

小量程 S 型力传感器的动态性能验证及优化研究

□肖尧^{1,2} 陈章位² 陈俭¹ 王萧博¹ 曾利民¹ 马丙辉¹

(1. 浙江省计量科学研究院 2. 浙江大学机械工程学院)

【摘要】小量程S型力传感器因其在微重量物体测量领域的广泛应用，对其动态性能的深入验证成为当前研究的重要方向。本文通过正弦法力传感器动态校准方法，评估小量程S型力传感器在动态工作环境下的响应特性。通过试验结果的分析，提出了可行的性能优化建议。

【关键词】力传感器；正弦法

文献标识码：B 文章编号：1003-1870 (2024) 01-0022-05

引言

传统的静态力传感器的设计主要关注在静止条件下的稳定性和精度，然而，实际工业应用中，物体的运动性质使得对动态性能的关注愈发迫切，尤其是在军工装备研究、医疗设备等领域，对微小物体的质量进行准确测量至关重要。这些应用场景往往伴随着动态和快速变化的负荷条件，因此，传感器动态性能的提高，才能确保其在快速变化的负荷条件下保持高精度和可靠性。小量程S型力传感器由于其特殊的结构和设计，在静态条件下表现出色。然而，在动态工作环境中，其性能的稳定性和可靠性，尚需进行试验验证。

本研究通过设计合理的试验方案并运用高精度的检定装置，对小量程S型力传感器的动态性能进行验证，以了解其在动态环境下的工作特性。本研究的结果有望为小型S型力传感器在动态测量领域的应用提供可靠的使用条件和结构设计建议。

1 力传感器动态校准方法

力传感器的动态校准方法可以根据激励信号、校准原理和试验条件的不同进行分类。在动态力计量领域，可根据激励信号源（即对传感器施加负荷的

种类分为正弦力、冲击力及阶跃力），其中正弦力和冲击力已颁布相应的校准规范和国家标准。

根据JJF1370-2012《正弦法力传感器动态特性校准规范》，正弦法通过标准振动台给传感器施加正弦形式的外部激励信号，全面评估传感器在不同频率下幅值灵敏度和相位延迟。

根据GB/T 37776-2019《动态力传感器校准方法 冲击力法校准》，冲击法通过施加突然的冲击负荷，评估传感器在瞬时负荷下冲击力灵敏度。

一般S型力传感器均为应变式传感器，且小量程的S型力传感器需要较高的灵敏度，故其刚度一般较小，因此，可推断此类传感器在动态力作用下频率相应不会很高。冲击法校准由于瞬时激励，无法精确给出特定频率范围内传感器的动态响应特征，故本研究主要采用正弦法校准，以确定被测传感器可以在动态环境下使用的频率范围和对应的响应特征。

2 试验设置

为了进行本次试验，在市场随机购买两只小量程S型力传感器，量程分别为(0~100) N和(0~500) N(图1)。



图1 两只S型力传感器，左量程为100N，右量程为500N

2.1 静态标定

根据JJG391-2009《力传感器检定规程》，为测得两只传感器的静态灵敏度，在温度19℃，相对湿度24%，大气压力101kPa的试验室进行静态标定，周围无影响标定结果的振动、冲击、电磁场或其他干扰源。传感器在标准检定条件下放置8小时，以保

证温度与标准检定条件的温度相同并稳定。开始标定前，将传感器与指示仪表（带激励电源）相连，预热半小时。本次标定采用0.01级的1000N静重式力标准机，传感器通过球形压头固定在标准机上，以保证其主轴线和加荷轴线相重合，同时检查所有连接部位的平滑度，避免锈蚀、擦伤及杂物。



图2 1000N静重式力标准机（精度0.01级）

对传感器施加预负荷至少3次，额定负荷的保持时间为40s，每次加荷至额定负荷后卸荷到零负荷并等待30s。完成准备工作后，调整指示仪表零点，然后按照设定的负荷点逐级增加，每级负荷加到后保持15s再读取输出值。结束后退到零负荷，保持1min，读取零点输出值，重新调整指示仪表零点。重复3次测量。

2.2 正弦法校准

正弦法力传感器动态校准方法可分为绝对法和相对法两种方法，绝对法采用激光干涉仪来测量质量块上表面加速度，相对法采用标准加速度计粘在质量块表面上测量加速度值。本次试验采用相对法校准。校准所需要的仪器(图3)包括：(1) 400N 标准振动台, 频率范围(5~10000) Hz；(2) 质量为1kg的标准质量铁块，质量均为1kg；(3) 2270 标准加速度计，量程为(2~100) m/s²。



图3 标准振动台；标准质量块；标准加速度计

图4为比较法正弦法校准装置安装示意图：将传感器安装于标准振动台上方，通过下连接件紧密连接。S型传感器上方安装质量块，通过上连接件紧密连接。质量块上表面中心点位置安装标准加速度

计，用专用的封蜡（频响可达4000Hz）连接。

本阶段试验在环境温度20.5℃，相对湿度24.5%，大气压力101kPa，无其他振动、噪声、电磁场或其他干扰源的试验室进行校准前，需要将传感

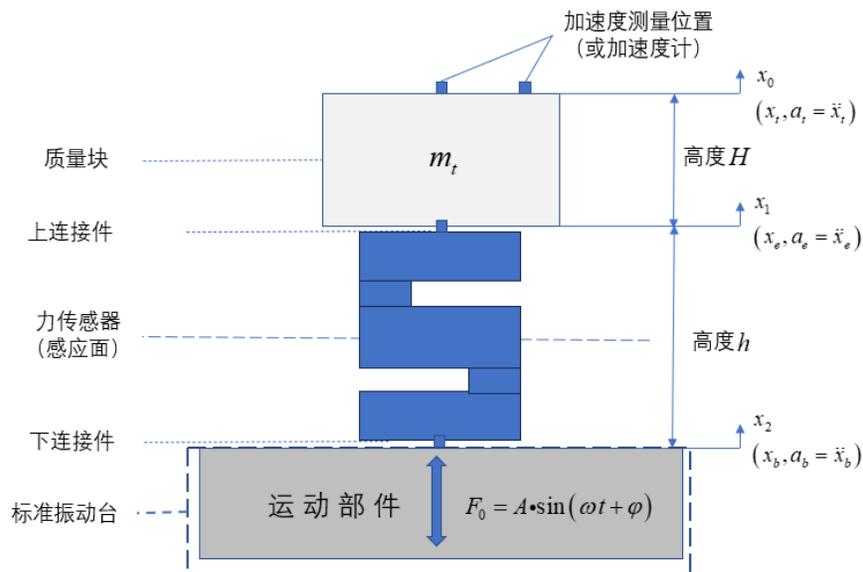


图4 比较法正弦法校准装置安装示意图

器在额定的试验环境下放置8h。校准系统的供电电压为(220±22)V,(50±1)Hz。完成外观检查后,将传感器的导线与校准系统正确连接后,打开仪器电源,通电预热30min。

确保仪器处于规定的工作状态后,调整振动控制器的参数,使校准系统产生10 m/s²的加速度值,测量数据采集的时间为10个振动周期,同一状态重复测量10次,求平均值。然后,按照选定的频率

点,从低到高调,逐点调整校准系统的输出频率并记录数据。

3 试验结果

传感器通过静态检定方法标定,3组数据平均后结果如表1,算得100N和500N两只传感器静态灵敏度分别为0.0203mV/(V·N)和0.0041mV/(V·N)。试验过程中测得两个传感器的零点输出、零点漂移、重复性等指标均合格。

表1 两个S型力传感器的静态标定数据

100N		500N	
标准力值(N)	输出信号(mV/V)	标准力值(N)	输出信号(mV/V)
0	0.0000	0	0.0000
20	0.4065	100	0.4083
40	0.8129	200	0.8165
60	1.2193	300	1.2247
80	1.6257	400	1.6328
100	2.0322	500	2.0409

传感器接入正弦法校准系统,振动台输出加速度幅值为10m/s²,频率点为20Hz,40Hz,60Hz,80Hz,100Hz,120Hz,140Hz,160Hz,180Hz,200Hz,220Hz,315Hz,400Hz,600Hz,800Hz,1000Hz。表2为标准加速度计溯源过的灵敏度幅频值与两个传感器安装后在各频率点下标准加速度计实际测得灵敏度。

表2 动态数据

频率点(Hz)	溯源的加速度计灵敏度(mV/(m/s ²))	100N	500N
		实测灵敏度(mV/(m/s ²))	实测灵敏度(mV/(m/s ²))
20	2.06	2.1377	2.0772
40	2.07	2.3732	2.1079
60	2.08	2.8861	2.1499
80	2.10	4.1139	2.2147
100	2.10	9.1516	2.2868
120	2.11	18.6906	2.3989
140	2.12	4.0827	2.5445
160	2.12	2.1511	2.7357
180	2.12	1.4002	2.9840
200	2.13	1.0084	3.3225
220	2.13	0.7701	3.7984
315	2.15	0.3187	31.8796
400	2.16	0.1916	4.5150
600	2.16	0.0838	0.8767
800	2.17	0.0517	0.3749
1000	2.17	0.0325	0.2179

从表中可看出,两个传感器在正弦激励下,不同频率下灵敏度变化差异很大。参考JJG233-2008《压电加速度计》关于加速度计灵敏度频率响应误差应在±10%范围内。因此,本研究设定100N传感器的动态响应约在30Hz以内,500N传感器的动态响应约在110Hz以内,高于设定频率传感器所测得的值均不可靠。测得灵敏度随着激励频率越来越高,逐渐趋近于0,说明传感器因自身刚度问题导致频率响应不足。

两只传感器接入校准系统后,加速度计实测灵敏度最大值分别出现在120Hz和315Hz处,高于溯源值数十倍,可以推断,当前频率下整个系统产生了共振现象。因此,通过校准系统的扫频功能,先后将100N和500N传感器单独安装在振动台上(传感器上端不连接质量块),测得两个传感器的固有频率分别为315Hz(图5)和1324Hz(图6)。接下来再在传感器上端安装上质量块,分别运行一次扫频,测得传感器与质量块组合的固有频率分别为107Hz(图7)和313Hz(图8)。从扫频图中也可看出,传感器与质量块组合后,固有频率降低且系统共振的影响是一个频率范围,导致多个频率点测量受到影响。因此,两个传感器在动态响应下可靠的频率区间严重降低。

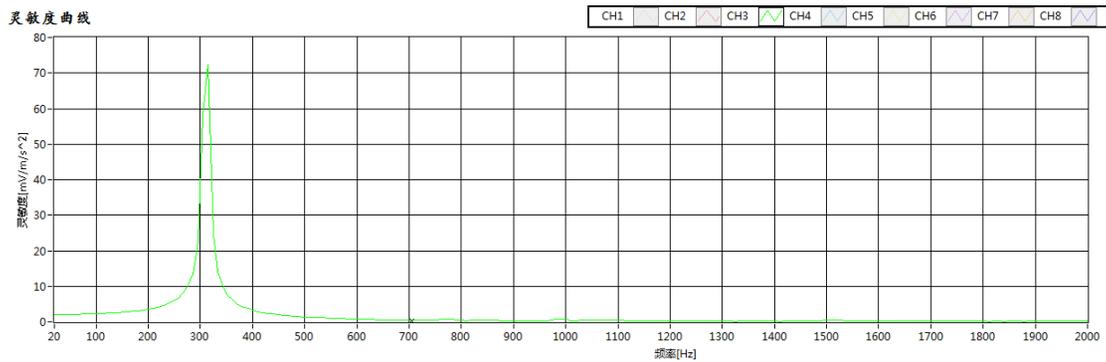


图5 100N传感器的固有频率

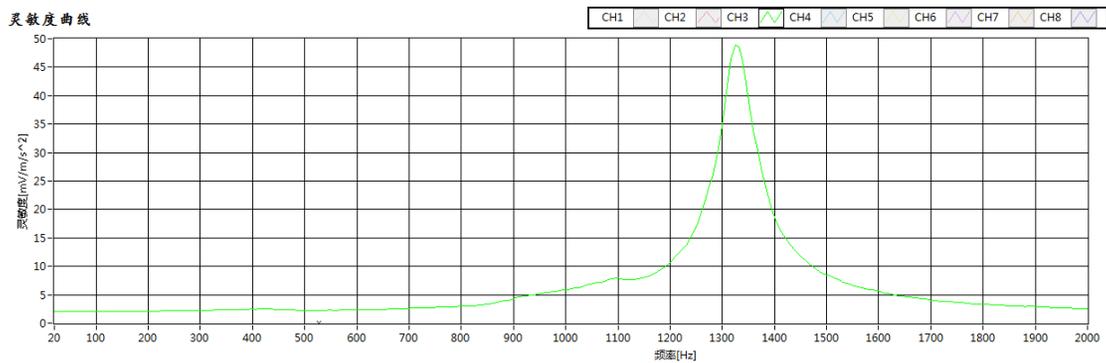


图6 500N传感器固有频率

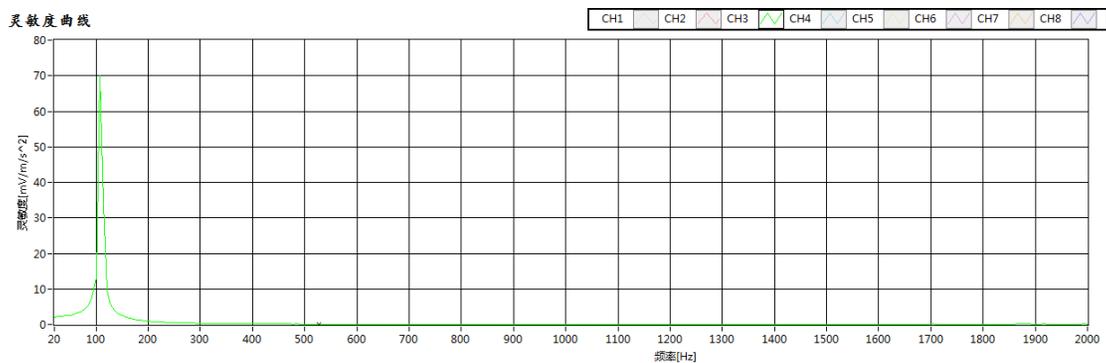


图7 100N传感器与质量块连接后的固有频率

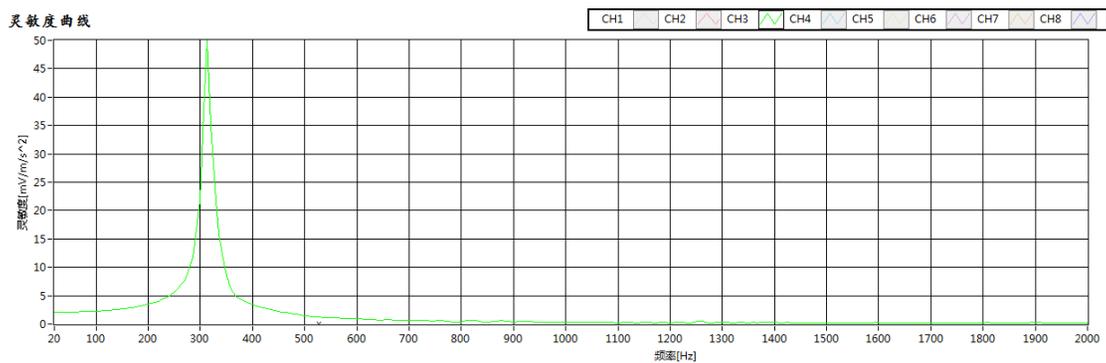


图8 500N传感器与质量块连接后的固有频率

4 结语

本研究通过对两个小量程S型力传感器的静态标定和正弦法动态性能校准得出以下结论：（1）静态性能优良的小量程S型力传感器的动态性能因受自身刚度较小的影响，频率响应能力远不如压电式传感器。（2）小量程S型力传感器的固有频率较低，若在动态环境下使用，需要规避系统共振导致的某段频率区间测量值不可靠。（3）传感器连接的构建会与传感器组合成新系统，需要注意材质的选择，否则会导致整个系统共振频率降低进而减小传感器动态响应的可靠范围。（4）提高传感器的整体刚度，可提高其在动态响应下可靠的频率范围。

参考文献

- [1] JJG632-1989《动态力传感器》[S].
- [2] JJF1657-2017《正弦法力传感器动态特性校准规范》[S].
- [3] GB/T 37776-2019《动态力传感器校准方法冲击力法校准》[S].
- [4] JJG391-2009《力传感器检定规程》[S].
- [5] JJG233-2008《压电加速度计》[S].

作者简介

肖尧（1989—），男，博士研究生，浙江省计量科学研究院力学所工作，浙江大学机械工程学院在站企业博士后。研究方向：动态力计量。