

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.001

裂纹扩展疲劳试验测控系统研究*

郑欢斌¹, 高红俐^{1*}, 刘 辉¹, 刘 欢¹, 齐子诚^{1,2}

(1. 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;

2. 中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘要:针对疲劳裂纹扩展过程中工作载荷的稳定性问题,建立了基于裂纹长度在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展试验振幅控制系统,提出了基于裂纹在线测量的自适应改进爬山法、固有频率跟踪方法及振幅模糊 PID 控制方法。首先采用自行设计的测量系统测得了试件不同裂纹尺寸所对应的系统固有频率,开始疲劳裂纹扩展试验后实时测量了裂纹扩展过程中的裂纹长度,采用所提出的固有频率跟踪算法对系统固有频率进行了跟踪,同时采用模糊 PID 方法对频率跟踪过程中造成的振幅波动较小进行了控制。实验及研究表明,所提出方法在裂纹扩展过程中的振幅控制精度为 2%,控制精度高、调整时间短,能较好地满足疲劳裂纹扩展试验的要求。

关键词:谐振式疲劳裂纹扩展试验;固有频率跟踪;模糊 PID 控制;疲劳裂纹;在线测量

中图分类号:TH87;TP394.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)10-1271-07

Measurement and control system for fatigue crack propagation test

ZHENG Huan-bin¹, GAO Hong-li¹, LIU Hui¹, LIU Huan¹, QI Zi-cheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

Abstract: Aiming at keeping the testing load stability when the fatigue crack growing, an amplitude control system of the resonance fatigue crack propagation test based on the crack on-line measuring was established, and its applied methods which are crack length on-line measuring nature frequency tracking method with the changing tracking steps and the amplitude fuzzy PID control method were proposed. Firstly, the system nature frequency data related with different crack length was obtained applying the designed measuring system. In the fatigue crack propagation test the nature frequency was followed applying the proposed method according to the measured crack length, on the same time, the amplitude fuzzy PID control was used to keep the amplitude to be stable during the frequency tracking. The experiment results indicate that the proposed methods have greatly improved the amplitude control accuracy which is less than 2% during the fatigue crack growing process and have shortened the tuning time, can meet the resonance fatigue crack propagation test requirement.

Key words: resonance fatigue crack propagation test; nature frequency tracking; fuzzy PID control; fatigue crack; on-line measuring

0 引 言

疲劳裂纹扩展试验是一种通过采用各种方法实时测量试件在设定交变载荷作用下所产生的疲劳裂纹长

度,来研究材料疲劳断裂特性的一种重要的金属材料性能测试方式^[14]。为了保证疲劳裂纹扩展试验结果的准确性和可靠性,必须保证裂纹扩展过程中试验载荷的控制精度,电磁谐振式疲劳裂纹扩展试验系统为

收稿日期:2015-03-11

基金项目:浙江省科技计划公益性资助项目(2014C37082);宁波市自然科学基金资助项目(2014A610060)

作者简介:郑欢斌(1989-),男,浙江湖州人,主要从事图像处理检测技术的研究与应用方面的研究。E-mail:huanbinstrong@126.com

通信联系人:高红俐,女,副教授,硕士生导师。E-mail:ghl.zjut@126.com

一强迫振动系统,由电磁激振器产生所需要的正弦激振力作用在振动系统上从而使工作台产生同频率的正弦振动,带动试件运动,使正弦波试验载荷作用在试件上^[5-7],在正弦波试验载荷的作用下,带有预制裂纹的试件将产生疲劳裂纹并不断扩展,试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,保证试验的进行。随着试验的进行,试件上的疲劳裂纹不断扩展,裂纹长度不断增长,系统刚度随之不断减小,系统将不再工作在谐振区,试验载荷振幅急剧下降,为保证裂纹扩展过程中试验载荷的稳定性,且使系统始终工作在谐振区,首先必须要精确跟踪系统的固有频率,同时保持试验载荷振幅的稳定性^[8]。文献[9]研究了谐振式曲轴弯曲疲劳试验中试件裂纹扩展对谐振系统载荷放大特性的影响,在此基础上实现了试验系统的高精度恒载荷控制;文献[10]利用分数阶 PID 控制器对载荷频率进行了控制,运用分数阶 PID 控制器控制载荷频率可以较好地消除稳态误差,且具有较好的鲁棒性。

本研究所提出的基于裂纹长度在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展试验振幅控制系统,在疲劳裂纹扩展过程中同时进行固有频率快速精确跟踪和试验载荷的准确控制,首先通过采用自行设计的基于图像处理技术的裂纹长度测量系统^[11-12]可精确在线测量谐振式疲劳裂纹扩展过程中的裂纹尺寸及其所对应的系统的固有频率,在该固有频率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,同时采用模糊 PID 方法控制频率跟踪过程中造成的振幅波动。该方法可用于快速、准确跟踪疲劳裂纹扩展过程中系统的固有频率值,且保持试验载荷振幅的稳定性,很好地满足疲劳裂纹扩展试验的要求。

1 基于裂纹在线测量的振幅控制系统

1.1 系统总体组成

基于裂纹在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展试验振幅控制系统总体组成如图 1 所示。其包括:①试验载荷加载系统:由疲劳试验机、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,从而使正弦波试验载荷作用在试件上的功能。②裂纹尺寸在线测量系统:包括图像传感器(CCD)、光学镜头、光源、图像采集卡,安装有图像采集及裂纹尺寸计算软件模块的计算机,该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,裂纹测量精

度为 0.1 mm。③试验载荷振幅控制系统:该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、数据通讯的微处理器,上位机为安装有固有频率跟踪算法程序、振幅控制程序及 RS232 串口通讯程序的计算机,该系统主要完成疲劳裂纹扩展过程中频率跟踪及振幅控制。

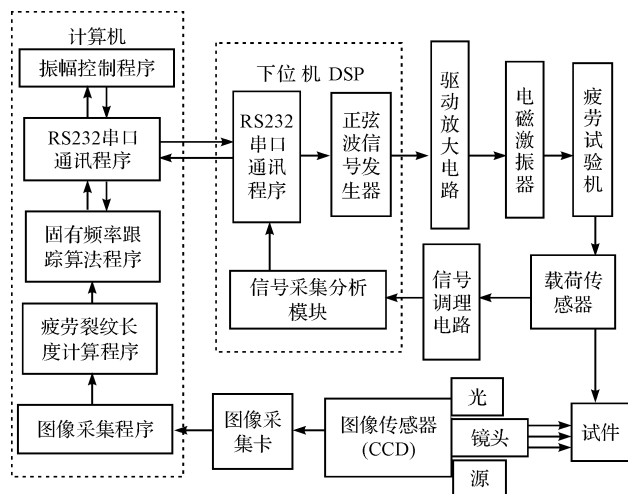


图 1 振幅控制系统总体组成原理框图

1.2 系统工作原理

1.2.1 裂纹扩展过程中固有频率和振幅的变化规律

裂纹扩展过程中系统固有频率和振幅的变化如图 2 所示。

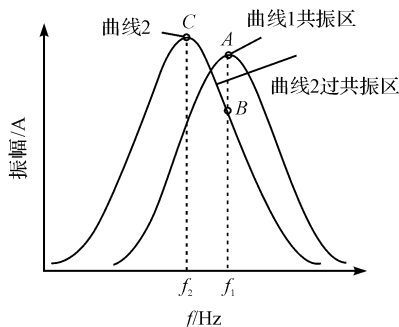


图 2 裂纹扩展过程中系统固有频率和振幅的变化

随着疲劳裂纹扩展试验的进行,试件上的疲劳裂纹不断扩展,裂纹尺寸不断增大,系统刚度随之不断减小,系统的幅频曲线由曲线 1 的位置移到曲线 2 的位置,在裂纹未扩展之前,试验载荷的频率等于此时系统的共振频率 f_1 ,系统工作在谐振点 A 点,随着裂纹的扩展,系统的幅频曲线移到曲线 2,此时系统的共振频率为 f_2 ,而如果试验载荷的频率仍为 f_1 ,则系统将不再工作在谐振区,系统的工作点由 A 点转移到 B 点,谐振式疲劳裂纹扩展试验系统基本为锐共振系统,即幅频曲线谐振区附近曲线较陡,这样造成试验载荷振幅急

剧下降,裂纹扩展时频率跟踪越慢,则试验载荷振幅下降越多,如及时准确跟踪固有频率的变化则系统工作点将由 *B* 点转移到 *C* 点,由系统动力学分析得知,裂纹扩展后系统的共振振幅增大,这样,裂纹扩展后固有频率跟踪过程中振幅的变化从 *A* 到 *B* 再到 *C*,幅值上为“等于设定值—小于设定值—大于设定值”,跟踪越快越精确则振幅变化的波动度也越小,通过采用试验载荷振幅模糊 PID 控制可保持频率跟踪过程中振幅的稳定。

1.2.2 基于裂纹在线测量的振幅控制方法

基于裂纹长度在线测量的疲劳裂纹扩展试验载荷控制包括裂纹长度计算、固有频率跟踪、振动载荷振幅控制,对于上、下位机式系统,除此之外,还包括 RS232 串口通讯程序。首先,需通过实验测量出系统固有频率和裂纹长度关系,并存于计算机内,由于同样材料、同样尺寸的试件热处理、试验时受力条件不完全相同,再加上固有频率、裂纹尺寸测量误差及裂纹尖端塑性区造成的影响,系统固有频率测量值和真实值不一定相等,因此本研究将系统固有频率测量值设定为频率跟踪的初始值。在疲劳裂纹扩展试验开始后,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,系统将该图像采集到计算机内,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 RS232 串口通讯程序从 DSP 控制器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,并采用模糊 PID 控制器对试验载荷振幅进行控制,通过 RS232 将跟踪频率值和激振电压值发送给下位机 DSP 控制器,发生相应正弦波给电磁激振器,控制试验机以该频率振动,载荷传感器采集载荷波形信号,DSP 控制器对信号处理后提取出振幅值和频率值发送给上位计算机,作为上位计算机频率跟踪和振幅控制的输入,如此循环直到找到固有频率和振幅达到设定值为止。

详细方法流程图如图 3 所示。

2 基于疲劳裂纹在线测量的系统固有频率跟踪算法

根据本研究所提出的基于裂纹长度在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展试验系统固有频率跟踪方法,首先可采用裂纹长度测量系统精确在线测量疲劳裂纹扩展

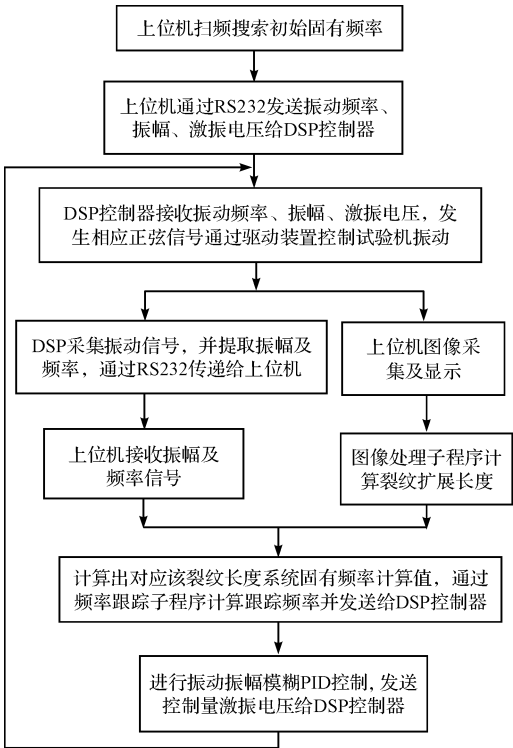


图 3 基于裂纹在线测量振幅控制方法原理流程图

试验过程中的裂纹尺寸,并可通过实验测得不同裂纹尺寸所对应的系统固有频率值,由于实验事先测定的系统固有频率值和疲劳裂纹扩展试验时系统固有频率存在一定的差值,笔者在该固有频率值左、右小范围内采用自适应结合改进爬山算法搜索系统精确固有频率值,完成准确固有频率的跟踪。

2.1 不同裂纹长度时系统固有频率的测量

本研究加工出带有初始预制裂纹的 CT 紧凑拉伸试件,并在图 1 所示的试验系统进行疲劳裂纹扩展试验,当裂纹扩展到不同尺寸时,首先采用自行研制的机械视觉疲劳裂纹在线测量系统测得疲劳裂纹长度,然后停止疲劳裂纹扩展试验,进行该裂纹尺寸下系统扫描频实验测得系统固有频率,此时固有频率测量为离线测量,而不是在疲劳裂纹扩展试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,笔者采用通过软件界面实时调整搜索步长的爬山法来实现,本研究在红山 PLG-100 谐振式高频疲劳试验机对材料为 45 号钢的 CT 紧凑拉伸试件进行了疲劳裂纹扩展过程中固有频率的测量,为测量同样实验设备、试件材料、尺寸及安装条件下实验数据的重复性,笔者共对 6 块试件进行了疲劳裂纹扩展固有频率测量实验,测得不同裂纹尺寸下系统固有频率测量数据如表 1 所示。

表 1 不同裂纹尺寸系统固有频率数据(单位:Hz)	0 mm	4 mm	8 mm	12 mm	16 mm	20 mm
1 测量值	126.1	121.1	118.3	110.3	101.3	95.4
2 测量值	126.3	121.3	118.7	111.4	99.2	96.8
3 测量值	126.7	118.2	117.6	114.2	100.1	93.2
4 测量值	126.4	121.5	117.3	112.6	103.2	95.6
5 测量值	125.3	118.6	117.4	112.7	102.2	96.8
6 测量值	124.9	119.5	118.3	111.7	98.1	97.5
测量平均值	126.0	120.0	117.9	112.2	100.7	95.9
最大偏差	1.8	1.1	1.4	1.9	2.2	2.3

由表 1 中实验数据可以看出,同样裂纹尺寸试件系统固有频率实验数据最大偏差为 2.3 Hz,主要是由

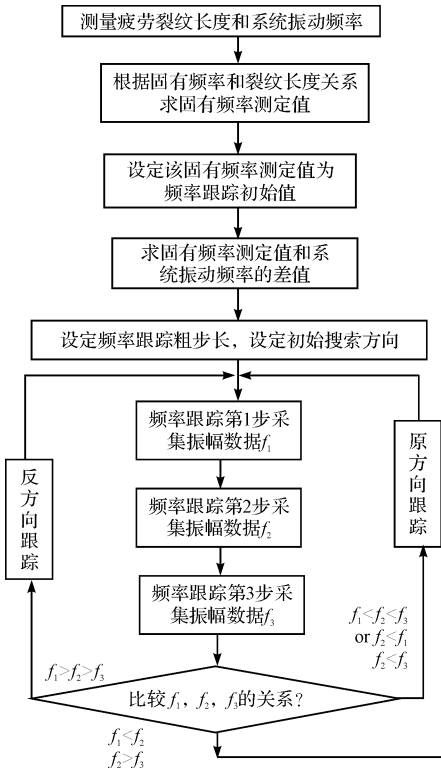


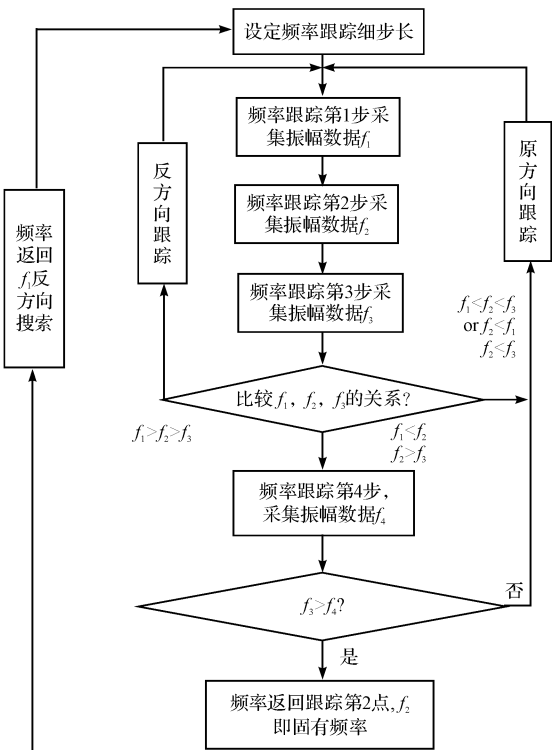
图 4 基于裂纹在线测量自适应改进爬山法

首先本研究测得系统固有频率和裂纹长度关系数据如表 1 所示,并将该数据存于计算机内,疲劳裂纹扩展试验开始后,在正弦振动试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,本研究首先测量试件上疲劳裂纹长度和系统的振动频率,根据试验开始前测得的固有频率和裂纹长度关系数据求得裂纹扩展到这一尺寸时系统固有频率值,将该实验测定的系统固有频率值设置为频率跟踪初始值,求固有频率测定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,该数据可根据实验进行修正,该粗步长沿所设定频率搜索方向,向前搜索 3

于同样材料、同样尺寸的试件热处理、试验时受力条件不完全相同,再加上裂纹测量误差、插值计算造误差及裂纹尖端塑性区造成的影响造成的。

2.2 系统固有频率的跟踪算法

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,都是从大范围扫频开始,采用同一跟踪步长或采用各种策略逐渐改进跟踪步长^[13-14],搜索固有频率,频率跟踪扫频范围大,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。本研究所提出系统固有频率跟踪方法如图 4 所示。



步,采用试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,如果是试验开始第一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,如不是第一组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 $f_1 < f_2$ 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 ,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,

因精调阶段步上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。

3 振动载荷振幅模糊 PID 控制

3.1 振幅模糊 PID 控制结构

常用谐振系统的振幅控制方法有 PID 控制模糊 PID 控制,本研究所采用疲劳裂纹扩展试验工作载荷振幅模糊 PID 控制结构如图 5 所示。

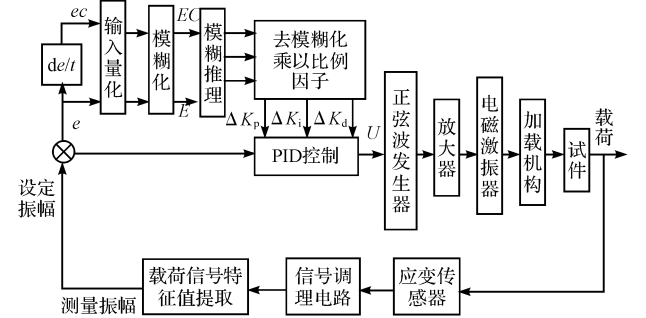


图 5 疲劳裂纹扩展试验载荷振幅模糊 PID 控制结构

主控制器是输入为振幅偏差 e 、输出为电磁激励器的激振电压 U 的 PID 控制器,3 个“两输入单输出”结构的模糊控制器用来在线整定谐振频率跟踪过程中振幅 PID 控制的比例、积分和微分参数,3 个模糊控制器的输入均为振幅偏差 e 及偏差变化率 ec ,输出分别为比例、积分和微分参数的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。

3.2 输入和输出量的模糊化

精确输入量 e 和 ec 需要分别乘以量化因子 K_e 和 K_{ec} 及模糊化后转换成各自模糊论域内的模糊变量 E 和 EC ,而模糊控制器的输出量 UP 、 UI 、 UD 也需乘以相应比例因子后才能得到精确值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。将模糊控制器输入量 E 和 EC 及输出量 UP 、 UI 、 UD 的标准论域皆设定为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,将输入量 E 和 EC 在论域区间内定义为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)7 个语言值,其隶属函数采用具有良好抗干扰能力的高斯型隶属度函数,根据输入变量值及其隶属度函数,可获得输入变量在设定论域内各个元素对应各个模糊子集的隶属度值,从而得到输入量离散隶属度表。为了使系统有较高的分辨率,本研究同样将输出量 UP 、 UI 、 UD 定义为 7 个语言值,与输入量 E 和 EC 相同,其隶属度函数选用比较简单的三角型函数,采用同样方法可获得输出量离散隶属度表。

3.3 模糊规则设计

在疲劳裂纹扩展过程中,本研究针对不同 e 和 ec

的情况,根据试验载荷振幅的控制要求制定相应模糊控制规则,求出所对应的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 参数,实现对 PID 控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的在线整定。 K_p 、 K_i 、 K_d 在线整定的要求为:

(1)当 e 较大时,为了有较好的快速跟踪性能,并避免因开始时误差 e 的瞬间变大可能引起微分过饱和而使控制作用超出许可范围,应取较大 K_p 和较小 K_d 。同时为了防止积分饱和,避免系统响应出现较大的超调,应对积分作用加以限制,此时取 $K_i = 0$ 。

(2)当 e 和 ec 为中等大小时,为使系统响应具有较小的超调, K_p 、 K_i 和 K_d 都不能取大值,应取较小的 K_i 值, K_p 和 K_d 的值大小要适中,以保证系统的响应速度,其中 K_d 的取值对系统的响应速度影响较大。

(3)当 e 较小时,为使系统具有良好的稳态性能,应取较大的 K_i 和 K_d ,同时为避免系统在设定值附近出现振荡,并考虑系统抗干扰性能, K_d 应根据 ec 来选定,其原则是:当 ec 较小时, K_d 值可取大一些,通常取中等大小;当 ec 较大时, K_d 的值应取小一些。

控制规则的形式为: R_i : if E is A_i and EC is B_i , then UP is $C_i, i = 1, 2 \cdots 49$; R_j : if E is A_j and EC is B_j , then UI is $C_j, j = 1, 2 \cdots 49$; R_k : if E is A_k and EC is B_k , then UD is $C_k, k = 1, 2 \cdots 49$ 。 R_i 、 R_j 、 R_k 表示第 i 、 j 、 k 条控制规则, E 表示偏差的语言变量, EC 表示偏差变化率的语言变量, UP 、 UI 、 UD 表示 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的语言变量。它们的语言值在相应论域中的模糊子集分别为 A_i 、 B_i 、 $C_i, i = 1, 2 \cdots 7$,共建立了 $49 \times 3 = 147$ 条控制规则, ΔK_p 模糊规则表如表 2 所示。

表 2 ΔK_p 模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS

3.4 模糊推理规则及解模糊算法

振幅 PID 控制参数调整模糊控制器的推理算法采用如式(1,2)所示两输入单输出 Mamdani MAX-MAN 推理方法,去模糊化则采用精度较高的如式(3)所示重心法,具体模糊推理规则如下:

IF A_1 AND B_1 THEN C_1
IF A_2 AND B_2 THEN C_2
IF A_3 AND B_3 THEN C_3
.....

输入 X_0 AND Y_0 结论 C'

由前提“ X_0 AND Y_0 ”和各种模糊规则“ A_i AND B_i THEN $C_i (i=1, 2, n)$ ”可得到推理结果:激活的单条规则输出量 C'_i 的隶属度值及总的激活规则输出量 C' 的隶属度值计算如式(1,2)所示:

$$\mu_{C'_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z) \quad (1)$$

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C'_1}(z) \vee \mu_{C'_2}(z) \cdots \vee \mu_{C'_n}(z) \quad (2)$$

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{i=1}^{13} \Delta k_{pi} \cdot \mu_{pi}(\Delta K_p)}{\sum_{i=1}^{13} \mu_{pi}(\Delta K_p)} \quad (3)$$

3.5 振幅模糊 PID 控制算法

振幅 PID 控制采用递推式控制算法如式(5)所示,疲劳裂纹扩展试验过程中 PID 控制在线整定的 K_p 、 K_i 和 K_d 参数采用式(3,4)进行计算:

$$\Delta u = K_p(e_i - e_{i-1}) + K_i e_i + K_d(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})$$

$$u_i = u_{i-1} + \Delta u \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \{e, ec\}_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \{e, ec\}_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \{e, ec\}_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (5)$$

3.6 振动载荷振幅模糊 PID 控制的实现

在实际在线应用中,本研究首先根据输入输出离散隶属度表、模糊控制规则、式(1,2)所示两输入单输出 Mamdani 模糊推理方法和式(3)所示去模糊化重心法,得到模糊控制查询表,模糊控制表是用 E 、 EC 在各自论域中的全部元素的所有组合计算得出的相应的以论域内元素表示的控制量变化值,写成矩阵形式并在实验过程中加以修正得到。笔者将该控制查询表存放于计算机中,在疲劳裂纹扩展试验每一个控制周期中,计算机将所采集的实测试验载荷振幅偏差 e 和偏差变化率 ec 值转换到各自的离散论域中,由模糊控制表可查到相应的控制输出值 UP 、 UI 、 UD ,再乘以各自相应的比例因子后便得到精确值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,根据式(3)得到整定好的 PID 控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d ,采用式(4)求得振幅 PID 控制的输出控制量—电磁激振器的激振电压。控制查询表可离线计算,在线控制时计算量很小,所以控制系统具有很强的实时性,满足谐振式疲劳裂纹扩展试验的要求。 ΔK_p 模糊控制表中某一元素值产生流程图如图 6 所示。

4 实验及结果分析

为进行相关实验研究,笔者建立了电磁谐振式疲劳裂纹扩展试验固有频率跟踪系统实验平台,实验装置实物如图 7 所示。其中,疲劳试验机采用红山 PLG-100 谐振式高频疲劳试验机,图像采集卡为美国 NI 公

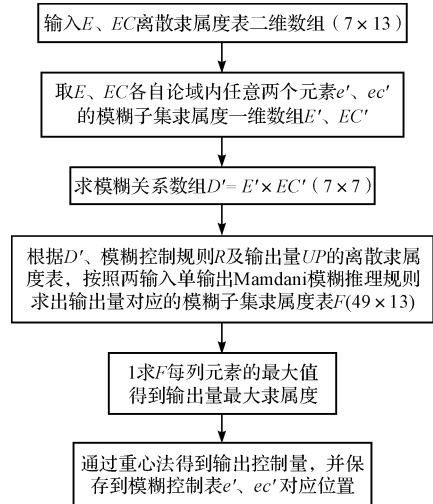


图 6 模糊控制表的某一元素值生成流程图

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 724×568 ,试验载荷振幅控制系统下位机 DSP 数据采集分析及信号发生系统,所采用核心芯片为 TMS320F2812 信号发生器和 TMS320F2812 信号采集、分析模块,载荷传感器采用电阻应变片式传感器。裂纹图像采集与处理软件开发平台为 IMAQ-VISION,载荷控制、频率跟踪、信号分析处理及通讯软件开发平台为 VC 语言。试块为 CT 紧凑标准试块,材料为 45 号钢。本研究在该实验平台上进行了不同裂纹长度系统固有频率测量实验和振幅控制实验,固有频率测量实验已在前面讲述。



图 7 实验平台实物图

为了验证基于裂纹在线测量的振动载荷振幅模糊 PID 控制系统的控制性能,本研究在所建立的实验平台上采用振幅 PID 控制方法、振幅模糊控制方法及本研究提出的控制方法对疲劳裂纹扩展试验的振动载荷振幅进行了控制,并在应用程序中增加了动态控制过

程参数的测量功能:调整过程中的超调幅度、调整时间的测量,系统运行界面如图 8 所示,测得具体实验数据如表 3 所示,系统采样时间为 0.5 s。为使实验结果具有普遍性,笔者测量了振幅不同设定值时各方法控制性能参数。实验结果表明:本研究方法和振幅 PID 控制方法、振幅模糊控制方法相比,控制精度高(稳态精度小于 1%,超调量小于 2%),调整时间短,控制过程稳定可靠。如要进一步提高其控制精度,则可从以下方面出发:进一步提高裂纹图像识别算法和系统固有频率跟踪算法等,更加精确对地在线测量裂纹长度以及快速跟踪系统固有频率。

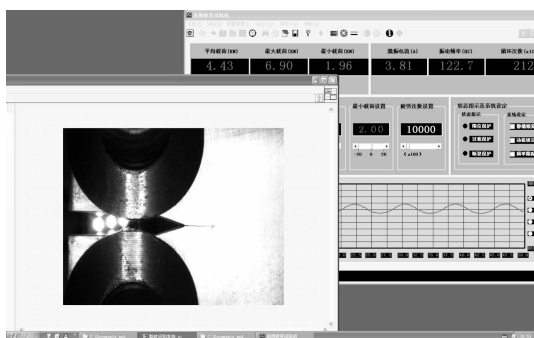


图 8 振幅控制系统运行界面

5 结束语

为了实时跟踪由于裂纹扩展而逐渐减小的系统固有频率并保证疲劳裂纹扩展过程中试验载荷的稳定性,本研究建立了基于裂纹长度在线测量的谐振式疲劳裂纹扩展试验振幅控制系统,提出了基于裂纹在线测量的粗细步长结合改进爬山法固有频率跟踪算法及振动振幅模糊 PID 控制方法,本研究对所提出的方法进行了详细的理论和实验研究,实验结果表明:采用本研究方法的实验系统在裂纹扩展过程中的振幅控制精度为 2%,控制精度高,调整时间短,能很好地满足疲劳裂纹扩展试验的要求。

笔者将其应用于所研制的谐振式疲劳裂纹扩展试验系统上,长期的系统运行结果表明:所研制系统能精确地实现固有频率的跟踪,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,而且在振动过程中保持振幅的稳定性。该方法可应用于各种结构的谐振式疲劳裂纹扩展试验系统,具有较强的应用价值和前景。

参考文献(References):

- [1] 李光海,刘正义. 基于声发射技术的金属高频疲劳检测[J]. 中国机械工程,2004,18(7):1205-1209.
- [2] PAVELKO V, OZOLINSH E. Detection of a fatigue crack by method of an acoustic emission[J]. *Transport and Telecommunication*,2002,13(1):75-84.
- [3] 云 艳,高红俐,沈姗姗. 基于机器视觉技术的疲劳裂纹自动检测实验系统[J]. 机电工程,2012,29(2):183-187.
- [4] KANCHANOMAI C, YAMAMOTO S, MIYASHITA Y. High cycle fatigue test for solders using non-contact digital image measurement system[J]. *International Journal of Fatigue*,2002,24(1):57-67.
- [5] SATOSHI N. Improved method for threshold crack propagation testing on an electromagnetic resonance type machine[J]. *Journal of Testing & Evaluation*,1993,11(3):193-201.
- [6] 张 妮. 高频疲劳试验机动态特性的研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.
- [7] 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
- [8] 沈姗姗,姜 伟,云 艳. 高频疲劳试验动载载荷控制系统研究[J]. 计算机测量与控制,2012,20(4):959-962.
- [9] 周 迅,俞小莉. 谐振式曲轴弯曲疲劳试验恒载荷控制方法[J]. 农业机械学报,2006,37(12):168-171.
- [10] SONDHI S, HOTE Y V. Fractional order PID controller for load frequency control[J]. *Energy Conversion and Management*,2014(85):343-353.
- [11] 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, P. R. China: ICMEE,2011:1031-1038.
- [12] 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,2011,22(11):1302-1306.
- [13] ZHU Wu, ZHANG Jia-min. 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.
- [14] 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.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

郑欢斌,高红俐,刘 辉,等. 裂纹扩展疲劳试验测控系统研究[J]. 机电工程,2015,32(10):1271-1277.

ZHENG Huan-bin, GAO Hong-li, LIU Hui, et al. Measurement and control system for fatigue crack propagation test[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(10):1271-1277.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>