

Crack Monitoring Sensitivity Analysis of Rosette Eddy Current Sensor Based on Semi-Analytical Model*

JIAO Shengbo, DING Hua, HE Yuting*, HOU Bo

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To monitor the crack damage located at bolt hole of metallic bolted-joint structure, a kind of rosette eddy current sensor with flexible and planar features was introduced, and the effects of driving frequency and sensor geometric parameters on crack monitoring sensitivity of sensor were analyzed based on constructed damage monitoring semi-analytical model. Four-channel rosette eddy current sensor was prepared with flexible printed circuit board technology, and fatigue crack monitoring experiment of 2A12 aluminum alloy specimen with center hole was carried out to verify the fatigue crack monitoring capability of sensor. Analysis results show that optimized driving frequency exists under difference liftoffs and the optimized damage monitoring sensitivity decreases with the increasing of liftoff. Damage monitoring sensitivity increases with decreasing of winding thickness and increasing of distance between driving and sensing winding, while the ratio between driving and sensing winding width has a small effect on the monitoring sensitivity of the sensor damage. Monitoring experiment result indicates that monitoring curve changing-point of sensing channels could be served as the indication of crack position except channel 1, and monitoring curve changing-point of channel 1 is initiation point of accumulated fatigue damage.

Key words: condition-based maintenance; structure health monitoring; rosette eddy current sensor; monitoring sensitivity; semi-analytical model

EEACC: 7310; 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.02.013

基于半解析模型的花萼状涡流传感器损伤监测灵敏度分析*

焦胜博, 丁 华, 何宇廷*, 侯 波

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对金属螺栓连接结构的孔边疲劳裂纹监测需求, 介绍了一种具有柔性平面特点的花萼状涡流传感器, 构建其损伤监测半解析模型, 并通过半解析模型分析激励频率和传感器结构参数对监测灵敏度的影响, 最后利用柔性电路板工艺制备出传感器, 并进行 2A12 铝合金中心孔板试样疲劳损伤监测试验验证花萼状涡流传感器的疲劳裂纹监测能力。损伤监测灵敏度分析结果表明在不同提离距离下传感器具有最优灵敏度频率点, 且随提离距离的增大, 最优灵敏度值减小, 最优频率点降低。传感器线圈厚度越小灵敏度越高, 且感应线圈与激励线圈之间的水平间距越大则传感器的损伤监测灵敏度越大, 而感应线圈与激励线圈宽度比值对传感器的损伤监测灵敏度影响较小。监测试验表明, 除第一个通道以外, 传感器其它感应通道归一化跨阻抗幅值随疲劳荷载次数变化曲线的拐点对应的即为裂纹扩展到相应通道下方的疲劳荷载次数, 而第一个通道的拐点可以初步确定试件的累积损伤起始点。

关键词: 结构健康监测; 基于状态的维修; 花萼状涡流传感器; 监测灵敏度; 半解析模型

中图分类号: TP212.1; V215.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)02-0205-06

为实现航空装备精确维修以保证航空装备的结构完整性和运行安全性, 继传统的事后维修和定时维修模式之后, 基于状态的维修模式(CBM)

被提出来并逐渐应用到航空装备的精确维修中^[1-2]。CBM 在确定维修需求时最突出的特点时考虑了装备的运行状态信息, 根据实时获取的状

项目来源: 国家高技术研究发展计划项目(2009AA04Z406); 十二五预研飞机结构裂纹检测微米传感器研究项目(51327030204)

收稿日期: 2012-11-02 修改日期: 2012-12-21

态信息制定维修决策。而作为获取装备底层状态信息的关键支撑技术,结构健康/损伤监测技术(SHM)成为实现CBM的重点同时也是难点。相比于各种无损检测技术(NDT),SHM技术侧重于考虑传感器与结构的一体化设计以及信息获取的连续性和实时性,前者要求传感器在设计过程也要考虑结构的运行状态和运行环境,例如应用于飞机关键连接结构的损伤监测传感器在设计过程中除了要考虑监测能力,也要考虑其承载能力和耐久性,而信息获取的连续性和实时则要求损伤监测系统实现自动化和智能化。

受技术水平限制,现有基于各类传感器的SHM技术还无法实现传感器与结构的无缝整合,而是采取将传感器贴附或嵌入到结构的方式实现对结构损伤状态的监测,如较为成熟的光纤技术、压电涂层、智能信息涂层、声发射及相对真空度^[3-7]等,同时这些技术在实际工程应用中存在诸多问题,例如智能信息涂层由于其随附损伤特性原理导致涂层经常出现脱落、损坏等各种耐久性问题,因此,研发损伤识别精度和准确度较高、耐久性较好、抗干扰能力强、综合效费比高的损伤监测传感器,仍是一个亟待解决的问题^[3]。目前,一类柔性平面涡流阵列传感器因其具有诸多优势而逐渐地被应用到结构健康监测中,其除了具有传统涡流检测中的高频下裂纹监测的高灵敏度和非接触式的特点之外,还具有柔性平面的特点,可监测具有复杂平面的结构,并且可通过现有成熟柔性电路板工艺制备,有利于进一步的工程推广应用。这类柔性平面涡流阵列传感器中,最具代表性的是美国JENTEK公司的MWM(Meandering Winding Magnetometer)^[8]传感器以及空客公司在A320现役客机上采用的ETFS(Eddy Current Foil Sensor)^[9]。目前,在我国的航空裂纹监测领域,涡流阵列传感器也得到广泛应用,如某型飞机篦齿盘的裂纹检测^[10-11]。

针对金属螺栓连接结构的孔边疲劳裂纹监测需求,本文介绍了一种具有柔性平面特点的花萼状涡流传感器,构建其损伤监测半解析模型,并通过半解析模型得到不同脱离距离下具有最优监测灵敏度的激励频率点,分析传感器结构参数对监测灵敏度的影响,最后利用柔性电路板工艺制备出传感器,并进行2A12铝合金中心孔板试样疲劳损伤监测试验验证花萼状涡流传感器的疲劳裂纹监测能力。

1 花萼状涡流传感器

1.1 传感器简化物理模型

花萼状涡流传感器是针对螺栓连接结构的孔边裂

纹监测需求而提出来的,其简化物理模型如图1所示。

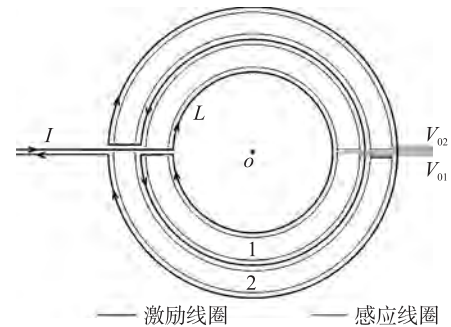


图1 花萼状涡流传感器简化物理模型

如图1所示,区别于传统涡流检测中所使用的多匝绕制线圈,花萼状涡流传感器由共面的单匝激励线圈和感应线圈构成(激励和感应线圈之间的基材厚度可忽略),单匝激励线圈从中心圆处呈辐射状向四周螺旋展开,在激励线圈的螺旋线间隔内分布着环状感应线圈。激励电流 I 在环状区域1和2产生激励场,由法拉第电磁感应定律,区域1和2所包含的感应线圈感生出 V_{01} 和 V_{02} ,而位于区域1和2下方的结构损伤可通过涡流影响感生电压 V_{01} 和 V_{02} ,则可以通过 V_{01} 和 V_{02} 的变化来判断裂纹损伤的当前位置,即花萼状涡流传感器通过类似一种分段监测的机制来实现对结构裂纹损伤的定量监测。传感器4个感应通道由内而外依次为1、2、3、4通道,其中1通道为靠近螺栓的通道。

将该涡流阵列传感器应用于螺栓孔孔边裂纹的监测时,主要有如图2所示的3种典型情形。对于情形图2(a),传感器通过某种方式固定于结构表面,适用于裂纹容限较大的结构,如蒙皮,这种应用方式对传感器的承载、耐磨性能没有太严格的要求。而对于裂纹容限较小的结构,传感器的必须像情形图2(b)和情形图2(c)那样使用,将传感器安装于螺栓头下方或安装于连接件之间,螺栓的压紧力构成了传感器的主要工况。

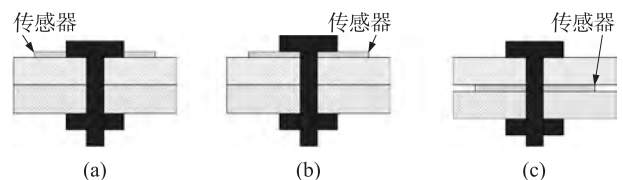


图2 传感器在螺栓孔处的典型应用情形

1.2 传感器损伤监测半解析模型

花萼状涡流传感器的损伤监测半解析模型表述了激励频率、传感器结构参数和被监测结构电磁参数等输入参数对传感器输出信号的影响。由于半解析模型构建过程较为复杂和繁琐,本节给出其建模

思路,部分具体建模过程可参考文献[12]。

图3是传感器损伤监测基本物理模型的横截面图。传感器放置于被监测结构上方,提离距离为 Δ_L ,被监测结构的厚度为 Δ_S ,其电导率为 σ ,磁导率为 μ ;激励线圈和感应线圈的宽度分别为 p 和 s ,其间距为 g ,线圈厚度为 Δ_{wind} ;相邻激励线圈间距 λ 定义为传感器的波长,即为裂纹监测精度。柱坐标系下时谐场位函数 A 的微分方程的通解形式为

$$A = J_1(kr)(c_1 e^{\chi z} + c_2 e^{-\chi z}) \vec{\varphi} \quad (1)$$

其中 $\chi^2 = k^2 + j\omega\mu\sigma$, ω 为激励线圈中电流的激励频率, σ 为介质层电导率, μ 为介质磁导率, k 为分离常数; J_1 为第一类型一阶 Bessel 函数。考虑 $Z=0$ 线圈截面,由式(1)可得该截面上的线电流密度 K 和磁矢 A 的 Bessel 级数表达式^[13]。

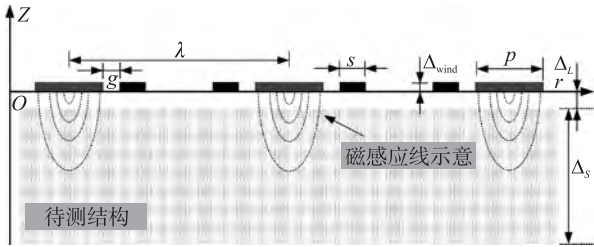


图3 传感器损伤监测基本物理模型(示意图)

$$K(r) = \sum_{n=1}^{\infty} K_{Bn} J_1\left(\frac{\alpha_n}{R} r\right) \quad (2)$$

$$A(r) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{Bn} J_1\left(\frac{\alpha_n}{R} r\right) \quad (3)$$

其中, α_n 是 J_1 的正向零点序列, R 是模型外边界。在线圈截面处配置离散点和子域,如图4所示。将离散点处的线电流密度作为未知参数,根据相邻离散点之间线电流密度的线性分布假设可得 K 的 Bessel 级数系数 K_{Bn} 的向量表达式

$$\mathbf{K}_{Bn} = M\mathbf{K} \quad (4)$$

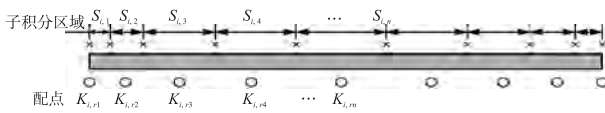


图4 第*i*段激励线圈横截面处的配点及子域划分方式

其中 \mathbf{K} 为所有离散点处未知线电流密度所构成的向量, M 为系数项,将式(4)代入式(2)得线圈截面处的线电流密度。同时,根据层状介质空间上下界面处场量的传递关系式以及线圈截面处边界条件可得线圈界面处的磁矢 A 的 Bessel 级数系数 A_{Bn} 的向量表达式

$$\mathbf{A}_{Bn} = T\mathbf{K}_{Bn} \quad (5)$$

则将式(5)代入式(3)得线圈截面处的磁矢 A 。应用法拉第电磁感应定律到任意圆形闭合路径,得

$$v = j\omega(2\pi r')A_{\varphi}(r') + 2\pi r' \frac{K(r')}{\Delta_{wind}\sigma_{wind}} \quad (6)$$

式中, v 为电压源,即在激励线圈是激励电压输入,在感应线圈中是感应电压输出; Δ_{wind} 是线圈厚度; σ_{wind} 是线圈电导率。对式6等式两边在图4中定义的子域内积分,得

$$\mathbf{M}_{TU}\mathbf{K} = \mathbf{V} \quad (7)$$

式中 \mathbf{V} 为电压源向量。考虑激励线圈和感应线圈中的线电流密度与电流约束关系,可建立得如下矩阵表达式

$$\mathbf{M}_{TD}\mathbf{K} = \mathbf{I} \quad (8)$$

联立式(7)和式(8),得包含所有离散点处未知线电流密度和感应线圈电压的矩阵等式,将激励线圈电流定义为1 A,则根据线性方程组求解理论可得各通道感应线圈感应电压,继而求得各感应线圈通道的跨阻抗值。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{TU} & \mathbf{M}_{TL} \\ \mathbf{M}_{TD} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 损伤监测灵敏度分析

2A12 铝合金以其较高的强度、良好的塑性成形能力和机械加工性能成为航空工业中使用最为广泛的铝合金之一。本节以 2A12 铝合金为被监测结构,应用上节构建的损伤监测半解析模型,分析激励频率和传感器结构参数对损伤监测灵敏度的影响。定义损伤监测灵敏度 S_{σ}

$$S_{\sigma} = \frac{\partial Z_A}{\partial \sigma} \approx \frac{\frac{\Delta Z_A}{Z_A^0}}{\frac{\Delta \sigma}{\sigma_0}} \quad (10)$$

式中, Z_A 为传感器跨阻抗幅值, σ 为 2A12 铝合金电导率, ΔZ_A 和 $\Delta \sigma$ 分别为结构损伤引起的跨阻抗幅值和电导率的变化量, Z_A^0 和 σ_0 分别为结构未发生损伤时的跨阻抗幅值和电导率。考虑到传感器各个通道的跨阻抗随输入参数的变化规律是一致,本文选取第一通道进行损伤监测灵敏度分析。

2.1 激励频率的影响

图5是不同提离距离下的传感器损伤监测灵敏度随激励频率的变化,从图5中可以看出,提离距离越大,损伤监测灵敏度越小。在不同提离距离下具有最优灵敏度频率点,且频率点大小随提离距离的增大而减小。需要注意的是,在损伤监测灵敏度分析中考虑了提离距离的影响,主要是因为很多实际金属结构表面都会经过阳极氧化或镀膜等工艺处理,从而在结构表面产生一层非导电介质,如 2A12

铝合金结构会经过阳极氧化处理,TC4 钛合金在 430 ℃ 加热会形成很薄且具有保护性的氧化膜,而不同厚度的非导电氧化膜在模型中即表征为传感器提高距离的增大。

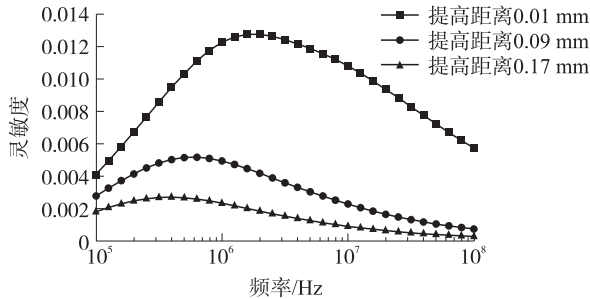


图5 不同提高距离下的损伤监测灵敏度随激励频率的变化

图5是传感器损伤监测灵敏度的最优频率点和最优灵敏度值随提高距离的变化曲线,即确定了结构表面氧化膜等非导电介质膜的厚度后,可以根据图6对传感器进行激励频率点选择。从图6中可以看出,随提高距离的增大,最优灵敏度值减小,同时最优频率点也降低,并且会趋于稳定值。

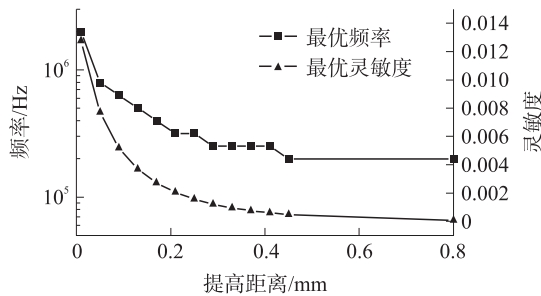


图6 损伤监测灵敏度最优频率点和最优灵敏度值随提高距离的变化

2.2 导线厚度的影响

图7为0.05 mm提高距离下的不同导线厚度的传感器损伤监测灵敏度随传感器激励频率的变化曲线。图7中,在最优频率点附近处不同导线厚度下的损伤监测灵敏度差别较大,且导线厚度越小灵敏度越高,导线厚度越大灵敏度越低,同时,由图中

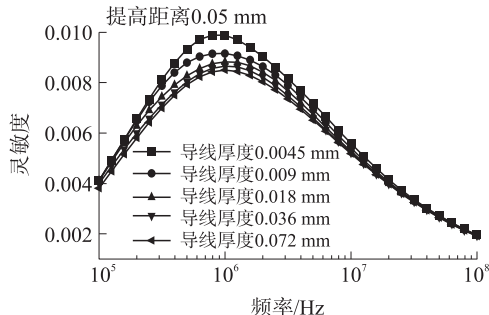


图7 不同导线厚度下的传感器损伤监测灵敏度随激励频率的变化

可以看出,0.036 mm导线厚度和0.072 mm导线厚度下的曲线几乎无差别,即损伤监测灵敏度降低的幅度随导线厚度增大而减小。

2.3 感应线圈和激励线圈间距的影响

图8为0.05 mm提高距离下的不同感应和激励线圈间距的传感器损伤监测灵敏度随传感器激励频率的变化曲线。图8中,感应线圈与激励线圈之间的水平间距越大则传感器的损伤监测灵敏度越大,这是由于水平间距越大,激励线圈所激发的入射场对感应线圈的直接影响就越小,则由结构电导率变化引起的涡流反射场变化对感应线圈的影响就变大,即损伤监测灵敏度变大。同时,从图中可以看出,感应线圈与激励线圈之间的水平间距大小对最优频率点的影响较为微弱。

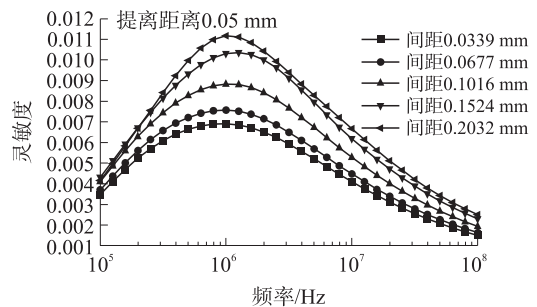


图8 不同间距下的传感器损伤监测灵敏度随激励频率的变化

2.4 激励线圈与感应线圈宽度比值

图9为0.05 mm提高距离下的不同激励线圈与感应线圈宽度比值的传感器损伤监测灵敏度随传感器激励频率的变化曲线。从图9中可以看出,感应线圈与激励线圈宽度比值对传感器的损伤监测灵敏度影响较小,在小范围内,比值越大,则损伤监测灵敏度越小。

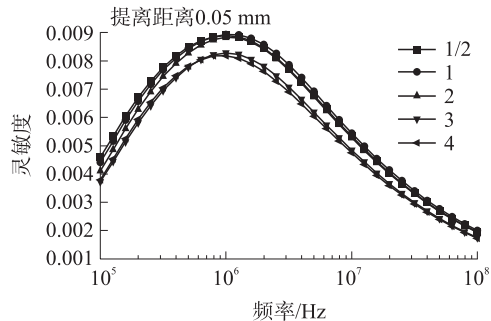


图9 不同激励线圈与感应线圈宽度比值下的传感器损伤监测灵敏度随激励频率的变化

3 疲劳损伤监测试验

本节根据灵敏度分析结果设计传感器的几何尺寸,如线圈厚度、激励线圈和感应线圈的间距以及宽

度等,并通过柔性电路板工艺制备了四通道花萼状涡流传感器,传感器波长设计为 1 mm,即裂纹监测精度设计为 1 mm,激励频率根据最优频率点曲线确定。为验证花萼状涡流传感器所设计的 1 mm 精度疲劳裂纹监测能力,在实验室条件下进行 2A12 铝合金中心孔板试样疲劳损伤监测试验。疲劳裂纹损伤监测试验硬件框架图如图 10 所示。

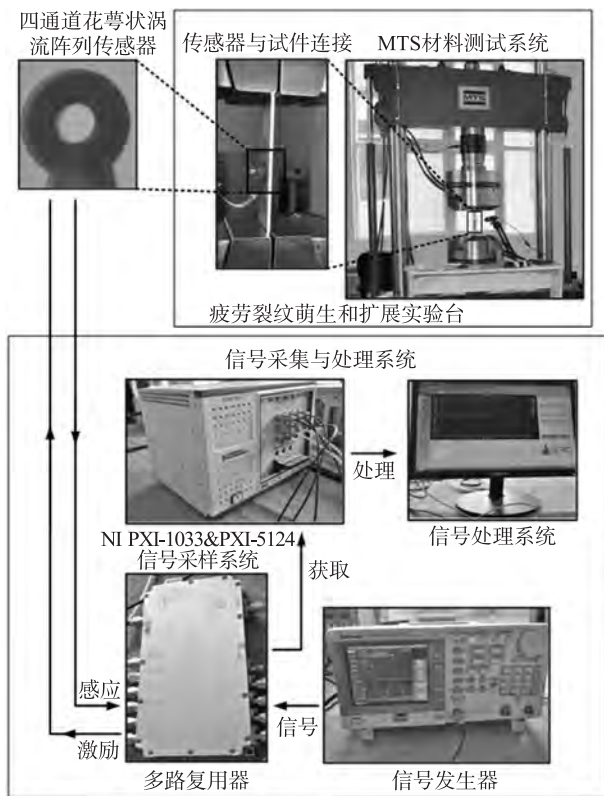


图 10 疲劳裂纹损伤监测试验硬件框架图

图 10 中,使用螺栓连接花萼状涡流传感器和 2A12 铝合金中心孔板,通过 MTS 材料试验系统对试验件加载载荷谱使得在中心孔边萌生并扩展裂纹,疲劳载荷谱如表 1 所示。

表 1 程序载荷谱

	应力/MPa	应力比	循环次数
高载	170	0.06	2 900
低载	190	0.06	100

表 1 中,采取了高低载方式的程序载荷谱,其目的在得到疲劳弧线,通过对疲劳弧线进行断口定量可分析得到实际疲劳裂纹扩展曲线,用于对比传感器的监测结果。

以试件发生破坏时的传感器各通道跨阻抗值为归一化因子,图 11 是传感器四个感应通道归一化跨阻抗幅值随疲劳载荷次数的变化,除通道 1 外,其他三个感应通道的归一化跨阻抗幅值曲线都存在明显

的拐点,分别为 B、C 和 D,根据传感器分段监测机制,可知这三个拐点对应的即为裂纹扩展到相应通道下方的疲劳载荷次数,这与试件破坏后的断口定量分析结果是一致的。通道 1 的归一化跨阻抗幅值在拐点 A 后不断增大,而断口定量分析结果表明在 A 点处还未萌生裂纹,考虑到通道 1 离孔边距离较近,可以初步确定 A 点对应为试件的累积损伤起始点。通道 1 与通道 2、3、4 的变化趋势有所不同,这是由于通道 1 靠近连接的螺栓(距离 0.16 mm),在传感器工作时螺栓对通道 1 的感应磁场产生一定干扰造成的。并且,依据疲劳裂纹损伤理论,试验件开始时就有累计裂纹损伤,即试验件开始时就会有初始裂纹,因此,通道 1 信号并不会像通道 2、3、4 一样出现明显的“拐点”。综上分析,根据监测结果,所设计的花萼状涡流传感器具有 1 mm 精度疲劳裂纹监测能力。

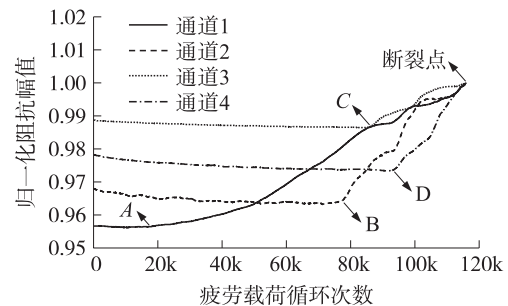


图 11 传感器四个感应通道归一化跨阻抗幅值随疲劳载荷次数的变化

4 结论

(1) 提高距离越大,花萼状涡流传感器的损伤监测灵敏度越小。在不同提高距离下都具有最优灵敏度频率点,且随提高距离的增大,最优灵敏度值减小,同时最优频率点也降低,并趋于稳定值。

(2) 在最优频率点附近处不同导线厚度下的损伤监测灵敏度差别较大,且导线厚度越小灵敏度越高,导线厚度越大灵敏度越低,同时,即损伤监测灵敏度降低的幅度随导线厚度增大而减小。

(3) 感应线圈与激励线圈之间的水平间距越大则传感器的损伤监测灵敏度越大。感应线圈与激励线圈宽度比值对传感器的损伤监测灵敏度影响较小,在小范围内,比值越大,损伤监测灵敏度越小。

(4) 2A12 铝合金中心孔板试样疲劳损伤监测试验表明,除第一个通道以外,传感器其它感应通道归一化跨阻抗幅值随疲劳载荷次数变化曲线的拐点对应的即为裂纹扩展到相应通道下方的疲劳载荷次数,而第一个通道的拐点可以初步确定试件的累积损伤起始点。

参考文献:

- [1] 李小波,王宏伟,李良峰,等. 基于状态的维修及其在外军航空装备中的应用[J]. 四川兵工学报,2011,32(6):126-128.
- [2] 张伟,康建设,王亚彬. 基于状态的维修及其建模研究[J]. 计算机仿真,2006,23(1):26-28.
- [3] 袁慎芳. 结构健康监控[M]. 北京:国防工业出版社,2007:15-16.
- [4] Guo Honglei, Xiao Gaozhi, Nezih Mrad, et al. Fiber Optic Sensors for Structure Health Monitoring of Air Platforms [J]. Sensors, 2011, 11:3687-3705.
- [5] Roach D. Real Time Crack Detection Using Mountable Comparative Vacuum Monitoring Sensors[J]. Smart Structures and Systems, 5(4): 317-328.
- [6] Zdenek Prevorovsky. Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy and Acoustic Emission in SHM of Aircrafts[C]//18th World Conference on Non-destructive Testing, Durban, South Africa, 2012.
- [7] Liu Mabao, Gao Qian, Hu Feng, et al. Flaw-Detected Coating and Its Application[C]//International Conference on Health Monitoring of Structure, Nanjing, China, 2007. 11-17.
- [8] Giurgiutir V, Lin B, Gsantoni-Bottai, et al. Space Application of Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22:1359-1370.
- [9] Rick Russell, David Jablonski, Andy Washabaugh, et. al. Development of Meandering Winding Magnetometer (MWM) Eddy Current Sensors for the Health Monitoring, Odelling and Damage Detection of High Temperature Composite Materials [C]//32nd HIGH TEMPLE Workshop, Palm Springs, USA, 2012. 35-37.
- [10] 田武刚,潘孟春,罗飞路等. 用于某型航空发动机篦齿盘裂纹检测的专用涡流传感器设计[J]. 传感技术学报. 2008, 21(7): 1152-1154.
- [11] 周文武,吴峻,李璐. 一种新型间隙传感器研究[J]. 传感技术学报. 2007, 20(7):1514-1516.
- [12] Holger Speckmann. Structure Health Monitoring [C]//IMRBPB Meeting, Cologne, Germany, 2007. 42-47.
- [13] Hildebrand F B. Advanced calculus for applications [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1962.



焦胜博(1988-),男,汉族,河北石家庄人,2011年考入空军工程大学航空航天工程学院硕士研究生,师从何宇廷教授。研究领域为军用飞机使用可靠性与安全性。主要从事飞机结构健康监控方面的研究,986558531@qq.com;



何宇廷(1966-),男,四川阆中人,空军工程大学航空航天工程学院教授,博士生导师,空军级专家,研究领域为飞机结构强度,飞机结构健康监控。发表论文50多篇,编写教材10余部,参与主持项目14项。