



中华人民共和国国家标准

GB/T 20485.1—2008/ISO 16063-1:1998
代替 GB/T 13823.1—2005

振动与冲击传感器校准方法 第1部分：基本概念

Methods for the calibration of vibration and shock transducers—
Part 1: Basic concepts

(ISO 16063-1:1998, 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 1 部分:基本概念

GB/T 20485.1—2008/ISO 16063-1:1998

*

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

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 1.5 字数 40 千字

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月第一次印刷

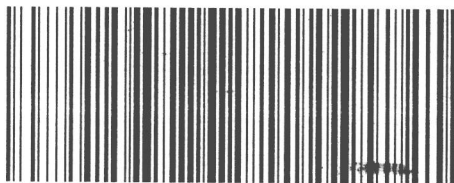
*

书号: 155066 · 1-31378 定价 20.00 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 20485.1-2008

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1部分。

本部分等同采用 ISO 16063-1:1998《振动与冲击传感器校准方法 第1部分:基本概念》(英文版)。

本部分等同翻译 ISO 16063-1:1998。

为使用方便,本部分作了如下编辑性修改:

- “本国际标准”一词改为“本部分”;
- 删除国际标准的前言;
- 对 ISO 16063-1:1998 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;
- 4.3.6“磁灵敏度”中引入注释,表明所对应的国家标准(GB/T 13823.4)采用了旋转磁场方向的测试方法。

本部分代替 GB/T 13823.1—2005《振动与冲击传感器的校准方法 第1部分:基本概念》。

与 GB/T 13823.1—2005 相比,主要修改内容如下:

- 修改了“前言”部分;
- 对正文中引用标准做了相应调整。

本部分的附录 A 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、北京市计量检测科学研究院。

本部分主要起草人:马明德、李学瑞、张宏宇、于梅、左爱斌。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 13823.1—1993、GB/T 13823.1—2005。

引 言

对于人或各类设备所遭受的冲击和振动进行精确测量的要求日益迫切,所以振动与冲击传感器的校准已变得格外重要。关于这些校准已采用或推荐了一些方法,GB/T 20485 的本部分对其中一些方法进行了阐述。第 5 章介绍了几种方法,这些方法在振动与冲击传感器的绝对校准中已被证明是可靠的。

本部分包含有振动与冲击两类传感器共同使用的校准方法,事实证明按照振动测量或冲击测量来区分传感器是不切实际的。

本部分仅限于线性运动加速度、速度和位移传感器的校准;不涉及用于力、压力或应变测量的传感器,当然其中一些传感器可能使用类似的方法进行校准。此外,本部分也不包括用于测量旋转振动的传感器,因为目前此类传感器数量较少,其校准硬件和方法与本部分涉及的线运动传感器也有所不同。

本部分包括定义并叙述了作为基础的绝对校准方法。此外,在总则中还概括叙述了振动与冲击传感器的多种校准方法,以及除灵敏度外其他测量特性的校准方法。为能实现已知准确度的校准,必须详细规定仪器的技术要求和操作步骤。有关各种校准方法的上述信息将在 GB/T 20485 的后续部分详细介绍。

传感器本身可作为一个单元进行校准,它可以包括连接电缆和/或一个适配装置。对校准系统必须始终进行明确地说明。

本部分包括一个参考文献目录,正文中引用参考文献时以方括号中的数字表示。

目 次

前言 I

引言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 特性测量 3

4.1 总则 3

4.2 直接响应 3

4.3 乱真响应 4

5 校准方法 6

5.1 总则 6

5.2 绝对法校准 6

5.3 比较法校准 13

6 测量不确定度的表达 13

附录 A (资料性附录) 校准测量不确定度表达 14

参考文献 17

振动与冲击传感器校准方法

第 1 部分:基本概念

1 范围

GB/T 20485 的本部分规定了振动与冲击传感器的校准方法,包括灵敏度以及其他特性的测量方法。

本部分推荐采用的一种绝对校准法为优先采用方法,还介绍了振动与冲击传感器的比较校准方法(见 5.3),更详尽的叙述见 GB/T 13823 及 GB/T 20485 的相关标准。

本部分适用于连续读出的直线运动加速度、速度及位移传感器的校准,并建议了优先采用的方法,这种方法已被证明能给出可靠和可复现的结果。

本部分不适用于旋转式传感器的校准。

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 1182—1996 形状和位置公差 通则、定义、符号和图样表示法(eqv ISO 1101:1996)

GB/T 13824—1992 对振动烈度测量仪的要求(eqv ISO 2954:1987)

ISO 2041:1990 振动与冲击 术语

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

3 术语和定义

ISO 2041:1990 确立的及下列术语和定义适用于本部分。

3.1

传感器 transducer

把被测量的机械运动(如给定方向的加速度),转换成可方便测量或记录的量的装置。

注:传感器可包括辅助设备,如失调放大器、必备的供电电源、必要的电子元件、输出指示器或记录器等。

3.1.1

工作范围 operating range

传感器在指定允差限内可视为线性传感器的频率与幅值范围。

3.1.2

互易传感器 reciprocal transducer

双向机电传感器。对此类传感器施加的电流与其产生的力之比(此时传感器被约束使其速度为零)等于对其施加的速度与其产生的电压之比(此时传感器处于开路状态,使其电流为零)。

例如:磁电与压电传感器。

3.1.3

不可逆传感器 unilateral transducer

应变片作为敏感元件的传感器,此类传感器对施加的电激励不产生明显的机械响应。

3.2

输入信号 input signal

作用于传感器输入端的信号。

例如：作用于安装面的加速度。

3.3

输出信号 output signal

传感器对给定输入信号所产生的响应。

注1：对单端传感器，加速度矢量指向传感器安装面时被视为正方向。对背靠背安装的参考加速度计，加速度矢量从上表面指向被比较校准的加速度计时被视为正方向。

注2：输出量（如电压、电荷、电流、阻抗等）的相位规定以所定义的正加速度矢量或导出量（速度或位移）为参考。

3.4

灵敏度 sensitivity

对线性传感器，灵敏度为正弦激励作用于安装面且平行于灵敏轴时，输出量与输入量之比。

注：一般情况下，灵敏度包括幅值与相位两个信息，因此是随频率变化的复数量。

正弦输入运动可以由以下方程组表示：

$$s = \hat{s} \exp[j(\omega t + \varphi_1)] = \hat{s} [\cos(\omega t + \varphi_1) + j \sin(\omega t + \varphi_1)] \dots\dots\dots (1)$$

$$v = j\omega s = \hat{v} \exp[j(\omega t + \varphi_1 + \pi/2)] = \hat{v} [\cos(\omega t + \varphi_1 + \pi/2) + j \sin(\omega t + \varphi_1 + \pi/2)] \dots\dots (2)$$

$$a = j\omega v = \hat{a} \exp[j(\omega t + \varphi_1 + \pi)] = \hat{a} [\cos(\omega t + \varphi_1 + \pi) + j \sin(\omega t + \varphi_1 + \pi)] \dots\dots (3)$$

$$u = \hat{u} \exp[j(\omega t + \varphi_2)] = \hat{u} [\cos(\omega t + \varphi_2) + j \sin(\omega t + \varphi_2)] \dots\dots (4)$$

式中：

s ——位移复数量；

v ——速度复数量；

a ——加速度复数量；

u ——输出复数量；

$\hat{s}$ ——正弦位移的峰值；

$\hat{v}$ ——正弦速度的峰值；

$\hat{a}$ ——正弦加速度的峰值；

ω ——角频率；

φ_1 与 φ_2 ——相位角；

t ——时间；

j ——虚部单位量。

位移灵敏度 S_s ，以输出信号单位每米表示：

$$S_s = \frac{u}{s} = \hat{S}_s \exp[-j(\varphi_1 - \varphi_2)] \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\hat{S}_s = \frac{\hat{u}}{\hat{s}}$ ——位移灵敏度幅值；

$(\varphi_1 - \varphi_2)$ ——相移。

速度灵敏度 S_v ，以输出信号单位每米负一次方秒表示：

$$S_v = \frac{u}{v} = \hat{S}_v \exp[-j(\varphi_1 + \pi/2 - \varphi_2)] \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$$\hat{S}_v = \frac{\hat{u}}{\hat{v}} \text{——速度灵敏度幅值;}$$

$\varphi_1 + \pi/2 - \varphi_2$ ——相移。

加速度灵敏度 S_a , 以输出信号单位每米负二次方秒表示:

$$S_a = \frac{u}{a} = \hat{S}_a \exp[-j(\varphi_1 + \pi - \varphi_2)] \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$$\hat{S}_a = \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \text{——加速度灵敏度幅值;}$$

$(\varphi_1 + \pi - \varphi_2)$ ——相移。

通常, 对位移传感器确定位移灵敏度, 对速度传感器确定速度灵敏度, 对加速度传感器确定加速度灵敏度。一般来说, 灵敏度幅值和相位角是频率的函数, $f = \omega/2\pi$ 。

注: 对位移、速度或加速度传感器, 当频率趋于零而对应的灵敏度不为零, 则被称为具有零频率响应(直流响应)。

恒加速度下灵敏度对应于 $\omega=0$ 和相位差为零。具有零频率响应的传感器有使用应变片、电位差计、差动变压器、力平衡(伺服)或可变磁阻系统做敏感元件的加速度传感器。不具有零频率响应的传感器有自发电式惯性传感器, 如压电或电动传感器等。

3.5

横向灵敏度比(TSR) transverse sensitivity ratio(TSR)

对同一输入量, 传感器灵敏轴垂直于输入方向时的输出量与传感器灵敏轴平行于输入方向时的输出量之比。

3.6

振动发生器 vibration generator

对传感器安装面提供可控制运动的装置。

注: 振动发生器有时被称为激励器或振动台。

4 特性测量

4.1 总则

传感器校准的基本目的是对传感器在其应用的自由度上, 在整个幅值与频率范围确定它的校准系数(灵敏度)。此外, 知道传感器在其他五个自由度上对运动的响应也很重要; 例如对一个直线运动加速度传感器, 应知道相对于灵敏轴垂直方向的运动响应以及对转动的响应。其他重要因素包括阻尼、相位角、非线性或响应随运动幅度的变化、温度与压力变化的影响, 以及其他外部条件如连接电缆运动时的影响。

4.2 直接响应

4.2.1 频率响应与相位响应

通过安装传感器使其灵敏轴平行于振动发生器运动方向, 测量由振动发生器提供的运动量或输入量, 同时测量传感器的输出, 即可获得传感器的灵敏度, 使用幅值与频率均在传感器工作范围内的可控瞬态激励, 可对连续读出或峰值读出的传感器进行校准。为测定谐振响应, 应在全部频率范围内缓慢连续地改变振动频率, 同时观测传感器输出。一般来说, 只提供作为频率函数的幅值灵敏度校准数据。然而, 如果振动传感器使用在靠近频率上限及频率下限, 或做特殊应用时, 就可能需要相位响应数据。在全部感兴趣的频率范围内, 测量输出信号与机械激励之间的相位差, 即可测定相位响应。

4.2.2 非线性度

使传感器输入幅值从所允许的最小值增加到最大值, 同时测量其输出幅值, 即可得到传感器输出的

线性偏差(幅度畸变)。当使用正弦振动发生器时,应在不同频率点上重复测量几次。

非线性可能以几种形式出现。随着幅度增加,传感器灵敏度可能逐渐变化,也可能在振动或冲击之后存在永久变化导致传感器产生零位移动,或存在突然限制运动范围的间断点。

传感器非线性的类型和幅度可以由它的幅度畸变来表示,也可将它的谐振曲线、相位角及衰减量与理想的线性传感器的响应特征相比较来表示。线性度的允许偏差由测量而定。可以预见在传感器有用的动态范围上限存在非线性。

4.3 乱真响应

4.3.1 温度相关性

多数传感器的灵敏度、阻尼比和谐振频率都是随温度变化的函数。

温度响应校准通常利用比较法进行。安装标准传感器使其轴向与被测传感器的轴向一致。被测传感器放置在温度箱内,标准传感器安放在温度箱外,否则就应对标准传感器进行保护,以抑制温度变化的影响,以使在全部校准过程中,由于周围温度的影响而造成的标准传感器灵敏度变化保持在2%以内。振动发生器仅用在横向振动小于轴向振动25%的已知频率点上。在选择振动发生器和设计夹具时,应使在进行校准的频率上被测传感器与标准传感器之间的相对运动小到足以忽略。

进行温度响应校准的另一个可供选择的方法是把标准与被测传感器一同安装在温度箱内合适的夹具上。这种方法仅限于标准传感器温度响应已知的温度范围。

对具有静态加速度响应的传感器,应在最高和最低温度下测量其零点不对称性。

对内阻尼大于临界阻尼10%的传感器,应至少在四个频率点上以一单振动幅值选取五个温度点(含室温)进行校准。此方法同样适用于另外一些传感器,如动圈式电动传感器。所选择的频率要分布在预定使用的整个频率范围上。

在最高校准温度上,温度稳定后应对压电传感器的内部电容和电阻进行测量。

如果在最高校准温度所测量的压电加速度计内阻过低,和适调放大器一起使用时会影响低频响应。这时应在此温度下进行低频响应校准。要选择若干频率来充分描述频率响应。在加速度计和适调放大器一起使用的情况下,应进行系统校准。

注:高温可以影响加速度计的低频响应,也影响加速度计-适调放大器系统的噪声和稳定性。温度响应偏差以被测温度下的校准系数相对于室温(20℃)时校准系数的变化量来计算(测量频率选在室温下传感器响应的平坦段)。该变化量以相对于室温时校准系数的百分比表示。比较理想的情况是,在期望使用的温度范围内,所选择传感器的温度响应偏差不超过±15%。

4.3.2 压电传感器的瞬变温度灵敏度

所有压电传感器在瞬态温度变化下都产生热电输出。对铁电材料尤其如此。热电输出大小取决于构成晶体的材料和传感器的结构。通常,热电输出的主要频率明显小于1 Hz。鉴于大多数适调放大器的低频特性,来自传感器的大部分热电输出被滤除了。

显然,热电输出依赖于温度变化速率以及传感器与放大器配套特性。对传感器的热电测试要使用通常配套的同类型适调放大器。按常用方法将传感器安装在一铝块上。铝块的质量约为传感器的10倍。传感器与铝块快速浸入一个冰水槽或与室温相差约20℃的其他适当液体槽中。槽中液体应予以说明。应有措施确保液体不会浸入传感器中并保证连接头的漏电阻不被液体降低等。使用直流示波器或记录仪测量放大器的最大输出和从瞬变开始至达到最大输出的时间。如果输出在起始的2秒内反向并达到反极性的峰值,该峰值与对应时间也应予以记录。对压电加速度计,通过把传感器最大输出值除以槽温与室温之差与加速度灵敏度的乘积,即可得到瞬变温度灵敏度。单位等效为 $[(m \cdot s^{-2})/^{\circ}C]$ 。

对特殊应用的具有显著差异的低频特性放大器,热电测量应和所使用的这类特殊放大器一起进行系统测量。对瞬态温度变化速率与上述情况差异极大的应用场合,应通过模拟这种温度条件进行测量。

4.3.3 横向灵敏度比

横向灵敏度比(TSR)通常在低于 500 Hz 的单频率点上测量。所使用的频率应记录在报告中。对于所施加的单频正弦运动,应确认施加到垂直于灵敏轴方向的运动至少应为灵敏轴方向运动的 100 倍。当测量横向灵敏度比小于 1% 的传感器时,为获得横向灵敏度比,所施加的运动更强烈,需要格外小心和熟练操作技巧。

安装传感器并沿灵敏轴在 360° 范围内,以 45° 或小于 45° 为增量逐次旋转传感器,以测定最大横向响应。

注:实验表明,加速度计的横向灵敏度在 2 000 Hz 以内频率相关性不明显。当前可用的频率范围从 2 000 Hz 到 10 000 Hz 的横向灵敏度资料非常有限。一些实验者指出,他们的实验结果通常表明,高频横向响应(从 2 000 Hz 至 10 000 Hz)具有与低频测量(指小于 500 Hz)一样的幅值量级。一般认为,轴向谐振频率大于 30 kHz 的加速度计,主要的横向谐振频率将大于 10 kHz,这样也就超出了传感器通常的工作范围。对其他类型的振动传感器,目前的资料更少。如有可能,应给出最低横向谐振频率。

4.3.4 旋转运动灵敏度

很多线运动传感器对旋转输入是敏感的,例如挠性压电与压阻加速度计及摆动式力平衡(伺服)加速度计。必须注意旋转灵敏度的存在,应该采取预防措施来排除由这种作用引起的测量误差。线运动振动传感器的旋转灵敏度可以通过旋转振动传感器灵敏度校准方法(见参考文献[36])来进行测量。

4.3.5 应变灵敏度

应优先选用下述方法来测定由于基座弯曲而在传感器输出端产生的误差。

传感器安装在可产生 25 m 曲率半径和 250×10^{-6} 应变的简易悬臂梁上。

把钢制悬臂梁夹紧于一刚性支架上。梁的宽度 76 mm,厚度 12.5 mm,自由长度为 1 450 mm。

此梁的固有频率非常接近 5 Hz。在梁上粘有一个应变片用以测量应变。其安装位置靠近(被测)传感器,离固定端大约 40 mm。安装位置处的运动用一个传感器测量。固定此传感器应使用附加的隔离方法以防止基座弯曲。测量过程通常宜使用校准系数高于被测传感器 10 倍以上的传感器。测量中应记录应变仪与传感器的输出。通过人工偏转梁的自由端来激励系统。在梁表面应变为 250×10^{-6} (相当于 25 m 曲率半径)时记录传感器输出。梁上安装位置处的运动与被测传感器指示运动之间的差值,就是由于基座弯曲而在传感器输出端产生的误差。用以上差值除以 250 即得到应变值为 10^{-6} (即一个微应变)时的应变灵敏度。

应在不同应变幅值下沿不同方向测量应变灵敏度。在某些使用和安装情况下,一些传感器的最大应变灵敏度能产生较大的误差。例如用于振动校准的振动发生器产生的应变,在一些频率上可使一些压电加速度计产生百分之几的误差信号。

4.3.6 磁灵敏度

把传感器安装在一个 50 Hz 或 60 Hz 的已知磁场内,转动被测量的传感器方向,记录传感器最大电输出信号。对于加速度计,灵敏度的单位为米每二次方秒特斯拉。对速度传感器,在可用频率范围内灵敏度单位为米每秒特斯拉。应从测量套组中剔除诱发的振动与乱真电噪声。

注:我国已正式出版的国家标准(GB/T 13823.4—1992 振动与冲击传感器的校准方法 磁灵敏度测试)中,采用了转动磁场方向测试传感器磁灵敏度的方法。

4.3.7 安装力矩灵敏度

对传感器安装力矩引起的校准系数变化,可通过施加几个特定安装力矩来进行测量。几个特定安装力矩分别为:二分之一规定安装力矩、规定安装力矩和二倍规定安装力矩(最大安装力矩)。这种测量方法限定传感器只有在使用螺钉、螺栓或其他螺纹紧固件进行安装时才能使用。如安装中使用一个以上紧固件,每个紧固件均应施加以力矩。

要确保传感器安装面没有毛刺或其他表面缺陷,以免影响平面安装。安装传感器的测试面要平坦、光滑,并且必须为钢制。推荐的平面度优于 $5 \mu\text{m}$,磨削加工后粗糙度均方根偏差不大于 $2 \mu\text{m}$ 。

对安装被校传感器的测试面,钻孔、攻丝必须垂直。其垂直度优于 0.05 mm(见 GB/T 1182—1996)。推荐使用接触面润滑方式,并加以说明。要从非紧固条件下施加力矩,即对于三个测试力矩中的任一力矩,施加力矩要从零开始进行。对于二分之一和两倍规定安装力矩,力矩灵敏度应记录为相对于规定力矩传感器校准系数的变化量。使用力矩的不确定度不应超过 $\pm 15\%$ 。

4.3.8 特殊环境条件

在一些特定环境中,传感器的工作可能受到不良影响,如强静电场、变化的强磁场、射频场、强声场及电缆作用和核辐射的影响。虽然对预期存在不利影响的场所已经研究出特殊测量技术(见 GB/T 13824—1992),但是当前还没有普遍认可的技术来测定上述特殊环境对传感器工作的影响。

5 校准方法

5.1 总则

为对传感器进行直接校准,需使用一个振动发生器为传感器提供一个可控制并可测量的输入量,同时还应具备一种对传感器输出信号进行记录和测量的方法。传感器应紧固在振动发生器上(当传感器输出大小取决于传感器和振动体的相对运动时,传感器应靠近振动台面安装)。

传感器的固定要有足够的刚性,以便在传感器工作频段内振动发生器将运动全部传递给传感器。当传感器及连接物被看作质量——弹簧单自由度系统时,上述系统的固有频率应高于振动发生器给出振动的最高频率。振动发生器可以是一个使传感器与地球重力场方向形成倾斜角的支架,也可以是离心机、电动式振动台或冲击摆的砣子。倾斜支架和离心机可以用于零频校准;转动式校准则用于地球重力场的低频校准;电动式振动台通常被用作稳态正弦校准;冲击摆产生瞬态激励,作为电动式振动台的补充,可用来激励共振频率响应,也可用于高加速度和高速度校准。此外,冲击激励还可以在高加速度和高速度变化时验证传感器的性能,检查在瞬变条件下与传感器配套仪器的性能。

本部分还给出了用于不同目的的几种校准方法。推荐使用激光干涉法作为基本校准方法,只要条件允许,标准传感器校准时都推荐使用这一方法。在单一频率下做校准时,根据不同的使用情况,应优先选择以下频率点:160 Hz、80 Hz、16 Hz、8 Hz。频率响应可以从使用频率范围内,通过离散频率点上的校准得到,在低准确度下可相对于参考频率下的灵敏度得到频率响应。大多数其他校准通过与一个经绝对校准方法校准的标准传感器作比较得出。校准总是以传感器的运动基面为参考,对于“背靠背”校准而言,以被校传感器的安装基面为参考。

5.2 绝对法校准

5.2.1 通过测量位移幅值及频率进行校准

5.2.1.1 概述

许多动态校准方法都是依据传感器所承受的振动位移幅值来进行精确测量的。这种方法一般用于可连续读数的传感器。振动发生器施加的正弦振动应在严格定义的直线上,其横向运动应该小至可忽略。

对于位移为 $\hat{s}$ 和频率为 f 的正弦振动分别进行一次和二次微分即可导出公式 $\hat{v} = 2\pi f \hat{s}$ 和 $\hat{a} = (2\pi f)^2 \hat{s}$ 。使用这两个公式即可由测得的位移计算速度 v 和加速度 a 。这些公式的使用前提是:即使微分后,运动过程中谐波和噪声也可以忽略。这里强调了将电源或诸如机械共振等其他因素引起的失真减为最小的必要性。谐波分量也是有害的,因为它们能激发起传感器的共振响应。

测出位移幅值后,通过计算传感器输出与速度或加速度的比值即可得到传感器灵敏度,位移幅值可利用激光干涉法测出。在参考文献[23]至[28]、[37]和[38]中详细介绍了这种方法。

基于激光干涉法对位移幅值进行测量的灵敏度计算方法,通常在 0.1 Hz~10 kHz 频率范围内能够得到较高的准确度(对应位移幅值 20 nm~0.5 m)。除灵敏度校准外,在干涉位移测量基础上,通过采用特殊方法还可以实现绝对相位校准。激光多普勒测速法(见参考文献[39])。也可以实现高精度的

绝对灵敏度校准和相位校准,这是基于位移测量的激光干涉法的一种替代方法。如果参考镜在传感器振动频率(或相关的谐波频率)上受到干扰,位移测量中就会产生重大误差。分光镜被干扰也会产生误差。最好用一个高灵敏度的加速度计监测干扰的大小。

5.2.1.2 理想干涉仪原理

图1给出了工作原理。其中 E_0 、 E_1 和 E_2 分别代表电场矢量, l_1 和 l_2 代表通过分光镜之后光束需经过的实际光程。被测量的位移幅值用 s (反射镜2)表示。

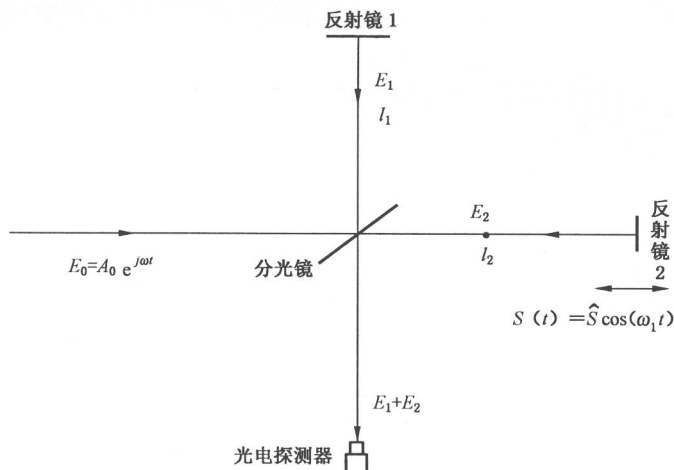


图1 理想激光干涉仪原理图

电场矢量 E_1 和 E_2 可表示如下:

$$E_1 = A_1 \exp \left[j \left(\omega t + \frac{4\pi}{\lambda} l_1 \right) \right]$$

$$E_2 = A_2 \exp \left\{ j \left[\omega t + \frac{4\pi}{\lambda} (l_2 + s) \right] \right\}$$

式中:

λ ——激光波长。

光电检测器的光电流强度 $I(t)$ 由下式给出:

$$I(t) \approx |E_1 + E_2|^2 = A + B \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} (L + s) \right]$$

式中:

A, B ——系统常数;

$L = l_2 - l_1$ 。

由光电流表达式可看出,在 $\frac{4\pi}{\lambda} (l_2 - l_1 + s) = 2n\pi$ 时可得最大值,因此,两个相邻最大值之间对应的位移量为 $\Delta s = \lambda/2$ 。每个振动周期内出现最大值的数目为:

$$R_f = 4\hat{s}/(\lambda/2) = 8\hat{s}/\lambda$$

一般称 R_f 为频率比,它可由1秒内的干涉条纹数除以振动频率求得。

位移幅值可由下式求得:

$$\hat{s} = R_f \cdot \lambda/8$$

除了频率比,如果再测量出振动频率,就可以计算出振动速度和加速度。

也可用同样的装置在上述“条纹计数法”推荐的频率范围之外测量位移幅值。分析光电流 $I(t)$ 的频谱,便可导出其他几种振幅测量方法。参考文献[23]中给出展开式:

$$I(t) = A + B \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \left[J_0 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) - 2J_2 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) \cos(2\omega_1 t) + 2J_4 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) \cos(4\omega_1 t) - \dots \right] - \\ B \sin \frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \left[2J_1 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) \cos(\omega_1 t) - 2J_3 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) \cos(3\omega_1 t) + \dots \right]$$

下面的两个例子充分说明了这里所需信号处理类型。

- a) 调节振动位移大小使其 n 阶谐波分量为零, 解式 $J_n \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) = 0$, 就可以得到 $\hat{s}$;
- b) 在不可能达到 $J_n \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right) = 0$ 所要求的振动位移时, 可由两个谐波分量的比值求出 $\hat{s}$ 。例如, $\hat{s}$ 值可从下式解出:

$$\frac{J_1 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right)}{J_3 \left(\frac{4\pi \hat{s}}{\lambda} \right)} = \frac{\hat{u}_1}{\hat{u}_3}$$

式中:

$\hat{u}_1$ 和 $\hat{u}_3$ ——被测幅值的一阶和三阶谐波分量。

5.2.1.3 测量系统

图 2 是一个测量系统的实例, 这里使用的传感器即是所谓的参考传感器, 并且灵敏度由上端面来确定(参考安装面)。激光器输出功率为 1 mW, 检测元件是常用的硅光电管。用脉冲发生器代替内部晶体振荡器以获得一个性能良好的计数输入信号。当使用零值法时, 频率分析仪用来选定适当的频率, 为避免参考镜或分光镜受振动台支座反作用力干扰, 激光器、干涉系统和振动系统应分别安装在单独的大重量隔振块上(例如: 每个重块应达到 400 kg 以上)。

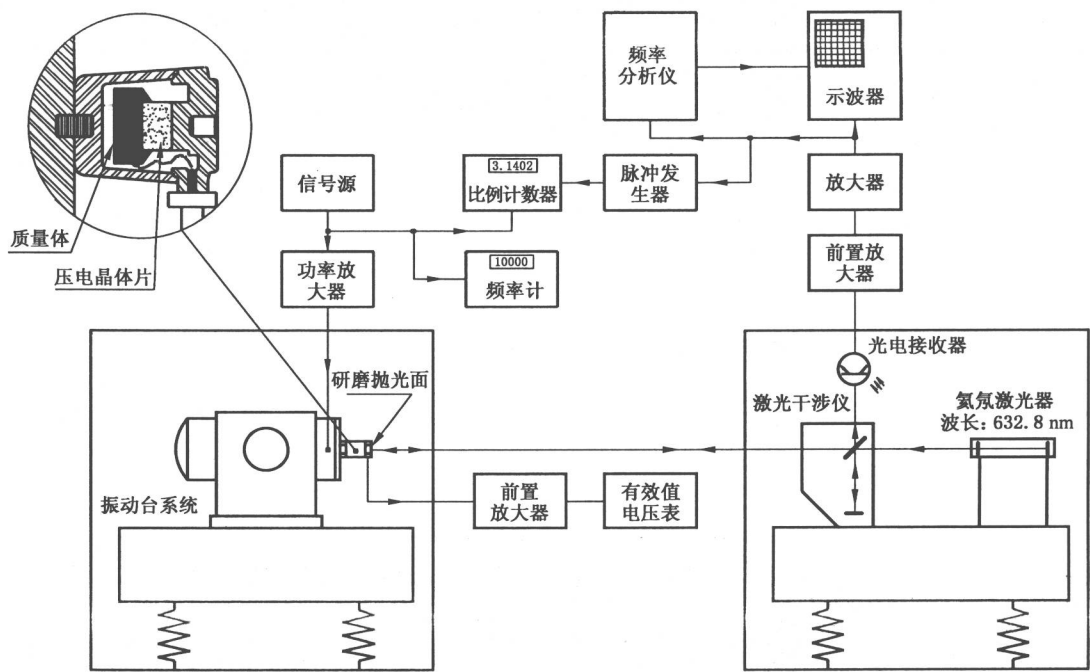


图 2 激光干涉法测量图例

5.2.2 互易法校准(见参考文献[28]至[30])

绝对校准也可以用互易校准技术来实现。在传感器电输出与所使用的校准振动发生器的运动成线性正比关系的幅值范围内, 互易理论可用来做振动标准的校准。该理论给出了振动发生器驱动线圈的

互易关系,即力与电流之比等于电动势与速度之比。

对驱动线圈施加指定频率的电流来驱动校准器时,灵敏度 S_{uc} 定义为加速度计产生的电动势 u_{13} (V) 与传感器安装面的加速度 a (m/s^2) 的比值:

$$S_{uc} = \frac{u_{13}}{\hat{a}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

互易法的目的是确定灵敏度 S_{uc} , 这样当测定了电动势 u_{13} 后, 加速度 $\hat{a}$ 可用式(8)来计算。而 S_{uc} 由下式来确定:

$$S_{uc} = S_0 + s_z Z_m \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

Z_m ——传感器的机械阻抗,单位为千克每秒(kg/s);

参数 S_0 和 s_z 由下面两个实验和计算步骤得出。

实验一:

将几个不同的重块固定到安装台面上,在分别加载每一个重量块和不加重量块时驱动线圈与加速度计之间的传递导纳 Y_e (A/V) 由下式给出:

$$Y_e = \frac{i}{u_{13}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

i ——驱动线圈的电流,单位为安培(A);

u_{13} ——加速度计产生的电动势,单位为伏特(V)。

实验二:

把校准器安装面与一个振动发生器相联接,然后起动振动发生器¹⁾。使校准器运动部件随振动发生器做正弦运动。测量加速度计产生的电动势 u_{13} 与校准器驱动线圈开路所产生的电动势 u_{15} , 并求出他们的比值 u_{13}/u_{15} 。

计算步骤:

以实验一中安装在台面的负荷质量 W 为横坐标做图,确定函数 $W/(Y_{ew} - Y_{eo})$ 的纵坐标截距 J 和斜率 Q , 这里 Y_{ew} 是附加有负荷质量 W 的 Y_e 值, Y_{eo} 是 $W=0$ 时的 Y_e 值。将 $W/(Y_{ew} - Y_{eo})$ 的实部和虚部分别做出图形,由此可确定出 J 和 Q 的实部和虚部,方程式(9)中的 S_0 和 s_z 的大小由下式给出:

$$S_0 = \sqrt{j\omega J u_{13}/u_{15}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$s_z = \sqrt{(u_{13}/u_{15})/j\omega J} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

ω ——角频率,单位为弧每秒(rad/s);

j ——虚部单位。

5.2.3 离心机校准法

5.2.3.1 单离心机

离心机由绕垂直轴以匀角速度旋转的平衡盘或平衡臂组成。利用该装置可以在所需时间内将精确的已知恒加速度施加给加速度传感器。目前已制造出能够承载几千克重的传感器和加速到 $6 \times 10^5 m/s^2$ 的离心机。市场也能见到低加速度离心机。

此类离心机仅可以校准具有零频响应的线加速度传感器。

校准时,将加速度传感器安装在离心机的转盘或转臂上,应注意使其灵敏轴与旋转圆的半径方向一致,这时作用在传感器的加速度为:

1) 电动振动台具有双驱动线圈结构,动圈与安装台面之间为机械连接。在这种情况下就没有必要使用另外的振动台了。

$$a = \omega^2 r \dots\dots\dots (13)$$

式中:

- ω ——离心机的角频率,单位为弧每秒(rad/s);
- r ——转轴到传感器质量块质心的距离。

传感器的安装与转轴中心距离应足够远,以使得测定 r 时可以忽略传感器内质量块的定位偏差。

由于多数传感器的设计结构不便于直接测出 r ,所以 r 的值可以这样来确定,将传感器分别装在相距已知距离 Δr 的两个位置上,绕转轴旋转并调节旋转转速,尽量使传感器在这两个位置得到的加速度一致,在第二个位置上的 r 值以 r_2 表示,那么;

$$r_2 = \frac{\Delta r}{1 - \omega_2^2 u_1 / \omega_1^2 u_2} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

- ω_1 ——第一个位置上的角频率,此时 $r=r_1=r_2-\Delta r$;
- ω_2 ——第二个位置上的角频率,此时 $r=r_2$;
- u_1 ——角频率为 ω_1 时传感器的输出;
- u_2 ——角频率为 ω_2 时传感器的输出。

由 r_2 和 ω_2 的值,根据式(13)可确定其加速度。

如果传感器加速度线性范围的低端能扩展到重力加速度 g ,就不必确定 r 的值,在这种情况下,可以用倾斜支架法在 $\pm g$ 下对传感器做第一次校准,然后将传感器放在离心机上,当传感器的输出与 g 值校准下的数值一致时,确定其对应的角频率为 ω_1 ,则在另外一个角频率 ω 下产生的加速度为:

$$a = g\omega^2 / \omega_1^2 \dots\dots\dots (15)$$

由于加速度随角频率的平方变化,所以与半径 r 相比需更精确地测定角频率值。多数校准用离心机上都装有转速表,它可以直接显示误差在 2% 以内的转速值,更精确地测定转速时可用频闪法或另外几种装置中的一种(如使用光电元件或磁电元件的装置)。它们能产生与转速成正比的脉冲。脉冲速率可用电子计数器来测定。

用离心机对机电传感器进行校准时导线要通过滑环和电刷。由于零频响应的加速度传感器是低阻抗器件,不存在对外部干扰场和电缆噪声的屏蔽问题,在通常情况下结构良好并经磨合的滑环所产生的电噪声可以忽略不计。但有些使用了应变元件的加速度传感器由于仅封装了 1 至 2 个敏感元件,构成惠斯登桥路的其他电阻安装在传感器的外部,校准这样的传感器就要把整个桥电路安装在转台上,以避免由于滑环组件电阻的微小变化产生虚假信号。另外,也可以使用开尔文桥路。

当传感器在小加速度下校准时,如果传感器对横向加速度较敏感,那么重力加速度就会产生明显影响。如果可能,当把传感器安装在离心机上时,应使传感器的最大横向灵敏度轴处于水平面内。

零频率下的加速度灵敏度可以通过高质量离心机校准,其扩展测量不确定度能达到 1% 或更好,但离心机校准不能给出在可用的频率范围内的频率响应。

5.2.3.2 倾斜离心机

当离心机的转轴与地球重力场方向不平行时,安装于离心机上的传感器所承受的加速度将包括重力加速度分量,大小为 $g\sin\varphi\sin(\omega t)$,这个加速度分量附加到向心加速度 $\omega^2 r$ 上,这里 φ 是转轴与垂直轴线的夹角。地球重力场分量对传感器的影响可以用弹簧—质量系统来近似,相关内容见参考文献[31]。当 $r=0$ 并且 $\varphi=90^\circ$ 时,作用于传感器的加速度为正弦加速度。这时,由重力引起的加速度就可测定,而且测量不确定度最小。当然,无论离心机在什么频率下旋转,其加速度的极限为 $\pm g$ 。受离心机及其平衡能力的限制,离心机最高旋转频率通常在数百赫兹以内。

5.2.3.3 双离心机(参考文献[32])

双离心机由一个偏心安装在大离心机上并如 5.2.3.1 所述环绕其垂直轴旋转的小离心机组成(见图 3)。振动传感器 A 被安装在独立驱动的小离心机上。当两个离心机以恒定的角频率驱动时,传感器

灵敏轴的方向相对于大离心机的中心以某一频率交替变化,以 Hz 为单位,其角频率等于小离心机相对于大离心机的每秒转数。任意时刻 t 施加于传感器灵敏轴的加速度分量 a 为:

$$a = r_c \omega^2 \cos(\omega_p t) + r(\omega \pm \omega_p)^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

ω ——大离心机的角频率,单位为弧度每秒(rad/s);

ω_p ——小离心机相对于大离心机的角频率,单位为弧度每秒(rad/s);

r_c ——两离心机的中心距;

r ——传感器质量块质心到小离心机中心的距离。

式(16)中,当 ω 和 ω_p 同为顺时针或同为逆时针时,最后一项取正号,当 ω 与 ω_p 反向时取负号。

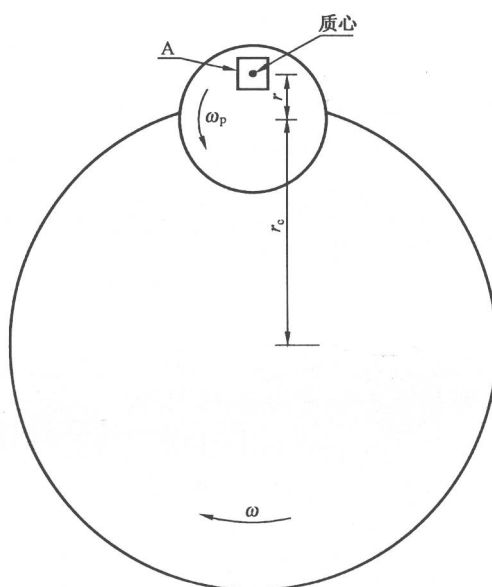


图 3 双离心机

当 $r(\omega \pm \omega_p)^2$ 一项可以忽略时,沿传感器灵敏轴方向上的加速度就剩下正弦项。

$$a = r_c \omega^2 \cos(\omega_p t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

这时沿传感器灵敏轴的加速度分量是正弦量,同时还有一个与灵敏轴垂直的加速度分量,因此这种方法不适用于横向灵敏度比大的传感器。在 ω 与 ω_p 大小相等、方向相反时, $r(\omega \pm \omega_p)^2$ 一项为零。

当双离心机由下列形式构成时,运动方程(17)是精确的,并且沿传感器灵敏轴向的加速度是纯正弦的。在空间安装一皮带轮,使其与大离心机同心。另一尺寸相同的皮带轮被同轴安装在小离心机上,并用皮带使两者相连。用电动机驱动大离心机,则两离心机相对于各自的转轴的角频率大小相等,方向相反。

双离心机可用在 0.7 Hz~10 Hz 频率范围内产生高达 500 m/s² 的正弦加速度。

5.2.3.4 倾斜校准支架

倾斜校准支架利用地球重力场对具有零频响应和可忽略横向灵敏度的线运动加速度传感器进行校准。可用范围从 $-g$ 到 $+g$ 。被校传感器固定在转臂末端的平台上,其灵敏轴与转臂方向一致,以感受沿臂方向上作用的加速度分量。转臂相对于铅垂方向成 φ 角, φ 角可在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内调整。该装置上装有指针可从分度圆上读出 φ 角。注意在 $\varphi=0$ 时,将安装传感器的底座调到水平。使用高准确度的分度圆可使转臂在 $\pm 0.1^\circ$ 或更高的准确度范围内定位。

沿臂方向作用的加速度分量为:

$$a = g \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (18)$$

角度变化 $\Delta\varphi$ 时,相应的加速度变化量为:

$$\Delta a = g \sin \varphi \Delta \varphi \dots\dots\dots (19)$$

在与灵敏轴垂直的方向上,加速度传感器所承受的加速度分量 a_t 为:

$$a_t = g \sin \varphi \dots\dots\dots (20)$$

通常,当传感器的横向灵敏度可忽略时,该量不影响校准结果。

注:为获得满意的结果,试验设备要求隔振。在对直流电压敏感的仪器仪表中采用电子滤波和平均的办法有助于减少台面上振动的影响。

5.2.4 冲击校准方法

为测量随时间变化的加速度,可以使用基于条纹计数和时间间隔测量的激光干涉法(见参考文献[40])。通过测得的位移值和对应的时间,利用内插多项式并进行两次微分运算即可获得加速度值。实验证明,通过使用一个特制的气动冲击加速度激励器——冲击锤和砧子,可以在冲击加速度峰值或高品质加速度计的冲击灵敏度测量中获得很小不确定度(见参考文献[41])。多数冲击绝对校准基于速度变化原理(见参考文献[28]和[33])。这是因为速度是一个可以进行直接测量的物理参数,通常的结构是把被校传感器安装在处于静止位置的悬吊砧体上(见参考文献[34])。用一个锤子打击这个砧台,使砧台产生一个瞬态运动。这一冲量是可控的,使得速度变化不要过快或过慢,以免激起仪器响应范围外明显的频率分量,这时可近似应用刚体动力学理论。被校速度或加速度传感器的质量与相连接的砧台质量相比要小,而且要保证碰撞时传感器灵敏轴方向与冲击力方向尽量一致。做冲击实验时,要记录加速度计输出与时间的对应关系,在冲击后随即测得砧台的速度 Δv 。

测量砧子通过已知距离所用时间来测定砧子的速度。用光电或磁传感器触发电子计时器。在碰撞过程中砧子获得的速度是受到加速度作用的直接结果:

$$\Delta v = \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \dots\dots\dots (21)$$

式中:

Δv ——速度增量,单位为米每秒(m/s);

$a(t)$ ——随时间变化的加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2)。

加速度计的输出 $u_r(t)$ 为:

$$u_r(t) = S_r a(t) \dots\dots\dots (22)$$

式中:

S_r ——参考标准的灵敏度,以输出信号单位每米负二次方秒表示。

由式(21)和式(22)可解出 S_r :

$$S_r = \left[\int_{t_1}^{t_2} u_r(t) dt \right] / \Delta v \dots\dots\dots (23)$$

由碰撞过程所记录下的输出及式(23)可以对线运动加速度传感器进行校准。如冲击施加于线性弹性体时,其脉冲为半正弦形,脉冲包络的面积 $A=0.637 hb$,其中 h 和 b 分别为脉冲的高度和宽度。改变碰撞件的质量、垫层,及诸如跌落高度、空气压力等初始条件,或改变与冲击发生器特性有关的其他物理参数,可以调整脉冲形状和脉宽。

要得到方程(23)中的 Δv 值,两种方法(用砧子做碰撞或用线性弹性体做碰撞)都可行。用记忆示波器或高速示波器加上照像的办法均可记录碰撞过程中加速度传感器输出随时间的变化。通过分别施加已知的电位差信号 u_c 和已知的的时间 t_c ,测量其对应的 y_c 与 x_c ,可以确定电位差标度和时间标度。电位差标度系数 k_1 和时间标度系数 k_2 由下列公式给出:

$$k_1 = u_c / y_c \quad k_2 = t_c / x_c \dots\dots\dots (24)$$

所记录的加速度计输出随时间变化曲线下的面积,由下式给出: