

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.11

脉冲力校准中锤体质量块结构与受力方式对校准结果的影响分析

何旋¹, 贺丽², 曹亦庆¹, 李善明¹, 商一奇¹, 赵巍宇¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要: 在脉冲力校准中, 锤体质量块的力学性能会对校准结果产生较大影响。本文采用有限元手段, 对锤体质量块的结构设计方案和受力方式进行分析, 得出锤体质量块动态特性的影响因素, 总结脉冲力校准中锤体质量块设计和使用时应遵循的规律, 为动态冲击计量标准装置的研建提供借鉴。

关键词: 脉冲力; 加速度; 有限元; 锤体质量块; 长径比

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)05-0059-06

Effect of Structural Design and Load Mode of Hammer Mass on Calibration Result in Impulse Force Calibration

HE Xuan¹, HE Li², CAO Yiqing¹, LI Shanming¹, SHANG Yiqi¹, ZHAO Weiyu¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Beijing Institute of Radio Metrology & Measurements, Beijing 100039, China)

Abstract: The mechanical properties of hammer mass have a great impact on the result of impulse force calibration. In this paper, the finite element method is used to analyze the structural design and load mode of the hammer mass, and the influence of the above factors on the dynamic characteristics of hammer mass is obtained. The rules that should be followed in hammer mass design and use in impulse force calibration are summarized.

Key words: impulse force; acceleration; finite element; hammer mass; aspect ratio

0 引言

脉冲力校准的原理是: 驱动锤体质量块运动速度在极短时间内产生突然变化, 激发冲击加速度脉冲, 传递与加速度脉冲变化趋势一致的脉冲力作用于被校力传感器上^[1-2]。锤体质量块在冲击过程中受到应力波传递及形变等因素影响, 其加速度峰值分布存在一定的变动性, 会影响校准结果的准确性^[3]; 由于力传感器的尺寸不同, 因此冲击过程中锤体质量块与被校力传感器接触截面积不同, 导致锤体质量块的动态响应不同, 也会影响校准结果^[4]。因此, 分析锤体质量块的结构设计及受力方式对其校准结果的影响非常必要。

1 锤体质量块物理模型

锤体质量块的结构外形如图 1 所示, 为直径不同的圆柱组合体。其中, 力传感器接触面是锤体质量块与被校动态力传感器在冲击过程中的撞击面。锤体提升面是锤体质量块与提升装置的接触面。为了实现大

幅值冲击, 锤体设有配重, 用来增加锤体的质量。为了保证锤体质量块在冲击过程中与被校动态力传感器轴线的同轴度, 设计了圆倒角的锤体对中环, 使锤体质量块复位后能够准确对中。

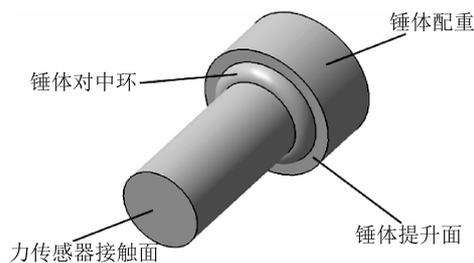


图 1 锤体质量块外形结构

2 影响脉冲力校准结果的因素分析

脉冲力发生装置利用锤体质量块的加速度与质量的乘积来复现力值, 目前, 锤体质量块质量的测量方法已较成熟, 测量误差在 10^{-6} 量级左右^[5], 而加速度

测量的误差分量在脉冲力合成测量误差中占据主导地位^[6]。锤体质量块在冲击过程中受到应力波传递及形变等因素的影响,其加速度峰值分布存在一定的变动性,此变动性是加速度测量误差的主要来源之一,在力值较大、脉冲宽度较窄的情况下,直接影响脉冲力的复现误差,在一定程度上阻碍了脉冲力校准向大力值、窄脉宽的方向发展^[7]。

影响锤体质量块加速度变动性的因素与冲击过程中的受力情况及其本身的结构形式有关。在冲击过程理论分析中,可将其受力形式简化为受到轴向的半正弦脉冲力。由于被校力传感器与锤体质量块的直径大小不同,导致锤体质量块在冲击过程中的受力面积不同,会影响其加速度变动性。由于锤头采用圆柱形设计,对其动态力学性能产生主要影响的变量是锤体的大小和长径比。因此,采用建模方式分析以上因素对锤体质量块加速度变动性的影响。

3 数学模型定义

本文采用 Patran/Nastran 有限元分析软件对锤体质量块冲击过程进行模拟和计算。采用冲击法进行脉冲力校准时,锤体质量块与被校传感器在一个冲击脉冲过程中,锤体质量块受到的力和产生的加速度都随着冲击过程的时间历程而改变。采用有限元分析软件对锤体质量块进行建模,假设在 t 时刻锤体质量块加速度达到峰值,则其平均加速度峰值计算方法为

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

式中: a_i 为第 i 个单元加速度幅值, m/s^2 ; m_i 为第 i 个单元的质量, kg ; n 为单元个数; \bar{a} 为加速度峰值平均值, m/s^2 。

进而可得到冲击加速度峰值分布变动性的计算公式,有

$$a_{\Delta} = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{\bar{a}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: a_{\max} 为加速度最大单元的冲击加速度幅值; a_{\min} 为加速度最小单元的冲击加速度幅值; a_{Δ} 为锤体质量块有限元模型加速度变动性。

在对锤体质量块进行有限元建模时,对于正体有限元网格的划分应满足瞬态响应分析的要求,锤体质量块上、下表面内加速度的测量点数应均不少于 5 个。为得到较为完整的面内加速度峰值分布,在有限元模

型中,应保证锤体质量块上、下表面内沿直径分布的单元数均不少于 10 个,并保证网格关于锤体质量块横截面的中心线轴对称,避免因网格质量导致的加速度计算偏差。实验中应主要关注锤体质量块上、下表面加速度及锤体质量块变径位置的加速度。为保证单元的刚度矩阵不出现奇异,应在网格创建过程中保证每个单元的最大边长与最小边长的比值不超过 2:1,并对锤体质量块上、下表面及变径处的网格进行适当细化。基于以上原则,建立锤体质量块的有限元模型如图 2 所示。

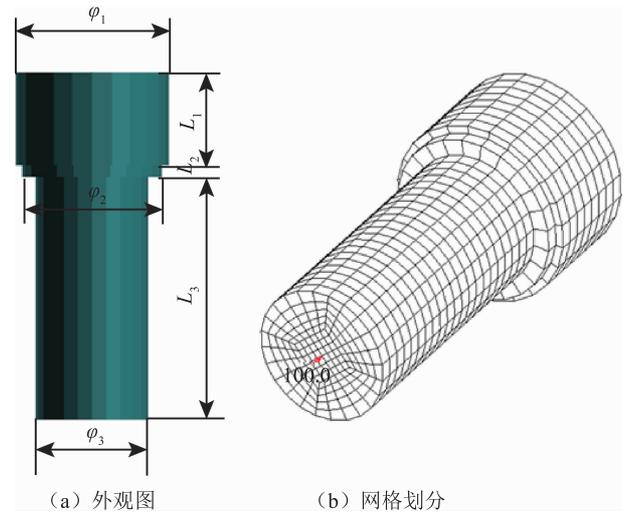


图 2 锤体质量块数学分析模型

4 有限元方法计算准确度验证

在用有限元分析软件进行计算之前,需要采用试验的方法验证软件计算准确度。为提高计算效率,在定义锤体质量块计算模型时,对其便捷条件进行简化处理,即锤体不添加位移约束,其受力方式为轴向半正弦激励。取一力传感器接触面直径为 100 mm、长径比为 3:1 的锤体质量块,其质量为 22.794 kg,节点数为 4159,单元数为 3600。在此锤体质量块与被校传感器接触面上施加一个激励,使锤体产生峰值为 30 g 的加速度及 10 ms 的脉宽,根据锤体质量计算出施加半正弦力的大小。通过有限元分析及前文的经验公式,计算加速度变动性,并在表 1 中列出。

根据数学分析模型中定义的锤体质量块特性,制作一个锤体质量块实体,采用跌落法,利用加速度传感器测量锤体质量块在冲击过程中的加速度分布变动性。在锤体质量块轴线位置安装加速度传感器,再在远离轴线的边缘位置安装加速度传感器,进行冲击试验,测量锤体质量块不同位置的加速度,计算其加速

度峰值变动性。试验采用的仪器设备如表 2 所示，试验结果如表 3 所示。

表 1 直径 100 mm、长径比 3:1 的锤体质量块有限元分析结果

脉宽 /ms	平均加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	最大加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	最小加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	加速度变动性/%
10	307.1078	313.708	307.106	2.150

表 2 测试用仪器设备

序号	设备名称	型号	编号	测量范围
1	单向冲击加速度传感器	4384V	30209	0 ~ 20000 m/s^2
2	单向冲击加速度传感器	4384V	30759	0 ~ 20000 m/s^2
3	电荷放大器	2692 - C - 001	2723857	0 ~ 100 nC
4	数据采集系统	-	-	± 10 V

表 3 加速度峰值变动性试验结果

脉宽 /ms	平均加速度/g	中心点加速度/g	边缘点加速度/g	加速度变动性/%
9.86	28.98	29.27	28.69	2.00

由表 1 和表 3 数据比较可知，有限元算法的分析结果与试验得出的加速度变动性测量结果比较相近，证明了其可行性。因此，可以利用有限元软件对锤体质量块的动态性能进行分析。

5 锤体质量块受力方式对加速度分布的影响分析

继续以前文中建立的锤体质量块有限元模型为研究对象，由于其下端面直径与动态力传感器的直径可能存在一定差异，因此加载有限元模型时，应考虑受载面积对其加速度分布变动性的影响。具体方法为：分别对各锤体质量块下端面施加幅值和脉宽不同的力，根据加载面积大小分为单点加载、局部面加载、整个面加载三种方式，如图 3 所示。

对长径比 3:1、质量 22.81 kg 的锤体质量块的下端面施加单点载荷，实验结果如表 4 所示。

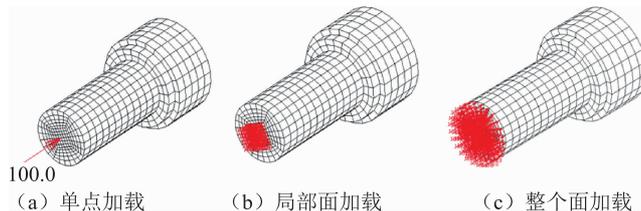


图 3 锤体质量块有限元模型的三种加载区域示意图

表 4 施加单点载荷时动态响应分析结果

载荷峰值 /kN	脉宽 /ms	平均加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	最大加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	最小加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	加速度变动性 /%
7	10	307.1078	313.708	307.106	2.150
110	5	4825.988	5136.02	4824.15	6.465
230	0.5	10090.52	11246	9080.68	23.85

由表 4 中数据可知，以单点载荷的方式将脉冲持续时间为 10 ms 的激励加载到锤体质量块有限元模型后，计算得到的最大与最小加速度的变动性接近 2%；在脉冲持续时间为 5 ms 的单点载荷激励下，最大与最小加速度的变动性已经超过了 6%；而在脉冲持续时间为 0.5 ms 的单点载荷激励下，最大与最小加速度的变动性达到了近 24%。

其他实验条件不变，对锤体质量块下端面施加局部面载荷，结果如表 5 所示。

表 5 施加局部面载荷时动态响应分析结果

载荷峰值 /kN	脉宽 /ms	平均加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	最大加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	最小加速度 / $(m \cdot s^{-2})$	加速度变动性 /%
7	10	307.1078	307.992	307.104	0.2892
110	5	4825.988	4837.03	4824.19	0.2662
230	0.5	10090.52	11233	9690.71	15.92

根据表 5 中数据可知，以局部面载荷的方式将脉冲持续时间分别为 10 ms，5 ms 的激励加载到锤体质量块有限元模型后，计算得到的最大与最小加速度的变动性接近 0.3%，而在脉冲持续时间为 0.5 ms 的局部面载荷激励下，最大与最小加速度的变动性近 16%。与单点加载方式相比，采用局部面加载方式计算得出的最大与最小加速度的变动性明显减小。

其他实验条件不变，对锤体质量块下端面施加整个面载荷，结果如表 6 所示。

表 6 施加整个面载荷时动态响应分析结果

载荷峰值/kN	脉宽/ms	平均加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	最大加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	最小加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	加速度变动性/%
7	10	307.1078	307.352	307.096	0.08336
110	5	4825.988	4827.56	4824.2	0.06965
230	0.5	10090.61	11220.6	9939.91	12.88

由表 6 中数据可知, 以整个面载荷的方式将脉冲持续时间分别为 10 ms, 5 ms 的激励加载到锤体质量块有限元模型后, 计算得到的最大与最小加速度的变动性不超过 1%, 而在脉冲持续时间为 0.5 ms 的整个面载荷激励下, 最大与最小加速度的变动性近 13%。

根据三种不同加载方式的锤体有限元模型瞬态分析结果可知, 锤体质量块的冲击加速度峰值分布变动

性与加载区域面积有关, 在下端面中心点单点加载, 冲击加速度峰值变动性最差, 在下端面整个面上加载, 冲击加速度峰值变动性最优, 即加载区域越大, 冲击加速度峰值分布越均匀。反应到具体的传感器校准过程中, 即被校动态力传感器的直径越接近锤体质量块下端面的直径, 锤体质量块的冲击加速度峰值分布越均匀, 反之则均匀性越差。因此, 校准时应避免出现被校传感器直径远小于锤体质量块直径的情况, 这将大大影响脉冲力校准结果。

6 锤体结构设计对加速度分布的影响

6.1 锤体质量块质量大小对加速度分布的影响

按照 3:1 的长径比, 建立下端面直径为 30 ~ 100 mm 的一组锤体质量块有限元模型, 其数据如表 7 所示。各锤体质量块分析结果如表 8 所示。

表 7 长径比为 3:1 时, 各锤体质量块有限元模型数据

锤体编号	下端面直径/mm	长径比	质量/kg	节点数	单元数
1-1	30	3:1	0.7387	3691	3216
2-1	40	3:1	1.6347	3433	2952
3-1	50	3:1	2.8626	5695	5088
4-1	60	3:1	5.9776	6181	5496
5-1	80	3:1	12.587	3385	2904
6-1	100	3:1	22.794	4159	3600

表 8 长径比为 3:1 时, 锤体质量块动态响应分析结果

锤体编号	载荷峰值/kN	脉宽/ms	平均加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	最大加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	最小加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	加速度变动性/%
1-1	0.2	10	270.7681	270.964	270.772	0.07091
	3	5	4061.541	4065.54	4061.48	0.09996
	6	0.5	8123.232	8191.81	8122.32	0.8555
2-1	0.48	10	293.638	293.932	293.644	0.09808
	7	5	4282.221	4285.9	4282.38	0.08212
	13	0.5	7952.848	8085.65	7959.94	1.579
3-1	0.85	10	296.9395	297.335	296.952	0.1290
	11	5	3842.738	3846.91	3842.57	0.1129
	22	0.5	7685.652	7945.79	7648.56	3.886
4-1	2	10	334.593	334.993	334.589	0.1207
	30	5	5018.896	5026.12	5018.12	0.1594
	60	0.5	10037.86	10589.2	10030	5.575
5-1	4	10	317.7977	318.059	317.797	0.08244
	60	5	4766.966	4768.97	4765.89	0.06463
	120	0.5	9534.202	9783.51	9499.63	2.988
6-1	7	10	307.1078	307.352	307.096	0.08336
	110	5	4825.988	4827.56	4824.2	0.06965
	230	0.5	10090.61	11220.6	9939.91	12.88

分析以上数据可知,质量较小的锤体质量块的冲击加速度峰值分布变动性明显优于质量较大的锤体质量块,这是由于在形状相似的前提下,锤体质量块质量越大,谐振频率越低,更容易产生谐振,导致加速度分布不均匀。因此锤体质量块加速度变动性随着锤体质量块质量的增大而增大。

6.2 锤体质量块长径比对加速度分布的影响

采用整个面加载的形式,在质量不变的前提下,按照 5:1 的长径比,建立下端面直径为 30~100 mm 的一组锤体质量块有限元模型,如表 9 所示,各锤体质量块分析结果如表 10 所示。

表 9 长径比为 5:1 时,各锤体质量块有限元模型数据

锤体编号	下端面直径/mm	长径比	质量/kg	节点数	单元数
1-2	30	5:1	0.741	5719	5088
2-2	40	5:1	1.635	5369	4680
3-2	50	5:1	2.859	9075	8208
4-2	60	5:1	5.974	9661	8664
5-2	80	5:1	12.63	5321	4632
6-2	100	5:1	22.75	6579	5760

表 10 长径比为 5:1 时,锤体质量块动态响应分析结果

锤体编号	载荷峰值/kN	脉宽/ms	平均加速度/($m \cdot s^{-2}$)	最大加速度/($m \cdot s^{-2}$)	最小加速度/($m \cdot s^{-2}$)	加速度变动性/%
1-2	0.2	10	280.4097	280.553	280.409	0.05135
	3	5	3738.783	3739.91	3738.78	0.03022
	6	0.5	8412.45	9036.57	8394.27	7.652
2-2	0.48	10	289.2804	289.395	289.28	0.03975
	7	5	3719.32	3720.10	3718.99	0.02985
	13	0.5	7852.084	8873.98	7833.03	13.29
3-2	0.85	10	227.48	227.533	227.479	0.02374
	11	5	4094.631	4095.66	4094.31	0.03297
	22	0.5	7961.925	9324.59	7880.94	18.32
4-2	2	10	289.7798	289.882	289.78	0.03520
	30	5	4636.475	4637.89	4634.12	0.08135
	60	0.5	9852.748	12506.3	9831.88	27.20
5-2	4	10	265.0034	265.058	264.979	0.02981
	60	5	4770.067	4772.64	4765.85	0.1425
	120	0.5	10070.28	12535.1	9853.48	27.21
6-2	7	10	285.2162	285.282	285.191	0.03191
	110	5	4848.702	4853	4840.47	0.2589
	230	0.5	9982.611	13872.7	9957.37	39.32

分析以上数据可知,长径比为 3:1 的锤体质量块的冲击加速度峰值分布变动性明显优于长径比为 5:1

的锤体质量块,这是由于在质量相同的情况下,长径比大的锤体轴向长度较长,其轴向谐振频率较低,在

受到与其轴向谐振频率较为接近的干扰时，更容易产生谐振，导致加速度分布不均匀。可见，锤体质量块加速度变动性随锤体质量块长径比的增大而增大。

7 结束语

通过本文的研究，得出了冲击过程中锤体质量块受力面积和长径比对加速度分布规律的影响规律：当锤体质量块撞击面积与被校动态力传感器接触面积接近时，加速度分布均匀；锤体质量块撞击面积大于被校动态力传感器接触面积时，加速度分布趋于不均匀，而且加速度变动性随着锤体质量块与被校动态力传感器受力面积之差的增大而增大。在锤体质量块的外形近似，质量、材料恒定的前提下，锤体质量块的长径比越大，加速度分布越不均匀；锤体质量块长径比适当减小，加速度分布趋于均匀。本文的研究对脉冲力校准中锤体质量块的设计提供了理论支撑，为动态冲击计量标准装置的研建提供重要参考。

参 考 文 献

[1] Kobusch M, Link A, Buss A, et al. Comparison of shock and sine force calibration methods[J]. Merida, 2007.

[2] 杨军, 张力, 樊尚春. 可溯源动态压力校准方法[J]. 计测技术, 2014, 34(2): 7-12.

[3] 振动与冲击手册, 第 1 卷[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

[4] 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.

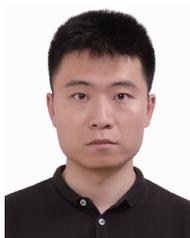
[5] 尹肖, 张力, 王宇, 等. 动态力校准中力传感器端部等效质量测量方法研究[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 50-53.

[6] 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.

[7] 王宇, 张力, 张立喆, 等. 正弦力校准中质量块加速度分布影响的理论修正研究[J]. 计测技术, 2010, 30(3): 1-4.

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-07-29

作者简介



何旋(1987-), 男, 硕士研究生, 2014年毕业于南京航空航天大学, 获工学硕士学位, 现于航空工业计量所从事航空器产业计量测试研究工作。

(广告)

《宇航计测技术》2019 年第 5 期目次

大型双反射紧缩场幅相特性校准技术研究
 基于双谱的 eLORAN 接收机干扰抑制方法研究
 铷频标温度系数影响因素分析与改进方法研究
 矢量信号调制质量分析方法研究与实现
 (0.1~1.8)GHz SiGe HBT 超宽带低噪声放大电路设计
 基于光纤双环网的高精度时频同步技术研究
 基于扩频体制的短波时号发播新方案及可行性分析
 本地标准时间频率的产生与保持
 时频系统数字锁相技术研究

针对地线扰动的一种地线电流自动补偿方法
 常闭式电磁制动器驱动结构设计及性能分析
 红外地球敏感器光电组件测试技术研究
 基于 CCD 自动巡线智能小车设计
 无人机测控系统误差分析
 卫星磁载荷现场校准技术研究
 我国计量行业法规政策和发展趋势分析
 探寻科学计量科研管理方法夯实企业发展基础
 国防军工计量技术机构保密监督检查实践