

引文格式: 刘芳, 夏桂锁, 温志辉, 等. 飞机蒙皮缺陷检测的现状与展望 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(23/24): 39-50.

LIU Fang, XIA Guisuo, WEN Zhihui, et al. Current status and prospect of defect detection of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 39-50.

# 飞机蒙皮缺陷检测的现状与展望\*

刘芳<sup>1</sup>, 夏桂锁<sup>1</sup>, 温志辉<sup>1</sup>, 李喆<sup>2</sup>, 徐奇林<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 飞机蒙皮在装配中会形成接缝处间隙与阶差的不均匀, 在服役过程中会产生凹痕、裂纹、腐蚀等缺陷, 这些问题使蒙皮强度降低, 承载能力下降, 影响飞机的气动性能, 危及飞行安全。针对飞机蒙皮缺陷的检测工作在飞机检修中占比很大, 也是飞机安全性的重要保证。介绍了飞机蒙皮常见的 7 种缺陷, 并分析了其产生的原因、位置以及危害; 根据缺陷所产生的位置, 将其分为三大类, 系统地阐述了针对蒙皮缺陷的各类检测技术的发展现状; 对飞机蒙皮检测技术的现状进行总结, 并对蒙皮缺陷检测的发展前景进行了展望。

关键词: 飞机蒙皮; 缺陷; 检测; 信息融合; 智能化

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.039



刘芳

硕士研究生, 主要从事三坐标计量、激光线扫描、电磁无损检测及监测研究。

飞机蒙皮构成了飞机的外形, 具有保持气动性和传递载荷的作用。蒙皮质量对飞机的隐身性、气动特性、飞行安全性和能耗有着重要影响<sup>[1-2]</sup>。随着航空工业的不断发展, 蒙皮的可靠性和可维护性已经成为确定飞机生存概率和生命周期成本的两个重要因素<sup>[3]</sup>。飞机蒙皮脱落或撕裂等会造成严重事故<sup>[4]</sup>。

飞机蒙皮一般采用具有较高强度、较高韧性、耐磨损及耐腐蚀的材料, 如铝合金、钛合金、高强度不锈钢、碳纤维和玻璃纤维复合材料等<sup>[5]</sup>, 随着技术的发展在材料上对飞机蒙皮进行不断优化。蒙皮受力复杂, 在飞机服役过程中始终受到交变载荷

的作用, 极易造成蒙皮部位的疲劳裂纹、腐蚀等异常, 且蒙皮一般为曲面结构, 不可避免地会在生产、装配过程中出现尺寸偏差。如生产制造过程中可能因工艺控制不当产生成分偏析、裂纹、分层和带状组织等缺陷, 从而影响结构的成型质量和整体性能<sup>[6-7]</sup>。另外, 装配过程中在蒙皮的接缝处必然会存在间隙与阶差, 如蒙皮与蒙皮之间、蒙皮与结构之间、机身部段之间、整流罩壁板之间等<sup>[8-9]</sup>。此外, 铆接质量也可能产生问题, 如单个铆钉的形变端直径不在规定的范围之内、铆钉高度异常以及铆钉之间的间距过大等<sup>[10]</sup>。当这些问题超过设计容限, 飞机的装配质量、气动

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51765049); 航空科学基金(2019ZE056001); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMAC-SFGS-2021-604)。

性能、隐身性能将受到严重影响。

在飞机服役过程中,可能会遭受外来物撞击或维修、使用不当而引起的凹痕、划痕等损伤<sup>[11]</sup>。随着服役时间的增加,飞机将趋于老龄化(老龄化指飞机的使用时间超过设计使用时间的75%),蒙皮也逐渐偏离其理想特性<sup>[12-15]</sup>。

针对飞机蒙皮装配质量及服役安全性问题,除了在生产过程中采取工艺措施和加强过程控制外,对飞机蒙皮的检测也是重要的质量保证措施。当前,世界各国已根据各种检测技术的特点和蒙皮实际情况,应用超声、涡流、红外、磁光成像以及机器视觉等技术,采用了多种检测方法保证蒙皮的安全性<sup>[16-18]</sup>。围绕飞机蒙皮检测技术研究领域,本文介绍了飞机蒙皮常见的7种缺陷,并分析了其产生的原因、位置以及危害;按照不同的缺陷位置,分析并比较了现有的飞机蒙皮检测技术,对国内外飞机蒙皮缺陷检测的相关进展进行了分类梳理;最后,对飞机蒙皮检测技术的发展和前景进行了展望。

### 飞机蒙皮的缺陷分析

飞机蒙皮缺陷类型大致可以分为7类,分别为凹痕、划痕、铆接质量异常、接缝异常、裂纹、腐蚀和脱粘。这些缺陷在质量成型、装配以及使用过程中都可能产生。在质量成型过程中,由于蒙皮加工工艺复杂,可能导致其出现凹痕、划痕以及脱粘等问题,一定程度上影响了蒙皮的成型质量;在蒙皮装配时,可能出现凹痕、划痕、铆接异常、接缝异常等问题,对飞机结构的稳定造成影响;蒙皮在服役过程中,受到应力以及环境因素的共同作用,使其产生凹痕、划痕、裂纹、腐蚀、脱粘等缺陷,对飞机平稳运行造成严重影响。下文将对7类蒙皮缺陷进行分析,并介绍其特点<sup>[19-20]</sup>。

(1)凹痕。如图1所示,凹痕是一种外形凹进部件原始轮廓且部件

的横截面积无改变的结构损伤,通常由外物体碰撞引起。在飞机生产过程中钝物(工具、工装、零件等)的撞击或局部不恰当的装配而产生静力挤压、飞行中的(飞沙、飞鸟、冰雹等)异物撞击等都会造成飞机部件出现永久性的凹陷或突起。由于部件的轮廓变化,会增加飞行阻力,降低飞行性能,造成飞机不正常的振动等。另外,凹痕区域会形成应力集中,从而影响到部件的抗疲劳性能<sup>[21-22]</sup>。

(2)划痕。划痕的定义是细长、深度较浅的可见线性损伤(最大深度被定义为0.1524mm)<sup>[23]</sup>。研究发现机体划痕大多是由于在去除机体蒙皮边缘的密封胶或是在清除机体外表面的粘贴标牌的过程中,由于使用了金属刀具或者不合适的硬质工具而造成的<sup>[24]</sup>,所以划痕常发生在有密封胶密封的机身蒙皮搭接/对接、对接加强片、修理件边缘、翼身整流罩周边等位置/区域。当某飞机存在划痕的区域未被发现或未被处理时,由于划痕部位产生应力集中,形成疲劳源,飞机在继续投入使用过程中,在划痕上某一点甚至更多点处,可能会导致疲劳裂纹提前形成,随着交变载荷的持续作用,疲劳源会沿着划痕逐渐发展,继而在不同部位产生了一群相互影响的小裂纹,最终在循环载荷作用下连通成一条长裂纹。蒙皮上形成的裂纹会导致飞机空中释压,造成灾难性的后果<sup>[25-26]</sup>。

(3)铆接质量异常。铆接是飞

机蒙皮上的主要连接形式,铆接的质量直接影响蒙皮甚至飞机整体气动性能和长疲劳寿命<sup>[27]</sup>。正常情况下,铆钉应与飞机蒙皮表面齐平,但在铆接过程中,可能出现铆钉头突出、铆钉的形变端直径不在规定范围之内、铆钉之间的间距过大、埋头孔异常等问题。若铆钉头突出,必然影响蒙皮搭接结构,降低飞机性能。对于单个铆钉而言,若铆接后所形成的形变端的直径较大,则形变端的厚度必然会减小,此时该铆钉的力学性能降低,容易损坏;若铆接后形变端的直径较小,此时的连接不稳定,容易导致铆钉脱落。此外,飞机蒙皮零件之间的连接是由多个铆钉铆接而成,若某两个铆钉之间的距离较大,导致零件的载荷不能均匀分布,一部分铆钉所分担的载荷比其他铆钉大,在服役过程中部分铆钉容易被破坏<sup>[28]</sup>。另外,法向偏角过大会显著降低螺栓的疲劳寿命,较大的埋头孔深度会降低面板厚度,导致铆接接头的连接性能不足<sup>[29]</sup>。如图2所示,飞机蒙皮部位存在大量铆接结构,铆接质量的检测需求很大。

(4)接缝异常。如图3所示,由于飞机大部分蒙皮部位为曲面结构,因此飞机装配与蒙皮修配大都采用手工操作,由于零件制造误差、部件装配积累误差、装配定位基准误差、检验工具工装误差等原因,造成蒙皮接缝处形成不统一的间隙及阶差。在飞机装配中,对产生的间隙和阶差



图1 飞机机身凹痕

Fig.1 Dent in fuselage of aircraft

都有具体要求,间隙和阶差的允许值按平行和垂直气流方向分别规定,间隙和阶差的检测精度是装配质量的保证。飞机各零部件装配产生的间隙和阶差对气动外形的可靠性起关键作用,对超音速飞机与隐形飞机影响尤其突出。

(5) 裂纹。在连续受地-空-地循环载荷作用下,机舱加压或减压会导致飞机蒙皮膨胀或者收缩,从而对铆钉、高锁螺栓等紧固件孔周围的蒙皮、加强筋以及外部蒙皮连接处施加压力产生裂纹<sup>[30]</sup>,如图4所示。此外,由于应力、受外来物撞击以及工具使用不当等原因导致飞机蒙皮出现划痕,经过一定的飞行循环后,这些划痕也可能形成裂纹。当裂纹尺寸和密度达到一定量级时,飞机蒙皮结构将不再满足适航标准条款中对剩余强度的要求。这些小裂纹互相连通,大大削弱结构原有的剩余强度,甚至可能使得飞机在空中解体<sup>[31-32]</sup>。另外,裂纹也会影响飞机

的气动性能和承载能力。

(6) 腐蚀。在腐蚀介质的作用下,周围介质和材料元素之间会发生化学或电化学反应<sup>[33]</sup>,使飞机表面形成腐蚀(图5)。从产生腐蚀的位置看,飞机蒙皮的腐蚀类型多为缝隙腐蚀,主要发生在垫圈、紧固件头部、表面沉积物、剥离的涂层、搭接接头和铆钉孔附近形成的缝隙部位。其产生的主要原因是密封不严,水分进入蒙皮接缝而产生腐蚀<sup>[34]</sup>。腐蚀是导致飞机老化的主要因素之一,会产生体积比原蒙皮所损伤的体积大的腐蚀物,导致铆钉之间的蒙皮膨胀,破坏飞机气动性能<sup>[35]</sup>。并且,腐蚀也可能产生蚀坑,容易引起应力腐蚀开裂,造成飞机结构断裂。随着腐蚀作用进一步发展,会使蒙皮材料的抗腐蚀性能降低,从而降低蒙皮材料的疲劳寿命,最终导致飞机彻底报废。

(7) 脱粘。脱粘是蒙皮跟蜂窝层之间或是蒙皮跟次级结构之间的

一种复合材料损伤。飞机蒙皮部位的脱粘一般由以下3类原因造成:第1类原因是制造缺陷或冲击损伤等会对复合材料加筋结构造成脱粘,即当复合材料加筋结构承受屈曲载荷时,蒙皮局部屈曲会导致筋条承受外弯曲载荷,从而引起蒙皮与筋条界面之间脱粘<sup>[36]</sup>;第2类原因是在制造过程中胶层的不均匀或压制抽真空过程中的不当操作,容易形成蒙皮与蜂窝层之间缺少胶层而导致脱粘<sup>[37]</sup>;第3类原因是飞机服役过程中,蒙皮与内部泡沫产生略微凹陷或者腐蚀,影响了蒙皮与内部泡沫之间的胶接力,最后形成脱粘<sup>[38]</sup>(图6<sup>[39]</sup>)。脱粘往往是小面积的、局部的、不连贯的,非连续性缺陷。脱粘会降低夹层结构的刚度、面内屈曲强度和抗疲劳强度,会威胁到结构零件的安全性<sup>[40]</sup>。若脱粘的面积过大或时间过长都将造成飞机结构失效,使得蒙皮在使用过程中脱落进而影响飞机的飞行安全<sup>[41]</sup>。



图2 飞机蒙皮铆接状况

Fig.2 Riveting condition of aircraft skin

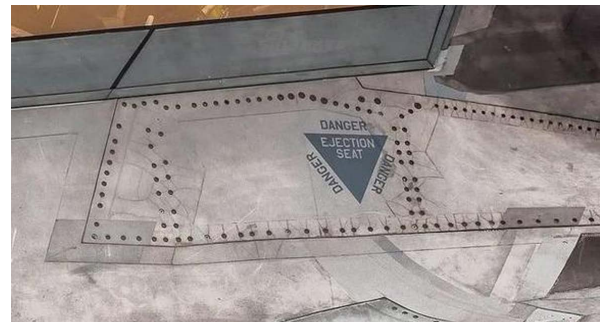


图4 飞机蒙皮裂纹

Fig.4 Cracks in aircraft skin

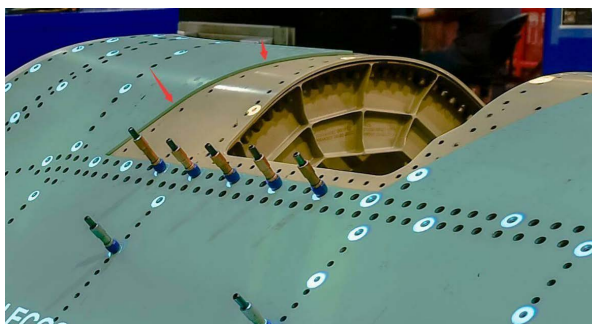


图3 飞机蒙皮接缝

Fig.3 Joints in aircraft skin



图5 严重的飞机蒙皮腐蚀

Fig.5 Severe corrosion in aircraft skin

## 飞机蒙皮缺陷的检测

目前,国内外关于飞机蒙皮缺陷检测的研究较多,由于各种缺陷所处位置及缺陷类型不同,所适用的缺陷检测方法也不同,根据缺陷所处位置,大致可归类为铆钉附近、接缝部分及蒙皮表面3类。对于飞机蒙皮铆钉附近缺陷的检测,主要是检测铆接质量异常、铆钉孔的裂纹和腐蚀等问题;对于飞机蒙皮接缝部分缺陷的检测,主要是检测该部位存在的阶差与间隙问题,在接缝处也会存在腐蚀及裂纹等缺陷;对于飞机蒙皮表面缺陷的检测,主要是检测表面部分的凹痕、裂纹、腐蚀、脱粘等问题。飞机蒙皮缺陷检测的技术种类繁多,下文根据缺陷存在部位的不同分类,讨论各种缺陷的检测方法及相关的研究进展。

### 1 铆钉及铆钉附近缺陷的检测

飞机蒙皮铆钉部位的缺陷,主要类型包括铆接质量异常、铆钉孔不规则、铆钉孔边缘的裂纹和腐蚀等。飞机蒙皮铆钉部分的检测一般分成两部分,一种是对铆钉的形变量、间距等进行检测,用以判断铆接质量;另一种是检测铆钉孔及其边缘的裂纹、腐蚀缺陷。其中针对铆钉孔边缘缺陷的检测是国内外研究者共同的难点。

#### (1) 铆接质量检测。

铆接质量检测实质是对铆钉本身进行检测,它通常以铆钉突出、铆

钉形变端直径异常、铆钉之间的间距不合理等作为判断依据,主要应用机器视觉技术进行检测。机器视觉技术便于实现检测的智能化,对于铆接质量异常的检测具有较高的精度和鲁棒性,适用于发展大规模的铆接质量检测,基本原理如图7所示。即利用计算机设备软件(Visual studio)控制可编程逻辑控制器(PLC),以此控制光源的照射,同时控制工业相机对待检测试件进行拍摄,并将图像数据通过图像采集卡转换为数字信号传入计算机设备进行数据处理。

Xie等<sup>[42]</sup>利用飞机蒙皮三维点云局部区域的密度变化来提取铆钉轮廓,有助于铆接质量的快速检测。在进一步的研究中,Xie等<sup>[43]</sup>构建了全自动非接触式飞机蒙皮铆钉扫描测量系统,能够对铆钉孔位置及铆钉的平面度进行智能检测与评价。蒋滔等<sup>[44]</sup>构建了铆接质量视觉检测系统,以铆接后铆钉形变端直径和间距作为衡量铆接质量的重要参数,利用改进遗传算法与最大类间方差(OTSU)法相结合对蒙皮图像进行分割,对分割图像进行铆钉特征提取,最后分析铆接质量参数,判断铆接质量是否存在问题。除了直接利用机器视觉技术,国内有学者提出了改进的磁光-涡流检测系统,即对检测图像进行处理得到铆钉的二值化图像,然后采用阈值法求取铆钉近似中心,最后将由铆钉中心发出的星形

射线矢量作为特征,采用模糊支持向量机方法对铆钉有无裂纹和裂纹方向进行分类。其中,支持向量机的核宽及惩罚常数采用网格法进行选取,并结合模糊隶属度函数解决多类分类问题中存在的错分和拒分现象。试验结果表明,使用训练获得的支持向量机分类器识别裂纹缺陷取得了很好的效果,能够满足自动检测的高实时性要求<sup>[45-46]</sup>。但从此类技术的发展来看,机器视觉技术更适合于飞机蒙皮的现场测量。

#### (2) 铆钉孔及其周边的缺陷检测。

由于铆钉孔附近的裂纹和腐蚀细小且位置隐蔽,这些缺陷又隐藏在铆钉头的下部,很难用传感器进行直接检测,且很多蒙皮材料是由多层材料组成,状况非常复杂,对铆钉孔附近的缺陷状况检测,主要采用涡流、磁光、视觉、超声等多种技术。

涡流检测技术在飞机上的应用案例非常多,传统涡流检测技术在飞机机体检测中的广泛应用已有60~70年的历史,早期以检测表面裂纹为主,后期开发了低频涡流技术,可以快速获取多个频率下的检测数据,并且频率越低,驱动多线圈探头能力越强,可以更深入地穿透金属,从而识别多层结构深层的亚表面裂纹和腐蚀<sup>[47]</sup>。Siegel等<sup>[48]</sup>介绍了国外早期所研制的飞机表面检测机器人,搭载了视觉检测系统与涡流检测系统,采用视觉与无损检测方法相结

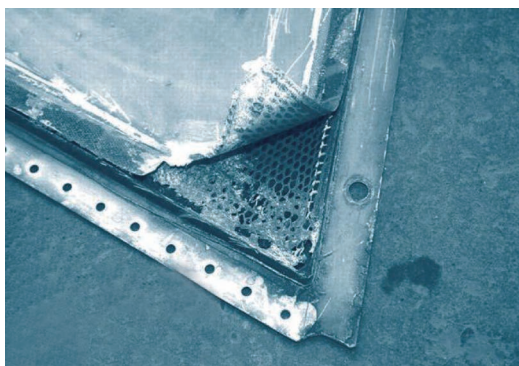


图6 蒙皮与蜂窝腐蚀脱粘  
Fig.6 Debonding of aircraft skin

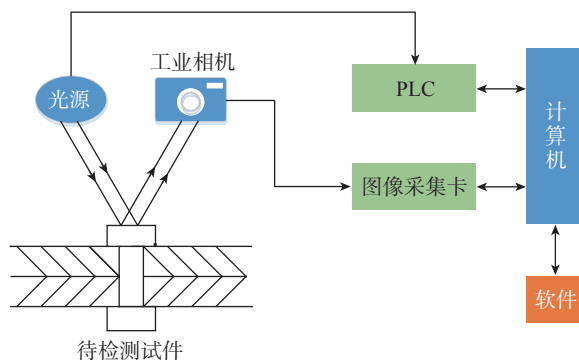


图7 机器视觉铆接缺陷检测  
Fig.7 Riveting defect detection based on machine vision

合的方式,辅助检查人员发现裂纹和腐蚀。其采用的方法为在机器人上安装多个摄像头,使得检测操作人员能够远程控制机器人运动并观察飞机蒙皮表面的状况,在涡流传感器探头位置也配有摄像头,操作人员能够通过视频观察飞机蒙皮表面状况,并能够找到铆钉位置,利用涡流探头对铆钉位置进行远程控制检测。这种检测方式是现代智能检测的雏形,为新世纪的智能检测与可视化检测进行了技术探索。随着检测技术的发展,阵列式检测技术可大幅提升效率,受到人们的重视。Janovec 等<sup>[49]</sup>应用奥林巴斯 OmniScan MX 探伤仪及 ECA 探头,对飞机铆接孔周边区域进行检测,主要目的是检测可能存在的裂纹或隐藏的腐蚀。该方法具有较高的分辨率和灵敏度,对亚表面缺陷也有较好的检测效果。针对铆钉孔周边的裂纹,开发了一种旋转测量方法,基于脉冲涡流或远场涡流检测技术,研制一种使探头能够围绕铆钉进行旋转检测的装置,如图 8 所示。旋转装置检测和纯手动检测的结果对比表明,旋转检测装置能够很好地抑制探头与铆钉之间的距离变化带来的对信号的干扰,减少伪缺陷并提高检测效率<sup>[50-51]</sup>。这种旋转测量的方法也应用在超声技术中,在检测隐藏部位的铆钉孔裂纹中取得了较好的效果。

超声检测技术具有方向性好、定量准确的特点,在铆钉孔缺陷检测中

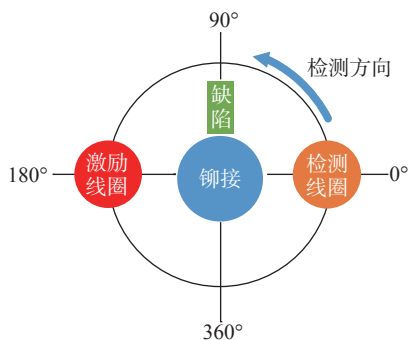


图 8 旋转检测示意图

Fig.8 Schematic diagram of rotation detection

的应用也非常广泛。Fromme 等<sup>[52]</sup>采用了 Lamb 波检测铆钉孔附近的裂纹,即利用 Lamb 波通过铆钉孔等不连续介质,形成散射场,然后分析散射场的变化,表明裂纹的发展状况。此方法可用于大面积蒙皮部位的快速检测,节省了检测时间,且试验结果与理论计算吻合程度较高,证明了此方法的有效性。另外,飞机在服役过程中,铆钉孔缺陷受铆钉的遮挡难以直接检测,致使缺陷的产生和发展不能得到有效监控,利用超声爬波开展紧固组合体超声成像与检测技术实现铆钉孔缺陷的原位检测,取得了较好的效果<sup>[53]</sup>。随着对飞机检测智能化程度要求的不断提高,对于多种检测方法的信息融合研究也越来越受到重视,Wang 等<sup>[54]</sup>将机器视觉技术与超声检测技术结合,提出了一种基于多类支持向量机和数据融合策略的蒙皮裂纹检测多类分类方法。与单一检测方法相比,多源信息融合方法可以提高飞机蒙皮裂纹的识别程度和识别精度。

磁光涡流成像技术是一种新兴的涡流无损检测方法,它综合应用了电涡流效应与法拉第磁致旋光效应,可实现对亚表面细小缺陷的可视化无损检测。20 世纪末,研发了一种将磁光效应与涡流相结合的无损检测仪器,可生成表面疲劳裂纹、亚表面的裂纹或腐蚀的实时图像,并且在涡流频率处于 25.6~102.4 kHz 时,表面疲劳裂纹成像明显;而在较低的频率下(如 6.4kHz),可以对亚表面的裂纹和腐蚀进行成像。此仪器较传统的涡流仪器具有较快的检测速度且检测数据更易于解释,适用于铝合金、钛合金、高强度钢的无损检测,也可以用于碳纤维等复合材料的无损检测<sup>[55]</sup>。随着该技术扩大推广,为处理大量磁光-涡流检测图像数据和解决人工解释方面的主观性问题,Park 等<sup>[56]</sup>提出了一种将滤波、铆钉检测和定级技术三者相融合处理的

自动检测算法,并搭建了基于数字信号处理(Digital signal processing, DSP)的自动铆钉检测系统。在文中证明了此算法可有效对铆钉进行检测和分类,鲁棒性较高。近年来,Deng 等<sup>[57-59]</sup>研究了磁光图像数据偏度函数的多种定义,以量化和分类来源于铆钉部位的缺陷,从而证实其在开发自动缺陷分类系统中的有用性。而后又提出了一种图像处理 and 自动分类算法,该算法对图像数据滤波后,再检测图像的结构边缘,被证明能在 1.5~100kHz 范围内的激发频率下对蒙皮表面和亚表面裂纹的磁光图像进行分类,相较于文献<sup>[55]</sup>能在更宽的涡流频率范围内进行检测。另外,此团队还使用模拟模型预测磁光图像和实验磁光图像数据进行检测概率(Probability of detection, POD)研究,经仿真证明,POD 曲线展示了优化检测参数的优点,为优化磁光-涡流检测系统性能提供参考。国内广东工业大学和电子科技大学都有研究者在进行磁光涡流检测技术的持续研究工作。

在飞机生产、装配过程中蒙皮埋头孔的直径、法向等的检测属于姿态检测及尺寸检测,一般应用视觉检测方法。Yu 等<sup>[60]</sup>利用视觉技术对埋头孔进行在线检测,实现埋头孔法向偏差和深度的同时检验,提取埋头孔边缘轮廓,建立埋头孔成像模型,推导埋头孔的法向偏差和深度,以这两种数据对埋头孔异常进行判断,进而保证蒙皮铆接的质量。毕超等<sup>[61]</sup>为了实现飞机蒙皮上钻孔点位处的法线方向检测,基于结构光三维视觉测量原理,通过工业相机获取十字线结构光在蒙皮上的投影光条计算出蒙皮曲面的结构特征,并进一步解算出十字线结构光交点处的法线方向,从而获得蒙皮上钻孔点位处的法向信息。试验结果表明,该结构光视觉检测系统在多个钻孔点位处的角度单次测量极限误差 $\leq \pm 0.12^\circ$ ,具有良好

的重复性精度,可以满足飞机蒙皮钻孔点位处的法向检测需求。

## 2 蒙皮接缝部分检测

飞机蒙皮接缝部分主要存在阶差与间隙问题,该检测主要在飞机装配过程中进行,以保证飞机的密闭和气动性能,服役过程中的腐蚀、裂纹检测需求不多。对于阶差与间隙,传统的检测方法大多是人工检测,使用塞尺、塞规等量具进行测量。传统的检测方法无法实现检测结果的数字化,且存在劳动强度大、检测周期长、漏检率高等问题。随着测量技术的快速发展,国外对间隙与阶差的测量研究愈发成熟,并已开发了相关设备应用于测量间隙与阶差。如美国 Origin Technologies 公司的 LaserGauges 激光测量系统、英国 Third Dimension Software 公司研发的 GapGun Pro、德国 Micro-Epsio 公司的 gapCONTRO 系列产品、瑞典 Hexagon 公司的 NEXTSENSE 轮廓测量和表面光学检测系统等,都应用了激光扫描技术对蒙皮的阶差与间隙进行检测,并具有易用性、便携性等优点。图 9 为 LaserGauges 激光测量系统,结合激光外形扫描技术和虚拟量规的测量法,已应用于众多的航空航天公司。

为了提升国产飞机的气动性能,国内学者开展了大量针对飞机蒙皮接缝间隙与阶差问题的相关研究,采用的主要技术有线结构光测量技术及面结构光测量技术,主要



图 9 LaserGauges 激光测量系统  
Fig.9 Laser measurement system of LaserGauges

的研究单位有南京航空航天大学、北京航空航天大学、航空工业各应用及研究单位等。线结构光测量方法需要对接缝区域进行定位,要求所投射的线结构光条与接缝近似垂直,对使用者的要求相对较高<sup>[62-63]</sup>。国内研究者除了进行测量仪器的开发工作以外,还进行了点云提取算法、边界提取算法、多种测量方法的联合应用等研究<sup>[64]</sup>。对于面结构光测量方法的研究,陈松林等<sup>[65]</sup>利用光栅投影技术对阶差与间隙进行了测量,为了减小相位误差,改进了条纹投影测量方法,以提高该方法对飞机表面自由曲面的适应性。区别于线结构光测量方法,此方法获得的数据更加密集,且一次测量即可完成视场内所有接缝的分析,效率较高。随着相关仪器研制的逐渐成熟,国内研究者的研究方向逐渐转变为相关算法的研究,南京航空航天大学的张波等<sup>[66]</sup>针对缝隙尺寸不均匀、数据采集存在噪声等问题,提出了一种基于支持向量机的蒙皮接缝点云间隙与阶差的提取方法,对分析间隙与阶差的算法进行了改进,实现了较高测量精度。南京航空航天大学科研团队还在致力于飞机蒙皮接缝自动识别、自动检测的相关研究<sup>[67]</sup>。

近年来,国家将智能制造提到了前所未有的高度,研究者期望采用机器人辅助视觉测量技术实现蒙皮接缝的自动测量。中国科学院沈阳自动化研究所的张洪瑶等<sup>[68]</sup>通过对机器人和 3D 扫描仪进行高精度手眼标定,采用机器人-3D 扫描激光扫描仪系统对飞机蒙皮接缝进行检测,进行了实验室内的技术探索,提高了测量的自动化程度。北京航空航天大学的杜福州等<sup>[69]</sup>提出一种采用视觉测量传感器与全向机器人辅助执行机构协同配合的测量方式,并分析了系统组成。该系统提出基于多源测量数据融合的间隙与

阶差自动化测量技术,为间隙与阶差高精度、自动化测量提供了技术支撑和方法指导。

综上所述,对于飞机蒙皮接缝处的检测,视觉检测方法因其速度快、精度高、适应性强等优点成为主要方式,为飞机的装配质量、飞行性能、隐身性能提供保障。

## 3 蒙皮表面部分检测

飞机蒙皮表面部分,主要存在凹痕、划痕、裂纹、腐蚀、脱粘等缺陷,目前应用较多的检测方法有红外检测、视觉检测、超声检测和散斑检测技术等。

如图 10 所示,由于蒙皮的特点,红外检测技术在飞机蒙皮检测中的应用一般采用主动红外热成像技术。20 世纪末美国等西方国家率先将主动红外热成像技术应用于飞机蒙皮检测研究。目前实际检测中遇到最多的是飞机蜂窝结构的脱粘缺陷、腐蚀损伤和焊接铆接损伤<sup>[70]</sup>。主动红外热成像技术对飞机蒙皮及其蒙皮下比如加强筋损伤开裂的检测可以取得有效的检测结果,并且还能对损伤做定量分析,如损伤深度、锈蚀程度以及能区别是积水还是渗漏的液压油等<sup>[71]</sup>。Gong 等<sup>[72]</sup>利用主动红外热成像技术对蒙皮材料的表面缺陷进行检测,试验表明,所生成的图像信噪比良好,能有效检测表面缺陷。但主动热成像获得的特征图像只提供投射在二维平面上的缺陷信息,容易使定位缺陷位置和深度造成误差。针对红外检测的定位及定量问题,有学者提出了将三维测量数据与红外热成像数据相融合的检测方法,用于提升检测能力,改善评定误差。这两种方法的融合能够同时检测表面和亚表面缺陷,并将这些缺陷在零件的模型中呈现<sup>[73-74]</sup>。红外检测技术应用于检测腐蚀方面,主要是对蒙皮表面的缝隙腐蚀进行检测,田云飞等<sup>[75]</sup>利用 ANSYS 有限元分析软件,模拟红外检测技术的检测环境,通过构建蒙皮搭接结构模型,证

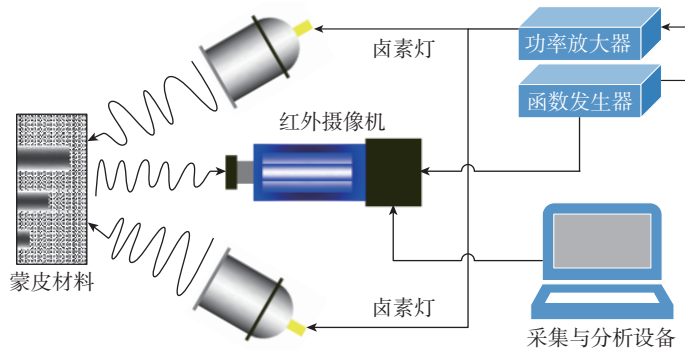


图 10 主动红外热成像原理

Fig.10 Principle of active infrared thermal imaging

明红外检测技术可以检测隐蔽的腐蚀,并且还得出划痕的存在并不影响对腐蚀的判断的结论。

飞机蒙皮表面的凹痕与划痕一般采用效率较高的视觉检测方法,如利用 3D 扫描仪采集的三维点云数据对蒙皮表面的损伤和缺陷进行评价。Allard 等<sup>[76]</sup>利用点云数据进行飞机的各种损伤评估,以确定损伤的严重程度,并与飞机制造商的规范进行比较。使用这种检测技术可以节省数小时的检查和分析时间。在 2020 年美国航天航空学会举办的科技论坛上,有学者介绍了深度学习在飞机蒙皮表面缺陷自动化维修目视检查中的应用,并通过大量数据样本实践,显示了自动化飞机维修检查的潜力<sup>[77]</sup>。针对飞机蒙皮表面缺陷的评估与维修, Jovancevic 等<sup>[78]</sup>通过对三维扫描仪采集的三维数据进行分析,基于局部表面特性识别和提取缺陷(如凹痕、凸起或划痕)信息。针对不同类型的缺陷,在一架空客 A320 上测试并验证了这种新方法。飞机蒙皮隐藏部位腐蚀的视觉检测的处理方法相对复杂,进行相关研究的难度较大。加拿大国家研究委员会航空航天研究所发明了一种应用于铆接飞机机身搭接接头隐蔽腐蚀损伤检测的增强型视觉检测技术<sup>[79]</sup>。这种技术为了量化内部腐蚀量,采用的方法是将检测区域内的平均腐蚀与

两个对角相邻铆钉中心之间的光边缘图像亮度分布的峰间振幅联系起来。利用相位一致性算法对光边缘图像特征进行绝对测量,再利用检测到的特征,结合铆钉尺寸和行数数据,对光边缘图像中的铆钉进行定位。试验验证了此技术在飞机隐蔽腐蚀定量评估中的有效性。

超声检测方法在蒙皮接缝、铆钉处缺陷的检测中应用较多,对于蒙皮表面缺陷的检测,由于被测区域面积较大,传统超声检测方法效率低、应用较少。超声相控阵技术是一种新兴的检测方法,其传感器由许多辐射单元排成阵列组成,能够一次检测一定面积的区域,效率大大提升。有学者研究利用超声相控阵技术对蒙皮划痕进行检测,无需去除漆层,检测速度快,可以直观成像从而更容易对几何外形和缺陷进行描述,因而许多航线运营商如达美航空、西南航空、美国航空、西北航空、英国航空等已使用该技术<sup>[80]</sup>。对于脱粘类缺陷的检测研究,超声检测方法在实际零件缺陷检测中的应用相对较少,更多的只是进行了原理研究, Gao 等<sup>[81]</sup>通过模拟分析光斑尺寸对激光超声反射波特性的影响、激光超声反射波与脱粘的相互作用以及脱粘的定量表征,提出了一种将激光-超声脉冲回波模式与定量检测策略相结合检测脱粘的方法,并通过试验验证了其合理性。Chong 等<sup>[82]</sup>采用激光超声检

测系统对具有脱粘问题的航空发动机复合材料夹层试样进行检测,试验中需要尝试不同频率信号才能够检测出脱粘缺陷,且检测信号的信噪比较低,对于非预制缺陷的状况,这种方法很难检测。

散斑技术受制于现场检测的便捷性问题,用于飞机蒙皮缺陷检测的案例较少。Jin 等<sup>[83]</sup>探讨了利用散斑技术实现蒙皮内部腐蚀的检测技术,但未见有后期相关检测仪器研究的报道。Wu 等<sup>[84]</sup>介绍了利用散斑技术实现机翼变形检测的研究,验证了该方法能够满足飞机机翼的静态和动态变形检测需求。在静态试验中,最大平移误差为 0.063mm,最大旋转误差为 0.025°;最大动态旋转测量误差约为 0.048°。Ji 等<sup>[85]</sup>为了解决民用飞机在飞行过程中由于增压而产生的蒙皮疲劳裂纹而带来的安全隐患,研究飞机蒙皮在均布压力作用下的变形机理,提出了一种基于散斑图像相关技术的变形检测方法,通过静态和动态试验验证了该方法的准确性和有效性,但这种方法距离实际应用还有一段距离。

飞机蒙皮的表面积很大,选择的检测手段都必须考虑效率的问题,因此视觉检测技术、红外检测技术、阵列式检测方法等能够实现大面积测量的技术应用较多。为了实现检测的智能化,在进行飞机蒙皮表面测量时,国内外大多数学者采用爬壁机器人搭载图像传感器,并实时获取飞机蒙皮的表面信息,结合滤波、边缘提取、特征提取等算法对所获检测图像进行处理,最终识别蒙皮上的裂纹和腐蚀<sup>[86]</sup>。国内南京航空航天大学和中国民航大学一直致力于飞机蒙皮检测机器人的研究,取得了大量的研究成果<sup>[87-90]</sup>。

## 飞机蒙皮缺陷检测的现状分析

由飞机蒙皮缺陷检测的研究成

果可以看出,针对飞机蒙皮各类缺陷大多已有相关的检测技术及检测方法。表1所示为飞机蒙皮各类缺陷的存在位置及主要检测方法,详细总结了飞机蒙皮所存在的7种缺陷、缺陷所存在位置及主要检测方法。针对表面缺陷,视觉检测技术的应用较为广泛;针对内部缺陷,超声和红外检测技术应用最多。国内外的飞机制造厂、修理厂、甚至是航空公司,大都配备了基于超声、涡流、红外、机器视觉等技术的检测仪器,用以提高装配效率与精度或在飞机检修中检测裂纹、腐蚀、脱粘等缺陷。

### (1) 铆钉部分的检测。

铆钉是飞机蒙皮部分的关键零部件,该部分检测包含铆钉、铆接质量和蒙皮上的铆钉孔及铆钉孔附近的裂纹、腐蚀缺陷。铆接质量主要运用了视觉技术对铆钉的平齐度、铆钉之间的间距、铆钉形变端直径

等进行检测,并且国内外学者均对视觉技术算法(如三维点云结构拟合算法、图像分割算法等)进行改进,提高了检测质量,但目前仍需要研究满足高度智能化、自动化、大规模检测需求的算法系统。铆钉孔的检测主要是检测其边缘细小的裂纹、分层和腐蚀。早期研究者尝试采用涡流检测对此缺陷进行检测,随着各种无损检测技术的发展,逐步将磁光、超声、视觉等技术应用于铆钉孔位置的检测。在铆钉、蒙皮的生产、装配过程中的检测相对较为容易,但是在蒙皮装配完成后或飞机服役过程中的原位检测,铆钉孔周围的缺陷因铆钉的遮挡而难以检测,这是飞机蒙皮缺陷检测的最大难点。近年来,随着相控阵技术的深入研究,利用超声波方向性好的特点,超声检测成为原位检测铆钉孔裂纹和分层缺陷的首选方案。

### (2) 接缝部分的检测。

接缝部分的检测同样分为两种情况:一是装配过程的尺寸检测;二是服役过程中的腐蚀、裂纹检测。接缝处的间隙与阶差是飞机气动性、气密性、甚至隐身性的保证,目前的研究方向大都是利用视觉检测技术结合机器人技术、智能检测技术来解决。接缝部位裂纹缺陷的危害性相对较小,当出现较大裂纹时,可检测方法很多。接缝部位的腐蚀缺陷可利用超声、涡流、红外等技术检测,难点在于效率与智能化的问题。

### (3) 表面部分的检测。

飞机蒙皮表面部分的缺陷可利用红外、视觉、超声、散斑等技术进行检测。从研究成果看,现有的检测技术已经能够满足飞机蒙皮表面部位缺陷的检测需求。飞机蒙皮表面部位,无其他遮挡或干扰物,检测实施的难度相对较小,关键的问题在于检测效率的提升。

综上,纵观飞机蒙皮缺陷检测的发展现状,由于位置及检测干涉的原因,最大的难点及核心问题在于铆钉及其附近的缺陷检测;另外随着智能制造的发展,对检测的适应性、鲁棒性、智能化等方面提出了较高的要求,很多检测技术研究的方向瞄准了检测精度与检测效率的提升。

## 结论

飞机蒙皮缺陷检测技术发展至今已经攻克了很多问题及难点,但是随着检测智能化水平及人们对其要求的逐渐提高,许多新的技术难点及研究热点涌现,从目前的研究现状和航空产业未来的发展需求来看,飞机蒙皮缺陷检测技术的发展趋势主要集中在以下3个方面。

(1) 解决新材料、新工艺的检测手段研究需求强烈。检测技术的发展必然受到需求发展的推动。随着航空工业的蓬勃发展,飞机蒙皮从最初的铝蒙皮,向蜂窝复合材料蒙皮、柔性蒙

表1 飞机蒙皮各类缺陷的位置分布及检测方法

Table 1 Location distribution and detection method of various defects in aircraft skin

缺陷种类	存在位置	主要检测方法
凹痕	表面	视觉技术: 检出率 $\geq 97\%$ ; 红外技术: 可检深度 $\geq 0.2\text{mm}$ , 长度 $\geq 4\text{mm}$
划痕	表面	视觉技术: 可检深度 $\geq 0.025\text{mm}$ , 准确率 98.3%
铆接质量异常	铆钉	涡流: 标准偏差 0.27~0.33mm; 磁光: 可检裂纹长度 $\geq 10.16\text{mm}$ ; 视觉: 识别率达 95%, 铆钉头法向偏差角 $< 0.15^\circ$ , 深度偏差 $\leq 0.02\text{mm}$ ; 超声: 可检测出铆钉裂纹 $\geq 2.53\text{mm}$
接缝异常	接缝	视觉技术: 间隙测量均值误差 $\leq 0.03\text{mm}$ , 阶差测量均值误差 $\leq 0.02\text{mm}$
裂纹	表面 铆钉 接缝	涡流: 可检测裂纹深度 $\geq 0.67\text{mm}$ , 检测概率为 90%; 磁光: 检测深度 $\geq 3.175\text{mm}$ , 最大偏差为 0.099mm, 平均偏差为 0.041mm; 视觉: 识别裂纹准确率 96.6%; 超声: 准确率 89.9%~93.3%
腐蚀	表面 亚表面 铆钉 接缝	涡流: 精确度可达壁厚 $\pm 5\%$ ; 红外: 可检测腐蚀面积 $\geq 0.12\text{mm}^2$ , 深度为 0.1mm; 视觉: 腐蚀的识别率为 90%~95%; 超声: 线性深度分辨率为 0.59mm, 位置误差约为 6.5%
脱粘	内部	红外: 在分类水和液压油进入方面灵敏度为 90%, 在分类脱粘和粘合池方面的灵敏度为 70%, 准确率 95.45%; 超声: 可检测界面脱粘、厚度 $\leq 0.5\text{mm}$ 胶膜脱粘、定位误差为 5mm, 相对误差 $\leq 5\%$

皮、多涂层蒙皮技术方向发展。复合材料蜂窝类零件可采用超声、射线、红外、激光剪切散斑等方法进行检测,但由于上、下蒙皮和中间蜂窝芯3部分往往由不同材料构成,表面大多存在涂层,各层之间存在大量脱粘现象等,针对这类蒙皮的缺陷检测技术还处在尝试和攻关的阶段。受新一代战机隐身技术的需求牵引,飞机蒙皮表面的制造工艺需求更加复杂,甚至飞机表面的涂覆层数量达到近10层,检测人员需检测每一层的涂覆厚度。然而,由于各种涂层相对较薄且是复合材料的原因,对其进行检测的难度非常大。目前航空领域涂层检测的研究大多针对热障涂层,针对蒙皮表面涂层厚度检测的研究鲜见报道。

(2) 多种检测数据的融合技术受到重视。在蒙皮缺陷检测中,单一的检测技术往往应用范围有限,而且定量还存在一定的困难。利用多种检测技术实现缺陷的多维度评价是蒙皮检测研究的重要方向,如视觉与涡流检测技术相结合、涡流与超声检测技术相配合等。随着用户对检测精度要求的提高,未来将需要发展数据融合技术,多种检测数据的融合技术能够更加准确地定量缺陷的尺寸,提高评价的准确性,或者采用一种技术检测某几种参数、另一种技术检测另外几种参数的多种检测技术结合的方法。

(3) 智能检测的需求越来越迫切。随着科技的进步,对制造业的智能化要求越来越高,飞机装配、检修中的效率及智能化要求也越来越高。飞机蒙皮面积大,检测过程中的工作量很大,在实际工况中靠人工爬到机身上进行检测非常不方便。国内外都尝试开发了机器人、智能检测装置等系统配合检测技术实现缺陷检测。智能检测及智能系统的研究是未来飞机蒙皮缺陷检测的主要发展方向。

## 参考文献

[1] XIA R, ZHAO J, ZHANG T, et al.

Detection method of manufacturing defects on aircraft surface based on fringe projection[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 208: 164332.

[2] 鲍岩,董志刚,朱祥龙,等.蒙皮镜像铣削支撑技术的研究现状和发展趋势[J].航空学报,2018,39(4):47-58.

BAO Yan, DONG Zhigang, ZHU Xianglong, et al. Review on support technology for mirror milling of aircraft skin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 47-58.

[3] LIU M B, LI B B, LI J T, et al. Smart coating sensor applied in crack detection for aircraft[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 330: 383-388.

[4] FENG Z, MAO K, ZOU T, et al. Discussion on airworthiness requirement of widespread fatigue damage-safe-life methodology or damage-tolerance methodology[J]. Procedia Engineering, 2014, 80: 392-398.

[5] 张景新,郭沛欣,白杰.先进铝锂合金机身壁板结构承载能力研究[J].航空科学技术,2013(3):23-26.

ZHANG Jingxin, GUO Peixin, BAI Jie. Strength evaluation of advanced aluminum-lithium fuselage panels[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013(3): 23-26.

[6] 何潇,杨鹏飞,樊俊玲.飞机二次共固化蒙皮超声检测缺陷信号的识别方法[J].无损检测,2020,42(4):31-35.

HE Xiao, YANG Pengfei, FAN Junling. Identification of defect signals of ultrasonic testing of aircraft secondary co-cured skin[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(4): 31-35.

[7] 薛倩,罗其俊,王岳.基于图像分析的飞机蒙皮裂纹检测[J].计算机应用,2019,39(7):2116-2120.

XUE Qian, LUO Qijun, WANG Yue. Crack detection for aircraft skin based on image analysis[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(7): 2116-2120.

[8] 李强,杜福洲.全向机器人蚁群算法路径规划与运动控制研究[J].机械设计与制造,2018(2):162-164,168.

LI Qiang, DU Fuzhou. Research on path planning and motion control of omnidirectional robot based on ant colony algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2): 162-164, 168.

[9] 康永刚,李春生,陈希多,等.航空大壁板装配连接局部变形数值建模与仿真分析[J].航空制造技术,2020,63(3):45-52.

KANG Yonggang, LI Chunsheng, CHEN Xiduo, et al. Numerical modeling and simulation analysis of local deformation for aircraft large-walled panel assembly connection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(3): 45-52.

[10] 岳胜,代多兵,安鲁陵.飞机结构装配间隙超差分析与对策[J].航空制造技术,2013,56(12):81-84.

YUE Sheng, DAI Duobing, An Luling. Analysis and countermeasure for out-of-tolerance clearance in structural assembly of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 81-84.

[11] 王守财,关志东,黎增山,等.金属蒙皮飞机冲击威胁研究[J].振动与冲击,2018,37(4):13-18.

WANG Shoucai, GUAN Zhidong, LI Zengshan, et al. A study on the impact threat of metal skin aircrafts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 13-18.

[12] WANG Y, LONG H. Summary and analysis of the aging aircrafts' failure[J]. Procedia Engineering, 2011, 17: 303-309.

[13] KOSKI K, SILJANDER A, BAECKSTROEM M, et al. Fatigue, residual strength and non-destructive tests of an aging aircraft's wing detail[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(6): 1089-1094.

[14] OKAFOR A, BHOGAPURAPU H. Design and analysis of adhesively bonded thick composite patch repair of corrosion grind-out and cracks on 2024 T3 clad aluminum aging aircraft structures[J]. Composite Structures, 2006, 76(1-2): 138-150.

[15] MUELLER E M, STARNES S, STRICKLAND N, et al. The detection, inspection, and failure analysis of a composite wing skin defect on a tactical aircraft[J]. Composite Structures, 2016, 145: 186-193.

[16] HASSAN M U, DANISH F, YOUSUF W B, et al. Comparison of different life distribution schemes for prediction of crack propagation in an aircraft wing[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 241-254.

[17] UNDERHILL P R, KRAUSE T W. Enhancing probability of detection and analysis of bolt hole eddy current[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2011, 30(4): 237-245.

[18] YACOB F, SEMERE D, NORDGREN E. Anomaly detection in skin model shapes using machine learning classifiers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(9): 3677-3689.

[19] GEORGESON G. Trends in R&D for nondestructive evaluation of in-service aircraft[C]//5th International Symposium on NDT in Aerospace. Singapore: Nanyang Press, 2013: 13-15.

[20] DEANE S, AVDELIDIS N P, CASTANEDO C, et al. Application of NDT thermographic imaging of aerospace structures[J].

Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 456-466.

[21] 王学慧, 杨志红, 史聪聪, 等. 飞机蒙皮凹坑修复的模型重构方法研究[J]. 机械工程师, 2018(3): 120-122.

WANG Xuehui, YANG Zhihong, SHI Congcong, et al. Research on model reconstruction of aircraft skin pit repair[J]. Mechanical Engineer, 2018(3): 120-122.

[22] 周广洲. 波音民用飞机外形凹坑损伤的检查及评估[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(2): 60-63.

ZHOU Guangzhou. Dent damage inspection and evaluation for boeing civil airplanes[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2013(2): 60-63.

[23] 殷允信. 波音飞机机身蒙皮划痕浅析[J]. 航空维修与工程, 2014(6): 71-73.

YIN Yunxin. Analysis of fuselage skin scribe line for boeing aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(6): 71-73.

[24] 张中波. 民机机体蒙皮划痕的应力分析及处理方法研究[J]. 西安航空学院学报, 2018, 36(5): 3-7.

ZHANG Zhongbo. Study on stress analysis and treatment of scratch on fuselage skin of civil aircraft[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2018, 36(5): 3-7.

[25] 冯振宇, 柳永波. 基于有限元法的飞机蒙皮划痕线损伤分析[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 32-34.

FENG Zhenyu, LIU Yongbo. Analysis of scribe line damage in aircraft skin based on FEM[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(5): 32-34.

[26] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. III: Cavities, dents, corrosion pits, scratches[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 759-776.

[27] 孙延鹏, 王海燕, 张弛. 机身蒙皮铆接质量检测算法的研究与分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36(4): 69-76.

SUN Yanpeng, WANG Haiyan, ZHANG Chi. Research and analysis of riveting quality detection algorithm for fuselage skin[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(4): 69-76.

[28] 王向东, 刘永坡, 刘何荣, 等. 大型铆接壳体表面质量检测设备总体设计[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(1): 15-21.

WANG Xiangdong, LIU Yongpo, LIU Herong, et al. Overall design of surface quality inspection equipment for large riveted shell[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, 35(1): 15-21.

[29] WANG J H, WANG M R. Handheld non-contact evaluation of fastener flushness and

countersink surface profiles using optical coherence tomography[J]. Optics Communications, 2016, 371: 206-212.

[30] 刘平政, 宋凯, 宁宁, 等. 飞机紧固件孔周裂纹检测远场涡流传感器设计及优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 1-8.

LIU Pingzheng, SONG Kai, NING Ning, et al. Design and optimization of remote field eddy current sensor for crack detection around the hole of aircraft fasteners[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 1-8.

[31] SIMPSON D L, BROOKS C L. Tailoring the structural integrity process to meet the challenges of aging aircraft[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21: 1-14.

[32] PITT S, JONES R. Multiple-site and widespread fatigue damage in aging aircraft[J]. Engineering Failure Analysis, 1997, 4(4): 237-257.

[33] REN K, GAO S, LIU P, et al. Influence of environmental factors on corrosion damage of aircraft structure[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2011, 1(6): 061004.

[34] LE M, KIM J, KIM S, et al. Nondestructive evaluation algorithm of fatigue cracks and far-side corrosion around a rivet fastener in multi-layered structures[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(9): 4205-4215.

[35] 盛敏, 王从庆. 铆钉周围飞机蒙皮腐蚀特征提取算法[J]. 科技通报, 2011, 27(5): 716-719.

SHENG Min, WANG Congqing. Corrosion feature of aircraft skin extraction algorithm around the rivet[J]. Bulletin of Science and Technology, 2011, 27(5): 716-719.

[36] 孙晶晶, 张晓晶, 宫占峰, 等. 复合材料帽型筋条脱粘的失效机理分析[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1616-1626.

SUN Jingjing, ZHANG Xiaojing, GONG Zhanfeng, et al. Failure mechanism study on omega stringer debonding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7): 1616-1626.

[37] 李慧娟, 霍雁, 蔡良续, 等. 不同光学方法对蜂窝结构中脱粘缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 89-94.

LI Huijuan, HUO Yan, CAI Liangxu, et al. Honeycomb structures using different optical testing methods[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(11): 89-94.

[38] 马文昌. 复合材料旋翼翼尖蒙皮脱粘修理技术研究[J]. 纤维复合材料, 2017, 34(4): 24-26.

MA Wenchang. Composite blade tip surface debonding repair technology research[J]. Fiber Composites, 2017, 34(4): 24-26.

[39] 代学桂, 熊路. 某型飞机铝合金蜂

窝结构故障模式与修复技术研究[J]. 航空维修与工程, 2016(2): 33-36.

DAI Xuegui, XIONG Lu. Research on failure model and remediation technology for aluminum honeycomb structure for a certain type of aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(2): 33-36.

[40] ZHOU Y, XU Y, LIU H, et al. Debonding identification of Nomex honeycomb sandwich structures based on the increased vibration amplitude of debonded skin[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 200: 108233.

[41] SATHYA P S, JAIN S, AUGUSTIN M J, et al. Disbond detection and load estimation on a composite test box using fiber bragg grating sensors[J]. ISSS Journal of Micro and Smart Systems, 2017, 6(1): 57-67.

[42] XIE Q, LU D, DU K, et al. Aircraft skin rivet detection based on 3D point cloud via multiple structures fitting[J]. Computer-Aided Design, 2019, 120: 102805.

[43] XIE Q, LU D, HUANG A, et al. RRCNet: Rivet region classification network for rivet flush measurement based on 3-D point cloud[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 5003412.

[44] 蒋滔, 方辉, 董秀丽. 飞机蒙皮铆接质量视觉检测系统的构建[J]. 航空制造技术, 2017, 60(6): 88-91.

JIANG Tao, FANG Hui, DONG Xiuli. Construction of visual inspection system for riveting quality of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 88-91.

[45] 高庆吉, 胡丹丹, 牛国臣, 等. 基于磁光图像的飞机铆钉缺陷识别[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2179-2183.

GAO Qingji, HU Dandan, NIU Guochen, et al. Defect recognition of aircraft rivet based on magento-optic image[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(12): 2179-2183.

[46] LI B, WANG X, YANG H, et al. Aircraft rivets defect recognition method based on magneto-optical images[C]//IEEE Computer Society, International Conference on Machine Vision & Human-Machine Interface. Beijing: Science Press, 2010, 788-791.

[47] BUCKLEY J M, SMITH R A, SKRAMSTAD J A. Transient eddy currents for aircraft structure inspection—An introduction[C]//Proceedings of the 42nd Annual British Conference on NDT. Sheffield: Pergamon Press, 2003: 11-40.

[48] SIEGEL M, GUNATILAKE P. Remote inspection technologies for aircraft skin inspection[C]//Proceedings of the 1997 IEEE Workshop on Emergent Technologies and Virtual Systems for Instrumentation and Measurement.

Niagara: Better Advance Press, 1997: 1-10.

[49] JANOVEC M, BUGAJ M, SMETANA M. Eddy current array inspection of riveted joints[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 43: 48-56.

[50] 雷美玲, 付跃文. 多层铆接结构铆钉孔周裂纹的脉冲涡流检测[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(1): 13-18.

LEI Meiling, FU Yuewen. Pulsed eddy current detection of rivet hole cracks in multi-layer metal riveting structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2018, 13(1): 13-18.

[51] 赵本勇, 宋凯, 宁宁, 等. 飞机铆接件隐藏缺陷的远场涡流检测探头优化与试验[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 271-281.

ZHAO Benyong, SONG Kai, NING Ning, et al. Optimization and experimentation of remote field eddy current testing probe for hidden defects of aircraft riveting parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 271-281.

[52] FROMME P, SAYIR M B. Detection of cracks at rivet holes using guided waves[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8): 199-203.

[53] 支文琪. 紧固组合件超声成像与检测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

ZHI Wenqi. Research on ultrasonic imaging and testing technologies for fasteners[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[54] WANG C Q, WANG X F, ZHOU X, et al. The aircraft skin crack inspection based on different-source sensors and support vector machines[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016, 35(3): 1-8.

[55] FITZPATRICK G L, THOME D K, SKAUGSET R L, et al. Magneto-optic/eddy current imaging of aging aircraft: A new NDI technique[J]. Materials Evaluation, 1993, 51(12): 1402-1407.

[56] PARK U, FAN Y, UDPA L, et al. Automated rivet inspection for aging aircraft with magneto-optic imager[C]//10th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation. Los Angeles: ASME, 2004.

[57] DENG Y, LIU X, FAN Y, et al. Characterization of magneto-optic imaging data for aircraft inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3228-3230.

[58] DENG Y, ZENG Z, TAMBURRINO A, et al. Automatic classification of magneto-optic image data for aircraft rivet inspection[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007, 25(1-4): 375-382.

[59] DENG Y, LIU X, UDPA L. Magneto-optic imaging for aircraft skins inspection: A probability of detection study of simulated and experimental image data[J]. IEEE Transactions on

Reliability, 2012, 61(4): 901-908.

[60] YU L, BI Q, JI Y, et al. Vision based in-process inspection for countersink in automated drilling and riveting[J]. Precision Engineering, 2019, 58: 35-46.

[61] 毕超, 郝雪, 李迪. 飞机蒙皮法线方向的视觉检测技术研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(9): 35-41.

BI Chao, HAO Xue, LI Di. Study on vision inspection technology for normal direction of aircraft surfaces[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(9): 35-41.

[62] 许大师, 杜福洲. 基于线结构光的飞机蒙皮对缝阶差与间隙测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 77-81.

XU Dashuai, DU Fuzhou. Research on measurement technique of the stepped difference and gap between aircraft skins based on linear structural light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 77-81.

[63] 吴兴江. 基于激光的便携式飞机装配接缝质量检测仪及应用[J]. 计测技术, 2011, 31(5): 22-26.

WU Xingjiang. A portable laser instrument for inspecting airplane assembly seam[J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(5): 22-26.

[64] 严成, 黄翔, 李泷泉, 等. 基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 70-74, 78.

YAN Cheng, HUANG Xiang, LI Shuanggao, et al. Research on detection of skin seam based on 3D laser scanning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70-74, 78.

[65] 陈松林, 夏仁波, 赵吉宾, 等. 基于光栅投影测量的蒙皮对缝检测技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 32-36, 50.

CHEN Songlin, XIA Renbo, ZHAO Jibin, et al. Research on measurement technique of flush and gap between aircraft skins based on grating projection technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 32-36, 50.

[66] 张波, 李泷泉, 郝龙, 等. 基于SVM的三维对缝点云间隙阶差提取方法[J]. 航空制造技术, 2020, 63(7): 47-54.

ZHANG Bo, LI Shuanggao, HAO Long, et al. Extraction method of gap and flush of three-dimensional seam point clouds based on SVM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(7): 47-54.

[67] 王文辉, 黄翔, 孟亚云, 等. 面向飞机蒙皮对缝的移动机器人自主跟踪方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 76-82.

WANG Wenhui, HUANG Xiang, MENG Yayun, et al. A mobile robot autonomous tracking method for aircraft skin seam[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 76-82.

[68] 张洪瑶, 李论, 赵吉宾, 等. 基于机器人——扫描仪测量的蒙皮对缝检测技术研究[J]. 工具技术, 2018, 52(8): 121-126.

ZHANG Hongyao, LI Lun, ZHAO Jibin, et al. Research on measurement technique of flush and gap between aircraft skins based on robot—3D laser scanner system[J]. Tool Engineering, 2018, 52(8): 121-126.

[69] 杜福洲, 于浩, 李强. 基于多源测量数据融合的间隙与阶差自动化测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 14-20.

DU Fuzhou, YU Hao, LI Qiang. Research on gap and step difference automatic measurement technology based on multi-source measurement data fusion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 14-20.

[70] 罗英, 张德银, 彭卫东, 等. 民航飞机主动红外热波成像检测技术应用进展[J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 718-723.

LUO Ying, ZHANG Deyin, PENG Weidong, et al. Developments of active infrared thermography and its applications in civil aviation aircraft testing[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(7): 718-723.

[71] THOMAS R L, HAN X Y, FAVRO L D, et al. Thermal wave imaging of aircraft for evaluation of disbonding and corrosion[C]//Presented at 7th European Conference on Non-Destructive Testing. Copenhagen: NDT, 1998: 126-130.

[72] GONG J, LIU J, QIN L, et al. Investigation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet with subsurface defects inspection using thermal-wave radar imaging (TWRI) based on the multi-transform technique[J]. NDT & E International, 2014, 62: 130-136.

[73] AKHLOUFI M A, GUYON Y, CASTANEDO C I, et al. Three-dimensional thermography for non-destructive testing and evaluation[J]. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2017, 14(1): 79-106.

[74] MENG X, WANG Y, LIU J, et al. Nondestructive inspection of curved clad composites with subsurface defects by combination active thermography and three-dimensional (3D) structural optical imaging[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 424-431.

[75] 田云飞, 曹宗杰. 红外检测在老龄飞机蒙皮搭接结构腐蚀检测中的应用分析[J]. 飞机设计, 2013, 33(3): 31-35.

TIAN Yunfei, CAO Zongjie. The analysis of aging aircraft skin lap joint structure based on infrared NDI[J]. Aircraft Design, 2013, 33(3): 31-35.

[76] ALLARD P H, LAVOIE J A, FRASER J S. Improvement of aircraft mechanical

damage inspection with advanced 3D imaging technologies[C]//5th International Symposium on NDT in Aerospace. Singapore: NDT, 2013, 18: 12-13.

[77] BOUARFA S, DOĞRU A, ARIZAR R, et al. Towards automated aircraft maintenance inspection. A use case of detecting aircraft dents using Mask R-CNN[C]//AIAA Scitech 2020 Forum. New York: ASME, 2020: 0389.

[78] JOVANCEVIC I, PHAM H H, ORTEU J J, et al. 3D point cloud analysis for detection and characterization of defects on airplane exterior surface[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(4): 1-17.

[79] LIU Z, FORSYTH D S, MARINCAK A. Automated rivet detection in the EOL image for aircraft lap joints inspection[J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 441-448.

[80] 罗云林, 耿智军. 基于超声相控阵的飞机蒙皮检测技术研究[J]. 测控技术, 2014, 33(5): 131-134.

LUO Yunlin, GENG Zhijun. Research on detection technology for aircraft skin based on ultrasonic phased array[J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33(5): 131-134.

[81] GAO F, WANG L, HUA J, et al. Application of lamb wave and its coda waves to disbond detection in an aeronautical honeycomb composite sandwich[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 107063.

[82] CHONG S Y, VICTOR J J, TODD M D. Full-field ultrasonic inspection for a composite sandwich plate skin-core debonding detection using laser-based ultrasonics[C]//Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2017. New York: International Society for Optics and Photonics, 2017: 1017007.

[83] JIN F, CHIANG F P. ESPI and digital speckle correlation applied to inspection of crevice corrosion on aging aircraft[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1998, 10(2): 63-73.

[84] WU J, YU Z, WANG T, et al. Airplane wing deformation and flight flutter detection method by using three-dimensional speckle image correlation technology[J]. Optics Image Science & Vision, 2017, 34(6): 924-930.

[85] JI Y, LI Z, LIU L, et al. A deformation detection method for aircraft skin on uniform pressure by using speckle image correlation technology[J]. Measurement, 2020, 154: 107525.

[86] SCHMIDT D, BERNS K. Climbing robots for maintenance and inspections of vertical structures—A survey of design aspects and technologies[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1288-1305.

[87] 邢志伟, 高庆吉, 党长河. 飞机蒙皮检查机器人系统研究[J]. 机器人, 2007, 29(5): 474-478, 484.

XING Zhiwei, GAO Qingji, DANG

Changhe. A robot for defect inspection of aircraft skin[J]. Robot, 2007, 29(5): 474-478, 484.

[88] 刘红, 王从庆, 盛敏, 等. 飞机蒙皮检测机器人的控制和感知总体结构[J]. 控制工程, 2012, 19(3): 502-506, 518.

LIU Hong, WANG Congqing, SHENG Min, et al. Control and perceptual system of a climbing robot in aircraft skin inspection[J]. Control Engineering of China, 2012, 19(3): 502-506, 518.

[89] 姜俊俊. 飞机蒙皮检测机器人动力学控制与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

JIANG Junjun. Research on dynamic control and experiment of an aircraft skin inspection robot[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

[90] 聂琪. 飞机复合材料蒙皮打磨机器人的精度分析与综合[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.

NIE Qi. Accuracy analysis and synthesis of parallel mechanism used in aircraft composite skin grinding[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

通讯作者: 夏桂锁, 副教授, 博士, 研究方向为三坐标计量、激光线扫描、电磁无损检测及监测。

## Current Status and Prospect of Defect Detection of Aircraft Skin

LIU Fang<sup>1</sup>, XIA Guisuo<sup>1</sup>, WEN Zhihui<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>2</sup>, XU Qilin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** In the process of aircraft assembly, uneven gaps and steps will be formed at the seams of the aircraft skin. In addition, dents, cracks, corrosion and other defects will be produced in the skin during the service process. Due to these defects, the strength of the skin will be weakened and the carrying capacity will be reduced, which will eventually affect the aerodynamic performance of aircraft and endanger flight safety. The detection of aircraft skin defects accounted for a large proportion in aircraft maintenance, consequently it is crucial for aircraft safety. This paper introduced seven common defects of aircraft skin, and analyzed the causes, locations and hazards of these defects. On the basis of the location of these defects, the defects were divided into three categories, and the development status of various kinds of detection technology of skin defects was systematically described. The status quo of aircraft skin detection technology was summarized, and the development prospect of skin defect detection was prospected.

**Keywords:** Aircraft skin; Defect; Detection; Information fusion; Intelligence

(责编 七七)