

文章编号: 1674-8190(2024)03-135-08

老旧直升机维修中无损检测技术的应用

张庆, 王勇先, 王勋

(中国人民解放军61769部队, 吕梁032100)

摘要: 随着使用年限的增长, 老旧直升机结构性故障和偶发性故障逐渐增多, 给维护修理带来了诸多困难, 维护人员常常不能及时发现和消除故障隐患。针对当前老旧直升机的特点和维修现状, 介绍了无损检测技术在航空维修领域中的应用, 结合直升机结构特点和使用情况探讨确定老旧直升机无损检测的重点部位和关键部件, 围绕不同无损检测技术特点对直升机关键部件检测的具体应用方法进行阐述, 并结合老旧直升机维护实践对无损检测技术的使用时机做出探讨和研究, 最后对无损检测技术在老旧直升机维修中的应用前景进行了展望。

关键词: 老旧直升机; 维修; 无损检测; 关键部位; 技术应用; 使用时机

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.13

Application of the nondestructive testing technology for old helicopters

ZHANG Qing, WANG Yongxian, WANG Xun

(No.61769 Unite of PLA, Lyuliang 032100, China)

Abstract: With the increase of service time, the increasing number of structural and sporadic failures in old helicopters has brought more challenges to maintenance quality, and the maintenance personnel cannot detect and eliminate hidden faults in time. In this article, the application of aviation non-destructive testing in the field of aviation maintenance and the characteristics and maintenance status of old helicopters are introduced, the key parts and key components of non-destructive testing for old helicopters based on the structural characteristics and usage of helicopters are explored and determined. The specific application methods for testing key parts of helicopters based on the characteristics of different non-destructive testing technologies are elaborated, and the timing of using non-destructive testing technology in the maintenance practice of old helicopters is studied. Finally, the application prospect of non-destructive testing technology in the maintenance of old helicopters is discussed.

Key words: old helicopter; maintenance; non-destructive testing; key parts; application technology; the timing of using

收稿日期: 2023-11-16; 修回日期: 2024-04-23

通信作者: 张庆(1984-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: 164295206@qq.com

引用格式: 张庆, 王勇先, 王勋. 老旧直升机维修中无损检测技术的应用[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 135-142.

ZHANG Qing, WANG Yongxian, WANG Xun. Application of the nondestructive testing technology for old helicopters[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 135-142. (in Chinese)

0 引言

近年来,随着我国航空技术的飞速发展,新型国产直升机陆续服役,新型材料和航电控制系统都有了长足进步,新一代直升机的维护工作也更加科学合理。但是,我国在役直升机仍有大量的老旧直升机,它们仍在军/民用航空领域中发挥着重要作用。如何提高相当数量老旧直升机的日常维护工作质效,确保维修质量可靠,是当前直升机维修工作中一个十分重要的问题^[1]。

本文通过分析当前老旧直升机的结构特点和材料性质,结合维修实践中老旧直升机使用年限增长带来的诸多维护难题,如结构性故障率的升高和故障部位的不易发现等问题^[2],提出为进一步提高维修质量,需重点加强老旧直升机故障的提前预警,在当前无损检测技术的特点优势上,探索其在老旧直升机维修工作中的应用前景。在借鉴民航固定翼飞机无损检测技术的应用案例和老旧直升机维护实践经验的基础上,分析探讨无损检测技术在老旧直升机维护中的重点检测部位,并指出不同检测方法的具体应用部位和时机,以期为今后老旧直升机维修工作合理选择无损检测相关技术提供参考和建议。

1 老旧直升机维修现状

1.1 老旧直升机特点

通常把日历寿命超过 15 年的直升机都作为老旧直升机对待。而不少直升机的预期使用寿命高达 30~50 年,这些型号的直升机一般都是 20 世纪 80~90 年代末定型生产的,一般具有以下特点:

1) 使用时间较长,日历期一般在 15 年以上,到目前一般都经过 2~3 次的大修维护,使用时间也多在 3 000 h 以上,有些甚至超过 5 000 h。

2) 直升机结构和部附件多为金属材料,如铝合金等,复合材料应用较少^[3]。

3) 没有安装健康与使用监测系统(Health and Usage Monitoring System,简称 HUMS)等,对直升机的状态无法做到实时监控和报警,维护和维修多是定期检修和事后维修^[4]。

1.2 当前老旧直升机维修难点

当前,老旧直升机随着日历期和使用时间的

增长,根据航空装备浴盆曲线的特点,老旧直升机在长时间的腐蚀损伤和积累疲劳损伤的作用下,其发生故障的概率明显增加,且多是结构性和深层次的故障,仅依靠日常目视检查和定期检修并不能准确发现故障缺陷。主要的难点有:一是结构性的裂纹故障增多,以我国某轻型直升机为例,在服役了 20 年后,近年来已多次发现垂尾大梁裂纹和尾梁对接框腹板裂纹等故障,某中型运输机也发生过发动机叶片损伤和金属桨叶损伤等故障;二是发生故障的部位多不易发现,因长期腐蚀和疲劳作用,一些故障问题可能出现在直升机机体桁条下方或铆接件下层板等深层次部位,这些部件不在日常检查的范围内,往往不易被发现;三是老旧直升机维修中故障检测手段少、检查方法单一等^[5]。老旧直升机因设计和制造工艺的影响,维修手册给出的维修手段少且定检周期间隔短,当怀疑故障时需要频繁拆卸和分解部件,受限于维护一线与大修工厂的设备差异,过多的拆装分解也会对部件安装精度造成影响,导致一定程度的过度维修。

2 无损检测技术介绍及应用重点

2.1 无损检测技术概念及特点

无损检测是以不损及将来使用和使用可靠性的方法,对材料或制件进行宏观缺陷检测、几何特性测量、组织结构和力学性能变化的评定^[6]。因为无损检测技术能在不损坏部件结构和材料特性的情况下实施检测,对航空器结构件和发动机的影响最小,使得无损检测技术广泛应用于航空器的维修中。为了提前发现缺陷隐患,在常规检查的基础上,通常需要采用无损探伤技术对飞机或直升机上整体结构件和蒙皮进行结构损伤检查。尤其是当前老旧直升机的维修难点多,需要加强无损检测技术在老旧直升机维修中的应用,既能避免直升机主要部件的无效拆卸、分解和安装等过程,节省维修时间和成本,还能提前发现机体结构和发动机内部部件的损伤,提供早期报警。

根据检测方法运用物理原理的不同,无损检测有许多方法。最普遍采用的有:射线检测(RT)、超声检测(UT)、涡流检测(ET)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)和红外热像检测(IRT),通称六大常规无损检测方法^[7]。除了以上 6 种无损探伤,近

年来还发展了声发射检测、计算机层析成像检测、全息干涉/错位散斑干涉检测等新技术^[7],民航领域已逐步应用,但在直升机维修中还未普及,本文暂不做具体介绍。

2.2 老旧直升机无损检测重点部位

直升机无损检测一般可分为原位检测和拆解状态下的离位检测。原位检测一般用于接近性条件较好的结构部位,常用的方法有超声检测、涡流检测和X射线检测。

拆解离位状态下可进行全表面检测,采用的方法以磁粉检测和渗透检测为主^[7]。直升机无损检测的侧重部件通常以动部件为主,重点是关键件、重要件以及结构分离面的相关组件^[8]。零部件

的结合面构成结构分离面(设计分离面、工艺分离面),结构分离面的受力情况一般比较复杂严重,因而结构分离面及其连接件通常也是无损检测关注的部位。

依据直升机的结构特点和主要部件的材料特性,老旧直升机重点危险部位一般是:机体(机身、尾梁、安定面),起落架,操纵系统(变距拉杆、助力器和自动倾斜器),旋翼桨毂(主、尾桨毂),旋翼支撑结构(主减支撑杆、连接接头),主、尾桨叶及其连接组合结构,传动系统(旋翼轴、尾桨轴、传动轴、主/尾减速器),发动机支撑结构^[9]。这些结构的疲劳关键危险部位的确定(疲劳设计)可以作为无损检测部位认定的依据。具体的检测部位如表1所示。

表1 老旧直升机无损检测重点部位
Table 1 The key parts of non-destructive testing for old helicopters

序号	结构系统	无损检测部位
1	机体结构	机身加强框与蒙皮,重要接头区域(主减速器、起落架),蒙皮与桁条的连接,尾梁对接框(腹板、螺栓孔),尾梁、垂直安定面(大梁、铆接处)
2	主/尾减速器	固定端头连接耳片,撑杆的焊缝接头,机体上的接头耳片
3	发动机	压气机、燃气涡轮和自由涡轮叶片,金属管路接头,尾喷管焊缝
4	主、尾桨叶	金属桨叶:桨叶根部接头区域,桨叶中段、后段件及其与大量的胶接情况 复合材料桨叶:桨叶根部区域、桨叶中段、前缘包铁附近区域;桨叶蜂窝结构
5	自动倾斜器	旋转环和不旋转环的关键危险部位是支臂的端头耳孔和支臂根部,扭力臂、防扭臂一般为上下连接耳孔,变距拉杆是上下连接耳孔和拉杆体
6	桨毂	铰接式金属桨毂:轴颈的叉耳接头,螺纹退刀槽等部位,频率匹配器(摆振阻尼器)连接部位,变距摇臂的端头部位 星形柔性桨毂:星形件柔性臂根部区域、主轴孔边缘,变距摇臂根部区域及连接耳孔,弹性轴承,上下夹板的连接孔部位
7	起落架	主起落架和前起落架的缓冲支柱和斜撑杆的焊缝及固定部件,轮毂斜撑杆、半轴连接固定部件

3 无损检测技术在老旧直升机维护中的应用及方法探讨

3.1 射线检测方法应用

射线检测的基本原理:当射线入射到物体时,射线的光量子与物质原子发生一系列相互作用,使入射射线被吸收、散射^[7],如果物体局部区域存在缺陷,它将改变物体对射线的衰减,引起透射射线强度的变化,用底片记录这种变化,就会形成不同黑度的影像。射线检测技术能够直观地显示出部件的缺陷形状及尺寸,对部件内部的体积性缺

陷的灵敏度比较高,对管板材料的焊接及铸件、锻件进行检测时显示效果较好,通常适用于航空器结构件的原位检测,但其对检测材料的厚度有一定限制,不易过厚^[7]。

根据射线检测技术的特点,其主要用于:机体、发动机零部件裂纹检测,蜂窝结构内部积水和芯材损坏检测,结构内部不可见缺陷和原位检测等^[10]。

1) 在直升机维修过程中,射线检测可对直升机机体的外蒙皮、主要隔框和梁等部位进行原位检测,实际工作中由于射线检测操作实施难度大,通常以上部位多采用其他检测技术。

2) 在部件及发动机维修中,可检测焊接部位的缺陷,如发动机叶片或尾喷管等。

3) 检测结构腐蚀。因结构腐蚀的存在与否等同于结构的厚度变化,厚度的变化在底片上会呈现黑度差,可利用射线来进行结构的腐蚀检测。

4) 利用射线检测方法可对桨叶等复合材料蜂窝结构进行检测(如图 1 所示),可检测出蜂窝结构内的积水和芯格断裂、芯格节点分离,蜂窝受损等^[11]。

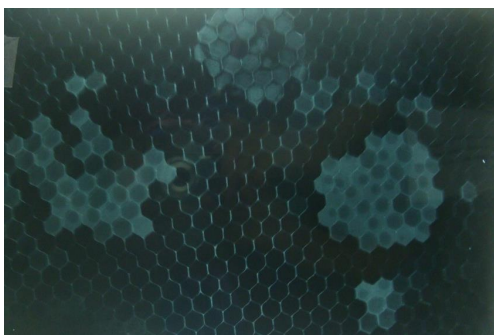


图 1 利用射线检测方法检测蜂窝结构积水

Fig. 1 Using radiographic testing to detect water ponding

3.2 超声波检测方法应用

在物体中传播的超声波遇到材料的声阻抗有变化时,部分声能被反射,根据反射信号的幅度可对缺陷的大小做出评估;根据入射波与反射波之间的时间差可确定反射面与声波入射点之间的距离,从而确定缺陷的位置^[12]。简单来讲,超声检测技术是利用声波与物质相互作用时,声速及声波的能量会发生变化这一现象,通过对声速和声波衰减的测量,来确定物质的一些基本物理参数的无损检测方法^[13]。超声检测设备通常包括:超声检测仪、探头、试块和耦合剂。

超声检测常用技术有:脉冲反射直射声束法、脉冲反射斜射声束法和穿透法等^[14]。在直升机维修中可用于:

1) 根据直升机结构,采用直射声束法可以检测主要部件连接螺栓的裂纹情况;

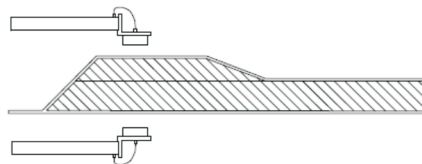
2) 根据老旧直升机情况,利用斜射声束法可及时检测出主、尾减速器等部件凸耳的疲劳裂纹;

3) 利用斜射声束法可进行老旧直升机紧固件孔检查,及时发现主要部件连接螺栓孔周围的缺陷;

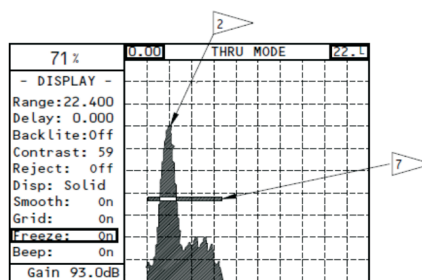
4) 在老旧直升机发动机大修工作中,可采用

相控阵技术对涡轴发动机燃气发生器叶片和自由涡轮叶片的裂纹进行检测^[15];

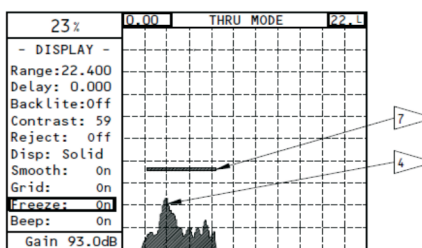
5) 采用空气耦合穿透法可检测复合材料(桨叶、桨毂等)脱粘缺陷(如图 2 所示),采用脉冲反射法检测层压结构(如层压弹性轴承)的分层缺陷。



(a) 空气耦合穿透法示意图



(b) 检测中正常区域的信号



(c) 脱粘区域的信号

图 2 采用空气耦合穿透法检测复合材料脱粘缺陷
Fig. 2 Using air coupling penetration method to detect bonding defect of aluminum composites

但因超声检测设备的成本较高,同时检测设备较大的体积也限制了其使用场合,故超声检测设备只能在宽敞的生产车间或者实验室使用^[16]。上述限制因素导致该设备在维护一线使用较难实现,在实际维修中还要结合情况合理选择使用超声检测技术。

3.3 涡流检测方法应用

涡流检测是一种基于电磁感应原理的无损检测方法。检测线圈通电后,当其在空气中时,其阻抗为某一恒定值。将线圈从空气中移动到检测工

件上之后,由于工件上涡流场的影响,检测线圈的阻抗将发生变化。涡流检测常用技术有高频表面检测、电导率测试等。

老旧直升机,长时间受运动载荷和环境因素的作用,在交变应力的作用下,结构表面易产生疲劳裂纹。涡流检测法通常应用于:

1) 涡流检测表面疲劳裂纹具有很高的灵敏度。采用高频表面检测对金属整流罩、机身隔框铆钉孔裂等部件检测,可及时发现裂纹故障;

2) 电导率测量可评估材料热处理状态及热损伤。用于非铁磁性材料,最常用于铝合金等,例如机体内金属地板梁的疲劳裂纹、紧固件孔疲劳裂纹、金属蒙皮近表面裂纹、主减速器撑杆(主要受力结构)的疲劳裂纹等。

3.4 磁粉检测方法应用

磁粉检测的基本原理是当铁磁性工件被磁化后,由于材料不连续性的存在,使工件表面和近表面的磁力线在材料不连续处发生局部畸变而产生漏磁场。吸附施加在工件表面的磁粉,形成了在合适光照下目视可见的磁痕,从而显示出材料不连续性的位置、形状和大小^[17-18]。

磁粉检测适用于铁磁性材料的表面和近表面检测,在老旧直升机维修中,主要可用于检测机轮轮毂螺栓、传动系统齿轮、连接接耳、支架等钢结构的表面和近表面裂纹,如检测直升机起落架套筒表面铬层龟裂(如图3所示)、发动机安装螺栓、起落架汽缸外筒疲劳裂纹等。

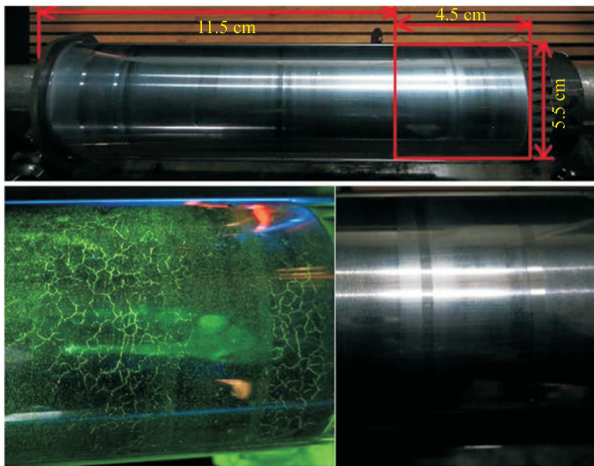


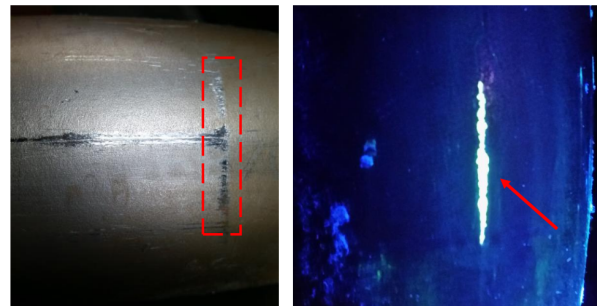
图3 起落架套筒表面铬层龟裂

Fig. 3 The cracks on the surface of the landing gear sleeve

3.5 渗透检测方法应用

渗透检测又称液体渗透检测,是一种以毛细作用原理为理论基础,主要用于检测非多孔性材料表面不连续性缺陷的一种无损检测方法^[7]。

渗透检测基本操作流程包括:前处理、渗透、去除表面渗透剂、干燥、显像、检验、后处理等。渗透检测是当前直升机维修中最常用的无损检测技术,适用于表面裂纹、折叠等缺陷的检测(如图4所示)。



(a) 金属部件裂纹位置

(b) 荧光下的裂纹表现

图4 渗透法检测金属疲劳裂纹

Fig. 4 Using Infiltration testing to detect Metal fatigue cracks

1) 直升机起落架机轮轮毂裂纹检测,也可检测主要固定螺栓的断裂、其他零部件裂纹等;

2) 发动机大修时,检测涡轮盘、涡轮叶片缺陷;

3) 机身主要结构,如垂尾局部打磨区,焊接区等。

3.6 红外热像检测方法应用

红外检测的实质是红外测温。当物体与周围环境存在温度差,就会在物体内部产生热量的流动。热量流动的过程受物体材料、结构和缺陷的影响,反映到物体表面会形成不同温度的区域^[19]。运用红外热像测量方法,可以根据被检测工件不同部位的温度变化来确定是否存在缺陷。

红外热像检测在老旧直升机维护中通常应用于:

1) 复合材料蜂窝结构的缺陷检测,可检测某些受到外部冲击(砂石、冰雹等)但表面无损伤的部位^[20],如桨叶、整流罩、尾翼等复合材料部件的内部缺陷或积水等(如图5所示)。

2) 应力集中处(铆钉附近)、导致疲劳裂纹的

金属部件,如机体隔框、加强板等。

3) 各种化学原因造成的锈蚀,特别是内表面锈蚀,还有各种失效的粘接、焊接、铆接。

4) 涂层的检测,如发动机部件、叶片的镀膜、涂层探伤问题。



图5 红外热像检测复合材料

Fig. 5 Using infrared imaging to detect aluminum composites

4 老旧直升机无损检测应用时机探讨

直升机具体检测部位与时机一般参考以下3个方面,一是技术手册中使用维护的规定;二是实际使用中出现过的偶发性损伤破坏的部件;三是基于疲劳理论分析对所确定的动部件及重要结构连接件^[21]。根据老旧直升机的特点,为提高检测能力,提升老龄直升机维修质量问题,应当执行与过去不同的维修和检测方案,着重解决腐蚀控制和疲劳检测问题。

1) 基于损伤容限设计的要求,贯穿于结构全寿命期内的周期性检查^[22]。

2) 日常维护中(机械日等),根据使用情况对可能发生故障的部位可采取随机临时性无损检测^[23]。例如在某一机型上某些确定部位,经过日常维护实践,应将重要金属部件的无损检测作为常态性检查。

3) 目前在多型直升机使用寿命增加的形势下,定期检查过程中,对拆卸下来的非到寿更换结构部附件,应进行探伤检查。

4) 直升机大修时,对机体构件进行最大程度地拆解,应对机体结构和机械部件进行最大程度的无损检测,检测结果可对直升机全寿命周期减少成本做出关键贡献,提出可靠性和可行性预

测^[24],这直接决定了大修后老旧直升机再服役安全寿命问题。

5) 部分老旧直升机延寿时,对机体、部件延寿评估是一项重要的工作,而延寿评估的基础是损伤检测,是延寿与否的重要依据。

6) 超常飞行后的检查(大姿态变换、机动飞行、特情飞行、粗暴着陆)以及长期处于特殊环境下(盐雾环境、沙尘环境)的飞行。由于复杂环境和超载荷可能具有加剧结构损伤扩展的危险性,应加强无损检测。

7) 特定检查如换季检查、专项检查,根据老旧直升机使用的自然条件和季节性变化特点,对整机、某些系统或机件进行预防性检查。需要根据检查科目对相应结构部件进行无损检测。

8) 老旧直升机发生非常规重大故障或批次性问题时,结合故障部位,也需要根据技术通报等加强对同型机群故障部件的无损检测。

5 结束语

随着近年来无损检测技术在航空、航天领域的广泛应用,其已经成为航天、航空制造业的核心支撑技术,在新材料、新工艺的研究,以及新型号飞机的设计制造和全寿命维修中,都发挥着重要的反馈作用。无损检测技术在直升机维修保障体系中的作用也日趋重要,尤其是老旧直升机维修工作中,加强无损检测技术的应用将带来极大的效益提升。一是弥补老旧直升机设计制造的不足,为其检修提供更精确和便利的检测技术和方法;二是能避免维修中无效部件拆卸、分解和安装,极大地节省维修成本,提高维修效率和质量;三是针对老旧直升机故障率上升的实际,能提前发现机体结构和发动机内部部件的损伤,为直升机提供预先报警,提高飞行安全性。

但是目前,从检测仪器设备、检测手段工艺等方面,无损检测在直升机日常维护中尤其是提升老旧直升机维修质量方面应用还不广泛,只是作为辅助手段出现,例如技术设备单一,从业人员培训及资格认证缺乏,直升机无损检测的标准、时机不明确,缺乏规范化检测程序和工艺等。相信在借鉴民航固定翼飞机的无损检测成果的条件下,随着老旧直升机维修经验的深化和无损检测技术的不断应用,无损检测技术会在直升机维修中取

得更好的应用前景。

参考文献

- [1] 高岩. 无损检测在直升机复合材料检测中的应用[C]//2019年(第四届)中国航空科学技术大会论文集. 沈阳:中国航空学会, 2019: 626-629.
GAO Yan. Application of non-destructive testing in helicopter composite material testing [C] // Proceedings of the Fourth China Aviation Science and Technology Conference in 2019. Shenyang: CSAA, 2019: 626-629. (in Chinese)
- [2] 傅天航, 刘松平, 刘菲菲, 等. 复合材料桨叶无损检测技术研究进展[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10): 162-166, 171.
FU Tianhang, LIU Songping, LIU Feifei, et al. Research progress on nondestructive testing technology of composite rotor blade[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10): 162-166, 171. (in Chinese)
- [3] 王正峰, 李志峰. 复合材料桨叶前缘包铁研制及使用现状[J]. 直升机技术, 2018(2): 68-72.
WANG Zhengfeng, LI Zhifeng. Development and application actuality of composite material blade leading edge protection[J]. Helicopter Technique, 2018(2): 68-72. (in Chinese)
- [4] 于杰. 基于声发射的直升机旋翼桨叶损伤在线监测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
YU Jie. Research on online monitoring method for damage of helicopter rotors and blades based on acoustic emission [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [5] 李小丽, 陈新波, 何忠祥, 等. 直升机涡轴发动机叶片损伤检测与定量评估[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 69-73.
LI Xiaoli, CHEN Xinbo, HE Zhongxiang, et al. Damage detection and quantitative evaluation of helicopter turboshaft engine blades [J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 69-73. (in Chinese)
- [6] 陈果, 李爱. 航空器检测与诊断技术导论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012: 208-212.
CHEN Guo, LI Ai. Introduction to aircraft inspection and diagnostic technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012: 208-212. (in Chinese)
- [7] 耿荣生, 景鹏. 航空装备无损检测技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012(1): 55-59.
GENG Rongsheng, JING Peng. Up-to-date NDT technology for aviation equipment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(1): 55-59. (in Chinese)
- [8] 柳文林, 穆志韬, 段成美. 直升机动部件寿命评定技术[J]. 航空维修与工程, 2004(6): 29-31.
LIU Wenlin, MU Zhitao, DUAN Chengmei. The fatigue life evaluation technology of helicopter dynamic components [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2004(6): 29-31. (in Chinese)
- [9] 陈康, 刘建新. 直升机结构与系统[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 121-132.
CHEN Kang, LIU Jianxin. Helicopter structure and systems [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007: 121-132. (in Chinese)
- [10] 许占显, 孙占华. 飞机复合材料结构的修补与无损评估[J]. 航空制造技术, 2003(12): 59-61.
XU Zhanxian, SUN Zhanhua. Repairing and nondestructive evaluation of aircraft composite structures [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(12): 59-61. (in Chinese)
- [11] 王仲生. 无损检测诊断现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 135-137.
WANG Zhongsheng. Practical on-site techniques for non-destructive testing and diagnosis [M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 135-137. (in Chinese)
- [12] 周钦瑶, 汪鑫, 肖遥, 等. 飞机轮毂超声检测装置设计[J]. 科技资讯, 2017(6): 23.
ZHOU Qinyao, WANG Xin, XIAO Yao, et al. Design of ultrasonic testing device for aircraft wheel hub [J]. Science & Technology Information, 2017(6): 23. (in Chinese)
- [13] 郭佳, 李四海, 宁宁, 等. 激光超声技术在无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 487-490.
GUO Jia, LI Sihai, NING Ning, et al. Application of laser ultrasonic technique in non-destructive testing [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(4): 487-490. (in Chinese)
- [14] 李昊. 超声无损检测技术的现状和发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2021(18): 2-5.
LI Hao. Current situation and development trend of ultrasonic non-destructive detection technology [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(18): 2-5. (in Chinese)
- [15] 黄松岭, 彭丽莎, 孙洪宇. 航空发动机叶片缺陷无损检测与在线监测技术综述[J]. 测控技术, 2023, 42(5): 1-11.
HUANG Songling, PENG Lisha, SUN Hongyu. Review of nondestructive testing and online monitoring technology for aero-engine blade defects [J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(5): 1-11. (in Chinese)
- [16] 张昭, 肖迎春, 李闵行, 等. 激光超声技术在航空碳纤维复合材料无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 269-274.
ZHANG Zhao, XIAO Yingchun, LI Minxing, et al. Applications of laser ultrasound NDT technology in aeronautical carbon fiber composite materials [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 269-274. (in Chinese)
- [17] 陈新波, 李小丽, 黄富明. 固定式智能磁粉探伤机的研制[J]. 无损探伤, 2022, 44(3): 30-33.
CHEN Xinbo, LI Xiaoli, HUANG Fuming. Development of a fixed intelligent magnetic particle testing machine [J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 44(3): 30-33. (in Chinese)

- [18] 刘波, 乐磊, 赵伟, 等. 电站在役设备焊缝的磁粉探伤[J]. 科技视界, 2016(4): 43.
LIU Bo, LE Lei, ZHAO Wei, et al. Magnetic particle testing of welds on in-service equipment in power stations[J]. Science & Technology Vision, 2016(4): 43. (in Chinese)
- [19] 邱花. 基于红外热波无损检测的纤维金属层板缺陷检测研究[J]. 化工机械, 2022, 49(1): 27-30.
QIU Hua. Study on nondestructive testing of fiber metal laminate defects based on infrared thermal wave[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2022, 49(1): 27-30. (in Chinese)
- [20] 陈韩青, 徐志远, 屈仲毅, 等. 蜂窝夹层结构无损检测方法研究综述[J]. 材料导报, 2023(4): 208-209.
CHEN Hanqing, XU Zhiyuan, QU Zhongyi, et al. Review of nondestructive testing methods for honeycomb sandwich structures[J]. Materials Reports, 2023(4): 208-209. (in Chinese)
- [21] 李小丽, 陈新波, 丁浩东. 基于有限元仿真的典型航空零件损伤预测与试验分析[J]. 无损探伤, 2022(4): 24-26.
LI Xiaoli, CHEN Xinbo, DING Haodong. Damage prediction and experimental analysis of typical aviation parts based on finite element simulation[J]. Nondestructive Testing, 2022(4): 24-26. (in Chinese)
- [22] 冯振宇, 杜洪增, 田秀云. 老龄飞机结构广布疲劳损伤研究的关键问题[J]. 中国民航学院学报, 2004(6): 83-86.
FENG Zhenyu, DU Hongzeng, TIAN Xiuyun. Key issues in the study of widespread fatigue damage in aging aircraft structures[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2004(6): 83-86. (in Chinese)
- [23] 宋和福. 从二代机到三代机维修看无损检测技术发展变化[J]. 山东工业技术, 2018(22): 56-62.
SONG Hefu. Development and changes of nondestructive testing technology from second generation machine to third generation[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2018(22): 56-62. (in Chinese)
- [24] ABDO S, HOVANEK M, KORBA P. Utilization of NDT methods in aircraft maintenance[J]. New Trends in Aviation Development (NTAD), 2021(8): 978.
- (编辑:马文静)

~~~~~

(上接第 109 页)

- configuration management scheme for ARJ21-700 aircraft development project [D]. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese)
- [13] 吴彬彬. 民用客机机载软件构型管理活动方案研究[J]. 中国信息化, 2017, 28(8): 60-62.  
WU Binbin. Research on the activity plan of civil aircraft airborne software configuration management[J]. China Information, 2017, 28(8): 60-62. (in Chinese)
- [14] 舒婷, 聂磊, 何遗非, 等. 基于PDM系统的构型管理的研究[J]. 科技创新导报, 2013(36): 153-155.  
SHU Ting, NIE Lei, HE Yifei, et al. Research on configuration management based on PDM system[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(36): 153-155. (in Chinese)
- [15] 谭莉娟, 郑巍, 刘友林, 等. 面向适航标准的机载软件测试验证方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(15): 9-22.  
TAN Lijuan, ZHENG Wei, LIU Youlin, et al. Overview of airborne software testing and verification methods for airworthiness standards[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(15): 9-22. (in Chinese)
- [16] 王仁龙. TC阶段软件的制造符合性检查[J]. 中国民用航空, 2011(3): 60-63.  
WANG Renlong. Manufacturing conformance check of software in TC stage[J]. China Civil Aviation, 2011(3): 60-63. (in Chinese)
- [17] 徐燕, 钟德明, 尹帅. 基于系统理论过程分析的软件安全性分析[J]. 计算机应用, 2013, 33(s2): 238-240.  
XU Yan, ZHONG Deming, YIN Shuai. Software security analysis based on system theory process analysis[J]. Computer Applications, 2013, 33(s2): 238-240. (in Chinese)
- [18] 陈海洋, 刘锐, 李宁宁. 飞机软件升级管控与机上验证探索[J]. 科技与创新, 2022(1): 53-55.  
CHEN Haiyang, LIU Rui, LI Ningning. Aircraft software upgrade control and on-board verification[J]. Science and Technology & Innovation, 2022(1): 53-55. (in Chinese)
- (编辑:马文静)