

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.01.14

正弦力计量校准研究

曾利民

(浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 动态力是加速度的导出量, 文章介绍了正弦力计量标准装置研究与量值溯源现状, 并认为根据动态力定义用激光干涉法测量加速度直接溯源到质量、加速度和时间是正弦力计量发展方向。由于正弦力计量中运动部件各处加速度不相等, 因而研究质量块加速度分布非常重要, 文章采用圆板弹性动力学模型将质量块三维结构简化为一维结构研究加速度径向分布, 再用杆件结构动力学模型进一步将质量块简化为质点研究加速度轴向分布, 进而减少正弦力测量结果的不确定度。

关键词: 正弦力; 量值溯源; 质量块; 加速度

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)01-0074-06

Investigation on Sinusoidal Force Calibration

ZENG Limin

(Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A dynamic force is the product of mass and acceleration. This paper describes the status of sinusoidal force measuring standard device and the development of sinusoidal force traceability. It is the development direction of the sinusoidal force measurement the acceleration is measured by a laser interferometer and traced directly to the mass, length and time according to the definition of dynamic force. In order to reduce the uncertainty of the sinusoidal force measurement, it is very important to accurately measure the acceleration distribution of the loading mass, the coupling between loading mass and force sensor, and the equivalent mass of force sensor end. Based on the elastic dynamics theory, the three-dimensional structure of the mass is simplified into a one-dimensional structure by using the circular plate elastic dynamic model to study the radial distribution of the acceleration. The dynamic model of the bar structure is further simplified into a point to study the axial distribution of the acceleration, and the accuracy of the measurement results of the sinusoidal force is improved.

Key words: sinusoidal force; traceability; mass body; acceleration

0 引言

在进行正弦力计量校准时, 运动部件各处加速度不相等, 特别是连接部位尤为明显, 为了提高正弦力测量结果的准确度, 必须准确掌握质量块加速度分布。文章基于“刚性假设、弹性修正、协同形变”, 并根据弹性动力学原理, 采用圆板弹性动力学模型研究质量块加速度径向分布, 将质量块三维结构简化为一维结构; 再用杆件结构动力学模型研究质量块加速度轴向分布, 并进一步将质量块一维结构简化为质点, 进而实现正弦力计量校准。

1 正弦力计量现状

校准正弦力, 是先将力传感器安装在电动振动台上, 再在力传感器上安装质量块并测量其加速度, 按牛顿第二定理, 用质量、加速度乘积计算正弦力幅值。

根据动态力定义与测量方法, 正弦力计量校准量值溯源如图 1 所示。由此, 一方面明确了正弦力校准以质量为中间量, 激光干涉法测量加速度时正弦力溯源到长度、时间、质量与电量, 加速度计法测量加速度时正弦力溯源至质量、加速度与电量; 另一方面明确了正弦力标准向工作计量器具量值传递的程序与校准方法, 并要求正弦力标准装置间应定期进行计量比对^[1]。由于正弦力计量校准中运动部件不是完全刚性, 国内外许多知名计量机构都在关注并尝试解决质量块的加速度不均匀问题^[2-3]。

1.1 激光干涉法正弦力测量

德国物理技术研究院 (PTB)、中航工业北京长城计量测试技术研究所 (CIMM)、西班牙计量中心 (CEM) 在正弦力计量上做了大量研究工作^[4-6]。CIMM 采用激光干涉仪直接测量加速度, 建立了激光干涉法动态力校准系统^[5,7]。其校准示意图如图 2 所示。

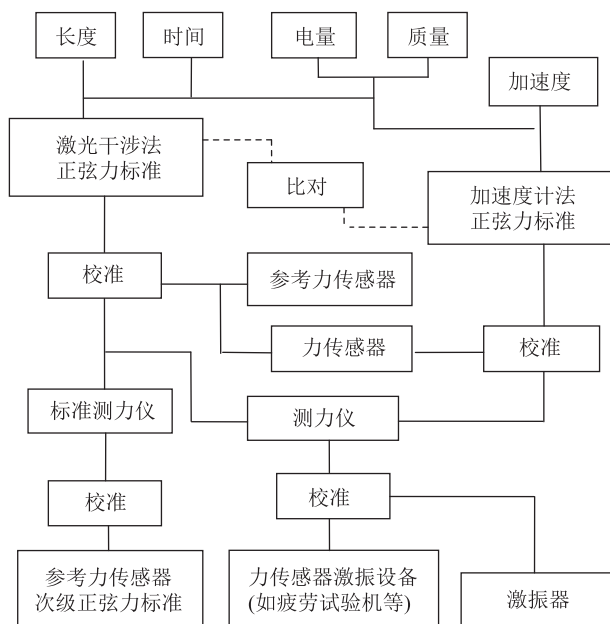


图1 正弦力计量校准量值溯源

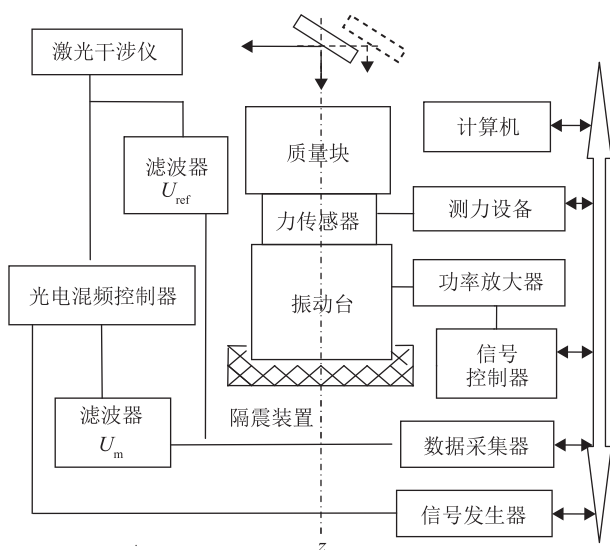


图2 激光干涉法进行正弦力校准示意图

激光干涉法进行正弦力校准的特点为：①激光干涉仪的测量头安装在二维位置控制平台上，以实现质量块顶表面加速度的扫描测量^[7]；②计算机控制各模块同步工作，测量质量块顶面中心点及径向1/2半径的圆周处4点加速度并通过功放控制系统驱动振动台；③校准结束后进行数据处理，计算加速度幅值平均值、正弦力幅值及正弦力幅频特性。

1.2 加速度计法正弦力测量

由于采用加速度计法进行正弦力测量比激光干涉法测量成本低得多，浙江省计量科学研究院（ZJIM）采

用加速度计法建立了正弦力计量校准装置^[1,8]，其校准示意图如图3所示。

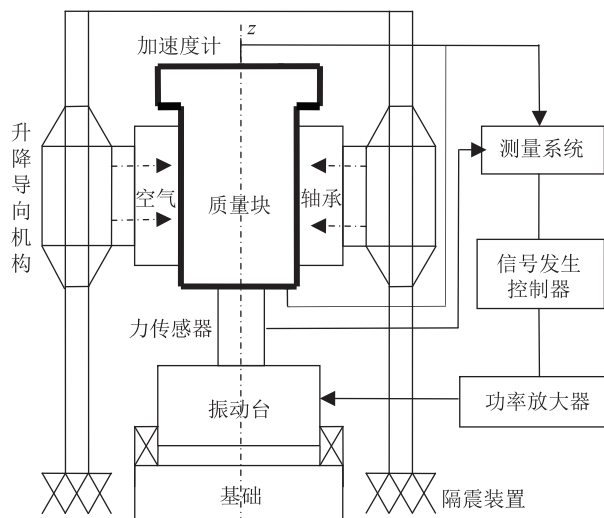


图3 加速度计法进行正弦力校准示意图

加速度计法进行正弦力校准的特点为：①电动振动台、机架支承在不同基础上，以减小共振影响，并采用空气轴承小阻尼导向技术扶正；②各通道并行对质量块顶面中心点、质量块顶面径向2/3半径圆周处4点（或3点）及质量块底部径向2/3半径圆周处2点（或3点）加速度同步、海量、连续采样；③校准中实时数据处理，用特征点加速度幅值加权平均计算质量块加速度平均值与正弦力幅值，并实时显示加速度幅值平均值、正弦力幅值。

2 正弦力计量研究

理论上假设质量块密度为 ρ ，加速度分布表示为 $a(r, \theta, z, t)$ ，则正弦力按 $F(t) = \rho \int_V a(r, \theta, z, t) dV$ 计算，质量块平均加速度幅值按式(1)计算。

$$\bar{a} = \frac{1}{V} \int_V a(r, \theta, z, t) dV \quad (1)$$

实际测量中，ZJIM基于“刚性假设”，并根据刚体运动原理和牛顿第二定理，按式(2)计算正弦力幅值^[3,7]。正弦力测量原理如图4所示。

$$F = (M_1 + M_2 + M_{31}) \bar{a} \quad (2)$$

式中： M_1 为质量块质量； M_2 为力传感器与质量块间连接件质量； M_{31} 为敏感件以上力传感器的端部质量，即等效质量。

2.1 加速度径向分布

力传感器、力传感器与质量块间连接件的截面积

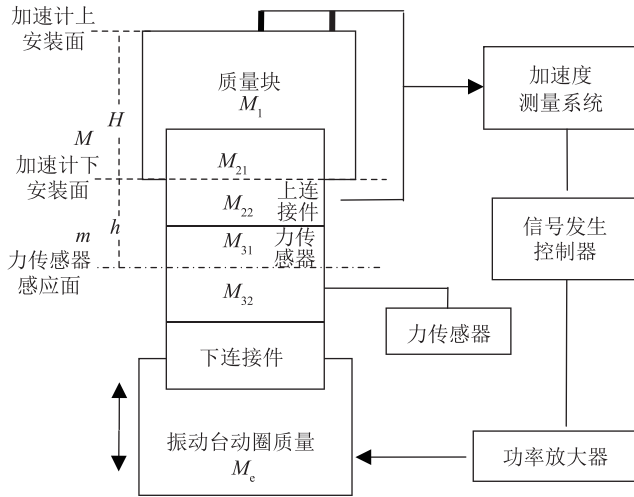


图4 正弦力测量原理

都比质量块的截面积小得多，因而力传感器与连接件的加速度径向不均匀分布可不考虑。由于质量块顶面加速度幅值振荡随振动频率提高而增大，并随质量块半径 R 显著增大，相对而言在质量块顶面中心、径向 $2/3$ 附近干扰要小。ZJIM 基于“弹性修正”，使用圆板弹性动力学模型，假设测量点加速度幅值 a 按式(3)拟合计算^[8]。

$$a = a_0 \left(1 + b \frac{r}{R} + c \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (3)$$

式中： r 为加速度计安装位置至质量块中心线距离； a_0 为质量块顶面中心加速度幅值； b, c 为待定系数。

理论上按公式(3)可计算质量块顶面加速度幅值平均值 $\bar{a}_0 = a_0 \left(1 + \frac{2}{3}b + \frac{1}{2}c \right)$ ，而质量块顶面径向 $2/3$ 位置的加速度幅值 $a = a_0 \left(1 + \frac{2}{3}b + \frac{4}{9}c \right)$ ，两者很相近，从而质量块加速度分布由三维问题简化成一维计算^[1,8]。由于质量块横截面积 $A = \pi R^2$ ，因而正弦力计算能进一步简化，按式(4)计算。

$$F(t) = A \rho \int_H a(z, t) dH \quad (4)$$

进而通过测量质量块顶面特征点加速度幅值，可近似得到质量块顶面加速度幅值平均值 $\bar{a}_0$ 。

2.2 加速度轴向分布

尽管在质量块与连接件间、力传感器与连接件间过渡面轴向加速度差异明显，但由于加速度计下安装面与力传感器感应面间的高度比质量块的高度小得多，加速度计下安装面以下等效质量比质量块质量小得多，因而可不再考虑力传感器、质量块间连接件下部加速

度轴向不均匀分布。PTB 只测量质量块顶表面加速度幅值，加速度幅值平均值按式(5)计算^[7]。

$$\bar{a} = \bar{a}_0 \cdot k_0 \quad (5)$$

式中： $\bar{a}_0$ 为质量块顶表面实测加速度幅值平均值； k_0 为加速度修正因子。

$$k_0 = \sin \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H \right) / \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H \right)$$

式中： E 为质量块弹性模量； H 为质量块高度； ω 为振动角频率。

CIMM 基于正弦受迫振动对质量块加速度轴向分布做了进一步的理论推导与计算，正弦力幅值按式(6)计算^[3]。

$$F = (M_1 k_0 + (M_2 + M_{31}) k_1) \bar{a}_0 \quad (6)$$

式中：加速度修正因子 $k_1 = \cos \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H \right)$ 。

ZJIM 基于“协同形变”，使用杆件结构动力学模型，假设质量块加速度幅值按公式(5)修正，通过质量块加速度分布研究，按式(7)计算正弦力幅值^[8]。

$$\begin{aligned} F &= M k_0 \bar{a}_0 + m k_2 \bar{b}_0 \\ &= (M_1 + M_{21}) k_0 \bar{a}_0 + (M_{31} + M_{22}) k_2 \bar{b}_0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中： M 为加速度计下安装面以上运动部件的质量； m 为加速度计下安装面与力传感器感应面间运动部件的质量； M_{21} 为力传感器与质量块间连接件上部分质量； M_{22} 为力传感器与质量块间连接件下部分质量； $\bar{b}_0$ 为加速度计下安装面加速度幅值平均值； k_2 为加速度修正因子。

$$k_2 = \sin \left(\sqrt{\frac{\rho_h}{E_h}} \cdot \omega h \right) / \left(\sqrt{\frac{\rho_h}{E_h}} \cdot \omega h \right)$$

式中： ρ_h 为力传感器与质量块间连接件密度； E_h 为力传感器与质量块间连接件弹性模量； h 为加速度计下安装面与力传感器感应面间高度。

为提高正弦力测量效率，ZJIM 只在特征点测量加速度幅值，假设加速度计下安装面加速度幅值平均值的加权系数为 z ，则加速度计上安装面（即质量块顶表面）加速度幅值平均值的加权系数为 $1 - z$ ，加权系数 z 可根据校准条件在校准前按式(8)计算^[8]。

$$\begin{aligned} M k_0 \bar{a}_0 + m k_2 \bar{b}_0 &= (M + m) [(1 - z) \bar{a}_0 + z \bar{b}_0] \\ &= (M_1 + M_2 + M_{31}) [(1 - z) \bar{a}_0 + z \bar{b}_0] \end{aligned} \quad (8)$$

具体而言：在质量块顶面中心安装加速度计进行加速度幅值测量，其加速度计的加权系数为 $0.34(1 - z)$ ；在质量块顶面半径 $2/3$ 处用多个加速度计进行加速度幅值测量，其加权系数取 $0.66(1 - z)$ ；在质量块

底面半径 2/3 处(或附近)用多个加速度计进行加速度幅值测量,其加权系数取 z 。例如,在质量块顶面中心安装 1 个加速度计、顶面半径 2/3 处安装 3 个加速度计、底面半径 2/3 处安装 2 个加速度计进行加速度幅值测量,各加速度计加权系数分别为 $0.34(1-z)$ 、 $0.22(1-z)$ 与 $0.5z$,只需校准前输入各加速度计相应加权系数即可。

3 不确定度评定与验证

3.1 测量结果不确定度评定

正弦力幅值按式(2)计算,因而其合成标准不确定度按式(9)计算,有

$$u_{rc} = \sqrt{u_{rm}^2 + u_{ra}^2} \tag{9}$$

正弦力幅值测量结果扩展不确定度按 $U_r = k \cdot u_{rc}$ ($k=2$)计算。

加速度计法正弦力测量不确定度来源包括质量、加速度测量两方面,其中质量块质量 M_1 、力传感器等效质量 M_{31} 、力传感器与质量块之间连接件质量 M_2 所引入的不确定度相对较小,加速度幅值平均值 $\bar{a}$ 所引入的不确定度 u_{ra} 占主导地位。

加速度测量不确定度来源于加速度计、数据采集系统及其配套放大器等组成的套组,包括套组加速度示值误差(重复性)、灵敏度年稳定度、加速度横向运动比 T 、振动台加速度失真度 D 及质量块加速度幅值不均匀度 N 等。其中:①特征点加速度幅值加权平均值不代表质量块加速度幅值平均值 $\bar{a}$,与加速度幅值不均匀度 N 相关。②振动台加速度横向运动比 T 直接影响加速度计法加速度幅值测量结果,其不确定度影响量为 $1 - \frac{1}{\sqrt{1-T^2}}$,假设加速度参考点横向运动比

$T=10\%$,不确定度影响量 $1 - \frac{1}{\sqrt{1-0.10^2}} = 0.50\%$;

假设通频横向运动比 $T=15\%$,不确定度影响量 $1 - \frac{1}{\sqrt{1-0.15^2}} = 1.11\%$,均匀分布。③振动台加速度失真度 D 也影响加速度幅值测量结果,其不确定度影响量为 $\frac{D}{9\sqrt{1-D^2}}$,假设加速度参考点失真度 $D=5\%$,

不确定度影响量为 $\frac{0.05}{9\sqrt{1-0.05^2}} = 0.56\%$;假设通频失真度 $D=10\%$,不确定度影响量 $\frac{0.10}{9\sqrt{1-0.10^2}} =$

1.12% ,正态分布。

前面提及,为提高工作效率,在保证一定测量准确度前提下通常只测量质量块特征点加速度幅值,所以公式(9)中的 u_{ra} 可替换为加速度幅值引入的不确定度 u_{ra} 。ZJIM 加速度计法正弦力幅值各标准不确定度分量如表 1 所示^[1,8-9]。

表 1 加速度计法正弦力标准不确定度分量汇总

不确定度来源	相对标准不确定度/%	
	参考点	通频
套组加速度示值重复性 u_{m1}	$\frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29$	$\frac{1.0}{\sqrt{3}} = 0.58$
套组灵敏度年稳定性 u_{m2}	$\frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29$	
加速度横向运动比 u_{m3}	$\frac{0.50}{\sqrt{3}} = 0.29$	$\frac{1.11}{\sqrt{3}} = 0.64$
加速度失真度 u_{m4}	$\frac{0.56}{3} = 0.19$	$\frac{1.12}{3} = 0.37$
质量块加速度不均匀性 u_{m5}	$\frac{1.0}{\sqrt{6}} = 0.41$	$\frac{1.5}{\sqrt{6}} = 0.61$
上级标准不确定度 u_{m6}	$\frac{0.5}{2} = 0.25$	$\frac{1.0}{2} = 0.50$
有效质量测量 u_{rm}	$\frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06$	

加速度计法正弦力测量结果合成标准不确定度按式(10)计算。

$$u_{rc} = \sqrt{u_{rm}^2 + u_{ra1}^2 + u_{ra2}^2 + u_{ra3}^2 + u_{ra4}^2 + u_{ra5}^2 + u_{ra6}^2} \tag{10}$$

加速度计法正弦力测量结果扩展不确定度为

参考点: $U_{r1} = 1.5\%$,

通频: $U_{r2} = 2.5\%$ 。

3.2 试验验证

2015 年 11 月, ZJIM 选用 Kistler 公司 8371B 压电式力传感器、B&K 公司 6292C 电荷放大器组成功力传感器套组进行第一次试验。用已有质量块,在正弦力约 4500 N(即状况 1:大质量块 21.32 kg、加速度 200 m/s²)和 1500N(即状况 2,小质量块 10.70 kg、加速度 150 m/s²)分别开展动态力套组灵敏度校准,并针对试验结果研究了加速度传感器正、倒安装间灵敏度的差异及安装绝缘胶木板等因素的影响;分析了质量块、振动台及加速度测量位置等因素的影响。

2016 年 10 月 ZJIM 完成第二次试验,为了更好地进行试验验证与比对,力传感器套组灵敏度有效数字从 3 位改成 4 位;并适当减小了试验力,在正弦力约 3300 N(即状况 3:相同大质量块、加速度 150 m/s^2)和

1100 N(即状况 4:相同小质量块、加速度 100 m/s^2)时进行试验,两次试验数据如表 2 所示。另外,ZJIM 还用静重式力标准机进行准静态校准,灵敏度 3.88 pC/N ,与低频段正弦力幅频响应校准结果相吻合^[8]。

表 2 力传感器套组正弦力幅频响应校准结果

振动频率/Hz	第一次试验			第二次试验		
	状况 1 灵敏度 $/(pC \cdot N^{-1})$	状况 2 灵敏度 $/(pC \cdot N^{-1})$	复现性/%	状况 3 灵敏度 $/(pC \cdot N^{-1})$	状况 4 灵敏度 $/(pC \cdot N^{-1})$	复现性/%
20	3.86	3.88	0.52	3.862	3.872	0.26
40	3.86	3.87	0.26	3.859	3.867	0.21
80	3.86	3.87	0.26	3.855	3.861	0.16
160	3.85	3.86	0.26	3.844	3.856	0.31
320	3.85	3.82	0.78	3.840	3.805	0.92
480	3.82	3.83	0.26	3.836	3.847	0.29
640	3.82	3.82	0.00	3.827	3.828	0.03
960	3.79	3.78	0.26	3.801	3.794	0.18
1280	3.73	3.76	0.80	3.742	3.781	1.04
1600	3.73	3.73	0.00	3.738	3.742	0.11
1920	3.68	3.66	0.54	3.684	3.666	0.49

由于表 2 中力传感器套组灵敏度复现性均在正弦力幅频响应校准结果的控制限(正弦力幅值测量不确定度)以内,表明 ZJIM 加速度计法正弦力计量标准装置稳定、可靠。

4 结束语

正弦力测量准确度主要取决于质量块加速度测量,正弦力负载质量块本身及质量块与力传感器间的连接直接影响力传感器幅频特性校准。用激光干涉法测量质量块加速度是提高正弦力测量准确度的重要手段,同时应考虑质量块加速度不均匀影响,特别是质量块加速度的轴向分布。由于正弦力理论计算模型是固定横截面圆柱状质量块,实际中无法避免局部是变截面装配,因而应考虑正弦力理论计算模型与实际间的差异,基于“刚性假设、弹性修正、协同形变”计算质量块平均加速度幅值有待于进一步完善。

参 考 文 献

- [1] 曾利民,倪守忠,蒋晓波,等. 正弦力校准和计量溯源研究[J]. 计量技术, 2014, (7): 42-45.
- [2] Roll Kumme, The Determination of the Effective Dynamic Force Forthe Calibration of Force Transducers with Due Regard to the Distribution of Mass and Acceleration [C] //XV IMEKO TC3 Conference. Madrid (Spain): IMEKO, 1996: 129-138.
- [3] 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.
- [4] Rolf Kumme. Investigation of the Comparison Method for the Dynamic Calibration of Force Transducers [J]. Measurement, 1998, 23: 239-245.
- [5] Zhang Li, Rolf Kumme. Investigation of Interferometric Methods for Dynamic Force Measurement[C]//XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium Dubrovnik. Croatia: IMEKO, 2003.

- [6] Nieves Medina and Jesús de Vicente. Force Sensor Characterization Under Sinusoidal Excitations [J]. Sensors, 2014, 14: 18454 – 18473.
- [7] 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.
- [8] Zeng Limin, Ma Binghui. Research on Sinusoidal Force Standard Equipment[C] //IMEKO International Seminar on Measurement. Hangzhou (China), 2017: 120 – 124.
- [9] Zhang L, Wang Y, Yin X, et al. Comparison Results Between PTB and CIMM on the Force Transducer Calibration Under Sinusoidal Loading [C] //XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018), IOP Conf. Series:

Journal of Physics: Conf. Series 1065 (2018) 042019 9

收稿日期: 2019 – 05 – 28

作者简介



曾利民(1965 –), 高级工程师, 男, 湖南益阳人, 1986 年 7 月毕业于中国矿业学院, 从事力值、硬度计量工作与动态力研究。主持完成国家质检总局科技项目《动态(冲击)力计量校准装置研究》和浙江省长基金建设项目《动态(正弦激振)力计量校准装置研究》。