

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.03.05

测量微小量级冲击加速度的传感器溯源方法研究

张毅文

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 在产品交付前, 空空导弹需要做各种模拟寿命周期内经历冲击环境的实验, 其中着陆或发射时的微小量级试验范围小于国内最小冲击加速度校准范围。本文采用冲击校准与振动校准相结合的验证方案, 解决微小量级冲击试验中所用监测传感器无法溯源的难题, 从而保证微小量级冲击试验的可靠性与准确性。

关键词: 冲击校准; 振动校准; 微小量级

中图分类号: TB936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)03-0021-03

Research on Sensor Tracing Chain for Measuring Micro-scale Impact Acceleration

ZHANG Yiwen

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Air-to-air missiles require various impact tests before delivery. The tests simulate various impact environment during the missile's life cycle. The range of micro-scale tests for missile landing or launch is less than the calibration range of domestic minimum impact acceleration. In this paper, shock calibration and vibration calibration are combined. This method solves the problem that the detection sensor used in the micro-scale test cannot be traced to the source. It guarantees the reliability and accuracy of the micro-scale impact test.

Key words: shock calibration; vibration calibration; micro-scale

0 引言

空空导弹在全寿命周期内的运输、装卸、挂飞、发射、着陆等阶段经受机械冲击的作用, 例如, 着陆时垂向加速度量值在 15 m/s^2 左右, 持续时间为 $30 \sim 50 \text{ ms}$; 发射时加速度变化范围为 $15 \sim 150 \text{ m/s}^2$, 一般在 30 m/s^2 左右。为了充分验证导弹寿命周期内的力学冲击效应对产品的结构应力、强度以及绝缘等电性能的影响, 需配套冲击加速度传感器对此类冲击试验过程中产品各部位的冲击加速度量值进行监测。但参照国家计量检定系统表 JJG 2072-2016《冲击加速度计量器具》, 空空导弹着陆、发射时的冲击试验量级低于国家和国防的冲击加速度量值范围, 采用冲击校准无法满足试验监测用传感器的量值溯源要求。而依据国家计量检定系统表 JJG 2054-2015《振动计量器具》, 采用振动校准进行溯源, 又无法确定使用振动灵敏度幅值设定传感器参数, 也无法将其应用在冲击信号的实际测量误差上。因此, 本文基于产品量值溯源的需求, 针对产品试验的实际情况及军工试验标准要求, 研究用于监测微小量级冲击加速度传感器的溯源链, 以及确定其实际测量误差的方法, 从而解决产品研制过程

中微小冲击加速度量值无法溯源的问题。

1 加速度传感器

1.1 加速度传感器特性

加速度传感器具有有限的工作范围, 其灵敏度的幅值随频率和加速度的变化不断地变化。

1) 传感器灵敏度随频率变化

灵敏度随频率的变化表现为: 传感器具有一定的工作频率范围, 当传感器工作频率超出一定范围后, 随着频率的增加, 灵敏度幅值呈非线性急剧增加, 不同频率点灵敏度幅值的最大误差可能达到 20% 甚至更高。图 1 为某公司某型传感器的灵敏度幅频响应曲线。

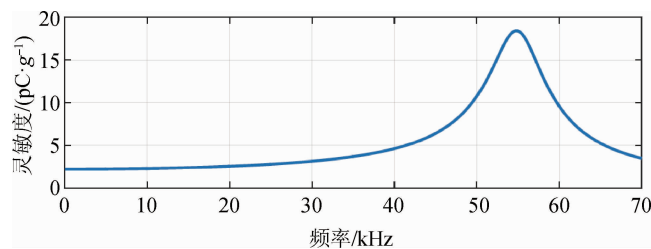


图 1 某型加速度传感器的幅频响应曲线

2) 传感器灵敏度随加速度变化

理想情况下, 加速度传感器为单自由度系统, 在其工作加速度范围内应具有相同的灵敏度。但实际上, 一个典型的加速度传感器是多自由度系统, 影响系统加速度传递的因素很多, 如传感器结构、预紧弹簧、惯性质量、敏感元件、连接件、基座等。这些因素决定了加速度传感器在感受加速度运动时, 其传递特性并非线性, 传感器的电输出与输入的加速度信号之比会随着加速度的大小而变化, 传感器灵敏度具有幅值线性度。

1.2 加速度传感器校准

针对加速度传感器的固有特性, 校准工作主要是在一定的频率和加速度范围内, 对传感器灵敏度幅值进行确定。目前国内外针对加速度传感器的计量校准包括振动校准和冲击校准^[1-2]。

1) 振动校准

以单一频率的正弦运动信号作为激励输入, 作用于被校传感器, 通过比较传感器电输出峰值和冲击加速度峰值获得该频率点的灵敏度幅值; 绘制不同频率点的灵敏度幅值与频率点的关系曲线, 从而获取传感器的幅频响应曲线。标准正弦信号是连续的周期过程, 在频域上表现为离散频谱, 即单一频率点的冲击信号。

2) 冲击校准

主要以传感器的时域峰值灵敏度校准为主, 校准方法是用近似半正弦的冲击加速度脉冲作为校准波形, 作用于被校传感器, 通过比较传感器电输出峰值和冲击加速度峰值获得灵敏度。标准半正弦的冲击加速度脉冲是具有明确起点和终点的非周期过程, 在频域上表现为从 DC 开始的具有无限带宽的连续频谱。

3) 振动、冲击校准结果的区别及应用

冲击校准时, 由于施加给传感器的冲击信号为具有无限带宽的连续频谱, 会引入图 1 中传感器高频段的灵敏度非线性上翘段。因此, 加速度传感器经过振动校准的灵敏度幅值与经过冲击校准的灵敏度幅值具有一定的偏差。

为了获得更为准确的测量结果, 选取通常用于测量周期性振动信号的加速度传感器, 对其进行振动校准获得振动灵敏度幅值; 选取用于测量单次非周期信号的加速度传感器, 对其进行冲击校准获得冲击灵敏度幅值。^[3-4]

2 验证方案及原理

2.1 技术要求

参照 GJB 150.18A-2009《军用装备实验室环境试验方法第 18 部分: 冲击试验》中对冲击试验脉冲波形

容差的规定, 试验时施加给产品的冲击加速度峰值误差在 $\pm 15\%$ 以内; 按照量传关系, 监测用传感器的测量误差应不超过 $\pm 5\%$ 。

产品试验要求为加速度峰值 $15 \sim 30 \text{ m/s}^2$, 脉冲持续时间为 $30 \sim 50 \text{ ms}$, 近似半正弦试验波形。

通常冲击测量系统的工作频率下限不高于 $0.008/T$, 上限不低于 $10/T$, T 为脉冲持续时间。按照产品试验要求, 试验波形覆盖的主要频率范围在 $0.16 \sim 333 \text{ Hz}$ 内。

2.2 验证方案原理

由于试验量级过小, 低于目前国内冲击加速度校准范围的最小值, 因此考虑结合冲击及振动两种校准方式进行验证, 从时域和频域分别验证传感器灵敏度幅值随加速度和频率变化的范围。验证思路如下:

基于振动、冲击国家计量检定系统表, 利用振动与冲击校准方法分别进行传感器灵敏度幅值的校准, 并由此验证当产品试验加速度和频率在一定的范围内变化时, 传感器灵敏度幅值也在其技术要求的范围内。

1) 振动灵敏度幅值与冲击灵敏度幅值的偏差在 $\pm 5\%$ 以内。

比较振动灵敏度幅值与冲击灵敏度幅值的偏差, 比较经振动校准的传感器灵敏度幅值线性度及经冲击校准的灵敏度幅值线性度。

2) 传感器工作频率范围内振动灵敏度幅值变化在 $\pm 5\%$ 以内。

利用振动频域校准方法对传感器在 $0.5 \sim 333 \text{ Hz}$ 频率范围内绘制幅频曲线, 获得传感器在不同频率点的灵敏度相对偏差; 在 $10 \sim 150 \text{ m/s}^2$ 范围内进行幅值线性度的校准, 确定传感器灵敏度幅值的变化范围。

3) 传感器工作频率范围内冲击灵敏度幅值变化在 $\pm 5\%$ 以内。

利用施加冲击激励的频域测试方法对传感器在 $\text{DC} \sim 333 \text{ Hz}$ 频率范围内绘制幅频曲线, 并采用系统辨识的方法进行验证, 确定传感器灵敏度幅值的变化范围。

3 实施过程及结果

使用某计量机构提供的加速度传感器进行测试, 结果如下:

1) 振动灵敏度幅值与冲击灵敏度幅值的偏差

传感器振动灵敏度幅值校准结果 (160 Hz) 为 $0.903 \text{ pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, 传感器冲击灵敏度幅值校准结果为 $0.898 \text{ pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, 两种校准方法的灵敏度幅值偏差为 -0.55% 。传感器振动灵敏度幅值线性度在 $10 \sim 150$

m/s^2 范围内为 0.00%，冲击灵敏度幅值线性度在 $40 \sim 10000 \text{ m/s}^2$ 范围内（最大加速度为 10000 m/s^2 ）为 -0.68%。

2) 传感器工作频率范围内的振动灵敏度幅值变化

利用扫频的方法，在 $10 \sim 150 \text{ m/s}^2$ 加速度范围内和 $0.5 \sim 1000 \text{ Hz}$ 频率范围内，对传感器施加不同频率点的正弦振动信号，绘制其幅频响应曲线，校准结果为：频率范围内传感器灵敏度幅值最大变化为 3.54%，校准不确定度为 3%。

3) 传感器工作频率范围内的冲击灵敏度幅值变化

利用 10000 m/s^2 的冲击加速度激励作为传感器的输入信号，采用实验建模法（也称为系统辨识的方法），对采集到的输入冲击加速度激励和传感器系统的输出电压数据提取信息，从而确定出一个与所测系统等价的差分方程模型。通过对传感器系统差分模型的辨识，绘制传感器幅频响应曲线^[5-7]。校准结果为：在 $\text{DC} \sim 5000 \text{ Hz}$ 频率范围内，传感器灵敏度幅值最大变化为 2.53%，校准不确定度为 5.2%。

4 结论

以上校准结果说明：传感器在 $10 \sim 150 \text{ m/s}^2$ 加速度范围内和 $0.5 \sim 1000 \text{ Hz}$ 频率范围内，经过振动校准，灵敏度幅值变化最大为 3.54%；传感器在 $40 \sim 10000 \text{ m/s}^2$ 加速度范围内和 $\text{DC} \sim 5000 \text{ Hz}$ 频率范围内，经过冲击校准，灵敏度幅值变化最大为 2.53%。其中振动校准和冲击校准在加速度和频率范围内有部分范

围重叠，可确定传感器在实际应用加速度和频率范围内的灵敏度幅值变化范围在 $\pm 5\%$ 以内，满足产品试验监测应用的性能指标要求。

参考文献

- [1] 《振动与冲击手册》编辑委员会. 振动与冲击手册[M]. 北京：国防工业出版社，1988.
- [2] 杨承志. 系统辨识与自适应控制[M]. 重庆：重庆大学出版社，2003.
- [3] 何旋，曹亦庆，李善明. 便携式冲击加速度激励装置研究[J]. 新技术新仪器，2019，39(6)：40-45.
- [4] 孙桥，王建林，胡红波. 低 g 值碰撞式冲击加速度计量标准装置研究与建立[J]. 振动与冲击，2015，10(34)：179-182.
- [5] 方崇智. 过程辨识[M]. 北京：清华大学出版社，1988.
- [6] 任红磊，邵新慧. 加速度计高频振动校准中的相关问题[J]. 计测技术，2010，30(4)：33-35.
- [7] 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.

收稿日期：2020-02-10；修回日期：2020-03-05

作者简介

张毅文，女，助理工程师，主要从事力学、温度计量测试技术等研究。

