

中华人民共和国国家标准

GB/T 20485.13—2007/ISO 16063-13:2001

振动与冲击传感器校准方法 第 13 部分：激光干涉法冲击绝对校准

Methods for the calibration of vibration and shock transducers—
Part 13: Primary shock calibration by laser interferometry

(ISO 16063-13:2001, IDT)

2007-07-02 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 仪器设备要求	1
4.1 总则	1
4.2 基于砧体(刚体)运动的冲击机	1
4.3 基于细长棒中波传播的冲击机	2
4.4 冲击机和激光干涉仪的隔振块	4
4.5 激光器	4
4.6 干涉仪	4
4.7 示波器	5
4.8 带计算机接口的波形记录仪	5
4.9 带数据处理程序的计算机	5
4.10 滤波器	5
4.11 其他要求	5
5 环境条件	6
6 优选的加速度及脉冲持续时间	6
7 方法	6
7.1 测量步骤	6
7.2 数据采集	6
7.3 数据处理	6
8 校准结果报告	9
附录 A(规范性附录) 校准中测量不确定度的表述	10
附录 B(资料性附录) 程序介绍	12
附录 C(资料性附录) 复灵敏度幅值和相移计算的替代方法	15
参考文献	16



前　　言

GB/T 20485《振动与冲击传感器的校准方法》主要由以下几大类组成：

- 第1类：基本概念；
- 第2类：绝对法校准（如：激光干涉法振动绝对校准、激光干涉法冲击绝对校准等）；
- 第3类：比较法校准（如：振动比较法校准、冲击比较法校准等）；
- 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）；

本部分是GB/T 20485《振动与冲击传感器的校准方法》第2类中的一个部分。

本部分等同采用ISO 16063-13:2001《振动与冲击传感器校准方法 第13部分：激光干涉法冲击绝对校准》（英文版）。

本部分等同翻译ISO 16063-13:2001。为使用方便，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 16063-13:2001中引用的其他国际标准，有被采用为我国标准的，用我国标准代替对应的国际标准，未被采用为我国标准的直接引用国际标准。

本部分的附录A为规范性附录，附录B、附录C为资料性附录。

本部分由中国计量科学研究院提出。

本部分由全国机械振动与冲击标准化技术委员会归口。

本部分起草单位：中国航空工业第一集团公司北京长城计量测试技术研究所、中国计量科学研究院。

本部分主要起草人：李新良、曾吾、于梅、孙桥。

本部分为首次制定。

引 言

按照定义,冲击灵敏度 S_{sh} 由加速度计输出峰值和输入加速度峰值关系来决定。 S_{sh} 不是一个唯一的量,是随着冲击脉冲持续时间、冲击波形、被校传感器的带宽、配套信号适调仪的频响而变化。

在频域计算某一个频率点对应的复灵敏度可以确定加速度计的线性。本部分提出了计算复灵敏度幅值 S_n 和相移 $\Delta\varphi_n$ 的数据处理程序,再计算冲击灵敏度 S_{sh} (见附录 C)。

本部分给出了运动的时间历程的绝对法测量运动的方法,从根本上不同于 GB/T 20485.1 介绍的速度改变冲击校准法。因此,得到的冲击灵敏度不同于后者得到的冲击校准因子,但和 ISO 5347-4(将转换为 ISO 16063-22)所得到的校准因子一致。

振动与冲击传感器校准方法

第 13 部分: 激光干涉法冲击绝对校准

1 范围

本部分规定了用激光干涉法测量冲击过程时间-位移信号对直线加速度计进行绝对法冲击校准的仪器设备和操作程序。该方法适用的冲击脉冲持续时间范围为 0.05 ms~10 ms, 峰值范围为 $10^2 \text{ m/s}^2 \sim 10^5 \text{ m/s}^2$ (与脉冲持续时间有关), 给出的是冲击灵敏度。

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 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(ISO 16063-11:1999, IDT)

ISO 5347-22:1997 振动与冲击传感器校准方法 第 22 部分: 加速度计共振测试 通用方法

3 测量不确定度

冲击灵敏度的测量不确定度:

- 在设定参考加速度峰值 10^3 m/s^2 , 参考冲击脉冲持续时间 2 ms 和放大器参考增益时, 为读数的 1%;
- 对所有冲击峰值、脉冲持续时间, 不超过读数的 2%。

上述规定适用于高精度等级传感器(例如, 参考标准加速度计)的校准, 这样的校准应仔细操作以确保给出的全部不确定度分量应足够小到符合相应规定(不确定度的分量参看附录 A)。特别是由传感器或冲击机的固有模态激发的频谱能量应比校准频率范围内的频谱能量要小得多, 传感器固有频率的测试按照 ISO 5347-22:1997 进行。通常应避免使用第 1 章、第 6 章中给出的相对短持续时间的脉冲。

本部分的所有使用者应按照附录 A 编制实际的不确定度分量表。

注: 根据 GB/T 20485.1, 测量不确定度表示为测量的扩展不确定度(简称不确定度)。

4 仪器设备要求

4.1 总则

为了满足第 1 章中的测量范围及达到第 3 章中的不确定度要求, 本章给出了所需仪器设备的推荐技术指标。

4.2 基于砧体(刚体)运动的冲击机

该冲击机是用一个能自由移动的锤(弹体)来撞击安装有加速度计的砧体(目标)。锤撞击砧体后, 砧体能够自由直线加速, 同时锤被自动锁住。为获得期望的脉冲宽度和脉冲波形, 在锤和砧之间应安装钢弹簧或缓冲垫(由橡胶、纸等某种可实现脉冲波形的材料制成), 所得冲击脉冲应是一个近似半正弦、半正弦平方或高斯(Gaussian)的加速度波形。锤和砧的共振频率至少为 $10/T$, T 为脉冲持续时间。

为了避免冲击机结构共振的影响,锤和砧应尽量与结构隔离。锤和砧的安装中心线间距最大值为 $\pm 0.2\text{ mm}$ 。砧应由对称力支撑,而非对称力支撑会导致其旋转、偏离于直线运动。

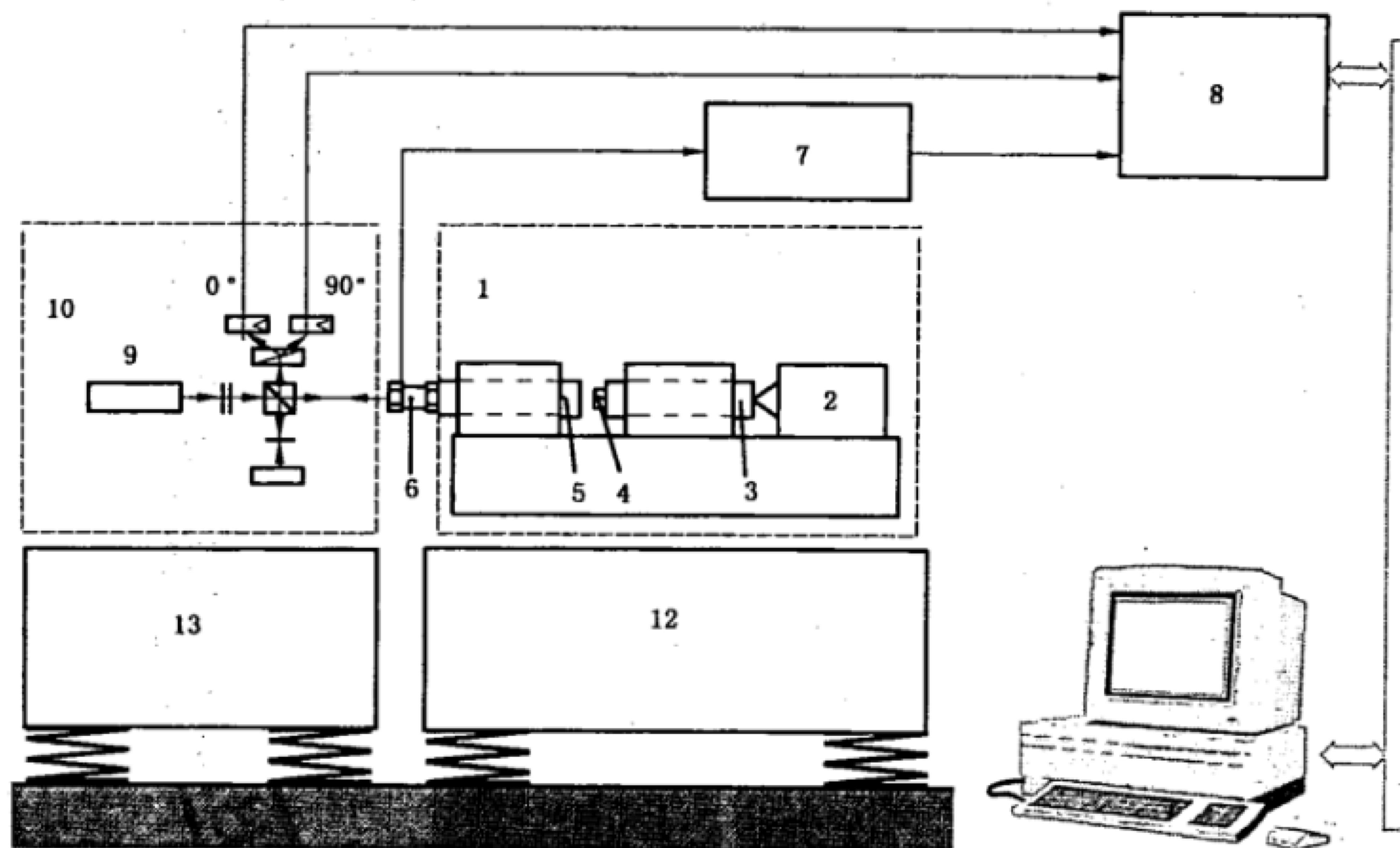
安装加速度计的表面的粗糙度,用算术平均偏差 R_a 表示,其值小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。

表面平面度的要求是:在对应于任何被校准传感器的最大安装表面内,该表面应包容在距离为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 两个平行平面之间。

联接传感器用的螺纹孔与安装表面的垂直偏差应小于 $10\text{ }\mu\text{m}$,即该孔的轴线允许在一个直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的柱体区域内,并且柱面的高度与孔的深度相同。

注 1:当砧(或砧和锤)安装在空气轴承上时,应满足上述要求(见图 1 和参考文献[1])。图 1 所示的冲击机可以产生半正弦平方加速度波形。

注 2:按照 ISO 5347-4:1993 进行比较冲击校准的传统冲击机(见参考文献[2]和[3]),不可能产生能用激光干涉法精确测量的运动。



- 1——冲击机(4.2);
- 2——弹簧单元;
- 3——空气轴承冲击锤(钢, 直径 $30\text{ mm} \times$ 长 200 mm);
- 4——垫;
- 5——空气轴承砧体(钢, 直径 $30\text{ mm} \times$ 长 200 mm);
- 6——加速度计;
- 7——放大器;
- 8——数字波形记录仪(4.8);
- 9——激光器(4.5);
- 10——干涉仪(4.6);
- 11——光电接收器(4.6);
- 12——隔振块 1(4.4);
- 13——隔振块 2(4.4)。

图 1 基于砧体(刚体)运动的冲击校准测量系统实例
(加速度峰值范围 $10^2\text{ m/s}^2 \sim 5 \times 10^3\text{ m/s}^2$)

4.3 基于细长棒中波传播的冲击机

该冲击机主要由一个可运动部件构成,例如,被加速的钢球(弹体)撞击和棒连接的缓冲件(如另一个相同直径的钢球),而棒的另一端面安装了加速度计。这里,棒以柔性支撑来避免冲击机结构共振的

影响。钢球和棒应尽量安装在同一直线上以满足第3章中的不确定度要求。

为达到第3章中所述不确定度,在测量期间,即数据采集的最重要时间段(最大值:1 ms),应尽量保证由加速度计安装表面引起的相对于直线运动的偏差最小。冲击机应具备数据采集的触发功能。

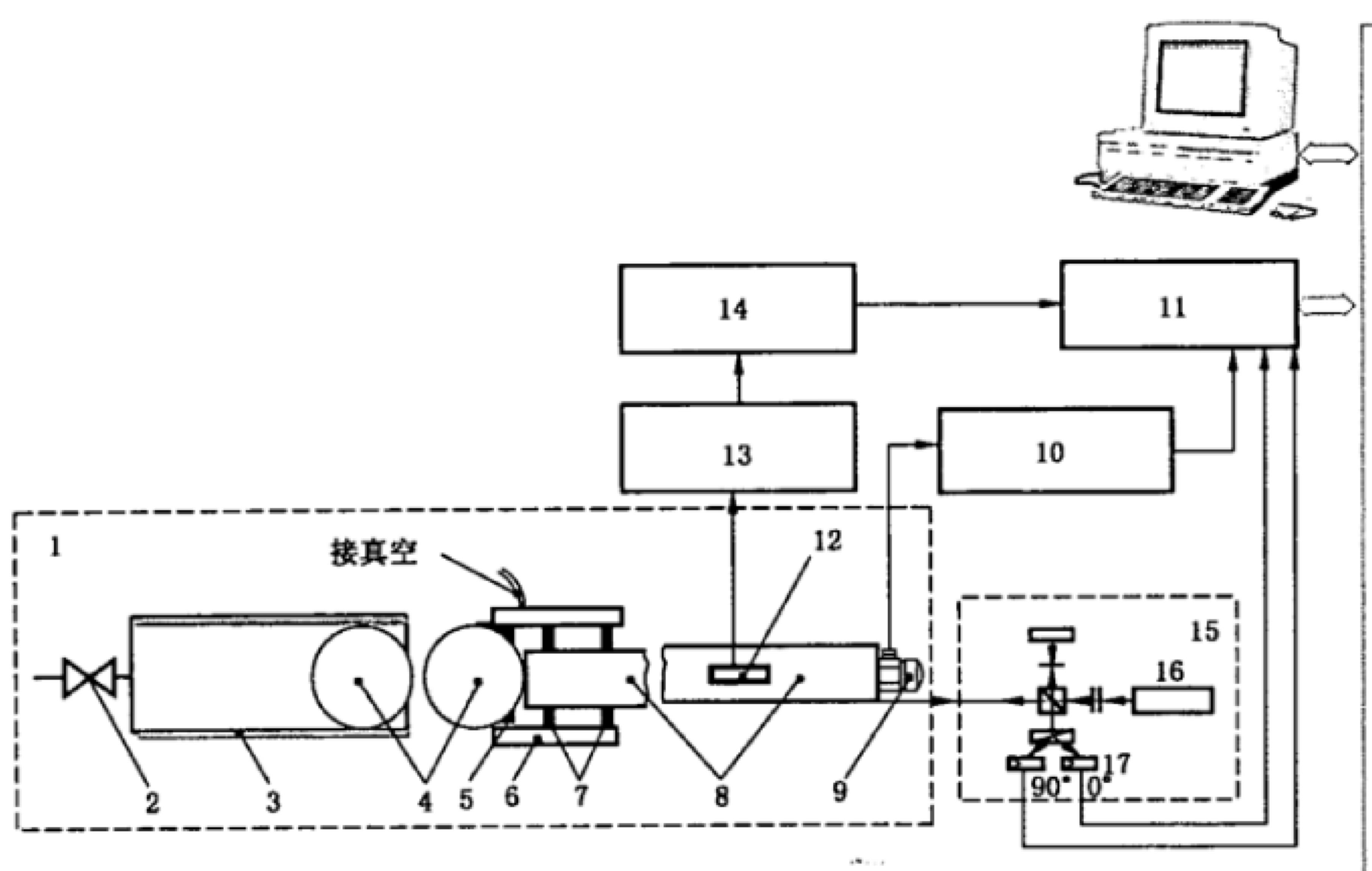
安装加速度计的表面的粗糙度,用偏差的算术平均 R_a 表示,小于 $1 \mu\text{m}$ 。

表面平面度的要求是:在对应于任何被校准传感器的最大安装表面内,该表面应包容在距离为 $5 \mu\text{m}$ 两个平行平面之间。

连接传感器用的螺纹孔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直径为 $10 \mu\text{m}$ 的柱体区域内,并且柱面的高度与孔的深度相同。

棒的尺寸设计(见参考文献[4]、[5])应考虑以下两个因素:校准单端安装加速度计时,激光光束必须能够射到棒的端面;保证足够的时间长度。

最大冲击持续时间和可用数据采集测量时间是从主脉冲开始时刻到该脉冲在安装表面发生反射的时刻之间的时间长度(例如,如图2所示,棒长2 m时,时间间隔0.8 ms)。



- 1—冲击机;
- 2—阀门(压缩空气);
- 3—空气腔;
- 4—碰撞球对(直径 50 mm);
- 5—硅橡胶;
- 6—铝管;
- 7—O形环;
- 8—棒(钛金属, 直径 25 mm, 长 2 000 mm);
- 9—加速度计;
- 10—放大器;
- 11—数字波形记录仪(4.8);
- 12—应变片;
- 13—桥路放大器;
- 14—触发单元;
- 15—干涉仪(4.6);
- 16—激光器(4.5);
- 17—光电接收器(4.6)。

图2 基于细长棒中应力波传播的冲击校准测量系统实例
(加速度峰值范围 $10^3 \text{ m/s}^2 \sim 10^5 \text{ m/s}^2$)

图 2 是一个基于应力波在细长棒中传播的冲击机的实例。为了获得触发信号，在棒的柱面对称位置上贴两个应变片。带有两个钢球的冲击激励装置(图 2 所示)可产生所需加速度波形，用高斯函数的微分(即高斯速度脉冲)来描述(见参考文献[6])。这种装置的优点是：在多次冲击校准中，具有良好的重复性；在不同加速度峰值上冲击频谱的频谱分量变化相对小(见参考文献[13])。为满足不同校准条件，也可使用与图 2 尺寸不同的棒。

通常，棒内轴向位移是径向位置和频率的复杂函数，而频率取决于棒的材料特性和直径。这样，对于被校传感器可能会带来和频率有关的基座应变，或增加校准的不确定度，或二者都有。

4.4 冲击机和激光干涉仪的隔振块

为了避免大地脉动引起的相对运动,以及冲击激励源支撑结构的反冲力对校准结果产生过大的影响,冲击机和干涉仪应安装在起隔振作用的同一个或两个不同的大质量块上。

4.5 激光器

应使用发红光的氮氛激光器。在实验室条件下(即:大气压为 100 kPa, 温度 23℃, 相对湿度 50%), 激光波长为 0.632 81 μm。

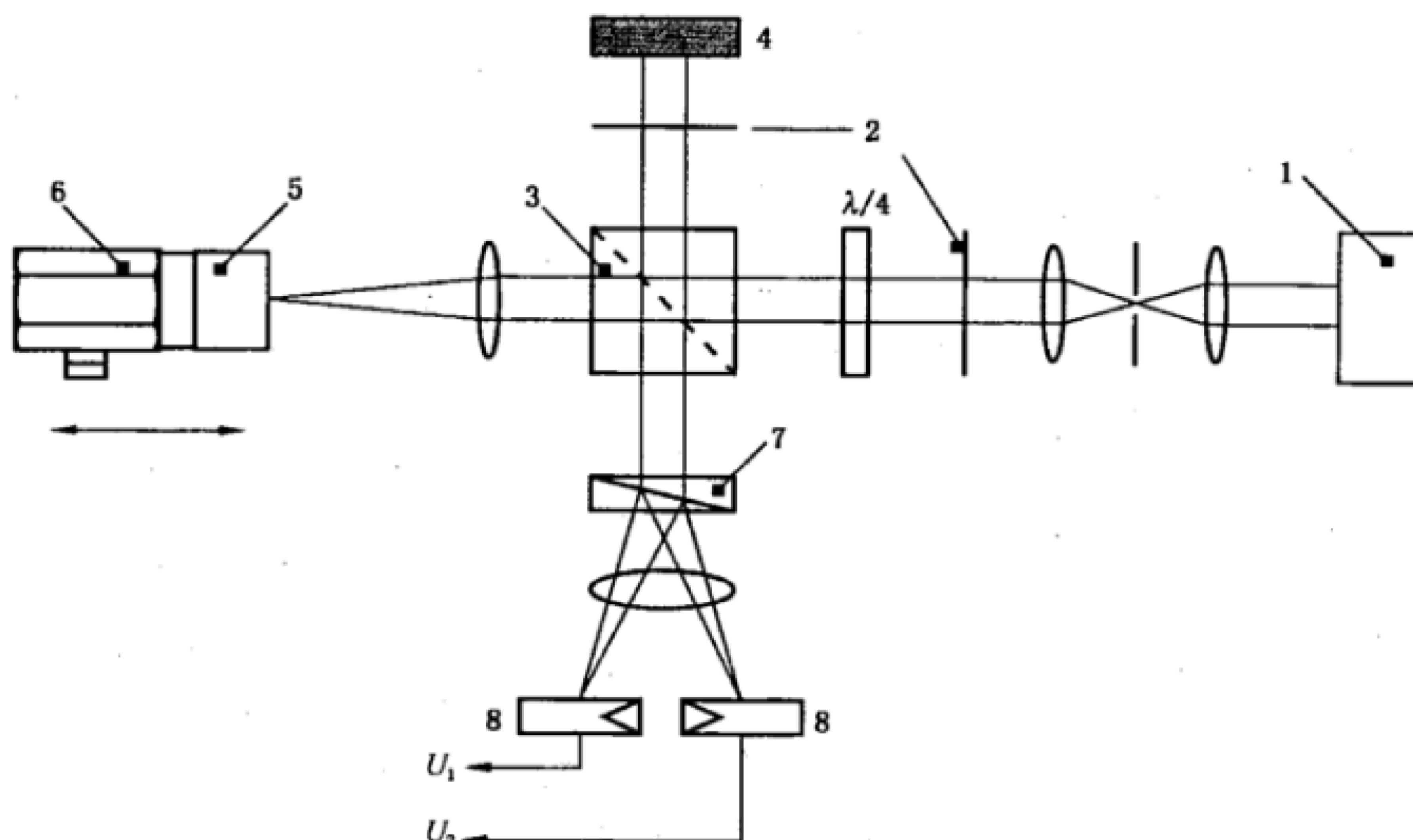
如果激光器具有手动或自动气压补偿,应将其设置为零或关闭。

另外,还可以选择其他已知稳定波长的单频激光器。

4.6 干涉仪

应选用改进型迈克尔逊(Michelson)激光干涉仪,正交信号输出,带有两只频响满足所需带宽的光电接收器。所需带宽根据最大速度 v_{max} 由下式得到:

改进的迈克尔逊干涉仪的结构见图 3。四分之一波片将入射的线偏振光分成偏振方向相互垂直、相位差为 90° 的两个测量光束。在与线偏振参考光束发生干涉后，两个正交偏振光束由光学器件[例如：沃尔斯顿(Wollaston)棱镜或偏振分光镜]分开，并由两个光电二极管检测。



- 1——激光器；
 - 2——偏振片；
 - 3——分光镜；
 - 4——参考镜；
 - 5——模拟质量块(测量反射镜)；
 - 6——加速度计；
 - 7——沃尔斯頓棱鏡；
 - 8——光电接收器。

图 3 正交输出的激光干涉仪

改进的迈克尔逊干涉仪的两路输出幅值的偏移量应小于±5%，相对幅值偏差应小于±5%，与90°名义角度的偏差应小于±5°。为确保这些允差，要采用适当的方法调整两路干涉信号的偏移量、幅值大小及相角。

干涉仪的测量光束和砧、棒或砧棒轴在一条直线上，以满足第3章中的测量不确定度的要求。

如果传感器是单端形式的，砧、棒或砧棒端面应该抛光，以满足测量光束反射需要，如果是背靠背传感器，其顶面也应该抛光，避免使用反射镜。

在大加速度峰值测量时，需要带宽很宽。例如，在测量冲击峰值为 10^5 m/s^2 、脉冲持续时间为 $200 \mu\text{s}$ 的冲击过程（加速度波形见4.3），干涉仪输出信号频率最大值为32 MHz，详见参考文献[6]。

也可以用其他合适的双光束干涉仪代替（改进）迈克尔逊干涉仪，例如，（改进）马赫-泽德（Mach-Zehnder）干涉仪。

4.7 示波器

如果4.8不包括示波器功能，应该有一个DC~50 MHz或上限频率更高的示波器检查干涉仪和加速度计的输出信号波形。

4.8 带计算机接口的波形记录仪

采用带计算机接口的波形记录仪，该记录仪具有模-数转换功能，并能存储干涉仪的两路正交输出信号及加速度计的输出信号。其幅值分辨力、采样率及存储容量应足够大，在校准的幅值范围内，满足第3章中规定的不确定度。通常，用于加速度计输出的幅值分辨力应不小于10比特，用于干涉仪正交输出信号的分辨力应不小于8比特。加速度输出测量的典型幅值分辨力应该不小于10比特，用一个两通道的波形记录仪记录干涉仪的输出信号，同时另一个波形记录仪（具有更高的分辨力和更低的采样率）记录加速度计的输出信号。

示例：在加速度峰值为 2500 m/s^2 、脉冲持续时间为2 ms的条件下校准加速度计，采样频率为50 MHz（存储容量应1 M字节，才能满足3个通道存储需要）或更高。

4.9 带数据处理程序的计算机

应使用带有数据处理程序的计算机，其程序应按照7.3中描述的计算过程编制。

4.10 滤波器

加速度计和干涉仪输出信号均用模拟滤波器滤波。为了避免混叠和（或）抑制噪声，该滤波应具有适合的幅频和相频响应，以满足测量不确定度要求（见第3章）。数据处理程序中的数字滤波器也应满足上述要求，见7.3。

对干涉仪输出信号进行滤波时，应考虑参考文献[6]介绍的误差。

4.11 其他要求

在校准中为获得较小测量不确定度（如1%），加速度计和放大器应作为一个整体一起进行校准。

加速度计应具有刚性结构。在计算测量不确定度时，应考虑基座应变灵敏度、横向灵敏度及加速度计/放大器套组的稳定性（见附录A）。

校准一个背靠背参考加速度计的灵敏度（幅值和/或相移）时，应加装一个模拟质量块，其质量与使用背靠背参考加速度计通过比较法校准（见ISO 16063-22）的加速度计质量相同。测量光点位于模拟质量块的顶部（外表面）或参考加速度计的上表面。

如果检测模拟质量块顶部运动，质量块的顶部应具有抛光的表面，测量光点的位置应靠近该表面的几何中心。如果质量块的运动不能视为刚体运动，应考虑其顶部与底部表面的相对运动。

另一方面，也可以通过模拟质量块上的纵向通孔测量参考加速度计的顶端运动。

用于比较法冲击校准的一些传统冲击机，被校加速度计的运动是通过背靠背参考加速度计的基准面传递的，两个加速度计固定为一个刚性结构。在这种情况下，背靠背的参考加速度计在进行冲击运动校准时检测紧靠加速度计的运动部位（如，棒的端面）。

5 环境条件

校准应在以下环境条件下进行：

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

6 优选的加速度及脉冲持续时间

加速度(峰值)和冲击脉冲持续时间应按以下系列值优先选用：

- a) 加速度值, m/s^2 :
- 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000。
- b) 冲击脉冲持续时间, ms:
- 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10。

注意：冲击校准脉冲持续时间要比厂家提供的最窄冲击脉冲持续时间要长一些，以避免损坏被校加速度计。

7 方法

7.1 测量步骤

按照图 1、图 2、图 3 所示安装。

调整激光干涉仪(见图 3)，使其输出为两路相位正交的信号 u_1 和 u_2 ，允差满足 4.6 的规定。

在做校准之前，应测量干扰量如交流声和噪声，其值应尽量小以满足校准不确定度要求。

把干涉仪(4.6)调整到最佳状态、设置放大器档位后，应优选推荐(见第 6 章)加速度峰值和脉冲持续时间，按 7.2 和 7.3 进行校准。

注 1：由数字信号处理程序和参考文献[7]、[8]所给出的特定的外差干涉技术可以产生允差满足 4.6 所述的正交信号，可实现比零差技术更小的不确定度。适当的外差技术在宽带(见 4.6)干涉信号的光电传输中具有特殊的优势，但成本比零差技术高。

注 2：在测量时变加速度信号，采用下列手段时就无须产生正交信号：单通道输出的迈克尔逊干涉仪，一台时间间隔分析仪和从测得的位移值及对应时间来确定加速度值的特定数学方法(见 GB/T 20485.1；详见参考文献[9])。

7.2 数据采集

应该设置低通滤波器和高通滤波器(如使用)的截止频率，使低、高通滤波对校准结果的干扰影响在允差范围以内(见参考文献[6])。采样率的设置应满足奈奎斯特(Nyquist)定律，使最高频率小于采样频率的二分之一。

在一个测量周期 $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$ 中，对正交信号进行等间隔采样，开始于 t_0 ，结束于 $t_0 + T_{\text{Meas}}$ 。测量应在加速度计安装面上的冲击发生前时刻开始(推荐的时移为 $0.1T$ ， T 为脉冲持续时间)，在反射脉冲到达之前结束(推荐的时移为 $0.05T$)。

在 $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$ 内采样得到的 $\{u_1(t_i)\}$ 和 $\{u_2(t_i)\}$ 两路测量值序列，其采样间隔 $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ 为常数。

加速度计输出值的采样序列为 $\{u(t_i)\}$ 。

将数据传送到计算机的存储器。

7.3 数据处理

7.3.1 概述

图 4 给出了计算冲击灵敏度(加速度计输出峰值比加速度峰值，见引言)的三种数据处理方法的框图，三种方法的区别在于使用或不使用 DFT(离散傅里叶变换)：

- a) 不使用 DFT 方法；

- b) 速度值 DFT 方法;
 - c) 位移值 DFT 方法。

对于方法 a) 和 b)，大部分计算步骤都相同，不同的仅是在由速度序列计算加速度序列时一个是在时域微分，一个是在频域微分。在频域计算时，应用了 DFT 和 IDFT(离散傅里叶逆变换)，而中间数据可用于加速度计灵敏度幅值和相位校准(见附录 C)。方法 c) 仅在频域对位移序列 $s(t_i)$ 进行两次微分得到加速度序列 $a(t_i)$ 。

方法 a) 用于“较长”的冲击，例如 $T \cdot a_{\text{peak}} \geq 0.5 \text{ m/s}$ 的正弦平方加速度波形（见 4.2）和 $T \cdot a_{\text{peak}} \geq 1.5 \text{ m/s}$ 的高斯速度波形（见 4.3）， T 为脉冲持续时间，以 s(秒) 为单位， a_{peak} 为加速度峰值，以 m/s^2 为单位。对于“较短”的冲击，可以用方法 b) 和方法 c)。两种方法也可用于长持续时间的冲击，可有效地抑制高频干扰振动的影响。如果在冲击前后加速度计的速度不是零，使用特殊的数据处理过程（剪切处理）可正确进行傅里叶变换。

注 1：冲击脉冲持续时间的定义和关系见参考文献[6]。对于高斯速度冲击，冲击脉冲持续时间就是速度大于 $0.606v_{peak}$ 的时间段。

注 2：上述关系下给出的冲击脉冲持续时间 T 应考虑 4.6 所给的允差范围内的正交信号的失真而带来的影响(见参考文献[6])。

注 3：参数 T 和 a_{peak} 的乘积约等于速度峰值，干涉仪输出瞬时频率和速度呈线性关系。如果上述条件满足，可以用低通滤波器对干涉仪输出信号进行滤波得到满足第 3 章不确定度要求的信噪比。

7.3.2 不使用 DFT 方法计算冲击灵敏度

通过下述的 a) 至 i) 数据处理方式计算出加速度计的冲击灵敏度, 见图 4 的 a)。

a) 利用采样得到的干涉仪输出值 $\{u_1(t_i)\}$ 和 $\{u_2(t_i)\}$,由下列公式计算调相值序列 $\{\varphi_{\text{Mod}}(t_i)\}$:

式中：

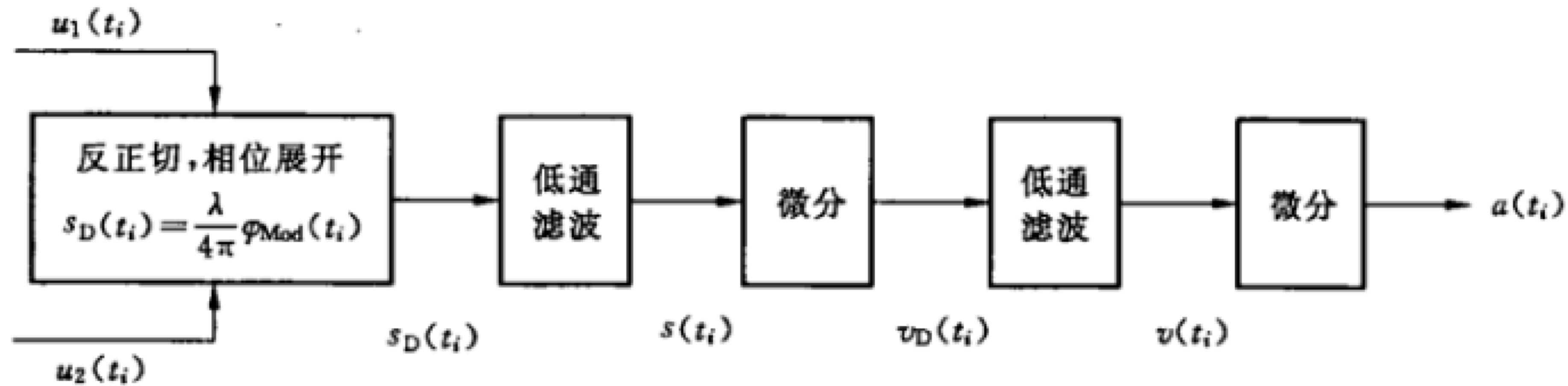
$n=0, 1, 2, \dots$

为了使调相值序列 $\{\varphi_{\text{Mod}}(t_i)\}$ 连续, 应选择 $n\pi$ 项中的 n 为整数。

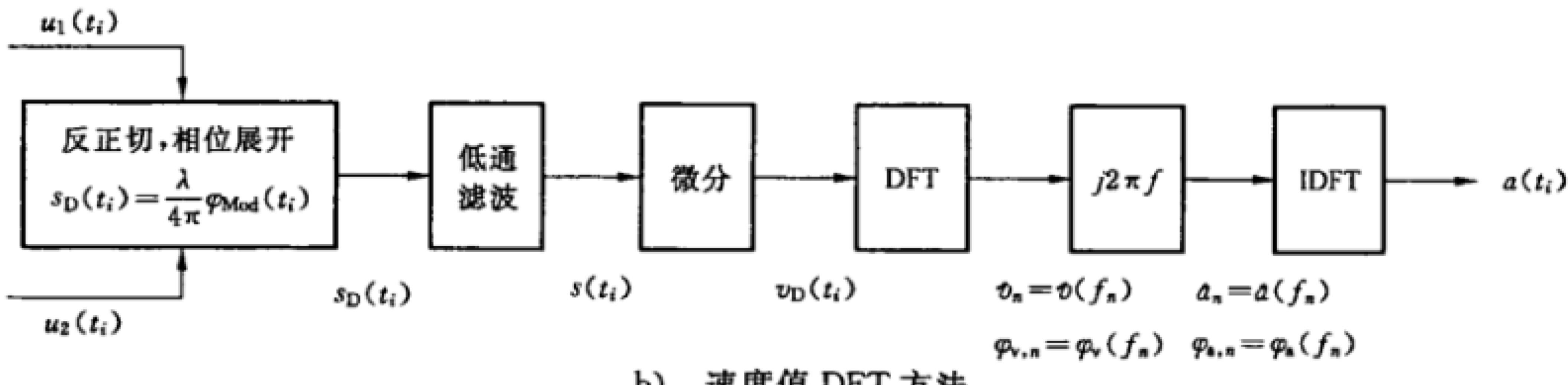
注：关于整数 n 计算的程序见参考文献[10]。

用下式计算位移序列 $\{s_D(t_i)\}$:

下标 D 表示受高频噪声影响的序列值。



a) 不使用 DFT 的计算方法



b) 速度值 DFT 方法

图 4 计算冲击灵敏度的数据处理框图

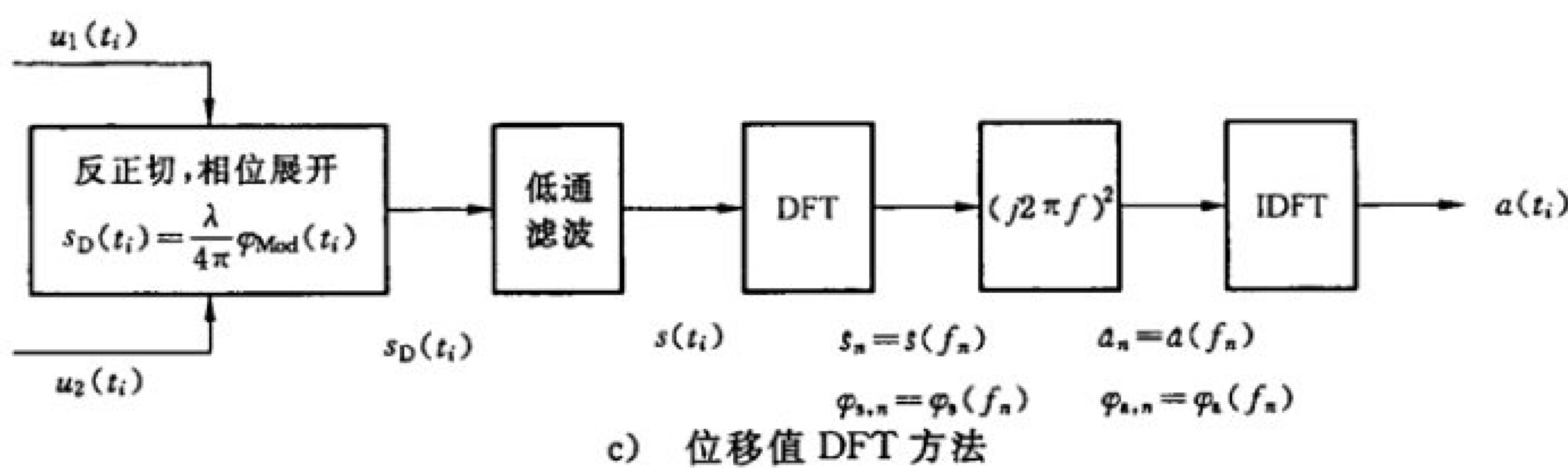


图 4(续)

- b) 选择数字低通滤波器的算法和参数,能够抑制高频噪声而不使信号发生畸变,对位移序列 $\{s_D(t_i)\}$ 进行滤波,得到一“平滑”位移序列,记作 $\{s(t_i)\}$ 。

注：具有平坦幅值响应的滤波器如 4 阶递归巴特沃斯(Butterworth)低通滤波器可实现这一目的。为了抑制典型噪声，截止频率在正弦平方加速度波形(见 4.2 冲击机)时不应大于 $16/T$ ，在高斯速度波形(见 4.3 冲击机)时不应大于 $5/T$ 。然而，为了保持信号本身的失真不被忽略，截止频率也不应太小。

- c) 对位移-时间函数进行一次微分获得速度-时间函数, 即速度序列 $\{v_D(t_i)\}$ 。

注：在 t_i 时刻用下式计算一次微分：

- d) 选择数字低通滤波器的算法和参数,能够抑制高频噪声而不使信号发生畸变,对速度序列 $\{v_D(t_i)\}$ 进行滤波,得到一“平滑”速度序列,记作 $\{v(t_i)\}$ 。

注：同 b) 注。

- e) 对速度-时间函数进行一次微分获得加速度-时间函数,即加速度序列 $\{a(t_i)\}$ 。

注：在 t_i 时刻用下式计算一次微分：

- f) 从计算所得的加速度计输入值的序列 $\{a(t_i)\}$ 判断最大值: $\max\{a(t_i)\}$,作为加速度峰值 a_{peak} 。

g) 选择数字低通滤波器的算法和参数,能够抑制高频噪声而不使信号发生畸变,对采样得到的加速度计输出序列 $\{u_p(t_i)\}$ 进行滤波,得到一“平滑”输出序列,记作 $\{u(t_i)\}$ 。

注：具有平坦幅值响应的滤波器如 4 阶递归巴特沃斯低通滤波器可实现这一目的。

- h) 从滤波所得的加速度计输出值的序列 $\{u(t_i)\}$ 判断最大值: $\max\{u(t_i)\}$, 作为加速度计输出峰值 u_{peak} 。

如果信号有零漂，冲击之前的最近零点和冲击之后的最近漂移零点应连接成一条直线，作为输出的最终零轴。允许有相对于输出峰值 1% 的最大零点漂移。如果零点漂移过大，应考虑对不确定度的影响，给出零点漂移数值。

- i) 由步骤 h) 和 f) 得到 u_{peak} 、 a_{peak} ，用下式计算冲击灵敏度 S_{sh} ：

在校准结果的报告中，应包含按照附录 A 计算出的校准中的测量扩展不确定度。

7.3.3 速度值 DFT 方法计算冲击灵敏度

通过下述的 a) 至 j) 步骤数据处理方法计算出加速度计的冲击灵敏度, 见图 4 的 b)。

- a) 同 7.3.2 的 a);
 - b) 同 7.3.2 的 b);
 - c) 同 7.3.2 的 c);
 - d) 对步骤 c) 得到的 $\{v(t_i)\}$ 进行 DFT 计算, 得到速度的复频谱;
 - e) 速度复频谱乘以 $j2\pi f$ 得到加速度的复频谱;
 - f) 用 IDFT 计算加速度序列 $\{a(t_i)\}$;

- g) 同 7.3.2 的 f);
- h) 同 7.3.2 的 g);
- i) 同 7.3.2 的 h);
- j) 同 7.3.2 的 i)。

7.3.4 位移值 DFT 方法计算冲击灵敏度

通过下述的 a) 至 h) 步骤数据处理方式计算出加速度计的冲击灵敏度, 见图 4 的 c)。

- a) 同 7.3.2 的 a);
- b) 同 7.3.2 的 b);
- c) 对步骤 b) 得到的 $\{s(t_i)\}$ 进行 DFT 计算, 得到位移的复频谱;
- d) 给位移复频谱乘以 $(j2\pi f)^2$ 得到加速度的复频谱;
- e) 同 7.3.3 的 f);
- f) 同 7.3.2 的 f);
- g) 同 7.3.2 的 g);
- h) 同 7.3.2 的 h);
- i) 同 7.3.2 的 i)。

8 校准结果报告

在校准结果报告中, 除校准方法以外, 至少应对下列校准条件和特性参数给予说明:

- a) 环境条件:
 - 加速度计的温度;
 - 环境空气温度。
- b) 安装方法:
 - 安装表面的材料;
 - 安装力矩(如果加速度计是螺栓安装);
 - 油或油脂(如果使用);
 - 电缆固定;
 - 安装方位(垂直或水平)。
- c) 模拟质量块(如果使用):
 - 材料(如: 钢)、尺寸(长度、直径)和质量;
 - 安装力矩;
 - 为了补偿上下表面之间相对运动的影响, 应给出灵敏度修正系数值。
- d) 激光反射:
 - 反射镜(抛光的棒端面);
 - 激光光点在反射面的位置。
- e) 所有放大器的设置(如果可调), 例如:
 - 增益;
 - 滤波器的截止频率。
- f) 校准结果:
 - 冲击加速度幅值和冲击脉冲持续时间;
 - 冲击灵敏度值;
 - 测量的扩展不确定度, 如果包含因子 k 不等于 2, 给出 k 的值。

附录 A

(规范性附录)

A.1 计算给定加速度峰值、冲击脉冲持续时间、放大器增益设置和滤波器截止频率时的冲击灵敏度 S_{sh} 的扩展不确定度 $U_{rel}(S_{sh})$

应按照以下 GB/T 20485.1 中的公式,计算给定加速度峰值、冲击脉冲持续时间、放大器增益设置和滤波器截止频率时的冲击灵敏度测量的相对扩展不确定度 $U_{rel}(S_{sh})$:

式中,包含因子 $k=2$ 。

不确定度分量见表 A. 1。

表 A. 1

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	引入灵敏度不确定度的分量 $u_i(y)$
1	$u(u_{\text{peak}, V})$	加速度计输出电压峰值测量(波形记录仪;如:ADC 的分辨率)	$u_1(S_{sh})$
2	$u(u_{\text{peak}, F})$	电压滤波对加速度计输出电压峰值的影响(频率带宽的限制)	$u_2(S_{sh})$
3	$u(u_{\text{peak}, D})$	电压干扰对加速度计输出电压峰值的影响(如:交流声和噪声)	$u_3(S_{sh})$
4	$u(u_{\text{peak}, T})$	横向、摇摆和弯曲加速度对加速度计输出电压峰值的影响(横向灵敏度)	$u_4(S_{sh})$
5	$u(a_{\text{peak}, Q})$	干涉仪正交输出信号的干扰对加速度峰值的影响(如:偏移、电压幅值偏差、与 90°名义角度差的偏差)	$u_5(S_{sh})$
6	$u(a_{\text{peak}, F})$	干涉仪信号滤波对加速度峰值的影响(频率带宽的限制)	$u_6(S_{sh})$
7	$u(a_{\text{peak}, VD})$	电压干扰对加速度峰值的影响(如:光电测量链中的随机噪声)	$u_7(S_{sh})$
8	$u(a_{\text{peak}, MD})$	运动干扰对加速度峰值的影响(如:偏移;加速度计参考平面与干涉仪光点之间的相对运动)	$u_8(S_{sh})$
9	$u(a_{\text{peak}, PD})$	相位干扰对加速度峰值的影响(如:干涉仪信号的相位噪声)	$u_9(S_{sh})$
10	$u(a_{\text{peak}, RE})$	其他干涉技术对加速度峰值的影响(干涉仪功能)	$u_{10}(S_{sh})$
11	$u(S_{sh, RE})$	对冲击灵敏度测量的其他影响(如:在传感器或冲击机中的共振激励的影响;重复测量中的随机影响;算术平均值的实验标准偏差)	$u_{11}(S_{sh})$

A.2 计算加速度峰值和冲击脉冲持续时间整个范围的冲击灵敏度 $S_{sh,r}$ 的扩展不确定度 $U_e(S_{sh,r})$

按照式(A.1)计算的冲击灵敏度测量的扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(S_{\text{sh}})$, 只对校准的加速度峰值、冲击脉冲持续时间、放大器增益和滤波器截止频率的设置有效。在连续校准过程中的任何时间间隔里, 应按照以下 GB/T 20485.1 中的公式计算加速度峰值和冲击脉冲持续时间整个范围内的冲击灵敏度 $S_{\text{sh},i}$ 的相对扩展不确定度:

式中,包含因子 $k=2$.

不确定度分量见表 A. 2。

表 A.2

<i>i</i>	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	引入灵敏度 不确定度的分量 $u_i(y)$
1	$u(S_{sh})$	在参考峰值、冲击脉冲持续时间和放大器增益设置情况下,按照式(A.1)计算的冲击灵敏度的不确定度	$u_1(S_{sh,t})$
2	$u(e_{T,A})$	参考放大器跟踪特性(对不同放大器设置的增益和相移的偏差)	$u_2(S_{sh,t})$
3	$u(e_{L,I,A})$	与参考放大器恒定的幅值-频率特性和线性的相位-频率特性的偏差	$u_3(S_{sh,t})$
4	$u(e_{L,I,P})$	与参考加速度计恒定的幅值-频率特性和线性的相位-频率特性的偏差	$u_4(S_{sh,t})$
5	$u(e_{L,s,A})$	参考放大器幅值线性的偏差	$u_5(S_{sh,t})$
6	$u(e_{L,s,P})$	参考加速度计幅值线性的偏差	$u_6(S_{sh,t})$
7	$u(e_{l,A})$	参考放大器增益的不稳定性和源阻抗对增益和相移的影响	$u_7(S_{sh,t})$
8	$u(e_{l,P})$	加速度计灵敏度的不稳定性(幅值和相移)	$u_8(S_{sh,t})$
9	$u(e_{E,A})$	环境对参考放大器增益和相移的影响	$u_9(S_{sh,t})$
10	$u(e_{E,P})$	环境对参考加速度计灵敏度(幅值和相移)的影响	$u_{10}(S_{sh,t})$

附录 B
(资料性附录)
程序介绍

B.1 概述

按照 GB/T 20485.1, 对承受平行于规定轴正弦激励的加速度计, 其加速度复灵敏度 \underline{S}_a 定义为:

$$\underline{S}_a = \hat{S}_a e^{j(\varphi_u - \varphi_a)} \quad \dots \quad (B.1)$$

式中:

$$\hat{S}_a = \frac{a}{\hat{a}} \quad \dots \quad (B.2)$$

\hat{S}_a —— 加速度灵敏度的幅值;

a —— 加速度计正弦输出 u 的幅值(最好是加速度计/放大器套组的输出电压);

\hat{a} —— 正弦加速度 a 的幅值;

φ_u —— 输出的初相角;

φ_a —— 加速度的初相角;

$(\varphi_u - \varphi_a)$ —— 复灵敏度的相移 $\Delta\varphi$,

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_a \quad \dots \quad (B.3)$$

由于复灵敏度的幅值和相移取决于频率, 所以必须在任何一个所关心的频率下确定。

在 GB/T 20485.11—2006 中描述了由正弦激励进行加速度计绝对校准的方法。(复)灵敏度的定义和校准基于线性系统理论。应用这个理论时, 可以使用冲击激励的绝对校准作为一种替代方法, 来确定复灵敏度的幅值和相移。如果加速度计的幅值线性偏离了理想值, 冲击校准结果就可能偏离振动校准值。可以按照附录 C 进行加速度计输入和输出的傅里叶谱计算, 并在任何频率分量下可按照公式(B.2)和公式(B.3)分别得出复灵敏度的幅值和相移。在谱的某些频率点 f_n 下, 通过观察加速度峰值对复灵敏度幅值 S_n 和相移 $\Delta\varphi_n$ 的影响, 可以确定与加速度计(带或不带电荷放大器)理想幅值线性的偏差值。

根据测量范围(见第 1 章), 本部分对加速度某些参数(峰值、冲击脉冲持续时间和冲击脉冲形状)测量使用冲击激励, 用加速度计的输出峰值与输入峰值的比值来确定加速度计(带或不带电荷放大器)的冲击灵敏度。在这种情况下, 应用公式(B.2)时, 用峰值 u_{peak} 和 a_{peak} 代替 a 和 \hat{a} , 灵敏度用 S_{sh} 表示:

$$S_{sh} = \frac{u_{peak}}{a_{peak}} \quad \dots \quad (B.4)$$

在这种情况下, 灵敏度取决于冲击脉冲持续时间, 如果加速度计与理想的幅值线性发生偏离, 则灵敏度还取决于峰值。

当冲击机产生一个加速度 $a(t)$ 时, 加速度计输出信号满足关系式 $u(t)$ 。

第一个光电接收器的输出可以写为:

$$u_1(t) = a_1 \cos \varphi_{Mod}(t) = a_1 \cos [\varphi_0 + \varphi_M(t)] \quad \dots \quad (B.5)$$

式中, 调制相位 φ_{Mod}

$$\varphi_{Mod} = \varphi_0 + \varphi_M(t) \quad \dots \quad (B.6)$$

是光电接收器信号初相位角 φ_0 和调制项 $\varphi_M(t)$ 合成。而 $\varphi_M(t)$ 与位移 $s(t)$ 成比例:

$$\varphi_M = \frac{4\pi s(t)}{\lambda} \quad \dots \quad (B.7)$$

它是假设在位移 $s(t)$ 和正弦相位项 $\varphi_M(t)$ 之间没有时间延迟。下面说明位移是如何计算的, 这样

速度 v 和加速度 a 可以基于定义从位移 s 中得出：

另一个光电接收器正交输出可以描述为：

式中：

$$a_2 = a_1 \circ$$

在 $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$ 测量周期内，以恒定的采样速率对正交信号进行采样。在 $t_0 < t < t_0 + T_{\text{Meas}}$ 内采样得到的 $\{u_1(t_i)\}$ 和 $\{u_2(t_i)\}$ 测量值序列具有 $\Delta t = t_i - t_{i-1} = 1/f_s = \text{const}$ (常数) 的一个采样间隔，其中 f_s 为采样频率。对于两个正交信号，在测量过程中可使用下列公式连续计算它们的相位值 $\varphi_{\text{Mod}}(t)$ ：

其中 $n=0, 1, 2, \dots$

这些计算程序,尤其是具有连续的“相位展开”(见参考文献[10])的反正切函数的计算程序都是数字信号处理中的标准程序。

使用由公式(B.9)得到的 $\varphi_{\text{Mod}}(t_i)$ 值, 离散的位移值序列 $\{s_D(t_i)\}$ 可以通过下式计算:

如果 $\varphi_0 \neq 0$, 则 $\{s_D(t_i)\}$ 存在偏差。因为按照公式(B.8)求导数, 这个常数项不影响速度和加速度的测量结果。下角标 D 表示这些值受到高频噪音的干扰。这些干扰可通过离散时间的低通滤波器来抑制。

要获得复灵敏度的幅值和相移(频域形式)和冲击灵敏度(时域形式),需要进行 B. 2 和 B. 3 中叙述的运算。

B.2 离散时间的低通滤波方法

为实现低通滤波，可以根据输出值 $y(t_{i-1})$ 、 $y(t_{i-2})$ 、输入采样值 $x(t_i)$ 、 $x(t_{i-1})$ 、 $x(t_{i-2})$ ，使用一种任意时刻 t_i 输出值的递归计算算法：

$$y(t_i) = A_1 y(t_{i-1}) + A_2 y(t_{i-2}) + B_0 x(t_i) + B_1 x(t_{i-1}) + B_2 x(t_{i-2}) \dots \dots \dots \quad (B.12)$$

式中：

$$i=0, 1, \dots, N-1$$

A_1, A_2, B_0, B_1, B_2 是滤波器系数。

这个二次微分方程的频率响应函数由下式确定：

式中：

Ω ——标称的角频率, $\Omega = 2\pi f/f_s$ 。

为获得该滤波器通带和阻带时的单调频率响应, 使用由下式给出的巴特沃斯近似函数:

式中 Ω_c 为标称的截止频率。滤波器系数 A_1, A_2, B_0, B_1, B_2 均根据这个近似函数确定。当应用相关计算公式时，依据理想的截止频率 Ω_c 得到它们的值。

对输出信号的递归计算会造成非线性的相移结果。为满足低通滤波器无任何相移的技术要求,使用下式对输出信号进行反方向的重复计算。

$$y^*(t_{N-1-i}) = A_1 y^*(t_{N-2-i}) + A_2 y^*(t_{N-3-i}) + B_0 y(t_{N-1-i}) + B_1 y(t_{N-2-i}) + B_2 y(t_{N-3-i}) \quad \dots \dots (B.15)$$

武中

$$i=0, 1, \dots, N-1.$$

则合成的频率响应函数可以表示为：

这样，在信号 $y^*(t_i)$ 和 $x(t_i)$ 之间应用两次滤波运算之后，就不会出现相移。

B.3 微分的方法

多种方法可用于求导。如果高频干扰的影响能够得到有效抑制,可使用本部分推荐的一种最简单的方法。为此目的,在 B. 2 介绍了离散时间的低通滤波方法。在对由公式(B. 10)得到的位移值进行离散低通滤波之后,形成以 $\{s(t_i)\}$ 表示的“平滑”的位移值序列,根据下式可以进行一次微分计算:

下角标 D 表示微分获得的值受高频噪音的干扰。因此，对于这些速度值 $\{v_D(t_i)\}$ 必须使用滤波操作，以得到“平滑”值 $\{v(t_i)\}$ 。在这种情况下，可以再次使用微分方法的简单表达式以得到加速度：

B. 4 另一种微分法

有另外一种方法可以得到一个时间序列 $x(t_i)$ ($i=0, \dots, L-1$) (例如, 近似高斯速度波形的序
列 $\{v(t_i)\}$) 的一阶导数 $x'(t_i)$, 由下列信号处理步骤:

a) 通过应用离散傅里叶变换, 计算 $f_n = \frac{f_s}{T} n$ 时间序列的复谱 $X(j2\pi f)$:

式中：

$$0 \leq n \leq L-1$$

b) 复角频率 $j2\pi f_n$ 与复谱 $X(j2\pi f_n)$ 的乘积可得到一阶导数复谱:

式中：

$$0 \leq n \leq L-1$$

c) 对 $X'(j2\pi f)$ 应用离散傅里叶逆变换, 以得到时间序列的导数:

式中：

$$0 \leq i \leq l-1$$

后一种方法抑制了干扰信号对被抑制的时间序列微分的影响。它可用来计算低量级冲击近似高斯速度波形的导数。

附录 C
(资料性附录)
复灵敏度幅值和相移计算的替代方法

C.1 加速度计复灵敏度幅值和相移(如果满足 C.2 的条件),可以使用 7.3.3 步骤 e)的中间结果得到。在频率点 f_n 对应的加速度复频谱得到振幅和初始相位,并表示为:

$$a_n, \hat{\varphi}_{a,n}$$

其中:

$$a_n = a(f_n), \quad \varphi_{a,n} = \varphi_a(f_n) \quad \dots \quad (\text{C.1})$$

需要的计算步骤如下:

- a) 通过对滤波后的加速度计输出值 $\{u(t_i)\}$ 序列进行傅里叶变换,计算加速度计输出复频谱。在频率点 f_n 对应的加速度的振幅和相位表示为:

$$a_n, \hat{\varphi}_{u,n}$$

其中:

$$a_n = u(f_n), \quad \hat{\varphi}_{u,n} = \varphi_u(f_n) \quad \dots \quad (\text{C.2})$$

- b) 使用下式计算加速度计复灵敏度幅值 $\hat{S}_n = \hat{S}(f_n)$ 和相移 $\Delta\varphi_n = \Delta\varphi(f_n)$ 的序列值(这里 $n=0, 1, 2, \dots, N-1$):

$$S_n = a_n/a_n \quad \dots \quad (\text{C.3})$$

$$\Delta\varphi_n = \varphi_{u,n} - \varphi_{a,n} \quad \dots \quad (\text{C.4})$$

当报告校准结果时,应按照 GB/T 20485.1 计算并报告测量的扩展不确定度。

C.2 三路信号采样应同时开始,同时结束,并且至少对两路干涉仪信号应由同一时钟实现同步采样。

为消除滤波器相位响应的干扰影响,应对序列值(见附录 B)进行正向和逆向的滤波操作。这可应用于干涉仪测量信号和加速度计输出测量信号的序列值的滤波。为了实现四阶巴特沃斯滤波器,两次滤波操作应是二阶。

C.3 上述关系是基于附录 B 给出的离散傅里叶变换的描述和下述说明得出的。用采样得到的加速度计输出信号 $X_u(f_n)$ 的离散傅里叶系数序列值和采样得到的速度信号 $X_v(f_n)$ 的傅里叶系数序列值,来确定被校准的加速度计复灵敏度,公式为:

$$\underline{S}(f_n) = \frac{X_u(f_n)}{j2\pi f_n X_v(f_n)} \quad \dots \quad (\text{C.5})$$

式中:

$$0 < n \leq L-1.$$

为得到复灵敏度幅值和相移,将公式(C.5)重写为:

$$\underline{S}(f_n) = \frac{|X_u(f_n)| e^{j\varphi_u(f_n)}}{|2\pi f_n X_v(f_n)| e^{j[\varphi_v(f_n) + \frac{\pi}{2}]}} \quad \dots \quad (\text{C.6})$$

通过使用附录 B 开始介绍的符号,可以将复灵敏度幅值表示为:

$$\hat{S}_n = \frac{a_n}{a_n} = \frac{|X_u(f_n)|}{|2\pi f_n X_v(f_n)|} \quad \dots \quad (\text{C.7})$$

相移表示为:

$$\Delta\varphi_n = \varphi_{u,n} - \varphi_{a,n} = \varphi_u(f_n) - \varphi_v(f_n) - \frac{\pi}{2} \quad \dots \quad (\text{C.8})$$

注:上述关系式,尤其是附录 B 中的公式(B.5)和(B.9)均假设为理想条件,但实际上不可能满足理想条件。在实际条件下,光电接收器信号偏离它们的幅值期望值 a_1, a_2 以及标称相移 $\pi/2$,可能发生不同的偏移量 $u_{0,1}, u_{0,2}$ 。有关 4.6 中叙述的在允差范围内,来自非理想正交信号的影响可见参考文献[6]。

参 考 文 献

- [1] H.-J. von Martens, H.-J. Schlaak, A. Täubner. Interferometrische Kalibrierung von Translations- und Rotationsaufnehmern mit Sinus- und Stoßanregung. *Fortschritte der Akustik, DAGA 94*, part B, 1994:681-684.
- [2] C. M. Harris, Ch. E. Crede. 冲击和振动手册, 第 3 版, McGraw-Hill, 纽约, 多伦多, 伦敦, 1987.
- [3] D. J. Evans. NIST 250 种特定测试之一(NO:24040S)用机械冲击激励测试加速度计的灵敏度. *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 旧金山, 加利福尼亚, 1995.
- [4] H. Kolsky. 固体中的应力波. *Dover Publications*, New York, 1963:215.
- [5] R. D. Sill. 用压缩波法在 100.000 g 幅值进行加速度计的冲击校准. *Proceedings of the 29th International Instrumentation Symposium*, Albuquerque, New Mexico; *Instrument Society of America, Instrumentation in the Aerospace Industry*, 29, 1983:503-516.
- [6] A. Link, H.-J. von Martens, W. Wabinski. 加速度计冲击绝对校准的新方法. SPIE, Volume 3411, 1998:224-235.
- [7] W. Wabinski, H.-J. von Martens. 振动幅相测量干涉信号的时间间隔分析法. SPIE, Vol. 2868, 1996:166-177.
- [8] A. Link, J. Gerhardt, H.-J. von Martens. 纳米级加速度计的幅相校准. SPIE, Vol. 2868, 1996:37-48.
- [9] Glöckner, B., v. Martens, H.-J., Rogazewski, P., et al. Neue Verfahren zur Kalibrierung von Stoßmeßmitteln. In: *Metrologische Abhandlungen*, 8, No. 3, 1988:245-258.
- [10] J. M. Tribolet. 一种相位展开的新算法. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, ASSP-25, No. 2, April 1977:170-177.
- [11] 测量不确定导则, BIPM, IEC, IFFC, ISO, IMPAC, IMPAP, OIML, 1993.
- [12] H.-J. von Martens, P. Rogazewski. 振动量值单位在 GDR 中的复现和传递. *Bulletin OIML*, No. 108, Sept. 1987:26-37.
- [13] Weißenborn Ch.. Verbesserte Impulsformung bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern. *Technisches Messen*, 66, 1999:277-285.
- [14] ISO 5347-4:1993, 振动与冲击传感器校准方法 第 4 部分: 冲击比较校准(将转换为 ISO 16063-22)
- [15] ISO 16063-22:2005, 振动与冲击传感器校准方法 第 22 部分: 冲击比较法校准

中华人民共和国

国家 标 准

振动与冲击传感器校准方法

第 13 部分：激光干涉法冲击绝对校准

GB/T 20485.13—2007/ISO 16063-13:2001

*

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 36 千字

2007 年 12 月第一版 2007 年 12 月第一次印刷

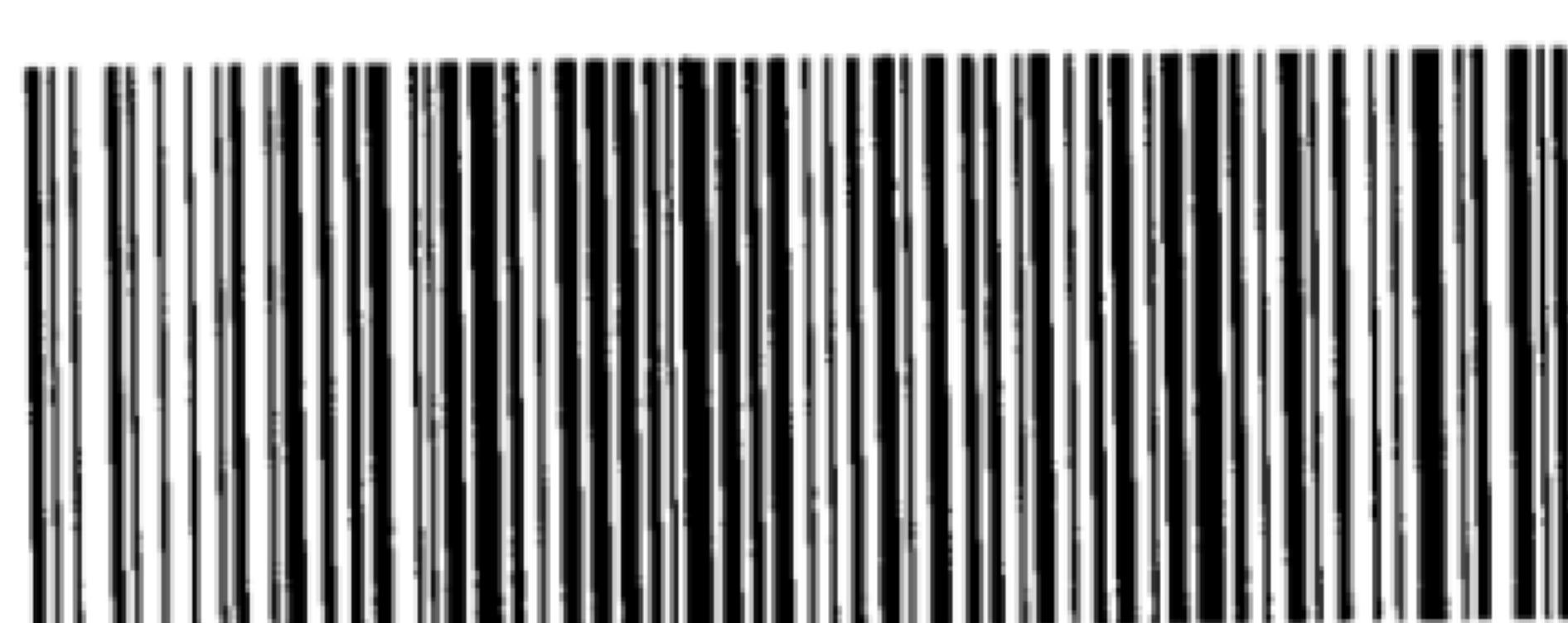
*

书号：155066·1-30157 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 20485.13-2007