

面向复杂曲面的激光超声机器人检测系统

丁 雷^{1,2}, 戴 磊^{1,2}, 耿开胜^{1,2}, 沈 鹏², 赵 芮², 徐丽霞³,
刘丽霞³, 陈栋康康³, 杨耀东³, 颜学俊^{1,4}, 钱斯文^{1,2},
卢明辉^{1,4}, 陈延峰^{1,4}

(1.南京光声超构材料研究院有限公司 南京,210046) (2.南京华秦光声科技有限责任公司 南京,210046)
(3.北京卫星制造厂有限公司 北京,100094) (4.南京大学现代工程与应用科学学院 南京,210023)

摘要 针对可重复使用航天器复杂承力结构的无损检测(non-destructive testing,简称NDT)需求,传统检测方法存在检测效率低、适应性差等问题,提出了一种基于激光超声的机器人智能检测系统。该系统由结构光相机、六轴机械臂和激光超声设备组成,具备大视场快速扫描及缺陷三维重构能力,并融合非接触式激光激励与探测技术,结合自动化路径规划与成像算法,可实现对复杂曲面结构的高精度缺陷检测。实验结果表明:系统能够有效识别铝合金试样中直径为0.5~10 mm范围的内部预埋缺陷;准确检测缩比舱曲面结构中不同位置和大小缺陷,以及某型号舱体关键承力部位的人工缺陷与真实裂纹,且成像结果与缺陷的实际尺寸和空间位置高度一致。与现有技术相比,该系统通过非接触测量、高适应性路径规划和高效成像算法,显著提升了对复杂曲面结构的检测效率与精度,为航天器承力结构的在役无损检测提供了一种可靠且高效的解决方案。

关键词 激光超声机器人;复杂曲面;无损检测;航天器承力结构
中图分类号 O439;O426.9;TH878

引 言

自航天时代开启以来,航天技术持续高速发展,但高成本与长周期仍是制约航天器研制效率的主要因素。可重复使用航天器作为现代航天技术的重要发展方向,通过返回地球后的快速检测与维护实现重复发射,可显著缩短研制周期、降低研制成本^[1-2]。航天器的承力结构作为关键支撑部件,其结构健康状况直接影响航天任务的成败,更关系到乘员的生命安全。因此,关键结构可靠性的保障和潜在缺陷的及时发现,是航天器设计与在役维护中的核心任务之一。

由于航天器典型承力结构普遍具有空间曲面、薄壁形态等复杂几何特征且需承载内部附加载荷,传统无损检测方法,如超声检测^[3-4]、射线检测^[5-6]和渗透检测^[7-8]在此类结构中的应用受到了限制,尤其在关键部位的缺陷检测方面,难以满足高效、精确的检测需求。因此,亟需发展适应复杂结构形态的先进无损检测技术,以满足对航天器承力结构关键区域在役检测的现实需求。

激光超声技术(laser ultrasonic technology,简称LUT)作为一种新兴的无损检测手段^[9-12],具备非接触、高精度和高灵敏度等优势,通过结合激光的空间定位优势与超声的材料穿透能力,可同时实现多物理参量检测,特别适用于复杂结构表面及其内部缺陷的检测。相比传统接触式超声检测方法,激光超声技术不受材料形态与工作环境限制,为航天器复杂结构的在役健康监测提供了可行的新路径。

自1994年达索航空公司推出欧洲首套激光超声检测系统LUIS以来^[13],激光超声技术在航空航天领域得到了持续发展。美国洛克希德·马丁公司自1998年起致力于该技术的工业化应用,研发了LaserUT系列系统,先后应用于JSF项目、F-22与F-35战机检测任务,并于2011年将LaserUT系统交付空客公司,标志该技术从军用航空领域扩展到民用航空领域。据报道,LaserUT系统已累计检测超过2万个复合材料部件,成为相关机型的常规检测手段^[14-16]。法国空客公司同期研制的LUCIE激光超声系统^[17]采用大能量CO₂脉冲激光器作为激励源,配合高功率激光器进行干涉探测,重复频率提升

至 400 Hz,扫查效率达到 5.6 m²/h,相比 LUIS 系统提高了近 3 倍,检测带宽覆盖 0.5~15 MHz,已能满足绝大多数航空航天结构件的检测需求。图 1 为空客公司开发的 LUCIE 激光超声检测系统。图 1(a)和图 1(b)分别为实验装置图 1 和实验装置图 2,待测结构的长为 6 m、高为 4 m。图 1(c)和图 1(d)分别为基于超声数据进行三维重建后的检测结果 1 和检测结果 2,可清晰观察到曲面结构内部的纹理特征。

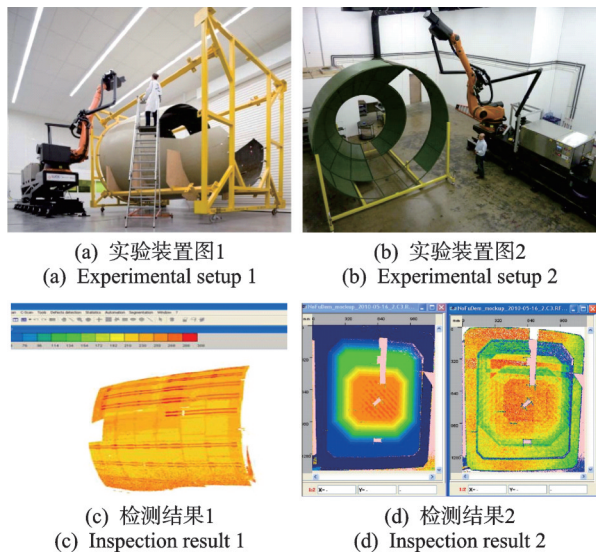


图 1 LUCIE 激光超声检测系统
Fig.1 LUCIE laser ultrasonic inspection system

尽管激光超声技术在部分先进机构中已获得应用,但在更广泛的航空航天工程实践中仍处于起步阶段。为响应可重复使用航天器复杂承力结构的检测需求,本项目组提出了一种基于激光超声的复杂曲面无损检测系统。该系统通过集成激光超声设备、结构光相机与六轴机械臂,借助自动路径规划技术,实现了复杂结构表面的智能化、自动化缺陷检测,并在多个典型场景中验证了其检测性能与工程适应性。

1 激光超声原理

1.1 激光激励超声原理

激光激励超声的基本机制主要包括热弹机制与热蚀机制^[17]。当脉冲激光照射到固体材料表面时,若激光功率较低,材料吸收部分激光能量并转化为热能,导致表面局部温度迅速升高。在热传导作用下,材料内部形成温度梯度场,局部热膨胀产生沿材

料表面平行方向的偶极子力,从而激发出多种模态的超声波,包括表面波、纵波和横波等。在该过程中,由于材料吸收的能量未达到其损伤阈值,表面不会发生熔化或气化,整个激励过程完全无损,因此被称为热弹机制。当激光功率密度较高时,材料表面吸收的能量超过其损伤阈值,会引发材料表面薄层的烧蚀。此时,激光使表面粒子汽化,部分粒子获得多余能量后高速喷射,产生垂直于材料表面的反冲压力,进而在材料中激发弹性波。该激励机制称为热蚀机制,可提供更高的激励强度和信噪比,其激发的超声波等效为材料表面受到的垂直集中力响应。

本项目组采用的激光超声激励方式基于热弹机制,其在确保激发有效超声信号的同时,不会对被测结构件表面造成损伤,具备良好的工程可实施性和检测安全性。

1.2 激光探测超声原理

非接触式激光超声探测技术主要包括电学方法与光学方法。其中,电学方法主要包括空气耦合超声法和电磁超声法。空气耦合换能器多采用点对点扫描方式,因其声阻抗差异显著,转换效率较低。电磁超声换能器虽具有较高的灵敏度,但其适用前提是被测材料需具备良好的导电性,同时换能器与待测表面之间需保持极小间距,限制了其在复杂结构或远距离检测场景中的工程可行性。光学方法基于干涉测量原理,能够实现远距离、高精度的非接触式超声波探测,为航天器等特殊环境中的在役检测提供了有效解决方案。为满足复杂工况下的应用需求,本系统采用光学干涉法进行激光超声波探测。

光学干涉探测方法主要包括零差干涉和外差干涉。零差干涉需保证参考光与测量光之间的光程差恒定,但易受到温度波动与机械振动等环境因素干扰,导致测量误差较大,通常用于实验室环境下的高精度测量。相比之下,外差干涉通过在两束相干光之间引入微小的频率差,形成动态干涉条纹。干涉信号经光电探测器转换为电信号后,利用电子电路与数字处理系统提取干涉相位差,进而获得目标表面的微小位移信息。外差干涉法不仅可有效抑制单频干涉系统的零漂问题,还具备较强的抗环境干扰能力,适用于工程现场的测量。因此,本系统选用外差干涉式激光测振仪作为探测装置,用于接收激光激励产生的超声信号。图 2 为基于外差干涉原理研制的激光测振仪光学原理图。

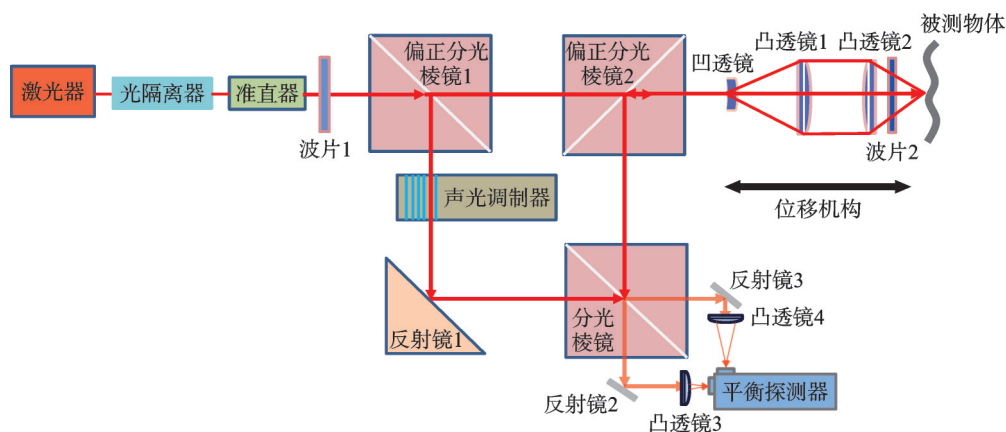


图2 激光测振仪光学原理图

Fig.2 Laser vibrometer optical principle diagram

2 系统设计

本检测系统融合了先进的激光超声技术与机器人自动化控制,通过结构光相机、六轴机械臂与激光超声设备的协同运行,实现了对复杂曲面结构的高效、非接触式无损检测。

激光超声设备光路图设计如图3所示。激励激光与测振激光在进入扫描振镜前完成合束,通过高速二维扫描振镜进行快速C扫描,系统可实现每秒采集50个不同空间位置的A扫描信号。

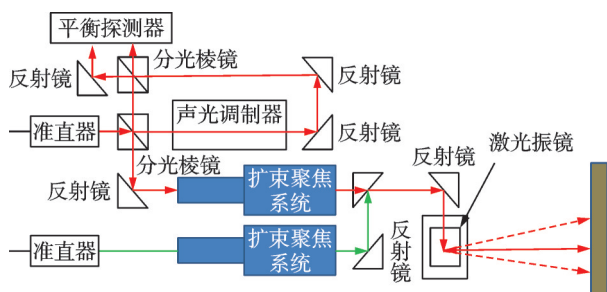


图3 激光超声设备光路图设计

Fig.3 Design of laser ultrasound equipment optical path diagram

图4为激光超声机器人智能检测系统实物图,其工作流程如下:①结构光相机对被测物体进行三维扫描并生成点云图像;②用户在点云图中框选检测区域,系统自动执行路径规划;③机械臂携带激光超声探头按预设路径进行扫描,结合成像算法生成缺陷C扫描图像。图5为激光超声扫描检测流程图。

针对复杂曲面结构的高精度贴合扫描与稳定检测需求,该系统选用结构光相机与六轴机械臂协同架构,并集成自动化路径规划技术进行功能实现。其中:结构光相机为SICK Visionary-S系列,其重复定位精度为0.25 mm,满足高精度扫描需求;六轴机械臂型号为KUKA KR70-R2100,具备70 kg的负载

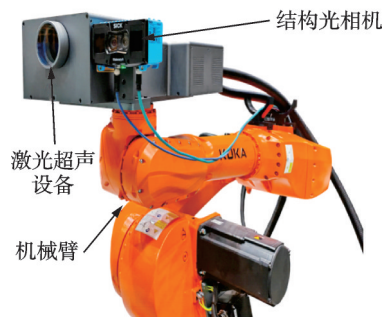


图4 激光超声机器人智能检测系统实物图

Fig.4 Laser ultrasound robot intelligent inspection equipment

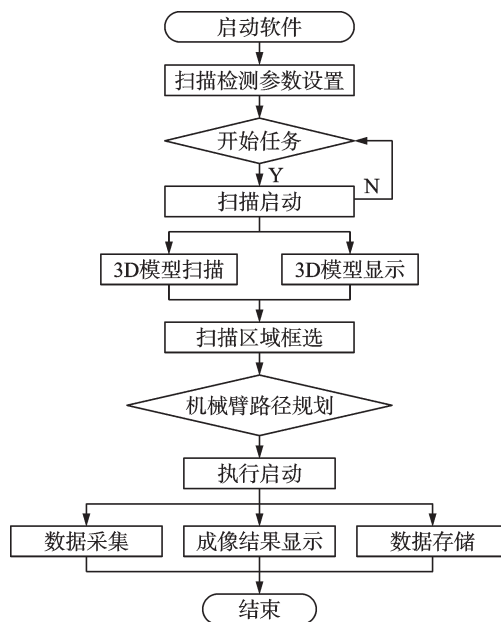


图5 激光超声扫描检测流程图

Fig.5 Flowchart of laser ultrasonic scanning inspection

能力与2 100 mm的最大臂展,重复精度高达0.05 mm,支持复杂空间路径的精准随形扫描。路径规划算法基于结构光相机采集的点云数据,结合激光超声设备的单次探测自动生成扫描轨迹,并将三维路径坐标传输给机械臂控制系统,确保激光束

始终在恒定距离垂直作用在目标表面。

系统核心为激光超声探测模块,该模块由激励激光器与干涉测振激光器组成,集成二维高速扫描振镜,可实现大视场范围内的快速扫描,并结合高效的激光超声成像算法,可实现被测结构内部缺陷的快速识别与三维重构。表1为激光超声设备关键技术指标。

表 1 激光超声设备关键技术指标

Tab.1 Key technical specifications of laser ultrasonic equipment

指标	数值
激励激光能量/mJ	0~50
激励激光波长/nm	532
激励激光脉宽/ns	<10
激励激光重复频率/Hz	400(可升级至 1×10^4)
激励光斑尺寸/mm	1~8
探测激光功率/W	0~2(可升级至10)
探测激光波长/nm	1 550
探测激光聚焦光斑尺寸/mm	0.2~0.6
工作距离/m	0.6~1
金属材料分辨率/mm	0.1
每秒检测效率(点)	50~100(可扩展至1 000)
金属检测深度/mm	0~50
碳纤维材料检测深度/mm	0~10

激光超声设备主要由脉冲激光激励模块、高频超声激光探测模块、扫描与成像模块以及信号采集与分析模块构成。其中:脉冲激光激励模块采用波长为 532 nm 的激光器,在不损伤被测结构表面的前提下有效激发超声波信号;高频超声激光探测模块采用波长为 1 550 nm 激光器,基于外差干涉原理,具备高灵敏度与高分辨率特性,可实现皮米级超声位移的精准检测;扫描与成像模块主要包括二维高速扫描振镜,为兼顾检测效率与精度,本系统引入基于时间反演原理的超声高速扫描方法,结合振镜的高速响应能力与空间灵活性,实现对大尺寸复杂构件的快速覆盖与缺陷成像;信号采集与分析模块由搭载高速采集卡的上位机构成,采样率为 2.5 GHz/s,带宽为 500 MHz,模拟输入分辨率为 10 bit,可实现超声信号的高保真采集与高效数字化处理。通过对采集信号的实时处理与可视化算法重建,可快速定位被测结构件的内部缺陷。

3 实验分析与验证

为验证本系统在不同应用场景下的性能,本项目组开展了典型结构的扫描检测实验。

选取含网格加筋结构的铝合金板试样作为测试对象,试样几何尺寸为 500 mm×400 mm×3 mm,内部预置了直径分别为 0.5、1、2、3、5 和 10 mm 的平底孔缺陷,制造公差为±0.05 mm。采用本系统从试样背面进行整体激光超声扫描,设备与试样间距设为 1 m。图6为铝合金网格加筋板试样检测成像结果。实验参数:激励激光能量为 8 mJ;光斑直径为 5 mm;探测激光功率为 200 mW;光斑直径为 0.4 mm;振镜扫描步长为 0.01 mm。由图6可见,系统能够清晰识别出直径为 0.5~10 mm 范围内的缺陷,其形貌、尺寸与预置缺陷一致。

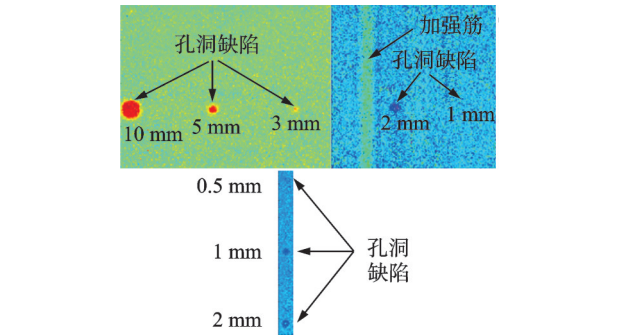


图6 铝合金网格加筋板试样检测成像结果

Fig.6 Ultrasound result diagram of aluminum alloy mesh reinforced plate sample

激光超声检测缺陷尺寸结果如表2所示,测试尺寸误差均不超过 0.6 mm,验证了系统的高分辨率与测量精度。为评估系统在复杂曲面结构检测中的适应性与路径规划能力,开展了激光超声机器人缩比舱体检测实验,如图7所示。路径规划覆盖了5个尺寸均为 10 cm×10 cm 的区域,部分区域内布设了不同尺寸的人工缺陷。设置振镜扫描步长为 0.2 mm,每个区域扫描点数为 25 000。

表 2 激光超声检测缺陷尺寸结果

Tab.2 Laser ultrasound defect size detection results

mm		
缺陷尺寸	测试结果	误差
0.5	0.4	0.1
1.0	1.1	0.1
2.0	2.2	0.2
3.0	3.2	0.2
5.0	4.5	0.5
10.0	10.6	0.6

图8为缩比舱圆形平底孔缺陷检测结果与三维点云图像融合图。可见,缺陷轮廓清晰,表面无任何激光损伤,验证了该系统对曲面结构的检测能力与安全性。

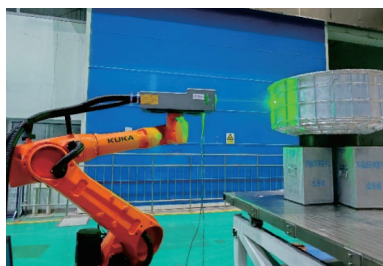


图7 激光超声机器人缩比舱体检测实验

Fig.7 Laser ultrasound robot scaled cabin detection

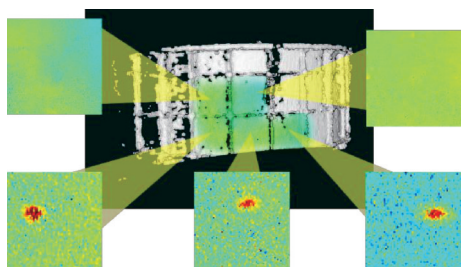


图8 融合图

Fig.8 Image fusion

在上述实验的基础上,进一步开展对某型号舱体关键承力部位的预制缺陷及实际裂纹检测研究。图9为检测装置实物图。被测目标结构的长为1.5 m,宽为0.8 m,内部嵌入3个宽度为1 mm、长度与方向各异的矩形槽状缺陷,分布在加强筋构成的网格结构中。从背面进行整体激光超声检测的流程为:结构光相机获取点云图,自动规划路径生成检测轨迹以及机械臂执行扫描路径。

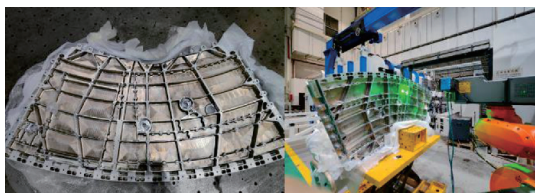


图9 检测装置实物图

Fig.9 Photograph of the inspection device

模拟矩形缺陷检测结果如图10所示。实验表明,系统能够准确识别缺陷位置及其形状边界,成像结果与设计的缺陷几何尺寸高度匹配。为进一步验证系统对真实裂纹的检测能力,选取某型号飞船承力结构在疲劳实验后的样件进行测试。如图11所示的疲劳裂纹检测结果清晰地揭示了疲劳加载后形成的实际裂纹形貌,验证了系统在实际损伤检测中的应用潜力。

综上所述,该系统通过非接触式测量方式、高适应性路径规划技术以及高效的成像算法,显著提升了复杂曲面结构的无损检测效率与精度,为航天器

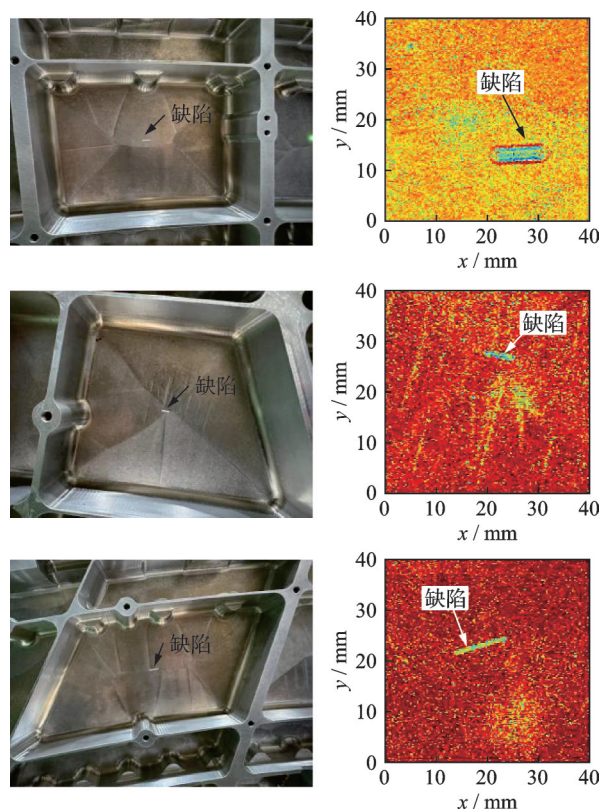


图10 模拟矩形缺陷检测结果

Fig.10 Simulation rectangular defect detection results

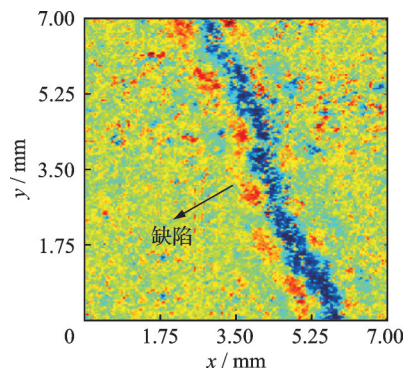


图11 疲劳裂纹检测结果

Fig.11 Fatigue crack detection results

承力结构的在役健康监测提供了一种可靠且高效的解决方案。

4 结论

1) 针对可重复使用航天器复杂曲面结构的无损检测需求,设计并实现了一种基于激光超声技术的机器人智能检测系统。该系统集成结构光相机、六轴机械臂、激光超声探测模块及自动路径规划算法,有效弥补了传统检测技术在曲面适应性、检测效率及灵敏度方面的不足,为航天器承力结构的在位无损检测提供了一种高效、精准的解决方案。

2) 实验结果表明,该系统在铝合金板试样与大型曲面结构等典型承力构件的检测中表现出优异性能。通过激光超声激励与基于外差干涉的高灵敏度光学探测相结合,系统能够准确捕捉亚纳米级位移变化,实现缺陷的重构成像,检测分辨率可达0.5 mm,成像结果与缺陷实际尺寸和空间位置高度一致。依托结构光相机提供的点云信息与自动路径规划算法的协同运行,系统能够在复杂曲面上实现高精度随形扫查,显著提升了检测过程的自动化程度与作业效率。

3) 该系统在复杂结构无损检测领域具有良好的工程适应性与拓展性。将激光超声检测技术与自动化路径规划算法深度融合,能够高效、精准地完成复杂曲面结构的健康检测与监测任务。该研究为航空航天器及其他对可靠性要求较高的关键结构件提供了一种新型的无损检测方案,具有广阔的工程推广前景与实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 宋征宇,黄兵,汪小卫,等.重复使用航天运载器的发展及其关键技术[J].前瞻科技,2022,1(1): 62-74.
SONG Zhengyu, HUANG Bing, WANG Xiaowei, et al. Development and key technologies of reusable space launch vehicles[J]. Frontier Science and Technology, 2022, 1(1): 62-74. (in Chinese)
- [2] 杨海峰,俞进.可重复使用航天器全寿命周期成本及经济性评估[J].载人航天,2021,27(1): 81-85.
YANG Haifeng, YU Jin. Lifecycle cost and economic evaluation of reusable spacecraft[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(1): 81-85. (in Chinese)
- [3] PENG Z, HAN A, WANG C, et al. Ultrasonic vibration cutting of advanced aerospace materials: a critical review of in-service functional performance[J]. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment, 2024, 5(1): 137-169.
- [4] FAN Z, BAI K, CHEN C. Ultrasonic testing in the field of engineering joining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(9): 4135-4160.
- [5] TYYSTJÄRVI T, FRIDOLF P, ROSELL A, et al. Deploying machine learning for radiography of aerospace welds[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2024, 43(1): 24.
- [6] TYYSTJÄRVI T, VIRKKUNEN I, FRIDOLF P, et al. Automated defect detection in digital radiography of aerospace welds using deep learning[J]. Welding in the World, 2022, 66(4): 643-671.
- [7] GR X U, GUANXS Q Y L. Analysis and innovation for penetrant testing for airplane parts[J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 1438-1442.
- [8] KUDINOV I I, GOLOVKOV A N, VAKHOV V V, et al. A new look at the controllability of parts with complex configuration in penetrant testing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2023, 59(11): 1107-1118.
- [9] 卢明辉,丁雷,颜学俊,等.激光超声技术在工业检测中的应用与展望[J].振动、测试与诊断,2021,41(4): 631-643.
LU Minghui, DING Lei, YAN Xuejun, et al. Application and prospects of laser ultrasonic technology in industrial inspection[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(4): 631-643. (in Chinese)
- [10] ZAREI A, PILLA S. Laser ultrasonics for nondestructive testing of composite materials and structures: a review[J]. Ultrasonics, 2024, 136: 107163.
- [11] XIE L, LIAN Y, DU F, et al. Optical methods of laser ultrasonic testing technology in the industrial and engineering applications: a review[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 176: 110876.
- [12] EVERTON S, DICKENS P, TUCK C, et al. Evaluation of laser ultrasonic testing for inspection of metal additive manufacturing[C]//Laser 3D Manufacturing II. [S.l.]: SPIE, 2015: 145-152.
- [13] PÉTILLON O, DUPUIS J, DAVID D, et al. Laser ultrasonics: a non-contacting NDT system[M]. [S.l.]: Springer, 1995: 1189-1195.
- [14] MONCHALIN J P. Progress towards the application of laser-ultrasonics in industry[M]. [S.l.]: Springer, 1993: 495-506.
- [15] PADIOLEAU C, BOUCHARD P, HEON R, et al. Laser ultrasonic inspection of graphite epoxy laminates [M]. [S.l.]: Springer, 1993: 1345-1352.
- [16] CHANG F, DRAKE T, OSTERKAMP M, et al. Laser ultrasonic inspection of honeycomb aircraft structures[M]. [S.l.]: Springer, 1993: 611-616.
- [17] 刘学坤.基于激光热弹效应的机械零件表面缺陷检测方法研究[D].杭州:浙江大学,2019.



第一作者简介:丁雷,男,1993年8月生,博士。主要研究方向为激光测振、激光超声检测技术、设备及应用。曾发表《Quality inspection of micro solder joints in laser spot welding by laser ultrasonic method》(《Ultrasonics》2022, Vol. 118)等论文。
E-mail: dinglei@imeta-center.com

通信作者简介:卢明辉,男,1979年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为人工结构材料的物理效应和器件性能研究、光声测量技术及仪器仪表。
E-mail: luminghui@nju.edu.cn