

基于正弦法的力传感器动态灵敏度校准的研究

王 振, 范海艇, 王 军, 夏冰玉, 韩晓萌

(上海市质量监督检验技术研究院, 上海 201114)

摘要: 为了校准预紧的压电式力传感器动态灵敏度并研究其频响特性和预紧结构的设计, 首先介绍了正弦力激励的方法并建立校准数学模型; 分别在传感器正立和倒立安装方式下进行测试; 通过对比试验研究传感器端部等效质量引入的惯性力对传感器动态灵敏度的影响; 然后将传感器和附加质量块安装于振动系统; 通过白噪声激励得到系统安装谐振频率, 研究传感器有效频率范围和测量精度与安装谐振频率的关系; 通过理论分析, 研究传感器两端等效质量不同, 预紧结构非对称设计原因; 最后对力传感器灵敏度进行不确定度评定分析; 试验结果表明, 当附加质量块质量约为传感器质量的 120 倍时, 可忽略端部等效质量对灵敏度标定的影响; 压电式力传感器固有频率高达 46 kHz, 但其有效使用频率范围受安装谐振频率限制, 当试验频率与安装谐振频率比 $f/f_0 \leq 0.1$ 时, 压电式传感器精度等级为 1%; 动态测试时将传感器端部等效质量轻的一端连接被测物体。

关键词: 灵敏度; 力传感器; 端部等效质量; 校准; 动态特性; 不确定度

Study on Dynamic Sensitivity Calibration of Force Sensor Based on Sine Method

WANG Zhen, FAN Haiting, WANG Jun, XIA Bingyu, HAN Xiaomeng

(Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai 201114, China)

Abstract: In order to calibrate the dynamic sensitivity of preloaded piezoelectric force sensors, its frequency response characteristics and the preloaded structure design are studied. Firstly, the incentive method of sinusoidal force is introduced, the calibration mathematical model is established, and the sensor is tested in the upright and inverted installation mode. The influence of the inertial force introduced by the equivalent end mass on the dynamic sensitivity calibration is studied through the comparative tests. Then, the sensor and the additional mass are installed in the vibration system. The system installation resonant frequency is obtained by white noise excitation, the relationship between the effective frequency range and measurement accuracy of the sensor and the installed resonant frequency is studied. Through the theoretical analysis, the reasons for the different equivalent mass at both ends of the sensor and the asymmetric design of the preload structure are studied. Finally, the sensitivity uncertainty of the force sensor is evaluated and analyzed. The test results show that when the additional mass is about 120 times of the sensor, the effect of the equivalent end mass on the sensitivity calibration can be ignored; The natural frequency of piezoelectric force sensor is up to 46 kHz, but its effective frequency range is limited by the installation resonant frequency. When the ratio of test frequency and installation resonant frequency f/f_0 is less than or equal to 0.1, the accuracy grade of piezoelectric force sensor is 1%; The light end of the sensor should be connected to the measured object during dynamic tests.

Keywords: sensitivity; force sensor; equivalent end mass; calibration; dynamic characteristic; uncertainty

0 引言

力传感器一般有应变式和压电式。应变式力传感器是测量物体受力变形产生的应变的一种传感器, 由于漂移和蠕变很小, 广泛用于静态测试, 但刚度和固有频率低导致其动态特性较差, 用于动态测试仅限于小试验力值、宽脉冲和低频情况。张伟^[1]采用零极点配置法设计的动态补偿数字滤波器, 改善 S 型应变式传感器动态性能, 减小了动

态误差。压电式传感器是基于压电材料的压电效应, 将外力变化转换为电信号的一类传感器件, 具有测量频带宽和动态特性好等优点。广泛应用于零部件疲劳测试、汽车碰撞冲击试验和工业自动化检测等领域。特别是随着人工智能的发展, 六维压电式力传感器被广泛应用于智能工业机器人领域^[2-3]。

压电式力传感器动态校准方法有正弦力法、冲击力法和阶跃力法^[4-6]。阶跃力法一般通过脆性材料断裂获得负阶

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-03-29。

基金项目: 上海市质量监督检验技术研究院青年科技启明星项目(QMX-2022-10-JL)。

作者简介: 王 振(1988-), 男, 硕士, 工程师。

通讯作者: 范海艇(1984-), 男, 高级工程师。

引用格式: 王 振, 范海艇, 王 军, 等. 基于正弦法的力传感器动态灵敏度校准的研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 319-326.

跃力, 可实现较大的动态力幅值和宽频下灵敏度校准, 但是断裂材料及其尺寸的选择需要考虑校准力值和下降时间等因素。冲击力法有落体式和水平冲击式两种校准装置, 吻合工程实际测量中碰撞冲击力^[7]。但是相应的检定规程 JJG632-1989《动态力传感器》一直没有修订, 缺少对装置的结构与试验参数的要求。试验条件不同会对力传感器的灵敏度标定影响很大。正弦力法一般是在标准振动试验台上进行的, 通过质量与加速度的乘积复现传感器力值。校准规范 JJF1370-2012《正弦力法力传感器动态特性校准规范》对正弦力传感器的动态性能校准作出了系统的规范及必要的说明。灵敏度测量精度高, 接近工程实践中的零部件周期频率测试。

传感器动态特性分为时域动态性能和频域动态性能, 动态校准参数主要为固有频率和灵敏度。虽然压电式力传感器具有较高的固有频率, 但是现场安装环境和安装结构很大程度上影响传感器的灵敏度动态特性, 其有效使用频率范围受安装谐振频率的限制, 其使用范围甚至只有 100~200 Hz。因此不仅对压电式力传感器的固有频率的测量进行研究^[8-10], 还需开展传感器现场标定技术的研究。传感器的端部等效质量是力传感器模型的重要校准参数, 影响压电式动态力测量精度^[11]。顾宝栋^[12]在正弦激励器上研究了传感器动态灵敏度和端部等效质量随频率变化特性, 忽视了标准加速计质量对其标定精度的影响。为了减少测量不确定度, 张力^[13]通过高精度的非接触激光测振仪替换标准加速计提高测量精度。同样正弦力法中的附加质量块表面加速度不均匀分布, 也直接影响复现的动态力精度, 而且力值和频率越大, 影响越明显^[14]。

压电式力传感器在使用过程中都需要经过预载过程。所谓预载就是传感器在测试之前以某种方式对它施加一定大小的力(一般为压力)让其产生一定的电荷, 然后通过一定的方式将其产生的电荷消除, 使传感器处于特定的预载状态, 以消除测力单元上下端与传感器晶体之间的间隙, 增加接触刚度以提高线性度和固有频率^[15]。黄亮^[16]用有限元分析软件对传感器结构模型进行仿真研究传感器的静态特性和动态模态, 分析结构设计对传感器性能的影响。夏明一^[17]设计研究不同的轴向预紧对传感器横向输出的影响, 通过试验和软件仿真得出轴向预载越大, 横向输出的线性区域越宽。

本文选取 Kistler 9321 型压电式单分量力传感器, 从时域和频域及改变传感器安装方向等方面开展研究。首先构建压电式力传感器的校准模型, 研究传感器端部等效质量对灵敏度校准的影响, 然后基于附加质量块的不同组合, 对力传感器动态灵敏度和频响特性进行研究, 结合理论分析研究传感器预紧结构的非对称设计。最后对力传感器的灵敏度进行测量不确定度评定分析。

1 压电式力传感器的校准模型

基于激光测振仪测量加速度的正弦力校准装置的结构

简图, 如图 1。因使用的 BK LAN-XI 高速同步采集分析仪不支持电荷型输出, 传感器输出的高阻抗电荷信号经适调仪(电荷放大器)把电荷信号转化为电压信号输入到采集分析系统, 同时可以在适调仪上设置传感器灵敏度参数进行标定。

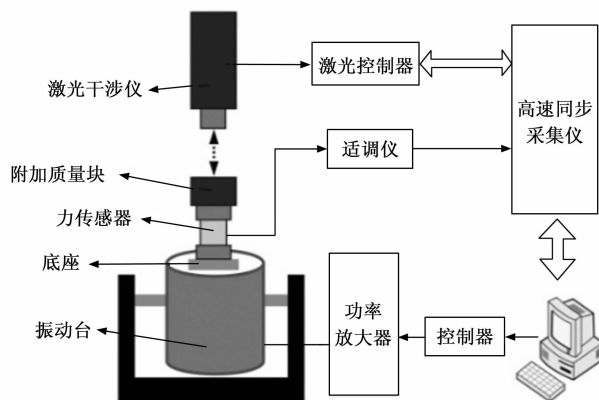


图 1 正弦力校准装置简图

压电式力环通过特殊的螺母螺栓组装成预紧传感器, 其结构上下两端都有等效质量块, 如图 2。当振动台动圈质量远大于被测系统质量, 不须考虑振动台面对被测系统影响。当被测系统的质量与振动台面的质量相当时, 必须考虑台面动圈对其影响^[18]。可将传感器等效一个线性二阶单自由度模型, 其等效模型和系统结构受力分析如图 3 所示。

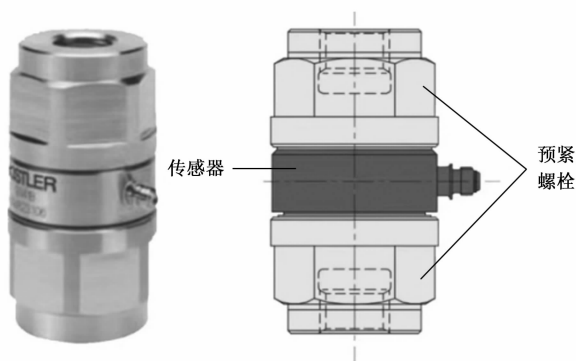


图 2 预紧的压电式力传感器

把附加质量块、连接机构和力传感器顶部等效质量作为刚性体, 根据达朗贝尔原理, 建立系统动平衡方程为:

$$(m_0 + m_b)a_b + F_k + F_c = 0 \quad (1)$$

$$m_a a_t - F_k - F_c + F_t = 0 \quad (2)$$

其中: m_1 表示附加质量块质量, m_2 表示传感器与质量块之间的联接机构(螺栓)质量, 质量 $m_0 = m_1 + m_2$ 为附加质量块与连接机构的总质量。 m_b 表示传感器上端部等效质量, m_t 表示传感器下端部等效质量, F_k 为传感器内部弹性力, F_c 为传感器内部阻尼力, a_b 为传感器上端部等效质量的加速度, a_t 为传感器下端部等效质量的加速度。 F_t 为传感器

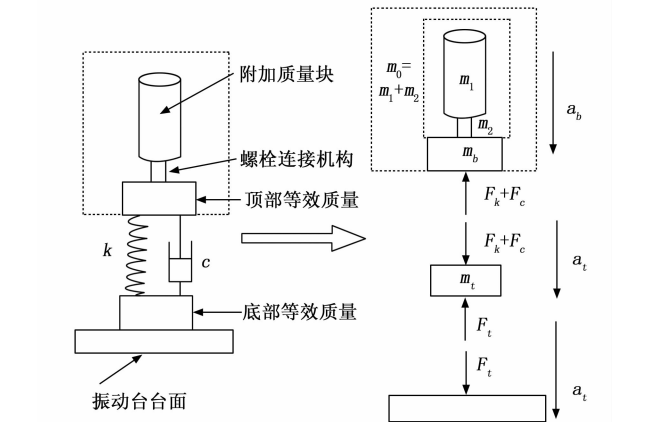


图 3 传感器等效模型和结构受力分析图

下端部等效质量与振动台面之间内力。

推导得：

$$F_k = -(m_0 + m_b)a_b - F_c \tag{3}$$
$$F_t = F_k + F_c - m_a a_t \tag{4}$$

正弦推力提供持续能量，振幅不衰减，可忽略阻尼力 F_c 的影响，因此式 (3) 变为：

$$F_k = -(m_0 + m_b)a_b \tag{5}$$

S 为电荷放大器上设置的初始灵敏度（一般为出厂参考灵敏度）， F 为压电式力传感器输出，根据灵敏度定义可知校准灵敏度 S_0 为：

$$S_0 = \frac{S \cdot F}{-(m_0 + m_b)a_b} \tag{6}$$

可通过 2 个不同质量块进行测量，联立求解参数 S_0 和 m_b ，当忽略传感器上端部等效质量时，只有 S_0 是未知量，通过一个附加质量块求解。

2 压电式力传感器的动态特性

2.1 忽略传感器端部等效质量影响

试验选用的附加质量块基本信息见表 1。设附加质量块材质均匀，试验时各部分加速度值相同。激光测振仪输出的原始信号为基于多普勒外差干涉法的速度波形，微分调解得加速度信号，解调过程如图 4。

表 1 附加质量块基本信息

质量块编号	A	B	C	D
材质	40 Cr			
形状	圆柱体(高度与直径比为 2)			
$m_0 = m_1 + m_2$ (kg)	1.374 0	2.413 6	4.978 5	7.360 0

首先把传感器正立（Kistler 标志）安装在振动台面上，设置参考频率 80 Hz，控制力值峰值在（200±10）N 范围内，高速同步采集仪记录速度和力传感器时域输出波形，从记录的波形中取 10 个周期，以算术平均值作为时域测量结果，时域信号经 FFT 变换到频域，如图 5 所示。

然后把传感器倒立（Kistler 标志）安装在振动台上，同样同步采集记录时域输出和 FFT 频域分析。

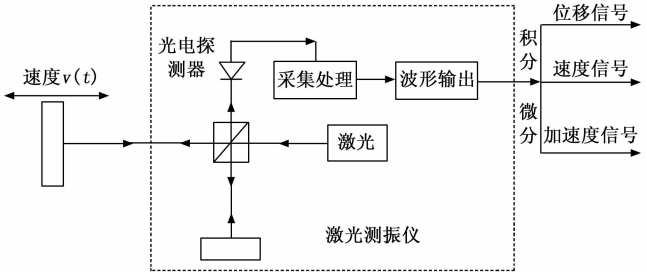


图 4 激光测振仪原理图

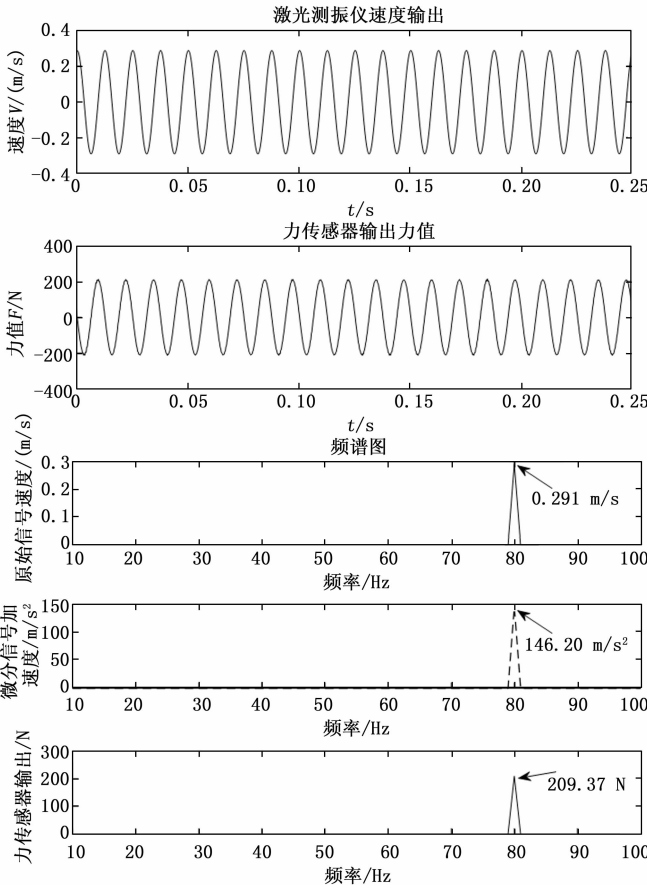


图 5 附加质量块 A 测试时域和频域图（正立安装）

已知选用的 Kistler 9321 压电式力传感器出厂参考灵敏为 $S = -3.666 \text{ pC/N}$ 。当传感器正立（Kistler 标志）安装时，忽略传感器端部等效质量 m_b ，把传感器倒立（Kistler 标志）安装时，忽略传感器端部等效质量 m_t ，分别在时域和频域上校准。灵敏度 S_0 随附加质量块质量变化趋势如图 6 所示。

分析如下：

1) 分析图 6 可知无论传感器正立（Kistler 标志）安装和倒立安装，时域还是频域，每个附加质量块计算的灵敏度 S_0 相差较大而且都比出厂参考灵敏度偏大，随着附加质量块质量增加趋向于参考灵敏度。理论上通过不同质量块计算的校准灵敏度 S_0 应相差不大，可推断力传感器端部等效质量引入的惯性力严重影响传感器灵敏度校准。特别在

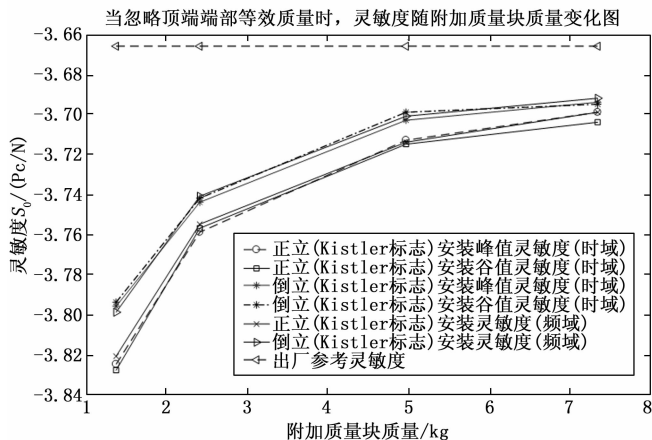


图6 灵敏度随附加质量块质量变化图（时域和频域）

附加质量块质量小的情况下，必须考虑和计算端部等效质量。试验所用传感器质量约 90 g，通过增加附加质量块根据最小二乘拟合并通过试验验证，大约在 10.8 kg 左右时，即附加质量块为传感器质量的 120 倍时，可不考虑端部质量引入的惯性力影响（与出厂参考灵敏度相对误差小于 0.5%）。

2) 通过图 6 的时域和频域分析，得到传感器正立（Kistler 标志）安装相比于倒立安装所得灵敏度数值偏大，可推断传感器顶端和底端等效质量不同，传感器的预紧螺栓装置非对称结构。

3) 根据贝塞尔公式计算重复性引入的 A 类标准不确定度和标准器最大允许误差引入的 B 类标准不确定度，合成后的扩展不确定度 $U_{rel}=0.6\%$ ($k=2$)。在安装方向确定的情况下，分析同一个附加质量块计算的灵敏度，通过图 6 可知在时域中峰值灵敏度和谷值灵敏度相差不大而且与频域中计算的灵敏度数值也很吻合，三者虽有轻微差异，在考虑不确定度的影响后可忽略此差异。

2.2 考虑传感器端部等效质量影响

当考虑传感器端部等效质量 m_b 或 m_t 影响时，对传感器动态灵敏度校准必须由 2 个不同质量的附加质量块组合计算灵敏度。同样设定频率为 80 Hz，控制力峰值约 (200 ± 10) N，分别在传感器正立（Kistler 标志）安装和倒立安装下进行测试计算，得传感器端部等效质量和传感器的校准灵敏度。如图 7 和图 8 所示。

以出厂灵敏度作为参考值通过灵敏度的相对误差形式，比较考虑传感器端部等效质量情况与不考虑传感器端部等效质量情况对灵敏度标定精度影响，见图 9 和图 10。

在传感器正立（Kistler 标志）安装和倒立安装下，分别计算每组附加质量块组合形式下传感器的端部等效质量的算术平均值，根据贝塞尔公式计算标准差，见图 11。其中“■”表示端部等效质量算术平均值，上下延伸线表示端部等效质量的标准差，分析不同附加质量块组合下计算的端部等效质量的波动差异性。

分析如下：

1) 通过图 7 可知，不论时域分析还是频域分析，传感

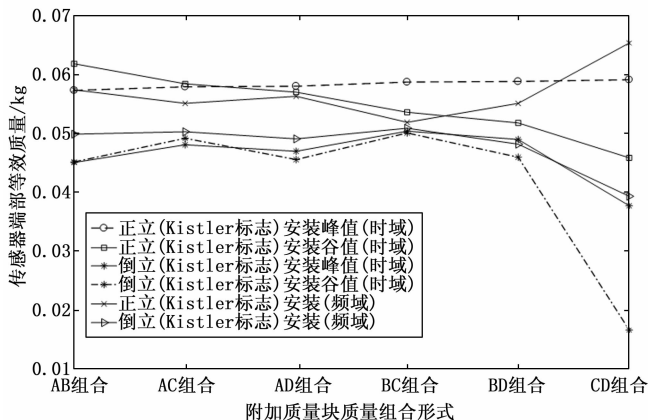


图7 传感器端部等效质量（时域和频域）

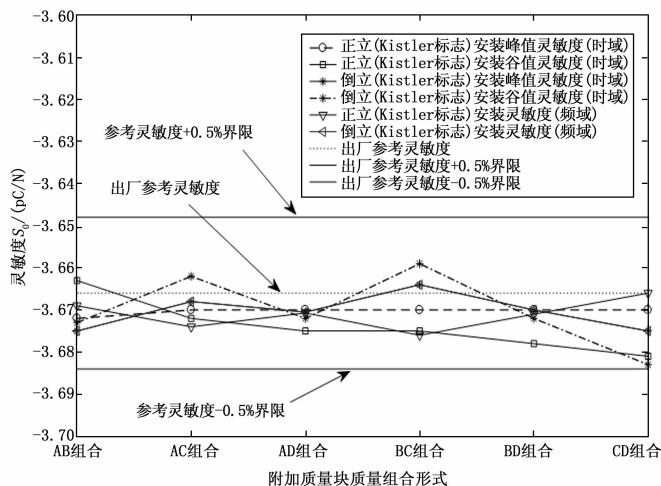


图8 传感器校准灵敏度（时域和频域）

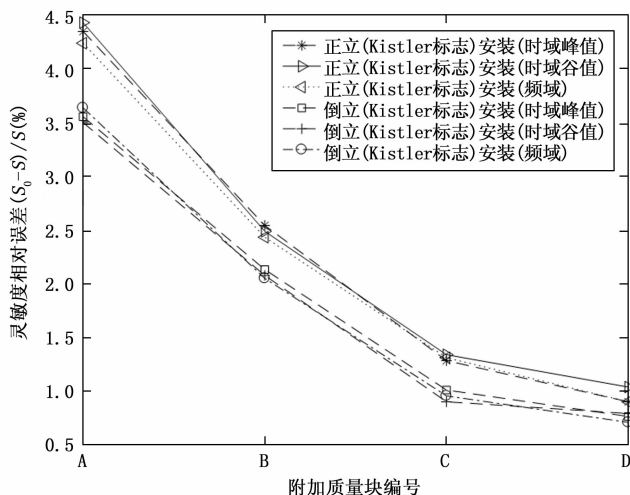


图9 灵敏度相对误差（不考虑传感器端部等效质量）

器正立（Kistler 标志）安装情况计算的端部等效质量都比倒立安装计算的端部等效质量大，即传感器两端的端部等效质量 $m_b \neq m_t$ 。通过不同附加质量块组合计算出端部等效质量，再次说明压电式力传感器预紧结构的非对称性。

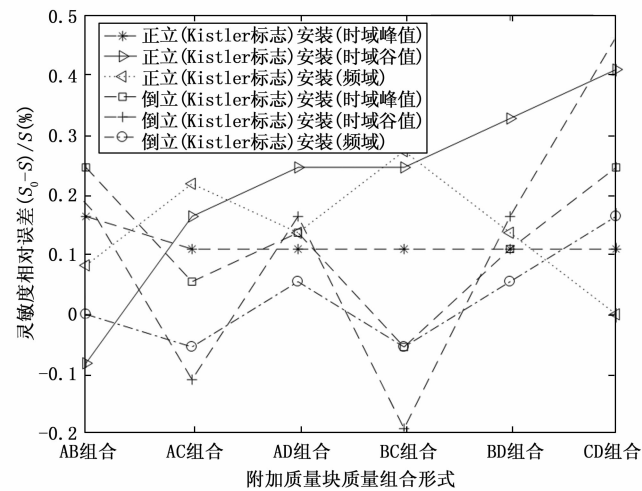


图 10 灵敏度相对误差 (考虑传感器端部等效质量)

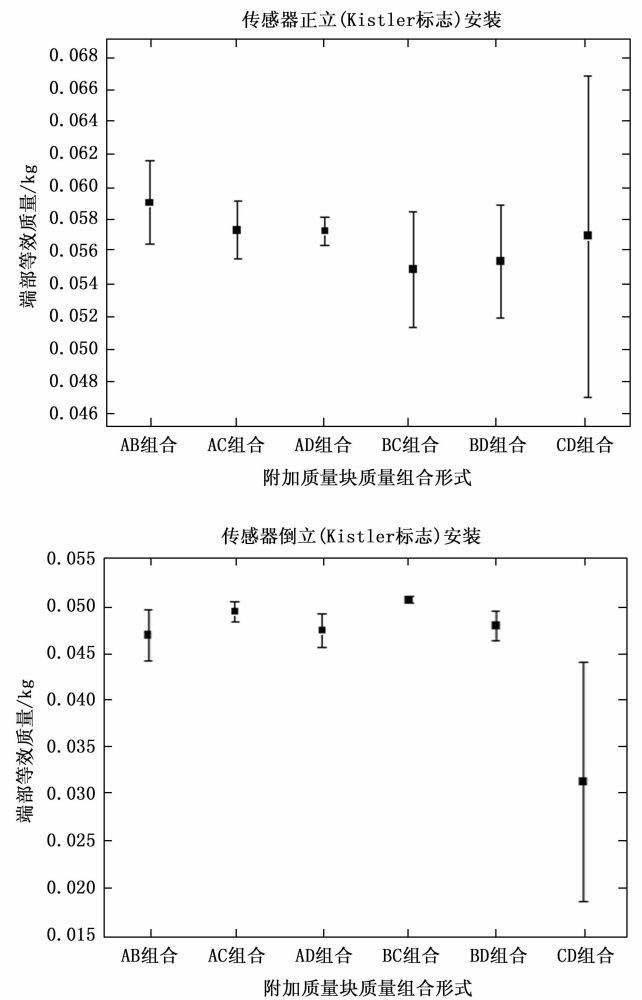


图 11 端部等效质量的误差图

2) 通过图 8 的时域和频域灵敏度图像可知附加质量块的不同组合, 计算的传感器灵敏度比较稳定, 而且都在出厂参考灵敏度附近, 上下波动幅值较小。通过图 10 的灵敏

度相对误差分析图, 可知校准灵敏度都在参考灵敏度的 $\pm 0.5\%$ 范围内。分析图 9 可知校准灵敏度相对出厂参考灵敏度示值误差都为正, 通过 A 附加质量块计算的灵敏度示值误差接近 4.5% , 严重影响传感器灵敏度标定的精度等级。通过试验可知, 考虑传感器端部等效质量, 通过附加质量块的不同组合计算的灵敏度, 实现了传感器灵敏度数值的一致性和统一性。

3) 比较分析图 11, 可知附加质量块的 CD 组合形式计算的传感器端部等效质量相比于其他 5 组组合形式波动很大, 而且在传感器倒立 (Kistler 标志) 安装时, 通过质量块 CD 组合形式下计算的传感器端部等效质量的算术平均值严重偏离其他组合形式计算的端部等效质量算术平均值。

2.3 传感器的固有频率和频域动态响应

根据力传感器的幅频特性分析, 可以获得力传感器的固有频率。本次采用落球实验测量传感器的固有频率, 如图 12 所示。通过使用金属钢球对力传感器进行冲击激励, 响应是有阻尼衰减震荡的瞬变过程, 记录响应信号经 FFT 频谱分析, 确定力传感器的固有频率。钢球冲击点接触, 排除剪切力影响; 外部的透明玻璃管主要起导向作用, 保证钢球冲击在力传感器的同一位置; 在底座上有固定力传感器的装置, 避免在冲击过程力传感器发生移动。试验采用丹麦 BK 公司的 3160-A-042 数据采集仪和 Pulse 分析软件, trigger 触发的 hold-off 等待设置时间长些, 防止钢球与传感器的连续碰撞引起误触发, 以免对测试结果造成影响。经多次试验比对, 结果具有一致性和重复性, 所测传感器固有频率为 46 kHz 左右。

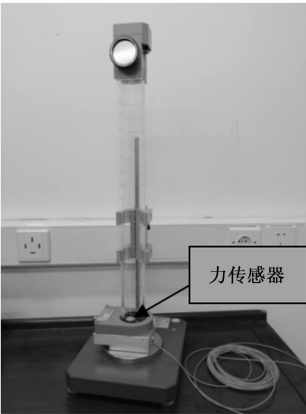


图 12 固有频率测试装置图

压电式力传感器的频域特性图可以通过分析安装环境和安装结构对压电式力传感器的动态特性获得。这对研究力传感器的可用频带范围有重要意义。把压电式力传感器和附加质量块安装在振动台, 输入白噪声激励信号, 采用动态信号分析仪测量系统功率谱密度确定系统安装谐振频率。表 2 为 4 个不同的附加质量块和传感器分别安装于振动台后测得整个系统安装谐振频率 f_0 。

表 2 系统安装谐振频率列表

质量块安装于台面形式	A	B	C	D
谐振频率 f_0 /Hz	1 537	1 458	1 146	1 024

以附加质量块 A 和 B 为一组，附加质量块 C 和 D 为另外一组进行试验，控制力值峰值在约 (200 ± 10) N，设置不同测试频率 f ，例如 40 Hz、60 Hz、80 Hz、100 Hz、120 Hz、140 Hz、160 Hz 和 200 Hz。传感器校准灵敏度随频率变化关系见图 13 所示。测试分析更高试验频率，研究灵敏度幅值比随 f/f_0 变化趋势，如图 14 所示。

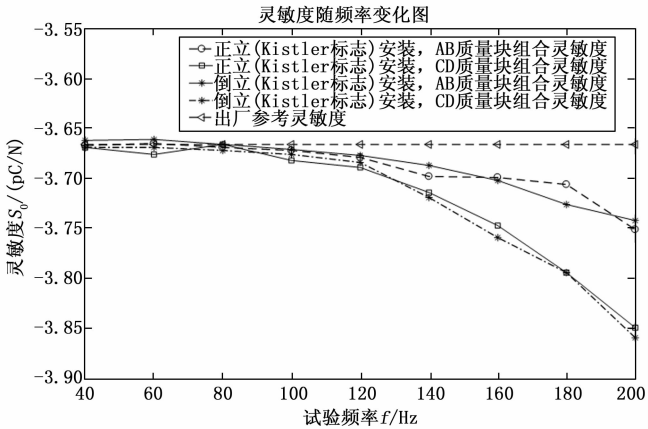


图 13 灵敏度随频率变化图

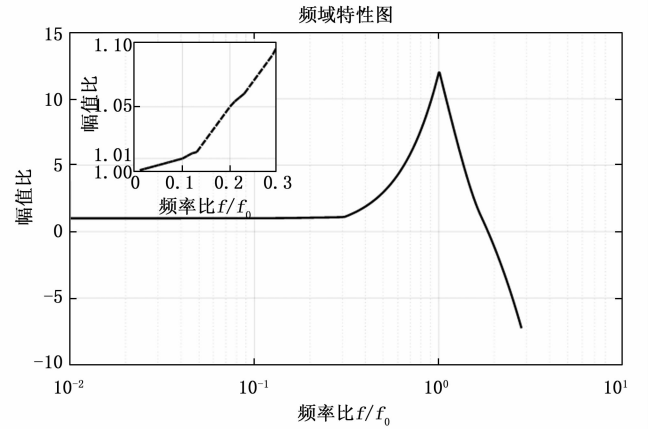


图 14 压电式力传感器频域特性图

分析如下：

1) 分析图 13 可知，在保证精度相等时，由于 A 和 B 组合的系统安装谐振频率较高，所以传感器的使用频率范围较高。考察传感器正立（Kistler 标志）安装下 A 和 B 组合的情况，传感器在 200 Hz 时，比值仅为 1.023，而 C 和 D 组合的比值较大为 1.050。即使压电式力传感器的固有频率高达 46k Hz，但是系统安装谐振频率严重限制其有效的使用频率范围，影响传感器精度等级。例如，当使用附加质量块 A 与 B 组合，在保证准确度等级为 1% 时，传感器

有效的使用频率只到 160 Hz。

2) 在附加质量块组合确定的情况下，比较图 13 的传感器正立安装和倒立安装的曲线，在低频率点两者数值相差不大，但随着测试频率增加，两者的灵敏度随频率变化趋势增大，校准灵敏度逐渐偏离出厂灵敏度，另外附加质量较大的 C 和 D 组合所得校准灵敏度波动较大。

3) 结合表 2 和图 14 分析，设 A 和 B 组合可认为系统安装谐振频率约为 1.5 kHz，C 和 D 组合可认为系统安装谐振频率约为 1.1 kHz，通过图 14 可知当 $f/f_0 \leq 0.1$ 时，传感器校准灵敏度 S_0 相比于参考灵敏度满足 1% 精度等级。

2.4 压电式力传感器的预紧结构

Kistler 的 9321 型压电式力传感器通过特殊的螺栓螺母把力环传感器预紧，以减少非线性影响和实现拉压双向测量。图 15 为传感器剖面图。

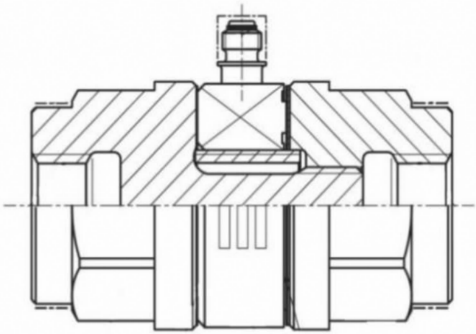


图 15 9321 型传感器结构剖面图

通过传感器正立和倒立安装方式研究传感器灵敏度和两端等效质量，预紧结构非对称性的结论得到验证。非对称设计有其理论依据，通过分析图 3 和式（4）可知，传感器测量的力是通过传感器内部晶体片的力，而真正传递到被测物体上的力为。忽略阻尼力 F_c 影响，和有微小差别， F_k 传递的力有一部分被用于为质量提供惯性力。因此为了保障力值量值传递的精度准确，在使用预紧压电式力传感器时，应将端部等效质量轻的一端与被测物体连接。

3 压电式力传感器的灵敏度不确定度评定

3.1 概述

以附加质量 A 和 B 组合为例，设定频率为 80 Hz，控制力峰值约 (200 ± 10) N，在传感器正立（Kistler 标志）安装下进行测试计算，进行校准灵敏度的不确定度评定。测量依据为 JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示计量校准规范。

3.2 数学模型

$$S_0 = \frac{S \cdot F}{-(m_0 + m_b)a_b} \tag{7}$$

其中： S 为已知出厂参考灵敏度， F 为压电式力传感器输出的电荷信号经电荷放大器及分析系统转化的力值输出。质量 m_0 为通过高精度电子天平测量的附加质量块与连接机构的总质量，因电子天平误差可以达到万分精度，故可忽

略质量 m_0 引入的不确定度。 m_b 为传感器上端部等效质量, a_b 为附加质量块和压电式力传感器上端等效加速度。

标准不确定度:

$$u_c(S_0) = \sqrt{[c_1 u(F)]^2 + [c_2 u(m_b)]^2 + [c_3 u(a_b)]^2} \quad (8)$$

灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial S_0}{\partial F} \quad c_2 = \frac{\partial S_0}{\partial m_b} \quad c_3 = \frac{\partial S_0}{\partial a_b} \quad (9)$$

$u_c(S_0)$ 表示灵敏度标准不确定度 $u(F)$ 表示由力 F 引入的标准不确定度, $u(m_b)$ 表示由传感器上端部等效质量引入的标准不确定度, $u(a_b)$ 表示由附加质量块和压电式力传感器上端等效加速度引入的标准不确定度。

3.3 标准不确定度来源

- 1) 测量重复性引入的标准不确定度。
- 2) 标准器准确度等级或最大允许误差引入的标准不确定度。
- 3) 附加质量块加速度不均匀分布引入的标准不确定度。

3.4 标准不确定度的评定

3.4.1 测量重复性引入的标准不确定度

对被校压电式力传感器进行 10 次安装, 校准灵敏度参数。重复性是引起输出量不确定度的主要来源, 可通过 A 类评定方法评定。

测量和计算数据见表 3。

表 3 10 次重复性测量和计算数据

F / N	206.574	206.547	206.707	206.884	206.601
	206.811	206.577	206.788	206.785	206.587
$a_b / (m/s^2)$	144.312	144.325	144.316	144.314	144.309
	144.311	144.325	144.329	144.329	144.314
m_b / kg	0.0574	0.0572	0.0577	0.0578	0.0581
	0.0575	0.0570	0.0571	0.0572	0.0573

计算算术平均值 \bar{F} 、 \bar{m}_b 和 \bar{a}_b 并根据贝塞尔公式计算标准差作为重复性引入的不确定度 $u_A(F)$ 、 $u_A(m_b)$ 和 $u_A(a_b)$ 如表 4。

表 4 算术平均值和重复性引入的不确定度列表

算术平均值	\bar{F}	\bar{m}_b	\bar{a}_b
	206.686 N	0.0574 kg	144.318 m/s ²
重复性引入的不确定度	$u_A(F)$	$u_A(m_b)$	$u_A(a_b)$
	0.123 N	0.000 3 kg	0.008 m/s ²

3.4.2 标准器激光测振仪和电荷放大器最大允许误差引入的标准不确定度

可通过 B 类评定方法评定, 根据激光测振仪和电荷放大器的溯源证书等技术资料, 该激光测振仪和电荷放大器为 0.3 级。假设均匀分布, 引入的标准不确定度为:

$$u_B(a_b) = \frac{144.318 \text{ m/s}^2}{\sqrt{3}} \times 0.3\% = 0.250 \text{ m/s}^2 \quad (10)$$

$$u_B(F) = \frac{206.686 \text{ N}}{\sqrt{3}} \times 0.3\% = 0.358 \text{ kN} \quad (11)$$

3.4.3 附加质量块加速度不均匀分布引入的标准不确定度

根据实验经验, 估计附加质量块加速度不均匀分布为 0.3%, 假设均匀分布。则加速度的不均匀分布引入的标准不确定度为

$$u_3(a_b) = \frac{144.318 \text{ m/s}^2}{\sqrt{3}} \times 0.3\% = 0.250 \text{ m/s}^2 \quad (12)$$

3.5 合成标准不确定度的评定:

把算术平均值 \bar{F} 、 \bar{m}_b 和 \bar{a}_b 带入 (9) 式计算灵敏系数, 根据不确定度传播率

$$u_c(S_0) = \sqrt{[c_1 u(F)]^2 + [c_2 u(m_b)]^2 + [c_3 u(a_b)]^2}$$

得合成标准不确定度 $u_c(S_0)$, 标准不确定度分量及合成不确定度一览表, 如表 5。

表 5 标准不确定分量和合成标准不确定度列表

标准不确定度分量	标准不确定度值	灵敏系数
$u(F)$	0.376 N	$c_1 = 0.018 \text{ pC/N}^2$
$u(a_b)$	0.354 m/s ²	$c_2 = -0.025 \text{ pC/[N} \cdot \text{m/s}^2]$
$u(m_b)$	0.000 3 kg	$c_3 = -2.562 \text{ pC/[N} \cdot \text{kg}]$
合成标准不确定度 $u_c(S_0) = 0.011 \text{ pC/N}$		

其中:

$$u(F) = \sqrt{u_A(F)^2 + u_B(F)^2}$$

$$u_c(a_b) = \sqrt{u_B(a_b)^2 + u_A(a_b)^2 + u_3(a_b)^2}$$

$$u(m_b) = u_A(m_b)$$

3.6 扩展不确定度的评定

一般包含因子 $k = 2$, 扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c(S_0) = 0.022 \text{ pC/N} \quad (13)$$

相对扩展不确定度表示为:

$$U_{\text{rel}} = \frac{0.022}{3.666} = 0.6\% (k = 2) \quad (14)$$

4 结束语

1) 当附加质量块约为传感器质量的 120 倍时, 可忽略端部质量对其标定的影响。

2) 在考虑传感器端部等效质量情况下, 通过不同附加质量块的随意组合来计算灵敏度能实现其稳定性和一致性, 即都在参考灵敏度的 $\pm 0.5\%$ 范围内。

3) 把传感器和附加质量块安装于结构后, 通过白噪声激励确定系统安装谐振频率, 设置不同试验频率测试, 得出当比值时, 压电式传感器的精度为 1%。

4) 在选择合适的附加质量块情况下, 通过正弦法的附件质量组合计算的灵敏度具有较高的测量精度, 扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 0.6\% (k = 2)$ 。

本项目的研究是基于质量块为刚体, 假设整个质量块各部分加速度相同。实际质量块不是理想刚体, 其在振动中各部分加速度不是均匀分布, 特别在大力值和高频率下, 加速度不均匀分布越明显, 直接影响动态力复现的精度。因此在动态力计量中还应重视质量块大小和形状的设计以及加速度分布不均匀的研究。

参考文献:

- [1] 张 伟, 张 跃, 张智敏, 等. 应变式力传感器动态特性研究及动态补偿 [J]. 计量学报, 2012, 33 (1): 35-38.
- [2] 刘 俊, 徐军领, 李 敏, 等. 垫圈式压电六维力传感器静态灵敏度解析 [J]. 光学精密工程, 2019, 27 (4): 901-910.
- [3] 王志军, 姚建涛, 王 航, 等. 并联预紧式六维力传感器动态力响应分析 [J]. 机器人, 2011, 33 (4): 455-460.
- [4] Kumme R. Investigation of the comparison method for the dynamic calibration of force transducer [J]. Measurement, 1998, (23): 239-245.
- [5] 卢小犇, 翟琼劫, 屠 淳, 等. 压电式动态力传感器校准方法的研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (5): 261-265.
- [6] FUJII Y. Measurement of steep impulse response of a force-transducer [J]. Measurement Science and Technology, 2003, 14: 65-69.
- [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.
- [8] 贾振元, 李映君, 张 军, 等. 并联式轴用压电六维力/力矩传感器 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (11): 62-68.
- [9] 徐兴盛, 李映君, 王桂从, 等. 轮辐结构压电式六维力传感器设计 [J]. 光学精密工程, 2020, 28 (12): 2655-2664.

(上接第 318 页)

存储空间覆盖困难、测试时序编写复杂的问题,同时也增加相应的外接源表程控方法可实现部分交直流参数测试,该系统逻辑功能判断准确,数据采集高效且精准,测试系统操作简单。

并对 S29GL 系列不同容量的芯片进行读、写、擦除等全功能验证,完成 VOL、VOH、VIL、VIH、tACC 等交直流参数测试,完成片擦除工作,验证了 NorFlash 功能验证系统的可靠性,为闪存存储器测试与验证提供一种新的经济、高效、可定制的测试方案。

参考文献:

- [1] 许子皓, 张依依. 闪存之争风云再起 [N]. 中国电子报, 2022-09-02 (007).
- [2] 黄克亚. 基于 FSMC 总线的嵌入式系统多显示终端驱动设计 [J]. 液晶与显示, 2022, 37 (6): 718-725.
- [3] YUETING L, LENG QW. Reduction of power consumption in norflash memory based wearable electronics with improved LRU algorithm [C] // Proceedings of 2019 2nd International Conference on Computer Information Science and Application Technology (CISAT 2019) (VOL. 3), 2019: 521-527.
- [4] 秦 臻, 张鑫泉. STM32 的 FSMC 机制与 NorFlash 的对接 [J]. 现代信息科技, 2021, 5 (22): 48-50.
- [5] 刘振海, 骆冬根, 王 改, 等. 基于 FSMC 接口的 CF 卡数据存储系统设计 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (10): 15-18.
- [6] 张英豪. 闪存高速接口模块的后端物理设计 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2022.
- [7] 王志平. NorFlash 在嵌入式系统中的仿真与应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.

- [10] 姚建涛, 孙 锐, 李立建, 等. 整体预紧式六维力传感器动态特性分析 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (5): 1037-1043.
- [11] 江文松, 王中宇, 张 力, 等. 力传感器惯性质量的改进 Monte Carlo 校准方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44 (2): 342-348.
- [12] 顾宝栋, 陈怀海, 申 凡, 等. 力传感器动态标定及其精度分析研究 [J]. 振动与冲击, 2005, 24 (2): 95-98.
- [13] 张 力. 激光干涉法进行正弦力校准研究 [J]. 计量学报, 2005, 26 (4): 337-342.
- [14] 王 宇, 张 力, 洪宝林, 等. 正弦力校准中降低质量块振动响应不均匀影响的设计方案 [J]. 振动与冲击, 2010, 29 (7): 228-231.
- [15] 陈以华. 压电测力单元预紧力施加装置研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [16] 黄 亮. 压电式四维力传感器的有限元仿真分析和设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [17] 夏明一. 空间微振动多维扰动力测试技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2019.
- [18] 陆秋海, 李德葆. 工程振动试验分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

- [8] 王 强. 基于 NorFlash 的 TFFS 文件系统移植 [J]. 自动化应用, 2016 (4): 13-15.
- [9] 范君健, 吴国东, 王志军, 等. 基于 FPGA+STM32 的多通道数据采集系统设计 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38 (12): 281-286.
- [10] 赵 星. STM32 基于 FSMC 的 SRAM 扩展技术 [J]. 工业控制计算机, 2015, 28 (6): 102-105.
- [11] 潘 辉. STM32-FSMC 机制的 NOR Flash 存储器扩展技术 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, 106 (10): 31-34.
- [12] 宋吉伟, 常文革, 黎向阳. 基于 NORFLASH 的大容量数据存储与传输 [J]. 电子科技, 2015, 28 (10): 34-37.
- [13] 王志平, 杨国武, 李晓瑜. SST39VF040 NorFlash 芯片的软件仿真实现 [J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32 (12): 2511-2514.
- [14] 陈鄯琛, 贺 云. 基于 V93000 MTP 的存储器测试 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40 (S1): 80-84.
- [15] 宋尚升, 龙永佳. 基于 J750 测试系统的 I~2C 存储器测试技术研究 [J]. 中国检验检测, 2022, 30 (2): 11-14.
- [16] 李求洋, 陈思禹, 桑作钧, 等. 一种 Nandflash 型存储器测试系统测试研究 [J/OL]. 微电子学: 1-7 [2023-03-15]. 1004-3365.
- [17] 宋国栋. 一种通用存储器测试装置的设计 [J]. 电子质量, 2020, 404 (11): 19-21.
- [18] 杨富征. FLASH 存储器的测试技术 [J]. 电子作, 2020, 404 (18): 62-63.
- [19] 张东磊. NORFLASH 存储芯片测试程序的设计 [J]. 电子世界, 2014, 444 (6): 115, 129.
- [20] 王晓亮, 谢朝辉, 杨红官. 基于 LabVIEW 和 FPGA 的存储器测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1763-1765.