

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.07

脉冲力校准装置锤体质量块设计及数据验证

商一奇, 何旋, 李善明, 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: 脉冲力发生装置的锤体质量块是脉冲力发生装置的重要组成部分, 锤体质量块的结构固有频率是保证动态力校准精度的重要条件, 通过对锤体质量块的设计及改进进行了描述和验证, 最后通过数据验证说明设计是合理的, 满足对动态力传感器的校准需求。

关键词: 动态力; 锤体; 模态

中图分类号: TB931

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0026-04

The Designs and Data Verification of Hammer Mass Block of Impulse Force Generator

SHANG Yiqi, HE Xuan, LI Shanming, CAO Yiqing

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

Abstract: As the important components of impulse force generator, The structure and natural frequency of hammer mass block are important conditions to ensure the precision of dynamic force calibration. This paper designed and improved the hammer mass block. It can satisfy satisfied the dynamic force calibration of force sensor, and certify certified the good performance specification of the designation based on the experimental data.

Key words: dynamic force; hammer mass block; modal analysis

0 引言

锤体形状及质量是影响落锤式脉冲力发生器产生脉冲力幅值的主要因素之一, 落锤式脉冲力发生器产生的脉冲力幅值和脉宽主要受锤体质量、高度及波形发生器的厚度、材料的硬度等因素影响^[1]。

因此, 需要根据发生器幅值范围进行设计计算。通过锤体的外形设计及模态分析来保证在脉冲力发生器校准的脉宽内, 锤体固有频率不会被激发, 以保证校准需求。本文通过对锤体的设计、模态分析、锤体材质和试验验证等过程, 让锤体满足落锤式脉冲力发生器对动态力传感器的需求。

1 锤体模型设计

1.1 锤体物理模型

锤体质量块以一定的初速度与被校力传感器进行碰撞以施加脉冲力。锤体质量块的固有频率是限制频率范围的主要因素, 为保证锤体质量块在撞击过程中的固有频率不会被激发, 其几何形状以圆柱形为基础, 在顶端增大半径, 使之能够支撑与扶正机构之上, 选择合适的长径比, 保证锤体质量块的固有频率在十几千赫兹左右, 以满足脉冲力发生装置设计的最窄持续时间指标。

机械加工中, 常用长径比说明工件刚度大小, 如果对于轴, 若长径比不大于 5, 则称为刚性轴, 因此锤体的长径比要小于 5; 长径比高时, 锤体的固有频率会随之降低, 同时随着锤体端面面积增大, 端面加速度的分布不均度也可能随之增大。因此, 需要选择比较适中的长径比, 既要保证锤体的刚度, 又要保证锤体的固有频率和加速度分布。

轴向一阶共振谐振频率为

$$\omega_i = \frac{(2i-1)\pi}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{rad/s}) \quad (1)$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{2i-1}{4L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{2i-1}{4L} \sqrt{\frac{2 \times 10^{11}}{7800}} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量, $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$; ρ 为密度, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$; i 为长径比; L 为锤长。

锤体物理模型如图 1 所示。由于被校动态力传感器多为环状, 该锤体设计检定传感器最大量程为 120 kN, 一般量程为 50 ~ 120 kN 的传感器直径为 40 ~ 60 mm, 为了在冲击时使锤体与该传感器能够完全接触, 锤体直径取 $\Phi 3 = 60 \text{ mm}$ 。由于台面为托架结构, 当长径比取小于 3 ~ 5 时, 锤体在 1 ms 冲击脉宽的前提下具有较好的固有频率特性。

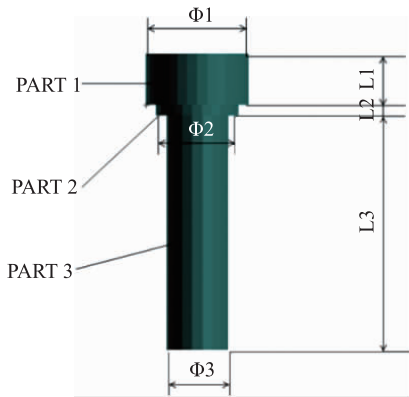


图1 锤体物理模型示意图

1.2 锤体有限元模型定义

锤体有限元模型如图2所示。采用Hex单元建模，模型中共有节点1932个，单元1479个。锤体总质量为8.5 kg，采用不锈钢材料，其材料属性如表1所示。

表1 不锈钢材料力学性能

性能	弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg·mm ⁻³
数值	2.0×10^5	0.33	7.9×10^{-9}

有限元模型仿照试验时的真实受力情况进行边界条件设置。冲击时，为使锤体尽可能保证垂直下落，并与被校传感器的轴线尽量重合，需限制图1中PART2部分锤体的横向位移；在锤体与传感器接触时，接触端面处锤体和传感器在横向无相对运动，因此在接触端面也要对锤体的横向位移进行限制，锤体的轴向运动自由。边界条件如图3所示。



图2 锤体有限元模型锤体 图3 有限元模型边界条件

2 垂体结构模态分析

2.1 锤体的固有频率特性分析

物体的固有频率是物体本身的性质，与边界条件无关。采用上述有限元模型，不加载边界条件，对锤体进行固有频率分析，其分析结果如图4所示。锤体的一阶固有频率为2405.8 Hz，振动方向为横向。由试验数据可知，锤体在冲击时其横向分量小于3%，横向激励很小，因此该频率模态不是主要分析对象，需在

此基础上对有限元模型加载轴向激励，对其轴向的固有频率特性进行研究。

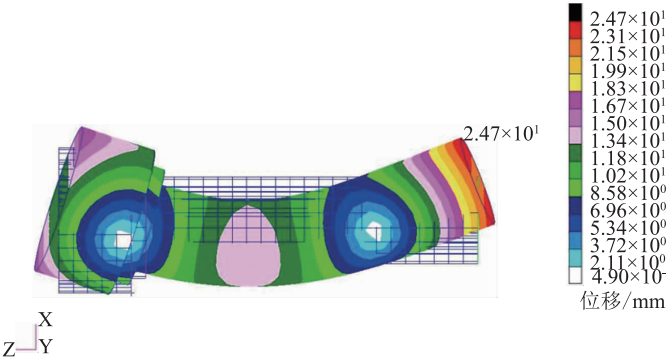


图4 锤体有限元模型一阶固有频率分析结果

脉冲应用中，分析冲击对确定的机械系统产生的影响极其重要。一般情况下，对于冲击过程更有效的描述可以简单的用傅里叶变换。也就是我们研究锤体固有频率的意义所在。通常傅里叶变换是复数，而冲击运动的时间历程是一种典型的非周期信号，正常时不能按数学的方法分解成许多正弦谐波之和，但为了解其频域描述，可以把一个非周期信号当作周期信号来处理，只是认为这一周期信号的周期极大，在无限远处重复。因而半正弦加速度冲击脉冲的频域描述为

$$F[a(t)] = \int_0^T a_p \sin \frac{\pi t}{T} e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

振幅和相位谱的表达式为

$$F[a(t)] = \frac{2a_p T}{\pi} \left| \frac{\cos \cos\left(\frac{\omega T}{2}\right)}{1 - (\omega T/\pi)^2} \right| \quad (\omega \neq \frac{\pi}{T}) \quad (4)$$

$$F[a(t)] = \frac{a_p T}{2} \quad (\omega = \frac{\pi}{T}) \quad (5)$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\omega T}{2} + n\pi \quad (6)$$

图5为典型半正弦冲击时间函数和它的傅里叶变换的频谱图。一个冲击脉冲包含的能量分布是从零频率扩展到无限频率，并且是没有分离频率分量的连续频谱。经分析可知，锤体的垂直轴向固有频率理论上只要高于在输入轴向上的脉宽，即当大于1 ms的激振频率情况下，就不会对碰撞过程的幅值造成较大影响^[2]。通过上述原理及换算可看出，当轴向固有频率大于1600 Hz时，锤体的设计符合要求。以下对锤体有限元模型轴向加速度的频率响应进行分析。

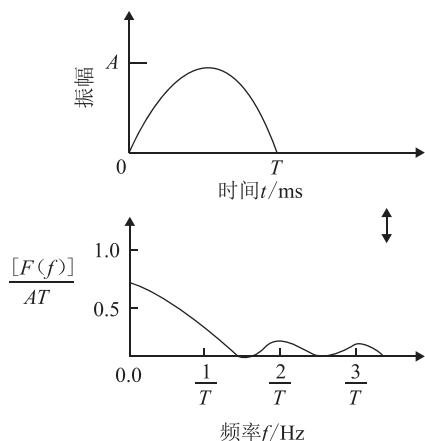


图5 典型半正弦冲击时间函数和傅里叶变换的频谱图

2.2 锤体有限元模型轴向加速度的频率响应分析

通过锤体的固有频率特性分析和试验测试数据了解到, 轴向固有频率的高低对本装置的影响极为重要。通过对有限元模型前 50 阶振动模式分析均不是轴向的谐振频率。无法便捷分析出轴向的固有频率。

在锤体与传感器接触的端面加载一大大小为 45815 N (锤体加速度为 550 g)、频率范围为 0 ~ 10 kHz 的变频率力。在有限元模型中加载前文 1.2 中设置的边界条件, 在 0 ~ 10 kHz 频段对模型的轴向加速度进行频响分析。图 6 是锤体有限元模型中 1932 个节点的频率响应曲线, 从中可以看出有限元模型中每个节点的频响曲线的共振峰都在 7000 ~ 8000 Hz 之间。以此为依据, 再次对有限元模型进行模态分析, 只研究振动频率在 7000 Hz 以上的模态, 得到有限元模型的轴向谐振频率为 7231.2 Hz, 如图 7 所示。

有限元分析给出的数据不能完全准确的体现实际谐振频率, 但整体谐振频率不会相差太多, 通过整体模态及垂向加载可看出, 锤体的谐振频率在装置设计的目标值 1 ms 脉宽的频率之外。

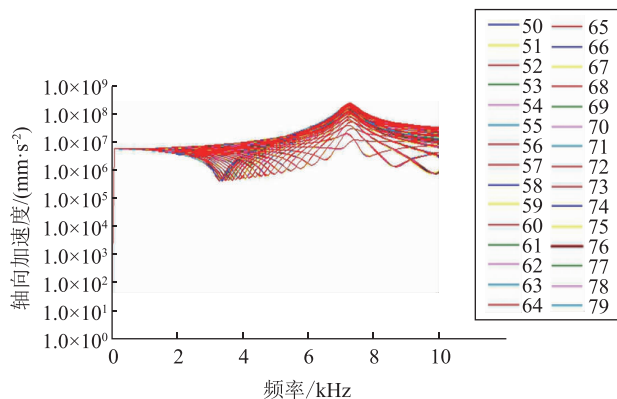


图6 锤体频率响应曲线

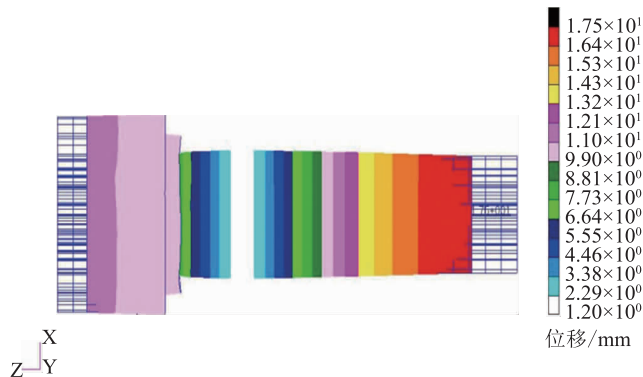


图7 轴向振动模式

3 锤体的材质

为保证力传感器受力准确, 锤体质量块下端与力传感器的撞击面的半径不能过大, 以不超过力传感器受力面半径为宜, 常用的大量程力传感器的半径在 40 ~ 60 mm。锤体上端支撑面过大, 会导致加速度分布不均匀度增大、质量块重心过高, 撞击后稳定度较差、摆动过大且不易限位, 易造成磕碰产生损伤。因此锤体质量块的设计需要尽可能减小质量块的尺寸以增加质量, 采用常规的钢材和特殊合金的材质来制作不同重量的锤体, 密度达到常用不锈钢材质的 2 ~ 3 倍左右的合金, 在不增加锤体质量块尺寸的前提下, 大大提高了发生装置的力值范围, 并降低了对加速度峰值和持续时间的要求。

4 锤体试验验证

设计先期制作了一款锤体, 锤体质量块如图 8 所示。由于该锤体质量块的变径处没有过渡, 校准时的波形基本圆滑, 导致锤体放入扶正机构后, 导向性不好, 试验后的横向运动比较差, 超过设计指标 3%, 试验数据如表 2 所示。

后经修改设计, 将锤体质量块变径处增加过渡带, 加强导向性, 如图 9 所示。试验后的横向加速度较好, 能够满足项目 3% 的横向运动比的需求, 试验数据如表 3 所示。

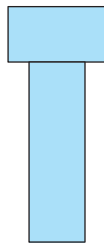


图8 先期锤体质量块

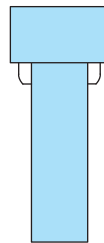


图9 改后锤体质量块

表 2 锤体质量块跟产试验数据

测量 次数	主方向			横向 1	横向 2	横向	加速 度峰 值重 复性	跌落 高度
	冲击加 速度峰 值/g	持续 时间 /ms	速度 变化 /(m·s ⁻¹)	冲击加 速度峰 值/g	冲击加 速度峰 值/g	加速 度比 /%	/%	/mm
1	29.36	8.56	1.464	0.40	0.73	2.50	1.50	150
	30.13	8.50	1.493	0.41	0.73	2.43		
	29.99	8.51	1.488	0.38	0.71	2.36		
	30.75	8.47	1.516	0.48	0.72	2.34		
	30.30	8.46	1.500	0.37	0.74	2.43		
	30.18	8.51	1.495	0.41	0.78	2.57		
2	14.05	10.44	0.854	0.18	0.31	2.21	0.85	110
	13.98	10.46	0.852	0.19	0.28	2.00		
	14.28	10.44	0.867	0.18	0.28	1.96		
	14.07	10.27	0.866	0.19	0.39	2.77		
	13.97	10.50	0.853	0.19	0.28	2.00		
	13.97	10.49	0.853	0.22	0.28	2.00		
3	19.89	9.51	1.100	0.21	0.52	2.61	2.32	125
	20.04	9.49	1.108	0.23	0.52	2.59		
	20.22	9.47	1.116	0.24	0.52	2.57		
	20.76	9.41	1.136	0.31	0.58	2.79		
	20.92	9.40	1.142	0.25	0.62	2.96		
	20.98	9.39	1.145	0.24	0.63	3.00		
4	106.01	6.00	3.701	5.71	5.74	5.41	0.32	410
	105.95	6.08	3.718	8.11	8.01	7.65		
	105.76	6.09	3.707	7.99	8.22	7.77		
	106.25	6.01	3.710	7.81	7.00	7.35		
	106.41	6.01	3.713	8.14	7.73	7.65		
	106.71	6.00	3.704	7.46	6.47	6.99		
5	188.91	5.04	5.788	8.06	7.02	4.27	0.30	570
	189.69	4.89	5.738	9.07	6.36	4.78		
	189.72	4.89	5.717	8.42	8.37	4.44		
	189.25	4.89	5.673	9.54	8.62	5.04		
	190.47	5.01	5.834	8.49	6.49	4.46		
	190.20	5.01	5.796	7.04	7.00	3.70		
6	498.92	1.11	3.069	24.94	12.38	5.00	0.51	420
	498.18	1.11	3.066	26.29	12.83	5.28		
	498.15	1.11	3.068	25.09	12.82	5.04		
	496.43	1.11	3.064	20.00	11.75	4.03		
	492.93	1.12	3.057	25.21	14.36	5.11		
	493.73	1.12	3.052	35.73	29.07	7.24		

5 结 论

通过对脉冲力发生器锤体的设计, 模式分析和试验验证, 使发生装置的频响、横向、均匀性及重复性等数据均优于设计指标, 装置达到了预期效果, 研究结果表明, 该锤体可以满足动态力传感器的校准需求。

参 考 文 献

[1] 孟峰, 张跃, 张智敏, 等. 脉冲式动态力校准装置发展动态[J]. 计量技术, 2011(5): 47-50.

表 3 锤体质量块跟产试验数据

测量 点数	主方向			横向 1	横向 2	横向	加速 度峰 值重 复性	跌落 高度
	冲击加 速度峰 值/g	持续 时间 /ms	速度 变化 /(m·s ⁻¹)	冲击加 速度峰 值/g	冲击加 速度峰 值/g	加速 度比 /%	/%	/mm
1	21.08	16.68	2.22	0.30	0.22	1.44	0.88	100
	20.66	16.72	2.18	0.25	0.37	1.77		
	21.05	16.64	2.22	0.26	0.30	1.42		
	20.80	16.68	2.19	0.26	0.30	1.45		
	21.04	16.64	2.22	0.25	0.29	1.37		
	21.12	16.64	2.23	0.27	0.31	1.45		
2	101.80	4.21	2.52	1.77	1.60	1.74	0.55	180
	101.89	4.21	2.52	2.06	1.42	2.02		
	102.41	4.19	2.53	2.19	1.55	2.14		
	102.69	4.18	2.53	2.03	1.47	1.98		
	103.22	4.19	2.54	2.20	1.47	2.14		
	102.92	4.18	2.54	2.32	1.51	2.26		
3	204.25	2.80	3.33	1.98	0.00	0.97	0.53	300
	204.62	2.74	3.28	2.69	3.24	1.58		
	202.54	2.76	3.29	2.69	3.33	1.64		
	203.46	2.75	3.29	2.62	2.86	1.41		
	203.44	2.78	3.28	2.84	2.93	1.44		
	205.62	2.74	3.30	2.44	3.29	1.60		
4	326.31	1.97	3.51	3.88	2.72	1.19	1.95	380
	316.54	2.02	3.50	5.82	2.80	1.84		
	322.71	2.00	3.52	2.15	2.98	0.92		
	309.17	2.06	3.49	2.72	3.41	1.10		
	318.59	2.02	3.53	3.99	3.08	1.25		
	313.41	2.04	3.52	3.65	2.89	1.17		
5	517.77	1.60	4.61	2.29	5.03	0.97	1.35	680
	502.54	1.64	4.59	6.06	4.91	1.21		
	503.62	1.64	4.60	7.27	3.19	1.44		
	514.39	1.62	4.63	3.60	4.58	0.89		
	501.93	1.64	4.61	4.68	5.60	1.12		
	504.34	1.62	4.61	4.33	4.09	0.86		

[2] 洪宝林. 力学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 240-241.
[3] 于梅, 孙桥. 基于激光绝对法冲击校准技术的动态力测量方法的研究[J]. 现代测量与实验室管理, 2004, 12(4): 5-8.
[4] 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.

收稿日期: 2018-01-10



商一奇(1982-), 男, 黑龙江人, 工学硕士, 主要从事冲击、转速计量校准研究。