

无损检测在飞机定延寿工作中的新进展

New Development of NDT in Prolonging Service Life of Aircraft Group

北京航空工程技术研究中心 耿荣生 景 鹏



耿荣生

无损检测学会理事长,国际无损检测委员会(ICNDT)荣誉委员,亚太地区无损检测委员会委员;北京航空工程技术研究中心教授。主要研究领域为声发射、动态监测和故障诊断技术等。获二等级以上军队及省部级科技进步奖9项,发表论文140多篇。2008年获国际无损检测委员会(ICNDT)颁发的SOKOLOV奖。

保障现役飞机安全可靠飞行和延长其安全使用期是空军的永恒话题和面临的最重要任务。在过去的9

以声发射技术为中心的综合无损检测技术已在空军现役飞机安全可靠飞行方面起到重要保障和技术支撑作用,并在两种三代机机群定、延寿试验中成功应用,保证了试验的顺利进行。采用文中所述的技术,两种机型的机群寿命均有50%以上的提高,说明无损检测是一项典型的具有低投入、高产出的工程应用技术。

年多时间里,笔者有幸参加了2个不同三代机机型的全尺寸疲劳试验,旨在确定和延长这2类飞机的机群寿命,这是一项过去从未有人尝试过的工作。

采用了以声发射为中心的综合无损检测方法,顺利完成了在整个疲劳试验过程中对试验飞机关键结构损伤的预报和健康监测任务,保证了试验任务的圆满完成^[1-2]。将无损检测技术全面引入飞机的定、延寿任务中,其面临困难、技术上的挑战以及对承担检测任务科技人员心理承受能力的考验都是空前的。经验说明,无损检测(NDT)或无损评价(NDE)技术在现役飞机的全寿命过程中起着极其重要的作用,它对保证飞行安全,延长飞机寿命,创造提高经济和

社会效益都具有非常重要的意义。

综合无损检测技术在现役飞机定、延寿中的重要作用

飞机寿命分疲劳寿命和日历寿命,前者是基于使用时间的寿命,又称飞行小时寿命,主要由疲劳强度决定(注:包括起落次数寿命),后者是基于日历时间的寿命,主要由抗腐蚀性能决定。在训练强度加强的情况下,疲劳寿命(因先于日历寿命到达)比日历寿命更有意义,也比日历寿命更重要。因此,除非特别说明,文中所述的寿命均指疲劳寿命。理论上,寿命应当是设计指标(根据关键部位受力情况选择材料、结构强度等),但设计水平总是有限,因此,疲劳寿命需要而且也只能通过全尺寸疲劳试验

来确定,即在地面模拟飞机全寿命过程中的载荷情况。另外,一些主战飞机是从国外进口的,由于(外方)制造商一般只给出十分保守的寿命指标,不会提供特别有价值的寿命资料,在此情况下,通过疲劳试验确定飞机机群寿命就更有意义。

全尺寸飞机疲劳试验的三要素,是编制出反映该机群使用情况的试验载荷谱和试验大纲;完善的试验加载控制设备和装置,实现按载荷谱和试验大纲规定的疲劳加载;以及试验过程中的无损检测和监测(在到达最大可修尺寸之前发现裂纹,经修理后损伤恢复初始值水平从而达到延长使用寿命的目的)。前两条是保证疲劳试验过程能再现试验机机群的真实飞行载荷,而最后一条的无损检测则是获取寿命数据的重要保障。试验过程中的无损检测和监测面临非常高的风险。首先是需要长达数年的时间跨度中及时和实时发现裂纹,其次是试验中的高背景噪声。由于在长达几年的试验过程中都要求损伤监、检测结果的实时性和及时性,而疲劳试验具有一次性和不可重复,以及无先验知识和多数关键结构可达性差或者不可达,无损检测面临的风险之大难以想像。由于是随机谱加载,试验过程中记录的监测信号波动非常大,常规意义下的包括统计参数变化趋势分析这样的信号处理方法很难奏效。如果在试验过程中未能及时发现关键结构的裂纹或损伤,或者等到发现时损伤已超过允许的范围(容限),疲劳试验将无法继续进行(再继续也失去意义),其结果是给不出有价值的飞机机群寿命,同时对外场现役飞机也提供不出有价值的防范措施。这将意味着疲劳试验是以失败而告终,其直接经济损失将达数亿元,而军事和政治上的损伤将无法弥补,如图1所示。笔者在历经2种不同机型飞机的全尺寸疲劳试验之后,认为利用基于声发射的综合裂

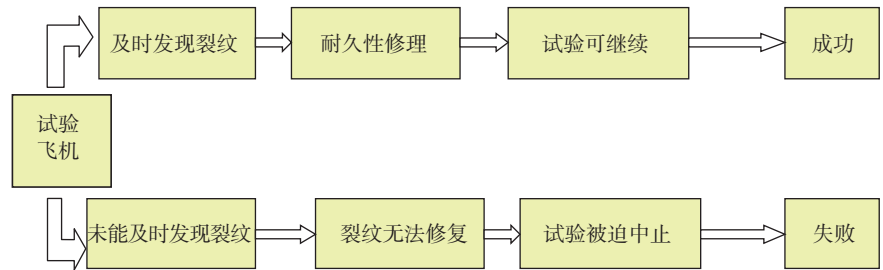


图1 全程无损检测、监测的重要性和高风险

纹监测、检测技术主要需要考虑以下几方面的因素。

1 疲劳裂纹综合检测方法

飞机疲劳试验时间跨度长(3~4年),需要检查的部位多,因此,任何单一检测方法都不能完全解决问题,而必须采用综合检测方法。在采用声发射监、检测方法对重点和关键部位实施全程监测的同时,特别强调目视跟踪检查(包括借助视频内窥镜的辅助目视检查),它可分为日常巡检和详细检查。依据我们长达数年的统计,目视巡检加上借助视频内窥镜的间接目视检测大概占到检测工作量的70%。还有一些行之有效并易于实现的方法也不应当被忽略,例如充气保压检查法。由于座舱、油箱有气密要求,在加载时,座舱、油箱舱均充压。若发现掉压后或保不住压力时,仔细检查该部位。中央翼3墙第1次开裂时就是发现油箱不能保压检查出来的。还有气密座舱开胶,也是通过检查座舱压力才发现的。试验中还利用了应变和位移法,监控构件应力水平,特别是利用了光栅应变测量技术发现高应变部位,以便对其加强监测。至于常用的无损检测方法,一定根据具体对象使用合适的方法并考虑不致过多占用试验时间。

在一些特殊情况下,特别是对重要的内部结构,为了提高裂纹监测的可靠性,还在一些关键时间节点增加了真空比较法监测和视频窥镜实时监测,它们对保证试验的成功都起到十分重要的作用。

当有怀疑部位时,还一度使用了X-射线照相法并将其作为一段时间

内的监测手段。例如试验某一阶段,外翼、中央翼2墙等部位,经用X-射线照相确认无裂纹后试验才重新开始。这种综合无损检测方法需要熟悉试验过程、细心观察飞机各(关键)部位在试验过程中的变化,并合理分配检测资源。

2 声发射监测、检测需要考虑的因素

试验过程中的损伤监测对保证试验成功具有决定意义。虽然也采用了应变监测和真空比较法监测,但由于监测区域总是有限,所以最终确定采用声发射技术为主要监测手段,其最大优点是覆盖的区域较大,通过合理布置声发射传感器可达到关键结构的全范围覆盖。疲劳试验过程中的声发射监测面临一些特殊问题。

首先是强背景振动信号。与静态拉伸或压力容器不同,试验机在受到随机载荷时,机体各部位都会产生十分强烈的振动信号,这些信号被声发射传感器拾取,形成所谓背景声发射信号,实际上是一种振动信号,而不是真正意义下的声发射信号。

其次,在多数情况下,疲劳裂纹形成和扩展产生的声发射信号即真正意义下的同损伤发展相联系的声发射信号要小于甚至远小于背景信号。

再次,试验的时间跨度多达几年,而对关键构件的损伤发展和扩展的预报又需要及时性和实时性。因此,失败的风险很高,这对参试人员的意志力和毅力也是一个重要考验。

2.1 监测和检测位置的选择

检测位置在理论上应当包括飞机的所有重要部位,而监测位置主要

是针对那些特别重要的关键结构,例如,中央翼一、二、三墙和外翼一、二、三墙,特别是中央翼与外翼在一、二、三墙的对接区域。虽然在试验的过程中曾对具体监测位置做过细微调整,但主要监测位置保持相对稳定。具体监测位置是在听取了强度专家的意见并结合现场情况再确定的。这样使监测的工作量大为减少。

2.2 声波传播通道的确认

确定具体监测部位后,一个必须通过试验解决的重要问题是从关键结构处到监测用声发射传感器需要有良好的声波传播通道。由于通常使用至少 2 个 AE 传感器监测一个关键部位,从关键部位到这 2 个 AE 传感器的声波衰减量应当尽量相同,即所谓“等衰减原则”。这需要在疲劳试验开始前(并在试验的中间合适阶段)通过模拟声发射(断铅)试验来解决。

2.3 背景声发射信号或背景噪声的统计分析

所谓统计平均特性并不是指各通道声发射参数(波击数、能量、事件数等)的简单平均,而是需要利用基于载荷、基于位置或其他参数将数据拆分(即所谓基于载荷滤波的统计值、基于空间滤波的统计平均值或基于其他参数滤波的统计值)分析等一系列方法^[1-2]。

3 信号子集的统计平均值趋势分析和相关分析

虽然疲劳试验是采用随机载荷谱,但它可以分成一系列有序的载荷子集,分别反映一定的飞机受力状态。例如,机体试验时,可按照科目方式(例如编队飞行、基本特技、战斗特技、空战、对地攻击等)归纳分类,特别是其中代表重飞行载荷的科目(战斗特技和空战等)。类似地,在起落架疲劳试验中也可进行这样的数据拆分。一个完整起落过程包括牵引、滑行、起飞线发动机试车、起飞滑跑拉起,及着陆、着陆滑跑、刹车、着

陆曲线滑行和转弯等不同状态,其中主要受力方式为起飞、着陆、滑行、制动、转弯等。为达到参数统计平均和趋势分析的目的,这些科目一定要有足够的采集数据,需要在试验过程中有意识地注意采集。一般说来,试验过程中各传感器接收到的信号是非稳态随机信号,对这样的信号采用统计平均或获取其统计参数作为判据特征值,收效甚微。但是,按科目分类后的信号可以认为更接近稳态或可看成是一种准稳态随机信号,其统计特征将会比较明显^[1-3]。

如再进一步对其处理,例如,进行空间滤波,即仅取出某一空间内的信号进行统计平均,它将十分接近稳态随机信号,在正常情况下,其变化在一定范围之内,否则即认为是出现“异常”。所谓空间滤波,需要在获得定位信号后,根据定位信号的分布情况再划出某一(最重要的)位置范围,例如(X, X+X0)之间的信号作为研究对象。此方式即可将获得的 AE 数据分割成如下(便于分析的)一系列子数据集,随之而来的“工作”即是分析这些子数据集的变化趋势,并及时发现异常时间点。建立子数据集的具体方法可见参考文献[2]。上述信号处理方法的一个基本条件是需要获得足够多的信号集,特别是强载荷时的信号集,这意味着试验过程中需要采集海量数据。

4 取得的主要成果

4.1 机群寿命的延长

仅在 #1 机型的试验中共发现了 193 个部位的疲劳裂纹和断裂故障,其中 38 条出现在关键部位上。由于发现及时,所有裂纹部位均可耐久性修理得到加强和验证,避免了导致试验失败的关键问题。通过 2 种不同机型的疲劳试验,两机群的飞行小时寿命都有 50% 以上的提高,其直接经济效益以百亿元为单位计算。与此同时,通过对这两种机群的合理延寿,成功解决了领先飞机的安全使

用,其军事意义也十分重大。课题采用的裂纹综合无损监测、检测技术,以及自行发展的一套完整声发射信号处理和预报技术,对未来疲劳试验过程的无损检测、监测工作具有指导意义,也将会为未来完成其他新机种的全机疲劳试验任务奠定坚实的基础。裂纹综合无损检测技术可以向大修厂和外场进行推广,从而对未来我军飞机的修理工作起到促进作用。

4.2 飞机裂纹图谱

课题研究的另一成果是首次编制了某飞机的关键裂纹图谱和总裂纹图谱,它对该型飞机的未来使用和修理具有重要意义。因此,依据目前所得到的试验结果,不仅可以给出某系列飞机使用寿命为某某飞行小时的结论,且为开展某系列飞机二次大修工作提供了重要的支持。

4.3 对飞机修理周期和修理方式的指导意义

利用先进的监控手段,在全机疲劳试验过程实施无损检测、监测,不但可通过早期预防性维修或者耐久性修理恢复试验飞机的结构完整性,从而为延长飞机寿命提供科学决策,同时也为该机(机群)确定修理周期、修理方式(内容)和未来该型飞机疲劳细节设计改进提供重要依据。与此同时,疲劳试验过程发现的有关飞机结构损伤的信息还将对外场该机型现役飞机的使用、维护提供指导准则,以保证这些飞机的飞行安全,这同样具有极其重要的意义。

4.4 飞机设计改进与工艺质量改进

某飞机全机疲劳试验的成功还为我们对国产化某飞机及后一机型某飞机的特性有了更加深入的了解。2008~2012 年进行的后一机型某飞机疲劳试验说明,在一些十分类似或十分相近的关键结构位置,其总体疲劳特性、工艺特性明显要比前一机型优越,仅这一点可能就会为飞机设计部门提供足够多的学习和改进空间。虽然两者都达到既定寿命,前一机型

某飞机的工艺水平达到了设计水平,但试验中暴露了平尾大轴的腐蚀,平尾边肋裂纹,中央翼一墙装配应力和制孔质量等工艺问题,应引起重视,说明工艺质量对寿命的影响关系重大。暴露工艺问题为提高工厂生产质量起到了重要的指导作用。

航空发动机轴承故障的无损检测及单机寿命监测

人们已逐步认识到包含多种检测方法的数据集成和数据融合技术对于解决复杂问题的有效性,其进一步发展则是所谓的“云无损检测技术”,即将云计算技术植入无损检测问题^[4]。与此相对应的另一发展方向是面向特定对象的专用检测仪器,对于在役飞机而言,这也是一种很有前途的发展方向^[5]。某型飞机在部队提高作战能力上具有重要作用,其轴间滚棒轴承和高压涡轮滚棒轴承状态,尤其是轴间轴承间隙即为我们特别关心的检测参数。在综合考虑各种可能的无损检测方法后,决定采用振动检测方法,即根据某一频率段的振动信号值来确定间隙量。由于无法接近该部位,设计了专用检测杆和

特别的传感器启动装置。检测时按下长杆的弹簧开关使传感器簧片放下,将长杆前端由整流罩锥口(图2)送入到涡轮轴底部靠近轴间滚棒轴承处(即图中箭头指向处,此时长杆外露长度约为20~30cm)并松开弹簧开关,使传感器与轴内壁保持良好接触状况。摇转发动机即可根据表头读数判断间隙量。拨动进气道的叶片可测量不同方位的间隙量(通常在3个方向进行检测即可)。这样的设备特别适合对发动机状态进行监测,由于使用简单,只要经常实施检测并记录每次测量获得的(平均)间隙量,根据它的变化趋势即可比较可靠地判断轴承的状态是否正常,这其实是一种典型的健康监测方法。这样研制的仪器已批量装备部队并取得良好的监、检测效果。

依靠损伤监控和健康监测的思想目前已发展成一种新的监测方式,即单机寿命监控,以克服疲劳试验给出的寿命指标不能覆盖单机差异的缺点,这是一种更科学合理的定寿方式。全尺寸疲劳试验定寿在确保机群所有飞机高安全性前提下需考虑不同飞机性能的“离散性”,因此,试

验机达到的疲劳寿命需除以一分散系数(通常设为3~5的整数)才能作为机群的寿命。对同一机群的绝大多数飞机,给出的寿命指标肯定是十分保守的,亦即存在很大的“寿命浪费”。单机寿命监控与全机疲劳试验相结合,将为现役飞机提供更合理、更科学的寿命指标并保障更安全的飞行。

结束语

以声发射技术为中心的综合无损检测技术已在空军现役飞机安全可靠飞行方面起到重要保障和技术支撑作用,并在2种三代机机群定、延寿试验中成功应用,保证了试验的顺利进行。采用文中所述的技术,两种机型的机群寿命均有50%以上的提高,说明无损检测是一项典型的具有低投入、高产出的工程应用技术。由于全尺寸飞机机体疲劳试验是飞机全寿命过程在时间刻度上的“压缩”,试验时的无损检测完全代表了飞机全寿命过程的检测需求,可为这些型号飞机使用过程的无损检测提出指导原则。论文还说明,研制一些具有特定用途的专用检测仪器可能是另一值得重视的发展方向,而将全机疲劳试验与单机寿命监控相结合,可为未来现役飞机机群和单机提供更合理的寿命和保障更安全的飞行。

参考文献

- [1] 耿荣生. 无损检测与全尺寸飞机疲劳试验(上)(下). 全国第九届无损检测会议论文集, 2010.
- [2] 耿荣生, 景鹏. 基于声发射监测的综合无损检测技术与飞机疲劳试验定寿. 应用声学, 2012, 31(1):28-34.
- [3] 张凤林, 韩维, 胡田才, 等. 声发射技术在航空领域的应用研究. 无损检测, 2000, 22(4):156-161.
- [4] 林俊明. 云检测 - 检测与评价技术的发展趋势. 全球华人无损检测高峰论坛论文集, 2011:51-57.
- [5] 雷洪. 空军装备2010年无损检测应用研究. 无损检测, 2011(3):27-29.

(责编 小城)

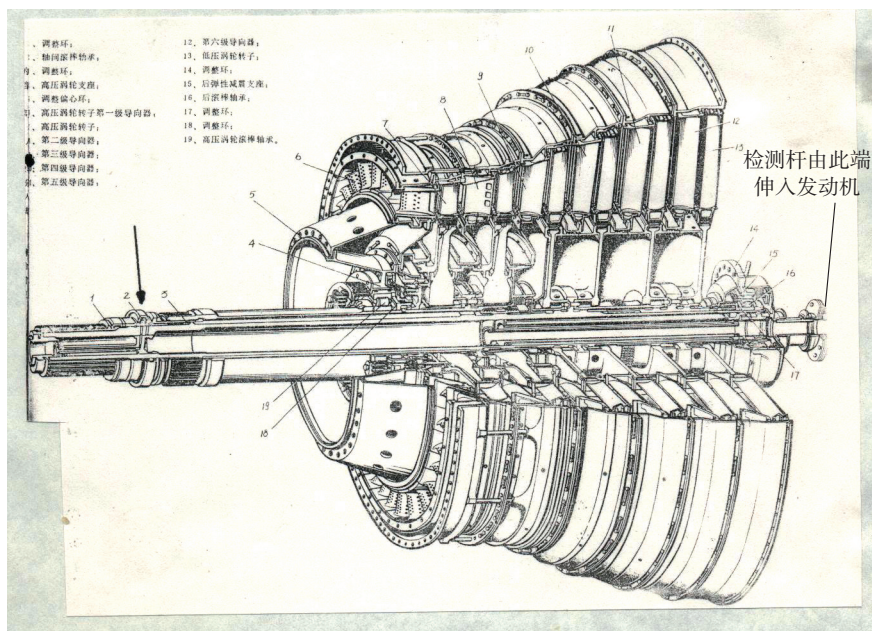


图2 某型发动机及检测其轴间轴承间隙量用检测杆图略