

激光与光电子学进展

大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展

张开富*, 史越, 骆彬, 童长鑫, 潘婷, 乔木

西北工业大学机电学院, 陕西 西安 710072

摘要 新一代飞机向着大型、重载、长寿等方向发展,对其装配质量、精度等提出更高的要求。装配中几何尺寸、物理损伤等的高精度测量是调控飞机装配工艺、保证装配指标的基础和关键,对飞机服役性能有着重要的影响。本文围绕新一代飞机结构尺寸大幅增加、承力结构复材化发展下的需求,论述了大型飞机装配中高精度测量技术的研究进展,具体从大空间点位高精度测量方法、大型结构外形高精度测量方法、复合材料结构装配缺陷高精度检测技术等方面对国内外理论研究和应用技术进行了梳理和总结,并指明相关技术的未来发展趋势和前景。

关键词 仪器,测量与计量;高精度测量;飞机装配;大空间场构建;装配外形测量;缺陷检测

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222914

Research Progress of High Precision Measurement Technology in Large Aircraft Assembly

Zhang Kaifu*, Shi Yue, Luo Bin, Tong Changxin, Pan Ting, Qiao Mu

School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China

Abstract Higher standards for assembly quality and precision have been introduced with the development of next generation aircraft toward massive, heavy duty, and extended life. High precision measurement of geometry and physical damage in assembly is the basis and key to regulating the aircraft assembly process and ensuring the assembly standard, which has an important influence on the service performance of the aircraft. With a focus on the requirements of the new generation of aircraft with the significant rise in structural size and the development of composite bearing structure, this paper discusses the development of large space point location high precision measurement method, large structure shape high precision measurement method, composite structure assembly defect high precision detection technology, and other aspects of theoretical research and technology application at home and abroad, and indicates the future development trend and prospect of relevant technology.

Key words instruments, measurement, and metrology; high precision measurement; aircraft assembly; large space field construction; assembly contour measurement; defect detection

1 引言

飞机装配是飞机制造的关键环节,装配过程中涉及的学科范围广、技术标准要求高,属于典型的高端装备制造技术。飞机装配是将各种零、组、部件按照规定的技术条件和质量要求进行配合与连接,并进行检验与试验的工艺流程,装配的质量直接决定了飞机产品的外形精度、制造质量和服役性能等^[1-2]。新一代飞机向着大型、重载、长寿等方向发展,其制造也向着高精度、低成本、柔性化、智能化等方向转变^[3],对装配的精

度、效率与质量均提出了更高的要求。此外,以纤维增强型复合材料为代表的轻质高强材料也逐渐由次承力结构升级为主承力结构。对此,开展大型飞机的大空间高精度测量、复合材料损伤的高精度检测方向的研究,是新一代飞机高效、高质装配的强有力支撑。

随着室内全球定位系统(GPS)、三坐标测量仪、电子经纬仪、双目视觉相机等^[4]高精度数字化测量系统的发展,大型飞机装配过程中的测量精度和测量效率有了极大提升。部件装配精度会直接影响大部件的对接精度,机身部件的装配质量和装配效率是保证飞机

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2022-12-20; 录用日期: 2022-12-23; 网络首发日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(52035011)、陕西省重点研发计划(2020ZDLGY01-02)

通信作者: *zhangkf@nwpu.edu.cn.com

整机装配质量和装配效率的决定性因素。在飞机数字化装配过程中,飞机大部件之间的对接装配,比如机身各段之间、机翼与机身之间的对接装配依赖于大尺寸测量系统对部件姿态的检测。在对接装配过程中,飞机部件的姿态通过数个数字化定位器支撑和协调运动来实现姿态的调整,装配现场各个数字化设备的协调运动的实现,依赖于空间测量场系统对各个数字化设备之间的相对位置关系进行标定。因此,装配大空间测量场的现场测量精度是影响飞机装配质量的重要因素。

随着航空制造业的快速发展,产品零部件越来越大且精度越来越高,尤其是其中的关键特征,如流体型面的轮廓度、铆钉齐平度、连接面对缝间隙等。飞机部件具有曲面形状复杂、尺寸大的特点,飞机外形检测困难,目前我国航空制造业仍普遍以部分特征点坐标值来表征飞机整机装配质量水平,这种评价方式由于采点密度低、特征点坐标值测量状态与理论状态不一致等问题,无法准确定位误差位置及误差量,严重影响和制约了飞机生产质量及其飞行性能。部件外形的微小偏差或波动会严重影响产品性能、降低效率并造成能源的大量消耗,作为评价飞机整机装配质量的关键特性,飞机大部件装配外形质量直接影响整体装备最终的气动性能、隐身性能以及结构性能。因此,利用高精度数字化测量设备在制造现场快速高效地测量飞机大部件装配外形逐渐成为航空制造领域研究的热点问题。

同时,面向复合材料装配缺陷的高精度检测技术作为精密测量技术体系中的一环也是保证新一代飞机制造质量的关键^[5]。与传统金属材料不同,复合材料在制孔、连接等装配过程中不可避免地会产生各类缺陷,缺陷会在服役过程中不断扩展,降低材料及结构的承载、疲劳性能,影响飞机的安全服役^[6]。为了满足新型飞机的零部件制造要求,复合材料制造技术发展迅速,不断涌现出新材料、新结构和新工艺,传统检测技术已经难以满足飞机复合材料构件对于微结构、微缺陷的检测要求。例如,目前广泛使用的常规超声技术难以检测型面或结构复杂的部件,难以实现飞机结构的自动化高效率和高精度的检测。因此,利用高精度的检测技术对复合材料装配过程中产生的缺陷进行检测及分析保证飞机产品的最终制造质量具有十分重要的意义。

近年来,为了满足新型飞机的发展要求,国外飞机制造商已将精密测量技术体系引入飞机装配中,实现了飞机装配过程中大空间尺寸的高精度测量以及复合材料装配缺陷的高可靠性检测,大幅提升了飞机的装配精度和最终的装配质量^[7]。美国波音公司已研究室内 GPS 测量系统多年,并且已将其成功应用于 747、787 等飞机整机的装配线中。该公司也利用激光跟踪仪测量系统对 JSF 战斗机的空间位姿进行检测,对部

件进行空间定位,完成了大部件对接装配工作,装配精度由原来的 10.16 mm 提高到 0.25 mm,提高了将近 50 倍;美国洛克希德·马丁公司利用基于激光雷达的精密检测技术对机身蒙皮进行测量,将测量时长由 28 h 缩短至 6 h;欧洲空客公司采用激光雷达和摄影测量技术对 A380 机翼装配外形进行测量使测量周期缩短了 30% 以上^[8]。国内飞机制造厂、航空院校、高校研究所近几年也纷纷展开了对大尺寸精密测量技术的研究与应用,浙江大学提出了基于激光跟踪仪测量和室内 GPS 的部件定位系统,对部件对接数字化柔性装配系统和平台集成进行了深入的探讨^[9];解放军工程大学研究了激光跟踪仪与经纬仪的组网方法,在现场获得了应用^[10];天津大学研究了多站位室内 GPS 的组网方法,达到了亚毫米量级的精度^[11];中国商用飞机有限责任公司在 ARJ21 的翼身对接中采用激光跟踪仪辅助实时调姿,圆满地完成了飞机翼身对接任务。西安飞机工业(集团)有限公司将激光跟踪仪和激光雷达运用到机身与机身的对接中,有效地提高了机身的装配精度^[12]。经过近些年的发展,中国的飞机大尺寸精密测量技术研究有了较大的进步,与西方发达国家的差距大大缩短,但整体测量技术以及测量体系还不够完善,且应用在某种程度上受到制约,总体来说仍然还有很大差距,仍然需要投入大量的精力来进一步提高。因此,针对大飞机装配过程中的测量与检测需求及难点,较为全面地了解国内外高精度测量技术的最新研究与应用,对促进国内大飞机装配过程中的精密测量技术的发展具有十分重要的现实意义。

2 飞机装配大空间测量场高精度测量方法

传统大空间测量场多使用单台或者单种测量设备进行构建,为满足大尺寸部件的高精度测量需求,组合式测量系统应运而生。通过组合多个测量设备或不同测量系统,往往可以达到一个较好的效果。由于大空间测量场的特点,需要对其进行坐标配准,即将测量点坐标转换到全局坐标系下,并将数据进行融合。坐标配准、环境等因素往往会影响到测量场的精度,所以还需要对测量场进行不确定度评估,并对误差进行补偿。因此,测量场配置优化、坐标系配准和不确定性评估等三个方面的技术是影响大空间测量场测量精度和效率的关键技术。

2.1 大空间高精度测量场配置优化技术

大空间测量所涉及的技术最早源自于地理测量仪器和方法,随着激光跟踪仪的发明,将大空间测量系统带入了一个新的时代^[13-14]。最初的激光跟踪仪是基于相对位移测量干涉仪(IFM)使用的,优点是其系统具有良好的鲁棒性,但其在波束中断的情况下,需要重建目标的初始位置。因此,跟踪器制造商开始在系统中引入除 IFM 之外的绝对测距仪(ADM)^[15]。目前,激

激光跟踪仪采用的是基于 IFM 和 ADM 组合的测量系统,极大地提高了采集速度,精度也通常可以达到 $(10 \pm 0.4) \mu\text{m}/\text{m}$ 。激光跟踪测量系统的基本工作原理是在被测物体的相应位置上安装一个反射器,激光跟踪头发出的激光束射到反射器上并反射回到跟踪头,当目标移动时,跟踪头调整光束方向来对准目标。同时,返回光束为检测系统所接受,用来测量目标的空间位置。当反射器离开基准位置并在空间移动时,激光跟踪仪会自动跟踪反射器,同时记录干涉测距值 D 及垂直度盘和水平度盘上的角度值 α, β ,用这三个观测值就可得到点的空间三维直角坐标 (x, y, z) ,如图 1^[16]所示。

在飞机装配中,使用单站测量时误差较大。在单站的翼身对接方案研究中,测量误差在 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 左右^[17]。1998 年,四个激光跟踪仪同时测量的方法被首次提出,四个激光跟踪仪在测量时产生了冗余,干涉仪的位置和目标的初始位置通过冗余度被自校准^[18]。对于多次设站或多设备的测量系统,布局规划是影响测量系统精度和效率的一大因素,且布局规划多受环境、飞机部件尺寸等的限制。对于单激光雷达设备,建立激光雷达布局规划的几何约束模型,通过网格法推导激光雷达布局规格的点位,解决单激光雷达设备时的站位规划^[19]。针对组合式测量系统中的站位规划问题,以激光跟踪仪和激光扫描仪为代表,通过构建融合两种设备测量特性的组合测量约束模型,并提出一种

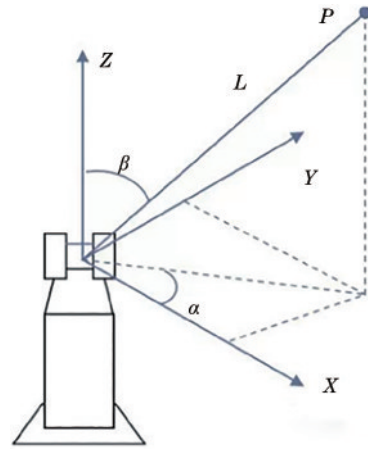


图 1 激光跟踪仪测量原理图^[16]





Fig. 1 Measuring principle diagram of laser tracker^[16]

判断站位可行性的站位评价方法,实现对组合式测量系统中激光跟踪仪的站位规划^[20]。为解决温度对站位规划的影响,通过建立非均匀温度场下的激光跟踪仪测量等模型,对激光跟踪仪站位进行优化计算^[21]。飞机装配测量中,激光跟踪仪在测量时往往需要进行转站操作,转站操作会给测量系统引入误差,对此可建立了一种加权点匹配的计算方法,提高坐标转换的精度,与传统方法相比,该匹配计算方法的标准差减少了约 10%^[22]。

将目前使用较多的数字化测量系统进行对比,分析对比几种主要参数,结果如表 1 所示。室内 GPS

表 1 大尺寸空间数字化测量系统对比

Table 1 Comparison of large-size space digital measurement systems

System of measurement	Principle of measurement	Typical precision	Range	Advantage	Shortcoming
 Laser tracker	Spherical coordinate system, laser absolute ranging, laser interferometric ranging, and grating angle measurement	ADM: $20 \mu\text{m}/\text{m}$; interferometer: $(4 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m})/\text{m}$	35 m	Good dynamic performance, wide measuring range, high ranging accuracy, and good portability	Single use angle error is large and price is more expensive
 Indoor GPS	Principle of triangulation, angular velocity, and time measurement	0.12 mm(10 m)–0.25 mm(40 m)	2–300 m	Full-range measurement, high measuring accuracy, and wide measuring range	Need multiple base stations to cooperate with use and price is high
 Joint measuring arm	Non-orthogonal coordinate system and grating angle measurement	INFINITE2.0: 0.05 mm	3 m	Good portability and freedom	Low degree of automation and low measurement efficiency
 Three-coordinate measuring machine	Cartesian coordinate system and grating ranging	LK H-T: $1.3 \mu\text{m} + \text{length measurement}$, $L(\text{mm})/250 \mu\text{m}$	1000 mm × 400 mm × 600 mm–4000 mm × 1600 mm × 2000 mm	High precision, high efficiency, and good versatility	Poor portability and measuring range is limited by size of workbench

(iGPS)也被广泛用于大空间测量场测量中,精度可以达到 $0.12\text{ mm}/10\text{ m}$,低于激光跟踪仪,但iGPS相对于激光跟踪仪来说不需要进行转站操作,优势是测量误差达到一定值时不再随着测量范围的增大而增加,而且还支持并行测量工作^[23]。摄像测量设备的使用也逐渐增多,但由于存在光学畸变差,每次作业前,都需要对设备进行校验^[24]。由于硬件发展的瓶颈和大尺寸测量逐渐提高的要求,组合式测量系统被提出。

将多种测量设备或系统进行组合测量已成为目前的研究热点和发展趋势,组合式测量可以结合各设备的特性进行优势互补。比较常见的组合有:利用激光跟踪仪与关节臂测量机进行组合测量,可实现比传统单设备

测量更好的效果^[25]。近距离小范围测量设备在实现大尺寸部件检测时,虽然测量精度高、空间可达性好,但是测量范围较小,远距离大空间测量设备正好弥补了这一不足。为了解决大型部件关键局部特征的全局测量和局部测量精度测量之间的矛盾,可通过组合3D扫描仪、激光跟踪仪和工业机器人的测量系统进行测量,该组合测量可将坐标变换的平均误差由 0.022 mm 降到 0.012 mm ^[26]。此外,基于摄影测量的激光跟踪仪测量系统,也可提高激光跟踪仪的转站精度^[22]。采用多种测量设备或不同测量系统组合的测量方法可以减少设备转站,同时重点关注局部关键特征,从而满足大尺寸零部件的检测需求^[27]。如图2所示。

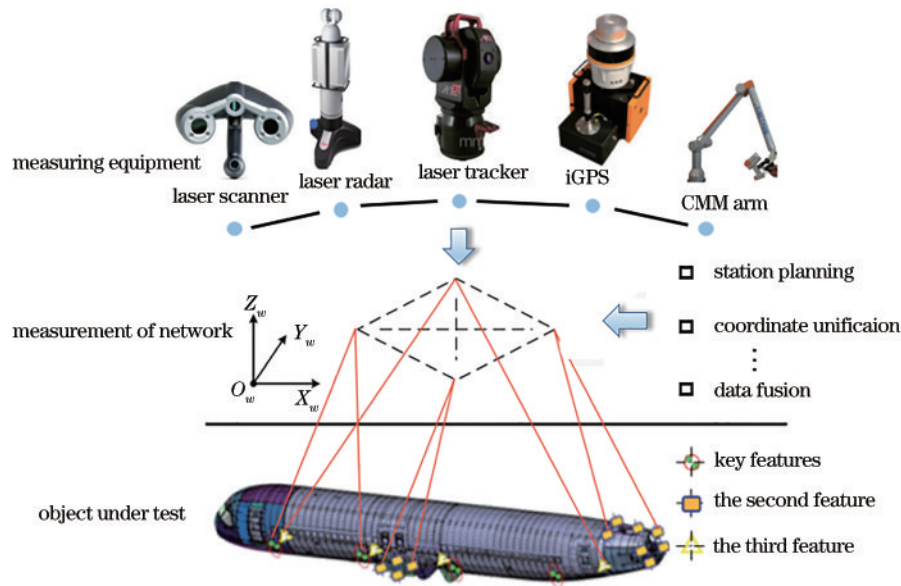


图2 组合式大尺寸测量

Fig. 2 Multi-modular large size measurement

2.2 大空间测量场坐标系转换精度优化设计

在飞机装配时,常以预设的全局坐标系作为统一的转配基准,并设置多个测量站位对装配对象进行三坐标测量,以保证部件的位置正确,并适应不同机型或产品的变化。利用若干个固定公共点进行测量,并根据名义坐标测量当前坐标系中的位姿,将测量点坐标转换到全局坐标系下^[28]。这些固定公共点称为增强参考系统(ERS)点。这些ERS点分散地部署在装配体中,多个ERS点组成大规模参考系统(LRS)。如图3所示。

跟踪仪转站时的坐标转换实质上是点的匹配问题,坐标转换时,需要在不同仪器站下测量ERS的坐标,并通过点集配准算法计算ERS到装配坐标系的最佳转换参数,计算得到各个待测点的坐标值,相比于直接测量,经过点集配准后的数据融合,测量精度得到提升。点集配准常用的算法有奇异值分解(SVD)法、四元数法、最小二乘解法、迭代最近点(ICP)法^[30]。为提高计算效率,考虑不同公共点点位方差权重的方法被

提出,利用一种改进的迭代加权最小二乘法,实验结果证明,该方法优于传统计算方法。基于非线性优化的点集配准常用于束平差或多传感器融合^[31-32],可重点分析ERS点测量误差的非均匀性和各向异性,建立改进加权模型,通过非线性无约束优化方法,降低坐标系配准误差。结果显示,所有ERS的平均配准误差从 0.058 mm 降低到 0.014 mm ^[29]。通过增加临时参考点的方式来优化坐标转换过程也可提升精度,通过引入一种新的混合参考系统(HRS)来分析和进一步降低坐标变换的不确定性,带有三个临时扩展点的系统在尾梁现场测量装配实验中,平均转换不确定度降低了 26% ^[30]。

2.3 大空间测量场精度评估与补偿技术

在大型飞机零部件装配的实际测量过程中,需要用到多台/种测量设备,而且通常需要利用测量设备多站位的方式对产品进行测量,以指导装配过程。虽然现有的检测设备如激光跟踪仪、iGPS等具有较不错的检测精度,但测量精度依然受到设备本身、环境、坐标

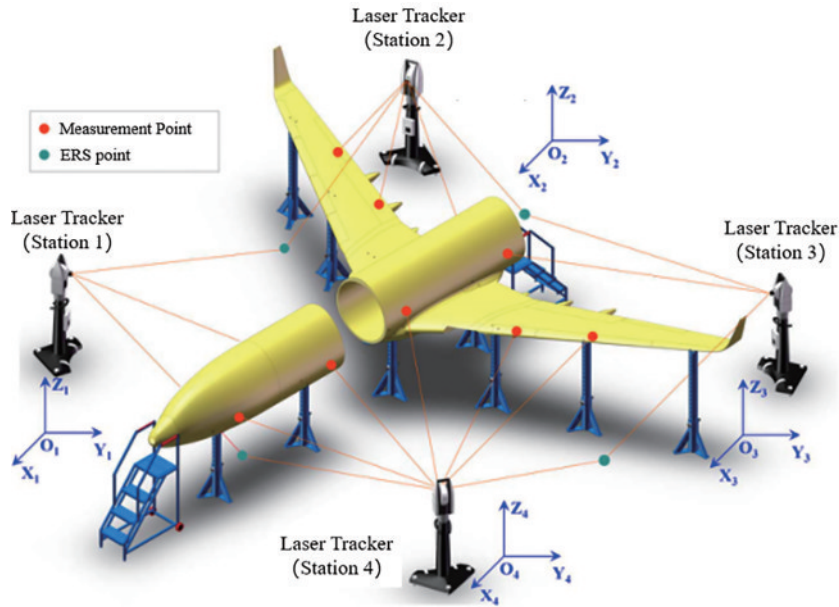


图 3 大型飞机部件车间测量辅助装配系统^[29]

Fig. 3 Measurement auxiliary assembly system for large aircraft parts workshop^[29]

转换等因素的影响,如图 4 所示。若不能有效评估,则可能出现测量误差超出实际测量要求的情况,严重影响数据的可靠性。因此,评估建站误差影响下的跟踪

仪测量不确定度,对保障测量可靠性、预测测量风险具有重要意义^[33]。同时,如何降低和补偿这些因素带来的误差,也对大型飞机零部件的准确装配至关重要。

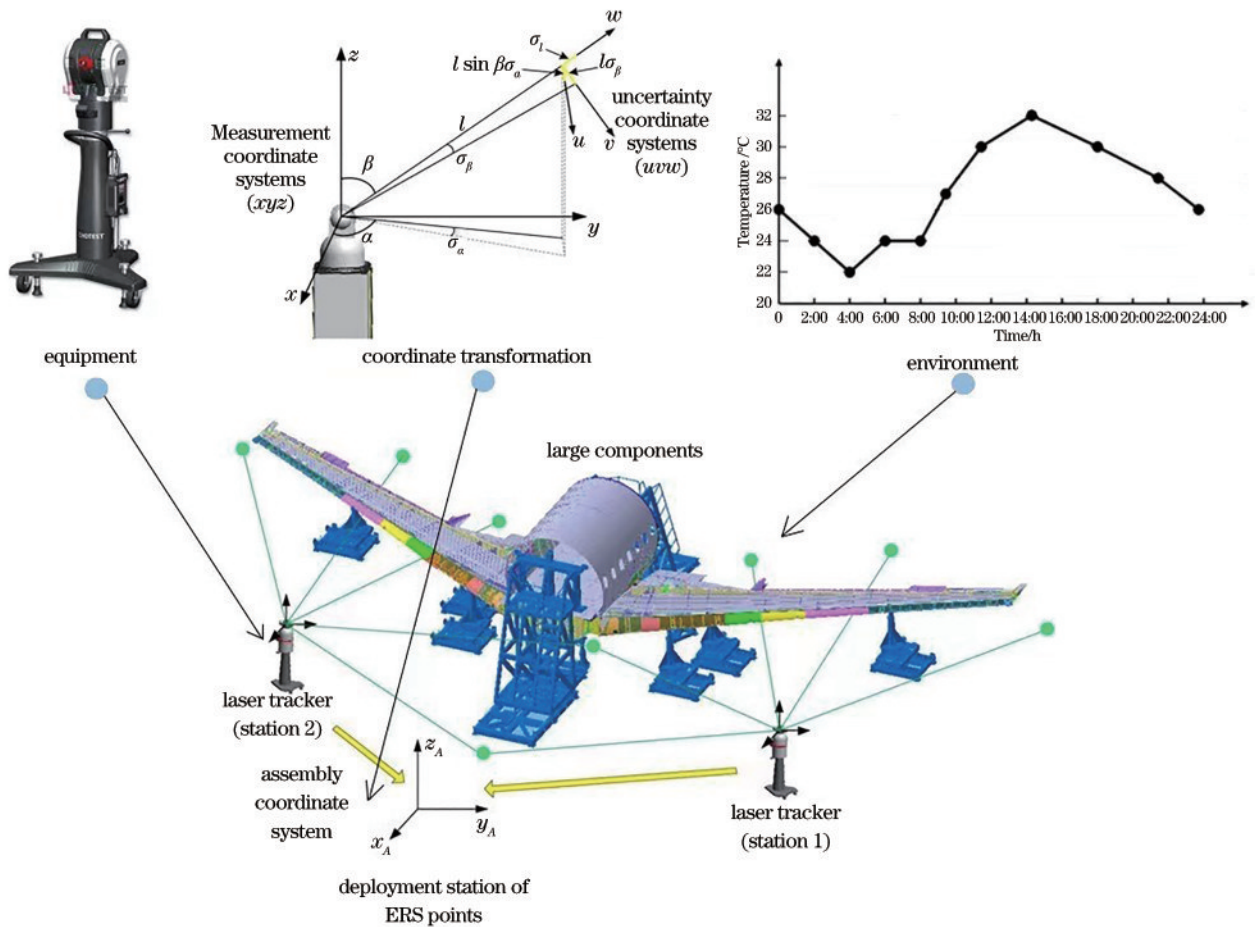
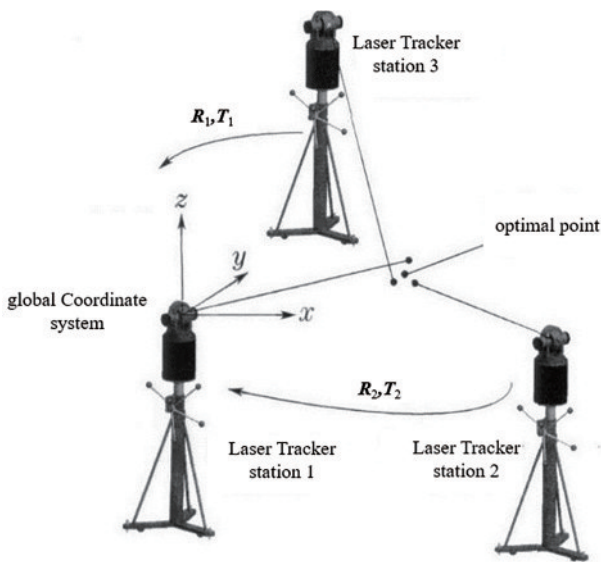


图 4 影响大空间测量场的主要因素

Fig. 4 Main factors affecting large space measurement field

由于大空间测量场测量范围广,常见的测量系统不稳定性的方法是用一个仪器从多个测量站位测量一组固定目标,基于扩展点坐标不变的约束,理论上这些固定点的测量坐标是相同的,但是由于各种因素的干扰,这些固定点的坐标相互之间是有偏差的,对偏差进行统计处理以此来反映系统的不确定性,如图 5 所示。测量场的误差来自多方面,跟踪仪设备本身和系统建站过程中往往会引入误差,对于激光跟踪仪性能的评估,可采用基于网络法的多数据融合方法,用激光跟踪仪在多站位测量一组固定点的坐标,通过数据融合将其中的长度作为参考,以此来评估激光跟踪仪的不确定度,并改进激光跟踪仪误差参数^[34-35],还可通过重点考虑长度测量误差的方法,使用干涉仪作为参考,减小来自光学系统和其他测量系统的误差^[36]。从激光跟踪仪设备在加工、运输、安装中可能产生的误差和不稳定性出发,分析系统的机械和光路结构误差的形成机理,可进行误差模型的建立和优化工作,但未考虑系统建站过程误差^[37]。对于系统建站过程误差,利用对多站束平差(BAMS)方法进行优化,建立一种综合建站误差的仿真评估算法,该方法较单站最佳拟合(BFSS)方法对不确定度拥有更好的约束^[38]。针对测量系统中激光跟踪仪转站误差导致的激光跟踪仪分时多基站测量精度难以保证的问题,可通过建立一种基于转站误差模型的参数修正补偿方法^[39]。面向飞机动态装配过程,利用飞机翼身对接调姿等建立数学模型的方法,实现对大型飞机零部件对接装配偏差的动态修正^[40]。

图 5 多站测量残差^[39]Fig. 5 Multi station measurement residual^[39]

3 飞机大部件装配外形数字化高精度测量方法

飞机装配是保证飞机外形精度的重要环节,提高飞机部件装配外形检测水平对于提升飞机制造质量具

有重要意义。飞机装配部件外形尺寸大、曲面形状复杂、型面测量数据量大,传统单一测量设备测量精度和效率之间的矛盾突出。随着近年来数字化测量技术的不断发展,其广泛应用于飞机大部件装配外形测量过程中,尤其在飞机大尺寸外形轮廓检测、飞机蒙皮对缝间隙、阶差检测以及铆钉平齐度检测等应用中展现出较大优势,这归功于其测量精度和效率的提高以及测量范围的扩大。在测量过程中会产生大量的点云数据,对大规模点云数据进行有效的优化处理对后续测量模型建立的准确度以及相关测量数值的精度十分重要。本章将具体针对数字化测量技术在飞机外形轮廓及蒙皮表面质量检测过程中的应用以及大规模点云数据的处理方法展开介绍。

3.1 飞机大尺寸外形轮廓高精度检测





航空产品中的大部件装配曲面外形准确度决定着飞机的气动/隐身性能,采用合理的方式对飞机大部件装配外形进行检测尤为重要。飞机曲面外形具有尺寸大、形状复杂、测量数据量大的特点,通常采用数字化测量方法实现大部件外形的高精度测量。早期数字化测量多采用接触式测量方法,以三坐标测量机为代表,常应用于整体叶片型面、中间整流罩的检测过程中^[41-42]。接触式测量具有测量精度高的优点,但缺点是效率低、易划伤目标表面且无法实现自动化测量。激光扫描法^[43]、结构光法^[44]、激光雷达法^[45]、摄影测量法^[46]等非接触式测量方法的出现提升了测量范围和测量效率,而且可开发性和自动化程度高的特点使它们在飞机大部件外形自动化测量方面展现出优势。表 2 列举了几种数字化测量系统并对其主要参数及优缺点进行了分析对比。

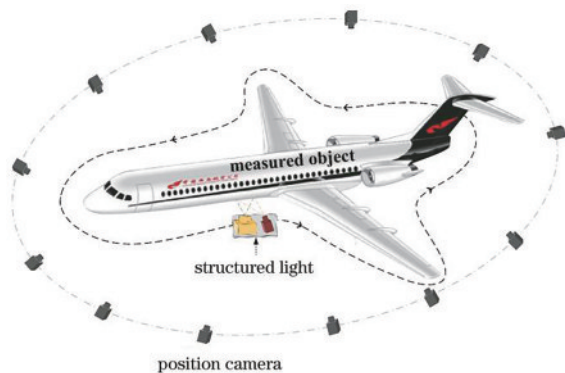
但随着测量要求的进一步提高,单一设备无法兼顾测量精度和测量效率的矛盾愈发明显,近年来许多学者通过构建数字化组合测量系统,使设备性能互补,从而提高测量精度与效率。将关节臂测量仪、激光跟踪仪以及摄影测量组合,在飞机内襟翼上翼面外形精度测量上进行应用与验证,在保证外形测量精度的同时进一步提高了测量效率^[47]。此外,结合结构光重建和摄影测量技术也可实现高精度、高效率、非接触的大尺寸飞机结构外形的三维重建,精度可达到亚毫米量级(0.16 mm 以下)^[48]。如图 6 所示。

为了进一步提升飞机大部件曲面外形的测量精度,需要对数字化测量系统进行站位规划与测量轨迹规划。测量仪器的站位规划是数字化测量的前提,站位的合理性直接影响着测量效率和精度。早期测量站位主要由操作者的经验决定,往往需要反复调整才能满足测量要求,测量效率低,难以满足现代飞机高效的测量需求。针对激光雷达测量飞机大部件外形测量需求,采用基于区域生长算法的站位规划方法得到初始站位,之后引入测量不确定度对其进行优化,该方法相比于经验法和聚类算法更具可行性和有效性^[49]。而对

表 2 外形数字化测量系统对比

Table 2 Comparison of contour digital measurement systems

System of measurement	Principle of measurement	Typical precision	Range	Advantage	Shortcoming
Laser scanner 	Laser triangulation	RIEGL LMS-Z420i: ≤ 10 mm	2–1000 m	Large measuring range, high measuring efficiency, and good portability	Low measurement accuracy
Linear laser measuring instrument 	Laser triangulation	KEYENCE LJ-X8400: 5 μ m	285–600 mm	High precision, high efficiency, and good portability	Small measuring range
Lidar 	Spherical coordinate system, laser frequency modulated coherent ranging, and grating angle measurement	MV330/350: 24 μ m (2 m)– 201 μ m (20 m)	MV350: ≤ 50 m MV330: ≤ 3 m	Good measurement accuracy, resolution and anti-interference performance, large measurement range, and certain portability	Long preheating time and high measurement cost
Digital photogrammetry 	Principles of triangulation and angle measurement by image processing technology	V-STAR S8: (4 μ m + 4 μ m)/m	≤ 10 m	Low requirements for working environment, high measurement efficiency, and good degree of automation	More error sources

图 6 基于后方摄像机视觉定位的全局三维重建原理图^[48]Fig. 6 Schematic diagram of global 3D reconstruction based on visual positioning of rear camera^[48]

于飞机大型蒙皮柔性测量系统,效率优化的扫描站位规划被提出,提升了扫描效率和完整性^[50]。此外,规划轨迹可以使测量设备在满足测量条件的情况下充分发挥性能,最大程度上降低系统误差,提高扫描数据的精确度,从而提升测量精度与测量效率。对于包含激光跟踪仪和工业机器人的自动化扫描系统中的测量轨迹规划问题,首先在 CATIA 中按照结构特征类别进行轨迹的初始规划,之后对测量误差进行分析,建立系统误差预测模型并通过粒子群算法对测量轨迹做进一步优化,可达到快速找到满足扫描约束的同时系统误差最

小的姿态的目的,从而提高曲面扫描的测量精度^[51]。为了提升结构光的检测精度,一种以改进贪心算法为基础的覆盖路径规划方法被提出,降低了视点数目,提升了结构光检测精度,从而提升了曲面外形测量精度^[52],如图 7 所示。

3.2 飞机部件外形表面质量高精度检测

高精度数字化测量技术也广泛应用于飞机外形表面质量检测过程中,包括蒙皮对缝检测以及铆钉平齐度检测等。飞机蒙皮主要通过铆钉固定在机翼骨架外围,其作用是维持飞机的气动外形,必须承担一定的局部气动力,装配时要保证蒙皮对缝的间隙及阶差在允许范围内。此外,蒙皮表面铆钉平齐度对飞机的隐身性能及气动性能也有着比较重要的影响,随着新一代战机对隐身性能及气动外形的要求越来越高,相应地对飞机蒙皮铆接质量提出了更高要求。

传统的蒙皮对缝检测采用塞尺测量,对人工操作要求高、效率低、误差较大,且不能有效采集和处理测量数据。随着数字化测量技术的不断发展,为了提高缝隙测量的精度和效率,国内外学者以线结构光视觉测量和激光扫描为代表的非接触测量方法应用于对缝检测中,如图 8 所示,相关的数字化检测设备,包括美国 Origin Technologies 公司的 Laser Gauge 系列产品、德国 8Tree 公司的 Gap Check 相关产品等均采用非接

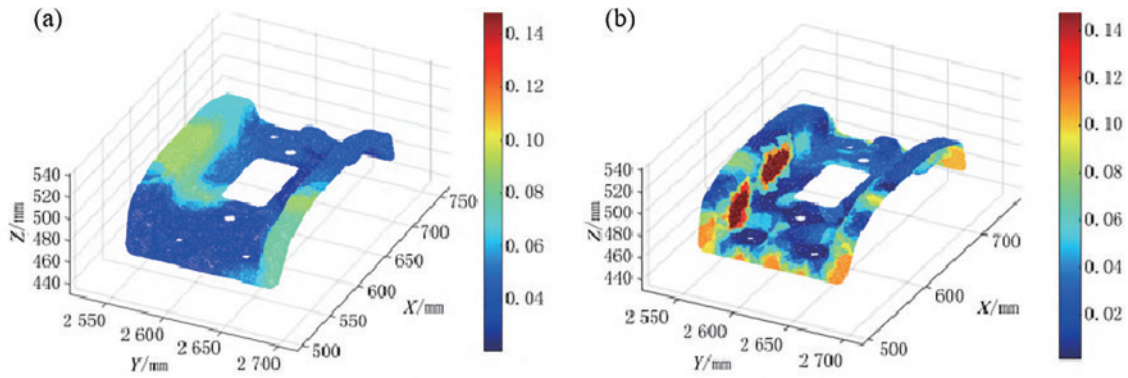


图 7 测量不确定度对比图^[52]。(a)文献[52]方法;(b)目标采样法

Fig. 7 Comparison of measurement uncertainty^[52]. (a) Method in Ref. [52]; (b) target sampling method

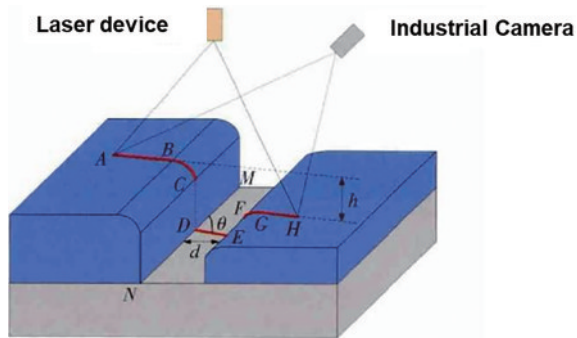


图 8 基于线结构光的阶差与间隙测量模型^[54]

Fig. 8 Stepped difference and gap measurement model based on linear structural light^[54]

触测量方法快速测量蒙皮阶差和间隙^[53]。线结构光视觉传感器可以实现对蒙皮对缝阶差与间隙的尺寸测量,阶差和间隙的重复测量精度分别达到了 0.04 mm 和 0.05 mm 以下^[54]。针对二维激光对缝检测多次测量重复精度不高的问题,基于三维激光扫描的蒙皮对缝检测方法被提出,其间隙和阶差测量精度可分别达到 0.04 mm 和 0.02 mm^[55]。此外,有学者利用机器视

觉的方法,提出了一种基于改进优化算法的飞机蒙皮对缝视觉测量方法,达到精确测量蒙皮对缝间隙的目的,测量精度达到了 0.02 mm 以下^[53]。

对于铆钉齐平度的检测,传统的检测靠人工抽检来实现,即采用传统卡尺或指针式三脚千分表手动检测,测量误差大且有较大局限性。非接触式数字化测量技术在铆钉齐平度检测方面同样展现出优势,构建双目多线结构光测量系统对铆钉齐平度进行测量,可实现对蒙皮表面铆钉头部凸台或凹坑特征的精准测量,精度可达到 0.03 mm 以下,但该系统无法同时测量多个铆钉^[56]。而基于 3D 激光扫描仪的图像采集系统,利用深度学习算法分析处理采集到的图像,可以同时检测多个结果,效率高,重复检测精度达到 0.015 mm,精度相比人工抽检提高较大^[57]。此外,针对铆钉逐一检测任务量大且检测可靠度低的不足,基于面结构光的铆钉齐平度检测方法先提出了一种图像噪声轮廓分割方法,之后基于图像-点云映射策略实现了快速且稳定的分割铆钉点云,铆钉齐平度测量偏差达到了 0.006 mm 以下^[58]。如图 9 所示。

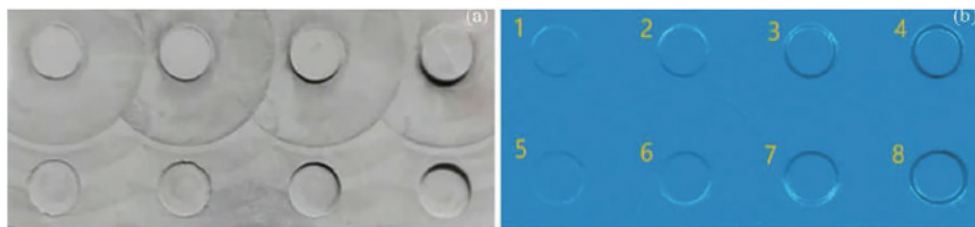


图 9 铆钉标准件及齐平度测量结果^[58]。(a)标准件;(b)测量结果

Fig. 9 Rivet standard part and its flushness measurement results^[58]. (a) Standard part; (b) measurement results

3.3 大规模点云数据高精度优化处理方法

随着数字化测量技术在飞机装配过程中的广泛应用,面对测量过程获得大规模点云数据,需要采用合适的方式对其中的有用信息进行提取。点云数据处理通常包括数据滤波、精简、配准等过程,其效果直接影响后续模型的准确度及数值精度,不断优化数据处理过程对提升组合测量系统的精度和效率起到关

键作用。

测量过程中通常存在一些噪点,需要将其去除以减轻对后续数据处理的影响,有效的滤波算法是点云数据优化处理的基础。常见的点云滤波算法有直通滤波、体素滤波、统计滤波、条件滤波、高斯滤波以及双边滤波等。同时一些新的方法不断出现,比如将统计滤波和双边滤波相结合的去噪方法可结合两种传统方法

的优点,去噪效果有极大的提升^[59]。

针对采集的点云过于密集且有冗余的情况,精简点云数量可提高运算速度且有利于进行更好的配准、特征提取、曲面重建与可视化。常用的方法包括包围盒法、聚类法、均匀网格法、三角网格法以及曲率采样法等。此外,有学者对传统方法进行改进并提出新方法,基于二分 K-means 聚类的曲率分级优化精简算法改善了单一精简算法不能精准保留模型特征且易造成点云孔洞等问题^[60]。

测量数据的高精度融合也是提高测量精度与效率

的重要途径之一。在数字化组合测量过程中,需要对单设备在不同位置测量所获得的点云数据进行配准(图 10),即数字化设备多站数据融合。针对测量设备多站数据融合问题,稳定性较强的四元数法可用于转换参数的求解,而数据中的不准确数据则采用粗大误差提取法进行删除^[61]。为解决大尺寸部件在三维重建时点云配准易产生误差累积以及误匹配点的问题,基于鲁棒核函数的点云配准算法被提出,在迭代最近点算法(ICP)的基础上改进目标函数以减小误匹配点的影响,并利用最小化点云对整体误差的方法减小了累积误差^[62]。

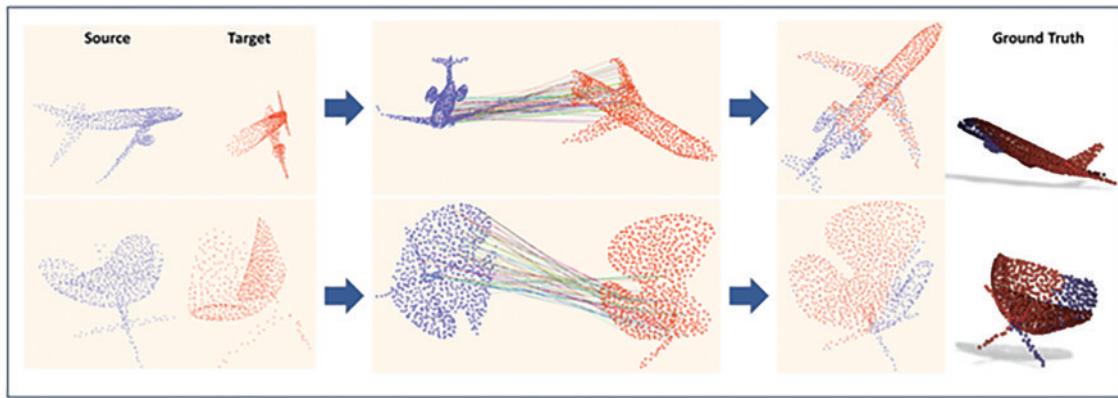


图 10 多视角点云配准流程示意图^[62]

Fig. 10 Schematic diagram of multi-view point cloud registration process^[62]

单一设备的数据融合后,对于采用多种测量设备的组合测量系统还需对不同设备的数据进行高精度融合,即跨源点云配准技术。为解决多尺度复杂数据集建模和融合的难点,一种重建-配准集成数据融合方法在加权平均法的基础上被提出,借助高斯过程模型,考虑各数据集的相关误差,提高了融合结果的质量^[63]。而面对同样的挑战,一种基准辅助数据融合方法(FADFM)的不确定度可达 $3.97 \times 10^{-5} \mu\text{m}$,与基于高斯过程的数据

融合技术相比,均方根(RMS)值提高了 36.1% 以上^[64]。为了融合来自激光扫描仪的大量测量数据和来自触摸探针的少量测量数据,一种用于表面测量的多源集成融合(MSIF)框架被提出,根据此框架开发了加权多源集成融合(MSIF-W)和叠加多源集成融合(MSIF-S)两种算法,并在真实飞机蒙皮表面进行了综合仿真和实际测量,结果表明,所提出的 MSIF 可以有效地提高多传感器数据集融合精度^[65],如图 11 所示。

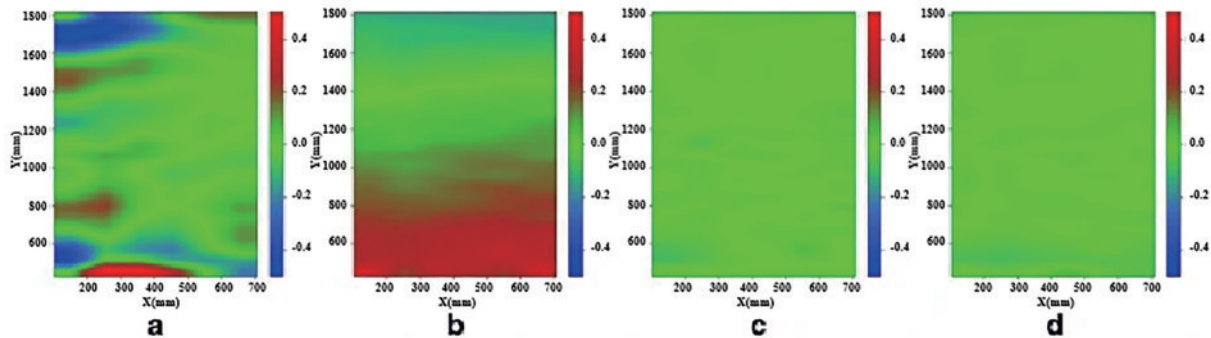


图 11 曲面误差图^[65]。(a)探针数据拟合表面;(b)扫描仪数据拟合表面;(c) MSIF-S 融合结果;(d) MSIF-W 融合结果

Fig. 11 Error map of curved surface^[65]. (a) Surface fitted with probe data; (b) surface fitted with scanner data; (c) MSIF-S fusion results; (d) MSIF-W fusion results

4 面向复合材料装配缺陷的高精度检测技术

航空复合材料具有重量轻、比刚度大等优点,既能

减轻飞机重量,也提高了飞机整体互换性,方便维护,在飞机制造领域得到了广泛的应用。但此类复合材料由于装配时的应力变化会产生脱黏、分层、夹杂等装配缺陷,对产品的安全使用及长时间服役造成严重威胁,

因此需要对复合材料装配过程中产生的缺陷进行高精度检测。

针对不断装机应用的各种新的航空复合材料、新的复合材料成型工艺、新的复合材料结构和新的检测与缺陷评估要求,从检测方法分类上,主要体现在激光检测、超声检测、X 射线检测和太赫兹检测技术等^[66]。近几年,随着众多学者对信号处理、图像处理和三维信号重构等技术的研究,使得检测精度和缺陷数据后处理能力逐步提升,面向复合材料装配缺陷的高精度检测方法及技术逐步趋于智能化、自动化、可视化。

4.1 复合材料装配缺陷检测设备

随着复合材料在航空领域的不断扩大应用,面向飞机装配的缺陷检测技术及相关仪器设备研究已成为业内高度关注的技术热点方向和应用方向。特别是纤维增强树脂基复合材料在飞机机身、机翼等非常重要的关键结构部位的应用,对检测技术和检测仪器设备提出了更高测量精度和测量效率等的要求,国内外学者对此展开了大量研究,下面对近几年新兴测量仪器设备及相关技术原理进行概述。

1) 激光超声检测仪

激光超声检测仪是利用激光脉冲辐照材料表面,因热弹性效应产生应力脉冲,应力脉冲同时以纵波、横波和表面波等形式的超声波向试样内部或沿表面传播,通过超声波的反射、散射或衰减表征缺陷,进行材料和结构检测。近年来,对于激光超声机理和技术的研究有了重要突破,在激光超声信号的激发、接收、传播理论和应用等方面取得了很大的进展。激光超声检测仪测量较厚复合材料时信噪比较低,一些学者就此问题研究了激光束尺寸和轮廓对脉冲回波激光超声波信号幅值的影响,实验表明,在峰值能量密度恒定的情况下,直射波和反射波的振幅随着激光束尺寸的增加而增大。这种振幅的增强可显著提高传播深度,从而优化较厚复合材料结构检测系统^[67]。为提升较薄复合材料的检测精度,有学者提出了使用带通滤波器提取所需波长的方法,该方法节省了时间,且将检测精度提升至毫米量级^[68]。

2) 超声红外热成像仪

超声红外热成像仪是把短脉冲、低频度的超声波应用在物体表面,超声波通过接触面耦合于物体内部进行传播。若发生裂纹、分层等损坏的状况,机械可在损坏部位摩擦等作用明显减弱,同时生成热量,继而提升损坏位置和邻近范围的温度,其相应表面温度场的改变可运用红外热像仪进行观测与记载^[69-70]。为减少检测过程中超声能量耗散,一些学者研究夹具固定方法对超声红外热像检测结果的影响,结果表明,对于同一待测结构,边界越固定,自由度越受到限制,检测过程中超声能量耗散越小,检测效果越好。图 12 所示为改进后的超声红外热成像检测系统^[71]。

3) X 射线成像仪

Infrared camera

Ultrasonic horn



Sample

Ultrasonic controll

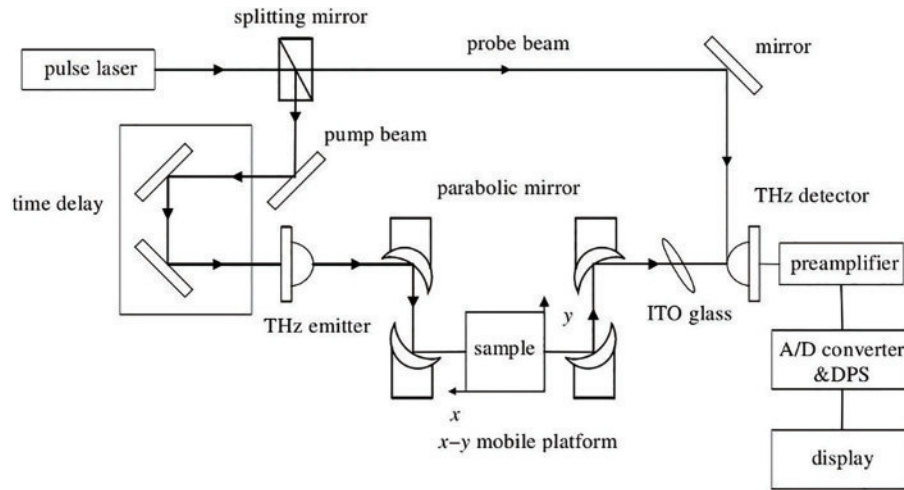
Computer

图 12 大功率超声红外热成像检测系统^[71]Fig. 12 High-power ultrasonic infrared thermal imaging detection system^[71]

X 射线成像仪常用于检测复合材料孔隙、夹杂物和冲击损伤等体积性缺陷,X 射线在透射物质时,由于物质对射线吸收程度的不同使得透射过物质后射线的强度也会有所差异,这种差异反应了物质的一部分特征(或者信息),成像单元检测到这种差异并将这种差异记录下来,即形成了 X 射线图像,这种差异反应在 X 射线图像中就是图像灰度值的明暗程度的差别。检测人员则根据获取的 X 射线图像来对被检测物体进行检测,这就是 X 射线无损检测的基本原理^[72]。作为 X 射线数字成像技术的一种,计算机层析成像技术(CT)克服了传统数字透照成像存在的三维结构二维投影成像深度信息缺失的问题,可实现产品内外型面与损伤、缺陷的高精度定性定量无损检测评价与三维建模分析,在复合材料检测方面应用前景广阔。但受成像原理制约,CT 技术难以对长宽厚度比较大的板、壳结构实施有效的检测。为克服 CT 技术在板壳结构成像检测方面的不足,近年来,发展了一种分层层析成像(CL)技术。它是一种先进的非接触式无损三维检测技术,既继承了 CT 高分辨率三维无损成像的优点,又克服了 CT 在异型结构检测方面的难题,能以高分辨率图像的形式直观地三维可视化产品内部结构与缺陷^[73]。

4) 太赫兹时域光谱仪

太赫兹时域光谱仪 (THz-TDS) 具有对复合材料的穿透能力强、可进行非接触检测、对人体无害以及不必使用耦合剂等优点^[74]。其检测原理如图 13 所示,由脉冲激光器发出的超快激光脉冲经过偏光分束镜被分为两束:一束作为泵浦光,入射到太赫兹发射器上,用于产生太赫兹脉冲,此脉冲经抛物面镜聚焦后入射到待测样品上;另一束作为探测光,与从样品中透射出的载有样品信息的太赫兹电磁脉冲共线经过太赫兹探测器。调整时间延迟装置,测量不同探测光到达时间下

图 13 THz-TDS 扫描成像系统原理图^[74]Fig. 13 Schematic diagram of THz-TDS scanning imaging system^[74]

太赫兹电场强度的变化量,太赫兹脉冲通过被测品的不同点,对其进行逐点扫描,记录下该样品不同位置的透射谱信息,从而测得样品缺陷的整体存在情况^[74]。太赫兹脉冲信号经过复合材料装配缺陷部位后,能量会发生损耗,针对微弱太赫兹信号的放大,国内外学者逐步开展了超导太赫兹天线耦合微测辐射探测器(ACMB)的相关研究工作,设计、制备出高性能的 ACMB 器件,并基于制备的器件搭建了一套二维扫描太赫兹被动成像系统,取得了良好的成像效果,验证了 ACMB 器件在复合材料检测中的巨大优势^[75]。

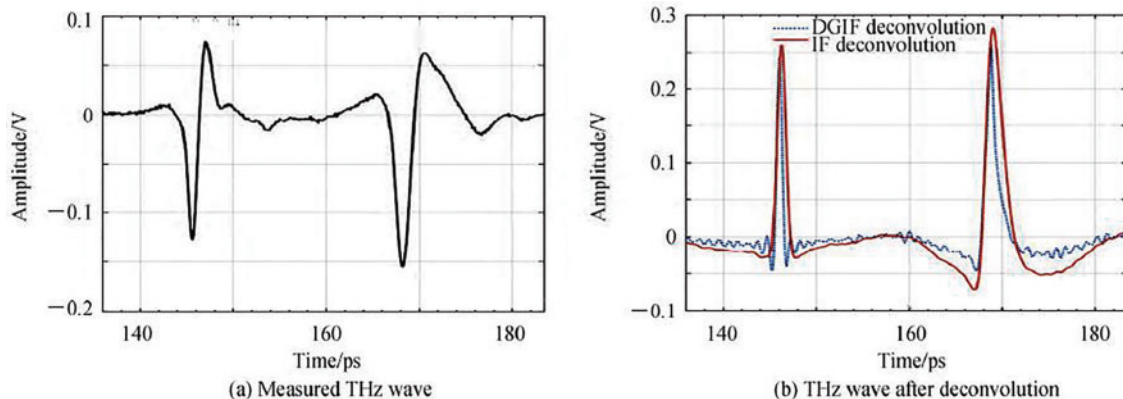
测量仪器设备的性能决定着复合材料装配缺陷的检测精度及效率,检测仪器测得的复合材料缺陷数据是后续进行信号精确提取、缺陷图像处理及缺陷三维可视化的研究基础。

4.2 复合材料缺陷特征信号精确提取技术

复合材料在装配过程中产生的缺陷种类多样且形状复杂,且由于环境干扰导致信号噪声过多,容易淹没缺陷特征信号,使检测难度增加。复合材料缺陷高精度识别与分析,需要对信号进行优化处理,主要包括以下两个方面:1)信号去噪。获得的全体数据进行去噪

处理以减小噪声信号对特征信号的干扰;2)特征信号提取。对缺陷对应的特征信号进行保护、分离和放大等操作以增强微小特征信号。

有学者利用双高斯脉冲滤波技术对缺陷的时域信号进行滤波优化,信号优化结果如图 14 所示,结合脱黏缺陷处的时域波形数据特征,采用缺陷特征时间区域优化技术,可去除大部分噪声^[76]。但滤波器在去噪时容易滤除特征信息从而降低信号的信噪比,先进的去噪算法可有效提高信号的信噪比从而提升检测分辨率,一种混合阈值经验模态分解(EMD)消噪算法由此被提出,实验结果表明,改进的 EMD 算法具有良好的去噪效果^[77]。时域有限差分方法(FDTD)或有限元方法也可以有效改善信号分量的性能,降低信号噪声干扰,改善后测量精度可达 1 mm,相对误差小于 10%,较传统方法有显著提升^[78-79]。近年来,小波变换方法常用于信号去噪,利用小波收缩去噪法可有效去除水蒸气引起的波动并保留与分层缺陷相关的特征信号^[80]。单独使用小波变换去噪效果有限,一种小波变换、互相关技术和希尔伯特黄变换相结合的超声信号混合处理方法被提出,该方法提高了玻璃纤维复合材

图 14 测量信号与反卷积信号对比^[76]。(a)测量信号;(b)反卷积信号Fig. 14 Comparison of measured signal and deconvolution signal^[76]. (a) Measured signal; (b) deconvolution signal

料内部分层缺陷的检测效率^[81]。此外,还可以结合小波变换与信号卷积方法对缺陷图像进行重构,重构后图像细节处分辨率和结构准确度有明显提升^[82]。

缺陷特征信号的准确提取对于确定缺陷类型及程度也十分关键。针对微弱信号的特征提取问题,利用局域半经典信号分析(LSCSA)算法,对时域信号进行量化处理,从而可实现对特征信号的提取与保护^[83]。此外,反卷积处理也是准确提取样品特征信号的手段之一,对样品信号和参考信号进行频域反卷积处理得到系统的脉冲响应函数,采用“谐振峰寻峰法”提取缺陷特征的回波信息^[84]。利用逆滤波反卷积法在反卷积后进一步进行去噪处理,也可使特征信号更为清晰^[85]。

4.3 复合材料缺陷高精度图像处理技术

对精确提取后的信号进行成像可直观显示复合材料缺陷位置,但获得的图像较为模糊且特征不明显,因此可以通过图像融合和超分辨率成像两方面提升缺陷图像质量,从而实现缺陷的高精度测量与定位。

图像融合是将 2 张或 2 张以上的图像信息融合到 1 张图像上,使最后的图像含有更多的缺陷信息。图像融合可以结合不同类型检测设备的优势,脉冲红外热成像适合于检测分层缺陷,特别是大面积分层缺陷,而超声红外热成像更适合检测微小缺陷,如孔隙、基体开裂、纤维断裂等,两种方法的融合提升了 CFRP 冲击和分层缺陷的探测能力与精度^[86];对超声和 X 射线计算机层析成像方法分别检测的数据进行融合成像也是常见的图像融合方法,该方法可提高碳纤维增强复合材料中装配缺陷的成像分辨率^[87];红外热成像技术和相控阵超声技术的融合对碳纤维复合材料中的冲击损伤检测效果良好,可解决由加热不均匀而引起的背景模糊问题^[88];将高速 X 射线成像、声传感器和机器学习相结合,使用先进的独立成分分析(ICA)方法,能使分类准确率达到 95%^[89]。除对不同检测方式得到的图像进行融合外,还可以研究不同融合方式对成像精度的影响,有学者分别研究了三种融合方法来测试图像融合对检测冲击缺陷的影响:1)二进制图像融合;2)代数融合;3)主成分分析融合。结果表明,使用主成分分析图像融合方法时,等效直径测量误差降低了 72.21%^[90]。

图像超分辨率成像可分为两类:一类为图像插值法,该方法通过增强图像边缘来提升图像分辨率^[91],由于算子本身的低通性难以精确识别图像边缘,导致图像边缘模糊^[92];另一类为应用学习方法实现图像分辨率的提高,其中稀疏编码和卷积神经网络等是目前常用的学习方法^[93]。通过稀疏学习方法提升图像分辨率在近些年发展迅速,通过数值模拟和实验验证发现,稀疏表示(SR)法在确定复杂信号的分层厚度方面表现出优异的性能^[94]。基于稀疏贝叶斯学习(SBL)谱图积分的方法^[95]可对具有分层缺陷的多层玻璃纤维增强聚合物(GFRP)复合材料进行超分辨率表征,采用局部峰峰分层成像方法,对各分层缺陷的横向位置和大小

进行量化处理,检测精度较图像插值方法有较大提升,如图 15 所示。

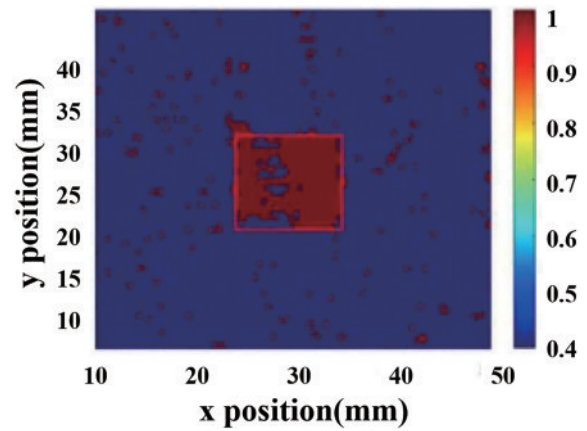


图 15 稀疏贝叶斯方法重建 THz-TDS 高分辨层析成像表征正方形分层缺陷^[95]

Fig. 15 Reconstruction of THz-TDS high-resolution tomography by sparse Bayesian method to characterize square layered defects^[95]

在基于人工智能算法的缺陷检测应用研究方面,利用深度卷积神经网络,通过对基于小波变换系数的信号分类任务进行训练,将分类后的信号作为输入信号进行 CT 扫描成像,获得的图像噪声小且图像更加清晰^[96]。此外,有学者利用三种神经网络模型对收集的缺陷时域信号或频谱信号进行处理,并进行缺陷的检测和分类。结果表明,一维卷积神经网络模型总体上优于长短期记忆递归神经网络(LSTM-RNN)和双向 LSTM-RNN 模型^[97]。如图 16 所示,该模型可以自动有效地重建具有不同颜色像素的图像,显示无缺陷区域和不同深度的缺陷区域。

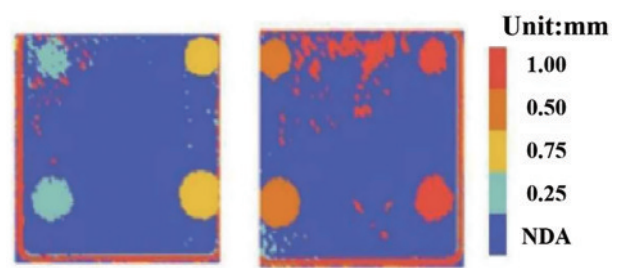


图 16 神经网络方法重建 THz-TDS 高分辨成像表征圆形分层缺陷^[97]

Fig. 16 Reconstruction of THz-TDS high-resolution imaging by neural network method to characterize circular layered defects^[97]

4.4 复合材料缺陷三维可视化技术

对复合材料缺陷进行三维重构可准确定位缺陷位置和计算缺陷面积,是目前研究的热点。三维重构可显示脱黏、分层和裂纹等不同类型的缺陷三维形貌。因为脱黏部分的空气层太薄而无法检测,因此脱黏定位是多层结构复合材料高精度检测的难点,针对碳纤

维增强基复合材料(CFRP)的脱黏缺陷高精度三维可视化,有学者采用基于全体积超声扫描的先进超声评价技术,对 CFRP 航空部件进行表征和三维厚度重建,以实现缺陷的三维可视化^[98]。此外,有学者利用小波变换方法来处理检测数据,并通过小波系数重建测试样品的三维图像,此方法可以清楚地识别脱黏区域并准确定位^[99]。对于装配过程中常见的冲击损伤,由于冲击损伤的形貌较为复杂,传统检测方式难以准确定位识别,为此,有学者融合超声和 X 射线检测数据进行三维重构,从三维可视化结果中可以直观地看到损伤的区域和深度,该方法大幅提高了碳纤维增强复合材料冲击缺陷的成像分辨率^[100]。为检测复合材料常见裂纹缺陷,利用数值分析方法模拟超声作用下复合材料裂纹位置的摩擦生热和热传导过程,对图像内的裂纹位置进行特征提取,最后对裂纹缺陷进行三维重构,从而实现复合材料裂纹缺陷的准确定位^[101]。

为提升三维重构可视化精度,基于多技术融合的三维重构方法近年来发展迅速,将三维激光扫描仪得到的高精度离散型点云数据和红外热成像仪探测的目标轮廓信息实现影像数据和三维点云模型数据融合,从而实现同时获取缺陷面积大小、位置和轮廓信息的效果^[102],检测精度为毫米量级。为进一步提升检测精度,有学者利用合成孔径聚焦技术(SAFT)检测亚毫米量级缺陷,通过重构缺陷信号来提高信噪比,并利用噪声统计法区分缺陷信号和噪声的空间相关阈值,SAFT 法增强了不同深度缺陷的信号,并使用这些信号构建了 3D 图像,立体地显示复合材料内部缺陷^[103],成像结果如图 17 所示。传统三维重构方法数据处理过程复杂,随着计算机科学和自动化成像技术的迅速发展,有学者设计了一套基于 X 射线无损检测技术的三维重建软件,缺陷建模结果与实际测量结果吻合较好,大大简化了复合材料缺陷三维重构过程。

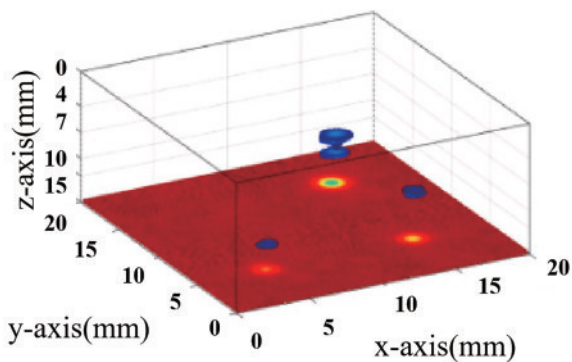


图 17 试样的三维重构结果^[103]

Fig. 17 Three-dimensional reconstruction results of specimens^[103]

5 结束语

精密测量技术的应用是保证新一代大型飞机产品装配质量的重要抓手。本文总结了国内外大型飞机装

配过程中高精度测量技术研究与应用现状,包括飞机装配大空间测量场高精度测量方法、飞机大部件装配外形数字化高精度测量方法,以及面向复合材料装配缺陷的高精度检测技术三个方面的内容。

对于飞机装配大空间测量场高精度测量,传统方法多基于单台或单种测量设备,导致精度及效率不足,一些研究者通过两种或以上测量方法结合协同工作的方式进行优缺点互补,如利用 iGPS 与激光跟踪仪构建组合测量平台以实现实时监控装配过程并保证后期精度。在使用多种测量设备时,因受制于飞机部件和装配的限制,单台设备并不能单独测量所有目标点,需要各种设备的协同工作,不同设备间的数据相互独立,需建立配置统一基准的测量场。因此,通过测量场配置优化、坐标系优化、精度评估与补偿等技术来提升测量场的构建效率及精度是当前及未来的发展方向。而对于飞机大部件装配外形数字化高精度测量,飞机部件装配外形尺寸大、曲面形状复杂、型面测量数据量大,单一设备测量精度和效率之间矛盾突出。目前国内外主要采用构建组合数字化测量系统的方式,并通过优化测量轨迹、提高视觉检测精度、大规模点云数据融合等技术手段充分发挥各测量设备的优点,来保证飞机大尺寸外形轮廓和飞机外形表面质量检测应用过程中的效率及精度。因此,组合式数字化测量系统及多技术的融合研究是未来发展和提升的重要方向。针对复合材料装配缺陷的高精度检测,传统检测技术存在精度不足、效率低等问题,对此,国内外学者在缺陷信号处理、缺陷图像处理及三维可视化重构等三个方面展开了研究,并大幅提升了对复合材料装配缺陷的检测能力。面向日益复杂的复合材料一体化成型工艺以及不断提高的检测需求,在保持高检测精度的前提下,智能化、可视化、自动化的无损检测是未来的发展方向。

在数字化工厂和智能制造的背景下,根据目前大型飞机装配中的高精度测量技术及系统的特点,我国应立足于具体型号及实际应用场景,深入开展高精度测量技术及系统的应用和研究,并形成相应技术体系,充分发挥数字化高精度测量技术的优势。未来,多数字化测量系统协同工作、大空间数字化测量场构建,以及部件装配外形数字化及装配缺陷检测,对提高我国飞机制造的水平 and 核心竞争力具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 刘检华,孙清超,程晖,等.产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J].机械工程学报,2018,54(11):2-28.
Liu J H, Sun Q C, Cheng H, et al. The research status, technical connotation and development trend of product assembly technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28.
- [2] 肖庆东,张学睿,郭飞燕,等.飞机装配质量主动实时控制技术研究现状与发展趋势[J].航空制造技术,

- 2021, 64(20): 22-35.
Xiao Q D, Zhang X R, Guo F Y, et al. Research status and development trends of active real-time control of aircraft assembly quality[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(20): 22-35.
- [3] 隋少春, 朱绪胜. 飞机整机装配质量数字化测量技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(11): 1449-1460.
Sui S C, Zhu X S. Digital measurement technique for evaluating aircraft final assembly quality[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2020, 50(11): 1449-1460.
- [4] 韩志仁. 大飞机数字化制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(S1): 53-57.
Han Z R. Key technology for digital manufacturing of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(S1): 53-57.
- [5] 刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 航空复合材料无损检测与评估技术研究进展回顾[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 14-27.
Liu S P, Liu F F, Li L G, et al. Review of research progress on nondestructive testing and evaluation techniques for aero-composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 14-27.
- [6] 唐国栋. 航空复合材料无损检测技术发展分析[J]. 中国设备工程, 2020(19): 12-13.
Tang G D. Development analysis of nondestructive testing technology for aviation composite materials[J]. China Plant Engineering, 2020(19): 12-13.
- [7] 薛翔, 张彤阳. 现代飞机装配工艺及展望[J]. 现代制造技术与装备, 2018(10): 184-185.
Xue X, Zhang T Y. Modern aircraft assembly process and prospect[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(10): 184-185.
- [8] 张永亮, 姜杰凤, 毕运波. 飞机确定性装配技术及应用[J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 38-45, 62.
Zhang Y L, Jiang J F, Bi Y B. Aircraft determinate assembly technology and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(18): 38-45, 62.
- [9] 金涨军. 飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Jin Z J. Establishment and optimization of large-volume measuring field in aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [10] 杨凡, 范百兴, 李广云, 等. 大尺寸高精度三维控制网络技术探讨[J]. 测绘科学技术学报, 2015, 32(2): 120-124.
Yang F, Fan B X, Li G Y, et al. Discussion on precise three-dimensional coordinate control network in field large-space measurement[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(2): 120-124.
- [11] Zhao Z Y, Zhu J G, Xue B, et al. Optimization for calibration of large-scale optical measurement positioning system by using spherical constraint[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(7): 1427-1435.
- [12] 李美琦, 徐辉, 徐超. 柔性装配测量系统的质量控制[J]. 工业计量, 2021, 31(6): 12-14, 17.
Li M Q, Xu H, Xu C. Quality control of flexible assembly measurement system[J]. Industrial Metrology, 2021, 31(6): 12-14, 17.
- [13] Peggs G N, Maropoulos P G, Hughes E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(6): 571-595.
- [14] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, et al. Large-scale dimensional metrology (LSDM): from tapes and theodolites to multi-sensor systems[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1739-1758.
- [15] Payne J M, Parker D, Bradley R. Rangefinder with fast multiple range capability[J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(6): 3311-3316.
- [16] 杜福洲, 文科. 大尺寸精密测量技术及其应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(11): 16-24.
Du F Z, Wen K. Large-scale precision measurement technology and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(11): 16-24.
- [17] 王巍, 周天一, 王诚鑫. 基于激光跟踪仪测量系统的翼身对接技术研究[J]. 装备制造技术, 2018(10): 203-206, 220.
Wang W, Zhou T Y, Wang C X. Research on wing body docking technology based on laser tracker measurement system[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(10): 203-206, 220.
- [18] Takatsuji T, Goto M, Kurosawa T, et al. The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration[J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(1): 38-41.
- [19] 周新房, 许斌. 飞机装配中激光雷达测量场布局规划方法探讨[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 72-77.
Zhou X F, Xu B. Discussion on layout planning method of laser radar measurement field in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 72-77.
- [20] 熊涛, 李泷杲, 李琦, 等. 基于组合测量的激光跟踪仪站位规划[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1712001.
Xiong T, Li S G, Li Q, et al. Station planning of laser tracker based on combination measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1712001.
- [21] 朱绪胜, 刘蕾, 陈雪梅. 基于蒙特卡洛仿真的车间现场激光跟踪仪测量站位优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(11): 3001-3010.
Zhu X S, Liu L, Chen X M. Measurement Station optimization for laser tracker *in situ* using based on Monte-Carlo simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(11): 3001-3010.
- [22] 黄鹏, 王青, 李江雄, 等. 激光跟踪仪三维坐标转换综合优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2912-2920.
Huang P, Wang Q, Li J X, et al. Comprehensive optimization for three-dimensional coordinate transformation of laser tracker[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2912-2920.
- [23] 王莉, 方伟, 邢宏文. 大尺寸空间测量方法的实施及应

- 用[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1): 48-51.
- Wang L, Fang W, Xing H W. Implementation of measurement method for large scale roomage[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(S1): 48-51.
- [24] Zhou Z L, Liu W, Wang Y X, et al. An accurate calibration method of a combined measurement system for large-sized components[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(9): 095013.
- [25] 王诚鑫, 王巍, 周星宇, 等. 一种基于激光跟踪仪与关节臂测量机的大尺寸工件组合测量方法[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 503-506.
- Wang C X, Wang W, Zhou X Y, et al. Combined measuring method for large components based on laser tracker and articulated arm measuring machine[J]. Applied Laser, 2020, 40(3): 503-506.
- [26] Zhou Z L, Liu W, Wu Q, et al. A combined measurement method for large-size aerospace components [J]. Sensors, 2020, 20(17): 4843.
- [27] Chen Z H, Du F Z, Tang X Q. Position and orientation best-fitting based on deterministic theory during large scale assembly[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(4): 827-837.
- [28] 李强, 王津, 张磊, 等. 基于激光跟踪仪的大型火箭包络测量技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(2): 22-26.
- Li Q, Wang J, Zhang L, et al. Research on envelope measurement technology of large rocket based on laser tracker[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2019, 55(2): 22-26.
- [29] Lu Y K, Liu W, Zhang Y, et al. An accurate calibration method of large-scale reference system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 6957-6967.
- [30] Deng Z P, Li S G, Huang X. Coordinate transformation uncertainty analysis and reduction using hybrid reference system for aircraft assembly[J]. Assembly Automation, 2018, 38(4): 487-496.
- [31] Predmore C R. Bundle adjustment of multi-position measurements using the Mahalanobis distance[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1): 113-123.
- [32] 章平, 常晏宁, 王皓. 基于全站仪的大尺寸测量场数据融合技术[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 140-144, 149.
- Zhang P, Chang Y N, Wang H. Research on data fusion technology in large scale measurement field based on total station[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(3): 140-144, 149.
- [33] 杨林志, 陈洪宇, 申皓. 综合建站误差的激光跟踪仪测量不确定度评估[J]. 制造技术与机床, 2021(8): 186-191.
- Yang L Z, Chen H Y, Shen H. Evaluation of measurement uncertainty of laser tracker considering the station building error[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(8): 186-191.
- [34] Wang L, Muralikrishnan B, Icasio Hernandez O, et al. Performance evaluation of laser trackers using the network method[J]. Measurement, 2020, 165: 108165.
- [35] Icasio-Hernández O, Bellelli D A, Brum Vieira L H, et al. Validation of the network method for evaluating uncertainty and improvement of geometry error parameters of a laser tracker[J]. Precision Engineering, 2021, 72: 664-679.
- [36] Gruza M, Gąska A, Sładek J A, et al. Method for accuracy assessment of the length measurement unit of laser tracking systems[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9335.
- [37] 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 20-30.
- Zhang H J, Ma J J, Zhang J. Multi parameter error model and calibration of laser tracker[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 20-30.
- [38] Gai Y H, Zhang J, Guo J, et al. Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly[J]. Measurement, 2020, 165: 108144.
- [39] 李辉, 刘巍, 张洋, 等. 激光跟踪仪多基站转站精度模型与误差补偿[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 771-783.
- Li H, Liu W, Zhang Y, et al. Model establishment and error compensation of laser tracker station-transfer[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(4): 771-783.
- [40] 朱永国, 张文博, 邓正平, 等. 基于激光跟踪仪和机器视觉的飞机翼身对接装配偏差动态综合修正[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 187-196.
- Zhu Y G, Zhang W B, Deng Z P, et al. Dynamic synthesis correction of deviation for aircraft wing-fuselage docking assembly based on laser tracker and machine vision[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 187-196.
- [41] 高继昆, 闫峰, 李季. 三坐标测量机在整体叶盘叶片型面检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 94-97.
- Gao J K, Yan F, Li J. Blisk blade profile inspection using CMM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 94-97.
- [42] Ascione R, Polini W. Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(9): 1055-1067.
- [43] 李欣, 周佳玮, 刘正国, 等. 三维激光扫描技术在船体外形测量中的试验性研究[J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(6): 36-37.
- Li X, Zhou J W, Liu Z G, et al. On ship shape surveying using 3-D laser scanning technique[J]. Journal of Geomatics, 2006, 31(6): 36-37.
- [44] Yang R, Chen Y. Surface reconstruction by structured light projection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2010, 15(5): 587-595.
- [45] 曹杰, 郝群, 张芳华, 等. APD 三维成像激光雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20190549.
- Cao J, Hao Q, Zhang F H, et al. Research progress of APD three-dimensional imaging lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20190549.
- [46] 张德海, 梁晋, 唐正宗, 等. 基于近景摄影测量和三维光学测量的大幅面测量新方法[J]. 中国机械工程, 2020, 31(12): 1200-1206.

- 2009, 20(7): 817-822.
- Zhang D H, Liang J, Tang Z Z, et al. New measuring method of large size measurement based on close range photogrammetry and 3D optical measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(7): 817-822.
- [47] 李五朋, 田锡天, 耿俊浩, 等. 飞机大部件装配外形数字化组合测量方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(8): 80-84.
- Li W P, Tian X T, Geng J H, et al. Digital combined measuring technology of aircraft large components outline [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(8): 80-84.
- [48] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115002.
- Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115002.
- [49] 赵子越, 魏亚飞, 李泷杲, 等. 一种面向大型结构件的激光雷达测量规划方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2112002.
- Zhao Z Y, Wei Y F, Li S G, et al. Measurement planning for large structural parts using laser radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2112002.
- [50] 李艺达, 隋少春, 曾坤, 等. 特征自适应的飞机大型蒙皮曲面测量系统与测量规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 428-438.
- Li Y D, Sui S C, Zeng K, et al. Feature adaptive measurement system and measurement planning for large aircraft skin surface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 428-438.
- [51] 陈允全, 李泷杲, 黄翔, 等. 基于机器人的飞机大型结构三维自动化检测方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 51-57.
- Chen Y Q, Li S G, Huang X, et al. Three-dimensional automatic detection method for large-scale structure of aircraft based on robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 51-57.
- [52] 刘洪鹏, 赵文政, 刘银华, 等. 测量不确定度约束下的结构光检测视点规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1079-1086.
- Liu H P, Zhao W Z, Liu Y H, et al. View planning of structured light for free-form surfaces with control of measurement uncertainty[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(4): 1079-1086.
- [53] 高健, 牛祥鑫, 郭超朋, 等. 基于改进 Otsu-Sobel 的飞机蒙皮对缝视觉测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 107-110, 115.
- Gao J, Niu X X, Guo C P, et al. Gap width measurement research of split type ammunition based on machine vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(3): 107-110, 115.
- [54] 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 D S, Du F Z. 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.
- [55] 严成, 黄翔, 李泷杲, 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 C, Huang X, Li S G, et al. Research on detection of skin seam based on 3D laser scanning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 70-74, 78.
- [56] 王德重, 黄翔, 李泷杲, 等. 基于双目多线结构光的铆钉齐平度测量方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(S2): 57-65.
- Wang D Z, Huang X, Li S G, et al. Rivet flatness measurement method based on binocular multi-line structured light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(S2): 57-65.
- [57] 聂鹏, 王家明, 李海伟, 等. 基于机器视觉的铆接高度差检测方法研究[J]. 现代制造工程, 2022(9): 107-112.
- Nie P, Wang J M, Li H W, et al. Research on riveting quality detection method based on machine vision[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(9): 107-112.
- [58] 国荣辉, 张益华, 崔海华, 等. 基于图像-点云映射的铆钉齐平度高效检测[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 2012002.
- Guo R H, Zhang Y H, Cui H H, et al. An efficient rivet flushness measurement method based on image-to-point-cloud mapping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2012002.
- [59] Jin Y X, Yuan X, Wang Z, et al. Filtering processing of LIDAR point cloud data[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 783(1): 012125.
- [60] 李佩佩, 崔凤英. 基于二分 K-means 聚类的曲率分级点云数据精简优化算法研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(4): 66-71.
- Li P P, Cui F Y. The optimization algorithm for curvature graded point cloud data based on dichotomous K-means clustering[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(4): 66-71.
- [61] 刘玉松, 王志海, 刘琦, 等. 基于 Metrascan 与激光雷达融合的飞机外形数字化测量方法研究[J]. 现代制造工程, 2019(2): 36-40, 47.
- Liu Y S, Wang Z H, Liu Q, et al. Research on aircraft profile digital measurement based on fusion of Metrascan and laser radar[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(2): 36-40, 47.
- [62] 张瑞程, 陈坤勇, 赵勇. 面向大部件三维重建的多视角点云配准方法[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(3): 30-36.
- Zhang R C, Chen K Y, Zhao Y. Multi-view point cloud registration method for large-scale components reconstruction[J]. Machine Design & Research, 2022, 38(3): 30-36.
- [63] Ren M J, Sun L J, Liu M Y, et al. A reconstruction-registration integrated data fusion method for measurement of multiscaled complex surfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(3): 414-423.
- [64] Wang S X, Cheung C F, Liu M Y. A fiducial-aided data

- fusion method for the measurement of multiscale complex surfaces[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(1): 1381-1389.
- [65] Xiang B F, Li Y G, Chen G X, et al. Multi-source integrated fusion for surface measurement[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(7): 1815-1823.
- [66] 李倩倩, 李哲, 李炜. X-ray CT 在纤维增强聚合物复合材料中的应用研究进展[J]. *中国材料进展*, 2022, 41(7): 525-535.
- Li Q Q, Li Z, Li W. Application research progress of X-ray CT in fiber reinforced polymer composites[J]. *Materials China*, 2022, 41(7): 525-535.
- [67] Jun J, Jhang K Y. Indirect method for measuring absolute acoustic nonlinearity parameter using surface acoustic waves with a fully non-contact laser-ultrasonic technique[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 5911.
- [68] Lee Y, Kitazawa S, Patel R. Simple method of measuring thicknesses of surface-hardened layers by laser ultrasonic technique[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(7): 072002.
- [69] 冯君伟, 盛涛, 汪丽丽, 等. CFRP 网格面板蜂窝夹芯结构锁相红外检测方法[J]. *宇航材料工艺*, 2019, 49(6): 69-71.
- Feng J W, Sheng T, Wang L L, et al. Lock-in infrared thermography testing method for honeycomb sandwich structure of CFRP grid panel[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2019, 49(6): 69-71.
- [70] 吴昊, 刘志平, 杜勇, 等. 超声红外热波成像在 CFRP 板螺栓孔损伤检测的研究[J]. *红外技术*, 2019, 41(8): 786-794.
- Wu H, Liu Z P, Du Y, et al. Study on damage detection of bolt holes in CFRP plate by ultrasonic infrared thermal wave imaging[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(8): 786-794.
- [71] Tian G, Li F Z, Feng S X, et al. The effect of fixing method on the result of ultrasonic infrared thermography testing[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 233: 04037.
- [72] 董方旭, 王从科, 凡丽梅, 等. X 射线检测技术在复合材料检测中的应用与发展[J]. *无损检测*, 2016, 38(2): 67-72.
- Dong F X, Wang C K, Fan L M, et al. The application and development of detection of composite materials by X-ray nondestructive testing techniques[J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(2): 67-72.
- [73] 傅健, 张昌盛, 朱国港, 等. X 射线分层析成像技术及在航空航天领域的应用[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(14): 49-54.
- Fu J, Zhang C S, Zhu G G, et al. Development and application of X-ray computed laminography for aerospace[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(14): 49-54.
- [74] 张紫茵, 邢砾云, 张瑾, 等. 太赫兹复合材料无损检测技术及其应用[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(4): 562-568.
- Zhang Z Y, Xing L Y, Zhang J, et al. Terahertz composite nondestructive testing technology and application [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(4): 562-568.
- [75] 姜寿禄, 武剑, 马旭明, 等. 超导太赫兹天线耦合微测辐射热检测器[J]. *低温物理学报*, 2020, 42(6): 279-284.
- Jiang S L, Wu J, Ma X M, et al. Superconducting terahertz antenna-coupled microbolometer[J]. *Low Temperature Physical Letters*, 2020, 42(6): 279-284.
- [76] 张丹丹, 任姣姣, 李丽娟, 等. 玻璃纤维蜂窝复合材料的太赫兹无损检测技术(英文)[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 163-171.
- Zhang D D, Ren J J, Li L J, et al. Terahertz non-destructive testing technology for glass fiber honeycomb composites[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 163-171.
- [77] 吕敬祥, 刘国强. 磁声电无损检测及改进的 EMD 消噪方法[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(17): 3935-3942.
- Lü J X, Liu G Q. Magneto-acousto-electrical NDT and improved EMD de-noising algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(17): 3935-3942.
- [78] Wang D C, Gu Y H, Gong Y D, et al. An ultrathin terahertz quarter-wave plate using planar babinet-inverted metasurface[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11114-11122.
- [79] Poulin C, Zerrad M, Triki M, et al. Terahertz transmission imaging of inhomogeneous polymer multilayers: theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(36): 10380-10389.
- [80] Dong J L, Locquet A, Citrin D S. Enhanced terahertz imaging of small forced delamination in woven glass fibre-reinforced composites with wavelet de-noising[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, 37(3): 289-301.
- [81] Tiwari K A, Raisutis R, Samaitis V. Hybrid signal processing technique to improve the defect estimation in ultrasonic non-destructive testing of composite structures [J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2858.
- [82] Ahi K. A method and system for enhancing the resolution of terahertz imaging[J]. *Measurement*, 2019, 138: 614-619.
- [83] 庾天翼, 李舜酩, 陆建涛, 等. 强噪声中检测微弱目标信号特征的量子信号处理算法[J/OL]. *计算机集成制造系统*: 1-19. [2022-10-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220411.0919.004.html>.
- Yu T Y, Li S M, Lu J T, et al. A quantum signal processing algorithm for detecting weak target signal characteristics in strong noise[J/OL]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*: 1-19. [2022-10-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220411.0919.004.html>.
- [84] Zhang J, Wang J, Han X H, et al. Noncontact detection of Teflon inclusions in glass-fiber-reinforced polymer composites using terahertz imaging[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(36): 10215-10222.
- [85] Dong J L, Locquet A, Declercq N F, et al. Polarization-resolved terahertz imaging of intra- and inter-laminar damages in hybrid fiber-reinforced composite laminate

- subject to low-velocity impact[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 92: 167-174.
- [86] Li Y, Zhang W, Yang Z, et al. Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 91-102.
- [87] Katunin A, Wronkiewicz-Katunin A, Dragan K. Impact damage evaluation in composite structures based on fusion of results of ultrasonic testing and X-ray computed tomography[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 1867.
- [88] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, et al. Automatic detection of impact damage in carbon fiber composites using active thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 58: 36-46.
- [89] Wasmer K, Le-Quang T, Meylan B, et al. Laser processing quality monitoring by combining acoustic emission and machine learning: a high-speed X-ray imaging approach[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 654-658.
- [90] de Oliveira B C F, Jr, Nienheysen P, Baldo C R, et al. Improved impact damage characterisation in CFRP samples using the fusion of optical lock-in thermography and optical square-pulse shearography images[J]. *NDT & E International*, 2020, 111: 102215.
- [91] 曹丙花, 张宇盟, 范孟豹, 等. 太赫兹超分辨率成像研究进展[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 405-417.
Cao B H, Zhang Y M, Fan M B, et al. Research progress of terahertz super-resolution imaging[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 405-417.
- [92] 席志红, 张越, 邵欣. 小波结合偏微分插值的图像超分辨率重构算法[J]. *探测与控制学报*, 2011, 33(5): 72-76.
Xi Z H, Zhang Y, Shao X. Image super-resolution reconstruction algorithm based on wavelet and PDE interpolation[J]. *Journal of Detection & Control*, 2011, 33(5): 72-76.
- [93] Ooi Y K, Ibrahim H. Deep learning algorithms for single image super-resolution: a systematic review[J]. *Electronics*, 2021, 10(7): 867.
- [94] Xu Y F, Wang X, Zhang L, et al. Terahertz nondestructive quantitative characterization for layer thickness based on sparse representation method[J]. *NDT & E International*, 2021, 124: 102536.
- [95] Xu Y F, Hao H, Citrin D S, et al. Three-dimensional nondestructive characterization of delamination in GFRP by terahertz time-of-flight tomography with sparse Bayesian learning-based spectrum-graph integration strategy[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225: 109285.
- [96] Meng M, Chua Y J, Wouterson E, et al. Ultrasonic signal classification and imaging system for composite materials via deep convolutional neural networks[J]. *Neurocomputing*, 2017, 257: 128-135.
- [97] Wang Q, Liu Q, Xia R, et al. Automatic defect prediction in glass fiber reinforced polymer based on THz-TDS signal analysis with neural networks[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 115: 103673.
- [98] Segreto T, Bottillo A, Caggiano A, et al. Full-volume ultrasonic technique for 3D thickness reconstruction of CFRP aeronautical components[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 67: 434-439.
- [99] Dai B, Wang P, Wang T, et al. Improved terahertz nondestructive detection of debonds locating in layered structures based on wavelet transform[J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 562-568.
- [100] Wronkiewicz-Katunin A, Katunin A, Dragan K. Reconstruction of barely visible impact damage in composite structures based on non-destructive evaluation results[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4629.
- [101] 罗立, 王瀚艺. 基于超声红外热成像的复合材料表面裂纹识别[J]. *激光杂志*, 2020, 41(12): 146-150.
Luo L, Wang H Y. Surface crack identification of composite materials based on ultrasonic infrared thermal imaging[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(12): 146-150.
- [102] 孙保燕, 陈文. 三维激光扫描和红外检测融合技术的工程应用[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(2): 170-173, 178.
Sun B Y, Chen W. Engineering applications of fusion of 3D laser scanning and infrared detection technology[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(2): 170-173, 178.
- [103] Qin L, Zhang S, Song Y, et al. 3D ultrasonic imaging based on synthetic aperture focusing technique and space-dependent threshold for detecting submillimetre flaws in strongly scattering metallic materials[J]. *NDT & E International*, 2021, 124: 102523.