

重复使用液体火箭发动机原位无损检测技术应用及展望

武晓欣¹, 贾洁羽², 邢理想², 朱安冬², 宋澄²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要:重复使用航天运载器是国家战略科技的前沿, 研制可重复使用液体火箭发动机成为这一趋势下的迫切需求。火箭返回后发动机是全箭重点检测和维护对象, 通过无损检测技术手段在发动机原位状态下获得结构健康状态信息, 快速判断产品寿命是否满足再次使用要求, 对提高液体火箭发动机重复使用可靠性至关重要。综述了当前应用于航空航天领域的无损检测技术, 对其在液体火箭发动机中的适用性进行了评估和分析。结合液体火箭发动机特点和重复使用无损检测应用场景, 超声检测、数字图像测量、羽流光谱和快响应动态传感器等技术亟需开展研究, 同时应开发自动化、智能化专用检测设备, 形成快速使用维护处理与检测系统, 实现液体火箭发动机便携高效、缺陷可视化和定量化等检测能力。

关键词:重复使用液体火箭发动机; 原位无损检测; 智能化; 自动化

中图分类号: V43

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)01-0046-11

Application and prospect of in-situ nondestructive testing of reusable liquid rocket engine

WU Xiaoxin¹, JIA Jieyu², XING Lixiang², ZHU Andong², SONG Cheng²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Reusable space launch vehicle is the cutting-edge of national strategic science and technology, and the development of reusable liquid rocket engines has become an urgent demand under this trend. After the rocket returns, the engine is a key inspection and maintenance object for the entire rocket. By using non-destructive testing technology to obtain structural health status information in the original state of the engine, which is crucial to quickly determine whether the product life meets the requirements for reuse and improve the reliability of liquid rocket engine reuse. The current non-destructive testing technologies applied in the aerospace field were reviewed, and their applicability in liquid rocket engines was evaluated and analyzed. Based on the characteristics of liquid rocket engines and the application scenarios of reusable non-destructive testing, there is an urgent need for research on technologies such as

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-07-03

基金项目: 国家重点实验室基金(6142704210102)

作者简介: 武晓欣(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机技术。

引用格式: 武晓欣, 贾洁羽, 邢理想, 等. 重复使用液体火箭发动机原位无损检测技术应用及展望[J]. 火箭推进, 2024, 50(1): 46-56.

WU X X, JIA J Y, XING L X, et al. Application and prospect of in-situ nondestructive testing of reusable liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 46-56.

ultrasonic testing, digital image measurement, plume spectroscopy, and fast response dynamic sensors.

At the same time, automated and intelligent specialized testing equipment should be developed to form a rapid use, maintenance, processing, and testing system, achieving portable, efficient, defect visualization, and quantification testing capabilities for liquid rocket engines.

Keywords: reusable liquid rocket engine; in-situ NDT; intelligence; automation

0 引言

近年来,美国猎鹰 9 运载火箭通过多次重复飞行大幅降低了发射成本,形成了较强的国际发射竞争力。低成本、周转期短的重复使用航天运载器已成为国内外研究的热点。发展航天,动力先行,研制可重复使用液体火箭发动机成为这一趋势下的迫切需求。重复使用液体火箭发动机是指经过多次(不小于 5 次)的发射任务周期可被完整地回收,在经过快速的检测和少量维护后即可再次参加飞行任务的重复使用飞行器动力。液体火箭发动机工作条件苛刻,在发动机一次使用后,各组件经历了大振动、高冲击、高温高压考核,对发动机状态的正确判断是再次安全使用的关键,因此回收后的维护检测非常重要。但由于航天发动机系统复杂,零组件众多,如果需要对发动机结构进行拆卸、分解后才能进行检查,势必增加了使用维护时间,不利于快速发射;同时,发射现场环境复杂,由于拆装不当造成人为故障和机件损伤的风险明显增加。因此,在整机原位状态下获得发动机结构健康状态信息,快速判断产品寿命是否满足再次使用要求,对提高重复使用发动机的使用可靠性至关重要,需要迫切开展液体火箭发动机重复使用期间原位无损检测技术的研究。

无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)^[1-3]是利用射线、超声、电磁、光、热、化学试剂等与物质的相互作用,检测被检对象表面和内部的结构异常或缺陷。无损检测能快速实时监测材料、产品加工过程中的各种缺陷并加以控制,同时能促进对设计和工艺的改良,对于控制和改进产品质量、保证材料及产品的可靠性、保证产品安全运行、降低生产成本及提高生产效率有着重要作用。而原位无损检测是产品不经拆卸和分解,在原来安装位置上进行无损检测^[4]。

无损检测技术在航空发动机的维修中使用场景多、应用较为成熟,典型的有渗透检测技术、射线照相检测技术、涡流检测技术等。此类技术在特种设备、轨道交通、能源电力等领域均有较广泛的应用。国外航天飞机主发动机 SSME(Space Shuttle Main Engine)是首台实现重复使用的液体火箭发动机,其使用维护流程中需进行多个无损检测项目。

在我国液体火箭发动机零、部、组件的研制、生产中主要应用的有射线照相、超声波、磁粉、渗透、泄漏、目视(内窥镜检测)等无损检测技术,其他如声发射、射线层析、涡流、激光全息、射线数字成像等无损检测技术也逐步得到应用。目前,我国液体火箭发动机无损检测多集中在产品生产阶段,对发动机热试后或重复使用间的整机原位无损检测技术的研究缺乏,检测项目少,且对核心部位、薄弱环节的检测覆盖率低。随着重复使用航天器的发展,“不下箭 48 h 内再次发射”“重复使用 20 ~ 50 次”等指标相继提出,未来航天产品的检测要求和检测结果的准确性将越来越高。需要研究与发展原位无损检测技术,实现便携式、快速高效、自动检测、缺陷可视化和定量化等能力。为此,本文基于重复使用发动机使用维护流程,梳理了国内外航空航天领域无损检测技术现状,针对液体火箭发动机重复使用提出了原位无损检测方法,为当前的相关研究提供参考。

1 液体火箭发动机重复使用无损检测场景

重复使用液体火箭返回后再次发射要开展一系列飞行后检查和处理工作,其中发动机作为火箭的动力源,一旦发生故障会造成巨大灾难,应列为全箭检测和维护的重点对象。目前,我国重复使用液体火箭发动机的维护流程仍在研究阶段,美国 SSME 发动机单次检测耗时约 32 h,其使用维护流

程包含控制器传感器测试、发动机外观检查、内窥镜检查、涡轮增压矩测试、外泄漏及密封性能检查等。结合一次性火箭发动机使用维护流程,针对重复使用发动机不下箭处理情况,分为下述 5 个阶段。

1)返回阶段:重复使用运载器着陆后,发动机第一步工作是推进剂排放和内腔吹除,属于无人员自动化操作阶段。

2)返回后处理:针对液氧/煤油推进剂发动机,为保证发动机再次使用前状态的一致性,同时防止再次启动时燃气腔残余煤油而爆燃,需排放内腔残余的点火剂和煤油,地面辅助系统同时对内腔吹除。液氧/甲烷发动机通过对发动机内腔吹除清空残余推进剂。

3)返回后产品状态检查:返回后对发动机产品状态进行检查和测试,获得发动机结构健康状态信息,包括探测发动机产品功能是否完备,把握产品结构内部机械损伤情况,及时维修或更换受损的部件,以减少和防止事故发生。

4)健康诊断:发动机健康状态诊断涉及控制器数据下传、数据判读与健康状态及寿命评估。需要更加全面深入分析发动机及组件的状态,做出正常、异常和故障判断,并对异常和故障进行定位。

5)再次飞行前维修:再次飞行前,需考虑发动机维修性设计、远场近场维修方案、性能校准试验方法等,保证发动机状态恢复完整性和性能可靠性。维护设计的基本要求包括功能模块化、标准化设计、检测可达性好、快速测发能力强等。

液体火箭发动机再次复飞需要以检测和维修作为保障,无损检测主要发生在火箭返回后发动机产品状态检查阶段及再次飞行前维修阶段。如上所述,整机原位状态环境复杂,应用更多的原位无损检测手段,对提高设计人员对缺陷和故障的判断准确度,缩短发动机使用维护时间,实现快速重复飞行具有重要作用。

2 航空航天领域无损检测技术现状

在航空航天领域,无损检测技术受到广泛的关注,得到较大的经济投入。重要产品(如发动机叶片)对无损检测技术要求很高,除了缺陷检出率、准确性及灵敏度等方面外,对检测缺陷的可视化程度

及定性定量评估等也提出了较高要求。

2.1 典型无损检测方法

2012 年国军标《航空发动机外场原位无损检测要求》中规定了航空发动机外场使用和整机状态下的可选无损检测手段^[5]。目前,航空发动机使用较多的有内窥检测技术、射线照相检测技术、涡流检测技术、超声波检测技术、渗透检测技术、磁粉检测技术等,其适用性和局限性对比情况见表 1。按照检测能力,Sohn 等提出了损伤检测的 5 个等级^[6],见表 2。重复使用液体火箭发动机原位无损检测需要达到 4 级损失可量化表征的程度。

表 1 典型无损检测方法和特点对比

Tab. 1 Comparison of typical non-destructive testing methods and characteristics

方法	对象缺陷	检查对象	不可用对象
内窥镜	内腔	复杂内腔组件	封闭组件
射线	内部	焊接部、铸钢物、铸铁件	大厚度铸钢板
超声	内部	板、管、锻造件、焊接部	普通铸铁件
磁粉	表面表层	强磁性钢铁	非磁性材、深部缺陷
渗透	表面开口	金属、非金属	内部缺陷、多孔材料
涡流	表面表层	管、线、棒材等	形状复杂结构、深缺陷
声发射	裂纹发生和进展	压力容器	已发生的缺陷
泄漏	间隙	密闭容器	开敞结构

表 2 损伤检测技术等级

Tab. 2 Damage detection technology level

检测等级	检测状态	描述
1 级	检测	判断损伤的存在
2 级	定位	确定损伤的位置
3 级	分类	估计损伤的类型
4 级	评估	量化损伤的程度
5 级	预测	预估结构的剩余使用寿命

2.2 航空航天领域新型无损检测方法

基于航空航天产品的结构复杂性与特殊性,高性能复合材料取代轻质金属材料,在多种重要结构中的占比逐渐上升,同时对无损检测的效率、精度及自动化等要求大幅提升。因此,在上述典型检测方法基础上,逐渐改进发展出更多高精度新型检测技术和高性能无损检测仪器设备,包括较为热门的相控阵超声检测、激光超声检测、空气耦合超声检测、红外热成像检测、激光全息检测等。而受使用场景限制,航天类产品原位无损检测需要重点发展以下几种检测技术。

2.2.1 超声检测技术

超声波检测是利用超声波探伤仪将超声波(频率通常为 1~100 MHz)摄入检查对象,如果材料内部有缺陷,在缺陷界面部分超声波会形成反射。根据其内部反射回来的损伤波来判断缺陷的存在、位置、性质和大小等,适用于金属、非金属、铁磁、非铁磁等各种材料,检测原理示意图见图 1。在航空发动机维修中,超声波检测可用于高压压气机叶片、低压压气机叶片、涡轮导向器叶片、燃烧室火焰筒外壁袋槽板材组织的检测。但传统超声检测存在一些缺点,如:需要参考试件用于仪器标定;需要耦合剂,对耦合表面要求高;影响因素多,对操作要求高。而在传统超声检测的基础上新发展出的相控阵超声检测和激光超声检测能减少上述问题。

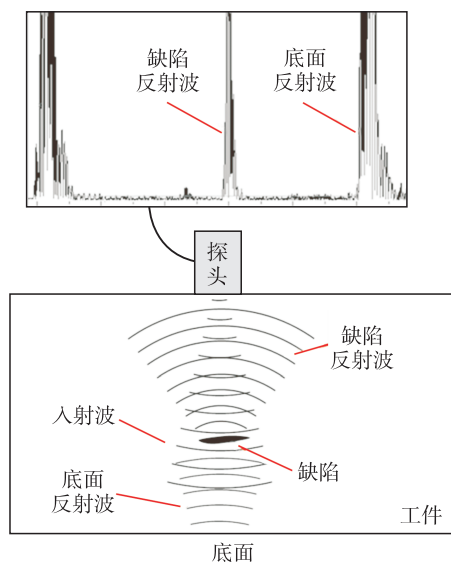


图 1 超声波检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic testing principle

相控阵超声检测利用多声束扫描成像,具有自适应聚焦、高速、实时成像等优点,普遍应用于飞机的大型复合材料构件的自动检测^[7]。国外的相控阵检测技术发展迅速,检测应用于管道、复合材料平板、航天飞机的箱体等。英国进行了超声检测数据的三维可视化研究,在 CAD 模型中进行检测图像的重建、显示和分析。国内相控阵检测方面,韩建宁等针对飞机铆钉脱落问题实施了在役监测^[8]。杨琛等利用相控阵超声成像开展了高强度螺栓的质量检测^[9]。

激光超声检测是用激光激发并接收超声波实现材料缺陷检测,适用于热弹性材料,具有完全非接触、复杂结构适应能力强、缺陷灵敏度与分辨率高和原位检测等特点,适用于大型复杂结构的自动化和快速现场检测。国外,洛克希德·马丁航空公司在 F-22 和 F-35 项目中应用了激光超声技术系统,已具有非常高的可靠性和稳定性,每年仅需 2~3 d 的维护时间^[10]。国内,北京航空航天大学利用激光超声检测系统实现了复合材料分层缺陷的激光超声 C 型扫描成像。李辉等研究了激光超声检测技术用于异种钢焊缝检测方面的优点和局限性^[11]。

目前,相控阵超声检测和激光超声检测已成熟应用于激光焊接焊缝质量在线监控、飞机机身搭接腐蚀检测、方向舵和尾翼等飞机结构件检测、高温陶瓷及复合材料检测等。而在航天领域中,其研究和应用整体偏少。赵灿等针对某型号火箭发动机涡轮泵转子组件电子束焊缝熔深无法测量的问题,开展了水浸超声扫描技术的研究,结果表明,水浸超声扫描能够对焊缝熔深进行定量表征,满足工程需求^[12]。

2.2.2 涡流检测技术

涡流检测技术基于电磁感应原理,常用于导电材料的表面和近表面缺陷检查,在飞行维修工作中的应用广泛,尤其是对应力腐蚀裂纹和疲劳裂纹的检查灵敏度很高。其优点是检测速度快,线圈与试件可不直接接触,无需耦合剂。同时由于涡流仪探头很小,可实现复杂结构的原位检测,更容易实现自动化。但仅限于导电材料的近表面检测,且大面积检查效率低、不适合复杂形状;检测结果不直观,判断缺陷性质、形状、大小较困难。涡流检测原理示意图见图 2。

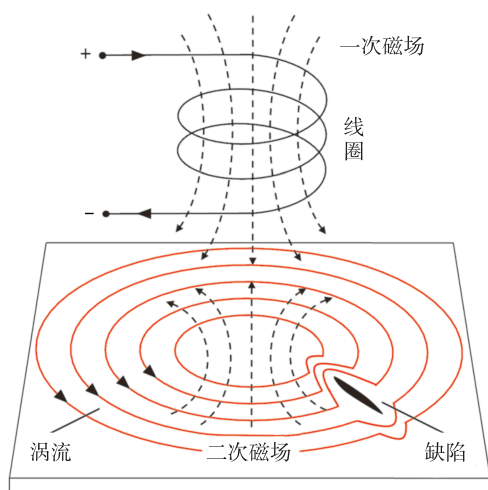


图 2 涡流检测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of eddy current testing principle

涡流检测在航空中多用于飞机铝合金结构件的层离腐蚀和表面裂纹分析及螺栓孔内裂纹检测等。国外的涡流技术发展较早,且革新较快。Hughes 等用涡流检测技术检测钢板的裂纹缺陷^[13]。Dmitriev 等针对铝结构件的裂缝缺陷,设计出一套自适应频率的涡流检测系统^[14]。国外涡流检测设备发展成熟,德国 FOERSTER 公司研制的便携式涡流检测仪等检测精度高,被广泛应用。2012 年航空工业标准《航空发动机叶片涡流检测》中规定了航空发动机叶片表面或近表面缺陷涡流检测的一般要求、检测设备、试样、检测步骤等详细要求^[15]。赵秀梅等采用专用的涡流阵列探头,实现了某航空发动机高压涡轮叶片的原位检测^[16]。喻星星等利用脉冲涡流检测技术对发动机篦齿盘均压孔进行原位无损检测有限元仿真,计算结果显示,脉冲涡流检测技术能够克服常规涡流检测过程中需要探头对准位置的缺点,对不同取向的缺陷可以一次性检出^[17]。

在液体火箭发动机研制过程中发生过由于振动产生的结构疲劳原因导致导管断裂等结构破坏,以及在严酷的力热循环加载条件下形成结构内部温度分布的不均和瞬时骤变,产生较大的力载荷,超过结构的承受能力,导致推力室喉部位置出现裂纹等情况。而目前仅能在发动机试后通过目视等手段凭借经验方法判断发动机的安全性,具有评价准则模糊不量化的缺点。因此,参考航空发动机无损检测手段,可以考虑通过涡流检测手段对发动机

整机薄弱环节进行状态检测,并通过单独零组件试验探索薄弱环节缺陷的发展过程。

2.2.3 数字图像测量技术

数字图像相关测量方法(Digital Image Correlation, DIC)结合了摄影测量、计算机视觉和图像配准等方法,是一种非接触、高精度的光学测量技术,能够精确采集被测物体的表面图像进而分析得到应变、位移等参数,数字图像测试原理示意图见图 3。该技术自 20 世纪 80 年代被发明以来^[18-19],由于其步骤简单、精度高、全区域、完全非接触等优点,目前已广泛应用于材料、结构几何位移和应变的测量^[20]。

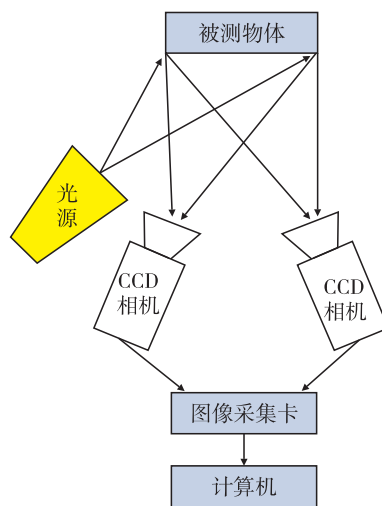


图 3 数字图像相关测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of digital image correlation measurement

刘依开展了基于 DIC 的旋转物体及应变全场测量方法的研究,在传统 DIC 方法的基础上引入旋转转子区,成功应用于旋转轴承的运动测量^[21]。张玉玲等将 DIC 应用于钢构件的疲劳监测,获得试件疲劳试验的全过程图像,验证了基于应变参数进行疲劳监测的可行性^[22]。余镇江采用双目视觉和 DIC 的三维变形测量方法,实现 6 000 r/min 工作状态下航空发动机叶片三维变形的测量^[23]。伍鹏等采用 DIC 方法对固体火箭发动机黏接界面原位拉伸过程应变场进行了定量分析^[24]。Janeliukstis 等进行了大尺寸复合结构 DIC 技术的研究,以全尺寸风力发电机叶片和直升机转子叶片为研究对象,将 DIC 技术分别应用于静力试验中的结构挠度和屈曲测量,

以及疲劳试验的应变、位移测量和模态分析^[25]。

在液体火箭发动机领域,文献[26]在 J-2X 发动机热试中采用 DIC 技术对发动机实时位移和应变进行测量,验证了高温、高低频振动环境下 DIC 技术的可行性,得到了发动机部分管路在预冷充填阶段和热试阶段的位移应变数据。

2.2.4 光学检测技术

光学检测是随着光学传感器、图样和信息处理等技术的发展,利用光的反射、辐射、偏振性等物理特性衍生出的新型测量诊断技术。在缺陷无损检测方面,陆鹏运用激光电子散斑干涉及上载波技术,定量测量了柴油机油泵在压力作用下的离面位移^[27]。高光谱成像是一个复杂、多学科高度融合的领域。Mehrubeoglu 等首次有针对性地分析了高光谱成像在铸件检测领域的应用,采用高光谱成像仪显示出潜在缺陷处突变为低强度的光谱轮廓,映射并量化了铝铸件表面裂纹缺陷区域^[28]。已有的多项研究表明:光学检测是振幅型颗粒、凹坑、划痕等有害微结构的有效检测方法。然而,由于光学检测技术目前使用成本较高,在缺陷检测方面相比传统无损检测方法优势并不明显。

除了缺陷检测外,光学检测也可用于故障识别检测。液体火箭发动机羽流的主要成分包括高温燃气及未完全燃烧的碳颗粒与金属氧化物颗粒,羽流中的金属含量和燃气组分是判断发动机工作状态的关键信息。不同组分的浓度会直接影响光学信号的穿透能力,此时光学检测的优势凸显,发动机光学羽流检测技术应运而生。光学羽流检测技术是采用光学非接触测量的方法,检测发动机羽流中的光学信号,分析得到金属成分、气体组分、温度等相关信息,用于发动机故障诊断及健康监测。在羽流检测方面,美国发展较早,其于 1969 年开发了 LBL code 计算羽流中原子及双原子分子发射光谱。Marshall Space Flight Center (MSFC)、Stennis Space Center (SSC) 及 Lewis Research Center (LeRC) 于 20 世纪 80 年代末先后开始发展 SSME 故障羽流发射光谱诊断系统^[29-30]。1995 年升级了光谱检测系统,在 LBL 程序基础上整合大量试验数据,完成了金属颗粒物发射光谱计算程序(EDC),推出基于羽流监测的健康监测及故障诊断系统。1996 年实现了基于羽流检测的首次预警停车,后续用于 J-2X、

RS-25 等多种型号发动机研制及改进,并用于航天器羽流监测。俄罗斯于 2000 年左右开始液体火箭发动机羽流光学诊断法研究,2015 年在质子号火箭 2、3 级发动机试车中添加了金属成分,进行了定量检测方法的验证。近年来国内也有相关学者对此开展了研究。国防科技大学的赵永学等以光谱采集系统为测量手段,对液氧-煤油发动机羽流的可见光谱辐射进行了实验研究,结果表明该项技术具有很强的工程意义^[31]。西安电子科技大学的徐启采用光学散射及高速摄影方法,对固体火箭发动机羽流凝聚相颗粒进行了监测^[32]。

3 液体火箭发动机无损检测技术应用及展望

为了适应重复使用液体火箭发动机对整机原位检测的新需求,除进行传统的外观检查、内外泄漏检查、电气检查外,还需要增加新型测试和检测项目,利用超声检测、光学测试设备、应变测量、图像识别等手段对发动机转动件、轴承、喷注器、推力室喉部、发动机管路等工作状态进行表征,针对性地开展原位无损检测方法研究。目前,部分方法已在试验过程中得到应用。

3.1 结构件无损检测技术

在液体火箭发动机中,发动机管路焊缝、推力室头身对接焊缝、整流栅与喷注器焊缝、涡轮球壳焊缝等焊缝均为发动机上重要的 I 类承力焊缝,但因结构限制,在整机原位状态无法使用 X 射线照相和 CT 等方法进行检测,超声检测和涡流检测技术将有力解决此类问题。

3.1.1 超声检测

涡轮泵和热力组件作为发动机的关键部件,其结构健康状态直接决定发动机能否重复使用。对于这些变厚度、回转结构件,需要研究超声波与缺陷的作用机理,提取表征缺陷的特征参数,为后续开展结构件中的缺陷量化及寿命评估奠定基础。

目前以航天发动机的结构板材为研究对象,以超声波中的 Lamb 波为技术手段,研究超声波与缺陷的作用机理,为后续开展结构件中的缺陷量化及寿命评估提供理论和试验基础。基于超声波在受损试件中传播时共振频率随脉冲激励幅值的增大发生漂移的原理,开展了缺陷检测验证试验。通过

人为制造平板构件损伤,研究损伤尺寸、深度和类型等与传感器响应之间的关系。试验表明:声波的频率、入射角度、传播模式对声波的检测能力有显著的影响,通过调节检测声波的关键参数可以大幅增加声波检测的精度和灵敏度。

3.1.2 原位涡流检测

相比航空发动机,目前涡流检测技术在液体火箭发动机上的应用仍处在初步探索阶段。

液体火箭发动机经过恶劣环境后,焊缝、退刀槽、应力集中点、热力组件内壁等部位易出现疲劳损伤,针对这类损伤,常规检测手段存在检测难度大、检测精度低甚至无法检测的问题。为满足重复使用液体火箭发动机快速检测、使用的需求,有必要采用涡流检测技术对整机试车后发动机的薄弱环节结构表面、近表面缺陷进行检测,利用试验件模拟故障发展模式,给出故障判断基线。同时对燃烧组件内壁镀层、环带进行涡流检测初步检测方法研究,进行发动机应力集中部位结构模态试验及关键组件模态试验,确定故障判断基线。

涡流检测设备可以考虑两种模式:一种是涡流传感器与测量设备一体,均为地面设备;另一种是涡流传感器设计成专有形状,预装在待检测部位,引出电气接口,需要测量时对接地面测试设备,加电测试。

3.2 数字测量技术

数字图像测量技术可被引入火箭发动机外观识别对比分析,以及通过观测结构相对运动,获得发动机结构变形和相应频率。

3.2.1 基于图像识别的发动机外观检查

为了对发动机状态进行快速初步判断,需要通过形态学、多尺度增强和监督机器学习等图像识别技术,辅助设计人员进行发动机外观检查,包括整体结构偏移、锁紧装置松动、结构裂纹辨识等。同时开展发动机图像识别方法及故障监测程序研究,进行发动机图像识别传感器及图像识别单元研究,建立发动机图像识别故障监测系统,完成发动机重复使用间图像识别故障监测试验验证。

3.2.2 基于高速图像的结构三维位姿反演

将图像测量技术引入火箭发动机热试,通过在发动机结构表面粘贴标记点,基于双目视觉测试技术,实现发动机在启动和关机等工作非平稳段的结

构响应频率、位移及变形的实时测量分析。

目前已将 DIC 技术应用于我国大推力液氧煤油发动机试车中的位姿测量,整个系统由多个不同视角的高速摄像机(采集频率 1000 帧/s)组成全三维的拍摄系统,满足 500 Hz 以内的频率分析范围,测量系统示意图见图 4。对补偿后位姿变化的频率进行分析,稳态的突频与试车前产品的模态试验结果相吻合,基于图像的测量结果能够反映整体结构模态振型,验证了该方法的有效性。

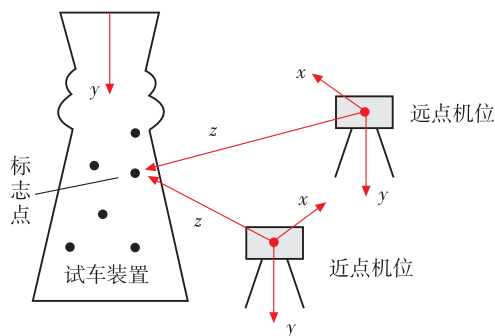


图 4 测量示意图

Fig. 4 Measurement diagram

3.2.3 基于机器视觉的发动机结构模态辨识

试车前后基于高速摄影拍摄发动机在力锤敲击下的响应视频,通过时域滤波分离不同的模态运动,采用运动放大技术对结构振型进行可视化,进而实现发动机大量管路频率和振型的快速测试。

3.3 光学检测技术

3.3.1 羽流光谱检测

发动机元件的正常与非正常烧蚀、磨损都可以由羽流中的燃气和颗粒成分加以表征,可作为重复使用发动机健康检测的重要技术手段。大推力发动机试车和飞行环境下,振动大、羽流温度高,给光学测试的应用带来了很大的挑战。通过光学测试和重构技术可以测量羽流的温度场、成分场、金属粒子分布场等信息,可用于热力组件的燃烧状态诊断、组件的磨损监测、生成维修建议等。

迄今为止,我国在液体火箭发动机羽流光谱理论及技术研究方面进行了初步探索,尚未实现工程应用,后续将在金属特征光谱分析及原理验证的基础上,聚焦金属优选特征谱线,建立完整的液体火箭发动机羽流金属成分光谱监测系统。

3.3.2 激光三维成像检测

发动机热力组件结构复杂,工作过程中可能存在推进剂沉积、裂纹、结构变形等。为了提高检测维护的效率,需要开展三维成像检测技术研究,建立热力组件关键尺寸激光三维成像检测管理系统,快速进行三维重构,识别结构的完整性、裂纹、变形等,对各组件的可复用性、寿命等进行评估。

3.4 快响应动态传感器技术

3.4.1 小型化薄膜高温温度传感器

富氧环境下,故障发展非常迅速,且破坏力极强,容易导致发动机甚至试车台的损坏,为防止故障模式引起的安全事故,需要快响应故障检测系统。目前,高温温度传感器的响应时间为几十毫秒,无法用于故障监控,因此需要研制快响应传感器。小型化薄膜高温温度传感器能够在 1 ms 内反映温度变化,可用于热力组件超温、过热、烧蚀的快速监测。

3.4.2 无冷却集成化传感器

高性能液体火箭发动机高温燃气管路压力不低于 30 MPa,温度高达 600 ~ 700 °C。目前地面状态下,高温压力和脉动压力传感器采用水冷却,无法用于飞行,使得飞行过程热力组件处于无法测试状态,需要发展无冷却测试技术。高温环境下的无冷却压力、脉动压力集成化传感器可以同时测量稳态压力和脉动压力,直接反映热力组件的燃烧性能、非稳态燃烧等信息,可用于直接监测热力组件的运行状态。

3.4.3 高精度高频响振动传感器

振动是反映工作过程发动机组件结构健康状况及运行状态的关键参数。目前,低温振动传感器精度不高。未来重复使用液氧甲烷发动机的泵转速更高,对结构频响的上限要求更高,需要进一步拓宽频响范围。此外,发动机存在低温的管路、泵和高温的热力组件、涡轮等,温度范围很宽,需要宽温度范围高精度高频响的振动传感器。利用该传感器可实现发动机工作模态的实时测量和结构薄弱环境识别与监控,提高试车和飞行的安全性。

3.4.4 无线智能传感器

液体火箭发动机上通常存在数十个传感器,其连接线路整理和固定困难,一旦在大振动环境下断裂,将严重影响对发动机的状态监控。因此,有必

要开展发动机无线智能传感器研制及数据处理技术研究,构建发动机无线传感器网络平台,进行发动机测点数据分系统实时监测及综合对比评估分析。

3.4.5 高频光纤光栅传感器

液体火箭发动机工作过程中的结构应变数据直接反映结构的重要健康信息,利用光纤光栅动应变、分布式测量技术能够获得结构响应,可作为重复使用发动机结构评估的重要依据。因此,需要开展低应力、高强度光纤光栅传感技术研究,面向发动机恶劣环境和现场条件限制的光纤光栅传感器埋入技术研究,完成光纤光栅传感器安装方案设计及分析。

目前针对液体火箭发动机结构应变测试对宽温度范围、大量程、高速测量的特殊要求,进行了光纤光栅应变传感器高速解调技术、宽温度范围光纤应变传感器及其布设保护技术、发动机结构光纤光栅应变测试验证等方面的研究。开展了光纤光栅应变传感器在发动机结构试验测试中的应用验证,为发动机结构设计和监测提供先进的测试手段支持。后续将基于重复使用发动机进一步研究该技术的可靠性。

3.5 发动机典型组件一体化检测技术

3.5.1 涡轮泵智能装配与精密测量一体化技术

涡轮泵是液体火箭发动机系统中唯一高速运转的组件,也是故障率最高的组件之一。其中涡轮泵摩擦力矩增大和轴承损坏是涡轮泵故障中的两大主要原因。涡轮泵结构复杂,装配时间非常长,直接影响周转维护的快速性。针对涡轮泵装配测量依靠人工效率低、一致性差、合格率低的问题,需要发展高精度智能化装配与检测技术,实现涡轮泵装配测量一体化,提高装配质量和装配效率。

在不对发动机进行较大拆卸的前提下,通过测量涡轮泵的转动扭矩大小来检测涡轮泵的启动扭矩和摩擦扭矩是否在合理的范围内。通过与正常动作状态下的数值相比,若启动扭矩和摩擦扭矩数实际值有较大的偏差,则表明涡轮泵可能存在故障隐患,需要拆卸检查;若数值在正常范围内,则认为涡轮泵正常,无需拆卸检查。因此涡轮泵转动扭矩的大小成为判断涡轮泵是否存在故障可能性的关键指标。这种通过测量转动扭矩来判断故障可能

性的方法成为快速检测涡轮泵的一种重要手段。

常规的应变测量中,被测组件都处于宏观静止状态,而涡轮泵作为高速旋转部件,其应变很难测量。利用非接触式无线测量技术可以实现最高转速 35 000 r/min 的测量。此外,缺乏针对涡轮盘、轴承等关键零件的有效检测技术,无法对轴承内的滚珠表面损伤进行精确检测与定量评估,严重制约了轴承运行状态与寿命评估判断,迫切需要开展轴承滚珠损伤的超声波检测技术,实现滚珠损伤的定量检测,实现深度不小于 50 mm,纵向分辨率不小于 0.5 mm 的实时检测,为未来轴承在线损伤检测与寿命评估提供支撑。

3.5.2 小型非接触光纤阀门动作在线快速检测

阀门是液体火箭发动机上的关键单点,而目前没有真正确认阀芯的动作是否执行到位、是否存在泄漏等状态的检测手段,需在线确认阀门动作到位情况。利用小型化非接触式光纤位移探头、大动态范围高精度信号检测、物体表面反射自适应补偿等关键技术,研制可监测发动机阀动作执行状态的在线检测样机,能够解决阀门工作状态监测的难题。

3.5.3 智能紧固件

随着高性能液体火箭发动机室压的提高,管路连接处的紧固件载荷相比以往型号增加,同时紧固件要承受工作过程中的高低温热载荷等附加载荷,预紧力的大小和分散严重影响发动机的可靠性。国内对紧固件预紧力的测量还存在无法直接测量和测不准的问题,对型号在复杂服役状态下的连接性能评价缺乏有效的预紧力支撑,对于连接结构预紧力的强度分析和结构优化、服役状态下的原位检测形成技术瓶颈。

近年来国内外开发了带永久安装的传感器(Permanent Mounted Transducer System, PMTS)的紧固件,即将压电传感器以薄膜涂层形式制备在螺栓上,传感器本身非常薄、小,制备完后与螺栓形成一个整体,可随紧固件长期服役使用。使用该产品及测量技术可以实现装备关键部位连接的精确控制,提升连接精度,同时在维修保障环节可以在原位、非拆卸条件下测量连接结构预紧力的变化情况,进而为快速评估零件安装状态提供重要的数据支撑,具有重要的应用价值。

3.6 发动机整机结构完整性评估技术

重复使用液体火箭发动机在工作状态下除发

动机工作时自身复杂的力学环境外,还要受到其他工作与不工作发动机、一级与二级之间、不同发动机/组之间的互相影响。

依托大型振动试验台系统开展液体火箭发动机整机动力学特性识别研究,研究重复试验/试车过程中发动机关键结构完整性演化规律,建立载荷-动特性-完整性对应关系,标定完整性判定参考数据库,依据完整性评估结果快速定位故障及维修并对再次飞行能力进行评估。

4 结 论

本文整理了目前航空航天领域的无损检测技术研究及应用情况,提出针对重复使用液体火箭发动机亟需研究的原位无损检测方法,为其实现快速原位无损检测提供参考,得出以下结论。

1) 为了提高重复使用液体火箭发动机使用维护效率,开展发动机重复使用间原位无损检测技术研究,构建关重件无损检测缺陷图谱等相关数据库,形成相应技术规范非常必要。

2) 航空航天领域现有各类无损检测方法,但尚未很好地应用在重复使用液体火箭发动机上。为了满足便携式、快速高效、自动检测、缺陷可视化和量化等需求,仍需进行针对性的改进。其中超声检测、数字图像测量技术、羽流光谱和快响应动态传感器等是迫切需要研究的关键技术,能够显著提高检测精度和效率。

3) 定制开发自动化、智能化装置是将各类研究方法落地的有效手段,将在未来液体火箭发动机重复使用间的无损检测中发挥重要作用。需优化工艺流程,将试后处理与产品检测集成,开发自动化、智能化使用维护处理与检测系统,进而缩短维护时间。

参考文献

- [1] SMITH R A, HUGO G. Transient eddy-current NDE for ageing aircraft-capabilities and limitations[J]. Insight, 2001, 43: 14-20.
- [2] MOHAMMADKHANI R, FRAGONARA L Z, JANARDHAN P M, et al. Improving depth resolution of ultrasonic phased array imaging to inspect aerospace composite structures[J]. Sensors, 2020, 20(2): 559.

- [3] SUMANA, KUMAR A. Total focusing method based ultrasonic phased array imaging in thick structures[EB/OL]. [2022-11-15]. <https://www.semanticscholar.org/paper/TOTAL-FOCUSING-METHOD-BASED-ULTRASONIC-PHASED-ARRAY-Sumana-Kumar/a8ba3c08d06318557d8d5c2f4edd0841dc7002a9>.
- [4] 田武刚. 航空发动机关键构件内窥涡流集成化原位无损检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. TIAN W G. Research on technology of borescope and eddy current integrative in-situ nondestructive testing for key components of aeroengine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [5] 总装备部. 航空发动机外场原位无损检测要求: GJB 7519-2012[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012. National Military Standard General Equipment Department. Requirements for field in-situ non-destructive testing of aero-engines: GJB 7519-2012[S]. Beijing: General Equipment Military Standard publishing and Distribution Department, 2012.
- [6] SOHN H, FARRAR C R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals[J]. Smart Material Structures, 2001, 10(3): 446-451.
- [7] 赵灿, 王建超, 张健, 等. 发生器头部电子束焊缝熔深相控阵超声检测[J]. 火箭推进, 2022, 48(5): 84-92. ZHAO C, WANG J C, ZHANG J, et al. Phased array ultrasonic testing of electron beam weld penetration at generator head[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(5): 84-92.
- [8] 韩建宁, 张振宇, 王珏. 铆钉超声相控阵检测及应用[J]. 无损探伤, 2021, 45(1): 41-43. HAN J N, ZHANG Z Y, WANG J. Ultrasonic phased array detection and application of rivets[J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 45(1): 41-43.
- [9] 杨琛, 李光植, 马延斌. 相控阵全聚焦实时3D超声成像检测高强度螺栓[J]. 制造与工艺, 2022(19): 136-138. YANG C, LI G Z, MA Y B. Total focusing phased array real time 3D ultrasonic imaging for high strength bolts[J]. Manufacturing and Process, 2022(19): 136-138.
- [10] CHU W P. Investigation of laser holographic Interferometric techniques for structure inspection[Z]. 1973.
- [11] 李辉, 张丽, 张洋洋, 等. 激光超声检测技术在异种钢对接焊缝检测中应用[J]. 电力安全技术, 2023, 25(3): 62-64. LI H, ZHANG L, ZHANG Y Y, et al. Application of laser ultrasonic testing technology in dissimilar steel butt weld inspection[J]. Electric Safety Technology, 2023, 25(3): 62-64.
- [12] 赵灿, 王建超, 王永红, 等. 转子组件电子束焊缝熔深超声检测[J]. 无损探伤, 2022, 46(2): 45-48. ZHAO C, WANG J C, WANG Y H, et al. Ultrasonic inspection of electron beam weld penetration of rotor components[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 46(2): 45-48.
- [13] HUGHES R R, STEVE D. Eddy-current crack detection at frequencies approaching electrical resonance[J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1581:1366-1373.
- [14] DMITRIEV S F, KATASONOV A O, MALIKOV V N, et al. Eddy-current measuring system for analysis of alloy defects and weld seams[J]. Russian Engineering Research, 2016, 36(8): 626-629.
- [15] 国家国防科技工业局. 航空发动机叶片涡流检测: HB 20114-2012[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2012. SASTIND. Methods for eddy current test of aero-engine blades: HB 20114-2012[S]. Beijing: China Aeronautical Comprehensive Technology Research Institute, 2012.
- [16] 赵秀梅, 段建刚, 李永. 涡流阵列探头在高压涡轮叶片原位检测中的应用[J]. 无损检测, 2014, 36(4): 20-22. ZHAO X M, DUAN J G, LI Y. Application of eddy current array probe in the in-situ detection of high pressure turbine blade[J]. Nondestructive Testing Technology, 2014, 36(4): 20-22.
- [17] 喻星星, 付跃文, 张朝晖. 发动机篦齿盘脉冲涡流检测技术研究[C]//航空装备维修技术及应用研讨会论文集. 烟台:[s. n.], 2015. YU X X, FU Y W, ZHANG Z H. Research on pulse eddy current testing technology for engine grate disk[C]//Proceedings of Aviation Equipment Maintenance Technology and Application. Yantai:[s. n.], 2015.
- [18] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427-431.
- [19] SUTTON M, WOLTERS W, PETERS W, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method[J]. Image and Vision Computing, 1983, 1(3):133-139.

- [20] BARONE S, NERI P, PAOLI A, et al. Low-frame-rate single camera system for 3D full-field high-frequency vibration measurements[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 123: 143-152.
- [21] 刘依. 基于数字图像相关的旋转物体位移和应变全场测量方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
LIU Y. Research on full-field measurement method of displacement and strain of rotating object based on digital image correlation[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [22] 张玉玲, 谢爱华, 杨云涛, 等. 数字图像应用于疲劳监测的测量参数研究[J]. *钢结构*, 2022, 37(6): 18-27.
ZHANG Y L, XIE A H, YANG Y T, et al. Test research on measurement parameters of digital image applied to fatigue monitoring[J]. *Steel Construction*, 2022, 37(6): 18-27.
- [23] 余镇江. 基于数字图像相关法的航空发动机叶片三维变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
YU Z J. Research on 3D deformation measurement technology of aero-engine blades based on digital image correlation method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [24] 伍鹏, 李高春, 韩永恒, 等. 基于 SEM 与数字图像相关的固体发动机黏接界面细观损伤过程分析[J]. *火炸药学报*, 2021, 44(1): 106-112.
WU P, LI G C, HAN Y H, et al. Analysis of meso-damage process of solid rocket motor adhesive interface based on SEM and digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(1): 106-112.
- [25] JANELIUKSTIS R, CHEN X. Review of digital image correlation application to large-scale composite structure testing[J]. *Composite Structures*, 2021, 271: 114143.
- [26] GRADL P R. Digital image correlation techniques applied to large scale rocket engine testing[C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2016.
- [27] 陆鹏. 光学无损检测中的载波技术及其在舰船油泵变形测量中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2006, 28(4): 79-81.
LU P. Carrier technology of optic NDT and its application in measurement of ship pump deformation[J]. *Ship Science and Technology*, 2006, 28(4): 79-81.
- [28] MEHRUBEOGLU M, SIMIONESCU P A, ROBINSON S, et al. A comparative study of three vision systems for metal surface defect detection[EB/OL]. [2023-03-10]. https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9611/1/A-comparative-study-of-three-vision-systems-for-metal-surface/10.1117/12.2190216.short#_, 2015.
- [29] TEJWANI G, BIRCHER F, VAN DYKE D, et al. SSME health monitoring at SSC with exhaust plume emission spectroscopy[C]//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 1997.
- [30] TEJWANI G, VAN DYKE D, BIRCHER F, et al. SSME exhaust plume emission spectroscopy at SSC-recent analytical developments and test results [C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 1995.
- [31] 赵永学, 张育林, 李麦亮, 等. 羽流 UV-VIS 辐射在液体火箭发动机故障诊断中的应用技术研究[J]. *宇航学报*, 2002, 23(1): 34-39.
ZHAO Y X, ZHANG Y L, LI M L, et al. Study of the fault diagnosis technology for liquid propellant rocket engine by plume UV-VIS radiation[J]. *Journal of Astronautics*, 2002, 23(1): 34-39.
- [32] 徐启. 固体火箭发动机羽流凝聚相颗粒分析研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
XU Q. Research on particle analysis of condensed phase in solid rocket motor plume[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.