

民用飞机发动机部件无损检测技术研究

中国民航大学航空自动化学院 刘涛 刘岱 詹湘琳 诸葛晶昌

【摘要】无损检测技术(NDT)是民用飞机发动机生产制造、日常维修、在役检测中均被广泛应用的一种检测方法。本文通过介绍民用飞机发动机无损检测技术难点,优化针对发动机叶片、发动机转子等特殊部件的无损检测技术方案。

【关键词】无损检测;在役检测;发动机叶片

1. 引言

无损检测技术(Nondestructive Detection Technology, NDT)作为一种有效的检测手段,已在民用飞机发动机的生产、制造、日常维护和检查过程中都发挥了极其重要的作用。针对现有民用飞机发动机的无损检测技术主要有:射线检测、涡流检测、内窥检测、以及超声检测等等,这些技术都具有各自的应用特点。其中由于射线检测技术成本高、对人体有害、使用局限性大,因此,该技术被较少应用在民用飞机发动机的日常维修当中。而涡流技术拥有检测速度快、无需耦合剂、非接触式检测等优点。但是值适用于检测导电材料,并且对形状复杂的零部件检查难度较大,甚至只能检测表面及亚表面的缺陷。内窥检测法适用于发动机的突发性事件检测、定期检测和故障监控,是目前各大航空公司对发动机在役检测的主要手段,尤其是针对发动机不易拆卸的部件和检验可达性较差的部件。超声检测技术优势是可以对金属和非金属以及复合材料进行无损检测,但是该方法存在应用局限性,例如会存在检测盲区、对于不光滑表面和无法进行处理的表面难于检测,因此,该测试方法适用于发动机中长期处在高转速、高负荷、高温等恶劣工作环境下,使用过程中极易产生疲劳裂纹和破损的发动机部件。综上所述,各种无损检测方法各有优劣势,但针对民用飞机发动机这一复杂的检测对象,仅靠单一的检测技术已难以面对其缺陷程度做出准确的诊断。因此利用上述各种无损检测方法具有互补性的特点进行检测技术集成,再融汇多种检测方法使之完成多种发动机型号、多种部件类型、高检测效率的民用飞机发动机无损检测任务。可构建多信息融合的无损检测技术的创新。^[1]

2. 民用飞机发动机常规NDT

民用飞机发动机多为高涵道涡轮风扇发动机,它主要由进气道、风扇、压气机、燃烧室、涡轮及附件系统组成。由于其结构复杂、经常转换工作状态,承受强大的交变载荷等因素,导致发动机部件易于发生疲劳和各种损伤,导致故障频发,严重时会使发动机工作失效,威胁飞行安全。目前常规的民用飞机发动机的NDT方法有:目视检测、涡流检测、内窥检测和超声检测等方法。根据持续适航审定要求和维修规范,NDT检测对于发动机的稳定工作和延长寿命都有非常重要的意义。

2.1 目视检测

目视检测是判断表面缺陷的一种无损检测,优点是简单、快速,是现在民航业一直延用的航线检测方法。但缺点是仅能检查发动机部件的表面,如发动机进气道、整流锥、风扇、尾喷管等。并且由于外界环境和发动机工作状态等原因,往往影响目视检查的效果。

2.2 涡流检测

涡流检测是以电磁感应为基础的无损检测技术。其优点是操作容易、检测速度快、不需要直接接触、不需要耦合剂。但缺点是由于发动机部件形状和大小等原因难以判断缺陷类型,干扰因素较多是还需要特殊信号处理技术,对形状特殊的部件检测效率较低。

2.3 内窥检测

内窥检测具有无损、直观和快速的性能,主要用来检测发动机不易拆卸和可达性较差的部件,例如燃烧室和涡轮叶片的缺陷,同时也可作为涡流检测提供图像,使检测人员可以清楚看到叶片的位置和损伤情况。该技术具有图像

清晰,分辨率高,可供多人同时观察,同时可采用数字图像处理技术提高图像质量等优点。

2.4 超声相控阵检测

超声相控阵检测技术采用阵列换能器,通过控制各阵元发射激励脉冲的延迟时间,达到合成波束聚焦、偏转等多种相控效果。通过局部晶片单元组合对声场控制,可实现高速、全方位和多角度检测。可根据被测部件形状使用相应的探头来检测难以接近的部位。具有检测速度快、灵活性强的特点。

3. 民用飞机发动机部件检测方案

发动机压气机叶片和涡轮叶片由于长期处在高温、高转速、高符合的工作条件下容易产生疲劳裂纹,而疲劳裂纹多发生在叶身1/3处和叶片榫槽处,是危害发动机安全的主要因素。

3.1 压气机叶片和涡轮叶片

超声相控阵检测系统原理是由超声波换能器、发射电路、接收电路、主控电路和显示装置组成。检测过程如图1所示。

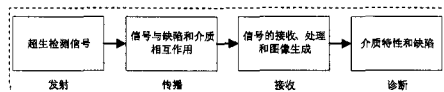


图1 超声相控阵检测流程图

发射部分:探头由一系列独立晶片按一定形状、尺寸排列组成,每一个晶片都有自己的接头、延时电路和模数转换器,每个晶片在声学上都是独立的。通常在二维或多维上排列若干单元换能器组成阵列,利用预先设定的各自独立发射和时间延迟电路来依次激励每个单元换能器,产生具有可控的人为预定的确定相位的声波,所有单元换能器在检测对象中产生的超声场相互干涉叠加,从而得到预先期望的波束入射角度和焦点位置,形成发射聚焦或声束偏转的效果。接收部分:在换能器发射的超声波遇到目标产生回波信号后,利用到达各阵元的时间存在差异的特性对各阵元接收信号进行延时补偿,然后相加合成,把特定方向回波信号叠加增强,而把其它方向的回波信号减弱甚至抵消。最后控制各阵元的相位和幅度形成聚焦、变迹等多种相控效果。^[2]

由于发动机涡轮盘是一个具有一定曲面的非平面部件,并且叶片根部紧密相联。因此,需要根据其结构和相控阵探头的偏转能力来满足对叶片根部检测的全面覆盖。首先超声波的波束需要在一定角度范围内进行扫描检查。横波检测的扫描检查范围为35°~75°。其次,尽可能一次相控阵扫描检查能覆盖所有被测区域,实时显示检测图像。通常取衰减值为-20dB,相控阵的扫描检查范围取决于阵元尺寸和波长,最大扫描检查范围可由波束半扩散角表达式求出。如公式1和公式2所示。^[3]

$$\gamma_{30dB} = \arcsin 0.74 \frac{\lambda}{D} \mu s \quad (1)$$

$$S_{30dB} = \frac{1.7F\lambda}{D} (F < N) \quad (2)$$

其中: λ 为波长取值1.18;D为传感器矩形晶片的边长;F为焦距。

对于发动机叶片缺陷的分析,首先利用超声波检测对多组发动机叶片进行检测,鉴于检测信号中所夹杂的噪声干扰需进行过滤干扰信号,提取有缺陷特征的特征信号,当信号幅值发生突变时通过这一特性可确定叶片缺陷。

3.2 发动机转子

发动机转子的危险部位是它的R角处,在此

处容易产生疲劳裂纹。如图2和图3可知R区的外形尺寸和结构的特殊性,该区域的圆弧曲率半径较小,不利于超声探头的耦合,声束不能覆盖整个圆弧区,并且入射声束与圆弧区域的检测表面不能达到垂直的要求,因此降低检测的灵敏度和干扰缺陷的判断。^[4]但是可以通过用涡流法检测材质的硬度,并用磁记忆法检测该区域的磨损程度。由于发动机转子结构较为特殊,其缺陷判断率较低的原因,可采用低频超声检测或激光超声检测来验证其内部状态。



图2 转子危险区域示意图



图3 转子检测示意图

3.3 发动机机匣

红外热波的无损检测技术是一种基于红外热波理论的非接触式检测,这种检测方式对被测物体进行主动加热,通过热波在缺陷地的传播的温度的不同,采集红外图像,对红外热图像进行图像分析。^[5]该技术的难度在于加热方式的选择。通常采用的加热方式有周期性和脉冲式两种。由于不同的发动机机匣材料各不同,在整体发动机上不同位置的机匣的物理特性也各不同,直接影响热波的传输效果,导致加热方式的不同。因此,针对发动机机匣进行实时检测时,应采用主动式热波激励法,同时记录发动机机匣表面实时温度变化,然后将该变化生成图像,最后对输出图像进行增强、滤波、去噪、锐化等处理。

4. 结语

无损检测技术是为民用飞机发动机的安全运转提供了可靠的保障和技术支撑。无论是在发动机的生产制造中,还是日常维修中,无损检测都发挥了极其重要的作用。因此,对无损检测技术的深入研究和技术创新,有利于提高民用飞机发动机安全性和可靠性,实现对民用飞机发动机的高灵敏度、高可靠性检测也可为提高航空企业的维修效率、节约维修成本,提供有力的技术支持。

参考文献

- [1] You Fenghe. Some new development of eddy current testing[J]. NDT of China, 2001, 23(2): 71-73.
- [2] 罗云林, 耿智军. 基于超声相控阵的飞机蒙皮检测技术研究[J]. 检测技术, 2014, 33(5): 131-134.
- [3] 江文文, 柏逢明. 航空发动机涡轮叶片相控阵超声检测研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34(4): 66-69.
- [4] 林俊明, 徐滨士, 董世运等. 发动机再制造零部件无损检测技术[J]. 2008, 551-555.
- [5] 赵璐, 孙焱, 曲娜. 航空发动机涡轮叶片裂纹红外热波无损检测研究[J]. 电子世界, 2014(11): 63.
- [6] 俞佳, 李明仁, 任吉林等. 民用飞机在役维护中无损检测的应用[J]. 无损探伤, 2011, 35(6): 1-4.
- [7] 马保全, 周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 1787-1803.

本文受天津市科技支撑计划项目(11ZCGH200700); 天津市高等学校科技发展基金计划项目(20100412); 人才科研启动基金(2010QD02S)资助。