

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.20

冲击加速度传感器频域校准技术研究

曹亦庆

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为获得更为真实的传感器频响特性, 利用激光干涉仪对传感器进行动态校准, 在传感器输入和输出数据的基础上, 确定系统模型结构、阶次, 基于输出误差模型, 采用系统辨识实验法, 辨识传感器模型的各项参数, 从而建立被校冲击加速度传感器的数学等价模型, 进而将模型方程转换为传递函数, 并绘制出传感器的幅频、相频特性曲线, 最终实现被校传感器的冲击频域校准。

关键词: 幅频曲线; 工作频率系统辨识; 频域校准

中图分类号: TB936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0139-05

Research on Frequency Domain Calibration Technology of Impact Acceleration Sensors

CAO Yiqing

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to obtain more realistic frequency response characteristics of the sensors, the laser interferometer is used to dynamically calibrate the sensors. Based on the input and output data of the sensors, the structure and order of the system model are determined. Based on the output error model, the system identification experiment method is adopted to identify the parameters of the sensor model, so as to establish the mathematical equivalent model of the calibrated impact acceleration sensors. Then the model equation is converted into the transfer function, and the amplitude-frequency and phase-frequency characteristic curves of the sensors are plotted. Finally, the impact frequency domain calibration of the calibrated sensor is realized.

Key words: amplitude-frequency curves; working frequency; system identification; frequency domain calibration

0 引言

机械冲击运动是一种运动参数强度随时间快速变化的现象。机械冲击运动参数作为被测量, 其幅值会随时间按照非线性速率连续变化。用于测量机械冲击运动的冲击加速度传感器, 在其工作加速度幅值和频率范围内应具有单一的灵敏度幅值。然而实际测量过程中, 传感器结构, 预紧弹簧、惯性质量、敏感元件、连接件、基座等元件的尺寸、材料等因素, 都会影响传感器的灵敏度幅值, 传感器灵敏度在不同测量幅值和测量频率下呈现一定的波动。因此测量过程中被测量冲击参数随时间连续变化的动态特征趋势会显著影响传感器产生灵敏度波动, 从而导致测量结果动态失真。

用于测量加速度运动参数的传感器的动态校准主要包括时域峰值灵敏度及频率响应校准, 分别用于确定传感器灵敏度随被测量幅值和频率变化的趋势。其中时域峰值灵敏度校准基本覆盖国防军工领域的传感器应用范围 0.1 ~ 200000 g; 而频率响应校准是采用振

动连续扫描法、逐点法或随机激励法, 在系统结构难以确定的情况下, 分别测量各个频率下传感器输入激励和输出信号的振幅和相角值并比较。因采用振动激励方式, 其最大量级难以超过 1000 g, 无法满足高量级加速度测量的溯源需求。为此中国、日本、美国、德国等国的计量技术研究机构先后开展冲击激励信号下传感器的频域校准技术研究, 其中大部分是基于加速度传感器简化的二阶微分方程, 通过振动或冲击激励信号实施动态测量, 从而对方程进行参数辨识, 获取传感器的频率响应曲线。事实上, 在大多数情况下, 加速度传感器的数学模型不是典型的二阶系统, 而是一种高阶系统, 因此通过简化二阶系统获得传感器动态特性具有一定的失真性, 当传感器处于复杂的力学环境中应用时, 动态测量误差随安装结构、测量范围的不同而不同。

为了获得更为真实的传感器固有频响特性, 本文基于现代控制理论中系统辨识实验法, 对冲击加速度传感器进行实验法建模: 即把冲击加速度传感器作为

系统进行辨识，从一组给定的模型类中，在输入和输出数据的基础上，确定一个与所测系统等价的高阶模型，并依据建立的等价数学模型计算传感器的频率响应。^[1-3]

1 总体技术方案

先对冲击加速度传感器进行动态测量，利用激光干涉仪对传感器的输入激励时域信号进行复现，同步采集被校加速度传感器的输入和输出时域数据，通过确定系统模型结构，系统模型的阶次，利用选定的系统辨识方法，辨识系统模型的各项参数，从而建立被校冲击加速度传感器的数学等价模型，进而将模型方程转换为传递函数，并绘制出传感器的幅频、相频特性曲线，最终实现被校传感器的冲击频域校准^[4]。

由于采用激光干涉仪复现冲击加速度运动信号，需对干涉仪输出的速度信号，经过微分处理获得加速度输入激励信号。在校准过程中，电缆噪声、各部件碰撞过程中的应力干扰波、环境噪声、数据处理算法引入的数据噪声等多种干扰都会叠加在被校传感器的输出信号之上，因此在传感器系统模型辨识过程中需对采集、微分后数据进行降低高频噪声，去除直流偏置及低频干扰趋势项等数据预处理，尽可能降低干扰信号对建模效果的不良影响，提高建模的辨识精度^[5-6]。

冲击加速度传感器频域校准的工作流程如图 1 所示。

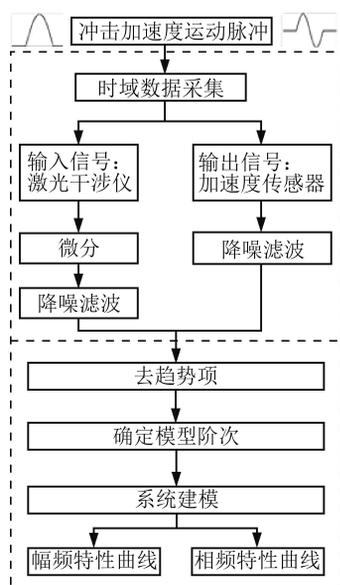


图 1 频域校准工作流程图

2 激励信号

冲击加速度发生装置作为冲击频域校准技术研究

中的被校传感器运动激励装置，为频域校准提供最优的运动信号类型，需要考虑以下的技术要求：

1) 系统辨识方法对信号类型的数学技术要求

冲击加速度发生装置用于对冲击加速度传感器施加适当的输入信号，以供后续的传感器辨识建模。选择合理的传感器输入信号是获得好的传感器辨识结果的关键之一。为了使传感器的频域特性可辨识，其产生的输入运动信号必须满足：①在辨识时间内被校传感器的动态特性能够被输入运动信号持续激励。即在信号采集时间内，输入运动信号能够充分激励被校传感器所关心频率范围内的灵敏度幅值变化，输入运动信号的频谱能够覆盖传感器校准频率范围。②输入运动信号的最优选择。基于 Fisher 信息矩阵相关指标函数最小的准则，能够使系统辨识效果最优的输入运动信号应具有近似的脉冲式自相关函数，如白噪声信号、M 序列信号或脉冲信号^[4]。

2) 被校加速度传感器校准的工程技术要求

参照 JJG 233 - 2008《压电加速度计检定规程》的规定，加速度传感器在其工作频率范围内，灵敏度的变化最大不应超过 ± 10%；加速度传感器灵敏度幅值线性度不应超过 10%。因此对冲击加速度传感器的频域校准，其输入运动信号应可以覆盖被校传感器的工作加速度幅值和频率范围。依据以上技术要求，冲击加速度发生装置产生的冲击加速度运动信号应具有：①近似脉冲式自相关函数；②能够实现可调、连续、较宽的加速度幅值及频率覆盖范围。

常见具有近似脉冲式自相关函数的信号有白噪声信号、M 序列信号或脉冲信号。其中白噪声和 M 序列信号，工程上难以实现其准确的信号特征，同时很难覆盖上千 g 以上的加速度幅值；选择以脉冲信号作为发生装置的运动信号类型开展发生装置的研制，可以实现高达 10 kHz，覆盖上万 g 的冲击加速度运动信号。

为了实现脉冲信号类型的机械冲击运动，冲击加速度发生装置的工作原理可基于碰撞原理和弹性应力波传播原理。

1) 基于碰撞原理，产生近似半正弦的冲击加速度运动脉冲。工程中当碰撞通过弹性体发生于两个刚体之间，碰撞过程基本满足动量守恒，因弹性体变形较大，碰撞过程持续时间增长，同时碰撞产生的加速度脉冲信号峰值降低。当选用的弹性体在碰撞过程中表现为高弹性和变形非线性时，基于碰撞原理产生的速度变化波形如图 2 所示。

因此产生的加速度运动脉冲则为近似对称的半正

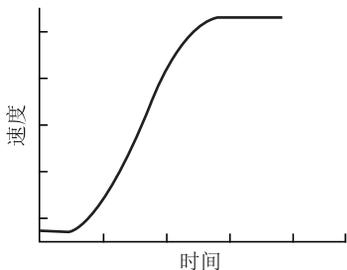


图2 碰撞过程中的速度变化量

弦波形。基于碰撞原理的冲击加速度发生装置，对加速度峰值和脉冲持续时间的调节，主要通过调节碰撞前速度、弹性体变形量、碰撞物体质量等实现^[7]。

2) 基于弹性应力波传播原理，产生近似正弦的冲击加速度运动脉冲。主要为一维弹性应力波在细长杆中的传播，当细长杆材料、直径均匀，杆中所受应力不超过材料的极限。则杆的一端被撞击后，有一确定压力作用在杆的端部，形成一个压力脉冲沿着杆传播，传递至另一个端面后，一部分透射出端面形成一个压缩脉冲；另一部分沿杆反射回来，形成拉伸脉冲。基于此原理在细长杆端面产生的冲击加速度运动为近似正弦波形。基于一维弹性应力波在细长杆中传播的冲击加速度发生器，主要通过调节碰撞压力、杆的长径比等实现加速度峰值和脉冲持续时间的调节^[8]。

3 建模方法

应用的建模方法是参数模型辨识方法，也称为现代辨识方法，需假定一种模型结构，通过极小化模型与过程之间的误差准则函数来确定模型的参数。建模方法流程为：确定系统模型结构、模型的阶次，辨识模型参数，建立其数学模型，进而获得其频响函数^[1-2]。

3.1 确定模型结构

冲击加速度传感器由敏感元件、质量块、弹簧和基座等组成，传感器与被测运动物体刚性连接在一起，承受相同的加速运动。目前多把冲击加速度传感器系统作为二阶线性定常系统进行校准，当考虑加速度传感器外壳、敏感元件、质量块各自的阻尼和弹性模量，以及连接在一起后的耦合影响，加速度传感器实际应用过程中，更多地是表现为高阶系统。因此对传感器的等效模型考虑以高阶微分方程进行等价更为真实，在进行数字化分析时，则以三阶或更高阶的差分方程进行等效辨识^[9-10]。

将待辨识的冲击加速度传感器看作“黑箱”，考虑测量过程存在各种噪声，模型线性化和其它近似假定所引起的误差，以及输入输出量的测量误差等，这些

干扰因素具有随机量的性质，被称为数学模型中的“噪声”。因此在加速度传感器的数学模型中需要考虑这些随机噪声，即在确定性模型的基础上以叠加方式考虑噪声的影响。为了获取无偏一致的参数估计值，在模型中加入白噪声或有色噪声，构建出输出误差(OE)模型^[1-3]为

$$z(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k) + v(k) \quad (1)$$

式中： $z(k)$ 为系统输出； $u(k)$ 为系统输入； $v(k)$ 为噪声；

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}; B(z^{-1}) = \sum_{j=0}^n b_j z^{-j}; n \text{ 为模型阶次。}$$

3.2 模型阶次

模型阶次是在获得模型参数估计值之后，求得模型的残差，借助统计假设检验的方法对残差的方差进行显著性检验来确定。因此定义相应的误差平方和准则函数 $J(n)$ 的变化为

$$J(n) = \sum_{k=1}^L f\{\varepsilon(\theta_n, k)\} = \sum_{k=1}^L \varepsilon^2(\theta_n, k) \quad (2)$$

由一组输入输出观测数据 $\{u(k), z(k) (k = 1, \dots, L)\}$ ，用同一种辨识准则，依次辨识不同阶 n 的模型参数 $\theta_n = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]$ ，并计算 $J(n)$ 。可以发现增加模型阶数 n ， $J(n)$ 会随之减小，但过于高阶的模型为使用增添了复杂性，因此模型阶次在适当情况下尽可能选择较低的阶次。由于参数估计的最小二乘准则是极小化损失函数要求，适宜阶次 n_0 检验的原则是：在 $n = n_0 - 1$ 时， $J(n)$ 最后一次出现陡峭的下降，此后 $J(n)$ 就近似保持不变或微小的变化，如图3所示。^[1-3]

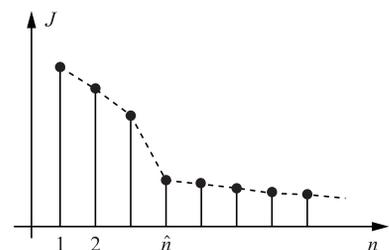


图3 损失函数 $J(n)$ 方法应用示意图

为了自动客观地评定 $J(n)$ 的变化模型阶次，则利用对数定义似然函数 $\log L$

$$\log L(n, \theta) = -\frac{L}{2} \log J(n) + C \quad (3)$$

式中： L 为数据长度； C 为表示常数。

选择 AIC 准则法作为模型阶次的检验方法，使 AIC 最小的阶次则为可取的模型阶次。^[1-3] 公式为

$$AIC(n) = -2 \log L(n, \theta) + 2p \quad (4)$$

式中： p 为模型中参数的数目。

3.3 建模

针对输出误差模型,因无法明确模型中噪声类型,利用辅助变量法,可在不需要噪声模型具体的结构形式,即可获得系统模型参数的无偏一致估计。算法原理为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n]^T \\ \mathbf{h}(k) = [-z(k-1), -z(k-2), \dots, \\ -z(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)]^T \\ \mathbf{z}_L = [z(1), z(2), \dots, z(L)]^T \\ \mathbf{e}_L = [e(1), e(2), \dots, e(L)]^T \\ \mathbf{H}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{h}^T(1) \\ \mathbf{h}^T(2) \\ \dots \\ \mathbf{h}^T(L) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

则模型为

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (6)$$

$$\mathbf{z}_L = \mathbf{H}_L\boldsymbol{\theta} + \mathbf{e}_L \quad (7)$$

参数的最小二乘估计公式为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS} = (\mathbf{H}_L^T\mathbf{H}_L)^{-1}\mathbf{H}_L^T\mathbf{z}_L = \boldsymbol{\theta}_0 + \left(\frac{1}{L}\mathbf{H}_L^T\mathbf{H}_L\right)^{-1}\left(\frac{1}{L}\mathbf{H}_L^T\mathbf{e}_L\right) \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} \frac{1}{L}\mathbf{H}_L^T\mathbf{H}_L = \frac{1}{L}\sum_{k=1}^L h(k)\mathbf{h}^T(k) \xrightarrow{L \rightarrow \infty} E\{h(k)\mathbf{h}^T(k)\} \\ \frac{1}{L}\mathbf{H}_L^T\mathbf{e} = \frac{1}{L}\sum_{k=1}^L h(k)e(k) \xrightarrow{L \rightarrow \infty} E\{h(k)e(k)\} \end{cases} \quad (9)$$

如果 $e(k)$ 是白噪声,则 $E\{h(k)e(k)\} = 0$,那么参数的估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS}$ 是 $\boldsymbol{\theta}$ 的无偏估计^[2]

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS} \xrightarrow{L \rightarrow \infty} \boldsymbol{\theta} \quad (10)$$

当 $e(k)$ 不是白噪声,则 $E\{h(k)e(k)\} \neq 0$,那么参数的估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS}$ 不是 $\boldsymbol{\theta}$ 的无偏估计。因此定义一个辅

助矩阵^[2]

$$\mathbf{H}_L^* = \begin{bmatrix} \mathbf{h}^{*T}(1) \\ \mathbf{h}^{*T}(2) \\ \dots \\ \mathbf{h}^{*T}(L) \end{bmatrix} \quad (11)$$

使之满足 $\frac{1}{L}\mathbf{H}_L^{*T}\mathbf{H}_L \xrightarrow{L \rightarrow \infty} E\{h^*(k)\mathbf{h}^T(k)\}$ 是非奇异阵; $\frac{1}{L}\mathbf{H}_L^{*T}\mathbf{e}_L \xrightarrow{L \rightarrow \infty} E\{h^*(k)e(k)\} = 0$, 则

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}_{IV}^* &= (\mathbf{H}_L^{*T}\mathbf{H}_L)^{-1}\mathbf{H}_L^{*T}\mathbf{z}_L = \boldsymbol{\theta}_0 + (\mathbf{H}_L^{*T}\mathbf{H}_L)^{-1}\left(\frac{1}{L}\mathbf{H}_L^{*T}\mathbf{e}_L\right) \\ &\xrightarrow{L \rightarrow \infty} \boldsymbol{\theta}_0 + E\{h^*(k)\mathbf{h}^T(k)\}^{-1}E\{h^*(k)e(k)\} = \boldsymbol{\theta}_0 \end{aligned} \quad (12)$$

则参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{IV}^*$ 为辅助变量参数估计值,只要适当选择,则参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_{IV}^*$ 可是 $\boldsymbol{\theta}$ 的无偏估计。

把辅助模型看出自适应滤波器时,通过选择如下的辅助变量,则可在有色噪声下也能够获得一致无偏估计,参数估计值与噪声基本无关^[2]。

$$\mathbf{h}^*(\mathbf{k}) = [-x(k-1), \dots, -x(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)]^T \quad (13)$$

$$x(k) = \mathbf{h}^{*T}(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) \quad (14)$$

4 试验验证

采用本文介绍的方法在研制的校准装置上测得标准冲击加速度传感器在不同频率点的灵敏度幅值,将其与国防最高振动标准装置相同频率点测量的传感器灵敏度幅值比较,得到灵敏度幅值误差最大为 -0.23 dB;并对本文研制校准装置和国防最高振动标准装置测得相同频率点下的传感器灵敏度幅值采用 E_n 值进行比对,比对结果为满意。如表 1 所示。

表 1 相同频率点下的灵敏度幅值误差及 E_n

频率/Hz	国防最高振动标准装置		研制的校准装置		灵敏度幅值 误差/%	灵敏度幅 值差/dB	E_n
	灵敏度幅值/($\mu\text{C} \cdot \text{g}^{-1}$)	不确定度/%	灵敏度幅值/($\mu\text{C} \cdot \text{g}^{-1}$)	不确定度/%			
1	2.143	1.0	2.134	3.4	-0.42	-0.04	0.12
80	2.144	1.0	2.134	3.4	-0.47	-0.04	0.13
160	2.148	0.5	2.134	3.4	-0.65	-0.06	0.19
1000	2.141	1.0	2.135	3.4	-0.28	-0.02	0.08
5000	2.158	1.5	2.160	3.4	0.09	0.01	0.02
10000	2.240	2.0	2.239	3.4	-0.04	0.00	0.01
12000	2.301	2.5	2.286	3.4	-0.65	-0.06	0.16
16000	2.442	2.5	2.404	3.4	-1.56	-0.14	0.37
20000	2.593	3.0	2.571	3.4	-0.85	-0.07	0.19

由试验数据可知, 本文对标准冲击加速度传感器校准获得其工作频率范围内的幅频曲线, 该传感器经国防振动最高标准计量符合标准加速度计的要求, 因此基于本文研制校准装置的幅频曲线与国防最高振动标准装置获得的幅频曲线, 通过比较不同频率点的灵敏度的误差和 E_n 值, 验证研制校准装置频域校准技术指标。

5 结论

本文研究成果为基于冲击加速度激励信号的冲击法传感器频域校准技术, 具有以下特点:

1) 通过基于冲击加速度激励的传感器频域校准技术研究, 将频域校准覆盖的加速度范围从 1000 g(振动法) 扩展至 15000 g(冲击法), 使其能够激发被校加速度传感器整个工作范围内的输出特征及相关信息, 基本覆盖目前国防领域常规冲击加速度测量范围, 完善加速度传感器溯源链。

2) 基于冲击加速度激励进行传感器建模方法的研究, 建立了更符合传感器真实测量状态的多阶数学模型, 相比以往简化的二阶模型, 更为真实反映传感器使用过程中的动态测量特性, 为传感器动态测量补偿提供了有力依据。

参 考 文 献

- [1] 杨承志. 系统辨识与自适应控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
[2] 方崇智. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

- [3] 萧德云. 系统辨识理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
[4] 李玲玲. 高 g 值加速度传感器及测试系统动态建模方法[D]. 太原: 中北大学, 2016.
[5] 沈文. 关于冲击信号的数字处理方法研究[J]. 计测技术, 1999, 19(02): 19-22.
[6] 胡红波, 于梅. 基于高冲击激励的加速度计参数辨识的研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(04): 487-491.
[7] 梁志国, 李新良, 孙璟宇, 等. 激光干涉法一次冲击加速度计动态特性校准[J]. 测试技术学报, 2004, 18(02): 133-138.
[8] 徐晓梅, 化文生, 连大鸿, 等. 差动式激光多普勒技术在冲击校准测试中的应用[J]. 航空计测技术, 2000, 20(01): 12-13.
[9] 张于北, 梁志国. 模型和思想指导下的加速度传感器动态校准技术[J]. 测试技术学报, 1996, 16: 354-356.
[10] 张洁文, 秦敏, 刘科, 等. 冲击传感器不同安装方式对校准结果的影响分析[J]. 计测技术, 2016, 36(01): 46-49.

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2016205A006)

作者简介

曹亦庆(1974-), 女, 江苏徐州人, 高级工程师, 主要研究方向为冲击加速度校准, 参与冲击加速度、冲击力国防最高标准的研制工作, 参与建立冲击加速度、冲击力国防最高标准。

