



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117824973 A

(43) 申请公布日 2024. 04. 05

(21) 申请号 202410015142.9

G01L 5/24 (2006.01)

(22) 申请日 2024.01.04

(71) 申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037号

(72) 发明人 翁顺 张俊树 高珂 朱宏平

颜永逸 夏勇 吴俐滢 张之越

(74) 专利代理机构 武汉信诚嘉合知识产权代理
有限公司 42321

专利代理师 胡全利

(51) Int. Cl.

G01M 7/08 (2006.01)

G06F 18/22 (2023.01)

G01N 29/04 (2006.01)

G01N 29/46 (2006.01)

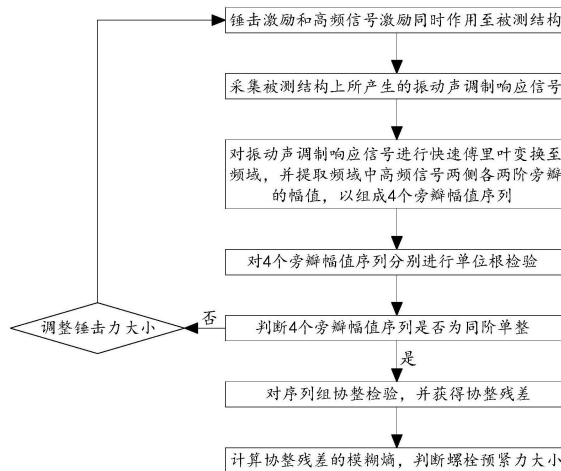
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法及系统

(57) 摘要

本发明涉及一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,锤击激励和高频信号激励同时作用至被测结构;采集被测结构上所产生的振动声调制响应信号;对振动声调制响应信号进行快速傅里叶变换至频域,并提取频域中高频信号两侧各两阶旁瓣的幅值,以组成4个旁瓣幅值序列;对4个旁瓣幅值序列分别进行单位根检验;判断4个旁瓣幅值序列是否为同阶单整,若为是,则进入下一步,若为否,则返回第一步,并调整锤击力大小;对序列组协整检验,并获得协整残差;计算协整残差的模糊熵,判断螺栓预紧力大小。有益效果为:通过力锤敲击替代激振器振动作为低频激励,操作更加简单,无需根据结构固有频率选择低频激励的频率。



1. 一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于,包括如下步骤:
S100、锤击激励和高频信号激励同时作用至被测结构;
S200、采集被测结构上所产生的振动声调制响应信号;
S300、对振动声调制响应信号进行快速傅里叶变换至频域,并提取频域中高频信号两侧各两阶旁瓣的幅值,以组成4个旁瓣幅值序列;
S400、对4个旁瓣幅值序列分别进行单位根检验;
S500、判断4个旁瓣幅值序列是否为同阶单整,若为是,则进入S600,若为否,则返回S100,并调整锤击力大小;
S600、对序列组协整检验,并获得协整残差;
S700、计算协整残差的模糊熵,判断螺栓预紧力大小。

2. 根据权利要求1所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于, S100中高频信号激励的确定方法如下:

对被测结构施加扫频信号,并采集对应的响应信号,然后经快速傅里叶变换将信号转换至频域,选取扫频范围内幅值最高的频率作为高频信号激励。

3. 根据权利要求1或2所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于, S500中调整锤击力大小的次数为30次以上。

4. 根据权利要求1~3任一项所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于,模糊熵计算公式如下:

- 1) 对一组长度为N的序列X进行相空间重构,得到时间序列Y;
- 2) 定义两个时间序列Y(i)与Y(j)之间的距离 $d_{i,j}^m$;
- 3) 引入模糊隶属函数,利用模糊函数计算时间序列Y(i)与Y(j)之间的相似度 $D_{i,j}^m$;
- 4) 定义函数:

$$\Psi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \left(\frac{1}{N-m} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m+1} D_{i,j}^m \right)$$

5) 对于有限长的试件序列,模糊熵估计为:

$$\text{FuzzyEn}(m, r, N) = \ln \Psi^m(r) - \ln \Psi^{m+1}(r)。$$

5. 根据权利要求4所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于,时间序列Y公式如下:

$$Y(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] - x_0(i), i=1, 2, \dots, N-m+1$$

其中,m为嵌入维数, $x_0(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x(i+j)$ 为均值。

6. 根据权利要求4所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于,距离 $d_{i,j}^m$ 公式如下:

$$d_{i,j}^m = d[Y(i), Y(j)] = \max_{k=(0, m-1)} \left| (x(i+k) - x_0(i)) - (x(j+k) - x_0(j)) \right|。$$

7. 根据权利要求4所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,其特征在于,相

似度 $D_{i,j}^m$ 公式如下:

$$D_{i,j}^m = \exp \left[-\frac{(d_{i,j}^m)^n}{r} \right]$$

其中, r 为相似容限度, $i, j=1, 2, \dots, N-m+1$,且 $i \neq j$ 。

8. 一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别系统,其特征在于,包括:

高频激励源(1),其固定在被测结构(7)上,并施加高频信号激励被测结构(7);

力锤(2),其固定在被测结构(7)上,并锤击激励被测结构(7);

信号发生器(3),其经功率放大器(4)连接高频激励源(1);

接收源(5),其固定在被测结构(7)上,并用以获取在高频激励源(1)以及力锤(2)作用下被测结构(7)所产生的振动声调制响应信号;

处理器(6),其获取接收源(5)所采集的振动声调制响应信号并进行处理,以判断螺栓预紧力大小。

9. 根据权利要求8所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别系统,其特征在于,所述高频激励源(1)采用压电陶瓷片。

10. 根据权利要求8所述一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别系统,其特征在于,所述信号发生器(3)采用NI-6366数据采集仪,所述NI-6366数据采集仪与处理器(6)电连接,所述接收源(5)采用压电陶瓷片,所述接收源(5)经NI-6366数据采集仪与处理器(6)电连接。

一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及钢结构领域,具体涉及一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法及系统。

背景技术

[0002] 钢结构是现代结构的主要形式,具有材料强度高、塑性好、材质均匀等特征,广泛应用于大跨桥梁、输电塔、海洋平台等领域,符合现代结构装配式、产业化和可持续发展的要求。钢结构的连接方式主要有栓(铆)接和焊接,早期的钢结构节点大都采用铆接的方式,随着高强度螺栓的发展,钢桁梁和钢拱节点均开始采用高强螺栓连接的方式。由于高强螺栓连接具有施工简单、受力性能好、可拆换、寿命长等优点,逐渐成为钢结构连接节点的主要形式。

[0003] 为保证结构性能达到标准,对螺栓连接节点的预紧状态进行检测至关重要。传统的螺栓检测大都需要检测人员高空作业,利用螺栓扳手等工具对结构中的螺栓逐一排查,或通过望远镜目视巡查高强螺栓连接的脱落情况。对于钢桁桥这种大型结构,传统的方法需要花费大量的人力物力,不仅成本高、效率低,还难以发现问题并及时采取修复措施,亟需合适的方法弥补这些不足。而随着技术的发展,大数据和人工智能成为科技进步的趋势,工业自动化逐渐取代手工检测,对检测人员的经验水平依赖性降低,有必要结合现代高科技技术,开发更有效、更智能的螺栓预紧状态识别方法。

[0004] 近年来,国内外学者已经研究出多种螺栓预紧状态检测方法,由于检测对象多处于服役状态,因此一般采用无损检测的方法,主要包括振动法、压电阻抗法、声发射法、主动传感法和非线性超声法,其中非线性超声法包括高频谐波法和振动声调制技术,振动声调制法由于其灵敏度高、鲁棒性好、无需复杂的仪器等优点,受到广泛关注。振动声调制法是向被测试件同时输入低频振动和高频信号,两种激励在接触截面发生调制作用,当试件完好,结构可视为线性系统,接收到的信号为两种激励的线性叠加,其频域仅有两列入射波对应的频率;若试件存在缺陷,则结构将在缺陷处变为非线性系统,由于两种激励在缺陷处的相互作用,高频信号会在接触界面发生幅值和相位调制,进而产生了新的旁瓣调制谐波成分,并由此可以判断试件的完整性和缺陷的大小,最初,这种技术被开发用于微裂纹的检验,随着研究的不断深入,国内外专家开始将其应用到检测焊缝的微裂纹、螺栓松动、复合材料分层和预测疲劳寿命等方面。

[0005] 振动声调制法是基于低频振动和高频声波相互作用,调制处非线性旁瓣信号进行损伤识别,具有良好的鲁棒性,可用于早期损伤检测,对螺栓松动、闭合微裂纹和复合材料分层等接触性缺陷十分敏感,但在实际应用中,很难通过架设激振器对结构进行低频振动激励,且低频振动激励的强度同样会影响调制结果,低频激励操作复杂难以控制,检测结果易发生漂移,亟需开发更简易的方式,进而推进振动声调制法在实际中的应用,同时,消除低频振动强度的影响也至关重要。

发明内容

[0006] 本发明所要解决的技术问题是提供一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法及系统,以克服上述现有技术中的不足。

[0007] 本发明解决上述技术问题的技术方案如下:一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,包括如下步骤:

[0008] S100、锤击激励和高频信号激励同时作用至被测结构;

[0009] S200、采集被测结构上所产生的振动声调制响应信号;

[0010] S300、对振动声调制响应信号进行快速傅里叶变换至频域,并提取频域中高频信号两侧各两阶旁瓣的幅值,以组成4个旁瓣幅值序列;

[0011] S400、对4个旁瓣幅值序列分别进行单位根检验;

[0012] S500、判断4个旁瓣幅值序列是否为同阶单整,若为是,则进入S600,若为否,则返回S100,并调整锤击力大小;

[0013] S600、对序列组协整检验,并获得协整残差;

[0014] S700、计算协整残差的模糊熵,判断螺栓预紧力大小。

[0015] 在上述技术方案的基础上,本发明还可以做如下改进。

[0016] 进一步,S100中高频信号激励的确定方法如下:

[0017] 对被测结构施加扫频信号,并采集对应的响应信号,然后经快速傅里叶变换将信号转换至频域,选取扫频范围内幅值最高的频率作为高频信号激励。

[0018] 进一步,S500中调整锤击力大小的次数为30次以上。

[0019] 进一步,模糊熵计算公式如下:

[0020] 1) 对一组长度为N的序列X进行相空间重构,得到时间序列Y;

[0021] 2) 定义两个时间序列Y(i)与Y(j)之间的距离 $d_{i,j}^m$;

[0022] 3) 引入模糊隶属函数,利用模糊函数计算时间序列Y(i)与Y(j)之间的相似度 $D_{i,j}^m$;

[0023] 4) 定义函数:

$$[0024] \quad \Psi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \left(\frac{1}{N-m} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m+1} D_{i,j}^m \right)$$

[0025] 5) 对于有限长的试件序列,模糊熵估计为:

[0026] $FuzzyEn(m, r, N) = \ln \Psi^m(r) - \ln \Psi^{m+1}(r)$ 。

[0027] 进一步,时间序列Y公式如下:

[0028] $Y(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] - x_0(i), i = 1, 2, \dots, N-m+1$

[0029] 其中,m为嵌入维数, $x_0(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x(i+j)$ 为均值。

[0030] 进一步,距离 $d_{i,j}^m$ 公式如下:

[0031] $d_{i,j}^m = d[Y(i), Y(j)] = \max_{k=(0, m-1)} |(x(i+k) - x_0(i)) - (x(j+k) - x_0(j))|$ 。

[0032] 进一步,相似度 $D_{i,j}^m$ 公式如下:

$$[0033] \quad D_{i,j}^m = \exp \left[-\frac{(d_{i,j}^m)^n}{r} \right]$$

[0034] 其中,r为相似容限度,i,j=1,2,...,N-m+1,且i≠j。

[0035] 基于上述技术方案,本发明还提供一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别系统,包括:

[0036] 高频激励源,其固定在被测结构上,并施加高频信号激励被测结构;

[0037] 力锤,其固定在被测结构上,并锤击激励被测结构;

[0038] 信号发生器,其经功率放大器连接高频激励源;

[0039] 接收源,其固定在被测结构上,并用以获取在高频激励源以及力锤作用下被测结构所产生的振动声调制响应信号;

[0040] 处理器,其获取接收源所采集的振动声调制响应信号并进行处理,以判断螺栓预紧力大小。

[0041] 进一步,高频激励源采用压电陶瓷片。

[0042] 进一步,信号发生器采用NI-6366数据采集仪,NI-6366数据采集仪与处理器电连接,接收源采用压电陶瓷片,接收源经NI-6366数据采集仪与处理器电连接。

[0043] 本发明的有益效果是:

[0044] 本方法可以提高振动声调制技术在健康监测领域中的适用性,通过力锤敲击替代激振器振动作为低频激励,操作更加简单,无需根据结构固有频率选择低频激励的频率,操作更加简单实用,无需对结构固有频率的先验知识,提出了消除低频激励强度变化影响的数据处理方法,解决了低频激励强度变化引起的测量数据漂移问题,提出了判断螺栓状态的指标,实现螺栓预紧力识别。

附图说明

[0045] 图1为本发明中基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法的流程图;

[0046] 图2为本发明中基于振动声调制技术的螺栓状态识别系统的结构图;

[0047] 图3为实验试件;

[0048] 图4为预紧力70N·m的振动声调制信号频域图;

[0049] 图5为预紧力30N·m的振动声调制信号频域图;

[0050] 图6为锤击力与旁瓣幅值的关系图;

[0051] 图7为协整残差序列;

[0052] 图8为通过模糊熵构建的预紧力损失评估模型。

[0053] 附图中,各标号所代表的部件列表如下:

[0054] 1、高频激励源,2、力锤,3、信号发生器,4、功率放大器,5、接收源,6、处理器,7、被测结构。

具体实施方式

[0055] 以下结合附图对本发明的原理和特征进行描述,所举实例只用于解释本发明,并非用于限定本发明的范围。

[0056] 实施例1

[0057] 如图1所示,一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别方法,包括如下步骤:

[0058] S100、锤击激励和低频信号激励同时作用至被测结构;

[0059] S200、采集被测结构上所产生的振动声调制响应信号;

[0060] S300、对振动声调制响应信号进行快速傅里叶变换至频域,并提取频域中高频信号两侧各两阶旁瓣的幅值,以组成4个旁瓣幅值序列;

[0061] S400、对4个旁瓣幅值序列分别进行单位根检验;

[0062] S500、判断4个旁瓣幅值序列是否为同阶单整(即序列本身为非平稳序列,经过相同次数的差分后,同为平稳序列,其中次数大于1),若为是,则进入S600,若为否,则返回S100,并调整锤击力大小;

[0063] S600、对序列组协整检验,并获得协整残差;

[0064] S700、计算协整残差的模糊熵,判断螺栓预紧力大小,从而确定螺栓状态。

[0065] 更进一步:

[0066] S100中高频信号激励的确定方法如下:

[0067] 对被测结构施加扫频信号,并采集对应的响应信号,然后经快速傅里叶变换将信号转换至频域,选取扫频范围内幅值最高的频率作为高频信号激励。

[0068] 对于S500中调整锤击力大小的次数至少为30次以上。

[0069] S600具体为:

[0070] 对序列组进行协整检验,得到序列的协整方程,然后再将序列组带入协整方程,获得协整残差。

[0071] 实施例2

[0072] 如图1所示,本实施例为在实施例1的基础上对其所进行的进一步改进,具体如下:

[0073] 模糊熵计算公式如下:

[0074] 1) 对一组长度为N的序列X进行相空间重构,得到时间序列Y;

[0075] $Y(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] - x_0(i), i=1, 2, \dots, N-m+1$

[0076] 其中,m为嵌入维数, $x_0(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} x(i+j)$ 为均值;

[0077] 2) 定义两个时间序列Y(i)与Y(j)之间的距离 $d_{i,j}^m$;

[0078] $d_{i,j}^m = d[Y(i), Y(j)] = \max_{k=(0, m-1)} |(x(i+k) - x_0(i)) - (x(j+k) - x_0(j))|$;

[0079] 3) 引入模糊隶属函数,利用模糊函数计算时间序列Y(i)与Y(j)之间的相似度 $D_{i,j}^m$;

[0080]
$$D_{i,j}^m = \exp \left[-\frac{(d_{i,j}^m)^r}{r} \right]$$

[0081] 其中,r为相似容限度, $i, j=1, 2, \dots, N-m+1$, 且 $i \neq j$;

[0082] 4) 定义函数:

[0083]
$$\Psi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \left(\frac{1}{N-m} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m+1} D_{i,j}^m \right)$$

- [0084] 5) 对于有限长的试件序列,模糊熵估计为:
- [0085] $FuzzyEn(m,r,N) = \ln \Psi^m(r) - \ln \Psi^{m+1}(r)$ 。
- [0086] 实施例3
- [0087] 如图2所示,一种基于振动声调制技术的螺栓状态识别系统,包括:
- [0088] 高频激励源1,其固定在被测结构7上,并施加高频信号激励被测结构7;
- [0089] 力锤2,其固定在被测结构7上,并锤击激励被测结构7;
- [0090] 信号发生器3,其经功率放大器4连接高频激励源1;
- [0091] 接收源5,其固定在被测结构7上,并用以获取在高频激励源1以及力锤2作用下被测结构7所产生的振动声调制响应信号;
- [0092] 处理器6,其分别与力锤2、接收源5连接,用于获取接收源5所采集的振动声调制响应信号并进行处理,以判断螺栓预紧力大小。
- [0093] 高频激励源1优选采用压电陶瓷片,信号发生器3采用NI-6366数据采集仪,NI-6366数据采集仪与处理器6电连接,接收源5采用压电陶瓷片,接收源5经NI-6366数据采集仪与处理器6电连接,此时,NI-6366数据采集仪既可以向功率放大器4发送信号,也可以接收接收源5所采集的信号,处理器6可以采用计算机。
- [0094] 实验例
- [0095] 如图3所示,实验试件为120mm×35mm×5mm的两块Q235钢板,通过一个强度级为8.8的M20螺栓连接,然后将螺栓连接板的两端放置于海绵垫上,减小边界条件产生的影响;
- [0096] 实验中高频激励源1采用压电陶瓷片,记为PZT1;接收源5采用压电陶瓷片,记为PZT2;
- [0097] PZT1和PZT2分别粘贴在螺栓两侧钢板上,并距螺栓中心400mm;
- [0098] 经由计算机内的软件LabVIEW编程,高频信号通过NI-6366数据采集仪传输至功率放大器4,提高电压后由PZT1作用到钢板上,频率选择为132480Hz,放大后的电压为600V;
- [0099] 低频激励则采用力锤2敲击的形式,作用在PZT1同侧的钢板末端,如图2所示,锤击激励和低频信号激励同时作用到试件上,经过螺栓连接界面后由PZT2采集,然后由NI-6366数据采集仪接收PZT2所采集的振动声调制响应信号,并保存至计算机进一步处理;
- [0100] 螺栓紧固状态下的预紧力为70N·m,以10N·m为步长依次递减,从70N·m至10N·m,共设置了7种工况;
- [0101] 首先将螺栓拧至紧固状态,持续发射高频信号同时使用力锤2以随机大小的力敲击试件,并记录锤击力大小,待力锤2引起的振动衰减完毕后,继续下一次敲击,完成61次敲击,在最后一次振动平稳后,结束信号采集,视为一组数据,每种工况采集一组数据,共7组,实验试件如图3所示;
- [0102] 图4和图5分别是螺栓预紧力为70N·m和30N·m状态下,使用相同大小的力敲击试件,高频信号附近的频域图;
- [0103] 当螺栓处于紧固状态时,高频信号的幅值较高,两侧旁瓣较为微弱,这是由于试件两端的固定方式和螺栓预紧力无法完全覆盖两钢板的连接界面,使结构产生了一定的接触非线性,也体现出改进的振动声调制方法对损伤的敏感性较强;
- [0104] 当螺栓发生松动时,可以在高频信号两侧看到明显的旁瓣信号,同时由于调制作用,高频信号的幅值也大幅度降低,说明旁瓣信号是由高频信号调制产生,此外,观察图5还

可以发现,两侧的旁瓣幅值呈现递减的趋势,对损伤的表现具有一致性;

[0105] 实验过程中,力锤2保持与计算机连接,实时监测锤击力的大小,提取每次锤击力的数值按大小排列,取低频侧一阶旁瓣幅值依次对应,结果如图6所示,实验结果表明,锤击力的大小会严重影响调制强度,使旁瓣幅值发生变化,根据振动声调制理论模型可知,锤击力的大小会影响试件的振动强度,使接触面的刚度和接触面积发生变化,进而影响调制强度,从图6中可以看出,旁瓣幅值随着锤击力的增大而增大,导致实际检测结果鲁棒性差,虽然二者整体变化趋势相同,但在边界条件、结构自身扰动和试件中未知的损伤等因素影响下,旁瓣幅值也会在一定范围内浮动,进一步增加了以旁瓣幅值为判断标准的不确定性。

[0106] 对70N·m状态下得到的4个旁瓣序列进行单位根检验,计算t统计量,表1给出了4个旁瓣幅值序列以及一阶差分后的单位根检验结果;

[0107] 表1

| | 序列 | t 统计量 | 平稳性 |
|--------|-------------|---------|-----|
| | 低频侧一阶旁瓣 | -0.787 | 非平稳 |
| | 低频侧一阶旁瓣一阶差分 | -8.644 | 平稳 |
| | 低频侧二阶旁瓣 | -1.450 | 非平稳 |
| [0108] | 低频侧二阶旁瓣一阶差分 | -16.481 | 平稳 |
| | 高频侧一阶旁瓣 | -0.829 | 非平稳 |
| | 高频侧一阶旁瓣一阶差分 | -7.599 | 平稳 |
| | 高频侧二阶旁瓣 | -1.466 | 非平稳 |
| | 高频侧二阶旁瓣一阶差分 | -14.645 | 平稳 |

[0109] 对比5%置信水平下的临界值-1.941可知,4个序列的t统计量均大于临界值,具有非平稳性;进行一阶差分后,对比结果表明差分序列为平稳序列,因此满足协整检验对于序列一阶单整的要求;

[0110] 对上述4个序列进行协整检验,获得协整残差如图7所示,从图7中可以看出,随着螺栓预紧力损失(PL)的增大,残差超出控制线的部分明显增多;

[0111] 此外,由于预紧力的减小,钢板表面的接触点发生松动,在振动作用下,原有的接触点和接触面会发生侧滑或偏移,导致微凸体的变化更加复杂,在残差三中,序列的幅值状态同时也更加杂乱;

[0112] 结合图7中残差序列的变化,计算其模糊熵作为预紧力指标(PI),图8为螺栓预紧力损失与模糊熵之间的关系,由图可知,二者表现出了出良好的线性相关,模糊熵可以有效地表征螺栓预紧力的损失大小,利用线性拟合构建基于协整残差的螺栓预紧力损失评估模型:

[0113] $PI = 0.00043 \times PL - 0.01812$

[0114] 计算预紧力损失评估模型与实际点的相关系数为0.9673,表明二者呈高度相关。

[0115] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

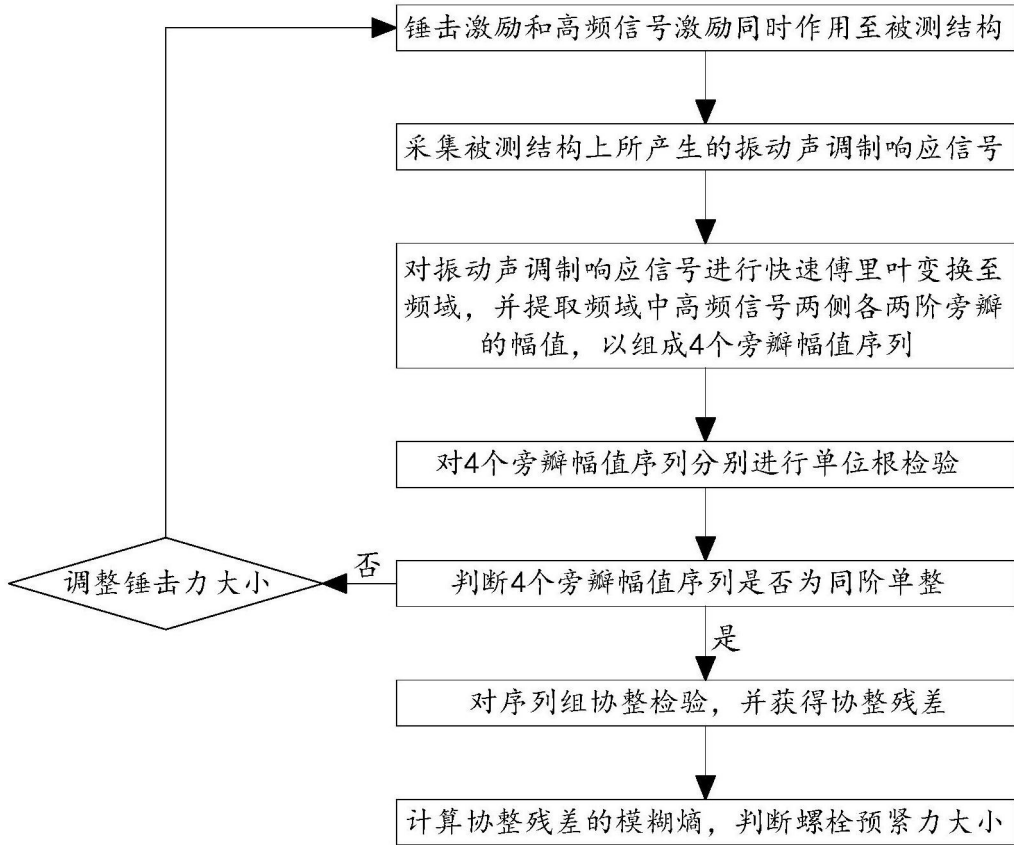


图1

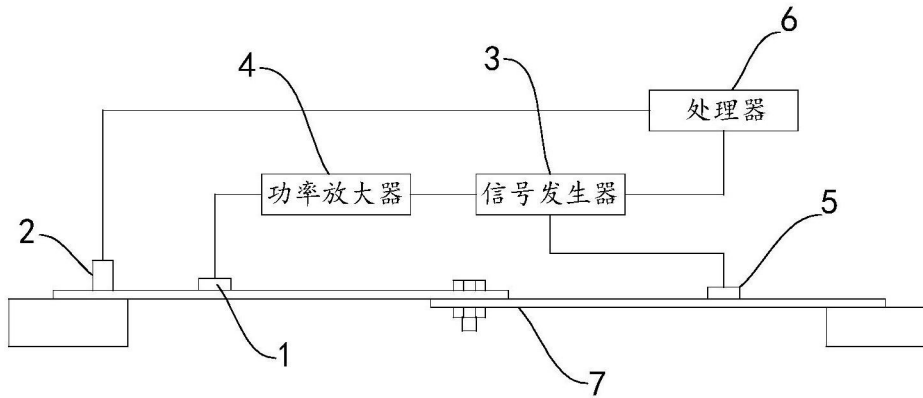


图2

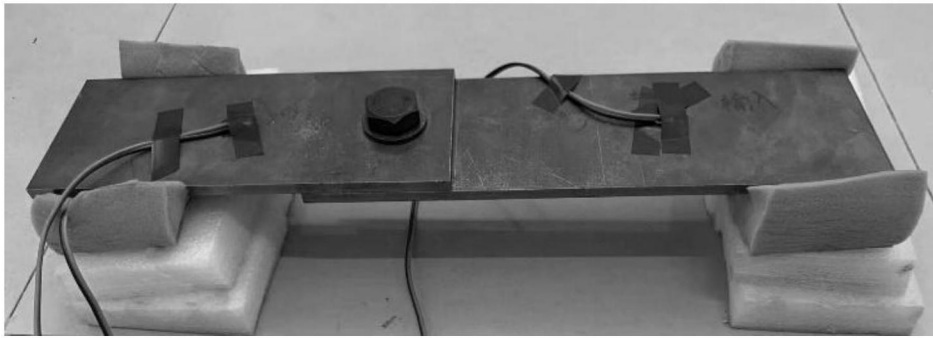


图3

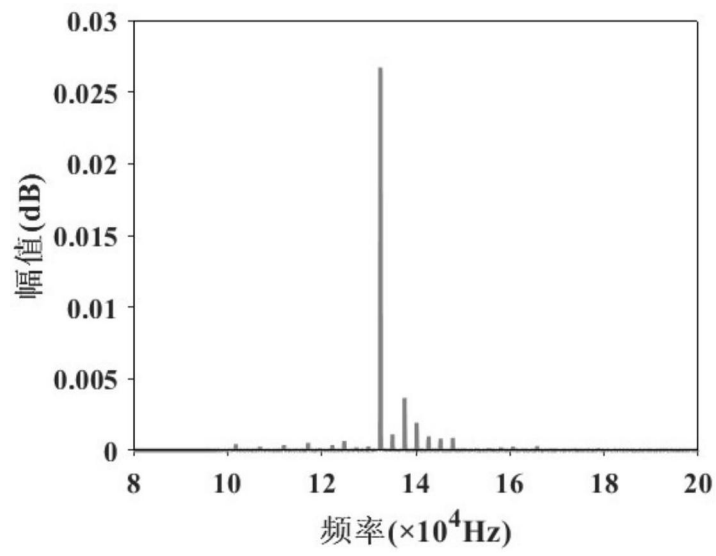


图4

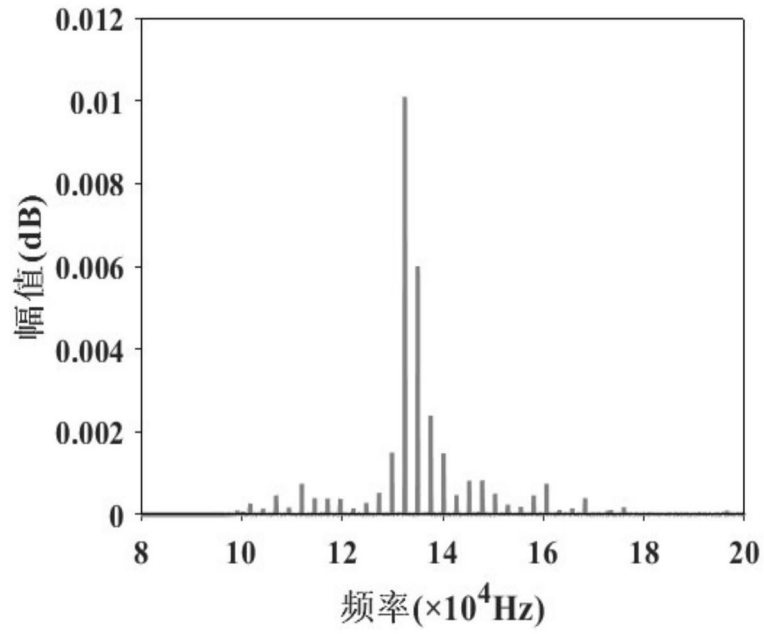


图5

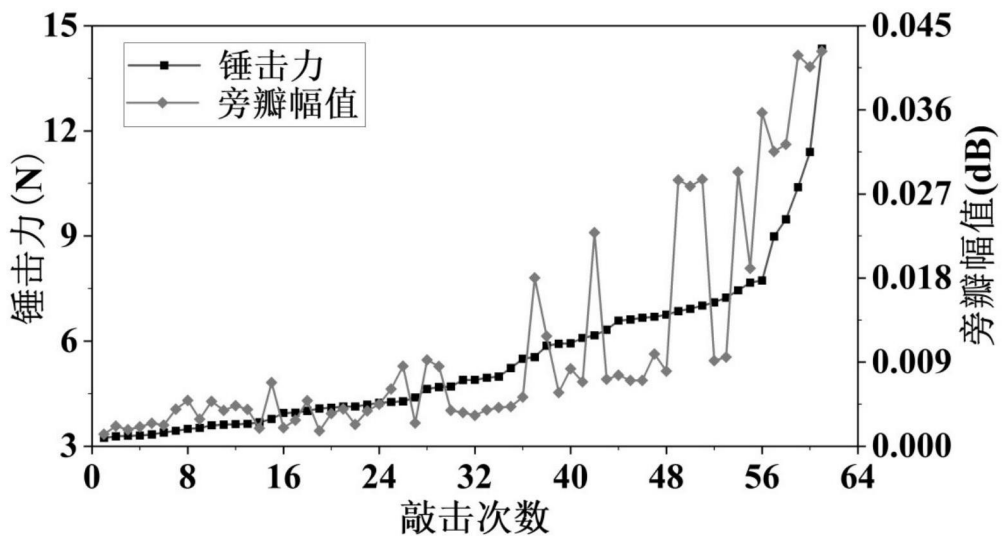


图6

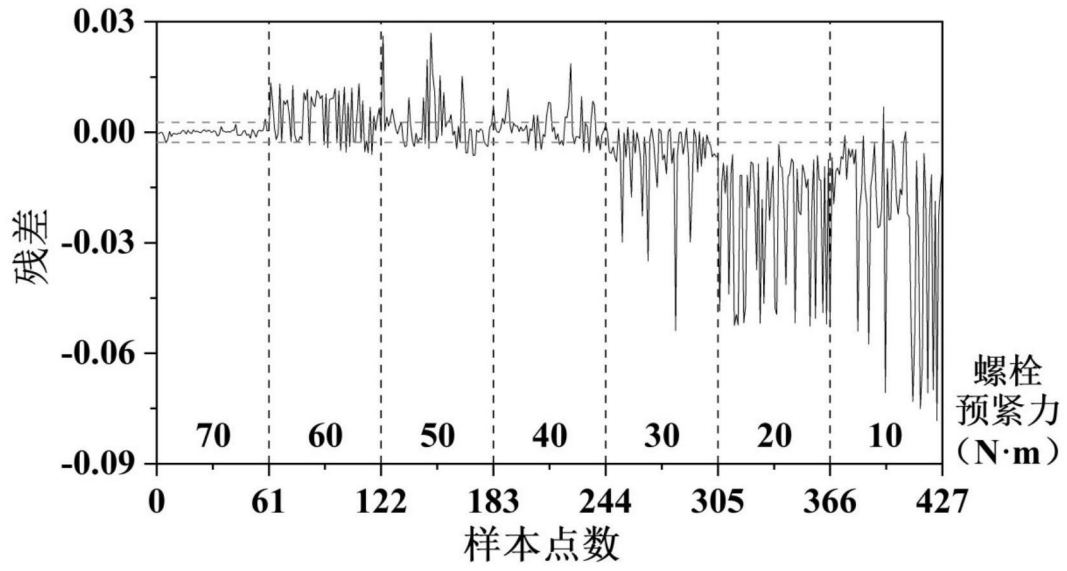


图7

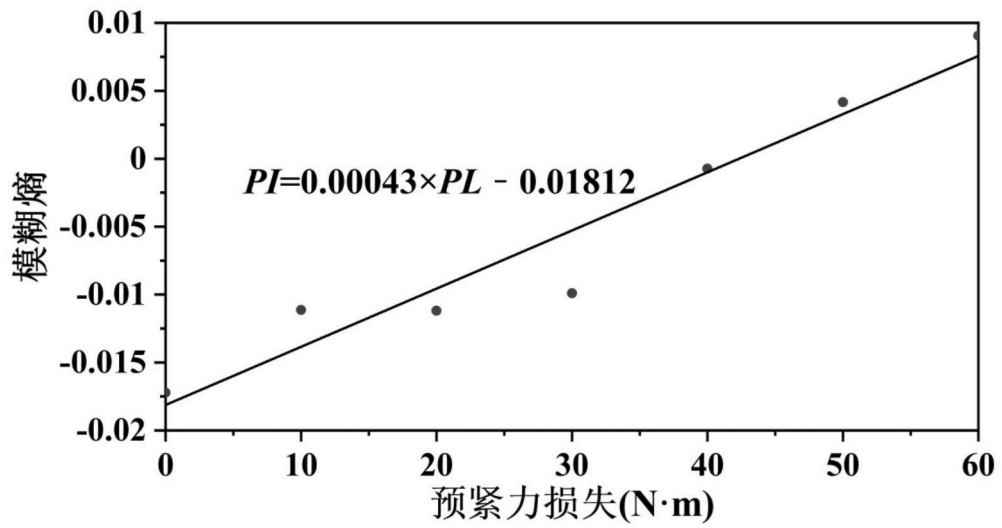


图8