此转换过程涉及模拟量信号以及数字量信号的相互转换，此为视觉检测技术中，算法工程师的主要工作。

图 3 为图片转换为数字量信号的示意，从左到右分别为：某图片、该图片转换成信号示意图、该信号经傅里叶分布后的正弦图之一及该正弦图转换为数字量信号。

3 缺陷识别率的影响因素识别及筛选

无论哪种形式的缺陷检测，均由三大部分组成：①光学系统（含传感器），如相机、透镜及光源等；②图像处理系统，含图像处理库等；③软件及人机界面。其中，硬件部分保证了缺陷的获取，软件及算法对图像

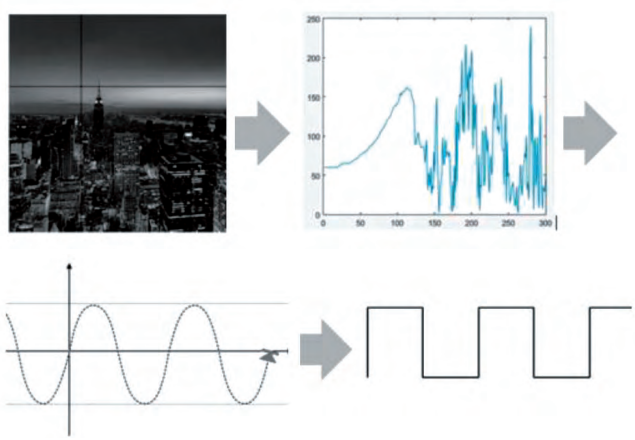

图 3 图片转换为数字量信号

进行重建，以确保缺陷的有效识别。

通过对相位偏折法（PDM）原理的分析及了解，结合系统的组成，可以看出，影响汽车涂层缺陷识别效果的因素主要有几下几点：

（1）涂层及缺陷的种类。根据相位偏折法的原理可以看出，非镜面或类镜面的涂层上的缺陷无法检出。可以检出的缺陷是需要引起光线形变的缺陷，因此，涂装的橘皮、打磨抛光痕等无法检出。

（2）光源的选择。根据相位偏折法，显示屏需对漆面进行条纹类光线的投影，采用散射光源，由于其具有多个方向的入射角，可让传感器捕捉到多角度反射光，用于相位偏折的分析及计算依据。一般地，主要采用 LED 屏或 LCD 屏，或两者相结合。无法采用激光等单一光源。

（3）产品造型的影响。相位偏折法适用于平面的缺陷检测，对于汽车车身，由于其棱线部位无法构成平面效果，因此，一般地，如果颗粒等缺陷刚好在车身棱线部分，则其检出概率较低。

（4）算法。算法在视觉技术系统的作用类似于人类的大脑，因此，缺陷检测效果的识别率和算法强相关。逻辑完善的算法，可以确保检出率 >95%，漏检率 <2%，同时具备良好的缺陷分类能力，分类准确率 >90%。

（5）相机与光源的相对位置。由于系统需要捕捉光源投射到被测面上的影响，根据光的折射以及散射原理可知，光源与相机的相对位置及角度影响合理设计的情况下，可以有效捕捉到相关反射光线，积累样本量。因此，图像重建流程中，需要对光源及相机的位置关系进行确定及标定，保证相机对于光源的有效捕捉，如图 4 所示。

（下转第 55 页）

陷位置图及缺陷放大图。

出现“针孔”缺陷时，视情节严重程度进行不同的补救措施，情况较轻时，可通过简单的抛光修饰进行弱化消除；情况严重时，则必须离线返修打磨后重新喷涂进行消除，不管是哪种补救措施，均带来作业工时和返修材料单耗的增加，影响交车效率，所以，针对“针孔”缺陷必须成立专项课题进行研究解决。

针对脱水率造成“针孔”缺陷的问题，从“人机料法环”五大方面进行分析。首先，人作为内板喷漆作业的执行者，因技能熟练程度和作业手法的不同，不同班次出现“针孔”的概率存在较大的差异；其次，闪干炉作为脱水率的功能单位，“脱水五要素”关键参数起着至关重要的作用；材料本身特性同样是影响脱水率的关键因素，水性溶剂挥发速率和表面慢干程度对“针孔”的减少有明显的缓解作用；水性面漆一般按照两遍成膜的方法进行施工，两遍成膜的膜厚比例同样是影响脱水率的重要因素；施工环境作为不可忽视的因素，温湿度参数及空气含水量也会造成脱水率的波动，从而造成“针孔”质量缺陷的产生。表 2 为“人机料法环”调整后“针孔”出现频率的趋势变化。

表 2 “人机料法环”调整后“针孔”出现频率的趋势变化

序号	影响因素	调整前	调整后	针孔变化趋势	备注
1	人	不熟练	熟练	↘	
2	机	一段温度 60 ℃ 二段温室 85 ℃	一段温度 75 ℃ 二段温室 85 ℃	↘	
3	料	不添加 03 溶剂	添加 1.6% 03 溶剂	↘	
4	法	分层比例 5∶5 色漆膜厚 25 μm	分层比例 6∶4 色漆膜厚 21 μm	↘	
5	环	温度 23 ℃ 相对湿度 65% 空气含水量 12 g/kg	温度 23 ℃ 相对湿度 65% 空气含水量 10 g/kg	↘	

4 结语

水性漆的应用虽然已经相对成熟，而且漆膜防腐性能优于溶剂型油漆，但是水性漆对施工条件的敏感性缺点同样不容忽视，水分烘干作为水性漆施工工艺中的关键环节需要重点关注，否则作为水性色漆和溶剂型清漆结合的中间环节，任何一个参数的波动都会对产品质量带来批量性的影响。

（上接第 51 页）

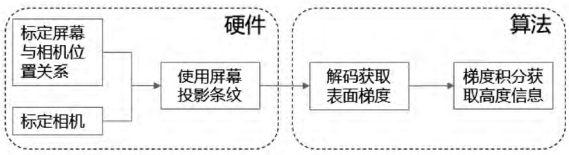

图 4 相机与光源的相对位置

4 涂装缺陷检测应用形式及未来展望

目前，在汽车 / 保险杠行业应用的漆膜检测技术的应用形式主要有两种：一种是机器人 + 视觉 + 光源；第二种是隧道钢构 + 视觉 + 光源。

其中，机器人 + 视觉 + 光源的组合形式，由于机器人动作的灵活性，可应用于车身及保险杠。此种检测方式不受车型限制，可调整机器人轨迹，根据车型外观仿形，以尽可能地保证缺陷的识别率及检出率。由于每个视觉头检测能力有一定的范围，因此，需根据车型大小以及生产线节拍等，配置不同数量的机器人及检测头。一般地，对于 30 JPH 的生产线，需要配置 2 ~ 4 台机器人才能满足此节拍下的检测需求，可适用于走停式或连续式输送线。

对于隧道钢构 + 视觉 + 光源的缺陷检测方式，分为车身检测以及尾门检测，其中，车身检测适用于走停式或连续式输送线，尾门检测受检测时间影响，建议采用走停式。此检测方式在最大车身通过范围内，同样不受车型限制，适用于所有车型。但相机的数量及布局，在前期规划时需尽可能地考虑产线上所有车型的特点，以保证一定的缺陷检出率。

此两种形式均在国内外有相关应用案例。部分案例中，还增加了缺陷自动标记、缺陷打磨等设备，实现车身外板的缺陷自动识别及自动处理。

视觉技术的进步、算法的日趋完善以及工业应用的日益增多，此三者相辅相成，可以推进算法逻辑的日趋完善，进而推动视觉技术的进步，有助于视觉技术更好地为工业自动化和智能化服务。

参考文献：

[1] 李大海，王瑞阳，张新伟．基于位相测量偏折术的高精度检测平面光学元件面形的方法 [J]．应用光学，2020, 41(4): 844-856.

[2] 朱正德．谈“机器视觉”在汽车制造业中的应用 [J]．中国测试技术，2006, 32(5): 22-25.