



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 20485.21—2007/ISO 16063-21:2003  
代替 GB/T 13823.3—1992

## 振动与冲击传感器校准方法 第 21 部分：振动比较法校准

Methods for the calibration of vibration and shock transducers—  
Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer

(ISO 16063-21:2003, IDT)

2007-01-02 发布

2007-12-01 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

## 目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 测量不确定度	1
4 仪器设备和环境条件的要求	2
4.1 总则	2
4.2 环境条件	3
4.3 参考传感器	3
4.4 振动激励设备	3
4.5 电压测量仪器	4
4.6 失真度测量仪器	5
4.7 示波器	5
4.8 相移测量仪器	5
5 校准	5
5.1 优选的幅值和频率	5
5.2 测量要求	5
5.3 校准步骤	6
6 结果处理	6
7 校准结果的报告	7
附录 A(规范性附录) 校准中测量不确定度的描述	8
附录 B(规范性附录) 振幅信号和机械运动与振动传感器电输出之间相移的定义	15
附录 C(资料性附录) 加速度、速度和位移之间转换的诺摸图表	16
附录 D(资料性附录) 不确定度计算实例	17
参考文献	21

## 前　　言

GB/T 20485《振动与冲击传感器的校准方法》由以下几大类组成：

- 第1类：基本概念；
- 第2类：绝对法校准（如：振动激光干涉绝对法、振动互易法、冲击激光干涉绝对法等）；
- 第3类：比较法校准（如：振动比较法、冲击比较法）；
- 第4类：环境模拟校准（如：磁灵敏度、声灵敏度、基座应变灵敏度、横向振动灵敏度等）；
- 第5类：其他。

本部分是GB/T 20485第3类中的一个部分。

本部分等同采用ISO 16063-21:2003(E)《振动与冲击传感器的校准方法 第21部分：振动比较法校准》(英文版)，并作了编辑性修改。

本部分是对GB/T 13823.3—1992《振动与冲击传感器的校准方法 正弦激励比较法校准(二次校准)》的修订。与GB/T 13823.3—1992相比有较大变化。主要变化有：

- 校准的频率范围从(20 Hz~5 kHz)扩展到(0.4 Hz~10 kHz)(可选择)。动态范围从( $10 \text{ m/s}^2 \sim 1000 \text{ m/s}^2$ )扩展到( $0.1 \text{ m/s}^2 \sim 1000 \text{ m/s}^2$ )(可选择)。
- 校准的振动波形从单一正弦扩展到多正弦、随机波，并增加了谱分析部分。
- 校准的频率可以是多点，也可以是单点。
- 校准频率的选取从1倍频程改为 $1/3$ 倍频程。
- 按试验条件和校准不确定度范围，将校准方法划分为实验室和现场两大类。
- 校准的内容从幅值校准增加到幅值和相位(可选项)校准，从单一加速度校准到加速度、速度和位移校准。
- 调整了相应的校准仪器设备，并增加了对传感器安装条件的要求。
- 附录A的内容进行了较大的改动，对振动比较法校准的不确定度分析作了规范的描述。除了有灵敏度校准不确定度以外还增加了相位校准不确定度。
- 增加了附录B、附录C、附录D。
- 附录A、附录B均为规范性附录，附录C、附录D均为资料性附录。
- 增加了参考文献。

本部分自实施之日起代替GB/T 13823.3—1992。

本部分由全国机械振动与冲击标准化技术委员会提出并归口。

本部分起草单位：湖北省计量测试技术研究院、中国计量科学研究院。

本部分主要起草人：于明、于梅。

## 引　　言

GB/T 20485 系列提供了一套振动与冲击传感器的校准方法,适用于校准实验室和现场使用。

本部分涉及的用户范围较宽,包括从事计量学中机械振动特性的技术评价和振动环境中的人体暴露问题的技术人员。本部分应用的关键在于对测量不确定度详细地描述和评价,以及在振动测量中误差估算和扩展不确定度的计算方法。

本部分中特别要规定的是:通过一个参考的、工作的或核查的标准(现场使用的便携式校准器)(其定义见参考文献[2])向国内或国际的振动绝对标准溯源。本部分为使用者提供直线式振动传感器(有或没有信号调节)的校准方法和步骤,从而可以获得振动频率在 0.4 Hz~10 kHz 范围内幅值和相位(可选择)的复灵敏度。

# 振动与冲击传感器校准方法

## 第 21 部分: 振动比较法校准

### 1 范围

本部分描述了直线式振动传感器的比较法校准,虽然本部分主要描述的是与一只经过绝对法校准的参考传感器进行直接比较的校准方法,该方法也能够用于校准体系中不同等级之间的校准。

本部分详细地说明了在振动频率从 0.4 Hz~10 kHz 范围内,运用比较法校准直线式振动传感器的步骤。它主要针对在实验室条件下使用标准方法的振动测量,其测量不确定度相对较小。它也能用于现场条件的测量,这样测量不确定度可能较大。

所有重要的不确定度源将影响校准结果,本部分也给出了评定扩展不确定度的方法。它包含使用一个核查标准来进行校准时不确定度的估计。

本部分比较法校准的环境条件应与参考传感器校准时一致。

注: 在极端环境条件下做传感器校准已包含在其他的标准中。

### 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。凡是注明日期的引用文件,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。凡是不注明日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 3240—1982 声学 声学测量中的常用频率

GB/T 20485.1 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)

GB/T 20485.11—2006 振动和冲击传感器的校准方法 第 11 部分: 激光干涉绝对法振动校准(ISO 16063-11:1999, IDT)

JJF 1059—1999 测量不确定度评定与表示(BIPM/IEC/IFCC/ISO/OIML/IUPAC, 1995, IDT)

ISO 2041:1990 振动和冲击 词汇

### 3 测量不确定度

#### 3.1 本部分的使用者按照附录 A 所作的不确定度估计来证实其不确定度水平(见附录 D)。

为建立满足不同需要的测量系统,给出了两个例子,并给出了建立每一个测量系统的要求和可达到的不确定度。例 1 是在良好的实验室控制条件下的校准,其校准装置可获得较高的准确度。例 2 是略低于最高准确度的校准要求或能维持在较窄的允差范围内的校准。这两个例子将贯穿本部分中。

##### a) 例 1:

已经过绝对法校准的参考传感器,并提供可以引用的不确定度。这个校准可以传递给一个实际应用的工作标准。与相应条款所说明的那样,比较法校准时的温度和其他条件被控制在一个较窄的允许范围内。

##### b) 例 2:

未经绝对法校准的参考传感器,但是它是可溯源的,其定义见参考文献[2],并具有相应的不确定度证明文件,这种校准也能传递到一个实际应用的工作标准上。在相应的条款中对其他参数和仪器的技术要求做了说明。

3.2 在上述两个例子中,对参考传感器的最低校准要求是要在合适的参考条件(频率、幅值和温度)下进行校准,通常选取的条件与 GB/T 20485.11—2006 相同。

可以选取下面的参数:

频率范围: 20 Hz~5 000 Hz, 可选择 0.4 Hz~10 000 Hz

动态范围: 10 m/s<sup>2</sup>~1 000 m/s<sup>2</sup> (rms), 可选择 0.1 m/s<sup>2</sup>~1 000 m/s<sup>2</sup> (依频率而定)

注: 这里给出的频率范围不是必须的,并且也允许进行单点校准。

任何给定频率下的加速度、速度或位移幅值,其动态范围将受本底噪声和激励设备所产生的总失真度所限制(如果没有使用滤波),也受它的最大功率的限制。(对于弹性系统的振动台,技术上也有采用改变输入电压波形来抑制在大位移时固有失真的方法。)一般电动式振动台的频率范围从 10 Hz~10 000 Hz,具有 200 m/s<sup>2</sup>~1 000 m/s<sup>2</sup> 加速度有效值、0.5 m/s~1 m/s 速度有效值和 5 mm 的位移峰值。校准下限取决于两个测量通道的噪声大小,也取决于测量通道的带宽。其校准的典型值是 50 m/s<sup>2</sup>~100 m/s<sup>2</sup> 加速度有效值或 0.1 m/s 速度有效值,对校准器通常使用的值在 1 m/s<sup>2</sup>~10 m/s<sup>2</sup> 之间。在考虑此范围内时,附录 C 中的图表是非常有用的。

在最低频率进行测量时,通常限制的参数是位移。在 1 Hz 时,大位移振动台的典型振动值为 1 m/s<sup>2</sup>~2 m/s<sup>2</sup> 加速度有效值或 0.1 m/s~0.3 m/s 速度有效值。

3.3 两个例子的可达不确定度(按照 GB/T 20485.1 的要求,计算扩展不确定度时包含因子为 2)由表 1 给出。实际中可能会超出这些指标,这取决于经过校准的参考传感器不确定度、参考传感器和被校传感器的响应特性,以及装置中使用的振动台和测量仪器的振动特性。实验室或最终用户的责任是确保报告的扩展不确定度的值是可信的。

表 1 复灵敏度幅值和相移的可达不确定度

参 数	例 1	例 2
<b>幅值</b>		
加速度计(0.4 Hz~1 000 Hz)	1%	3%
加速度计(1 kHz~2 000 Hz)	2%	5%
加速度计(2 kHz~10 000 Hz)	3%	10%
速度和位移传感器(20 Hz~1 000 Hz)	4%	6%
<b>相移<sup>a</sup></b>		
参考条件 <sup>b</sup> (幅值和频率值与参考传感器校准时相同)	1°	3°
其他参考条件	2.5°	5°
注: 例子中给出的扩展不确定度(例如 1%)是基于附录 D 实例(测量结果的扩展不确定度是 0.84%)中给出的具体不确定度估算的。		
<sup>a</sup> 相移的测量是可选的。		
<sup>b</sup> 推荐的参考条件如下:GB/T 20485.11—2006 的第 2 章)		
——频率(Hz):160、80、40、16、8[或角频率 $\omega$ (rad/s):1 000、500、250、100、50]。		
——加速度(m/s <sup>2</sup> )(有效值或峰值):100、50、20、10、5、2、1。		

## 4 仪器设备和环境条件的要求

### 4.1 总则

本章中的例子对应第 3 章的条款。

如果满足以下列出的每一条推荐技术指标,根据已校准参考传感器的不确定度,以及参考传感器和被校传感器的响应特性,就应在可用频率范围内获得第 3 章给出的不确定度。当然,其他技术要求的组合也能满足同样的不确定度。在频率小于 1 Hz 时,为了满足第 3 章中所给出的扩展不确定度,需要使

用特殊的仪器设备。使用附录 A 的方法提供扩展不确定度是必须的。

#### 4.2 环境条件

如下所示：

	例 1	例 2
室内温度：	(23±5)℃	(23±10)℃
相对湿度：	不大于 75%	不大于 90%

#### 4.3 参考传感器

参考传感器应尽可能与放大器一起校准。

##### a) 例 1：

该传感器应按照适当的绝对校准方法校准，或者与一只在选定参考加速度和频率下、经适当的绝对方法[扩展不确定度为 0.5%（幅值）和 0.5°（相移），包含因子  $k=2$ ]（见 GB/T 20485.11—2006 或其他部分）校准过的传感器进行比较的方法来校准参考传感器。在频率的高端和低端允许较大的不确定度。

##### b) 例 2：

该传感器应按照适当的和已知的可以溯源到绝对参考传感器的方法校准，在选定的参考加速度和频率值下，其扩展不确定度为 2%（幅值）和 2°（相移）（包含因子  $k=2$ ）。在频率的高端和低端允许较大的不确定度。

被校传感器可以直接安装在参考传感器的顶部，叫做背靠背校准。背靠背的结构见图 1。也可以将参考传感器安装在固定装置的下面，与被校传感器成一直线。不推荐使用两只传感器肩并肩的安装方法，因为常常会有摇摆的运动产生，许多情况会引起大的误差。在校准器中参考传感器是整个运动体的一个组成部分。

4.4~4.8 规定了引入测量不确定度的仪器特性。

#### 4.4 振动激励设备

振动激励器应满足表 2 给出的要求。

表 2 振动激励设备

参数	单位	例 1	例 2
频率不确定度	%	≤0.1	≤0.2
频率稳定性	测量周期内读数的 %	0.1	0.2
加速度幅值稳定性	测量周期内读数的 %	0.1	0.3
总谐波失真( $f > 20 \text{ Hz}$ )	%	≤5	≤10
整个频率范围内的总谐波失真	%	≤10	≤20
横向、弯曲与摇摆加速度	%	$\leq 10(f \leq 1 \text{ kHz})$ $\leq 30(f > 1 \text{ kHz})$	
交流声和噪声 ( $f \geq 10 \text{ Hz}$ )	dB(低于满输出)	≥50	≥40
交流声和噪声 ( $f < 10 \text{ Hz}$ )	dB(低于满输出)	≥20	≥10

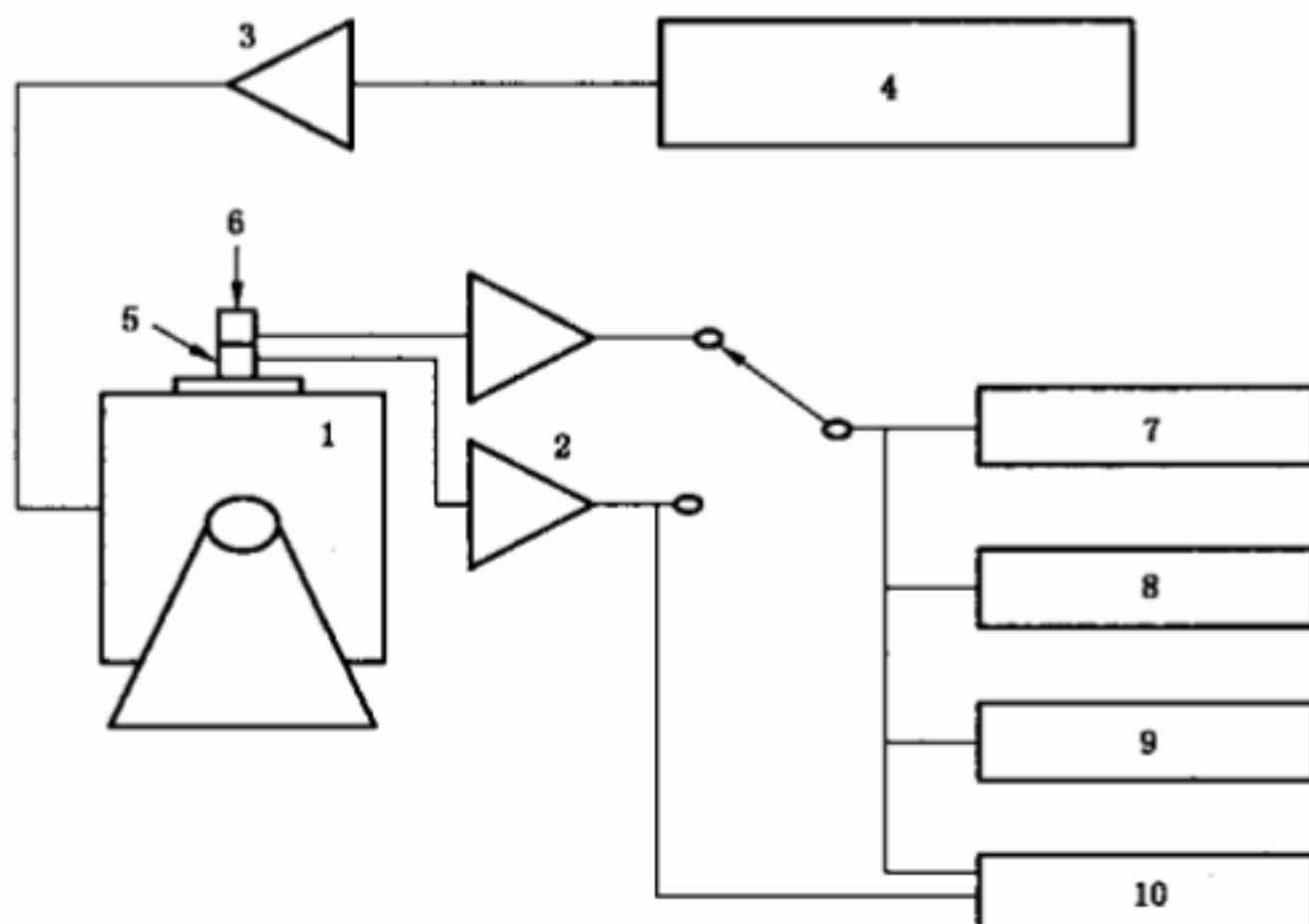
只有在测量带宽内，交流声和噪声的影响才是重要的。对校准使用的频率、加速度值和负载的每个组合，横向幅值、弯曲与摇摆加速度值、交流声和噪声应与第 3 章所给出的不确定度相符。

在传感器的安装面所产生的静态或动态基座应变不应对校准结果造成过大的影响。

为了达到以上的目的，两个作比较校准的传感器安装面之间必须有平面度和表面粗糙度技术指标，以满足要求。如果使用最大的频率范围进行校准，必须有严格的几何公差要求，其偏差的算术平均值  $R_a$  应小于  $1 \mu\text{m}$ 。平面度的要求是：两个面的平行度差应小于  $5 \mu\text{m}$ ，包括任何最大的校准传感器的安

装面。传感器的连接孔(有螺纹)与安装表面的垂直偏差应小于  $10 \mu\text{m}$ , 即该孔的轴线允许在一个有  $10 \mu\text{m}$  直径的柱面区内, 而且柱面的高度与孔的深度相同。

振动激励器的安装表面应与运动方向垂直。任何垂直度偏差都会影响计算不确定度估计。(见附录 A)



- 1——激励器；
- 2——放大器；
- 3——功率放大器；
- 4——频率发生器和指示器；
- 5——参考传感器；
- 6——被校准的传感器；
- 7——电压表；
- 8——失真度仪(可选择)；
- 9——观察波形用示波器(选用)；
- 10——相位计(选用)。

图 1 与参考传感器进行比较的振动校准系统

注 1: 多正弦、正弦或随机信号发生器可以与频率分析仪连接使用。典型的快速傅立叶变换(FFT)分析仪用于随机、多正弦信号和单正弦相关分析, 而频率响应分析仪(FRA)则用于单正弦信号分析。此时失真度就不重要了。因此通常可使用分析仪替代宽带的有效值电压表。虽然电压表更准确, 但是对失真和与测量频率不同的其他频率点的信号比较灵敏。当使用谱平均时, 相干测量能够用来估计信噪比和传感器的非线性度是否在定义的范围内。对于双通道测量, 当施以随机激励和使用 64 次平均时, 0.98 的最小相干限将保证由信噪比和非线性度引入的误差不大于 0.9%。特殊情况下, 由于振动台或传感器在其他频率点非线性的影响, 宽带激励可能会在一个测量频率点处产生不需要的(横向)振动或输出信号。

注 2: 4.3 和 4.4 的仪器可组合为校准器。

#### 4.5 电压测量仪器

考虑两种可替换的设置。

a) 用单一电压表测量传感器放大器输出端的真有效值。连续地测量被校传感器和参考传感器的输出信号, 其中参考传感器的输出至少应测量两次。该仪器应满足表 3 的要求。

表 3 电压测量仪器—单一电压表

参数	单位	例 1	例 2
频率范围	Hz	1~10 000	1~10 000
线性度的最大偏差	信号电平的最大差值读数的 %	0.1	0.3
参考传感器连续两次测量的最大偏差	%	0.1	0.3

注: 最后一行是测量重复性, 它不光包括电压表的重复性, 在此作为通用技术要求处理。

b) 测量传感器放大器输出电压比率的仪器。该仪器的特性见表 4。

表 4 电压测量仪器

参数	单位	例 1	例 2
频率范围	Hz	1~10 000	1~10 000
最大不确定度	%	0.2	0.5

#### 4.6 失真度测量仪器

失真度测量仪器(限定使用,见表 5 的注)应有 1% 到 10% 总谐波失真的测量能力,其特性见表 5。

表 5 失真度测量仪器

参数	单位	例 1	例 2
频率范围	Hz	1~50 000	1~50 000
最大不确定度	读数的 %	10	10

注: 失真度测量仅仅在正弦校准时是必要的, 所以没有将它列入标准步骤。它可用来检查振动发生设备最初性能, 以及定期和有疑问时检查使用。

#### 4.7 示波器

使用示波器或类似的显示设备来检查传感器信号的波形。它很重要但不是必须的。

#### 4.8 相移测量仪器

该仪器的特性见表 6。

表 6 相移测量

参数	单位	例 1	例 2
频率范围	Hz	1~10 000	1~10 000
最大不确定度	(°)	0.2	0.5

### 5 校准

#### 5.1 优选的幅值和频率

按照下面的序列, 在传感器校准范围内选取 6 个与加速度(峰值或有效值)相联系的频率值。

a) 加速度( $m/s^2$ ):

——1、2、5、10 或者它们的十倍数;

如果使用宽带信号, 应取它们的总有效值。

b) 频率:

——按标准的 1/3 倍频程序列选择(见 GB/T 3240—1982)。

如果使用宽带信号, 则要求在一次或多次校准中覆盖所需的测量频率范围。

优选的参数最好与参考传感器校准时选取的相同。如果传感器需要在其他的频率和加速度进行校准, 而不是在参考传感器校准条件下, 则应在这些频率和加速度下评定参考传感器的特性。其产生的不确定度分量将计入不确定度的计算。(见附录 A)。

#### 5.2 测量要求

当使用一个新的装置或新的传感器进行校准时, 为了确保一定的重复性, 有必要进行多次校准。

测量中, 应尽可能减小电缆抖动和基座应变对测量结果影响, 这是很重要的, 特别是在低频部分。可以分别或同时采用调整电缆的连接和传感器的安装, 观察测量结果或谐波失真变化的方法, 来评价这些因素的影响。如果与校准的不确定度比较, 测量灵敏度或失真度没有显著的改变, 这些影响可以被忽略。传感器的安装状况也要可重复, 这点可以通过反复数次地安装传感器和传感器每一次重新安装后

的灵敏度测量得到验证。

如果试验的传感器未和配用的信号适调器或放大器一起校准,就应该在所有的测量频率点,以可溯源的方式确定与传感器配套使用的信号适调器或放大器的增益和复灵敏度的频率响应(如果必要还有幅值和相移),传感器和放大器的灵敏度和频率响应也可在整个测量频率范围内以溯源的方式确定。

如果在上述实验中,出现与所期望的不确定度值相比变化较大的情况,应该通过大量的重复性测量对这些变化量进行量化,从而得到好的偏差估计值,并包含在最终不确定度的表述中。如果测量没有在参考传感器校准时的频率和幅值条件下进行,就显得更为重要了。

### 5.3 校准步骤

应该检查参考传感器(或固定装置)和被校传感器的表面,确认其表面无毛刺及其他瑕疵,并且满足生产厂给出的平面度指标和第4章中的技术要求。

使用推荐的扭矩值,将被校传感器与参考传感器背靠背安装(见4.4),或者与激励器上的内装参考传感器的固定装置安装成一直线。校准频率在5kHz以下时,可采用具有良好已知特性的固定装置安装两只传感器。在更高频率段,可采用直接背靠背安装或与激励器上的内装参考传感器的安装。图1为一个典型实验室校准装置的方框图。电压表、选择器、信号发生器和相位计常常被一个具有足够准确度的两通道仪器代替(即具有信号发生器和电压比率表功能的双通道分析仪)。

需要时应测量两只传感器的输出比率和相对相移。

在参考频率点确定传感器的灵敏度。对于加速度计,首选160Hz(第二选择为80Hz),参考加速度值首选100m/s<sup>2</sup>(其他选择为10m/s<sup>2</sup>、20m/s<sup>2</sup>或50m/s<sup>2</sup>),然后再确定其他校准频率点和加速度值下的灵敏度。该结果将以参考点灵敏度的绝对值或相对偏差(百分数或者分贝数)和度的偏差来表示。

用螺钉安装传感器时,宜在传感器和激励器的安装面之间涂上一层轻油、蜡或者油脂的薄膜,特别是在高频率端进行校准时,更应如此(详见GB/T 14412—2005/ISO 5348:1998)。

## 6 结果处理

如果参考传感器和被校传感器对同一振动参量产生响应,则被校传感器复灵敏度中的幅值 $S_2$ 和相移 $\varphi_2$ 应按下式计算:

$$\text{幅值: } S_2 = \frac{X_2}{X_1} S_1 \quad (1)$$

$$\text{相移: } \varphi_2 = \varphi_{2,1} + \varphi_1 \quad (2)$$

式中:

$s_1, \varphi_1$ ——参考传感器复灵敏度中的幅值和相移。

$X_1$ ——参考传感器输出值。

$X_2$ ——被校传感器输出值。

$\varphi_{2,1}$ ——参考传感器与被校传感器输出值之间的相移。

如果两只传感器测量不同的振动参量,则被校传感器的灵敏度按以下公式计算。

a) 如果测量的是加速度复灵敏度的幅值 $S_a$ 和相移 $\varphi_a$ ,则:

$$\text{速度复灵敏度幅值: } S_v = 2\pi f S_a \quad (3)$$

$$\text{速度复灵敏度相移: } \varphi_v = \varphi_a - 90^\circ \quad (4)$$

$$\text{位移复灵敏度幅值: } S_s = 4\pi^2 f^2 S_a \quad (5)$$

$$\text{位移复灵敏度相移: } \varphi_s = \varphi_a - 180^\circ \quad (6)$$

b) 如果测量的是速度的复灵敏度的幅值 $S_v$ 和相移 $\varphi_v$ ,则:

$$\text{位移复灵敏度幅值: } S_s = 2\pi f S_v \quad (7)$$

$$\text{位移复灵敏度相移: } \varphi_s = \varphi_v - 90^\circ \quad (8)$$

式中:

$S_a, \varphi_a$ —加速度复灵敏度中的幅值和相移;

$S_v, \varphi_v$ —速度复灵敏度中的幅值和相移;

$S_1, \varphi_1$ —位移复灵敏度中的幅值和相移;

$f$ ——振动频率(Hz)。

只有明确了传感器的方位、运动方向和电信号的定义，才能在  $180^\circ$  范围内确定相移。见 GB/T 20485.1 和附录 B)。

对于设计成在一个或多个频率点给出一个或多个固定幅值的校准器,由特定的幅值  $A$  和测量结果  $X$  即可获得被校传感器的灵敏度:

武中

A 和 S 必须对应于相同的振动参量。

## 7 校准结果的报告

出具校准结果的报告时,除了校准方法和具有校准有效期的仪器设备外,至少应对下面的条件和特性给予描述。

- a) 环境条件,例 1:
    - 测量时传感器的温度;
    - 或者,环境空气的温度与没有测量时传感器温度的估计差值。
  - b) 环境条件,例 2:
    - 估计的传感器的温度。
  - c) 安装技术:
    - 安装面的材料;
    - 安装力矩(如果是螺钉安装或者例 2 中其他方法)或胶粘的方法;
    - 安装部件或适配器的特性(如果使用);
    - 油、油脂或蜂蜡(如果使用);
    - 电缆的固定;
    - 方位(垂直或水平)。
  - d) 当传感器与信号放大器或适调器整体被校准时,放大器的所有设置(如可调整):
    - 增益;
    - 截止频率和滤波器斜率。
  - e) 校准结果:
    - 校准频率和振动幅值;
    - 灵敏度(幅值,如果测量了相移,应包括相移);
    - 测量值的一致性(如果已测量);
    - 校准的扩展不确定度(按照附录 A 计算)。
  - f) 如果包含因子不是  $k=2$ (对应正态分布,95% 的置信水平),需确定包含因子。

附录 A  
(规范性附录)  
校准中测量不确定度的描述

### A.1 测量扩展不确定度的计算, $U$

#### A.1.1 计算 $U$ 值的目的

根据国际度量衡委员会(CIPM)推荐的方法—GUM, 应该用“扩展不确定度” $U$  值来表述校准中的测量不确定度。给出  $U$  值的目的是提供  $y-U$  到  $y+U$  的一个区间, 在这个区间里期望  $Y$  值能具有高的概率。 $Y$  为校准时特定被测量, 其估计值为  $y$ 。为确信估计  $y-U \leq Y \leq y+U$ , 扩展不确定度  $U$  值应按以下方法确定。

#### A.1.2 修正

必须确定对测量结果有显著影响的每一个影响因子, 并且通过使用估计的修正值或修正系数对这些影响因子进行补偿。

如果用具有显著期望值(特别是不对称分布)的概率分布(最好是概率分布密度, 见 A.1.3), 对影响测量结果的影响因子进行适当地描述, 将期望值通过系统误差处理并进行修正补偿。

#### A.1.3 标准不确定度估计

对测量不确定度有贡献的每一个不确定度分量, 应该用被称为“标准不确定度”的标准偏差  $u_i$  来表示, 它等于方差  $u_i^2$  的正平方根。

通过对一系列观测值的统计分析(标准不确定度的 A 类评估), 可以用估计的标准偏差得到一些标准不确定度。应该用概率分布的标准偏差来评估其他的标准不确定度(标准不确定度的 B 类评估), 概率分布是描述各个参量所有可能值的科学判断。判断基于该参量所有可用的信息。特别是, 如果除了一个参量可能出现的值在  $b_-$  到  $b_+$  范围之内, 没有关于该参数由系统效应产生的可能值的具体信息, 可以使用  $[b_-, b_+]$  区间内均匀分布来表示这个信息。其标准不确定度为  $b/\sqrt{3}$ ,  $b=(b_+-b_-)/2$ 。在这种情况下, 期望值  $(b_++b_-)/2$  是用作修正的。

如果一个影响量被认为是均匀分布(矩形概率密度), 但是已知被带入具有特定非线性函数的测量结果中(如正弦、二次或三次多项式), 应通过选择联合分布模式对该信息进行计算。

例如: 加速度计的灵敏度  $S$  是使用公式  $S=x/a$  计算得出, 其中:  $x$  为振动激发的电压或电荷的输出幅值,  $a$  为在定义测量方向上所施加的正弦加速度的幅值。校准中测量结果受到的各种干扰影响中, 可能主要来自振动台的横向运动分量, 它的加速度幅值为  $a_T$ , 输出产生的误差分量为  $e_{xT}$ , 加速度计横向灵敏度为  $S_T$ 。此例中假设要测量的加速度与横向加速度同频率, 并且没有相位差。由于横向灵敏度通常取决于最大横向灵敏度( $S_{T,\max}$ )的方向和横向激励方向之间  $\beta$  角的正弦, 误差分量可以表达为:

$$e_{xT} = S_T a_T = S_{T,\max} a_{T,\max} \cos\beta$$

如果已知最大横向灵敏度值( $S_{T,\max}$ )和最大横向加速度值( $a_{T,\max}$ ), 而  $\beta$  角为未知, 则假设角  $\beta$  在  $[-\pi, \pi]$  区间内呈矩形分布是合理的。因此, 呈矩形分布角  $\beta$  的影响量—横向加速度导致的测量误差分量为  $e_{xT}$ , 其概率密度可以描述为:

$$w(e_{xT}) = \frac{1}{b\pi \sqrt{1 - \left(\frac{e_{xT}}{b}\right)^2}}$$

$$-b < e_{xT} < b$$

$$b = S_{T,\max} a_{T,\max}$$

(通常称为反正弦分布), 相应的标准不确定度为:

$$u(e_{xt}) = b/\sqrt{2}$$

这种情况下期望值  $E\{e_{xt}\}$  为零。这是误差  $e_{xt}$  最佳估计值。

#### A.1.4 合成标准不确定度

应使用不确定度传播定律,通过对单个标准不确定度(适宜的协方差)进行合成,确定“合成标准不确定度” $u_c$  作为 Y 的测量标准不确定度。因此,可从下式得到合成标准不确定度:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \quad \dots \quad (\text{A.1})$$

该方程式是基于一阶泰勒级数的近似:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \dots \quad (\text{A.2})$$

式中 Y 是通过函数关系  $f$  从 N 个输入量  $X_1, X_2, \dots, X_N$  得到的被测量。

被测量 Y 的估计值用  $y$  表示,可在方程(A.1)中对输入量的值使用输入估计值  $x_1, x_2, \dots, x_N$  获得。因此,测量结果的输出估计值由下式给出:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad \dots \quad (\text{A.3})$$

在方程(A.1)中,符号  $\partial f / \partial x_i$  通常称为灵敏系数  $c_i$ 。它们等于在  $X_i = x_i$  时求出的偏导数  $\partial f / \partial x_i$ 。符号  $u(x_i, x_j)$  标明与  $x_i$  和  $x_j$  有关联的协方差。

对没有出现显著相关的情况,方程(A.1)被简化为:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad \dots \quad (\text{A.4})$$

注:如果在不确定度  $u(x_i)$  描述的范围内,函数模型  $f$  与输入估计值  $x_i$  完全成线性关系,由方程(A.2)的一阶泰勒级数的近似导出的方程(A.1)是唯一适用的。如果将角  $\beta$  视为输入量  $x_i$ ,A.1.3 中给出的例子就不属于此种情况。为了克服在振动和冲击传感器校准中同时存在其他在测量中起作用的影响量的这个障碍,介绍了一种适用的数学模型(见参考文献[4])。为了简要说明上述例子中的这个数学模型,作为输入量  $x_i$ ,将系数  $(1 - e_{xt}/x)$  代入用以计算被测量的函数关系式,其中  $e_{xt}/x \ll 1$ 。适合于本例的公式(A.2)被简化为三个输入量:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3)$$

式中:

$Y$ ——被测量(灵敏度 S);

$X_1$ ——加速度计的输出(电压或电荷幅值  $x$ );

$X_2$ ——加速度幅值;

$X_3 = (1 - e_{xt}/x)$

因此,可以建立关系式:

$$Y = \frac{X_1}{X_2} X_3$$

如果没有显著的相关性,就可以使用一阶泰勒级数的近似,导出相对合成标准不确定度:

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\left(\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{u(x_3)}{x_3}\right)^2}$$

使用例中介绍的符号,后面的关系式可以写为下式:

$$\frac{u_c(S)}{S} = \sqrt{\left(\frac{u(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(e_{xt}/x)}{1}\right)^2}$$

式中:

$u(x)/x$ ——输出电压幅值测量的相对标准不确定度;

$u(a)/a$ ——加速度幅值测量的相对标准不确定度;

$u(e_{xt}/x) = u(e_{xt})/x$ ,如例子中说明的  $u(e_{xt}) = b/\sqrt{2}$ 。

同样可以用各个参量的相对误差分量(如电压,加速度,或综合灵敏度)来表示其他因子与数值 1 的偏差。

因此,允许分别考虑各个不确定度的误差源,将这些因子作为输入量( $X_4, X_5, \dots$ )。

#### A.1.5 扩展不确定度

应该通过  $u_c$  与包含因子  $k$  相乘得出“扩展不确定度”U:

$$U = ku_c$$

在式中应优先使用  $k=2$ 。如果假设校准结果的可能值以标准偏差  $u_c$  形式呈近似正态分布,可以判定未知数值在  $U$  定义的区间内,而  $U$  具有的置信概率近似为 95%。

#### A.1.6 报告结果

报告测量结果  $y$  时,如果不是  $k=2$ ,应对所使用的扩展不确定度和包含因子  $k$  予以说明。此外,可以对该区间近似的置信水平应予说明。

### A.2 参考条件下扩展不确定度的计算

#### A.2.1 灵敏度值的相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(S)$ 的计算

对于每一个应用频率、加速度和放大器的增益设置(如果放大器是被校准传感器的一部分),可用以下公式计算复灵敏度值测量的相对扩展不确定度  $U_{\text{rel}}(S)$ :

$$U_{\text{rel}}(S) = ku_{c,\text{rel}}(S)$$

包含因子  $k=2$ (见 A.1.5)。

$$\begin{aligned} u_{c,\text{rel}}(S) &= \frac{u_c(S)}{S} = \frac{1}{S} \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_i^2(S) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \\ &= \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_{\text{rel},i}(S) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u_{\text{rel}}(x_i, x_j)} \end{aligned}$$

式中  $S$  是灵敏度;  $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  是估计的灵敏度;  $x_i$  是估计的输入值;  $u(x_i, x_j)$  是  $x_i, x_j$  的估计协方差(如果不相关,为零)。最后部分使用  $u_{\text{rel}}$  表示是相对值。

注 1: 使用对相关项赋以相同的数  $i$ ,通常可以省略上述关系式中的相关项。这个方法可以获得有效的简化(见参考 [4])。

注 2: 假设自由度的有效数字足够大(认为大于 10),设想合成不确定度近似为正态分布(见 JJF 1059—1999)。

表 A.1 列出一些不确定度来源。尽管可以认为它包含了所有重要的误差源,但却不能保证是包括了全部。因为本部分在一个很宽的范围内包含了不同的系统和方法,但是总会有新的系统和方法出现。

表 A.1 确定  $S$  的不确定度分量

$i$	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	相对不确定度的贡献 $u_{\text{rel},i}(S)$
1	$u(S_1)$	参考传感器和放大器组成的套组在规定条件下的合成标准不确定度	$u_{\text{rel},1}(S)$
2	$u(a_{R,A})$	适调放大器的增益	$u_{\text{rel},2}(S)$
3	$u(a_R)$	电压比测量(通常为两个相关的测量)	$u_{\text{rel},3}(S)$
4	$u(a_{R,d})$	总谐波失真对电压比测量的影响	$u_{\text{rel},4}(S)$
5	$u(a_{R,H})$	交流声和噪声对电压比测量的影响	$u_{\text{rel},5}(S)$
6	$u(a_{R,V})$	横向、摇摆和弯曲振动对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},6}(S)$
7	$u(a_{R,e})$	基座应变对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},7}(S)$
8	$u(a_{R,N})$	安装参数(如扭矩、电缆的固定、模拟质量块等)对电压输出比测量的影响	$u_{\text{rel},8}(S)$
9	$u(a_{R,r})$	相对运动对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},9}(S)$
10	$u(S_{1,s})$	参考传感器的时间稳定性	$u_{\text{rel},10}(S)$
11	$u(a_{R,T})$	温度对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},11}(S)$
12	$u(f)$	振动频率测量	$u_{\text{rel},12}(S)$

表 A. 1 (续)

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	相对不确定度的贡献 $u_{\text{rel},i}(y)$
13	$u(a_{R,L})$	传感器非线性对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},13}(S)$
14	$u(a_{R,I})$	放大器非线性对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},14}(S)$
15	$u(a_{R,G})$	传感器受重力作用对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},15}(S)$
16	$u(a_{R,B})$	传感器受振动台磁场作用对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},16}(S)$
17	$u(a_{R,E})$	其他环境参数对电压输出比的影响	$u_{\text{rel},17}(S)$
18	$u(S_{\text{RE}})$	对灵敏度测量和被校传感器灵敏度的其他影响(如:重复测量中的随机效应;算术平均值的实验标准偏差等)	$u_{\text{rel},18}(S)$

注 1: 如果选择的测量方法使用工作参考传感器,用参考传感器在某些点对其进行校准,并需要做上述计算两次,第一次计算的结果用作最终计算的输入值。

注 2: 可以使用与本表不同于的方法,细分和计人不确定度的误差源。本表已考虑了每一个会对测量结果造成显著影响的影响因子(见 A. 1.3)。

### A. 2.2 相移的扩展不确定度 $U(\Delta\varphi)$ 的计算

对于每一个应用频率、加速度和放大器增益的设定值(如果放大器是被校准传感器的一部分),可按下式计算复灵敏度  $S$  的相移  $\Delta\varphi$  测量的相对扩展不确定度  $U_{\text{rel}}(S)$ :

$$U(\Delta\varphi) = k u_e(\Delta\varphi)$$

包含因子  $k=2$ (见 A. 1.5);

$$u_e(\Delta\varphi) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2 u_i^2(\Delta\varphi) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$$

式中  $\Delta\varphi$  是复灵敏度相移;  $g(x_1, x_2, \dots, x_N)$  是估计的相位,  $x_i$  是估计的输入值,  $u(x_i, x_j)$  是  $x_i, x_j$  估计协方差(如果不相关,为 0)。

注 1: 使用对相关项赋以相同的数  $i$ ,通常可以省略上述关系式中的相关项。这个方法可以获得有效的简化(见参考 [4])。

注 2: 假设自由度的有效数字足够大(认为大于 10)设想合成不确定度近似为正态分布(见 JJF 1059—1999)。

表 A. 2 列出一些不确定度来源。尽管可以认为它包含了所有重要的误差源,但却不能保证是包括了全部。因为本部分在一个很宽的范围内包含了不同的系统和方法,但是总会有效的系统和方法出现。

表 A. 2 确定  $\Delta\varphi$  的不确定度分量

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	不确定度的贡献 $u_i(y)$
1	$u(\Delta\varphi_1)$	参考传感器与放大器组成套组的相位合成标准不确定度	$u_1(\Delta\varphi)$
2	$u(\Delta\varphi_A)$	适调放大器的相移不确定度	$u_2(\Delta\varphi)$
3	$u(\varphi)$	相移测量	$u_3(\Delta\varphi)$
4	$u(\varphi_d)$	总谐波失真度对相移测量的影响	$u_4(\Delta\varphi)$
5	$u(\varphi_H)$	交流声和噪声对相移测量的影响	$u_5(\Delta\varphi)$
6	$u(\varphi_T)$	横向、摇摆和弯曲振动对输出相移的影响	$u_6(\Delta\varphi)$

表 A.2 (续)

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	不确定度的贡献 $u_i(y)$
7	$u(\varphi_e)$	基座应变对输出相移的影响	$u_7(\Delta\varphi)$
8	$u(\varphi_M)$	安装参数(如扭矩、电缆的固定、模拟质量块等)对输出相位的影响	$u_8(\Delta\varphi)$
9	$u(\varphi_R)$	相对运动对输出相移的影响	$u_9(\Delta\varphi)$
10	$u(\Delta\varphi_S)$	参考传感器相移的时间稳定性	$u_{10}(\Delta\varphi)$
11	$u(\varphi_T)$	温度对输出相移的影响	$u_{11}(\Delta\varphi)$
12	$u(\varphi_L)$	传感器非线性对输出相移的影响	$u_{12}(\Delta\varphi)$
13	$u(\varphi_I)$	放大器非线性对输出相移的影响	$u_{13}(\Delta\varphi)$
14	$u(\varphi_G)$	传感器受重力作用对输出相移的影响	$u_{14}(\Delta\varphi)$
15	$u(\varphi_B)$	传感器受振动台磁场作用对输出相移的影响	$u_{15}(\Delta\varphi)$
16	$u(\varphi_E)$	其他环境参数对输出相移的影响	$u_{16}(\Delta\varphi)$
17	$u(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_{2,RE})$	对相位测量和被校传感器输出相移的其他影响(如:重复测量中的随机效应;算术平均值的实验标准偏差)	$u_{17}(\Delta\varphi)$

注 1: 如果选择的测量方法使用工作参考传感器,用参考传感器在某些点对其进行校准,并需要做上述计算两次,第一次计算的结果用作最终计算的输入值。

注 2: 可以使用与本表不同于的方法,细分和计人不确定度的误差源。本表已考虑了每一个会对测量结果造成显著影响的影响因子(见 A.1.3)。

### A.3 整个频率和振幅范围的扩展不确定度

#### A.3.1 灵敏度值的相对扩展不确定度 $U_{rel}(S_t)$ 的计算

根据 A.2.1 计算的复灵敏度值测量的相对扩展不确定度  $U_{rel}(S_t)$ , 只对在校准频率、加速度、放大器设置(如果一个放大器是校准传感器的一部分)条件下测量的结果有效。对于整个频率和振幅范围,由下式计算复灵敏度值测量的相对扩展不确定度  $U_{rel}(S_t)$ :

$$U_{rel}(S_t) = k u_{c,rel}(S_t)$$

包含因子  $k=2$ (见 A.1.5);

$$u_{c,rel}(S_t) = \frac{u_c(S_t)}{S_t} = \frac{1}{S_t} \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_i^2(S_t) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$$

式中:

$S_t$ ——对整个频率和幅值范围确定的灵敏度;

$f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ——估计的灵敏度;

$x_i$ ——估计的输入值;

$u(x_i, x_j)$ —— $x_i, x_j$  的估计协方差(如果不相关,为零)。

注 1: 使用对相关项赋以相同的数  $i$ ,通常可以省略上述关系式中的相关项。这个方法可以获得有效的简化(见参考 [4])。

注 2: 假设自由度的有效数字足够大(认为大于 10)设想合成不确定度近似为正态分布(见 JJF 1059—1999)。

表 A.3 列出一些不确定度来源。尽管可以认为它包含了所有重要的误差源,但却不能保证是包括了全部。因为本部分在一个很宽的范围内包含了不同的系统和方法,但是总会有新的系统和方法出现。

表 A.3 确定  $S_i$  的不确定度分量

$i$	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	不确定度的贡献 $u_i(S_i)$
1	$u(S)$	按照 A.2.1, 在校准频率、振幅和放大器设置条件下, 计算的灵敏度值的不确定度	$u_1(S_i)$
2	$u(e_{T,A})$	适调放大器的归一化(不同放大倍数的增益偏差)	$u_2(S_i)$
3	$u(e_{L,f,A})$	适调放大器的频率响应(不同频率的增益偏差)	$u_3(S_i)$
4	$u(e_{L,f,T})$	传感器的频率响应与理论曲线的偏差(在不同频率点, 灵敏度与假定曲线的偏差)	$u_4(S_i)$
5	$u(e_{L,a,A})$	振幅对放大器增益的影响	$u_5(S_i)$
6	$u(e_{L,a,T})$	振幅对传感器灵敏度(幅值)的影响	$u_6(S_i)$
7	$u(e_{i,A})$	放大器增益的不稳定性和电源阻抗的影响	$u_7(S_i)$
8	$u(e_{i,T})$	传感器灵敏度(幅值)的不稳定性	$u_8(S_i)$
9	$u(e_{E,A})$	环境对放大器增益的影响	$u_9(S_i)$
10	$u(e_{E,T})$	环境对传感器灵敏度(幅值)的影响	$u_{10}(S_i)$
11	$u(e_{M,T})$	安装参数(如扭矩、电缆的固定、模拟质量块等)对传感器灵敏度(幅值)的附加影响	$u_{11}(S_i)$

### A.3.2 相移的扩展不确定度 $U(\Delta\varphi_i)$ 的计算

根据 A.2.2 所计算的复灵敏度  $S_i$  的相移  $\Delta\varphi_i$  测量的扩展不确定度, 只对在校准频率、加速度、放大器设置(如果一个放大器是校准传感器的一部分)条件下测量的结果有效。对于整个频率和振幅范围, 由下式计算复灵敏度相移测量的扩展不确定度  $U(S_i)$ :

$$U(\Delta\varphi_i) = k u_e(\Delta\varphi_i)$$

包含因子  $k=2$ (见 A.1.5);

$$u_e(\Delta\varphi_i) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2 u_i^2(\Delta\varphi_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial g}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$$

式中:

$\Delta\varphi_i$ ——整个频率和振幅范围内确定的复灵敏度的相移;

$g(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ——估计的相移;

$x_i$ ——估计的输入值;  $u(x_i, x_j)$  是  $x_i, x_j$  的估计协方差(如果不相关, 为零)。

注 1: 使用对相关项赋以相同的数  $i$ , 通常可以省略上述关系式中的相关项。这个方法可以获得有效的简化(见参考 [4])。

注 2: 假设自由度的有效数字足够大(认为大于 10)设想合成不确定度近似为正态分布(见 JJF 1059—1999)。

表 A.4 列出一些不确定度来源。尽管可以认为它包含了所有重要的误差源,但却不能保证是包括了全部。因为本部分在一个很宽的范围内包含了不同的系统和方法,但是总会有新的系统和方法出现。

表 A.4 确定  $\Delta\varphi_t$  的不确定度分量

$i$	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	不确定度的贡献 $u_i(\Delta\varphi_t)$
1	$u(\Delta\varphi)$	按照 A.2.1, 在校准频率、振幅和放大器设置条件下, 计算的灵敏度相移的不确定度	$u_1(\Delta\varphi_t)$
2	$u(e_{T,A}^*)$	适调放大器的增益(不同放大倍数的相移偏差)	$u_2(\Delta\varphi_t)$
3	$u(e_{L,f,A}^*)$	适调放大器的频率响应(不同频率的相移偏差)	$u_3(\Delta\varphi_t)$
4	$u(e_{L,f,T}^*)$	传感器的频率响应与理论曲线的偏差(在不同频率点下, 相移与假定曲线的偏差)	$u_4(\Delta\varphi_t)$
5	$u(e_{L,s,A}^*)$	振幅对放大器相移的影响	$u_5(\Delta\varphi_t)$
6	$u(e_{L,s,T}^*)$	振幅对传感器灵敏度(相移)的影响	$u_6(\Delta\varphi_t)$
7	$u(e_{L,A}^*)$	放大器相移的不稳定性和电源阻抗的影响	$u_7(\Delta\varphi_t)$
8	$u(e_{L,T}^*)$	传感器灵敏度(相移)的不稳定性	$u_8(\Delta\varphi_t)$
9	$u(e_{E,A}^*)$	环境对放大器相移的影响	$u_9(\Delta\varphi_t)$
10	$u(e_{E,T}^*)$	环境对传感器灵敏度(相移)的影响	$u_{10}(\Delta\varphi_t)$
11	$u(e_{M,T}^*)$	安装参数(如扭矩、电缆的固定、模拟质量块等)对传感器灵敏度(相移)的附加影响	$u_{11}(\Delta\varphi_t)$

附录 B  
(规范性附录)

**振幅信号和机械运动与振动传感器电输出之间相移的定义**

#### **B. 1 运动**

一个物体通常有 6 个自由度:直线运动 3 个,旋转运动 3 个。

#### **B. 2 坐标系**

所有的运动均是在坐标系里测量,建议对线性运动采用具有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标的笛卡儿坐标系。

角运动可以在附加有旋转角的同一坐标系中测量。角运动在以旋转轴作为坐标轴的极坐标系中描述,使用右手螺旋定则(拇指指向轴的方向,四指则为正旋转方向)确定旋转方向的标记。

#### **B. 3 传感器类型**

可以使用不同类型的振动传感器。加速度计、速度传感器、位移(接近式)传感器都是典型的传感器。

#### **B. 4 单位**

振动信号的振幅可以线性或旋转单位描述。加速度、速度和位移(长度)的量值单位分别是  $\text{m}/\text{s}^2$ 、 $\text{m}/\text{s}$  和  $\text{m}$ ,相移(角)的单位是度或弧度。角加速度、角速度和角位移(平面角)的量值单位分别是弧度每平方秒、弧度每秒和弧度,旋转相位(角)的单位是度或弧度。

#### **B. 5 坐标系的定义**

坐标系必须相对于传感器定义,要有一个坐标轴与传感器的主轴平行,其正方向从测量表面穿过并指向传感器。

#### **B. 6 运动极性和标记的定义**

直线运动(加速度、速度或位移)的方向为与传感器主轴平行的轴的正方向时,为正符号。

旋转或角运动的方向与正角度方向相同时,为正符号。

该定义与传感器(接触式或非接触式)的安装无关。

#### **B. 7 传感器灵敏度(幅值和相移)的定义**

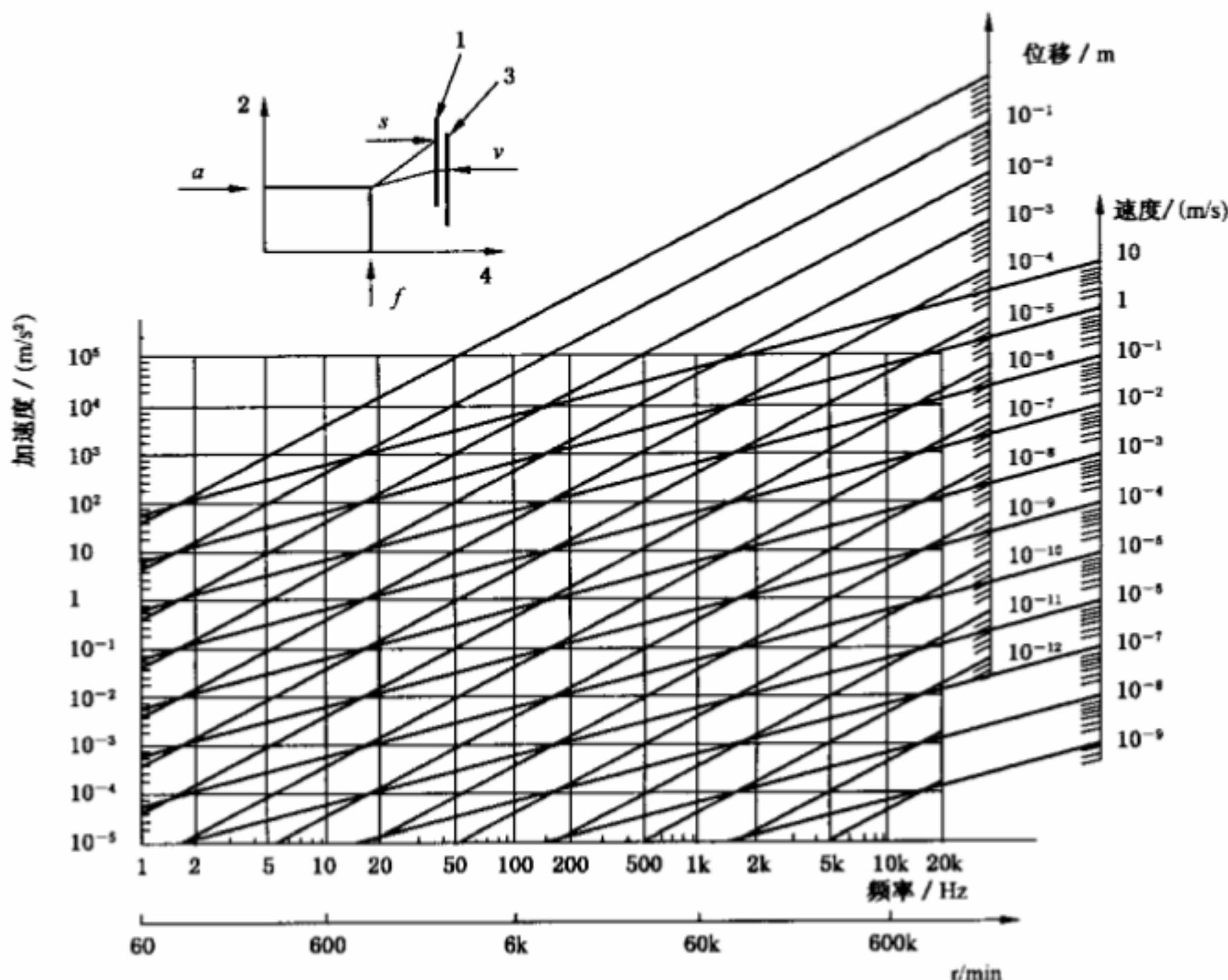
传感器将物理参数转换为其他的参数,通常是输出电信号。输出信号可以是电压、电流或电荷。

灵敏度被定义为电信号输出与给定运动的比率。灵敏度包括一个带符号的数值和一个相移,其指标基于前面定义的坐标系、运动和传感器的转换。

**附录 C**  
**(资料性附录)**  
**加速度、速度和位移之间转换的诺谟图表**

图 C.1 表示在离散频率下,振动的加速度、速度和位移幅值(有效值、峰值或峰-峰值)之间转换的诺谟图表。如果使用不同的参数,应使用 $\sqrt{2}$ (有效值转换为峰值)或 $2\sqrt{2}$ (有效值转换为峰-峰值)。使用两个已知参数,可以得到其他两个。

例如,如果频率和加速度已知,使用所提供的诺谟图表就可以从各自的标尺读取对应的速度和位移值。



- 1——位移；
- 2——加速度；
- 3——速度；
- 4——频率。

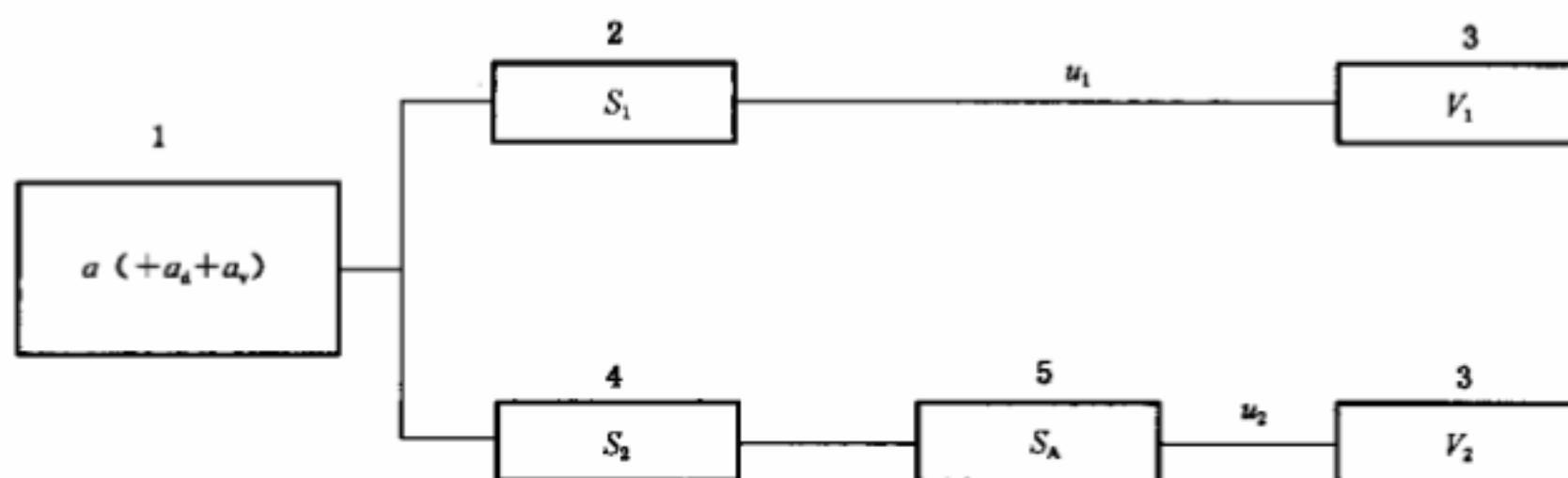
图 C.1 加速度、速度和位移之间转换的诺谟图表

附录 D  
(资料性附录)  
不确定度计算实例

#### D.1 概要

为了对前面所述原则的应用提供便利,本附录给出图 1 所示的设置实例。

测量过程如图 D.1 所示。



1——机械振动；

2——参考加速度计套组；

3——电压表；

4——被校传感器；

5——放大器。

图 D.1 测量过程示意图

#### D.2 符号

本附录使用以下符号：

$a$ ——主方向加速度；

$a_v$ ——相对于主方向的横向加速度；

$a_d$ ——主方向的加速度失真度；

$S_1$ ——参考传感器套组的灵敏度值；

$u_1$ ——参考传感器套组的输出电压；

$V_1$ ——电压表读数(参考电压和加速度值是有效值)；

$S_2$ ——被校传感器的灵敏度值；

$S_A$ ——适调放大器的灵敏度值；

$u_2$ ——放大器的输出电压(被校传感器)；

$V_2$ ——被校传感器的电压读数。

#### D.3 灵敏度函数

加速度激励  $a$  传给传感器。

被校传感器和与之配套的适调放大器组成校准套组。将该套组的输出与经过校准的参考传感器套组的输出进行比较。参考传感器套组由参考传感器和与之配套的适调放大器组成。

校准套组的输出电压  $V_2$  与参考传感器套组的输出电压  $V_1$  的比率  $V_R$  由连续测量确定。考虑到漂移问题，在测量  $V_2$  之前和之后均测量  $V_1$ 。如果频率响应的斜率不同，加速度失真度  $a_d$  会影响被校传感器灵敏度的计算；如果斜率相同，它对两个读数( $V_1$  和  $V_2$ )的影响也同样。在表 D.1 中，假设参考传感器为频率响应没有斜率的石英传感器，假设被校传感器为 PZT(钛酸铅/锆酸盐陶瓷)传感器，它的典型情况是 $-2\%/f$  的十倍斜率，可以描述为：

$$S_2(f) = S_2(f_{ref}) \left( 1 - 0.02 \lg \frac{f}{f_{ref}} \right)$$

适调放大器输出电压由如下式所示：

$$u_2 = a S_2 S_A$$

用下式从参考传感器套组的输出电压计算加速度：

$$a = \frac{u_1}{S_1}$$

将  $a$  代入  $u_2$  的公式中，可以得到被校传感器的灵敏度：

$$S_2 = \frac{S_1 u_2}{u_1 S_A}$$

$V_R$  由下式确定：

$$V_R \equiv \frac{V_2}{V_1}$$

并且假设加速度值稳定不变，则：

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{u_2}{u_1}$$

则  $S_2$  的函数关系式的模型为：

$$S_2 = \frac{S_1}{S_A} V_R$$

#### D.4 不确定度计算

按照参考文献[4]，将没有直接包括在上述函数关系式模型中的影响量扩展为：

$$S_2 = \frac{S_1}{S_A} V_R \times I_1 \times \cdots \times I_M$$

式中因子  $I_1 \sim I_M$  描述影响量产生的误差。

平均值等于 1(有不同的分布形式，正态、矩形等)，共有：

$$I_i = \frac{1 - e_{2,i}}{1 - e_{1,i}}$$

式中  $e_i$  表示用一个适当的分布形式描述影响量所引起的第  $i$  个误差分量。只有在某些条件下，误差分量  $e_i$  才可以通过简单的分布形式进行估计，如矩形分布，其平均值为零。

每个影响因子都包括一个量对  $V_R$ (由  $V_1$ 、 $V_2$  得到)的影响。

对每一个影响因子  $I_i$ ，应考虑误差之间可能具有的相关性。最好选择这样的一些影响因子，以使相关的影响量被包含在导致所有影响因子不相关的一个因子里。

在假设误差  $e_i$  很小的情况下，泰勒级数的二阶(和高阶)项可以被忽略。

根据参考文献[4]，如果没有显示出很强的相关性，可以假设相关系数为零。

如果  $V_R$  影响量之间相关因子未知，应该用参考文献[3]中方程式 D.10 处理这些影响因子：

$$u^2(y) \leq (|u_1(y)| + |u_2(y)|)^2 + u_e^2(y)$$

式中  $u_1(y)$  和  $u_2(y)$  是相关因子不确定度(近似正态分布的标准偏差)； $u_e(y)$  是不相关因子的合成

不确定度。

不确定度预算根据相对不确定度计算。对于不相关因子,  $S_2$  的相对合成不确定度  $u_{c,rel}(S_2)(k=1)$  通过下式得到:

$$u_{c,rel}^2(S_2) = \frac{u_c^2(S_2)}{S_2^2} \sum_{i=1}^N \left( \frac{u_{rel,i} c_i}{x_i} \right)^2$$

式中  $c_i$  是灵敏系数, 它是对不同参量函数模型求出的偏导数。当函数模型只包含分子和分母形式的因子, 它们都是 1 或 -1, 这意味着被平方后基本没有任何意义了。

表 D.1 给出了一个有实际数据的实例。相对扩展不确定度(包含因子  $k=2$ )为:

$$U_{rel,95}(S_2) = \frac{U_{95}(S_2)}{|S_2|} = 0.84\%$$

用包含因子  $k=2$  计算的扩展不确定度, 符合置信概率为  $p=95\%$  的置信限(假设为正态分布)。

表 D.1 在 160 Hz 和 100 m/s<sup>2</sup> 时压电加速度计不确定度估算的实例

参数	描述	相对扩展不确定度或估计误差分量的范围/%	概率分布模型	因子 $x_i$	灵敏度系数 $c_i$	相对贡献 $u_{rel,i}(y)/\%$
$S_1$	参考传感器套组的校准	0.5	正态 ( $k=2$ )	1/2	1	0.25
$S_{1,s}$	3 年的漂移, 制造商的说明书给出 $<0.05\%/\text{年}$	0.15	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.087
$S_{A,CAL}$	说明书给出的适调放大器校准的灵敏度	0.25	矩形	$1/\sqrt{3}$	-1	0.14
$V_R$	说明书给出的电压比率	0.2	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.12
$I(V_{R,T})$	温度变化对 $V_R$ 值测量的影响: 参考传感器灵敏度在 $(23 \pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$ 内变化 $<0.02\%/\text{ }^\circ\text{C}$ 被校准传感器在 $(23 \pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$ 内变化 $<0.1\%/\text{ }^\circ\text{C}$	0.36	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.21
$I(V_{R,S})$	测量前后参考标准的最大允许误差, $0.2\%$	0.2	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.12
$I(V_{R,N})$	安装参数(电缆、插座、扭矩)对被校传感器的影响, 最大为 $0.05\%$	0.05	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.029
$I(V_{R,d})$	加速度失真度对 $V_R$ 值测量的影响: 被校传感器(PZT)和参考传感器(石英)之间频率斜率的差, 典型值为每 10 倍频率为 $-2\%$ 。3 次谐波小于 $5\%$ , 假设矩形分布	0.0024 参见注 2	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.0014

表 D.1 (续)

参数	描述	相对扩展不确定度或估计误差分量的范围/%	概率分布模型	因子 $x_i$	灵敏度系数 $c_i$	相对贡献 $u_{rel,i}(y)/\%$
$I(V_{R,v})$	横向加速度对 $V_R$ 值测量的影响: 振动台的横向振动 $a_T$ 最大值为 10%; 参考传感器的横向灵敏度 $S_{v,1}$ 最大为 2%; 被校传感器的横向灵敏度 $S_{v,2}$ 最大为 5%	$\sqrt{(S_{v,2}^2 + S_{v,1}^2)a_T^2} = 0.51$ 公式的说明见注 3 和参考文献[4]、[5]	特殊分布	$\sqrt{1/18}$ 1/18 的说明见注 3 和参考文献[4]、[5]	1	0.12
$I(V_{R,e})$	基座应变对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.05	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.029
$I(V_{R,r})$	相对运动对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.05	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.029
$I(V_{R,L})$	传感器非线性对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.03	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.017
$I(V_{R,I})$	放大器非线性对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.03	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.017
$I(V_{R,G})$	重力对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.00	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.00
$I(V_{R,B})$	激振器磁场对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.03	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.017
$I(V_{R,E})$	其他环境条件对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.03	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.017
$I(V_{R,RE})$	其他影响量(如重复测量中的随机效应;算术平均值的实验标准偏差)对 $V_R$ 值测量的影响:估计值小于	0.03	矩形	$1/\sqrt{3}$	1	0.017
$u_{rel}(S_2)$	加速度计灵敏度 $S_2$ 的不确定度		标准不确定度( $k=1$ )			0.42

注 1: 列出了比较法测量中包括的不确定度和它们的估计值。使用合适的分布形式(如矩形分布),将不确定度转换成为最后一栏的标准偏差。所有的计算值  $u_{rel,i}(y)$  都是标准不确定度( $k=1$ )。

注 2: 按照正文中对参考点不取决于频率的注释,以及按照正文中有关被校传感器公式,用三次谐波处的灵敏度 0.99 乘以在参考频率点获得的灵敏度,两个通道的输出可以用  $u_1^2 = S_1^2(f_{ref})(a_{ref}^2 + a_3^2)$  和  $u_2^2 = S_2^2[S_1^2(f_{ref})a_{ref}^2 + S_1^2(3f_{ref})a_3^2]$  描述。使用  $a_3 = 0.05$ ,通过对上面两个输出值的平方计算平方根的比可求出误差。假设放大器有一个平的响应( $S_A$  为常数)。

注 3: 如果已知两个传感器的横向灵敏度方向和激振器横向振动方向,但是它们的相对方向未知,在整个  $360^\circ$  内给出合成方差  $\sigma^2 = \frac{1}{2}(S_{v,2}^2 + S_{v,1}^2)a_T^2$ ,式中  $S_{v,2}, S_{v,1}$  和  $a_T$  分别为横向灵敏度和横向振动。

如果假设其三者均为未知,但是在上述已知数值的区间内呈矩形分布,可以用  $1/\sqrt{3}$  进行归一。形成  $\sigma^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3}S_{v,2}^2 + \frac{1}{3}S_{v,1}^2 \right) \times \frac{1}{3}a_T^2 = \frac{1}{18}(S_{v,2}^2 + S_{v,1}^2)a_T^2$ 。

### 参 考 文 献

- [1] GB/T 14412—2005/ISO 5348:1998 机械振动与冲击 加速度计机械安装
  - [2] 国际计量学基本词汇和通用术语(VIM)。BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993.
  - [3] 校准中测量不确定度的描述。出版书目 EA-4/02, 欧洲合作鉴定组织, 1999.
  - [4] GRD 中振动量值单位表示和转换, MARTENS, H.-J. Von 和 ROGAZEWSKI, P., 108 号 OIML 公告, 1987, 26 页~37 页.
  - [5] 振动干涉测量的估计, MARTENS, H.-J. Von, SPIE, 4072, 2000, 82 页~101 页.
-