



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 20485.12—2008/ISO 16063-12:2002

代替 GB/T 13823.18—1997

## 振动与冲击传感器校准方法 第 12 部分：互易法振动绝对校准

Method for the calibration of vibration and shock transducers—  
Part 12: Primary vibration calibration by the reciprocity method

(ISO 16063-12:2002, IDT)



2008-03-03 发布

2008-08-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布



中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准

振动与冲击传感器校准方法

第 12 部分：互易法振动绝对校准

GB/T 20485.12—2008/ISO 16063-12:2002

\*

中国标准出版社出版发行  
北京复兴门外三里河北街 16 号

邮政编码：100045

网址 [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

电话：68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 880×1230 1/16 印张 1.25 字数 33 千字

2008 年 6 月第一版 2008 年 6 月第一次印刷

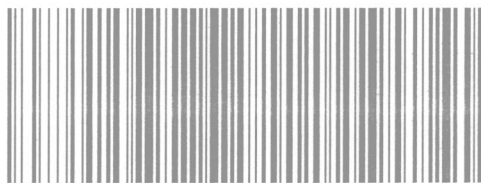
\*

书号：155066·1-31379 定价 18.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话：(010)68533533



GB/T 20485.12-2008

## 前 言

GB/T 20485《振动与冲击传感器校准方法》预计结构由基本概念、绝对法校准、比较法校准和环境模拟校准等大类以及以下几部分组成：

- 第 1 部分：基本概念；
- 第 11 部分：激光干涉法振动绝对校准；
- 第 12 部分：互易法振动绝对校准；
- 第 13 部分：激光干涉法冲击绝对校准；
- 第 15 部分：激光干涉法角振动绝对校准；
- 第 21 部分：振动比较法校准；
- 第 22 部分：冲击比较法校准。

本部分是 GB/T 20485 的第 12 部分。

本部分等同采用 ISO 16063-12:2002《振动与冲击传感器校准方法 第 12 部分：互易法振动绝对校准》(英文版)。

本部分等同翻译 ISO 16063-12:2002。

为便于使用，本部分作了如下编辑性修改：

- “国际标准的本部分”一词改为“本部分”；
- 删除国际标准的前言；
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”；
- 对 ISO 16063-12:2002 中引用的其他国际标准，有被等同采用为我国标准的，用我国标准代替对应的国际标准，未被等同采用为我国标准的直接引用国际标准。

本部分代替 GB/T 13823.18—1997《振动与冲击传感器的校准方法 互易法校准》。

与 GB/T 13823.18—1997 相比，主要修改内容如下：

- 标准名称“互易法校准”改为“互易法振动绝对校准”；
- 原标准中规定的频率范围 40 Hz~1 250 Hz 改为 40 Hz~5 000 Hz，并对仪器设备要求做了相应的调整；
- 校准环境条件中室温由 20℃±5℃改为 23℃±3℃；
- 校准频率的选择改为按照 1/3 倍频程；
- 增加了加速度计复灵敏度辐角(相移)的计算内容；
- 附录 A 不确定度计算采用新方法等；
- 增加了第 3 章 测量不确定度和第 4 章 符号；
- 附录 A 中增加了 A.1.2 和 A.2.2 复灵敏度辐角(相移)校准的不确定度计算；
- 增加了附录 B 互易法理论在机电传感器校准中的应用。

本部分的附录 A 为规范性附录，附录 B 为资料性附录。

本部分由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会提出并归口。

本部分起草单位：中国计量科学研究院、安徽大学。

本部分主要起草人：于梅、杨丽峰、葛立峰。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 13823.18—1997。

目 次

前言 ..... I

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 测量不确定度 ..... 1

4 符号 ..... 1

5 仪器设备要求 ..... 2

5.1 总则 ..... 2

5.2 频率发生器和显示器或计数器 ..... 2

5.3 功率放大器和振动台 ..... 2

5.4 振动台的隔振块 ..... 2

5.5 复电压比测量仪 ..... 2

5.6 电阻器 ..... 2

5.7 试验质量块组 ..... 3

5.8 失真度测量仪 ..... 3

5.9 示波器 ..... 3

5.10 空气处理装置 ..... 3

6 环境条件 ..... 3

7 优先选用的加速度幅值和频率值 ..... 3

8 操作步骤 ..... 3

8.1 总则 ..... 3

8.2 实验 ..... 4

9 灵敏度的计算 ..... 4

附录 A(规范性附录) 不确定度的计算 ..... 8

附录 B(资料性附录) 互易法理论在机电传感器校准中的应用 ..... 11

参考文献 ..... 15

振动与冲击传感器校准方法  
第 12 部分:互易法振动绝对校准

1 范围

本部分规定了使用互易法和 SI 国际单位制对加速度计进行绝对校准所用的仪器设备及操作程序。  
本部分适用于频率范围 40 Hz~5 kHz、加速度幅值(取决于频率)范围 10 m/s<sup>2</sup>~100 m/s<sup>2</sup> 的直线加速度计的校准,本部分基于电动振动台的线圈作为互易传感器的情况。  
与被校传感器配套使用的信号适调仪或放大器具有良好特性时,可以使用本部分描述的方法进行传感器灵敏度校准。为了达到本部分第 3 章规定的测量不确定度,应该采用传感器与信号适调仪或放大器配套进行校准(在本部分中,把传感器与信号适调仪或放大器的组合简称为“加速度计”)。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 20485 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分。然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 20485.1—2008 振动与冲击传感器校准方法 第 1 部分:基本概念(ISO 16063-1:1998,IDT)  
ISO 266 声学 优选频率

3 测量不确定度

在参考频率 160 Hz 和参考幅值 100 m/s<sup>2</sup>、50 m/s<sup>2</sup>、20 m/s<sup>2</sup>、10 m/s<sup>2</sup> 时,传感器复灵敏度模(幅值)测量的不确定度不大于 0.5%,辐角(相移)测量的不确定度不大于 1°,在整个校准的频率和幅值范围内,灵敏度幅值测量的不确定度不大于 1%,灵敏度相移测量的不确定度不大于 2°。  
要求使用本部分的所有用户根据附录 A 进行不确定度估算,提供测量不确定度的文件资料。  
根据 GB/T 20485.1—2008,测量不确定度表述为测量的扩展不确定度(简称为“不确定度”)。

4 符号

表 1 中列出了本部分使用的通用符号。对于公式中使用的特殊符号,在公式的下方对其进行了定义。

表 1 通用符号

| 符 号   | 定 义                    | 单 位 |
|-------|------------------------|-----|
| $f$   | 振动频率                   | Hz  |
| $n$   | 试验质量块序数( $n=0$ 表示无质量块) |     |
| $m_n$ | 序号为 $n$ 的试验质量块的质量      | kg  |
| $u$   | 复电压                    | V   |
| $U$   | 复电压比                   |     |
| $Y$   | 复电导纳                   | S   |

表 1 (续)

| 符 号         | 定 义           | 单 位                                    |
|-------------|---------------|----------------------------------------|
| $R$         | 电阻            | $\Omega$                               |
| $\alpha$    | 最小二乘拟合的复截距    | $\text{kg} \cdot \Omega$               |
| $\beta$     | 最小二乘拟合的复斜率    | $\Omega$                               |
| $S_a$       | 被校加速度计的复灵敏度   |                                        |
| $ S_a $     | 加速度灵敏度的模(幅值)  | $\text{V}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ |
| $\varphi_a$ | 加速度灵敏度的辐角(相移) | $^\circ$                               |
| $\text{Re}$ | 复数的实部         |                                        |
| $\text{Im}$ | 复数的虚部         |                                        |
| $  $        | 复数的模或绝对值      |                                        |
| $\arg$      | 复数的辐角         |                                        |

5 仪器设备要求

5.1 总则

在关注的整个频率范围内,传感器的壳体在结构上应是刚性的。在计算传感器复灵敏度模和辐角的扩展不确定度时,应考虑加速度计(传感器与信号适配仪或放大器组成的套组)的基座应变灵敏度、横向灵敏度及灵敏度稳定性(参照附录 A)。

5.2 频率发生器和显示器或计数器

所用仪器应满足下列性能指标:

- a) 频率不确定度:不大于 0.01%;
- b) 频率稳定性:在每一个测量周期内不超过 0.01%;
- c) 幅值稳定性:在每一个测量周期内不超过 0.01%。

5.3 功率放大器和振动台

在各种测量环境下,所用仪器均应满足下列性能指标:

- a) 总谐波失真:不大于 2%;
- b) 横向、弯曲及摇摆加速度:应符合灵敏度测量不确定度的相关要求(在所关注的整个频率范围内,其典型值应小于主轴方向加速度的 10%);
- c) 加速度计输出的信噪比:不小于 30 dB;
- d) 加速度幅值稳定性:在每一个测量周期内不超过 0.05%。

5.4 振动台的隔振块

为了减小振动台支撑结构对振动台运动产生的反作用力,振动台应安装在一个大的刚性隔振质量块上,以显著降低对校准结果不确定度的影响。隔振块的质量应至少是振动台运动部分质量的 2 000 倍。适合此用途的隔振块有花岗岩、钢制蜂窝状的光学平台等。若校准环境中存在明显的地面振动,隔振块应使垂直与水平方向的悬挂共振频率均小于 2 Hz。

5.5 复电压比测量仪

所用设备应满足下列性能指标:

- a) 频率范围:40 Hz~5 kHz;
- b) 复电压比模(幅值)的不确定度:不大于 0.1%;
- c) 复电压比辐角(相移)的不确定度:不大于 0.1°。

5.6 电阻器

在校准频率和功耗范围内,电阻器电阻测量的不确定度应不大于 0.05%。

由于电流是通过标准电阻的阻抗值确定的,所以应确保其阻抗值不受电感与热效应的影响。

## 5.7 试验质量块组

试验质量块应:

- a) 覆盖至少 5 个近似等间隔的测试范围,而最大的试验质量块应约为振动台运动部分质量的 0.5 至 1 倍;
- b) 质量测量的不确定度不大于 0.05%。

推荐试验质量块选用长宽比约为 1 的立方体或圆柱体。可利用公式  $c/(2L)$  来估算试验质量块呈刚体特性时的最高频率,其中  $c$  为试验质量块材料中的声速, $L$  为质量块的长度。质量块表面粗糙度的技术要求及连接件机械加工公差都应满足或不大于被校传感器校准时的安装要求。如果在高频段进行校准,这些要求应更为严格。为了提高试验质量块自身的固有频率,质量块应选相对较硬的材料加工,如碳化钨。

实际上,在测量电导纳时所做的大量不同的测量会导致驱动线圈产生热效应。因此,在选用试验质量块的数量和尺寸时,应在减小统计不确定度和增大测量不确定度之间折衷考虑。

## 5.8 失真度测量仪

失真度测量仪总谐波失真的范围为 0.01%~5%,并应满足下列性能指标:

- a) 频率范围:40 Hz~5 kHz;
- b) 不确定度:不大于失真度测量值的 10%。

## 5.9 示波器

示波器可以用来观测加速度计和电动式动圈的信号波形,它是可选设备。

## 5.10 空气处理装置

该装置应确保环境条件满足第 6 章中的要求。

# 6 环境条件

校准应在以下环境条件中进行:

- a) 室内温度:  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ ;
- b) 相对湿度:不大于 75%。

## 7 优先选用的加速度幅值和频率值

校准使用的加速度幅值和频率应从以下序列中选择:

- a) 加速度:10  $\text{m/s}^2$ 、20  $\text{m/s}^2$ 、50  $\text{m/s}^2$ 、100  $\text{m/s}^2$ ;
- b) 参考加速度:100  $\text{m/s}^2$ 、50  $\text{m/s}^2$ 、20  $\text{m/s}^2$  或 10  $\text{m/s}^2$ ;
- c) 频率:在 40 Hz~5 kHz 范围内,按照 GB/T 3240 规定的标准的 1/3 倍频程选择。
- d) 参考频率:160 Hz。

在校准大加速度幅值时,驱动线圈产生的热效应将导致较大的幅值校准不确定度。

## 8 操作步骤

### 8.1 总则

互易法校准机电式传感器是利用被校传感器机电端口间的双向线性关系。为了对两只传感器进行绝对校准,实验共需 3 只传感器,其中一只仅作为振动传感器,一只仅作为振源,另外一只具有互易性,既作为振动传感器又作为振源(振动发生器)。通常,互易传感器的机电耦合方式可以是电动式或压电式。然而,在互易法振动校准的实际应用中,电动式传感器被更广泛地用作互易传感器。因此,本部分描述的方法都是基于将电动振动台的线圈作为互易传感器。安装被校传感器时应靠近该线圈。

仅作为振源的传感器可以是一个第二激励器,它与装有互易传感器和加速度传感器的运动部件机

械联接,或是安装在同一运动部件上的第二线圈(参见利用第二激振器或第二线圈实现校准系统的参考文献)。如果使用第二激振器,可通过一个短螺栓与运动部件刚性联接,另外还应将互易传感器与第二激振器完全隔离,并保证运动部件的直线运动不因第二振源的存在而受到影响。若第二振源是电动式的,应注意防止两个电动元件间相互联接对校准结果不确定度带来不利影响。图 1 和图 2 是基于互易法的一个可实现的校准系统方框图,图中有安装在带有互易传感器的振动台内的加速度传感器,以及表示为第二激振器的第二振源。

校准频率点应远远低于装有互易传感器和支撑被校传感器运动部件的固有频率。使用具有很高谐振频率的三向加速度计可以确定横向和轴向的谐振频率。运动部件与刚体运动的偏离可通过测量运动部件安装表面的相对运动确定。理想的是通过安装在试验夹具上的三向加速度计来测量横向和轴向谐振。加速度计与试验夹具质量之和等于确定  $Y_n - Y_0$  时的最大质量块的质量。当运动部件上装有被测传感器和确定  $Y_n - Y_0$  时的最大质量块时,加速度计校准时典型的上限频率应为运动部件谐振频率的 0.25 倍。应避免在出现次谐振的频率点进行校准。不应将悬挂系统和结构引起的这些次谐振视为由运动部件固有频率引起的谐振。

用互易传感器作为振源(激振器)和振动传感器(速度线圈)来得到测量结果(分别参见 8.2.1 和 8.2.2)。对于第 1 种情况,要求在运动部件上加质量块和不加质量块两种条件下进行测量。重要的是应在均匀的温度场中,用磁隙中同一静态位置的互易传感器线圈完成这些测量。在温度场中,温度变化量上限的典型值应在 1℃ 到 2℃ 之间。用互易线圈两端的直流偏置电压可以对互易传感器的静态位置偏移量进行修正。理想的情况下,装置应只在一个点上接地以避免地回路的形成。测量互易线圈和标准电阻两端电压时,应尽量靠近电压电源以减小噪声的引入。在测量电压比  $U_v$ (参见 8.2.2)过程中,可以拆除或短接标准电阻器。然而,如果短接标准电阻,在高频校准时应检验电感效应是否对测量结果不确定度产生了影响。

设置好仪器设备后,在 160 Hz 和参考加速度幅值下进行校准,然后在其他选定的频率点和加速度幅值下进行校准。测量结果用复灵敏度的模(幅值),复灵敏度的辐角(相移),或复灵敏度的模(幅值)和辐角(相移)表述。对于每一个校准频率点对应的加速度,其失真、横向振动(弯曲和摇摆加速度)、交流声及噪声都应满足第 3 章中给定的不确定度要求。在进行校准时,未用的仪器设备不应与测量装置连接。

8.2 实验

8.2.1 实验 1:复电导纳  $Y$ (驱动线圈的电流与加速度计开路输出电压复数比)的测量

用互易电动线圈作为驱动线圈(振源),由复电压比( $U_d$ )除以标准电阻( $R$ )的方法测量复电导纳,式中  $U_d$  是标准电阻两端的电压降( $u_r$ )与加速度计输出的开路电压( $u_{a1}$ )之比(见图 1),即:

$$Y=U_d/R=(u_r/u_{a1})(1/R)$$

在运动部件上加质量块与不加质量块两种情况下得到一系列的测量值。在下面的公式中,不加质量的复电导纳用  $Y_0$  表示,加试验质量  $m_n$  的复电导纳用  $Y_n$  表示。

当测量  $U_d$  时,加速度计与标准电阻应处于相同的地电势,实验 1 应在使用的所有加速度幅值下进行校准。

8.2.2 实验 2:复开路电压比  $U_v$ (加速度计输出电压与速度线圈输出电压的复开路电压比)的测量

用互易电动线圈作为速度线圈(振动传感器),使用一个外部振源或一个运动部件上的第二个激励线圈来驱动运动部件(见图 2),测量加速度计输出电压( $u_{a2}$ )与可动线圈输出电压( $u_c$ )的复开环电压比。电压比( $U_v=u_{a2}/u_c$ )是在运动部件上无质量块的条件下测定的。

在测量  $U_v$  时,加速度计与互易线圈应处于相同的地电势。

9 灵敏度的计算

见方程(1)~(10)与附录 B。

$$F(m_n, Y_n, Y_0) = \frac{m_n}{Y_n - Y_0} \dots\dots\dots (1)$$

在每个校准频率和加速度幅值下,利用测量的  $m_n, Y_n$  和  $Y_0$  值,通过对(1)式最小二乘拟合,得到  $F(m_n, Y_n, Y_0)$  的复截距与斜率。在下面的拟合公式中,可以使用不加权( $w_n=1$ )或加权的统计方法:

$$\text{Re}\alpha = \frac{\sum (w_n^2 m_n^2) \sum \text{Re} \left( \frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Re} \left( \frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - [\sum (w_n^2 m_n)]^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Im}\alpha = \frac{\sum (w_n^2 m_n^2) \sum \text{Im} \left( \frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Im} \left( \frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - [\sum (w_n^2 m_n)]^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Re}\beta = \frac{\sum w_n^2 \sum \text{Re} \left( \frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Re} \left( \frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - [\sum (w_n^2 m_n)]^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Im}\beta = \frac{\sum w_n^2 \sum \text{Im} \left( \frac{w_n^2 m_n^2}{Y_n - Y_0} \right) - \sum w_n^2 m_n \sum \text{Im} \left( \frac{w_n^2 m_n}{Y_n - Y_0} \right)}{\sum w_n^2 \sum (w_n^2 m_n^2) - [\sum (w_n^2 m_n)]^2} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $\alpha$ ——函数  $F(m_n, Y_n, Y_0)$  的复截距,单位为千克欧姆(kgΩ);
- $\beta$ ——函数  $F(m_n, Y_n, Y_0)$  的复斜率,单位为欧姆(Ω);
- $n$ ——试验质量块  $m_n$  的序号;
- $w_n$ ——测量时使用的试验质量块  $m_n$  的统计加权因子;
- $m_n$ ——施加的试验质量块,单位为千克(kg);
- $Y_n$ ——运动部件上有试验质量块  $m_n$  时测得的电导纳,单位为西门子(S);
- $Y_0$ ——运动部件上无试验质量块时测得的电导纳,单位为西门子(S)。

注:根据加速度计校准方法,可能不需要计算斜率,也不需要计算截距的实部和虚部而只需计算其幅值;见公式(8)~(10)(见参考文献[1])。

从下面公式可以得到以频率函数表示的加速度计复灵敏度的模和辐角。

对于在振动台运动部件上固定安装有标准参考传感器(用于通过比较法来校准其他传感器)的情况,被校加速度计灵敏度随施加在运动部件上的机械阻抗变化,可通过下面公式得出:

$$|S_a| = \left| \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j 2 \pi f}} \left[ \frac{1}{1 - \beta(Y_t - Y_0)} \right] \right| \dots\dots\dots (6)$$

$$\varphi_a = \arg \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j 2 \pi f}} \left[ \frac{1}{1 - \beta(Y_t - Y_0)} \right] \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- $|S_a|$ ——在频率  $f$  下加速度计复灵敏度的模(幅值),单位为伏每米负二次方秒[V/(m·s<sup>-2</sup>)];
- $\varphi_a$ ——在频率  $f$  下加速度计复灵敏度的辐角(相移),单位为度(°);
- $j$ ——虚数的单位,  $j^2 = -1$ ;
- $f$ ——振动频率,单位为赫兹(Hz);
- $U_v$ ——用互易传感器作为速度线圈时,在频率  $f$  下测得的复开路电压比;
- $\alpha$ ——频率  $f$  处函数  $F(m_n, Y_n, Y_0)$  的复截距,单位为千克欧姆(kgΩ);
- $\beta$ ——频率  $f$  处函数  $F(m_n, Y_n, Y_0)$  的复斜率,单位为欧姆(Ω);
- $Y_t$ ——使用在振动台运动部件上附加的专用传感器,在频率  $f$  下测得的导纳,单位为西门子;
- $Y_0$ ——在振动台运动部件上无附加质量时,在频率  $f$  下测得的导纳,单位为西门子(S)。

对于从运动部件上拆除标准参考传感器的情况,被校加速度计灵敏度可通过下列公式得到:

$|S_a| = \left| \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j 2 \pi f}} \right| \dots\dots\dots (8)$

$\varphi_a = \arg \sqrt{\frac{U_v \alpha}{j 2 \pi f}} \dots\dots\dots (9)$

公式(8)和(9)中的符号与公式(6)和(7)中的定义相同。

在较低的频率点上(典型值是小于 1 kHz 频率点),β 约为 0Ω, arg(U<sub>v</sub>) 约为 90°, arg(U<sub>d</sub>) 约为 0°, 当这些条件都满足时,加速度计复灵敏度的模简化为:

$|S_a| = \sqrt{\frac{|U_v| |\alpha|}{2 \pi f}} \dots\dots\dots (10)$

式中:

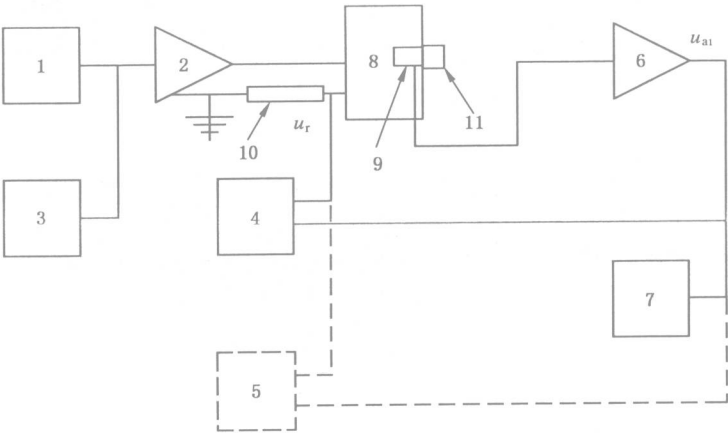
|U<sub>v</sub>|——用互易传感器作为速度线圈时,在频率 f 下测得的复开路电压比的模(幅值);

|α|——频率 f 处函数 F(m<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Y<sub>0</sub>) 的复截距的模(幅值),单位为千克欧姆(kgΩ)。

其他符号与公式(6)、(7)中的定义相同。

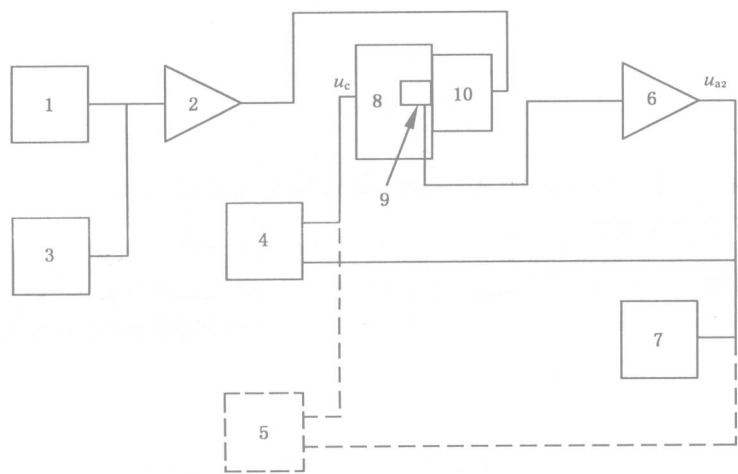
在使用公式(10)时,只需要确定复电压比的模(幅值)和复截距 α 的模。其中用复导纳微分的模,通过函数 F(m<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub>, Y<sub>0</sub>) 的最小二乘拟合,可确定复截距 α 的模。

报告校准结果时,应计算总的校准不确定度和相应的包含因子,按照附录 A 取包含因子 k=2。



- 1——频率发生器;
- 2——功率放大器;
- 3——频率计数器;
- 4——电压比测量仪;
- 5——示波器(可选);
- 6——信号适调仪或电荷放大器;
- 7——失真度分析仪;
- 8——装有互易传感器的振动台;
- 9——传感器;
- 10——标准电阻器;
- 11——试验质量块。

图 1 互易传感器作为振源的实验 1 测量系统方框图



- 1——频率发生器；
- 2——功率放大器；
- 3——频率计数器；
- 4——电压比测量仪；
- 5——示波器(可选)；
- 6——信号适调仪或电荷放大器；
- 7——失真度分析仪；
- 8——装有互易传感器的振动台；
- 9——传感器；
- 10——第二个振动源。

图 2 互易传感器作为振动传感器的实验 2 测量系统方框图

附 录 A  
(规范性附录)  
不确定度的计算

A.1 在选定频率、振幅、放大器设置的校准条件下,复灵敏度的模(幅值)的测量扩展不确定度和辐角(相移)的测量扩展不确定度的计算

A.1.1  $U(|S|)$ 的计算

根据 GB/T 20485.1—2008 给出的下面公式,计算选定频率、振幅、放大器设置校准条件下的复灵敏度模(幅值)的测量扩展不确定度  $U(|S|)$ :

$$U(|S|) = k u_c(|S|) \dots\dots\dots (A.1)$$
$$u_c(|S|) = \frac{1}{|S|} \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(|S|)} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中包含因子  $k=2$ 。  
不确定度分量见表 A.1。

表 A.1 确定  $|S|$  的不确定度分量

| $i$ | 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 不确定度来源                                             | 不确定度分量大小<br>$u_i(y)$ |
|-----|----------------------|----------------------------------------------------|----------------------|
| 1   | $u(f_{FG})$          | 频率的不确定度                                            | $u_1( S )$           |
| 2   | $u(u_{Temp})$        | 校准过程中由温度影响引入的参考加速度计的不确定度                           | $u_2( S )$           |
| 3   | $u(u_D)$             | 由失真带来的加速度计复谱输出的模(幅值)的不确定度                          | $u_3( S )$           |
| 4   | $u(u_T)$             | 由振动台运动部件偏离理想运动方向引入的加速度计复输出的模(幅值)的不确定度(如:横向运动,基座应变) | $u_4( S )$           |
| 5   | $u(m_m)$             | 质量测量的不确定度                                          | $u_5( S )$           |
| 6   | $u(U_v)$             | 确定加速度计输出与速度线圈输出的复开路电压比的模(幅值)的不确定度                  | $u_6( S )$           |
| 7   | $u(R_Y)$             | 测量复导纳模时电阻的不确定度                                     | $u_7( S )$           |
| 8   | $u(U_Y)$             | 测量复导纳模时,确定复电压比的模(幅值)的不确定度                          | $u_8( S )$           |
| 9   | $u(S_{RE})$          | 确定复灵敏度的模(幅值)的其他影响因素的不确定度(如:随机噪声,试验标准差)             | $u_9( S )$           |

A.1.2  $U(\varphi)$ 的计算

根据 GB/T 20485.1—2008 给出的下面公式,计算选定频率、振幅、放大器设置校准条件下的复灵敏度辐角(相移)的测量扩展不确定度  $U(\varphi)$ :

$$U(\varphi) = k u_c(\varphi) \dots\dots\dots (A.3)$$
$$u_c(\varphi) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 u_i^2(\varphi)} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中包含因子  $k=2$ 。  
不确定度分量见表 A.2。

表 A.2 确定 φ 的不确定度分量

| i | 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 不确定度来源                                          | 不确定度分量大小<br>$u_i(y)$ |
|---|----------------------|-------------------------------------------------|----------------------|
| 1 | $u(f_{FG})$          | 频率的不确定度                                         | $u_1(\varphi)$       |
| 2 | $u(u_{Temp})$        | 校准过程中由温度影响引入的参考加速度计的不确定度                        | $u_2(\varphi)$       |
| 3 | $u(u_D)$             | 由失真带来的加速度计复谱输出的辐角的不确定度                          | $u_3(\varphi)$       |
| 4 | $u(u_T)$             | 由振动台运动部件偏离理想运动方向引入的加速度计复输出的辐角的不确定度(如:横向运动,基座应变) | $u_4(\varphi)$       |
| 5 | $u(m_m)$             | 质量测量的不确定度                                       | $u_5(\varphi)$       |
| 6 | $u(U_v)$             | 确定加速度计输出与速度线圈输出的复开路电压比的辐角的不确定度                  | $u_6(\varphi)$       |
| 7 | $u(R_Y)$             | 测量复导纳辐角时电阻的不确定度                                 | $u_7(\varphi)$       |
| 8 | $u(U_Y)$             | 测量复导纳辐角时,确定复电压比辐角的不确定度                          | $u_8(\varphi)$       |
| 9 | $u(S_{RE})$          | 确定复灵敏度辐角的其他影响因素的不确定度(如:随机噪声,试验标准差)              | $u_9(\varphi)$       |

A.2 在整个频率和幅值范围内,复灵敏度的模(幅值)的测量扩展不确定度和辐角(相移)的测量扩展不确定度的计算

A.2.1  $U(|S_t|)$ 的计算

按照 A.1.1 计算的复灵敏度模(幅值)测量的扩展不确定度  $U(|S|)$ ,只对特定的频率、振幅、放大器设置校准条件有效。对于整个频率和幅值范围,在任一连续校准的时间间隔内,复灵敏度模(幅值)的测量扩展不确定度  $U(|S_t|)$ 按以下公式计算:

$$U(|S_t|) = k u_c(|S_t|)$$

.....( A.5 )

$$u_c(|S_t|) = \frac{1}{|S_t|} \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i^2(|S_t|)}$$

.....( A.6 )

式中包含因子  $k=2$ 。  
不确定度分量见表 A.3。

表 A.3 确定  $|S_t|$  的不确定度分量

| i | 标准不确定度分量<br>$u(x_i)$ | 不确定度来源                                         | 不确定度分量大小<br>$u_i(y)$ |
|---|----------------------|------------------------------------------------|----------------------|
| 1 | $u_c( S )$           | 在校准频率、振幅、放大器设定的情况下,按照 A.1.1 计算的复灵敏度模(幅值)合成不确定度 | $u_1( S_t )$         |
| 2 | $u(e_{GA})$          | 由参考放大器增益(放大器设置的一项功能)引入的不确定度                    | $u_2( S_t )$         |
| 3 | $u(e_{FA})$          | 参考放大器增益随频率的变化引入的不确定度                           | $u_3( S_t )$         |
| 4 | $u(e_{FT})$          | 参考传感器的灵敏度幅值随频率的变化引入的不确定度                       | $u_4( S_t )$         |
| 5 | $u(e_{LA})$          | 参考放大器幅值线性度引入的不确定度                              | $u_5( S_t )$         |
| 6 | $u(e_{LT})$          | 参考传感器幅值线性度引入的不确定度                              | $u_6( S_t )$         |

表 A.3 （续）

| <i>i</i> | 标准不确定度分量<br><i>u</i> ( <i>x<sub>i</sub></i> ) | 不确定度来源                                 | 不确定度分量大小<br><i>u<sub>i</sub></i> ( <i>y</i> )    |
|----------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 7        | <i>u</i> ( <i>e<sub>TA</sub></i> )            | 参考放大器的增益和参考加速度计输出阻抗随时间变化引入的不确定度(长期稳定性) | <i>u<sub>7</sub></i> (  <i>S<sub>t</sub></i>  )  |
| 8        | <i>u</i> ( <i>e<sub>TT</sub></i> )            | 参考传感器灵敏度幅值随时间变化引入的不确定度(长期稳定性)          | <i>u<sub>8</sub></i> (  <i>S<sub>t</sub></i>  )  |
| 9        | <i>u</i> ( <i>e<sub>EA</sub></i> )            | 参考放大器增益由环境影响引入的不确定度                    | <i>u<sub>9</sub></i> (  <i>S<sub>t</sub></i>  )  |
| 10       | <i>u</i> ( <i>e<sub>ET</sub></i> )            | 参考传感器灵敏度幅值由环境影响引入的不确定度                 | <i>u<sub>10</sub></i> (  <i>S<sub>t</sub></i>  ) |

A.2.2 *U*(*φ*)的计算

按照 A.1.2 计算的复灵敏度幅角(相移)测量的扩展不确定度 *U*(*φ*),只对特定的频率、振幅、放大器设置校准条件有效。对于整个频率和幅值范围,在任一连续校准的时间间隔内,复灵敏度幅角(相移)的测量扩展不确定度 *U*(*φ<sub>t</sub>*)按以下公式计算:

$$U(\varphi_t) = k u_c(\varphi_t) \dots\dots\dots (A.7)$$

$$u_c(\varphi_t) = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} u_i^2(\varphi_t)} \dots\dots\dots (A.8)$$

式中包含因子 *k*=2。  
不确定度分量见表 A.4。

表 A.4 确定 *φ<sub>t</sub>*的不确定度分量

| <i>i</i> | 标准不确定度分量<br><i>u</i> ( <i>x<sub>i</sub></i> ) | 不确定度来源                                       | 不确定度分量大小<br><i>u<sub>i</sub></i> ( <i>y</i> )  |
|----------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1        | <i>u<sub>c</sub></i> ( <i>φ</i> )             | 在校准频率、振幅、放大器设定的情况下,按照 A.1.2 计算的复灵敏度幅角的合成不确定度 | <i>u<sub>1</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 2        | <i>u</i> ( <i>e<sub>GA</sub></i> )            | 由参考放大器相移(放大器设置的一项功能)引入的不确定度                  | <i>u<sub>2</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 3        | <i>u</i> ( <i>e<sub>FA</sub></i> )            | 参考放大器相移随频率的变化引入的不确定度                         | <i>u<sub>3</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 4        | <i>u</i> ( <i>e<sub>FT</sub></i> )            | 参考传感器的灵敏度相移随频率的变化引入的不确定度                     | <i>u<sub>4</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 5        | <i>u</i> ( <i>e<sub>LA</sub></i> )            | 参考放大器相移随幅值的变化引入的不确定度                         | <i>u<sub>5</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 6        | <i>u</i> ( <i>e<sub>LT</sub></i> )            | 参考传感器灵敏度相移随幅值的变化引入的不确定度                      | <i>u<sub>6</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 7        | <i>u</i> ( <i>e<sub>TA</sub></i> )            | 参考放大器的相移和参考加速度计输出阻抗随时间变化引入的不确定度(长期稳定性)       | <i>u<sub>7</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 8        | <i>u</i> ( <i>e<sub>TT</sub></i> )            | 参考传感器灵敏度相移随时间变化引入的不确定度(长期稳定性)                | <i>u<sub>8</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 9        | <i>u</i> ( <i>e<sub>EA</sub></i> )            | 参考放大器相移由环境影响引入的不确定度                          | <i>u<sub>9</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> )  |
| 10       | <i>u</i> ( <i>e<sub>ET</sub></i> )            | 参考传感器灵敏度相移由环境影响引入的不确定度                       | <i>u<sub>10</sub></i> ( <i>φ<sub>t</sub></i> ) |

附 录 B  
(资料性附录)

互易法理论在机电传感器校准中的应用

互易法理论应用于机电传感器校准,其假设条件为传感器线性和单自由度双向运动。在这两个限定条件下,用阻抗将传感器的机电耦合方式模拟为双路网路时,其公式如下:

$$u = z_e i + z_{em} v \dots\dots\dots (B.1)$$

$$F = z_{me} i + z_m v \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

$u$ ——电端口间的复电压;

$i$ ——通过电端口的复电流;

$F$ ——机械端口间的复力;

$v$ ——通过机械端口的复速度;

$z_e$ ——激励点  $v=0$  时的电阻抗;

$z_m$ ——激励点  $i=0$  时的机械阻抗;

$z_{em}$ 、 $z_{me}$ ——换能系数,如果换能机械装置是压电型或静电型,则  $z_{me}=z_{em}$ ;如果换能机械装置是电磁型,则  $z_{me}=-z_{em}$ 。

速度传感器的灵敏度  $S_v$  被定义为开路输出与机械端口速度的复数比,力发生器的传感器灵敏度  $G_F$  被定义为开路力(固定机械阻抗)与电端口电流的复数比。则:

$$S_v = \frac{u}{v} \Big|_{i=0} = z_{em} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$G_F = \frac{F}{i} \Big|_{v=0} = z_{me} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$G_F = \pm S_v \dots\dots\dots (B.5)$$

如果两只线性传感器(其中至少一个是互易的)被单自由度正弦激励,可以通过两个测量实验确定两个传感器绝对复灵敏度  $S_{v1}$  和  $S_{v2}$  的乘积和比值,然后从这些值可以确定两个传感器中的任意一个或两个的绝对灵敏度。如果两个传感器在机械上被并列刚性联接,则传感器机械端口的参考速度幅值相等,而相位相反,  $v_1 = -v_2$ 。如果传感器 1 作为力发生器激励传感器 2,则按照下列方法确定传感器灵敏度的乘积(8.2.1 中的实验 1),当传感器的机械端口直接联接在一起时,则  $z_T$  等于两个传感器的合成机械阻抗。然后从公式(B.4)得到:

$$F = G_{F1} i_1 = v_1 z_T = -v_2 z_T \dots\dots\dots (B.6)$$

$$z_T = -G_{F1} i_1 \frac{S_{v2}}{u_2} = \mp S_{v1} S_{v2} Y_0 \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:  $Y_0 = \frac{i_1}{u_2}$ 。

如果已知在传感器机械端口之间引入了机械阻抗  $z_n$ ,那么激励的机械阻抗:

$$z_T + z_n = \mp S_{v1} S_{v2} Y_n \dots\dots\dots (B.8)$$

式中  $Y_n = \frac{i_1}{u_2}$  包括已知附加的机械阻抗。从  $z_T + z_n$  中减去  $z_T$ ,得到:

$$z_n = \mp S_{v1} S_{v2} (Y_n - Y_0) \dots\dots\dots (B.9)$$

所以:

$$S_{v1} S_{v2} = \pm \frac{z_n}{(Y_n - Y_0)} \dots\dots\dots (B.10)$$

如果附加的机械阻抗是一个已知的质量,对于正弦激励  $z_n$  是  $j\omega m_n$ ,灵敏度的乘积:

$$S_{v1}S_{v2} = \pm \frac{j\omega m_n}{(Y_n - Y_0)}$$

..... ( B. 11 )

式中:

- $j$ ——虚数的单位,  $j^2 = -1$ ;
- $\omega$ ——角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;
- $m_n$ ——附加质量。

可以按照下列方法确定传感器灵敏度的比值(8.2.2 中的实验 2)。对于用两只并列刚性联接的传感器,则机械端口的速度幅值相等,相位相反( $v_1 = -v_2$ )。对于用作速度传感器的互易传感器( $i_1 = i_2 = 0$ ),则两只传感器都使用公式(B.3):

$$\frac{S_{v2}}{S_{v1}} = -\frac{u_2}{u_1} = -U_v$$

..... ( B. 12 )

式中  $U_v$  是传感器 1 和传感器 2 的开路电压比,其中传感器 1 作为速度传感器使用。  
可以用灵敏度的乘积和比值确定任意一个或两个传感器的复灵敏度。例如,对传感器 2 的情况:

对于速度计:

$$S_{v2} = \sqrt{\pm \frac{U_v j\omega m_n}{(Y_n - Y_0)}}$$

..... ( B. 13 )

对于加速度计:

$$S_{a2} = \sqrt{\pm \frac{U_v m_n}{j\omega (Y_n - Y_0)}}$$

..... ( B. 14 )

如果互易传感器的换能机械装置是电磁型的,式中根号下的符号为正;如果互易传感器的换能机械装置是压电型或静电型的,式中根号下的符号为负。

通常只要使用一个附加质量块就可以确定灵敏度。然而在实际中,为了获得  $\alpha + \beta m$  线性方程(式中  $\alpha$  和  $\beta$  分别为截距和斜率)和  $m/(Y - Y_0)$  与  $m$  的线性对应关系,使用  $m_1, m_2, \dots, m_n$  一系列的质量块和与之对应测得的复电导纳  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , 进行  $m/(Y - Y_0)$  与  $m$  的函数线性最小二乘拟合,就可获得更小的不确定度。通过替代,传感器 2 的测量复灵敏度则为:

对于速度计:

$$S_{v2} = \sqrt{\pm U_v j\omega \alpha}$$

..... ( B. 15 )

对于加速度计:

$$S_{a2} = \sqrt{\pm \frac{U_v \alpha}{j\omega}}$$

..... ( B. 16 )

通常在机电传感器互易校准所设计的实际系统中,两个传感器不但被一个机械阻抗分隔,而且在必需的附加质量连接点还有另外一个机械阻抗。在这种情况下,根据传感器开路输出电压与附加质量表面速度的复数比较灵敏度是理想的,还可以用该校准过的传感器通过比较法来校准安装在附加质量块表面上的第二只传感器。当通过互易法校准使用的互易传感器是电动型的,与安装表面的力和速度、互易传感器(传感器 1)电端口的电流和电压、速度传感器(传感器 2)的开路输出电压相关的方程式由导纳模拟得出(见参考文献[8]):

$$i_1 = y_e u_1 - y_{em} F$$

..... ( B. 17 )

$$v = y_{em} u_1 + y_m F$$

..... ( B. 18 )

$$u_2 = k_e u_1 + k_m F$$

..... ( B. 19 )

式中:

- $u_1$ ——传感器 1 电端口的复电压;
- $u_2$ ——传感器 2 电端口的复电压;
- $i_1$ ——通过传感器 1 电端口的复电流;
- $F$ ——安装表面的复力;
- $v$ ——安装表面的复速度。

通常  $y_e, y_m, y_{em}, k_e$  和  $k_m$  是电复阻抗和机械复阻抗、互易电动传感器、速度计和运动部件换能系数的函数,它们的值取决于校准设备特定的物理实现。

如果  $F$  是以速度  $v$  激励的机械阻抗  $z_n$  的反作用力,那么:

$$-F = vz_n \dots\dots\dots (B.20)$$

从公式(B.20)中计算出  $v$ ,将结果代入公式(B.18),计算安装表面的力:

$$-F = \frac{u_1 y_{em} z_n}{y_m z_n + 1} \dots\dots\dots (B.21)$$

将公式(B.21)获得的力表达式代入(B.19)和(B.20),得到传感器 2 开路输出电压与安装表面速度的复数比,从而导出传感器 2 的复灵敏度  $S_{v2}$ :

$$S_{v2} = \frac{u_2}{v} = \frac{k_e}{y_{em}} + \left( \frac{k_e y_m}{y_{em}} - k_m \right) z_n \dots\dots\dots (B.22)$$

将公式(B.21)获得的力表达式代入(B.17)和(B.19),得到传感器 1 激励线圈中的电流与传感器 2 开路输出电压的复数比,从而导出传感器 2 的复传递导纳  $Y_n$ :

$$Y_n = \frac{i_1}{u_2} = \frac{y_e + (y_e y_m + y_{em}^2) z_n}{k_e + (k_e y_m - y_{em} k_m) z_n} \dots\dots\dots (B.23)$$

正如前面所述,如果附加到安装表面的机械阻抗是一个已知的质量  $m_n$ ,那么  $z_n$  就是给定正弦激励的  $j\omega m_n$ ,函数式:

$$\frac{m_n}{(Y_n - Y_0)} = \alpha + \beta m_n \dots\dots\dots (B.24)$$

式中:

$Y_n$ ——用一个安装表面的附加质量  $m_n$  测量的电导纳;

$Y_0$ ——在安装表面上没有附加质量时测量的电导纳。

使用公式(B.23)得到函数式  $m_n/(Y_n - Y_0)$ :

$$\alpha = \frac{k_e^2}{j\omega y_{em} (y_{em} k_e + y_e k_m)} \dots\dots\dots (B.25)$$

$$\beta = \frac{k_e (k_e y_m - y_{em} k_m)}{y_{em} (y_{em} k_e + y_e k_m)} \dots\dots\dots (B.26)$$

式中:

$j$ ——虚数的单位,  $j^2 = -1$ ;

$\omega$ ——角频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

用传感器 1 作为速度计,  $U_v$  被定义为  $u_2$  与  $u_1$  的比,  $i_1 = i_2 = 0$ ,由公式(B.17)得:

$$F = u_1 \frac{y_e}{y_{em}} \dots\dots\dots (B.27)$$

将公式(B.27)得出的力表达式代入公式(B.19),比值  $U_v$  为:

$$U_v = \frac{y_{em} k_e + y_e k_m}{y_{em}} \dots\dots\dots (B.28)$$

分别对公式(B.25)和(B.28)得出的  $\alpha$  和  $U_v$  表达式求积,得出:

$$U_v \alpha = \frac{k_e^2}{j\omega y_{em}^2} \dots\dots\dots (B.29)$$

$$\sqrt{j\omega U_v \alpha} = \frac{k_e}{y_{em}} \dots\dots\dots (B.30)$$

分别用公式(B.26)和(B.25)得出的  $\beta$  和  $\alpha$  的表达式,导出  $\beta \cdot j\omega$  和  $\alpha$  乘积的比值,然后将其结果与公式(B.30)得出的  $k_e/y_{em}$  表达式相乘:

$$\frac{\beta}{j\omega \alpha} \sqrt{j\omega U_v \alpha} = \frac{k_e y_m}{y_{em}} - k_m \dots\dots\dots (B.31)$$

从公式(B.22), (B.30)和(B.31)得出传感器 2 的复灵敏度表达式为: