

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108212

基于冲击激励的力传感器的动态数学模型研究

郭致港¹ 焦新泉^{1,2} 贾兴中²

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 在研究力传感器的动态校准过程中发现了由于力传感器与试验装置基座之间存在非刚性耦合而使传感器的动态响应性能受到明显影响的问题。故此依托现有的力传感器动态校准装置对力传感器的动态响应性能及最优数学模型展开了研究,并针对性地提出了基于力传感器原始模型优化后的3种数学模型。然后通过实验获取的数据对这3种模型展开分析对比,并发现模型3是3种数学模型中最优秀的一种。最后通过27次重复冲击试验与模型3共同解算出了力传感器的各项特征参数,这些参数对提高力传感器的动态响应能力极为重要。

关键词: 力传感器;动态校准;动态响应;冲击力;数学模型

中图分类号: TB93 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Research on dynamic mathematical model of force sensor based on impact excitation

Guo Zhigang¹ Jiao Xinquan^{1,2} Jia Xingzhong²(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the process of studying the dynamic calibration of the force sensor, it is found that the dynamic response performance of the sensor is obviously affected due to the non-rigid coupling between the force sensor and the base of the test device. Therefore, based on the existing dynamic calibration device of force sensor, the dynamic response performance and optimal mathematical model of force sensor are studied, and three optimized mathematical models based on the original model of force sensor are proposed. Then this paper analyzes and compares the three models through the experimental data, and finds that model 3 is the best of the three mathematical models. Finally, through 27 repeated impact tests and model 3, the characteristic parameters of the force sensor are calculated. These parameters are very important to improve the dynamic response ability of the force sensor.

Keywords: force sensor; dynamic calibration; dynamic response; impact force; mathematical model

0 引言

动态校准(dynamic calibration),又称动态量校准,指确定计量器具动态性能的校准。动态校准技术一直是准确认识和细致研究客观物理对象首要的、不可或缺的一环,也是国际计量科学界长期探索的重要问题^[1]。

伴随科技的发展,力传感器几乎在所有的工业领域中均有应用,尤其是在工程建设、航空航天、各种碰撞毁伤实验、冲击波载荷试验等领域有着不可替代的作用^[2-3]。目前在计量与测试领域,力传感器在静态校准方面的手段与设备已很成熟,并且具有很高的水平^[4]。但是在一些动态测试领域,力传感器依旧通过所谓的“静标动用”的手段进行

动态测试,这已经对实验结果产生了严重的偏差。由此看出针对力传感器进行动态性能研究迫在眉睫^[5]。

针对力传感器进行动态校准手段主要有3种:正弦力校准法、阶跃力校准法、冲击力校准法^[6-7]。

正弦力校准法:通过正弦激振设备对力传感器产生周期性的正弦激励,通过测量与传感器连接的装置(或设备)的加速度,进一步推导出传感器的动态性能参数。目前主要研究有:Prilepko等^[8]通过激振器对力传感器进行动态校准;Nozato等^[9]通过该方法对多组力传感器系统的信息融合进行修正;张力^[10]和朱中华等^[11]通过激光干涉法、正弦力校准法等手段对力传感器的动态性能进行研究等。

阶跃力校准法:通过激波管等设备对力传感器产生阶

收稿日期:2021-10-28

跃压力,通过测量传感器的响应来推导出传感器的动态性能参数。目前主要研究包括有 Kobusch 等^[12]采用多普勒激光干涉技术实现阶跃力对力传感器的校准、尹肖等^[13]通过利用快开阀门实现负阶跃力对力传感器的校准等。

冲击力校准法:通过产生冲击力的设备对力传感器产生冲击激励,并通过测量系统的脉冲加速度来推导出传感器的动态性能参数例如,利用落锤结构能实现冲击激励对力传感器进行动态校准,冲击力的校准^[14];Fcng 等^[15]通过该方法,实现了 120 kN 与 200 kN 的冲击力对力传感器的校准;Jain 等^[16]通过对标准载荷的放大实现了 1 MN 冲击力对力传感器的校准等。

以上不管采用何种校准方法,力传感器都需要通过使用各种方式与被测机构进行紧密链接后方可进行实验,并需要依次保证实验过程中力的传递路径的唯一性,减少或者消除力的分流以保证测量精度^[17]。并且不管采用何种动态校准手段,对力传感器的动态校准方式,最终是通过求解其特征参数实现的,准确辨识力传感器的特征参数是提高动态校准能力的关键^[18]。

本文依托现有的力传感器动态校准装置,采用冲击激励方式对力传感器的动态响应性能展开了研究。但在研究过程中发现了由于力传感器与试验装置基座之间存在非刚性耦合而使传感器的动态响应性能受到明显影响的问题。

为此,本文尝试建立了 3 种基于力传感器原始数学模型基础上优化后的参数化数学模型。这些模型是由弹簧、质量块、阻尼元件等通过串联布置组成的。然后本文通过实验获取的数据对优化后的参数化数学模型 2、3、4 展开分析对比,并最后发现模型 3 是 3 种数学模型中最优秀的一种。最后本文通过 27 次重复冲击试验的实验数据,结合模型 3 的拟合建模,共同解算出了力传感器的各项特征参数。这些特征参数共同定义了力传感器在给定的动态环境中的动态性能,对提高力传感器的动态响应能力极为重要。

1 实验装置及传感器

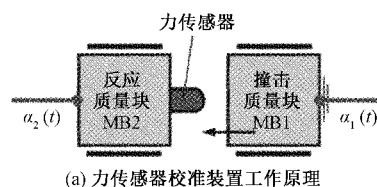
1.1 力传感器动态校准装置

如图 1 所示,为本文开展实验所使用的冲击力传感器动态校准装置。如图 1(a)所示为装置的工作原理,图 1(b)所示为带有可视化光束激光干涉仪的装置实物图。该装置的工作原理为:通过两个重 10 kg 的立方体质量块(MB1, MB2)和力传感器发生碰撞,通过确定的质量和加速度(通过激光振动计)来实现对碰撞过程中的冲击力的追溯。之所以采用“立方体”这种几何形状,是因为这种形状不易受到由冲击激发的附加旋转振动的影响,因此会改善得到的加速信号的质量。

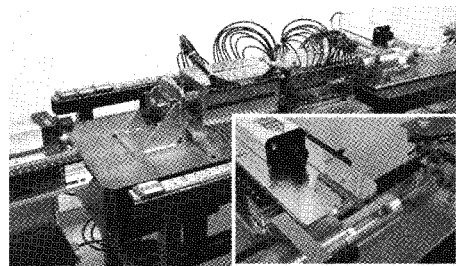
1.2 力传感器

如图 2 所示,为本文实验中用到的两种力传感器及其与校准装置中的质量块的安装示意图。

如图 2(a)所示,为德国生产的 HBM U9B/1kN 型力传

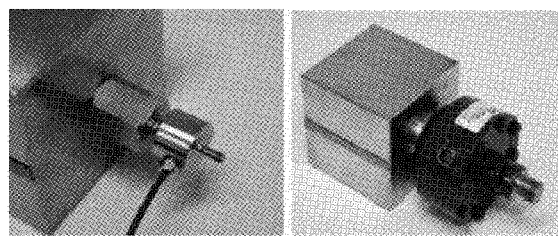


(a) 力传感器校准装置工作原理



(b) 力传感器校准装置实物图

图 1 力传感器校准装置



(a) HBM U9B 型力传感器

(b) Interface 1610 型力传感器

图 2 两款应变计式力传感器

感器。该传感器结构小巧,质量仅为 63 g,其测量膜片使用具有弹性的应变计。该型力传感器配有带球形端面的螺栓,应变计装在螺栓上部,使其既可用于测量压力,又可测拉力。出厂时,制造商标定的该型传感器的基本共振频率为 24 kHz。

如图 2(b)所示,为美国生产的 Interface 1610/2.2kN 型力传感器。该型传感器是具有超过 1.5 kg 的剪切梁的应变传感器,直径为 105 mm。相较于 HBM U9B/1kN 型力传感器,该型传感器具有更大的外形尺寸以及测量量程。

另外,通过本实验装置对其他型号的力传感器的实验,也侧面表明了传感器冲击响应会受到耦合共振的影响,这是由于与传感器固定的反应质量块上产生了振动。因此可以预测到,小型 HBM U9B 型力传感器及其薄螺纹螺栓连接到质量块上,也必然会出现类似的现象。

1.3 冲击力测量信号

首先通过使用硬金属质量块撞击传感器的头部,以激发传感器产生机械振动,进而形成脉冲信号。基于此原理,实验平台使用了重量为 10 kg 的撞击质量块进行实验,并将会产生持续时间约为 1 ms 的冲击脉冲信号。如图 3 所示,为通过实验平台测量得到的典型冲击力信号。所有信号均经过了 20 kHz 下的低通滤波处理。

如图 3(a)所示,为小型的 HBM U9B/1kN 型传感器测得的信号,它是非常平滑的脉冲,没有冲击后的信号振荡。

相反,如图 3(b)所示,为 Interface 1610/2.2kN 型传感器测得的脉冲响应信号,可以看出信号中具有叠加的振动和突出的信号振荡。从图中可以看出具有特定机械适应性的不同类型的传感器会有不同的响应。

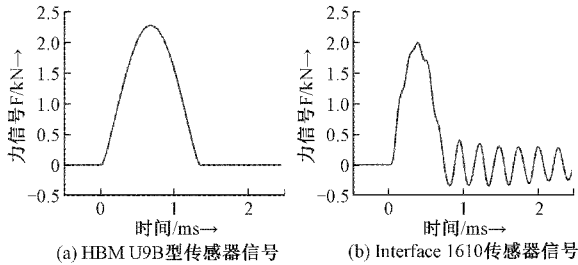


图 3 测量得到的冲击力脉冲信号

得益于 HBM U9B/1kN 型力传感器头部自带的螺栓结构,传感器可以由此加载质量不一的负载块。传感器通过添加额外的负载块,机械特征会发生相应的改变,在相同的外力条件下撞击传感器,得到的动态响应必然不同。

此外,通过研究 HBM U9B/1kN 型传感器对附加负载块的使用影响,能够分析是否可以将传感器的基本谐振频率偏移至实验装置的噪声分量之下的问题。

如图 4 所示,显示了安装负载块后的力传感器,两个不同质量的负载块分别通过螺纹杆固定在传感器上。如图 4(a)所示,头部质量增加 3.1 g,如图 4(b)所示,头部质量增加 7.0 g。

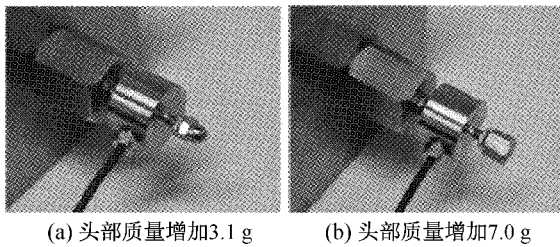


图 4 HBM U9B/1kN 型力传感器带有两个不同的附加负载质量

如图 5 所示,为 HBM U9B/1kN 型力传感器在安装 7.0 g 的负载块后,通过校准装置对其进行测试后的结果。图中显示出了测试过程中撞击质量块与反应质量块采集到的加速度信号 a_1 、 a_2 的变化曲线。

从图 5 中的加速度信号曲线可以看出,加速度信号中夹杂了由强烈冲击力激发产生的噪声,这些噪声可能源于质量块的模态振动(模态是结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以由计算或试验分析取得,这样一个计算或试验分析过程称为模态分析)。以上的测试信号若要用于随后的参数识别过程,就必须正确过滤这些高频噪声信号。图 5 中的信号已经经过了 20 kHz 截止频率的低通滤波器滤除,因为其已经低于该传感器预期的基本谐振,所以信号中的噪

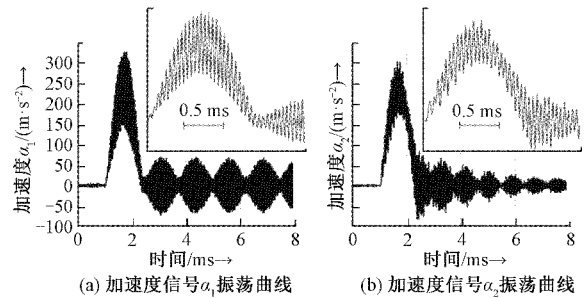
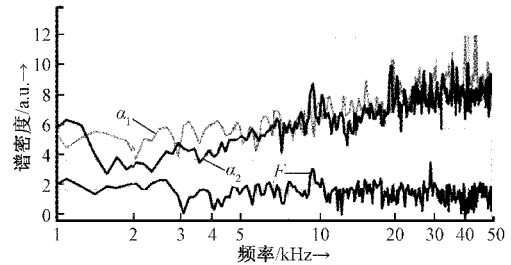


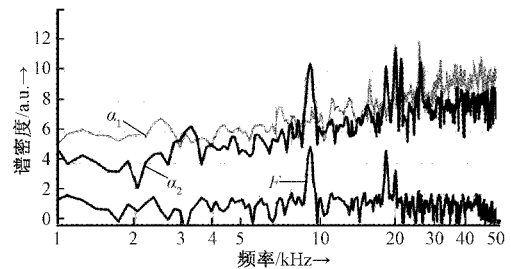
图 5 撞击质量块与反应质量块加速度信号 a_1 、 a_2 的冲击激励振荡曲线

声仍然非常大。由图 5(a)中曲线可以看出,冲击质量块 MB1 的加速度信号 a_1 表现出几乎无阻尼的振动,并带有叠加的拍频信号(beat signal);由图 5(b)中曲线可以看出,安装有传感器的反应质量块 MB2 的加速度信号 a_2 也表现出类似的性能,但明显阻尼更强。最后,每组实验都经过 3 次重复测量,证明了实验的可重复性非常好。

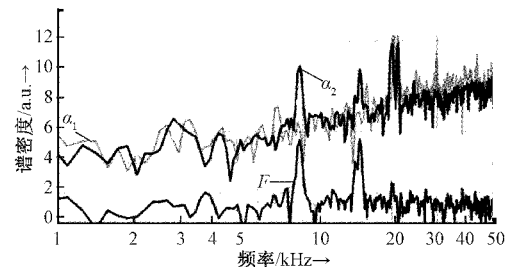
接下来又通过加载了不同质量负载块的 HBM U9B/1kN 型力传感器进行实验。如图 6 所示,显示了实验中 3 个采集的测量信号,这 3 个信号分别是两个质量体的加速度 a_1 和 a_2 以及传感器的输出信号 F 。



(a) 无负载情况下信号振荡的频谱分析



(b) 施加 3 g 负载情况下信号振荡的频谱分析



(c) 施加 7 g 负载情况下信号振荡的频谱分析

图 6 带有不同附加质量负载块的 HBM U9B/1kN 型力传感器的信号振荡的频谱分析

从图6可以看出针对3种负载块配置的传感器下的信号振荡的频谱成分:如图6(a)所示,在没有负载块时,力传感器表现出低于30 kHz的振荡。这可能是它的基本共振频率;如图6(b)及(c)所示,随着负载块重量的增加,信号峰值会明显向低频方向移动,并且可以观察到在大约9 kHz处出现的共振,其强度只是略微取决于负载。由于传感器壳体的质量和弹性,此处的共振可以被识别为第二轴向振动模式,其可能进一步受到基座处的非刚性机械耦合的影响。

由上文分析可知,随着传感器螺栓处负载块质量的增加,传感器的动态响应会发生改变,并随着冲击力的导入,传感器的基本共振频率将会有所降低。这一共振频率可以看作是传感器头部质量与其弹性耦合的函数(为了实现可重复的测试条件,所有机械耦合的螺纹连接在每种情况下都以规定的扭矩固定)。

如图7所示,为通过校准装置对Interface 1610/2.2kN型力传感器进行测试的结果, a_1 代表冲击质量块MB1的加速度信号, a_2 表示安装有传感器的反应质量块MB2的加速度信号, F 表示Interface 1610/2.2kN型力传感器测得的响应输出信号。从图7(d)的频谱分析可以看出,力 F 和加速度 a_2 信号在3.7 kHz、6.7 kHz处都显示出强烈的振动。在两个信号中的主要分量幅度相似的情况下,这种性能结果实际上不同于前面提到的较大质量传感器的特性。

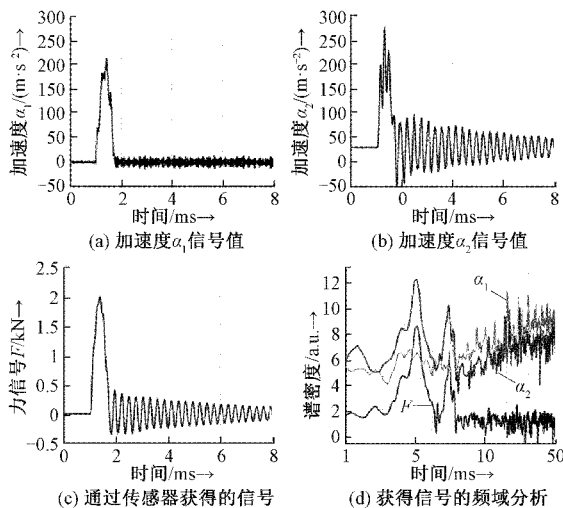


图7 使用Interface 1610/2.2kN型力传感器获得的时域和频域中的冲击信号(仅信号振荡)

2 力传感器的数学模型建立

2.1 力传感器的原始数学模型

除了前文提到的力传感器与试验装置之间的机械耦合因素之外,传感器本身结构形态也可能是影响其动态性能的重要因素之一。因此本文从更深层次分析了在动态测量

过程中力传感器的内部质量结构的运动(主要是各结构引起的惯性力)对其性能优劣的影响。

在数学建模中为了更形象地描述力传感器,将传感器的原始数学模型描述为由弹簧、质量块、阻尼元件等通过串联布置的系统。该系统由两个集中质量(基础质量、头部质量)组成,它们通过线性弹簧元件(刚度、阻尼)连接,具体的原始数学模型图例如图8所示。力传感器自身结构的位移可以由线性位移坐标描述,作用在传感器两侧的力由作用力和反作用力表示。假设力传感器的输出信号与测量弹簧的伸长率成比例。

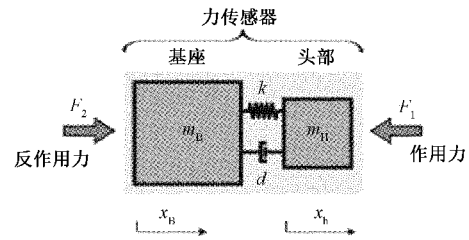


图8 力传感器地基本模型图例

假设传感器以无阻尼状态安装在实验装置基座上,当传感器受到动态冲击力激励时,机械系统以特征共振响应,如式(1)所示,给出了基本共振频率 f_{res} 与 m_H 和 k 的关系式。

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m_H} \quad (1)$$

对于一般的应用场合来说,该公式可以用于形容力传感器的动态适用性。但是,要想更深层次地了解力传感器的动态响应性能,仅仅靠这两个参数还不够,还需要知道4个模型参数: m_B 、 m_H 、 d 和 k 。

2.2 力传感器的优化数学模型

由于力传感器与基座之间存在非刚性耦合,会明显地影响着传感器的动态响应性能。因此,针对非刚性耦合影响力传感器动态性能的这个问题的,本小节对力传感器的原始数学模型(如2.1节所述)进行了优化,扩展了前文的原始模型,并将传感器与校准装置的机械结构进行了整合。优化后的数学模型依然采用线性串联布置,并采用一维多体方式进行数学建模,如图9所示。

本文基于力传感器原始模型提出了3种优化后的数学模型:模型2、模型3以及模型4。这3种优化模型在它们对传感器与反应质量块的机械适应性的描述上基本不同。

1) 模型2假设传感器与反应质量块之间是刚性固定的;

2) 模型3、4假设传感器与反应质量块之间弹性固定,且根据具体的机械结构,模型3将适配器重量分开并分配给相邻质量块,模型4将适配器重量集中且通过弹性结构与相邻质量块链接。

在每种情况下,假定所有环节的耦合均是刚性的。优化模型各组件的状态可由常微分方程组表示,方程组内的

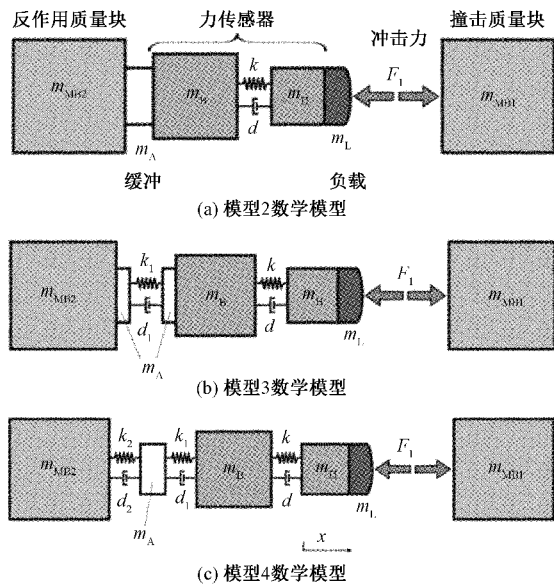


图 9 优化后的力传感器数学模型

方程是每个质量单元的力的平衡的结果^[19]。每个方程如式(2)所示。

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = L \quad (2)$$

其中, x, \dot{x}, \ddot{x} 是运动矢量(位移、速度、加速度), M, D 和 K 表示质量、阻尼和刚度的矩阵, L 表示载荷矢量。质量矩阵是对角线矩阵, 而阻尼和刚度矩阵是三对角线矩阵(主对角线和上下子对角线上为非零元素)^[20]。例如, 模型 4 的各个分量矩阵如式(3)~(7)所示。

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} + m_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{MB2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} k & -k & 0 & 0 \\ -k & k + k_1 & -k_1 & 0 \\ 0 & -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D = \begin{bmatrix} d & -d & 0 & 0 \\ -d & d + d_1 & -d_1 & 0 \\ 0 & -d_1 & d_1 + d_2 & -d_2 \\ 0 & 0 & -d_2 & d_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$x = [x_H, x_B, x_A, x_{MB2}]^T \quad (6)$$

$$L = [F_1, 0, 0, 0]^T \quad (7)$$

描述模型 4 的方程组由 4 个方程组成, 因为冲击接触, 即冲击质量块 MB1 和力传感器(模型质量 $m_{11} + m_L$)之间的耦合不能由弹性耦合元件表示, 二者之间需要通过测量到的冲击力 F_1 来表示。

与力传感器的基本模型不同, 融入冲击校准装置后的新模型用常微分方程组计算得到的相应惯性力代替反作用力 F_2 , 其中用反应质量块 MB2 的位移作为输入量。

在实际标定前可以测量数学模型中的一些参数, 例如两个质量块的质量和自适应部分, 但其余的参数, 特别是关于力传感器内部的各参数等, 则必须通过从测量得到的动态校准实验的数据推算出来。

3 力传感器动态参数识别

通过力传感器校准装置可以获取的数据有: 两个质量块的位移 X_{MB1}, X_{MB2} 、力传感器的输出信号 F 。通过低通滤波处理后可以得到质量块 MB1、MB2 的加速度数据 a_1, a_2 。然后通过使用加速度 a_1 计算得到冲击力 F_1 。为了清晰描述在冲击力瞬间接触传感器时的变化情况, 采用时间窗来抑制冲击后信号分量。如式(8)所示, 传感器输出信号 F 和反应质量块在时刻 t_0, \dots, t_N 的加速度 a_2 可以描述为:

$$y(t_n) = [F(t_n), a_2(t_n)]^T, n = 0, \dots, N \quad (8)$$

假设测量噪声符合正态分布的特征, 通过在时域中采用非线性最小二乘法对所有参数进行最大似然估计。因此, 式(2)所描述的微分方程的数值积分方法与 Nelder-Mead 非线性单纯形法一起用于优化计算。这种优化方法的好处是它不需要计算导数^[21]。如式(9)所示, 优化函数如下:

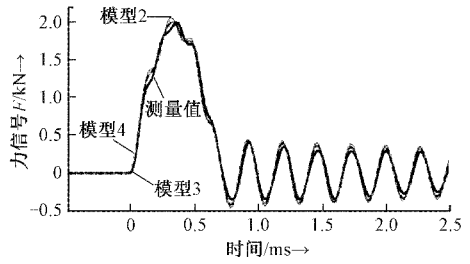
$$G(\theta) = \|y - S(x(t_0), \theta, F_1)\|^2 \quad (9)$$

其中, $\|\cdot\|$ 是欧几里德范数, θ 是需要求解的刚度和阻尼参数的矢量, y 是测量得到的数据, $x(t_0)$ 为微分方程组的初始值。在该方法中, 假设所有模型组件的质量值是已知的。设计函数 $S(\cdot)$ 表示代表模型的微分方程组的数值积分和所得输出数据的计算。如式(10)所示, 对于模型 4, $S(\cdot)$ 计算如下:

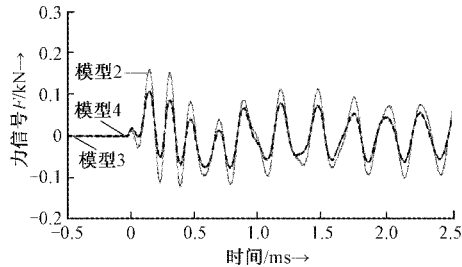
$$S(x(t_0), \theta, F_1) = \begin{bmatrix} k(x_H - x_B) \\ -(k_2(x_{MB2} - x_A) + d_2(\dot{x}_{MB2} - \dot{x}_A))/m_{MB2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于方程组的积分是函数 $S(\cdot)$ 计算的一部分, 导数的计算将是一项繁琐的任务。为了获得足够精确的有限差分来进行基于导数的数值优化, 所以对方程组的积分需要非常高的精度。为此, 采用无导数的 Nelder-Mead 单纯形法进行参数估计。

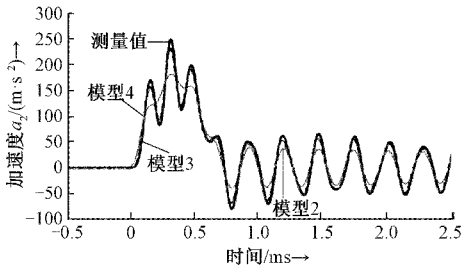
基于 Interface 1610/2.2kN 型力传感器的动态参数识别结果如图 10 所示。用截止频率为 12 kHz 的四阶巴特沃斯低通滤波器对位移数据计算加速度时的噪声进行了过滤。通过利用每个模型估计的模型参数, 函数 $S(\cdot)$ 的两个元素(力 F 、加速度 \ddot{x}_{MB2})的计算轨迹在图 10 中显示, 并与相应的测量数据进行对比。为了更清楚进行数据分析对比, 图 10 还额外显示出了拟合残差的变化曲线。从图中可以明显看出: 1) 模型 2 产生了相当大的偏差, 特别是在加速度 a_2 的变化曲线中; 2) 相较模型 2、模型 3 和模型 4 都显示出小得多的偏差, 这表明传感器与反应质量块的耦合不能被认为是完全刚性的; 3) 模型 3 与模型 4 的变化曲线几乎吻合, 原因之一是由于两种模型都具有几乎相同的拟合质量。



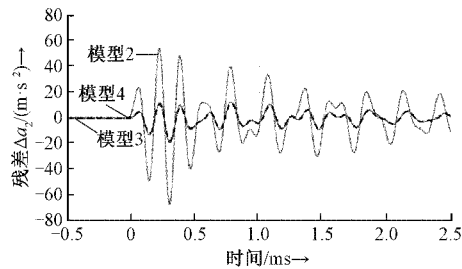
(a) 传感器力信号测量值与各模型下的力信号模拟曲线



(b) 3种模型力信号模拟值与实际测量值的残差曲线



(c) 传感器加速度测量值与各模型下的加速度信号模拟曲线



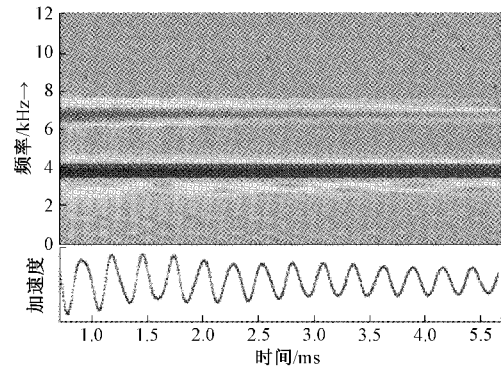
(d) 3种模型加速度信号模拟值与实际测量值的残差曲线

图10 Interface 1610型传感器的模拟值与实际测量值对比

由于两种模型都具有几乎相同的拟合质量,因此所选择的模型3足以描述系统的行为(对于模型3,适配器的质量完全分配到反应质量块,适配器与反应质量块MB2的耦合比传感器更具有刚性)。

接下来,对这种模型进行一次验证。由图7(通过力传感器校准装置对Interface 1610/2.2kN型力传感器进行测试的结果)可以看出,传感器输出信号力 F 和撞击质量块MB1的加速度信号 a_z 分别在3.7 kHz与6.7 kHz处均显示出强烈的波峰。然后,基于模型3的获取的数据,对主脉冲之后的加速度值进行短时DFT(离散傅里叶变换)分析。分析结果如图11所示,该图显示了颜色编码的加速度幅值随时间的变化情况,进一步与图7得到的结果相印证。

如表1所示,列出了Interface 1610/2.2kN型力传感

图11 对基于模型3获得的加速度信号 a_z 的短时DFT分析

器在分别使用模型2、3、4时,在分析一个冲击脉冲时解算得到的传感器各动态参数值。

表1 基于3种不同模型下的力传感器的模型参数列表

参数	单位	模型2	模型3	模型4
k	10^6 N/m	166	187	186
d	kg/s	109	154	154
k_1	10^6 N/m	—	1 743	2 867
d_1	kg/s	—	539	154
k_2	10^6 N/m	—	—	4 680
d_2	kg/s	—	—	1.12

如式(11)所示,为 f_{res} 在忽略阻尼的情况下计算公式,得到基于不同模型下的力传感器的共振频率如表2所示。

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{eig(M^{-1}K)} \quad (11)$$

表2 基于不同模型下的传感器共振频率

共振频率	单位	模型2	模型3	模型4
f_{res}	kHz	3.687	3.687	3.687
$f_{res,1}$	kHz	—	6.695	6.694
$f_{res,2}$	kHz	—	—	35.62

由于各模型组件之间的耦合刚度是传感器测量弹簧的近10倍。所有3种模型都能在约3.7 kHz附近位置处出现低频共振。且由表2可以看出,模型4的附加共振远远超出所考虑的频率范围,这进一步表明了模型4的建模结构的缺陷与不足。

最后,本文通过试验装置对Interface 1610/2.2kN型力传感器进行了约2 kN峰值的27次重复冲击测试。并且基于模型3解算出刚度 k 、阻尼 d 、耦合刚度 k_1 、耦合阻尼 d_1 等传感器参数值。如图12所示,为27次重复实验结果的分析对比。

由图12可以看出,传感器在基于模型3下解算出的各动态参数的相对标准偏差非常小,特别是刚度参数的偏差;阻尼参数变化较大,可能是由于它们对冲击力校准装置的

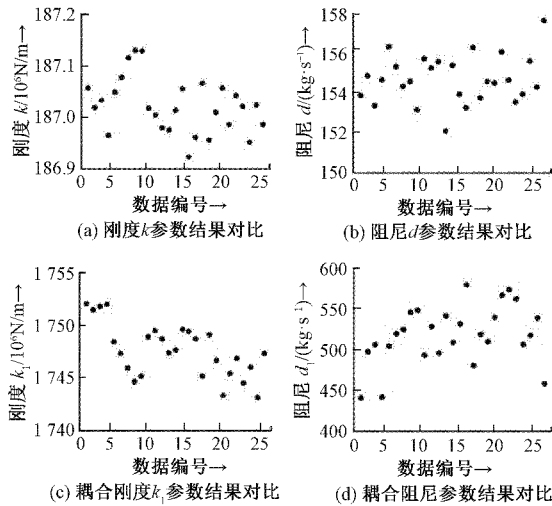


图 12 对力传感器进行 27 次重复冲击试验的参数结果对比

动态行为的影响相对较小的缘故,因此在基于模型 3 的动态参数识别过程中不太敏感。

4 结 论

本文基于两种型号的力传感器,通过冲击激励方式对基于数学模型的力传感器的动态响应性能进行了研究。基于研究过程中发现的力传感器与试验装置基座之间存在非刚性耦合影响传感器动态响应性能的问题,本文列出了 3 种优化后的传感器数学模型。然后通过测试过程中得到的实验数据对这 3 种模型进行了分析对比,并判定模型 3 最为符合传感器的动态响应特征。最后本文通过试验装置,对 Interface 1610/2.2kN 型力传感器进行了 27 次重复冲击试验,结合模型 3 共同解算出了该型力传感器的各项动态特征参数并进行了分析对比。结果也再次表明了模型 3 的有效性。这些特征参数定义了力传感器在给定的动态环境中的动态性能,对提高传感器的动态响应能力非常关键。

在后续的深入研究中,将着重研究在参数识别过程受到的诸多干扰因素,以及本文所提出的“通过数学建模参数识别来确定传感器动态特征”的方法在其他类型的力传感器中的适用性。

参考文献

- [1] 王志军,姚建涛,叶东,等. 双层预紧式六维力传感器动态性能的理论及实验研究[J]. 燕山大学学报, 2012, 36(4): 304-309.
- [2] 金冉,吕朝,陈伟,等. 应变传感器动态特征激光绝对法冲击校准装置[J]. 宇航计测技术, 2021, 41(3): 38-42.
- [3] 谷恒. 应变式力传感器交/直流激励测量方法研究与系统研制[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- [4] 卢小彝,李政,李何良,等. 力传感器绝对法脉冲力校准的研究与试验[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(8): 14-19.
- [5] 周宁. 关于传感器动态校准技术研究的探讨[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 119-123.

- [6] 东方,焦洋,安少华,等. 基于电液伺服技术的动态力校准装置的研制[J]. 计测技术, 2016, 36(S1): 175-176.
- [7] 商佳尚,王宇. 动态力校准中需要规范的若干问题[J]. 计测技术, 2014, 34(2): 1-5, 10.
- [8] PRILEPKO M Y. Calibration and validation of dynamic force transducers [J]. Measurement Techniques, 2017, 60(7): 691-695.
- [9] NOZATO H, OTA A, KOKUYAMA W, et al. An enhanced primary shock calibration procedure to reduce the zero shift effect of piezoelectric transducers by using a virtual amplifier[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(9): 095007.
- [10] 张力. 激光干涉法进行正弦力校准研究[J]. 计量学报, 2005(4): 337-342.
- [11] 朱中华,丁建宁. 传感器动态性能的研究进展[J]. 机械与电子, 2008(6): 75-78.
- [12] KOBUSCH M. The 250 kN primary shock force calibration device at PTB [J]. Measurement, 2013, 46(5): 1757-1761.
- [13] 尹肖,张力,王宇,等. 动态力校准中力传感器端部等效质量测量方法研究[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 50-53.
- [14] 李玺. 加速度传感器微秒级窄脉冲校准系统的研究[D]. 太原:中北大学, 2015.
- [15] FENG M, ZHIMIN Z, YUE Z, et al. Dynamic force calibration by impact excitation [C]. EPJ Web of Conferences, EDP Sciences, 2014, 77: 00008.
- [16] JAIN S K, KUMAR H, TITUS S S K, et al. Metrological characterization of the new 1 MN force standard machine of NPL India [J]. Measurement, 2012, 45(3): 590-596.
- [17] 张伟. 基于 LabVIEW 的应变式力传感器动态特征及动态测量平台的研究[D]. 北京:中国计量科学研究院, 2010.
- [18] 张灿. 附加质量对力传感器的动态性能影响研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(7): 5-9.
- [19] 江文松,尹肖,李泓洋,等. 基于参数辨识的力传感器动态校准方法[J]. 计量学报, 2021, 42(5): 603-608.
- [20] 张国庆. 多体系统动力学的算法研究现状及应用[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2010, 26(1): 74-76.
- [21] 张淑芬,梁斌. 构造多自由度无阻尼系统微分方程的一种方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2004(3): 87-91.

作者简介

郭致港, 硕士研究生, 主要研究方向为电路与系统、动态测试技术。

E-mail: 2633568721@qq.com

焦新泉, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为微纳器件及测试技术。

E-mail: jiaoxinquan@nuc.edu.cn

贾兴中, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电路与系统。

E-mail: 18636687318@163.com