

电磁谐振式疲劳裂纹扩展试验固有频率跟踪系统

高红俐,张立彬,姜伟,周寅

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为保证电磁谐振式疲劳裂纹扩展实验工作载荷的稳定性,提出了基于裂纹长度在线测量的自适应改进爬山法固有频率跟踪方法,建立了相应的固有频率跟踪系统。采用自行设计的裂纹长度测量系统测得实验过程中不同时刻的裂纹长度,根据固有频率和裂纹长度的理论关系计算出此时系统的固有频率值,并将此值设定为频率跟踪的初始值,在初始值左右小范围区域内采用自适应改进爬山法搜索系统精确固有频率值。建立了双自由度双质量块电磁谐振式疲劳裂纹扩展实验振动系统数学模型和CT紧凑拉伸试件刚度模型,从理论上推导出了固有频率随裂纹尺寸变化的规律,并通过实验进行了验证。实验结果表明:文中方法固有频率跟踪精度为0.3 Hz,跟踪时间为3.5 s,和一般爬山法相比,跟踪精度高、速度快、过程稳定可靠,很好地满足了疲劳裂纹扩展实验的要求。

关键词: 仪器仪表技术;电磁谐振式;疲劳裂纹扩展实验;固有频率跟踪;振动系统;疲劳裂纹;在线测量

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-1093(2013)07-0896-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.07.016

Nature Frequency Tracking System for the Electromagnetic Resonance Fatigue Crack Propagation Test

GAO Hong-li, ZHANG Li-bin, JIANG Wei, ZHOU Yin

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education and Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: A nature frequency tracking system based on the crack on-line measurement is established to ensure the stability of test load in the resonance fatigue crack propagation test, and its applied method which is an improved adaptive hill climbing nature frequency tracking method for crack length on-line measuring is proposed. First, the designed crack on-line measuring system is used to acquire the crack length, the related nature frequency is calculated according to the theoretical relationship between crack length and nature frequency, and then the theoretical nature frequency value is set as an original frequency point to track the accurate nature frequency. The accurate nature frequency near the original frequency point can be obtained by applying the proposed nature frequency tracking method. A vibrating system mathematical model with two degrees of freedom and double mass and a sample stiffness model are established, and the law of nature frequency changing with crack length is theoretically obtained and verified by experiment. The experimental results show that the nature frequency tracking accuracy is 0.3 Hz, the

收稿日期: 2012-12-25

基金项目: 浙江省科技计划项目(2007C21080)

作者简介: 高红俐(1968—),女,副教授。E-mail: ghl_zjut@126.com

tracking time is 3.5 s, the proposed method has the higher tracking accuracy, faster tracking speed, and more stable and reliable tracking process compared with the general hill climbing nature frequency tracking method. It can meet the resonance fatigue crack propagation test requirements.

Key words: technology of instrument and meter; electro magnetic resonance; fatigue crack propagation test; nature frequency tracking; vibrating system; fatigue crack; on-line measurement

0 引言

疲劳裂纹扩展实验是通过实时测量试件在设定正弦交变载荷作用下所产生疲劳裂纹的长度来研究材料疲劳断裂特性的一种重要的金属材料疲劳性能测试实验,是能源、航空、航天等重要设备所使用材料必须要进行的材料性能测试实验之一^[1-2],其主要实验方式为采用国际标准规定的 C(T) 紧凑试件进行^[3]的疲劳裂纹扩展实验,在设定交变载荷作用下疲劳裂纹基本沿着预制裂纹的方向直线延伸,但疲劳裂纹的萌生和扩展却是一个复杂而缓慢的非线性演化过程^[4-6]。实验不仅需要精确测量疲劳裂纹长度,而且要精确控制实验载荷,从而保持实验结果的准确性。电磁谐振式疲劳裂纹扩展实验系统为工作在共振区的振动系统,由电磁激振器产生所需要的正弦激振力作用在实验机振动系统上使工作台产生同频率的正弦振动,带动试件振动产生位移,从而使正弦波实验载荷作用在试件上,实验载荷的频率应和振动系统的固有频率相等,从而使系统工作在谐振区,以几乎最小的能量维持系统的振动,保证实验的进行^[7-9]。随着实验的进行,试件上的疲劳裂纹不断扩展,裂纹长度不断增大,系统刚度随之不断减小,系统将不再工作在谐振区,实验载荷振幅急剧下降,为保证裂纹扩展过程中实验载荷的稳定性,从而保证实验结果的准确性,则必须精确跟踪系统的固有频率。以往常用的谐振系统的固有频率跟踪方法有爬山法、改进爬山法、自适应模糊固有频率跟踪方法等^[10-11],都是从大范围扫频开始,然后采用各种策略逐渐改进跟踪步长搜索固有频率,频率跟踪范围大,不能很好地实现在裂纹扩展过程中固有频率的快速准确跟踪,从而造成实验过程中实验载荷振幅波动大,甚至在裂纹快速扩展阶段无法跟踪系统的固有频率,保证实验的正常进行。本文所提出的基于裂纹长度在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展实验振幅控制系统,采用自行设计的基于图像处理技术的裂纹长度测量系统^[12-13]可精确在线测量谐振式疲劳裂纹扩展过程中的裂纹尺寸,通过建立振动系统的数学模型计算出不同裂纹尺寸所对应的系统

固有频率值,将此值设定为固有频率跟踪的初始值,在此跟踪初始值左右小范围区域内采用自适应改进爬山法搜索系统精确固有频率值,此方法可快速、准确跟踪疲劳裂纹扩展过程中系统的固有频率值,很好地满足了疲劳裂纹扩展实验的要求。

1 固有频率跟踪系统及工作原理

基于裂纹在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展实验固有频率跟踪系统总体组成如图 1 所示,包括实验载荷加载系统:由高频疲劳试验机、试件、电磁激振器及其放大电路组成,主要完成将电磁激振器所产生的正弦激振力作用在主机工作台上,使工作台产生同频率的正弦振动,从而使正弦波实验载荷作用在试件上的功能。裂纹尺寸在线测量系统:包括 CCD 图像传感器、光学镜头、光源、图像采集卡及计算机,此系统主要完成疲劳裂纹扩展过程中裂纹尺寸在线测量的功能。固有频率跟踪系统:此系统为上下位机分布式结构,下位机为基于 DSP 技术的完成数据采集分析、正弦波信号发生、数据通讯的功能的微处理器,上位机为安装有图像采集程序、疲劳裂纹长度计算程序、固有频率跟踪算法程序及 RS232 串口通讯程序的计算机,此系统主要完成疲劳裂纹扩展过程中固有频率跟踪。基于裂纹长度在线测量的疲劳裂纹扩展实验固有频率跟踪方法,首先需从理论上求出系统固有频率和裂纹长度关系的计算公

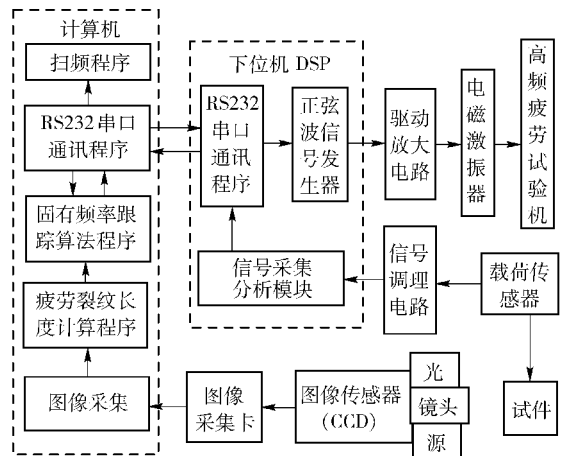


图 1 系统总体组成原理框图

Fig. 1 Block diagram of nature frequency tracking system

式,并存于计算机内,由于同样材料、同样尺寸的试件热处理、实验时受力条件不完全相同,再加上固有频率计算误差、裂纹尺寸测量误差及裂纹尖端塑性区造成的影响,系统固有频率计算值和真实值之间存在一定的差值,因此将系统固有频率计算值设定为频率跟踪的初始值,然后在初始值左右小范围内采用自适应改进爬山法搜索系统精确固有频率值。基于裂纹长度在线测量上下位机式疲劳裂纹扩展实验固有频率跟踪详细方法如图 2 所示,在设定交变正弦载荷的作用下裂纹开始萌生并不断扩展,由 CCD、镜头、图像采集卡采集裂纹图像并在计算机内图像采集软件的控制下,将此图像采集到上位计算机内,通过图像处理疲劳裂纹长度计算程序计算出疲劳裂纹长度,根据存储在计算机内的系统固有频率和裂纹长度的关系,求出此时系统固有频率理论值,同时根据 DSP 控制器通过 RS232 串口通讯程序传输来的振动载荷振幅值,在理论值附近小区域内采用自适应改进爬山法搜索系统精确固有频率值,将跟踪频率值通过 RS232 串口通讯程序发送给下位机 DSP 控制器, DSP 控制器发生相应正弦波给电磁激振器,控制试验机以此频率振动,同时载荷传感器采集载荷波形信号至 DSP 控制器内,控制器对信号处理后提取出振幅值发送给上位计算机,作为

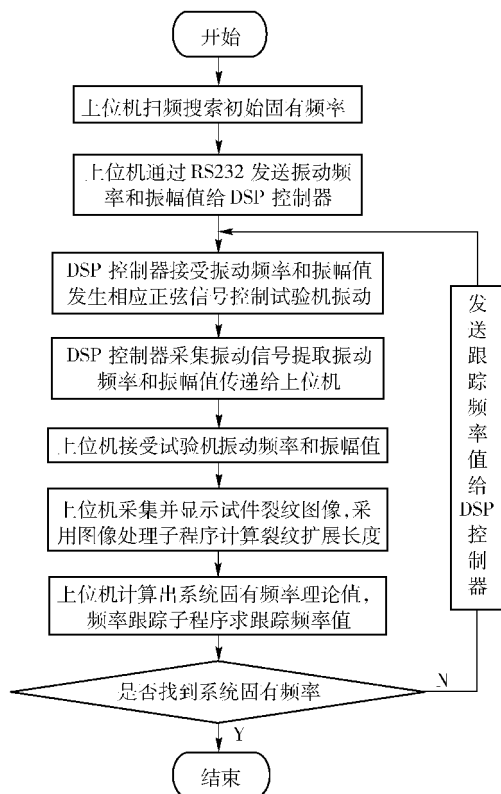


图 2 固有频率跟踪方法流程图

上位计算机频率跟踪判断的一个依据,如此循环直到找到固有频率为止。

2 固有频率随裂纹扩展变化规律研究

2.1 电磁谐振式疲劳试验机结构及工作原理

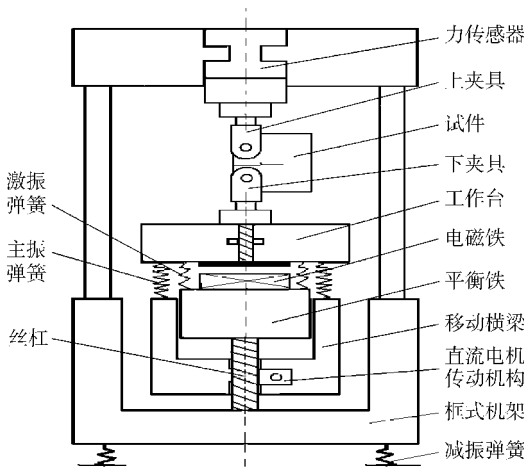
PLG-100 高频疲劳试验机为电磁谐振式疲劳实验主流机型,主机结构如图 3(a)所示,主要由框架型机架、安装在机架顶部的力传感器、C(T)试件、上下夹具、工作台、电磁铁、主振弹簧、激振弹簧、平衡铁、移动横梁、直流电机及传动机构、滚珠丝杠机构、减振弹簧组成。试样一端通过上夹具、测力传感器与外围机架相连接,另一端通过下夹具、法兰和工作台相连,电磁铁衔铁安装在工作台上,电磁铁线圈和平衡铁相连,平衡铁通过激振弹簧和工作台相连,和滚珠丝杠间存在间隙,电磁激振器所产生的正弦激振力作用在工作台上带动试件振动,在正弦波实验载荷的作用下,带有预制裂纹的试件产生疲劳裂纹并不断扩展,完成疲劳裂纹扩展实验。移动横梁、直流电机及蜗轮蜗杆机构、滚珠丝杠机构组成平均载荷加载装置,系统进行振动实验前,先由伺服电机驱动蜗轮传动机构并通过滚珠丝杠机构带动安装在机架上的移动横梁移动并通过主振弹簧带动工作台移动,以此来实现试样的静态拉伸或压缩。

2.2 电磁谐振式疲劳实验振动系统建模

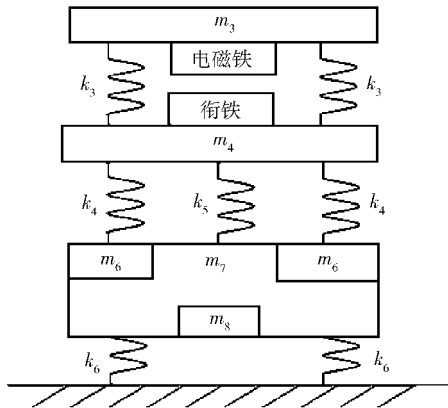
电磁谐振式疲劳试验机振动系统原理模型如图 3(b)所示,为一三自由度三质量块强迫振动系统,图中: m_3 为激振质量,包括平衡铁和电磁铁线圈; m_4 为主振质量,包括工作台、电磁铁衔铁、工作台上法兰和夹具质量; m_6 为移动横梁质量; m_7 为机架质量; m_8 为伺服电机、蜗轮蜗杆传动机构质量;平均载荷加载完成振动系统起振后, m_6 、 m_7 、 m_8 可看作为一整体机座; k_3 为激振系统弹簧刚度; k_4 为主振弹簧刚度; k_5 为试件刚度; k_6 为减振弹簧刚度。由于整体机座 m_6 、 m_7 、 m_8 的质量要远远大于系统其它质量块 m_3 、 m_4 ,而减振弹簧刚度 k_6 要远远小于系统其它弹簧刚度,图 3(b)所示系统振动时,整体机座相对于底面的位移几乎为 0,在主机完全对中、振动位移较小且不可考虑裂纹尖端塑性区域影响的情况下,系统为一线性振动系统,又考虑到系统振动过程质量块所受的阻尼力,并令参数进一步简化: $m_2 = m_3$, $m_1 = m$, $k_2 = 2k_3$, $k_1 = 2k_4 + k_5$,得图 3(c)所示双自由度双质量块电磁谐振式疲劳裂纹扩展实验振动系统动力学模型,其中: x_1 为质量块 m_1 运动位移; x_2 为质量块 m_2 运动位移; c_1 、 c_2 为系统阻尼系

Fig. 2 Flow chart of nature frequency tracking method

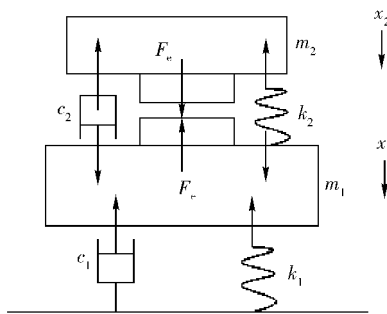
数; F_e 为电磁激振力。



(a) 机械结构示意图
(a) Mechanical structure



(b) 振动系统模型
(b) Vibrating system model



(c) 振动系统动力学模型
(c) Vibrating system dynamic model

图 3 电磁谐振式疲劳试验机振动系统
Fig. 3 Vibrating system for electromagnetic resonance fatigue test

2.3 疲劳裂纹扩展过程中固有频率的变化规律

为求得疲劳裂纹扩展过程中固有频率随裂纹长度的变化关系,首先根据所建立的振动系统数学模型,建立其振动微分方程,求出固有频率和试件刚度的关系,再根据试件刚度模型求出试件刚度和裂纹

长度的关系,从而推导出固有频率随裂纹长度的变化规律。

2.3.1 固有频率和试件刚度的关系

根据图 3(c) 所示系统动力学模型,由牛顿第二定律得系统振动微分方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -F_e \\ F_e \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $F_e = F \sin(\omega t)$, F 为电磁激振力振幅, ω 为电磁激振力频率。

系统无阻尼时其自由振动微分方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式中:

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

X_1, X_2 分别为质量块 m_1, m_2 的 x_1, x_2 振幅。

将上式代入(2)式,令系数行列式为 0,可得系统的特征方程为

$$\Delta(\omega) = \begin{vmatrix} -k_2 & k_1 + k_2 - m_1\omega^2 \\ k_2 - m_2\omega^2 & -k_2 \end{vmatrix} = m_1 m_2 \omega^4 - [k_1 m_2 + k_2(m_1 + m_2)] \omega^2 + k_1 k_2 = 0. \quad (4)$$

将 $k_1 = 2k_4 + k_5$ 带入(4)式,求解得系统一阶固有频率 ω_1 和试件刚度 k_5 之间关系表达为

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2} \frac{2k_4 m_2 + k_5 m_2 + k_2(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} - \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{2k_4 m_2 + k_5 m_2 + k_2(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} \right]^2 - \frac{8k_4 k_2 + 4k_5 k_2}{m_1 m_2}}. \quad (5)$$

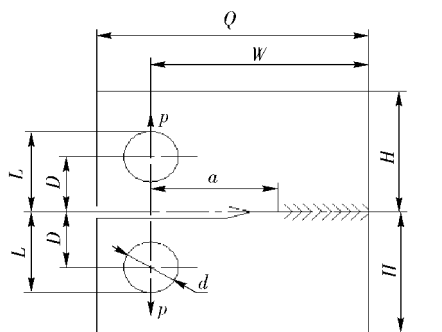
2.3.2 试件刚度的计算

如前所述,在疲劳裂纹扩展实验中,试件加工、热处理、安装理想条件下,标准紧凑拉伸试件疲劳裂纹沿预制裂纹直线扩展,如图 4 所示,图中 Q, L, H, W, B, d 均为试件尺寸, a 为疲劳裂纹顶点到受力线的距离,即国际标准规定的计算裂纹长度, P 为作用在试件上的载荷,根据试件结构、受力及约束情况,带有预制裂纹 a_n (试件切口长度)的紧凑拉伸试件可简化成如图 4(a) 所示对称悬臂梁相接的模型,在正弦载荷 p 的作用下疲劳裂纹 a 缓慢扩展,短斜线

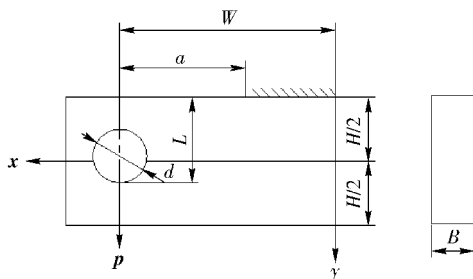
所标注的上下悬臂梁相接处逐渐缩短,即悬臂梁的支撑面不断缩小因紧凑拉伸试件及其加载的中心对称性,选取 1/2 为研究对象,如图 4(b)所示,采用弹性力学刚度计算的小位移理论^[8],得试件刚度计算(5)式:

$$k_5 = 1 / \left[\frac{3L}{BEW \left(1 - \frac{a}{W}\right)^3} + \frac{4W^2}{BEH^3} \left(\frac{a}{W}\right)^3 \right], \quad (6)$$

式中: E 为试件材料弹性模量,计算时一般取 206 GPa,式中其他参数含义如图 4 所示,对于 C(T) 标准试件 $W = 50 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$, $H = 30 \text{ mm}$, $B = 12.5 \text{ mm}$.



(a) 对称悬臂梁刚度计算模型
(a) Calculating model of cantilever beam stiffness



(b) 简化悬臂梁刚度计算模型
(b) Simplified calculating model of stiffness cantilever beam

图 4 紧凑拉伸试件悬臂梁刚度计算模型

Fig. 4 C(T) sample stiffness cantilever beam calculating model

2. 3. 3 固有频率和裂纹长度关系

由高频疲劳试验机设计手册得: $m_1 = 280.4 \text{ kg}$, $m_2 = 520.25 \text{ kg}$, $k_2 = 4.98 \times 10^8 \text{ N/m}$, $k_4 = 3.16 \times 10^8 \text{ N/m}$, 试件尺寸为标准紧凑拉伸试件尺寸,材料选用 45# 钢,根据(5)式和(6)式得疲劳裂纹扩展过程中固有频率和裂纹尺寸关系,如图 5 所示,为了更加简明的表示裂纹扩展过程中试件固有频率的变化规律,图中横坐标裂纹尺寸转换为裂纹扩展长度,即为从预制裂纹顶点到裂纹尖端的距离,从图中可以看到随着裂纹的扩展系统的固有频率逐渐降低,裂

纹扩展到 20 mm 时,固有频率从 126.4 Hz 降低到 102.6 Hz,开始阶段固有频率随裂纹扩展变化较慢,裂纹扩展到 8 mm 左右固有频率变化加快。

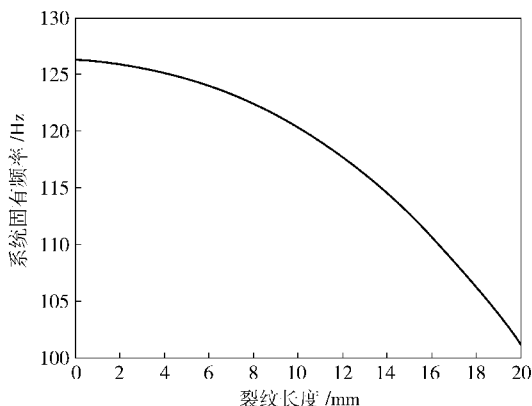


图 5 固有频率随裂纹长度变化曲线

Fig. 5 The change of nature frequency with the crack length

3 基于裂纹长度在线测量的固有频率跟踪算法

疲劳裂纹扩展实验开始后,在正弦振动实验载荷的作用下试件上的疲劳裂纹产生并不断扩展,造成系统固有频率减小,为跟踪系统固有频率,首先测量试件上疲劳裂纹长度和系统的振动频率,根据固有频率计算公式求得裂纹扩展到这一尺寸时系统固有频率值,将此值设置为频率跟踪初始值,然后求固有频率计算值和系统振动频率的差值,如差值大于 2 Hz 设定频率跟踪粗步长为差值的 20%,如差值小于 2 Hz 设定频率跟踪粗步长为差值的 30% 而且大于 0.5 Hz,此数据可根据实验结果进行修正,采用此粗步长沿所设定频率搜索方向,向前搜索 3 步,采用实验载荷特征值提取算法计算出 3 个位置的振幅为 f_1 、 f_2 、 f_3 ,如果 $f_1 < f_2 < f_3$ 说明搜索方向正确,沿原方向采用同样步长继续向前搜索 3 步,如果 $f_1 > f_2 > f_3$ 说明搜索方向相反,如果是实验开始第 1 组搜索则从频率跟踪初始值开始采用同样步长沿反方向搜索,如不是第 1 组搜索则每次反向调整时粗调步长缩减为原先的 70%,如果 $f_2 < f_1$ 而 $f_2 < f_3$ 则说明遇到局部噪声干扰,以原步长继续往前搜索进行判断,当出现 $f_1 < f_2$ 而 $f_2 > f_3$ 时说明频率跟踪已越过系统固有频率点,频率返回 f_1 值,此时采用小步距回调,进入精调阶段,精调步长初始值约为此时粗调步长的 20% 而且大于 0.2 Hz,重复上述过程,且每次反向调整时精调步长缩减为原先的 70% 而且大于 0.2 Hz,一直到出现 $f_1 < f_2$ 而 $f_2 > f_3$ 时,因精调阶段

搜索步长较小频率搜索过程中易遇到局部噪声干扰,当 $f_1 < f_2$ 而 $f_2 > f_3$ 时增加一步搜索判断,从而使

系统的可靠性进一步增强。系统固有频率跟踪方法如图 6 所示。

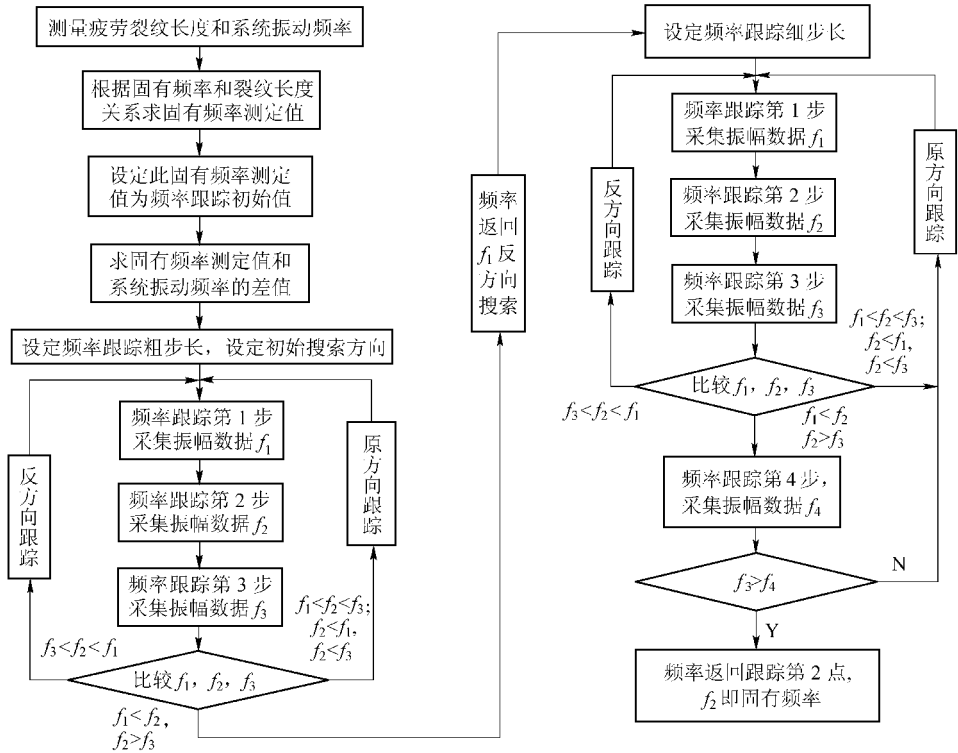


图 6 基于裂纹在线测量的自适应改进爬山法固有频率跟踪

Fig. 6 The improved adaptive hill climbing nature frequency tracking method based on crack length on-line measuring

4 实验及结果分析

为进行相关实验研究,建立了如图 7 所示的电磁谐振式疲劳裂纹扩展实验固有频率跟踪系统实验平台,实验装置实物如图 7 所示,系统运行界面如图 8 所示。其中试验机采用红山 PLG-100 谐振式高频疲劳试验机,图像采集卡为美国 NI 公司所生产的

PCI-1014 图像采集卡,镜头为 SONY 35 mm 定焦镜头,CCD 为 XC-XT50CE 高清晰度、高帧速率顺序扫描的黑白 CCD 摄像头,分辨率为 724 像素 × 568 像素,固有频率跟踪系统下位机为 DSP 数据采集分析及信号发生系统,所采用核心芯片为 TMS320F281 信号发生器和 TMS320F2812 信号采集、分析模块。裂纹图像采集与处理软件开发平台为 IMAQ-VISION,频率跟踪、信号分析处理及通讯软件开发平



图 7 实验平台实物图
Fig. 7 Experiment platform

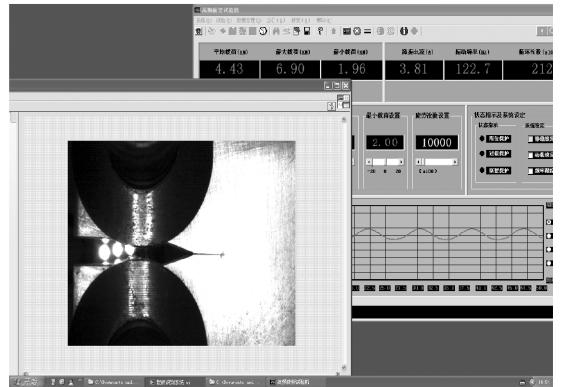


图 8 疲劳裂纹扩展实验系统运行界面
Fig. 8 Working interface of fatigue crack propagation test system

台为 C 语言。试块为 CT 紧凑标准试块,为退火处理后的 45# 钢。实验包括系统固有频率与疲劳裂纹长度关系的理论分析验证实验及疲劳裂纹扩展固有频率跟踪实验。

4.1 系统固有频率与疲劳裂纹长度理论分析验证实验

固有频率测量方法为采用精密线切割方法加工出一批具有不同预制裂纹尺寸的试件,在图 7 所示的实验系统上对不同裂纹尺寸的试件进行扫频实验,求得针对此裂纹尺寸时系统的固有频率,此时固有频率测量为离线测量,而不是在疲劳裂纹扩展实验过程中的在线测量,测量精度要求较高,但对搜寻时间没有要求,可采用通过软件界面实时调整搜索步长的爬山法来实现。系统固有频率理论值和测量值与裂纹扩展长度的关系如图 9 所示。由实验数据分析可知:系统固有频率理论值和测量值随裂纹尺寸的变化趋势及数值均比较吻合,测量值大于理论计算值,经分析主要原因应是振动系统在建模过程中忽略了如图 3(a) 所示工作台和平衡铁之间、工作台和移动横梁之间除了主振弹簧和激振弹簧外,还各有两根很细的连接导杆,连接导杆和弹簧是并联关系,在理论计算中忽略了连接导杆的刚度,另外就是工作台质量值计算的误差,实验中对同一裂纹长度的试件进行了多次实验,实验结果具有很好的重复性,系统固有频率理论值和实验值的最大偏差为 3.1 Hz。基本验证了理论计算的准确性,这样,在具体应用时,可对原来的理论数值加以修正后作为精确固有频率搜索的初始设定值,避免了对所有要进行实验的试件全部进行固有频率测量的巨大工作量。

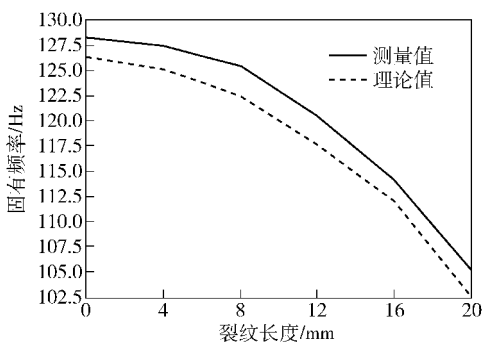


图 9 系统固有率理论值和测量值与裂纹扩展长度关系

Fig. 9 The change of theoretical and experiment nature frequency values with crack length

4.2 固有频率跟踪实验

根据前面的理论分析,随着疲劳裂纹的扩展系统的固有频率不断降低,如果没有裂纹在线测量手

段,则不能确定系统的固有频率和裂纹尺寸的关系,此时可采用单边爬山法在较大范围内进行固有频率的跟踪。文中在所建立的实验平台上采用单边爬山法和本文所提出的方法对疲劳裂纹扩展实验的固有频率进行了跟踪,在裂纹扩展过程中测得疲劳裂纹扩展到不同尺寸时固有频率的跟踪值及跟踪时间,并和 4.1 节中所测得的实际系统固有频率值进行比较,计算出固有频率的跟踪误差,具体实验数据如表 1 所示,系统采样周期为 0.5 s。由实验结果可以看出:采用本文方法固有频率跟踪精度为 0.3 Hz,跟踪时间为 3.5 s,和一般爬山法相比,跟踪精度高、速度快、过程稳定可靠,很好地满足了疲劳裂纹扩展实验的要求。

表 1 不同裂纹尺寸系统固有频率跟踪数据
Tab. 1 Nature frequency tracking experiment data

实验参数	裂纹长度值/mm					
	0	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0
频率测量值/Hz	128.4	127.1	125.1	120.3	114.3	105.4
爬山法频率/Hz	128.1	127.5	125.7	120.8	114.0	104.9
本文方法频率/Hz	128.6	127.2	125.4	120.2	113.8	105.2
本文方法频率偏差值/Hz	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
爬山法频率偏差值/Hz	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
爬山法跟踪时间/s	6.0	4.0	6.5	7.5	5.0	6.5
本文方法跟踪时间/s	1.0	2.5	3.5	2.0	1.5	2.5

5 结论

本文所研究的谐振式疲劳裂纹扩展实验系统为一双自由双质量块的振动系统,为了保证疲劳裂纹扩展过程中实验载荷的稳定性,从而保证实验结果的准确性和可靠性,必须实时跟踪由于裂纹扩展而逐渐减小的系统固有频率。文中建立了电磁谐振式疲劳裂纹扩展实验固有频率跟踪系统,提出了基于裂纹在线测量的粗细步长结合自适应快速固有频率跟踪方法,对所研究系统的结构和工作原理、裂纹在线测量粗细步长结合自适应快速固有频率跟踪算法、固有频率和裂纹长度关系的理论计算方法进行了理论和实验研究,所提出方法固有频率跟踪精度为 0.3 Hz,跟踪时间为 3.5 s,和一般爬山法相比,跟踪精度高、速度快、过程稳定可靠,很好地满足了疲劳裂纹扩展实验的要求。已将研究成果应用于所研制的谐振式疲劳裂纹扩展实验系统上,长时期的系统运行结果表明:所研制系统能精确地实现谐振式

疲劳裂纹扩展实验裂纹扩展过程中固有频率的跟踪,使系统始终工作在谐振区,以几乎最小的能量维持系统的振动,对于其他结构的谐振式疲劳裂纹扩展实验系统,除固有频率理论计算部分的振动系统模型,本方法均可适用,因此具有较强理论研究和应用价值及应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 赵荣国,罗希延,任璐璐,等. 航空发动机涡轮盘用 GH4133B 合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 机械工程学报,2010,35(18):55-65.
ZHAO Rong-guo, LUO Xi-yan, REN Lu-lu. Research on fatigue crack propagation behavior of GH4133B superalloy used in turbine disk of aero-engine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,35(18):55-65. (in Chinese)
- [2] 刘秀丽,陆富梅,吴晓峰. LY12CZ、LC4CS 铝合金板材疲劳裂纹扩展特性研究[J]. 航空学报,1993,27(3):215-218.
LIU Xiu-li, LU Fu-mei, WU Xiao-feng. A study on statistical nature of fatigue crack growing for the LY12CZ and LC4CS alloys aluminum[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1993,27(3):215-218. (in Chinese)
- [3] GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S]. 北京:国家质量技术监督局,2001.
GB/T 6398—2000 Standard test method for fatigue crack growth rates of metallic materials[S]. Beijing: State Quality Supervision Bureau,2001. (in Chinese)
- [4] Nishijima, Satoshi. Improved method for threshold crack propagation testing on an electromagnetic resonance type machine [J]. Journal of Testing & Evaluation, 1993,11(3):193-201.
- [5] 代鹏,冯森林. CT 试样三维疲劳裂纹扩展数值模拟[J]. 计算力学学报,2011,(增刊1):33-36.
DAI Peng, FENG Miao-lin. Numerical simulation of 3D fatigue crack growth of CT specimens[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2011,(S1):33-36. (in Chinese)
- [6] Noroozi A H, Glinka G, Lambert S. Prediction of fatigue crack growth under constant amplitude loading and a single overload based on elasto-plastic crack tip stresses and strains [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008,75:188-206.
- [7] Nishijima, Satoshi. Improved method for threshold crack propagation testing on an electromagnetic resonance type machine [J]. Journal of Testing & Evaluation, 1993,11(3):193-201.
- [8] 张妮. 高频疲劳试验机动态特性的研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
ZHANG Ni. Study on dynamic characteristics of high-frequency fatigue tester[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [9] 孙磊,姬战国,尹廷林,等. 高频疲劳试验机振动系统动力学特性分析[J]. 工程与试验,2010,50(2):13-15.
SUN Lei, JI Zhan-guo, YIN Ting-lin. Dynamic analysis of electromagnetic resonance fatigue testing machines [J]. Engineering & Test, 2010,50(2):13-15. (in Chinese)
- [10] Zhu Wu, Zhang Jiamin. Fuzzy control on automatic frequency tracking of ultrasonic vibration system with high power and high quality factor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,16(2):275-278.
- [11] 曹群,李秀珍,尚斐. 基于模糊自寻优控制方法的自动频率跟踪[J]. 生命科学仪器,2004,20(2):25-29.
CAO Qun, LI Xiu-zhen, SHANG Fei. Automatic frequency tracking based on fuzzy self-optimizing control approach [J]. Life Science Instruments, 2004,20(2):25-29. (in Chinese)
- [12] GAO Hong-li, SHEN Shan-shan, YUN Yan. Fatigue crack length real time measurement method based on camera automatically tracking and positioning [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, Hefei, China: IEEE, 2011:1031-1038.
- [13] 周见行,高红俐,齐子诚,等. 基于摄像头自动跟踪定位的疲劳裂纹在线测量方法研究[J]. 中国机械工程,2011,(11):1302-1306.
ZHOU Jian-xing, GAO Hong-li, QI Zi-cheng, et al. Study on on-line measurement method of fatigue crack length based on camera automatically tracking and positioning [J]. China Mechanical Engineering, 2011,(11):1302-1306. (in Chinese)