



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××—××××

## 正弦力标准装置校准规范

Calibration Specification for Sinusoidal  
Force Standard Equipments

(征求意见稿)

201×-×-×发布

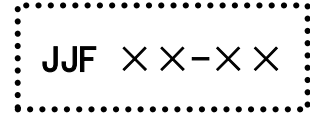
201×-×-×实施

国家市场监督管理总局 发布



# 正弦力标准装置 校准规范

Calibration Specification for  
Sinusoidal Force Standard Equipments



---

**归口单位：**全国力值硬度重力计量技术委员会

**主要起草单位：**浙江省计量科学研究院  
中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所  
杭州亿恒科技有限公司  
中国计量科学研究院

**参加起草单位：**

本规范委托全国力值硬度重力计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

# 目 录

引 言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 术语 .....	1
4 概述 .....	2
5 计量特性 .....	3
6 校准条件 .....	5
7 校准项目和校准方法 .....	5
8 校准结果表达 .....	16
9 复校时间间隔 .....	16
附录 A .....	17
附录 B .....	23
附录 C .....	28

# 引 言

JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表述》、JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》共同构成本规范制定工作的基础性系列标准。

本规范在制定过程中充分参照了国家标准 GB/T 20485.1-2008/ISO 16063-1:1998《振动与冲击传感器校准方法 第 1 部分 基本概念》、JJF 1011-2006《力值与硬度计量术语及定义》、JJF 1156-2006《振动 冲击 转速计量术语及定义》中的术语、符号与定义；引用了国家标准 GB/T 20485.11-2006/ISO 16063-11:1999《振动与冲击传感器校准方法 第 11 部分 激光干涉法振动绝对校准》、GB/T 20485.21-2007/ISO 16063-21:2003《振动与冲击传感器校准方法 第 21 部分 振动比较法校准》、JJG 638-2015《液压式振动试验系统》、JJG 948-2018《电动振动试验系统》、JJF 1219-2009《激光测振仪校准规范》、JJF 1370-2012《正弦法力传感器动态特性校准规范》中相关的校准项目、方法及计量性能。规定了校准正弦力标准装置的计量特性、校准条件、校准项目、校准方法、校准结果的处理及复校时间间隔。

本规范为首次起草。

# 正弦力标准装置校准规范

## 1 范围

本规范适用于中频标准振动台或电动振动系统为振动力源的正弦力标准装置的校准。

注：液压式振动试验系统为振动力源的正弦力标准装置可参照执行。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 20485.1-2008/ISO 16063-1 振动与冲击传感校准方法 第1部分 基本概念

GB/T 20485.11-2006/ISO 16063-11 振动与冲击传感器校准方法 第11部分 激光干涉法振动绝对校准

GB/T 20485.21-2007/ISO 16063-21 振动与冲击传感器校准方法 第21部分 振动比较法校准

JJG 233-2008 压电加速度计检定规程

JJG 298 标准振动台

JJG 948 电动振动试验系统

JJG 676 测振仪

JJF 1219-2009 激光测振仪校准规范

JJF 1117-2010 计量比对

JJF 1370-2012 正弦法力传感器动态特性校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

## 3 术语

### 3.1 有效质量 Effective mass

在振动过程中作用于力传感器敏感面上，参与加载的所有部件质量的总和，包括质量块、上连接件和力传感器头部的质量。单位：kg。

### 3.2 静态灵敏度 (Static sensitivity of the transducer)

静态校准时获得的力传感器套组的输出增量与所施加力的增量之比，单位：pC/N、mV/N（压电类力传感器）或 mV/V/N（应变类力传感器）等。

### 3.3 动态灵敏度 (Dynamic sensitivity of the transducer)

在给定频率的正弦力激励下，力传感器套组的输出量幅值与输入力幅值之比，单位：pC/N、mV/N（压电类力传感器）或 mV/V/N（应变类力传感器）等。

### 3.4 相对灵敏度 Relative sensitivity

在给定频率与幅值的正弦力激励下，力传感器套组的动态灵敏度与静态灵敏度的百分比，用于表征力传感器套组的频响特性，又称灵敏度频率响应，单位：%。

### 3.5 灵敏度幅值线性 Amplitude linearity of dynamic sensitivity

在参考频率不同幅值正弦力激励下，力传感器套组的动态灵敏度与参考灵敏度的不一致程度，用校准点的幅值灵敏度相对于参考灵敏度的相对偏差表示，单位：%。

### 3.6 力传感器套组 Force transducer with amplifier

由力传感器、信号适调器和数据采集单元组成的动态力测量系统。

## 4 概述

正弦力标准装置基于牛顿第二定理，用质量、加速度幅值乘积计算正弦力幅值，具体在振动台台面中心安装力传感器，再在力传感器上安装荷载质量块，振动台激振对力传感器（或测力仪）进行正弦力校准的动态力标准装置。由振动力源（电动振动试验系统或标准振动台）、质量块与连接件、振动加速度测量系统与扶正装置等组成。扶正装置采用空气轴承导向技术，以保持振动过程中质量块的运动姿态，如图 1 所示。

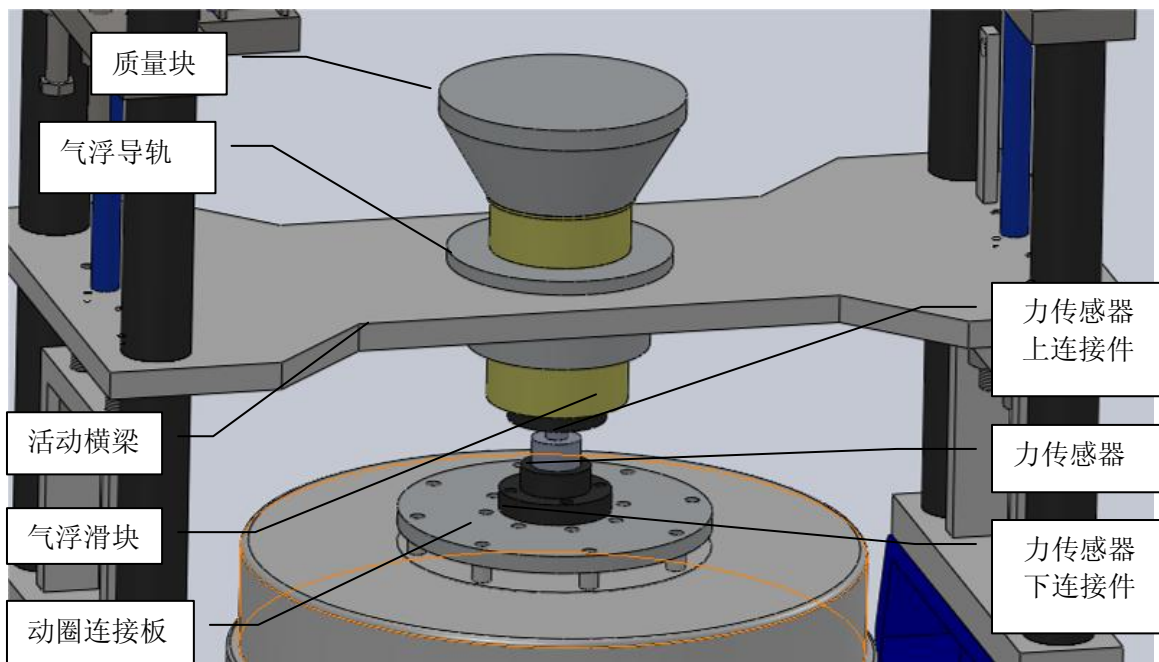


图 1 正弦力标准装置结构示意图

振动加速度测量系统用于测量振动运动过程中的振动加速度——时间历程，分为绝对法（激光干涉法）、直接测量法（加速度计法）。直接测量方法借助于加速度传感器直接测量振动加速度——时间历程；绝对法基于激光多普勒测速原理，借助于绝对测量运动学的基本量——时间和长度复现振动加速度——时间历程，如图 2 所示。各模块同步工作，可实时数据处理获得校准结果。



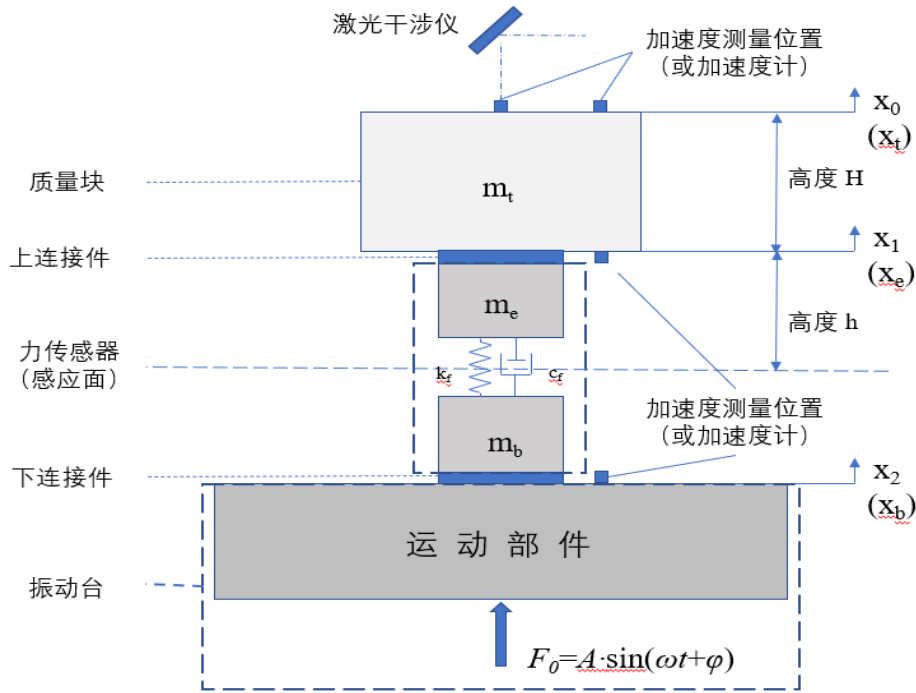


图2 正弦力标准装置测量示意图

## 5 计量特性

质量块采用圆柱结构，要求密度均匀与力学性能稳定，并通过连接部件与力传感器紧密连接，连接部件的材质、质量准确度要求与质量块相同，振动台基础质量宜不小于 1000 倍振动运动部件质量，绝对法要求振动台和激光干涉仪应分别安装在不同的地基上以减少振动台及环境振动对测量的干扰。计量特性见表 1。

表 1 计量特性一览表

序号	校准项目	技术指标
1	质量块与连接件的质量	不确定度 $U_r = 0.02\%$
2	激光测振仪	加速度测量不确定度：1Hz<f≤5kHz, $U_{rel}=0.2\%$ , $U_{\phi}=0.5^\circ$
	振动标准套组	灵敏度不确定度：幅值参考条件±0.5%，其它±1.0%； 相位参考条件±0.5°，其它±1°。 灵敏度频率响应：幅值±2.0%，相位±2° 灵敏度幅值线性度：±1.0% 参考灵敏度年稳定度：0.5%
	工作加速度计	灵敏度不确定度：幅值参考条件：±1.0%；其它： $U_{rel}=3.0\%$ ； 灵敏度幅值频率响应：±3% 灵敏度幅值线性度：±2% 参考灵敏度年稳定度：1%
3	加速度稳定性	频率变化：≤0.1%，加速度幅值变化：≤0.3%
	加速度幅值控制误差	≤1.0%

	力源	谐波失真度	≤5%，参考频率点；其它频率：≤10%
		横向运动比	≤10%，参考频率点；≤20%，其它频率
		幅值均匀度	≤5%，参考频率点；≤10%，其它频率
		控制器频率误差	最大允许误差：±0.05%
		控制器电压误差	最大允许误差：±0.2%
		控制器通道间一致性	幅值比：±0.5%， $f < 20\text{Hz}$ ；≤0.2%， $f \geq 20\text{Hz}$ 相位差：±0.5°， $f < 20\text{Hz}$ ；≤0.2°， $f \geq 20\text{Hz}$
4	校准能力验证	参考灵敏度	重复性±0.5%，年稳定度±0.5%
		灵敏度频率响应	归一化偏差 $E_n \leq 1$
		灵敏度幅值线性	归一化偏差 $E_n \leq 1$
		相位延迟	不确定度：参考频率点 1°，其它频率点 3°。

注 1：质量块顶、底面粗糙度： $R_a 0.4$ ；顶底面平行度：0.015mm；圆度：0.01mm；高径比：0.6~3.0，有扶正装置时高径比最大可达 5。

注 2：通常在参考频率点（8Hz 或 16Hz，80Hz 或 160Hz）以最大加速度  $5\text{m/s}^2$ 、 $10\text{m/s}^2$ 、 $20\text{m/s}^2$ 、 $50\text{m/s}^2$  或  $100\text{m/s}^2$  连续振动 100s 进行振动台稳定性测量。

注 3：两通道或多通道振动力源控器有通道间一致性要求，相位延迟项目只有用户要求才进行校准。

注 4：用力传感器测量套组对正弦力标准装置校准结果验证时，以力传感器测量套组已知测量值作为参考值，比对结果用归一化偏差  $E_n$  值评价， $E_n \leq 1$ ，比对结果可以接受； $E_n > 1$ ，比对结果没有到达合理预期应分析原因。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

- 1) 环境温度：(20±5)℃；
- 2) 相对湿度：≤80%；
- 3) 电源电压：380 (1±10%)V 或 220 (1±10%)V，频率：(50±1)Hz 范围内。
- 4) 周围环境应无明显影响校准结果的振动和冲击源，无强电场、强磁场、强声场的干扰。

### 6.2 校准用设备

校准用设备见表 2。

表 2 校准项目和校准设备

序号	校准项目		校准设备	
			名称	计量性能
1	质量块与连接件质量		天平、砝码	Ⅱ级、M1 等级
2	激光测振	灵敏度	中频振动标准	测量不确定度：

	仪	线性度	装置 (基准/副基准)	参考点 $\pm 0.2\%$ ; $\pm 0.2^\circ$ 。 10Hz $\leq f \leq 1$ kHz, $\pm 0.2\%$ ; $\pm 0.4^\circ$ 。 1kHz $< f \leq 5$ kHz, $\pm 0.2\%$ ; $\pm 0.4\%$ 。	
		频率响应			
3	振动标准套组	灵敏度幅值不确定度	中频振动标准装置 (绝对法)		
		灵敏度相移不确定度			
		灵敏度幅值频率响应			
		灵敏度幅值线性度			
		灵敏度年稳定度			
4	工作加速度计	灵敏度幅值不确定度	中频振动标准装置	振动标准套组 灵敏度不确定度: 参考点 $U_{rel}=0.5\%$ , 相移 $\pm 0.5^\circ$ ; 其它点: $U_{rel}=1.0\%$ , $\pm 1.0^\circ$ ( $k=2$ )。 标准振动台 频率最大允许误差: $\pm 0.1\%$ , 频率稳定性: $\pm 0.1\%$ , 加速度幅值稳定性: $\pm 0.1\%$ , 基波失真度 $\leq 5\%$ 。	
		灵敏度幅值频率响应			
		灵敏度幅值线性度			
		灵敏度年稳定度			
5	振动力源	加速度稳定性	测振仪	振动加速度幅值范围: (1~1000) $m/s^2$ , 振动频率范围: (20~5000) Hz, 振动加速度非线性度: 1%, 灵敏度频率响应 2%, 参考灵敏度稳定度 0.5%。	
		加速度幅值控制误差			
		谐波失真度			
		横向运动比			
		加速度幅值均匀度			
			控制器频率误差	信号发生器 数字频率计 或动态信号分析仪	信号发生器频率准确度 $\pm 0.05\%$ , 频率稳定度在测量周期内不超过读数的 $\pm 0.05\%$ , 幅值稳定度在测量周期内不超过读数的 $\pm 0.05\%$ 。 动态信号分析仪: A级
			控制器电压误差		
			控制器通道间一致性		
6	校准能力验证	参考灵敏度	力传感器套组	套组中力传感器: 静态特性不低于 0.5 等级, 固有频率大于 10 倍振动力源共振频率或安装后自振频率大于 3 倍振动力源共振频率; 信号适配器: 准确度优于 $\pm 2\%$ , 幅频特性 1/5 倍~5 倍工作频率范围内幅值比偏差 $\leq \pm 1\%$ ; 数据采集单元: 准确度 $\pm 0.5\%$ , 采样频率大于 20 倍力传感器输出(或欲使用的)最高校准频率。	
		灵敏度频率响应(相对灵敏度)			
		灵敏度幅值线性			
		相位延迟			

注 1: 用 MPE:  $\pm 5\%$  的表面粗糙度测试仪或其它相应测量仪器检查质量块顶、底面粗糙度; 用 MPE:  $\pm$

0.05mm 的高度卡尺、MPE:  $\pm 0.03\text{mm}$  的游标卡尺或其它相应测量仪器检查质量块高径比；用 1 级平板、MPEV:  $\pm 0.0035\text{mm}$  杠杆式千分表或其它相应测量仪器检查质量块顶、底面平行度与质量块圆度。

注 2：力传感器套组中使用的指示仪表（包括可向传感器提供激励电压的指示仪表）的相关准确度指标，原则上应优于被检力传感器相应准确度指标的三分之一。

## 7 校准项目与方法

### 7.1 校准项目

正弦力标准装置的校准项目见表 1。

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 校准前准备

1) 校准前检查正弦力标准装置上铭牌，铭牌上应标明正弦力标准装置的型号规格、编号、制造厂家等装置基本信息；表明装置正弦力值范围、工作频率范围等计量性能。

2) 动态力测量套组在校准试验环境下放置时间应在 8 小时以上，其温度与校准条件的温度平衡。

3) 校准前检查正弦力标准装置外形结构，确认无影响正常工作的机械损伤，输入输出插座无松动等现象后按使用说明书进行通电，预热后进行自检，各部分应工作正常，数据采样率与 A/D 应与正弦力标准装置标识（如说明书）一致。

(a) 按 JJG 948-2018 第 6.3.3 条用声级计（A 计权）检查正弦力标准装置振动力源噪声，如果发现工作时噪声大于 90dB(A) 应采取隔声或消声措施。

(b) 按 JJG 948-2018 第 6.3.4 条用特拉斯计检查振动台工作时台面所有安装螺孔是否漏磁，磁通密度应不超过 5mT 或出厂技术要求。

(c) 将标准加速度计或加速度计刚性安装在振动台台面中心，标准加速度计或加速度计的输出连接动态信号分析仪（或数字电压表与频率计），当电动振动试验系统处于工作状态，控制仪输出信号幅值为 0，功率放大器增益调至最大，测量台面中心加速度的有效值并计算加速度信噪比，加速度信噪比  $\geq 60\text{dB}$ 。

(d) 将加速度计刚性安装在振动台台面中心，加速度计的输出连接动态信号分析仪，动态信号分析仪输出白噪声信号给功率放大器，调节功率放大器增益使振动台产生适当当量的振动，测量振动台频率响应函数与一阶共振频率，符合出厂技术要求。

#### 7.2.2 质量块与连接件质量

选择合适的 II 级平天与  $M_1$  等级砝码分别测量校准时所使用质量块、连接件、力传感器及加速度等的质量。

#### 7.2.3 加速度测量系统

##### 7.2.3.1 激光测振仪

对于采用激光干涉法测量质量块的加速度幅值的激光测振仪，其校准方法采用 JJF1219-2009《激光测振仪校准规范》。线性度、灵敏度按 7.2.1 的要求执行，频率特性按 7.3 的要求执行。

##### 7.2.3.2 振动标准套组

对于采用振动标准套组测量质量块的加速度幅值的测振仪，校准方法采用 JJG233-2008

《压电加速度计》检定规程。参考灵敏度幅值和相移按 6.3.2.2 的要求执行，灵敏度频率响应按 6.3.3 的要求执行，灵敏度幅值线性度按 6.3.4 的要求执行，灵敏度幅值年稳定度按 6.3.5 的要求执行。

### 7.2.3.3 工作加速度计

工作加速度计或工作加速度计套组校准方法采用 JJG233-2008《压电加速度计》检定规程。参考灵敏度幅值和相移按 6.3.2.1 的要求执行，灵敏度频率响应按 6.3.3 的要求执行，灵敏度幅值线性度按 6.3.4 的要求执行，灵敏度幅值年稳定度按 6.3.5 的要求执行。

### 7.2.4 振动力源

#### 7.2.4.1 振动台加速度稳定性

将加速度计刚性安装在振动台台面中心，其输出通过信号适调器连接数字电压表，当电动振动试验系统处于工作状态，在工作频率范围内做规定频率与加速度的连续振动，选取参考频率点（8Hz 或 16Hz，80Hz 或 160Hz），测量该频率下的最大加速度（如取  $2\text{m/s}^2$ 、 $5\text{m/s}^2$ 、 $10\text{m/s}^2$ 、 $20\text{m/s}^2$ 、 $50\text{m/s}^2$  或  $100\text{m/s}^2$ ）连续振动 100s，在任意 10s 的时间间隔内其频率与加速度幅值的稳定性按公式（1）、公式（1）计算。

$$w_f = \frac{2|\Delta f(i, i+1)|_{\max}}{f_i + f_{i+1}} \times 100\% \quad (1)$$

$W_f$ ——加速度频率稳定性，%

$|\Delta f(i, i+1)|_{\max}$ ——10s 时间间隔内的频率最大变化量，Hz

$f_i$ 、 $f_{i+1}$ ——10s 时间间隔内的频率最大变化量对应的两个频率值，Hz

$$w_a = \frac{2|\Delta a(i, i+1)|}{a_i + a_{i+1}} \times 100\% \quad (2)$$

$W_a$ ——加速度幅值稳定性，%；

$|\Delta a(i, i+1)|_{\max}$ ——10s 时间间隔内的加速度幅值最大变化量，Hz；

$a_i$ 、 $a_{i+1}$ ——10s 时间间隔内的加速度幅值最大变化量对应的两个加速度幅值，Hz。

#### 7.2.4.2 振动台加速度幅值控制误差

将参考加速度计刚性安装在振动台台面中心（或与控制传感器背靠背安装），参考加速度计输出通过信号适调器连接动态信号分析仪（或数字电压表），当电动振动试验系统处于工作状态，在工作频率范围上、下限及参考频率点内不少于 10 个频率点，在各频率的最大加速度幅值内同时记录测量系统和动态信号分仪（或连接数字电压表）的实测值，按公式（3）计算加速度幅值测量误差  $\delta_a$ 。

$$\delta_a = \frac{a_0 - a_1}{a_1} \times 100\% \quad (3)$$

$\delta_a$ ——加速度幅值控制误差，%

$a_0$ ——加速度示值电压， $\text{m/s}^2$

$a_1$ ——动态信号分仪（或连接数字电压表）实测加速度， $\text{m/s}^2$

#### 7.2.4.3 振动台横向运动比

将三轴向振动加速度计刚性连接在振动台上表面的中心位置，使三轴向振动加速度计的其中一个轴向与质量块运动方向一致，其余两个轴向与运动方向垂直。其输出通过信号适调器连接动态分析仪，在正弦力标准装置的工作频率范围内，适当选取不少于 10 个频率值（包括频率范围上限、下限与参考频率点），在所选各频率下最大加速度幅值 50% 时振动，从动态信号分析仪上同时测量并记录三个方向加速度信号，重复校准三次，利用公式（4）计算质量块上每个校准点的冲击加速度峰值的不均匀度  $N$ ，取最大值作为校准结果。

$$T = \frac{\max|a_{ix}, a_{iy}|}{a_{iz}} \times 100\% \Bigg|_{\max} \quad (4)$$

式中： $a_{iz}$ —某校准点第  $i$  次测量时，振动台在运动方向上的冲击加速度峰值，单位： $\text{m/s}^2$ ；

$a_{ix}, a_{iy}$ —某校准点第  $i$  次测量时，垂直于振动台运动方向的两个互相垂直方向的冲击加速度峰值，单位： $\text{m/s}^2$ 。

#### 7.2.4.4 振动台谐波失真度

标准加速度计刚性安装在振动力源台面中心，其输出通过信号适调器连接动态分析仪，在正弦力标准装置的工作频率范围内，适当选取不少于 10 个频率值（包括频率范围上限、下限与参考频率点），测量所选各频率下最大加速度幅值 50% 时的加速度基波失真度，按公式（5）计算。

$$D = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2}}{a_1} \quad (5)$$

#### 7.2.4.5 加速度幅值均匀度

将不少于五只振动加速度计刚性连接在振动台面的中心位置 and 不同直径的同心圆周上，如图 3 所示，图中 0, 1, 2, 3, 4 为加速度计的安装位置。其输出通过信号适调器连接动态分析仪，在正弦力标准装置的工作频率范围内，适当选取不少于 10 个频率值（包括频率范围上限、下限与参考频率点），在所选各频率下最大加速度幅值 50% 时振动，重复校准三次，利用公式（6）计算质量块上每个校准点的加速度幅值的不均匀度  $N$ ，取最大值作为校准结果。

$$N = \frac{|a_k - a_0|}{a_0} \times 100\% \Bigg|_{\max} \quad (6)$$

式中： $a_k$ —第  $k$  支加速度计输出的加速度幅值，单位： $\text{m/s}^2$ ； $k=1, 2, 3, 4$ ；

$a_0$ —中心位置处加速度计输出的加速度峰值，单位： $\text{m/s}^2$ 。

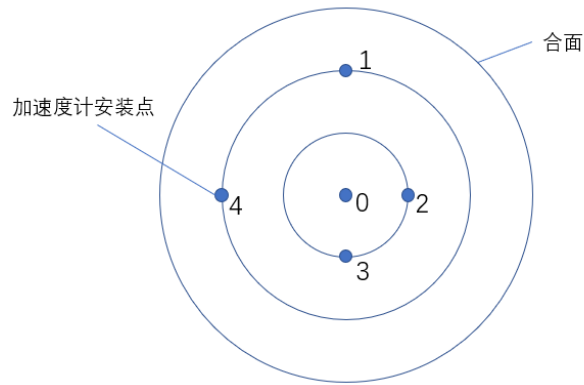


图3 加速度传感器安装点分布横截面图

注：振动台台面无法安装多个振动加速度计的小台面振动台可不开展此项校准项目。

#### 7.2.4.6 振动台控制器

##### 1) 控制器频率测量误差

将振动控制器正弦自闭环控制，控制器信号的输出连接动态信号分析仪（或数字电压表与频率计），在工作频率范围上、下限及参考频率点内不少于 10 个频率点，在各频率的最大加速度幅值内同时记录测量系统和动态信号分仪（或连接数字电压表）的频率值检定，按公式（7）计算每个校准点的频率示值误差  $\delta_f$ ，取示值误差的最大值作为校准结果。

$$\delta_f = \frac{f_0 - f_1}{f_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中： $\delta_f$ —测量系统频率示值误差，%

$f_0$ —测量系统标称频率，Hz

$f_1$ —动态信号分仪（或连接数字电压表）实测频率，V

##### 2) 控制器电压测量误差

将正弦信号发生器的输出同时接测量系统和动态信号分仪（或连接数字电压表），当电动振动试验系统处于工作状态，在工作频率范围上、下限及参考频率点内不少于 10 个频率点，在各频率的最大加速度幅值内同时记录测量系统和动态信号分仪（或连接数字电压表）的实测值，按公式（8）计算控制系统电压测量系统电压测量误差  $\delta_v$ 。

$$\delta_v = \frac{U_0 - U_1}{U_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中： $\delta_v$ —测量系统电压测量误差，%

$U_0$ —测量系统示值电压，V

$U_1$ —动态信号分仪（或连接数字电压表）实测电压，V

##### 3) 控制器通道间一致性

将振动控制传感器的输出连接测量系统的两个输入通道，在工作频率范围上、下限及参

考频率点内不少于 10 个频率点，在工作频率范围内设置平直谱，在适当的量级内做随机自闭环控制，选择一个通道为控制通道，其它通道为测量通道，观察其幅值比，确定通道间一致性较相差的两通道。在各频率的最大加速度幅值下记录测量系统两通道间的电压比的示值，按公式（9）计算每个校准点的电压比的测量误差  $\delta_{Rv}$ ，取示值误差最大值作为校准结果。

$$\delta_{Rv} = (R_v - 1) \times 100\% \quad (9)$$

式中： $\delta_{Rv}$ —测量系统电压比测量误差，%

$R_v$ —测量系统两通道间电压比，V

在各频率的最大加速度幅值下记录测量系统两通道间的相位差的示值，按公式（10）计算每个校准点的相位差的测量误差  $\delta_\phi$ ，取示值误差的最大值作为校准结果。

$$\delta_\phi = \phi_1 - \phi_0 \quad (10)$$

$\delta_\phi$ —测量系统相位差示值误差，°

$\phi_0$ 、 $\phi_1$ —测量系统两通道间相位差，°

### 7.2.5 校准能力验证

已知灵敏度的力传感器测量套组安装在振动台的台面上，在力传感器上端安装质量块，各安装面之间要求配合良好（可以根据实际情况在接触面之间涂抹一定量的润滑剂），且有足够的预紧力，理论上假设质量块密度  $\rho$ ，加速度分布用极坐标表示  $a(r, \theta, z, t)$ ，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  $\bar{a} = \frac{1}{V} \int_V a(r, \theta, z, t) dV$  计算，实际测量中根据牛顿第二定理用刚体运动原理按式  $F = (m_t + M + m_e) \bar{a}$  计算正弦力幅值，式中： $m_t$  为质量块质量； $M$  为力传感器与质量块间上联接件质量； $m_e$  为敏感件以上力传感器的头部质量。对于采用螺纹配合方式安装的力传感器，应满足传感器说明书对安装力矩的要求，以保证在校准过程中振动台、力传感器、质量块之间力值的正确传递；振动台台面的中心轴线与力传感器和质量块的中轴线重合，以尽量减少偏心负荷和倾斜负荷的影响。

注 1：试验前按说明书要求连接正弦力标准装置与动态力测量套组的导线，并打开仪器电源通电预热 30min；质量块安装表面要求带有一定预紧力，且受力均匀，保证力载荷传递过程不出现偏心负载。

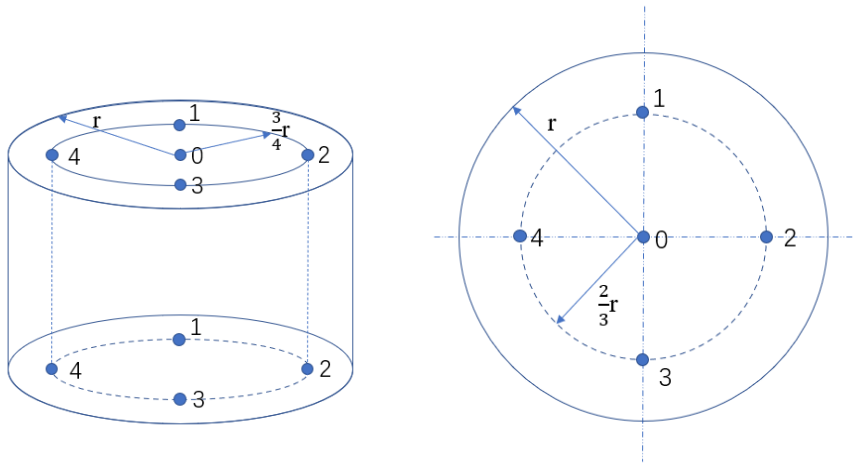
#### 7.2.5.1 质量块加速度测量

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  $\bar{a}$  与振动台加速度幅值均匀度 N 相关，优先进行质量块加速度分布校准。

##### 1) 质量块加速度分布（径向）校准

将一组振动加速度计刚性连接在质量块顶面中心及（1/2~3/4）半径圆周位置或在相应位置用绝对法测量其加速度，如图 4 所示。图中 0，1，2，3，4 为加速度计的安装位置或加速度测量位置。





(a) 质量块顶、底面加速度测点位置 (b) 质量块顶面加速度测点横截面图

图4 质量块顶、底面加速度测量点位分布图

每个校准点按照标准装置的操作规范利用公式(11)计算质量块上每个校准点顶面加速度幅值作为校准结果。

$$\bar{a}_t = 0.36a_0 + 0.64 \frac{a_{t1} + a_{t2} + \dots + a_{tk}}{k} \quad (11)$$

式中： $a_{tk}$ —第 $k$ 支加速度计输出的加速度幅值，单位： $\text{m/s}^2$ ； $k=0, 1, 2, 3, 4$ ；

#### 2) 质量块加速度分布(轴向)校准

将两组振动加速度计刚性连接在质量块的顶表面及底表面相同同直径的同心圆周上，如图4所示，图中1, 2, 3, 4为加速度计的安装位置。每个校准点按照标准装置的操作规范利用公式(12)计算质量块上每个校准点底面加速度幅值作为校准结果。

$$\bar{a}_e = \frac{a_{e1} + a_{e2} + \dots + a_{ek}}{k} \quad (12)$$

式中： $a_{ek}$ —第 $k$ 支加速度计输出的加速度幅值，单位： $\text{m/s}^2$ ； $k=0, 1, 2, 3, 4$ ；

注1：直径小于70mm的质量块可不校准此项目。

注2：底表面无法安装加速度计的质量块可只测量质量块的顶表面的加速度峰值的不均匀度。

#### 7.2.5.2 头部质量

力传感器头部质量推荐采用统合拟合法进行测量。

1) 将力传感器安装在振动台上，在力传感器上端面更换已知质量的质量块，并将力传感器与信号调理器相连，设置所配信号适调仪的增益与放大倍数，力传感器测量套组设置为参考灵敏度为 $S_r$ （也可设定为1），启动振动台，产生参考频率 $f_r$ 的加速度幅值（可用多个加速度幅值测量），记录信号调理器输出 $u$ ；然后在力传感器上端面更换已知质量的质量块，再启动振动台产生参考频率 $f_r$ 的加速度幅值（也可多个加速度幅值测量），记录力传感器测量套组输出 $u$ ；用不少于2组已知质量的质量块重复校准形成一系列试验数据 $(M_{ij}, u_{ij})$ ，以质量块质量 $M_{ij}$ 为横座标，对应力传感器测量套组输出 $u_{ij}$ 为纵座标进行最小二乘法直线拟合，得到校准方程式(13)，按式(14)计算力传感器的头部质量 $m_e$ 。

$$u_{ij} = AM_{ij} + B \quad (13)$$

$$m_e = B / A \quad (14)$$

注：起始质量块的质量应大于力传感器的20倍头部质量以减少对最终校准不确定度的影响，每个质量块上通常做3个加速度幅值测量。

2) 力传感器倒过来重复步骤1) 计算质量块底部质量  $m_b$ ，校准力传感器的头部质量按  $m_e = m_f - m_b$  计算，力传感器的头部质量  $m_e$  取两次测量结果的平均值。

### 7.2.5.3 参考灵敏度

1) 根据选择的校准点参考力值（一般在力传感器量程的 5%~80%间选一点，或根据用户要求确定），结合选定合适质量块（一般选择质量块的质量大于 20 倍力传感器的头部质量），并计算与确定相应加速度设定值，其加速度通常取  $5\text{m/s}^2$ 、 $10\text{m/s}^2$ 、 $20\text{m/s}^2$ 、 $50\text{m/s}^2$  或  $100\text{m/s}^2$  等。参考频率点  $f_r$  根据用户要求确定为 8Hz 或 16Hz，80Hz 或 160Hz。

2) 力传感器测量套组与标准装置相连接，将力传感器测量套组设定为已知静态灵敏度与所需的档位。在参考条件重复校准六次，校准点力传感器测量套组每次校准的灵敏度按公式 (15) 计算：

$$S_j = \frac{F_{1j}}{F_{0j}} S_0 \quad (15)$$

式中： $S_j$ —第  $j$  次校准计算的灵敏度，pC/N、mV/N 或 mV/V/N；

$F_{1j}$ —第  $j$  次校准标准装置输出的正弦力幅值，N。

$F_{0j}$ —第  $j$  次校准的力传感器测量套组输出的正弦力幅值，N。

3) 校准点灵敏度重复性按公式 (16) 计算，参考灵敏度取多次校准灵敏度的平均值。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{S} = \frac{\sum S_j}{n} \\ \sigma = \sqrt{\frac{\sum (S_j - \bar{S})^2}{n-1}} \\ R = \sigma / \bar{S} \end{array} \right. \quad (16)$$

其中： $\sigma$ —以标准不确定度表征的重复性标准差，N；

$R$ —重复性；

$n$ —测量次数， $n=6$ 。

4) 参考灵敏度稳定性按公式 (17) 计算

$$W_s = \frac{\bar{S} - S_1}{S_1} \times 100\% \quad (17)$$

式中： $W_s$ —灵敏度年稳定度，%；

$S_1$ —上一年力传感器测量套组灵敏度，pC/N、mV/N 或 mV/V/N；

$\bar{S}$ —本年力传感器测量套组灵敏度，pC/N、mV/N 或 mV/V/N。

注：参考灵敏度校准可用灵敏度频率响应（相对灵敏度）、灵敏度幅值线性测量数据进行计算。

#### 7.2.5.4 频率响应（相对灵敏度频响）与相位延迟

1) 根据选择的校准点参考力值（一般在力传感器量程的 2%~80%间选一点，或根据用户要求确定），结合选定合适质量块（一般选择质量块的质量大于 20 倍力传感器的头部质量），并计算与确定相应加速度设定值，其加速度通常取  $5\text{ m/s}^2$ 、 $10\text{ m/s}^2$ 、 $20\text{ m/s}^2$ 、 $50\text{ m/s}^2$  或  $100\text{ m/s}^2$  等。

2) 根据选择的校准频率点一般不少于 7 点，通常按 1/3 倍频程频率选取，应包括一个参考频率点，校准的参考频率点  $f_r$  根据用户要求确定为 8Hz 或 16Hz，80Hz 或 160Hz。

#### 3) 校准程序

##### 方法一：绝对法

(a) 调整标准装置配套的仪器设备使其处于规定的工作状态。

(b) 调整激光干涉测量系统，使其测量点位于力传感器上表面靠近中心位置。

(c) 将振动台功率放大器的增益调至最低后开启其电源。调整振动台控制器输出参考频率点  $f_r$  正弦信号，逐渐调整其输出值和振动台功率放大器的增益，使校准系统产生所设定加速度值。待振动台工作稳定后，同步采集激光干涉仪和力传感器的测量数据，每次对测量数据的采集时间应不小于 10 个振动周期，在同一状态重复测量 10 次。测量结束后，逐渐将振动台功率放大器增益调至最低。

(d) 调整振动控制器的参数，使校准系统输出规定的频率和力值，待振动台工作稳定后，进入下一步程序。

(e) 调整激光干涉测量系统，使其测量点位于 0，同步采集激光干涉仪和力传感器的测量数据，每次对测量数据的采集时间应不小于 10 个振动周期，在同一状态重复测量 10 次，共采集 10 组数据。依次调整激光干涉测量系统测量位置至 1~4 点重复上述测量，记录实验数据。

(f) 从低频至高频依次在每个频率点重复 d~e，完成所有频率点的校准。

(g) 重复上述过程三次校准后，逐渐将振动台功率放大器增益调至最低。

注：如需更换质量块，则卸除原质量块，选定另一质量块重新计算与确定相应加速度设定值使系统可以产生不同的校准力值，从低频至高频依次在每个频率点下重复 d~g。

##### 方法二：直接测量法

(a) 在质量块特征点上安装加速度计。

(b) 调整标准装置配套的仪器设备使其处于规定的工作状态。

(c) 将振动台功率放大器的增益调至最低后开启其电源。调整振动台控制器输出参考频率点  $f_r$  正弦信号，逐渐调整其输出值和振动台功率放大器的增益，使校准系统输出规定的频率和力值，待振动台工作稳定后，完成各特征点校准。

(d) 从低频至高频依次在每个频率点完成所有频率点的校准。

(e) 重复上述过程三次校准后，逐渐将振动台功率放大器增益调至最低。

注：如需更换质量块，则卸除原质量块，选定另一质量块重新计算与确定相应加速度设定值使系统可以产生不同的校准力值，从低频至高频依次在每个频率点下重复 d~e。

#### 4) 数据处理

(a) 在各校准频率点，用式 (18) 分别计算出各校准频率点力传感器测量套组的幅值灵敏度，校准频率点各次测量灵敏度频率响应（相对灵敏度）为  $S_i / S_{0i}$ 。

$$S = \frac{\bar{u}}{(m_i k_0 + (M + m_e) k_1) \bar{a}_i} \quad (18)$$

(b) 将力传感器测量套组设置为已知静态灵敏度时, 按 JJF 1370-2012 第 7.2.6.4 用式 (19) 分别计算各校准频率点标准装置的正弦力幅值, 校准频率点各次测量灵敏度频率响应 (相对灵敏度) 为  $F_{0i} / F_i$ 。

$$F = (m_i k_0 + (M + m_e) k_1) \bar{a}_i \quad (19)$$

各校准频率点灵敏度频率响应 (相对灵敏度) 用式 (20) 计算。

$$E_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{S_j}{S_0} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{F_{0j}}{F_j} \quad (20)$$

式中:  $E_j$ —第  $j$  个频率点灵敏度频率响应 (相对灵敏度);

$S_j$ —第  $j$  次校准计算的灵敏度, mV/N 或 pC/N;

$F_j$ —第  $j$  次校准正弦力标准装置的输出正弦力幅值, N。

$F_{0j}$ —第  $j$  次校准力传感器测量套组的输出正弦力幅值, N。

注 1: 德国 PTB 正弦力标准值按  $F = (m_i + M + m_e) \bar{a}$ , 式中  $\bar{a} = \bar{a}_i \cdot k_o$ ,  $\bar{a}_i$  为质量块顶表面实测加速度幅值平均值;  $k_o$  为加速度修正因子  $k_o = \sin\left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right) / \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right)$ 。

注 2: JJF1370-2012 正弦力标准值按  $F = (m_i k_0 + (M + m_e) k_1) \bar{a}_i$ , 式中  $\bar{a}_i$  为质量块顶表面实测加速度幅值平均值;  $k_o = \sin\left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right) / \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right)$  为质量块加速度修正因子,  $k_1 = \cos\left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right)$  为质量块试底部加速度修正因子。

注 3: 如果质量块与连接件较大时, 正弦力标准值按  $F = (m_i + M_1) k_0 \bar{a}_i + (m_e + M_2) k_2 \bar{a}_e$ , 式中:  $\bar{a}_i$  为质量块顶表面实测加速度幅值平均值;  $\bar{a}_e$  为加速度计下安装面或测量位置 (质量块底表面) 实测加速度幅值平均值;  $k_o = \sin\left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right) / \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right)$  为质量块加速度修正因子,  $k_1 = \cos\left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \cdot \omega H\right)$  为质量块试底部加速度修正因子,  $k_2 = \sin\left(\sqrt{\frac{\rho_h}{E_h}} \cdot \omega h\right) / \left(\sqrt{\frac{\rho_h}{E_h}} \cdot \omega h\right)$  为力传感器与质量块间联接件加速度。  $\bar{a}_e$  无法实际测量时可用  $\bar{a}_e = \bar{a}_i k_1$  进行计算, 力传感器与质量块间联接件质量不大时还可简化, 正弦力标准值按  $F = m_i k_0 \bar{a}_i + (m_e + M) k_2 \bar{a}_e$  计算。

(c) 按 JJF 1370-2012 第 7.2.6.1 和 7.2.6.3 分别得到的  $\bar{\varphi}_a$  和  $\bar{\varphi}_u$  数据, 各校准频率点的相位延迟用式 (21) 计算。

$$\Delta\varphi = \bar{\varphi}_u - \bar{\varphi}_a \quad (21)$$

4) 用力传感器测量套组对正弦力标准装置校准结果验证时, 以力传感器测量套组已知测量值作为参考值, 按 JJF1117-2010 附录 E 计算幅频响应 (相对动态灵敏度频响) 与相位延迟的归一化偏差  $E_n$  值。

#### 7.2.5.4 幅值线性

1) 幅值线性度校准时参考频率点  $f_r$  根据用户要求确定为 8Hz 或 16Hz, 80Hz 或 160Hz, 校

准点力值通常在力传感器量程的5%~100%（或欲使用的）范围内不少于5点；推荐选择9个测量点，近似为量程的5%，10%，20%，30%，40%，50%，60%，80%，100%，其中力值参考点的加速度通常取 $5\text{m/s}^2$ 、 $10\text{m/s}^2$ 、 $20\text{m/s}^2$ 、 $50\text{m/s}^2$ 或 $100\text{m/s}^2$ 等。

## 2) 校准程序

### 方法一：绝对法

a) 将力传感器测量套组设置为参考灵敏度，调整仪器设备使其处于规定的工作状态。

b) 调整激光干涉测量系统，使其测量点位于力传感器上表面靠近中心位置。

c) 将振动台功率放大器的增益调至最低后开启其电源。调整振动台控制器输出参考频率点  $f_r$  正弦信号，逐渐调整其输出值和振动台功率放大器的增益，使标准装置产生所设定加速度值。待振动台工作稳定后，同步采集激光干涉仪和力传感器的测量数据，每次对测量数据的采集时间应不小于10个振动周期，在同一状态重复测量10次。测量结束后，逐渐将振动台功率放大器增益调至最低。

d) 调整振动控制器的参数，使标准装置输出规定的频率和力值，待振动台工作稳定后，进入下一步程序。

e) 调整激光干涉测量系统，使其测量点位于0，同步采集激光干涉仪和力传感器的测量数据，每次对测量数据的采集时间应不小于10个振动周期，在同一状态重复测量10次，共采集10组数据。依次调整激光干涉测量系统测量位置至1~4点重复上述测量，记录实验数据。

f) 从低频至高频依次在每个频率点重复d~e，完成所有频率点的校准。

g) 重复上述过程三次校准后，逐渐将振动台功率放大器增益调至最低。

注：如需更换质量块，则卸除原质量块，选定另一质量块重新计算与确定相应加速度设定值使标准装置产生不同的校准力值，从低频至高频依次在每个频率点下重复 d~g。

### 方法二：直接测量法

a) 在质量块特征点上安装加速度计。

b) 将力传感器测量套组设置为参考灵敏度，调整标准装置配套的仪器设备使其处于规定的工作状态。

c) 将振动台功率放大器的增益调至最低后开启其电源。调整振动台控制器输出参考频率点  $f_r$  正弦信号，逐渐调整其输出值和振动台功率放大器的增益，使标准装置输出规定的频率和力值，待振动台工作稳定后，完成各特征点校准。

d) 从低频至高频依次在每个频率点完成所有频率点的校准。

e) 重复上述过程三次校准后，逐渐将振动台功率放大器增益调至最低。

注：如需更换质量块，则卸除原质量块，选定另一质量块重新计算与确定相应加速度设定值使标准装置以产生不同的校准力值，从低频至高频依次在每个频率点下重复 d~e。

## 3) 数据处理

将力传感器测量套组设置为参考灵敏度时，在每个校准点按公式（22）计算力传感器测量套组的灵敏度线性，用校准点的灵敏度幅值相对于参考灵敏度  $S_R$  的相对偏倚表示。

$$L_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{S_j}{S_R} - 1 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{F_{1j}}{F_{rj}} - 1 \quad (22)$$

式中： $L_j$ —第  $i$  个校准点灵敏度线性；

$S_j$ —第  $j$  次校准计算的灵敏度, mV/N 或 pC/N;

$F_{1j}$ —第  $j$  次校准标准装置输出的正弦力幅值, N。

$F_{rj}$ —第  $j$  次校准的力传感器测量套组输出的正弦力幅值, N。

4) 用力传感器测量套组对正弦力标准装置校准结果验证时, 以力传感器测量套组已知测量值作为参考值, 按 JJF1117-2010 附录 E 计算灵敏度线性的归一化偏差  $E_n$  值。

## 8 校准结果表达

校准结果后发给校准证书或校准报告。校准证书或校准报告至少应包括以下信息:

- a) 标题, “校准证书”或“校准报告”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 证书或报告的编号, 每页及总页数的标识;
- d) 校准单位校准专用章;
- e) 送校单位的名称和地址;
- f) 被校设备的名称、制造厂、型号规格、编号;
- g) 进行校准的日期;
- h) 对校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- i) 本次校准所用的测量标准的名称、出厂编号、准确度/等级、证书编号、溯源性及有效性说明;
- j) 校准环境条件的描述, 包括: 温度、湿度等;
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- l) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务, 以及签发日期;
- m) 校准试验的操作人及核验人的签名;
- n) 校准结果仅对被校设备有效的声明;
- o) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书或报告的声明。

推荐的校准结果原始记录的内容格式见附录 B, 校准证书的内容格式见附录 C。

## 9 复校时间间隔

正弦力标准装置的复校时间间隔可根据实际使用情况, 由用户自主决定, 建议复校时间为 1 年。

## 附录 A

## 正弦力标准装置校准不确定度评估

## A.1 概述

A.1.1 测量对象：正弦力标准装置；

A.1.2 测量依据：JJF XXXX-202X《正弦力标准装置校准规范》；

A.1.3 环境条件：室温(20±5)℃；

A.1.4 测量过程：基于牛顿第二定理，用质量、加速度幅值乘积计算正弦力幅值。在正弦力标准装置校准能力验证时，以3次正弦力幅值测量结果的平均值进行评价。

## A.2 测量模型

正弦力标准装置在振动台台面中心安装力传感器，再在力传感器上安装荷载质量块，振动台激振对力传感器（或测力仪）进行正弦力校准的动态力标准装置。正弦力标准装置校准能力验证用已知灵敏度的力传感器测量套组安装在振动台的台面上，在力传感器上端安装质量块，各安装面之间要求配合良好（可以根据实际情况在接触面之间涂抹一定量的润滑剂），且有足够的预紧力，理论上假设质量块密度 $\rho$ ，加速度分布用极坐标表示 $a(r, \theta, z, t)$ ，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 $\bar{a}(t) = \frac{1}{V} \int_V a(r, \theta, z, t) dV$ 计算，具体根据牛顿第二定理用刚体运动原理按式（A.1）计算正弦力幅值。

$$F = m\bar{a} \quad (\text{A-1})$$

式中： $m = m_i + M + m_e$

$m_i$  为质量块质量；

$M$  为力传感器与质量块间上联接件质量；

$m_e$  为力传感器的头部质量。

$\bar{a}$  为敏质量块、联接件与力传感器头部质量振动加速度幅值的平均值。

## A.3 不确定度来源分析与标准不确定度分量合成

正弦力标准装置测量不确定度主要来源由有效质量、加速度幅值两部分引起，因此用于不确定度评定的数学模型如下：

$$u_r(F) = \sqrt{u_r^2(m) + u_r^2(\bar{a})} \quad (\text{A-2})$$

正弦力标准装置按照振动加速度复现原理可分激光干涉法及加速度计直接测量法。

## A.4 正弦力标准装置不确定度分量的评定

## A.4.1 有效质量测量引入的标准不确定度

质量块、联接件的有效质量使用电子天平进行测量，力传感器头部质量按本标准 7.5.2.2 进行测量，假定为均匀分布，则引入的相对标准不确定度 $u_r(m)$ 按公式(A-3)计算。

$$u_r(m) = \frac{\delta_m}{m\sqrt{3}} \quad (\text{A-3})$$

式中： $\delta m = \delta m_i + \delta M + \delta m_e$

$\delta m_l$ 、 $\delta M$ 、 $\delta m_e$  分别为质量块、连接件与力传感器头部质量的最大允许测量误差。

#### A. 4. 2 振动加速度幅值测量误差引入的标准不确定度

##### A. 4. 2. 1 激光干涉法

A. 4. 2. 1. 1 激光干涉法基于激光多普勒测速原理，绝对测量冲击速度-时间历程，通过对速度  $v(t)$ ——运动的速度-时间历程微分得到  $a(t)$ ——运动的加速度-时间历程间接得到加速度幅值，按  $a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$  计算。振动加速度峰值的测量误差包括激光干涉仪速度测量不确定度、采样时间误差、激光光轴与被测运动方向不重合、冲击加速度峰值不均匀度引入的不确定度分量，采用 B 类方法评定。根据 JJG 2054—2015《振动计量器具检定系统表》，选择国际标准 ISO 16063-11 中的“方法 3”测量加速度，激光干涉仪加速度测量结果的测量不确定度  $U_{ra}$  引入的相对标准不确定度分量按式(A-4)计算。

$$u_r(a_s) = \frac{U_{ra}}{2} \quad (A-4)$$

A. 4. 2. 1. 2 振动加速度传感器直接测量法（比较法）借助于加速度传感器直接测量复现的振动加速度 - 时间历程，加速度标准套组由冲击加速度传感器、信号适调器等组成，所引入的相对标准不确定度分量包括加速度标准套组的灵敏度校准、灵敏度幅值的线性度、年稳定性等引入的不确定度分量，均采用 B 类方法评定。

##### 1) 加速度标准套组的灵敏度校准不确定度引入的标准不确定度

根据 JJG 2054—2015《振动计量器具检定系统表》，灵敏度校准不确定度为参考点： $U_{rs} = 0.5\%$ ，其它： $U_{rs} = 1\%$ ，则引入的相对标准不确定度  $u_{r1}$  按照公式(A-9)计算：

$$u_{r1} = \frac{U_{rs}}{2} \quad (A-9)$$

##### 2) 加速度标准套组的灵敏度幅值线性度引入的标准不确定度

加速度标准套组灵敏度幅值线性度假定为  $\gamma = 1.0\%$ ，均匀分布，则引入的相对标准不确定度  $u_{r2}$  按照公式(A-10)计算：

$$u_{r2} = \frac{\gamma}{k} \quad (A-10)$$

##### 3) 加速度标准套组的年稳定性引入的标准不确定度

加速度标准套组的年稳定性为  $S_b$ ，假定为三角分布，则引入相对标准不确定度  $u_{r3}$  按照公式(A-11)计算：

$$u_{r3} = \frac{S_b}{k} \quad (A-11)$$

综上所述，直接测量法（比较法）加速度幅值测量装置引入的振动加速度传感器的相对标准不确定度分量按照公式(A-12)计算

$$u_r(a_s) = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2} \quad (A-12)$$

#### A. 4. 3 振动台加速度失真度引入的标准不确定度



振动台加速度失真度影响加速度测量结果，其不确定度影响量为  $\delta_D = \frac{D}{9\sqrt{1-D^2}}$ ，假设加速度参考点失真度  $D=5\%$ ，其它（通频）失真度  $D=10\%$ ，正态分布，所引入的相对标准不确定度分量按式(A-5)计算。

$$u_r(D) = \frac{\delta_D}{k} \quad (\text{A-5})$$

#### A. 4. 4 横向运动比引入的标准不确定度

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，加速度计的最大横向运动比为  $5\%$ ，B类评定，其不确定影响量为  $\delta_T = 0.05T$ 。假设加速度参考点横向运动比  $T=10\%$ ，不确定度影响量  $\delta_T = 0.05T = 0.5\%$ ；其它（通频）横向运动比  $T=20\%$ ，不确定度影响量  $\delta_T = 0.05T = 1.0\%$ ，假设三角分布，则引入的相对标准不确定度分量按式(A-14)计算。

$$u_r(T) = \frac{\delta_T}{k} \quad (\text{A-14})$$

#### A. 4. 5 电压测量不确定度分量

电压输出波形测量扩展不确定度为  $U_U$  引入的相对标准不确定度分量按式(A-6)计算。

$$u_r(U) = \frac{U_U}{2} \quad (\text{A-6})$$

#### A. 4. 6 质量块加速度分布测量不确定度分量

质量块加速度幅值不均匀度  $N$  轴向分布主要受应力波衰减影响，假定质量块通过加速度分布修正因子  $k_0$  修正质量块加速度分布后，对动态力测量造成的相对不确定度分量影响量不超过  $\delta_N = 2\%$ ，在参考点对动态力测量造成的相对不确定度分量影响量不超过  $\delta_N = 0.8\%$ 。如果不做修正处理，假设反正弦分布（ $k = \sqrt{2}$ ）；如果仅限于径向修正不考虑质量块轴向影响，假定均匀分布（ $k = \sqrt{3}$ ）；如果径向、轴向均做修正处理（如考虑质量块高径比等）用理论计算，假定三角分布（ $k = \sqrt{6}$ ）；如果径向、轴向均做修正处理（如考虑质量块高径比等）且质量块顶面、底面加速度均测量，假定正态分布（ $k = 3$ ），因而冲击加速度峰值不均匀度引入的相对标准不确定度分量  $u_r(N)$  按式(A-7)计算

$$u_r(N) = \frac{\delta_N}{k} \quad (\text{A-7})$$

### A.5 不确定度评定

A. 5. 1 激光干涉法振动加速度测量引入的标准不确定度分量  $u_r(\bar{a})$  按公式(A-8)计算：

$$u_r(\bar{a}) = \sqrt{u^2(a_s) + u_r^2(D) + u_r^2(U) + u_r^2(N)} \quad (\text{A-8})$$

A. 5. 2 直接测量法振动加速度测量引入的标准不确定度分量  $u_r(\bar{a})$  按公式(A-17)计算：

$$u_r(\bar{a}) = \sqrt{u^2(a_s) + u_r^2(D) + u_r^2(T) + u_r^2(U) + u_r^2(N)} \quad (\text{A-17})$$

A. 5. 3 标准装置输出的正弦力幅值的不确定度由有效质量、冲击加速度峰值两部分分量引起，合成标准不确定度按照公式(A-18)计算如下：

$$u_r(F) = \sqrt{u_r^2(m) + u_r^2(\bar{a})} \quad (\text{A-18})$$

A.5.4 正弦力标准装置输出正弦力幅值的相对扩展不确定度，按照  $U_r(F) = k u_r(F)$  计算：取包含因子  $k=2$ ，正弦力幅值测量结果扩展不确定度按式(A-19)计算。

$$U_r = 2u_r(F) \quad (\text{A-19})$$

## A.6 不确定度评定实例

### A.6.1 激光干涉法正弦力标准装置的不确定度评定

A.6.1.1 被校正弦力标准装置配套激光干涉仪，计量特性在工作频率范围内，绝对法（激光干涉法）正弦力标准装置最佳测量不确定度：幅值灵敏度：参考频率点  $U_r=1.0\%$ ，其它  $U_r=2.0\%$ ；相位延迟：参考频率点  $1^\circ$ ，其它频率点  $3^\circ$ 。标准不确定度分量汇总见表 A-1：

表 A-1 标准不确定度分量汇总表（激光干涉法）

序号	不确定度来源		分量代号	类型	分布类型	影响量 %	置信因子	不确定度分量 %	备注
1	有效质量	质量块	$u_r(m_t)$	B	均匀	$\pm 0.02$	$\sqrt{3}$	0.07	
		连接件	$u_r(M)$	B	均匀	$\pm 0.02$			
		力传感器头部质量	$u_r(m_e)$	B	均匀	$\pm 3$			
2	加速度	激光干涉仪加速度测量不确定度	$u_r(a_s)$	B	/	0.2	2	0.10	
3		振动台加速度失真度	$u_r(D)$	B	正态	0.56	3	0.19	参考点
						1.12	3	0.37	其它
4	幅值	电压测量不确定度	$u_r(U)$	B	/	0.2	2	0.10	
5		质量块加速度分布测量不确定度	$u_r(N)$	B	三角	0.8	$\sqrt{6}$	0.33	参考点
	2.0					$\sqrt{6}$	0.82	其它	
合成标准不确定度			参考点： $u_r(F) = 0.412\%$ ；其它： $u_r(F) = 0.913\%$						
扩展标准不确定度			参考点： $U_r = 0.9\%$ ；其它： $U_r = 1.9\%$						

注 1：质量称量不确定度分量以 2kg 质量块为例， $m_t = 2000\text{g}$ ，力传感器与质量块间上联接件质量  $M = 70\text{g}$ ，敏感件以上力传感器的头部质量  $m_e = 75\text{g}$ 。有效质量不确定度分量

$$u_r(m) = \frac{\delta m_t + \delta M + \delta m_e}{m\sqrt{3}} = \frac{2000 \times 0.02 + 70 \times 0.02 + 75 \times 3}{2145\sqrt{3}} \% = 0.07\%$$

注 2：径向、轴向均做修正处理（如考虑质量块高径比等），仅用理论计算，在质量块底面未进行加速

度测量，假定三角分布，取 $k = \sqrt{6}$ 。

A. 6. 1. 2 根据以上不确定度分量的实际数据，可获得参考频率合成标准不确定度为：

$$u_r(\bar{a}) = \sqrt{u_r^2(m) + u_r^2(a_s) + u_r^2(D) + u_r^2(U) + u_r^2(N)} = 0.412\%$$

扩展不确定度为： $U_r = 2 \times 0.412\% = 0.9\%$ 。

A. 6. 1. 3 其它（通频）频率点合成标准不确定度为：

$$u_r(\bar{a}) = \sqrt{u_r^2(m) + u_r^2(a_s) + u_r^2(D) + u_r^2(U) + u_r^2(N)} = 0.913\%$$

扩展不确定度为： $U_r = 2 \times 0.942\% = 1.9\%$ 。

A. 6. 2 直接测量法（比较法）正弦力标准装置的不确定度应用实例评定

A. 6. 2. 1 被校正弦力标准装置配套标准振动套组，计量特性如下：在工作频率范围内，直接测量法（加速度计法）正弦力标准装置幅值灵敏度最佳测量不确定度：参考频率点 $U_r = 1.5\%$ ，其它频率点： $U_r = 2.5\%$ 。标准不确定度分量汇总见表 A-2：

表 A-2 标准不确定度分量汇总表（冲击加速度传感器直接测量法）

序号	不确定度来源		分量代号	类型	分布类型	影响量 %	置信因子	不确定度分量 %	备注	
1	有效质量	质量块	$u_r(m_t)$	B	均匀	$\pm 0.02$	$\sqrt{3}$	0.11		
		连接件	$u_r(M)$	B	均匀	$\pm 0.02$	$\sqrt{3}$			
		力传感器头部质量	$u_r(m_e)$	B	均匀	$\pm 2$	$\sqrt{3}$			
2	加速度	加速度标准套组灵敏度测量不确定度	$u_r(a_{11})$	B	/	0.5	2	0.25	参考点	
					/	1.0	2	0.50	其它	
		加速度标准套组灵敏度幅值线性度	$u_r(a_{12})$	B	/	/	/	/	/	参考点
					均匀	$\pm 1.0$	$\sqrt{3}$	0.58	其它	
		加速度标准套组年稳定性	$u_r(a_{13})$	B	正态	$\pm 0.5$	3	0.29		
3	幅值	振动台加速度失真度	$u_r(a_2)$	B	正态	0.56	3	0.19	参考点	
						1.12	3	0.37	其它	
4		振动台加速度横向运动比	$u_r(a_3)$	B	三角	0.5	$\sqrt{6}$	0.20	参考点	
	1.0					$\sqrt{6}$	0.41	其它		
5		电压测量不确定度	$u_r(a_4)$	B	/	0.2	2	0.10		

6	质量块加速度分布 测量不确定度	$u_r(a_5)$	B	正态	0.8	3	0.27	参考点
					2.0	3	0.67	其它
合成标准不确定度		参考点: $u_r(F) = 0.564%$ ; 其它: $u_r(F) = 1.116%$						
扩展标准不确定度		参考点: $U_r = 1.2%$ ; 其它: $U_r = 2.4%$						

注 1: 质量称量不确定度分量以 20kg 质量块为例, 质量块、力传感器与质量块间上联接件质量两者之和  $m_t = 2000g$ ,  $m_t + M = 21.325kg$ , 敏感件以上力传感器的头部质量  $m_e = 1.250g$ 。有效质量不确定度分量计算如下

$$u_r(m) = \frac{(\delta m_t + \delta M) + \delta m_e}{m\sqrt{3}} = \frac{21.325 \times 0.02 + 1.250 \times 3}{22.575\sqrt{3}} \% = 0.11\%。$$

注 2: 在质量块顶面、底面均进行加速度测量, 假定正态分布, 取  $k = 3$ 。

A. 6. 2. 2 根据以上不确定度分量的实际数据, 可获得参考频率合成标准不确定度为:

$$u_r(\bar{a}) = \sqrt{u_r^2(m) + u_r^2(a_5) + u_r^2(D) + u_r^2(T) + u_r^2(U) + u_r^2(N)} = 0.564\%$$

扩展不确定度为:  $U_r = 2 \times 0.564\% = 1.2\%$

A. 6. 2. 3 其它频率点合成标准不确定度为:

$$u_r(\bar{a}) = \sqrt{u_r^2(m) + u_r^2(a_5) + u_r^2(D) + u_r^2(T) + u_r^2(U) + u_r^2(N)} = 1.116\%$$

扩展不确定度为:  $U_r = 2.4\%$ 。

## 附录 B

## 正弦力标准装置校准原始记录

第 页 共 页

委托单位 \_\_\_\_\_ 地址 \_\_\_\_\_  
 计量器具名称 \_\_\_\_\_ 型号规格 \_\_\_\_\_  
 出厂编号 \_\_\_\_\_ 制造厂 \_\_\_\_\_  
 准确度等级 \_\_\_\_\_ 校准前状态 \_\_\_\_\_ 校准后状态 \_\_\_\_\_  
 校准地点 \_\_\_\_\_ 温度 \_\_\_\_\_ °C 相对湿度 \_\_\_\_\_ %  
 校准日期 \_\_\_\_\_ 有效期限 \_\_\_\_\_ 证书编号 \_\_\_\_\_

## 一、校准依据文件：

## 二、校准所用的计量标准设备：

名称	设备编号	规格型号/ 测量范围	准确度等级/最大允 许误差/不确定度	证书编号	有效日期

## 三、校准结果：

## 1 校准前检查：

## 2 有效质量：\_\_\_\_\_

序号	名称	编号	实测质量/kg	测量结果的合成标准不确定度 $u_c$
1				
2				
3				

## 3 激光干涉仪加速度灵敏度

测量不确定度：\_\_\_\_\_

线性度：\_\_\_\_\_

频率响应：\_\_\_\_\_

## 4 加速度标准套组的加速度灵敏度

灵敏度不确定度：幅值参考条件\_\_\_\_\_, 其它\_\_\_\_\_

相位参考条件\_\_\_\_\_, 其它\_\_\_\_\_

灵敏度频率响应：幅值\_\_\_\_\_, 相位\_\_\_\_\_

灵敏度幅值线性度：\_\_\_\_\_

参考灵敏度年稳定度：\_\_\_\_\_

## 5 加速度计加速度灵敏度

灵敏度不确定度：幅值参考条件\_\_\_\_\_，其它\_\_\_\_\_

灵敏度频率响应：幅值\_\_\_\_\_，

灵敏度幅值线性度：\_\_\_\_\_

参考灵敏度年稳定度：\_\_\_\_\_

6 振动力源动台加速度稳定性：设定频率\_\_\_\_\_ Hz，幅值\_\_\_\_\_  $m/s^2$ 

时间/s	0	10	20	...	90	100
加速度幅值 ( $m/s^2$ )						

加速度稳定性\_\_\_\_\_

## 7 振动台加速度幅值线控制误差\_\_\_\_\_

校准点		设定加速度幅值 $m/s^2$	测量加速度幅值 $m/s^2$	加速度幅值线控制误差 %
序号	Hz			
1				
2				
⋮				
9				
10				

## 8 振动台谐波失真度：\_\_\_\_\_、加速度横向运动比：\_\_\_\_\_

序号	校准点		测量 次数	谐波 失真度	加速度幅值实测值 $m/s^2$			
	设定频率	设定幅值			主方向 Z	横向 X	横向 Y	横向运动比
1			1					
			2					
			3					
2			1					
			2					
			3					
...			1					
			2					
			3					

## 9 振动台加速度峰值不均匀度：\_\_\_\_\_

序号	校准点		测量 次数	加速度幅值实测值 $m/s^2$					
	设定频率	设定幅值		中心点	点 1	点 2	...	点 N	不均匀度
1			1						
			2						

			3						
2			1						
			2						
			3						
...			1						
			2						
			3						

## 10 振动控制器频率、电压测量误差与通道一致性

序号	加速度频率控制误差			加速度幅值控制误差		
	设定频率值	测量频率值	%	设定电压值	测量电压值	%
1						
2						
⋮						
9						
10						

通道一致性\_\_\_\_\_

11 力传感器头部质量：\_\_\_\_\_。

12 校准能力验证力传感器套组参考灵敏度：

设定频率\_\_\_\_\_ Hz，幅值\_\_\_\_\_  $m/s^2$ 力传感器套组静态灵敏度  $S_0$  \_\_\_\_\_。

测量次数	正弦力标准装置 正弦力幅值/N	力传感器套组 正弦力幅值/N	力传感器套组 灵敏度测量值 $S_j$	重复性%
1				
2				
⋮				
5				
6				

本年度参考灵敏度：\_\_\_\_\_，上年度参考灵敏度：\_\_\_\_\_，

参考灵敏度年稳定度：\_\_\_\_\_

## 13 校准能力验证频率响应（相对灵敏度）与相位延迟

质量块质量\_\_\_\_\_、高度\_\_\_\_\_、材质与弹性模量：\_\_\_\_\_

连接件等质量\_\_\_\_\_、高度\_\_\_\_\_、材质与弹性模量：\_\_\_\_\_

力传感器质量\_\_\_\_\_、高度\_\_\_\_\_、材质与弹性模量：\_\_\_\_\_

头部质量\_\_\_\_\_，设定加速度\_\_\_\_\_  $\text{m/s}^2$ ，力传感器套组静态灵敏度  $S_0$  \_\_\_\_\_

校准点设定频率										
测量次数		1	2	3	1	2	3	1	2	3
正弦力标准装置	顶面加速度 $\overline{a_t}$									
	$a_{t0}$									
	$a_{t1}$									
	$a_{t2}$									
	$a_{t3}$									
	$a_{t4}$									
	顶面加速度 $\overline{a_e}$									
	$a_{e1}$									
	$a_{e2}$									
	$a_{e3}$									
	$a_{e4}$									
	正弦力幅值 $F$									
正弦力标准装置	初始相位 $\overline{\phi_a}$									
	$\phi_{a0}$									
	$\phi_{a1}$									
	$\phi_{a2}$									
	$\phi_{a3}$									
	$\phi_{a4}$									
力传感器套组	输出幅值 $u$									
	正弦力幅值 $F_0$									
	灵敏度 $S$									
	相对灵敏度 $S/S_0$									
	平均灵敏度									
	参考实验室灵敏度									
	灵敏度归一化偏差									
	初始相位 $\phi_u$									
	相位延迟 $\Delta\phi$									
	平均相位延迟									



14 校准能力验证幅值线性

质量块质量\_\_\_\_\_、高度\_\_\_\_\_、材质与弹性模量：\_\_\_\_\_

连接件等质量\_\_\_\_\_、高度\_\_\_\_\_、材质与弹性模量：\_\_\_\_\_

力传感器质量\_\_\_\_\_、高度\_\_\_\_\_、材质与弹性模量：\_\_\_\_\_

力传感器头部质量\_\_\_\_\_，设定频率\_\_\_\_\_Hz，

力传感器套组参考实验室灵敏度\_\_\_\_\_，力传感器套组参考灵敏度  $S_R$  \_\_\_\_\_。

校准点设定幅值											
折算力值											
测量次数		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
正 弦 力 标 准 装 置	顶面加速度 $\overline{a_t}$										
	$a_{t0}$										
	$a_{t1}$										
	$a_{t2}$										
	$a_{t3}$										
	$a_{t4}$										
	顶面加速度 $\overline{a_e}$										
	$a_{e1}$										
	$a_{e2}$										
	$a_{e3}$										
	$a_{e4}$										
	正弦力幅值 $F$										
	力 传 感 器 套 组	输出幅值									
正弦力幅值 $F_1$											
灵敏度											
灵敏度相对偏差											
平均灵敏度											
灵敏度幅值线性											
灵敏度归一化偏差											

校准：\_\_\_\_\_ 核验：\_\_\_\_\_

## 附录 C

## 正弦力标准装置校准证书内页格式

- 1 校准前检查：  
2 有效质量：\_\_\_\_\_

序号	编号	实测质量/kg	测量结果的合成标准不确定度 $u_c$
1			
2			
...			

- 3\* 激光测振仪校准，加速度、频率示值误差：\_\_\_\_\_
- 3 灵敏度校准：\_\_\_\_\_
- 3 线性度校准：\_\_\_\_\_
- 4\* 振动加速度标准套组校准，加速度、频率示值误差：\_\_\_\_\_
- 4 灵敏度：\_\_\_\_\_
- 4 幅值线性度：\_\_\_\_\_
- 4 灵敏度年稳定度：\_\_\_\_\_
- 5\* 工作加速度计校准，加速度、频率示值误差：\_\_\_\_\_
- 5 灵敏度校准：\_\_\_\_\_
- 5 幅值线性度：\_\_\_\_\_
- 5 灵敏度年稳定度：\_\_\_\_\_
- 6\* 振动力源振动台校准。加速度控制误差\_\_\_\_\_
- 6 振动台加速度稳定性：\_\_\_\_\_
- 6 振动台横向运动比：\_\_\_\_\_
- 6 振动台谐波失真度：\_\_\_\_\_
- 6 振动台加速度均匀度：\_\_\_\_\_
- 6 质量块加速度分布：\_\_\_\_\_
- 6 控制系统频率测量误差：\_\_\_\_\_
- 6 控制系统电压测量误差：\_\_\_\_\_
- 6 控制系统通道一致性：\_\_\_\_\_
- 7\* 校准能力验证，参考灵敏度：\_\_\_\_\_
- 7 参考灵敏度的重复性：\_\_\_\_\_
- 7 参考灵敏度的稳定性：\_\_\_\_\_
- 7 灵敏度频率响应（相对灵敏度）：\_\_\_\_\_
- 7 灵敏度幅值线性：\_\_\_\_\_
- 7 相位延迟：\_\_\_\_\_。