

# 加速度计的校准

李德春, 孟宪澍, 郑屹, 崔巍

(沈阳飞机设计研究所, 沈阳, 110035)

**摘 要** 介绍了振动传感器——加速度计的校准方法及其误差分析, 着重介绍了加速度计校准的最新方法, 即随机校准, 提出了改进的随机校准方法, 并作了相应的误差分析。对各种校准方法如正弦比较法、激光干涉仪法、随机校准法进行了比较, 作了试验研究。

**关键词** 加速度计; 随机校准; 灵敏度; 标准传感器

近年来, 随着航空、航天等各种工程技术的发展, 越来越多的场合需要取得精确的动态数据, 其中振动参数的测量占有重要的地位, 而传感器是获得准确、真实数据的第一关。对传感器进行精确地校准是保证测试精度的根本要求。目前多数情况下采用正弦法校准, 但从发动机测试条件上看, 振动信号往往是随机信号, 并同时有多种因素影响传感器的特性。因此, 能够模拟现场条件对传感器进行校准, 才是保证传感器准确度的最佳方案。

在航空与航天飞行器的设计中, 机械和结构设计的发展引出很多振动问题, 使冲击和振动的精确测量显得更加重要。由于压电加速度计的高灵敏度质量比和低的环境灵敏度, 使其应用广泛。同时, 它的极宽的频率和动态范围满足现代先进测量和分析设备性能的要求。因此许多力量致于振动传感器的优化设计并规定了它们的校准方法。

校准通常指的是检定所有影响传感器(或加速度计)测量精度性能的过程。即使性能很少受或者不受时间和外部环境的影响, 为使仪器良好工作以及通常的法制约束, 要求压电加速度计用户确认制造厂的校准和定期的校准。

压电加速度计的校准通常理解成是对规定频率的轴向灵敏度的复校及频率响应测量, 以检查传感器的全面情况。

本文介绍压电加速度计灵敏度校准和频率响应测量使用方法的动向。将讨论激光干涉仪绝对校准法和两种比较校准法, 一种是用正弦激励, 另一种是用随机激励, 并针对校准精度对这

些方法作一比较。

## 1 校准方法

加速度计(振动传感器)轴向灵敏度校准方法有绝对校准法和比较法。

绝对校准法是指用测量基本物理量的基本单位和导出单位的方法确定加速度计灵敏度。绝对校准法用于标准加速度计的校准。绝对法中有激光干涉法和互易法。今天, 最方便的绝对校准法是用激光干涉法。因此, 由于激光的出现, 使用互易法校准少了, 因为互易法非常复杂, 为了获得好的测量结果, 它要求非常细心地测量。激光干涉法主要用于校准标准加速度计, 精度较高。

比较法校准是使被校传感器灵敏度与已知灵敏度的标准传感器作比较。与激光干涉仪绝对法相比, 比较法的优点是操作简便和要求复杂贵重的仪器量少, 因此比较法是普通用户用的校准方法, 用于工作用加速度计的校准。

校准精度取决于所用的方法。因此比较法要使用经过绝对法校准的加速度计, 所以在任何情况下比较法的校准精度低于所使用标准传感器的校准精度。

### 2.1 校准不确定度

为了评定各种校准方法的精度, 校准不确定度处理必须用统一的方法。本文采用英国检定局(BCS)指导刊物 B3003 中所述方法。

它对测量不确定度值(包括置信限)赋予“ $\pm$ ”号。这样, 测量的真值将位于 $\pm$ 极限值范围内。

为了实用方便, 校准不确定度分成随机不确定度和系统不确定度。

收文日期: 2001-03-28

作者简介: 李德春, 男, 1963 年出生, 高级工程师, 主要从事热工、力学等专业计量、测试工作

随机不确定度( $U_r$ )在有限次测量中,标准偏差估计值 $\sigma_{估计}$ 为

$$\sigma_{估计}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1)$$

式中  $x_i$ ——每次测量值;

$\bar{x}$ ——测量平均值;

$n$ ——测量次数。

对于给定置信度 CL, 平均值(包括总体平均值)的随机不确定度限( $\pm U_r$ )可由 $\sigma_{估计}$ 算得

$$U_r = t \left[ \frac{\sigma_{估计}}{\sqrt{n}} \right] \quad (2)$$

式中, $t$ 为学生氏分布系数, $t$ 与测量次数和置信度有关。

系统不确定度( $U_s$ )是由测量过程中各常量值、但又不确切知道的各分量组成。

系统不确定度来自于校准因素、测量仪器、操作方法和测试项目。

根据分布特性知识,可假定为均匀分布,并在 $\pm a_i$ 极限范围内。

当综合各种概率密度分布时,分布将趋向于高斯型。取极限值的一半 $\pm a_i$ , $x$ (包括总体平均值)的系统不确定度( $\pm U_s$ )可按式计算

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (3)$$

式中, $K$ 为对应一定置信度的正态分布系统。总不确定度为

$$U_t = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (4)$$

和校准结果的报告为

$$\bar{x} \pm U_t \quad (5)$$

包括置信水平。

## 2.2 用激光干涉仪校准(绝对法)

典型的校准装置框图示于图1。所用原理在各种文献已有介绍并被纳入 ISO5347。它是基于极端稳定和已知的激光波长 $\lambda$ 。

有3种不同方法得到迈克尔逊干涉仪光电二极管的读数信息,最简单方法是用于小于1000 Hz的频率。它是基于计数每个振动周期的强度变化数 $R_f$ (也称“条纹”计数)。

它可方便地表示出振动的位移幅值

$$X_0 = R_f \frac{\lambda}{8} \quad (6)$$

对于角频率为 $\omega$ 的正弦振动,其位移表示式

$$X = X_0 \sin \omega t \quad (7)$$

加速度为

$$A = -\omega^2 X_0 \sin \omega t \quad (8)$$

加速度幅值

$$A_0 = \omega^2 X_0 = \omega^2 R_f \cdot \frac{\lambda}{8} \quad (9)$$

从上式可以看出,我们必须考虑条纹计数和振动频率的不确定度。从该装置可以看到,电压表和电荷放大器的不确定度必须考虑,最后我们知道,在振动周期中传感器的倾斜和横向振动,正弦运动的畸变和温度也产生误差,都要计算在内。

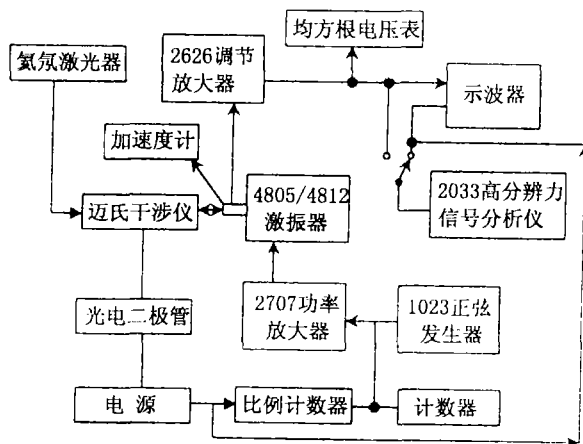


图1 激光校准框图

表1给出 B&K8305 型 160 Hz 标准传感器测量的估计误差。

表1 B&K8305 型标准传感器 (160 Hz)

激光校准不确定度

激光校准不确定度		
$e_1$	电压表 + 电荷放大器	$\pm 0.08\%$
$e_2$	计数器 $\times 2$	$\pm 0.002\%$
$e_3$	条纹计数( $R_f$ )	$\pm 0.02\%$
$e_4$	畸变	$\pm 0.1\%$
$e_5$	倾斜	$\pm 0.2\%$
$e_6$	温度	$\pm 0.1\%$
$e_7$	横向振动(最大5%)	$\pm 0.1\%$
$\sigma$	估计标准偏差(测量3次)	$\pm 0.02\%$

置信度为99%的随机误差,取 $n=3$ , $t=9.92$ 和 $\sigma$ 取自表1中的最后一行,由式(2)得

$$U_r = 0.12\% \quad (10)$$

系统误差可用表1中的值和 $K=2.58$ (置信度为99%),由式(3)得

$$U_s = \frac{2.58}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2 + e_7^2} \quad (11)$$

总的不确定度为

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} = 0.44\% \quad (12)$$

国际循环比对校准表明, 根据这些原则计算的不确定度与观察偏差能很好一致, 并说明比较保守的方法, 如直接把各项不确定度加起来并不是更合理的。

### 2.3 比较法校准(Back To Back 背靠背)

比较法主要用于工作用加速度计的检定, 根据激励源分为正弦比较法和随机比较法。

1) 正弦比较法校准(简单的背靠背比较校准)

正弦比较校准的方框图如图 2 所示。两个加速度计背靠背安装在振动台上, 一个标准加速度计, 一个被校工作用加速度计。

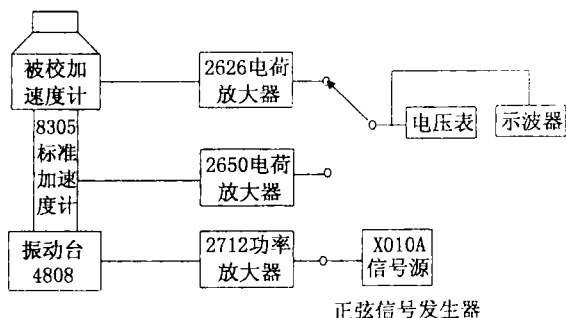


图2 正弦比较法校准方框图

正弦比较法校准示意图如图 3 所示。

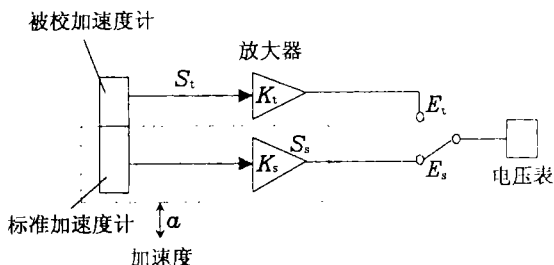


图3 正弦比较法校准示意图

电荷灵敏度的校准:

第一种方法: 按图 2 连接线路。

把连接标准加速度计的电荷放大器的灵敏度调到标准加速度计的数值。如标准加速度计为 8305, 其灵敏度为  $1.214 \text{ pc/g}$ , 与之连接的电荷放大器为 2650, 把 2650 的电荷灵敏度数值调为  $1.214 \text{ pc/g}$ , 衰减档(增益系数)调到  $100 \text{ mV/unit}$ 。被测加速度计的电荷放大器 2626 的衰减档(增益系数)也调到  $100 \text{ mV/unit}$ , 选择一定的加速度值 ( $1 \sim 10 \text{ g}$  之间), 调节被校加速度计的电荷放大器的电荷灵敏度旋钮, 使标准电荷放大器 2650 的输出和被校电荷放大器 2626 的输出相等, 此时被校电荷放大器 2626 的灵敏度数值就是被校加速度计的灵敏度。

第二种方法: 参看图 3 正弦比较法校准示意图。

设:  $S_t$ ——被校加速度计的灵敏度 ( $\text{mV/g}$ );

$S_s$ ——标准加速度计的灵敏度 ( $\text{mV/g}$ );

$R$ ——被校加速度计输出(电荷放大器调到归一化)与标准加速度计(电荷放大器调到归一化)输出之比;

$R_o$ ——被校加速度计输出(电荷放大器调到归一化)与标准加速度计(电荷放大器的灵敏度旋钮调到标准加速度计的灵敏度数值)输出之比;

$E_t$ ——被校加速度计电荷放大器(归一化)的输出;

$E_s$ ——标准加速度计电荷放大器(归一化)的输出;

$E_{so}$ ——标准加速度计电荷放大器(电荷放大器的灵敏度旋钮调到标准加速度计的灵敏度数值)的输出;

$K_s$ ——标准加速度计电荷放大器的增益;

$K_t$ ——被校加速度计电荷放大器的增益。

A) 被校电荷放大器和标准电荷放大器均调到归一化档, 被校加速度计的灵敏度为

$$S_t = S_s \frac{K_s}{K_t} \quad (13)$$

$$R = \frac{E_t}{E_s} \quad (14)$$

B) 被校电荷放大器调到归一化档, 标准电荷放大器的灵敏度旋钮调到标准加速度计的灵敏度数值, 被校加速度计的灵敏度为

$$S_t = R_o \frac{K_s}{K_t} \quad (15)$$

$$R_o = \frac{E_t}{E_{so}} \quad (16)$$

在输入加速度不变的情况下

$$E_{so} = \frac{E_s}{S_s} \quad (17)$$

$$R_o = S_s R \quad (18)$$

例: 输入为  $5 \text{ g}$  时,

标准加速度计, 型号 8305;

电荷灵敏度  $S_s = 1.214 \text{ pc/g}$ ;

电荷放大器 2650 衰减档  $K_s = 100 \text{ mV/unit}$ ;

电荷放大器 2650 的灵敏度旋钮调到 1.214;

标准加速度计与电荷放大器 2650 输出:  $E_{so} = 0.35040 \text{ mV}$ ;

被校加速度计, 型号 YJ2-1 编号 528;

电荷放大器 2626 衰减档  $K_i = 10 \text{ mV/unit}$ ;

电荷放大器 2626 的灵敏度旋钮调到归一化 1-0-0;

被校加速度计与电荷放大器 2626 输出:  $E_i = 0.73336 \text{ mV}$ 。

根据式(15),被校加速度计的电荷灵敏度为

$$S_i = R_o \frac{K_s}{K_i} = \frac{E_i}{E_{80}} \cdot \frac{K_s}{K_i}$$

$$= \frac{0.73336}{0.35040} \times \frac{100}{10} = 20.928 \text{ pc/g}$$

## 2) 随机比较法校准(用 FFT 分析法作背靠背比较法校准)

利用随机振动校准传感器的方法是一个重要的发展方向。目前振动加速度计绝大多数情况下都在正弦条件下校准,但被校加速度计常常应用在随机振动环境中,两种环境对传感器的影响存在很大差异,因而正弦校准法受到限制。正弦振动校准受到下列因素的影响:机械运动失真,谐波失真,噪声,电缆的运动等等。正弦标定方法不能在任意频率范围内做连续标定,并且不能给出相位信息。由于测量设备和分析方法的限制,需要很长的检定时间。随机校准方法是用随机信号做激励源采用比较法进行校准,用参考加速度计和被校加速度计之间的传递函数进行动态校准,用动态信号分析仪和计算机来测量、分析和处理数据。该校准方法可在整个工作频率范围内得到完整的幅度和相位校准数据,满足在随机振动测量中对加速度计技术参数要求。

### (a) 简单的 FFT 校准

FFT 校准装置原理框图如图 4 所示。B&K2032/34 型双通道信号分析仪实现 800 个频率的比较和提供一个覆盖所有这些频率的随机激励信号,图 5 表示简单 FFT 校准的工作原理。

图中:  $S_u(f)$  为未知加速度计的电荷灵敏度;

$S_r(f)$  为参考加速度计的电荷灵敏度;

$H(f)$  为频率响应函数值(分析仪读出);

$H_A(f)$  为 A 通道信号调节放大器的频响函数;

$H_B(f)$  为 B 通道信号调节放大器的频响函数。

如果以最简单的直接使用方式使用该装置,假定分析仪动态范围合适,我们能够利用表 2 给出在 160 Hz 时用标准加速度计校准另一加速度计的总

的不确定度。

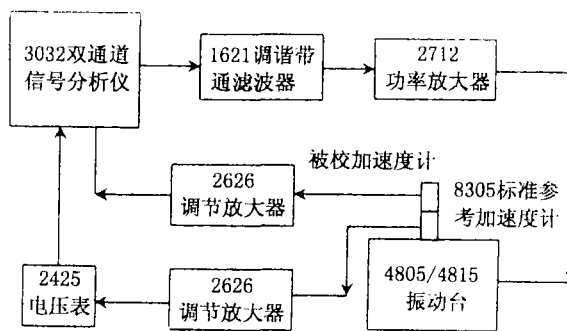


图4 FFT校准装置原理框图

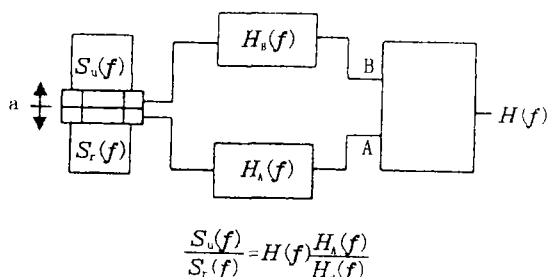


图5 简单 FFT 校准的工作原理

表2 简单 FFT 校准的不确定度  
(两个 8305 型 160 Hz 标准传感器)

$e_1$	2032 型双通道信号分析仪的最大误差	$\pm 3.1\%$
$e_2$	2626 型电荷放大器(通道 A)的最大误差	$\pm 0.5\%$
$e_3$	2626 型电荷放大器(通道 B)的最大误差	$\pm 0.5\%$
$e_4$	当温度变化范围为 $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 时, 8305 型标准加速度计的灵敏度误差	$\pm 1.2\%$
$e_5$	8305 型标准加速度计由于横向振动(最大 10%)的误差	$\pm 0.2\%$
$e_6$	由于横向振动(最大 10%)产生的未知加速度计的输出误差, 最大横向灵敏度 2%	$\pm 0.2\%$
$e_7$	由于测量室的温度和未知加速度计温度之差( $\pm 3^\circ\text{C}$ )引起的未知加速度计输出误差	$\pm 0.1\%$
$e_8$	8305 的校准不确定度(置信度 99%)	$\pm 0.6\%$
$\sigma$	由于 10 次连续测量计算所得的估计标准偏差	$\pm 0.1\%$

由(3)式可得系统不确定度

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2 + e_7^2}$$

$$= 4.8\% \text{ (置信度 99\%)} \quad (19)$$

一次测量( $n=1$ )的随机不确定度

$$U_r = 0.33\% \text{ (置信度 99\%)} \quad (20)$$

$n = 1$  时比较校准测量的不确定度

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} = 4.81\% \text{ (置信度 99\%)} \quad (21)$$

校准的总不确定度

$$U_t = \sqrt{U_c^2 + e_3^2} = 4.85\% \text{ (置信度 99\%)} \quad (22)$$

虽然 5% 的不确定度满足了大多数应用的要求, 仍希望提高精度。有两种提高精度的自校正方法。

(b) 改进的 FFT 校准——切换法

一旦按上述方法作了一次测量, 互换传感器电缆接头用同样装置作第二次测量时, 将允许抵消大部分系统不确定度。

由两个频率响应  $H_{ur}(f)$  和  $H_{vu}(f)$  可得

$$\frac{S_u(f)}{S_r(f)} = H_{ur}(f) \frac{H_A(f)}{H_B(f)} \quad (23)$$

和

$$\frac{S_r(f)}{S_u(f)} = H_{vr}(f) \frac{H_A(f)}{H_B(f)} \quad (24)$$

或

$$\frac{S_u(f)}{S_r(f)} = \sqrt{\frac{H_{ur}(f)}{H_{vu}(f)}} \text{ 和 } S_u(f) = S_r(f) \cdot \sqrt{\frac{H_{ur}(f)}{H_{vu}(f)}} \quad (25)$$

在这种情况下下的不确定度见表 3。假定在两次测量之间横向运动和温度没有变化, 求得系统不确定度。

表 3 切换法 FFT 校准的不确定度  
(两个 8305 型 160 Hz 标准传感器)

$e_1$	2032 型双通道信号分析仪 (振幅分辨率) 的最大误差	$\pm 0.1\%$
$e_2$	由于温度在 $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 范围变化引起的 8305 型标准加速度计的灵敏度误差	$\pm 0.1\%$
$e_3$	由于横向振动(最大 10%)引起的 8305 型 标准加速度计的误差	$\pm 0.2\%$
$e_4$	由于横向振动(最大 10%)引起的未知加 速度计输出误差	$\pm 0.2\%$
$e_5$	由于测量室温和未知加速度计温度间的 差异( $\pm 3^\circ\text{C}$ )引起未知加速度计输出误差	$\pm 0.1\%$
$\sigma$	由于 10 次连续测量得到的估计标准偏差	$\pm 0.1\%$

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2} \cdot e_1 \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \cdot e_2 \right)^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 \right]^{1/2} \\ = \frac{2.58}{\sqrt{3}} \cdot 0.234\% = 0.48\% \quad (26)$$

式中的两个  $\frac{1}{2}e$  来自式(23) 和(24) 中的频响函数

$H$  和在均方根符号下取  $\frac{1}{2}$  是根据方差传播定律, 即

用展开式

$$Y(x_1, x_2, \dots, x_n) \approx Y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \left[ \frac{\delta Y}{\delta x_1} \Delta x_1 + \frac{\delta Y}{\delta x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\delta Y}{\delta x_n} \Delta x_n \right] \quad (27)$$

由平均值  $\bar{x}$  得到表达式

$$\sigma_R^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta Y}{\delta x_i} \right)^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (28)$$

式中  $\sigma_i^2$  为变量的方差。

类似地, 可得随机不确定度

$$U_r = \frac{3.25}{\sqrt{1}} \sqrt{\left( \frac{1}{2} \sigma \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \sigma \right)^2} = 0.23\% \quad (29)$$

(置信度 99%)

由此比较不确定度变成

$$U_c = \sqrt{0.48^2 + 0.23^2} = 0.53\% \quad (30)$$

和总不确定度

$$U_t = \sqrt{0.53^2 + 0.6^2} = 0.8\% \quad (31)$$

(置信度 99%)

(c) 改善的 FFT 校准——替换法

本方法也是基于两次测量, 但是在这种情况下, 一个传感器固定于激振器, 而一个标准和一个未知传感器与此比较, 如图 6 所示。可以得到

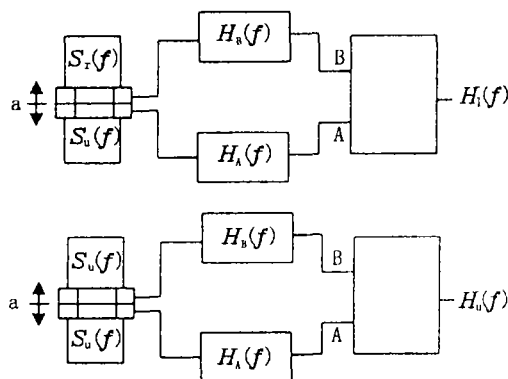


图 6 用替换法 FFT 校准的工作原理

$$\frac{S_u(f)}{S_r(f)} \cdot \frac{S_r(f)}{S_r(f)} = \frac{S_u(f)}{S_r(f)} = \frac{H_u(f)}{H_r(f)} \text{ 或} \\ S_u(f) = S_r(f) \frac{H_u(f)}{H_r(f)} \quad (32)$$

式中  $S_u(f)$ ——未知加速度计的电荷灵敏度;

$S_r(f)$ ——基准加速度计的电荷灵敏度;

$S_x(f)$ ——测量用标准加速度计的电荷灵敏度;

$H_u(f)$ ——未知加速度计相对标准加速度计的频响函数;

$H_r(f)$ ——基准加速度计相对测量标准加速度计的频响函数。

不确定度数据见表4。

表4 替换法FFT校准的不确定度  
(两个8305型160 Hz标准传感器)

$e_1$	2032型双通道信号分析仪(振幅分辨率)的最大误差	$\pm 0.1\%$
$e_2$	由于温度在 $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 范围变化产生的8305型标准加速度计的灵敏度误差	$\pm 0.1\%$
$e_3$	由于横向振动(最大10%)引起的8305型标准加速度计的误差	$\pm 0.2\%$
$e_4$	由于测量室温和未知加速度计温度间的差( $\pm 3^\circ\text{C}$ )引起未知加速度计输出误差	$\pm 0.1\%$
$e_5$	由于横向振动(最大10%)引起的未知加速度计输出误差	$\pm 0.2\%$
$e_6$	由于标准传感器横向灵敏度和横向振动变化(最大5%)引起的误差	$\pm 0.1\%$
$\sigma$	频响函数连续10次测量所得的估计标准误差	$\pm 0.1\%$

下式是按上述同样方法得到

$$U_s = \frac{K}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2 + e_7^2}$$

$$= \frac{2.58}{\sqrt{3}} \cdot 0.36\% = 0.54\% \text{ (置信度99\%)} \quad (33)$$

$$U_r = \frac{3.25}{\sqrt{1}} \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2} = 0.46\% \text{ (置信度99\%)} \quad (34)$$

$$U_c = \sqrt{0.54^2 + 0.46^2} = 0.71\% \text{ (置信度99\%)} \quad (35)$$

$$U_t = \sqrt{0.71^2 + 0.6^2} = 0.93\% \text{ (置信度99\%)} \quad (36)$$

可以指出自校正方法加上现代信号分析仪能够提高比较法测量的精度, 假如标准传感器校准是在较宽频率范围和使用较好的系统, 包括激振器和夹具, 用替代法在频率范围从5 Hz至5 kHz内精确和非常快地校准。

### 3 实现设备

#### 3.1 技术关键

1) 在随机振动条件下测量幅值和相位传递函数时如何提高信噪比, 排除干扰因素, 提高测量精度;

2) 在随机校准条件下, 如何对主要技术指标进行误差分析, 给出合理的校准不确定度;

3) 在随机校准条件下, 在高频段即5 kHz~10 kHz, 如何保证校准精度;

4) 在参考加速度计和被校加速度计灵敏度

相差较大时如何准确地测量。

#### 3.2 购置成品(成套系统)

丹麦B&K公司9610型振动传感器校准系统是一个易于操作、基于PC机的系统, 在一些初始人工设定后, 可进行各种各样的加速度计和速度传感器的自动校准。采用替代法进行背靠背校准。

用途:

①加速度计和速度传感器快速和精确的幅值与相位校准;

②加速度计从5 Hz到10 kHz的电荷和电压校准;

③速度传感器从5 Hz到2 kHz的电压校准;

④加速度计从0.002至500 pc/ms<sup>-2</sup> (0.02~5 000 pc/g)的电荷灵敏度校准;

⑤加速度计(有无内装电路均可)从0.1~1 000 mV/ms<sup>-2</sup> (1~10 000 mV/g)的电压灵敏度校准;

⑥速度传感器从0.4至99 mV/m·ms<sup>-1</sup> (10~2 500 mV/in/s)的电压灵敏度校准。

特点:

①典型的校准精度5~10 Hz:1.3%;10 Hz~4 kHz:1.2%;4~7 kHz:1.8%;7~10 kHz:2.6%;

②基于个人计算机的软件控制运行及完整的数据库;

③校准结果曲线图中的频率和幅值可用线性或对数刻度表示;

④可选择国际或英制单位(g, in, in/s);

⑤典型的校准时间3~10 min;

主要系统配置:

2035型:	信号分析仪单元
7649型:	双通道分析软件
3019型(2个):	25 kHz输入模件
3156型:	25 kHz谱展宽处理器
3106型:	信号发生器和采样模件
5923型:	振动传感器多路转换器
WB0693(2个):	差分电荷放大器
5936型:	精密衰减器
9623型:	两个匹配的3506型校准配套以及由丹麦国家声学基准实验室(DPLA)给出的激光校准证书
2712型:	功率放大器
4808型/	振动激励器/
4809型:	振动激励器

系统说明:

9610 型振动传感器校准系统由必凯公司 (B&K) 校准工程师安装。为了保证有高的校准精度, 需特别注意系统和标准检验。系统检验包括一系列自动测量来检查系统是否预热和测量结果是否稳定。

8305 型标准参考加速度计和 3506 型校准配套用来做电荷和电压标准, 标准检验保证了它们在允差限以内, 以使校准测量有效。在进行有效的校准之前, 校准系统必须通过检验测试。

软件:

校准软件是一个易于使用的程序, 它使人工操作减少至最低限度, 可进行传感器的自动校准, 且操作简单。标准软件包中有一个全面的数据库。所有与您的振动传感器有关的数据都可从中得到。当选择一个特定的振动传感器进行校准时, 基于数据库, 软件便自动地为校准测量设置额定灵敏度、频率范围和允差限。它也可选择加速度计的电荷、电压及速度传感器的校准。然后提示您选择正确的校准标准以及在适调放大器上设置正确的控制值。

#### 4 随机校准试验研究

利用随机振动来标定振动传感器是近年的一种新技术。为了检验试验结果的准确性和可靠性, 需要针对不同类型的传感器做大量的试验, 并且需要检查它们的坚固性。在试验以前, 需要对标定系统中用到的仪器做校验。动态信号分析仪的校准应严格按照 JJG834—93 校准规程来进行, 随机振动控制器按照 JJG529—88, 校准振动台按照 JJG298—82 等。由于加速度计的电荷和电压灵敏度标定是从 5 Hz 到 10 kHz, 对于不同频段范围内的理论校准误差列于表 5 中, 实际校准误差示于表 6 中。相位校准误差不大于 3°。

表 5 理论校准误差

频率	开关法	替代法
5 ~ 2 kHz	0.71%	0.88%
2 ~ 5 kHz	0.97%	1.11%
5 ~ 7 kHz	1.16%	1.28%
7 ~ 10 kHz	1.64%	1.73%

表 6 实际校准误差

频率 5 ~ 10 Hz	10 Hz ~ 2 kHz	2 ~ 5 kHz	5 ~ 7 kHz	7 ~ 10 kHz
误差 1.3%	1.2%	1.5%	1.8%	3%

##### 4.1 与激光干涉仪校准的比较

用来进行比较的两个标准加速度计的型号 -

序列号分别为 8305—452060 和 8305—452004。校准结果如表 7 所示。

表 7 校准结果

频率 (Hz)	20	80	160	1000	2000
激光校准 (pc/g)	1.151	1.155	1.155	1.150	1.164
随机校准 (pc/g)	1.143	1.155	1.157	1.160	1.155
误差 (%)	0.7	0.0	0.2	0.9	0.8
频率 (Hz)	20	80	160	1000	2000
激光校准 (pc/g)	1.208	1.209	1.210	1.214	1.215
随机校准 (pc/g)	1.212	1.213	1.214	1.228	1.225
误差 (%)	0.30	0.30	0.30	1.15	0.8

##### 4.2 与简单背靠背比较校准法的比较

随机和正弦比较校准法的校准结果如表 8 所示, 型号 - 序列号为 4366—778271。

表 8 校准结果

频率 (Hz)	5	8	10	20	30	40	60
随机校准 (pc/g)	40.47	41.03	42.00	42.32	42.72	42.54	42.43
正弦校准 (pc/g)	40.44	41.68	42.57	42.69	42.93	42.67	42.55
频率 (Hz)	80	120	160	200	400	600	800
随机校准 (pc/g)	42.26	41.97	41.96	41.82	41.51	41.14	41.03
正弦校准 (pc/g)	42.37	42.23	42.13	42.04	41.71	41.57	41.37
频率 (Hz)	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	8 000
随机校准 (pc/g)	40.92	40.82	40.91	41.22	41.55	43.21	45.20
正弦校准 (pc/g)	41.39	40.90	40.86	41.64	42.06	43.50	45.38

##### 4.3 使用 FFT 分析法的背靠背比较校准的相位校准

校准结果列于表 9。

表 9 校准结果

频率 (Hz)	20	40	60	80	100	120	160
相位 Lag D	-0.3	-0.1	0.0	-0.1	-0.3	-0.1	-0.2
频率 (Hz)	200	400	600	800	2 000	4 000	6 000
相位 Lag D	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2

得到结论

1) 振动传感器的随机校准方法得到的校准结果是准确和可信的;

2) 在校准中, 使用了闭环控制, 根据不同的频谱很容易地控制振动, 可以针对不同的频段研究传感器的频率响应;

3) 比较这两种校准方式, 开关式校准比替代法标定的校准结果更准确, 但是受被校准传感器的形状和质量限制;

4) 使用闭环控制可以扩展校准振动台的工作频带, 可以使用一个振动台完成传感器的标定

工作。

## 5 结束语

振动测试传感器进行随机校准, 不仅能提高校准精度, 而且能够确定某些非振动因素, 如接地回路、安装块等对传感器特性的影响。计算机技术和数字信号处理技术的迅速发展使振动传感器的随机校准获得了成功。与目前正弦校准方法相比, 它具有能较好地模拟实际环境, 在各个频率点同时校准等优点, 是一种先进、快速、准确的校准方法。在随机校准中运用随机信号激励和双通道 FFT 分析, 可以消除振动台的结构振动、失真和干扰对校准的影响, 能够提高校准精度。在加速度频响特性校准中与正弦激励法相比, 随机激励法不仅精度高, 而且还能获得有关加速度的更多信息。表 11 为两种方法所获得的信息比较。

表 11 两种方法可获得的信息比较

检定项目	方 法	
	正 弦	随 机
灵敏度	可 以	可 以
线性度	不可以	可 以
相 位	不可以	可 以

在校准方面人们总是强调校准的条件尽量达到理想化程度。就振动计量来说, 目前的正弦校准要求振动台面和信号失真要小, 振动台的隔离

条件要好, 抗干扰能力要强, 而实际都不可能达到理想的程度。而采用随机校准后, 对这些条件几乎没有要求, 并且能够提高校准精度。这就是说, 随机校准对校准条件要求不高, 而在信号分析及数据处理方面下工夫。这种做法, 将会改变人们对振动计量强调校准条件的习惯思维。另外, 随机校准采用随机信号激励, 达到了校准与现场条件的统一, 能够真实地反映加速度计的特性, 并把侧重点放在信号分析和数据处理方面, 这恰恰为在线计量和测试打下基础, 同时对其他量的计量有一定的借鉴作用。

随机校准采用现代信号分析技术, 大大完善了振动传感器的校准。将信号分析中的功率谱、传递函数、相关函数、概率密度函数等运用在校准方面, 使人们对校准的认识产生一个从个体到系统、片面到全面的飞跃。振动测量技术发展很快, 特别是计算机和 FFT 的普及和应用, 使振动测量技术发生了革命性的变化。随机校准方法顺应了测试技术发展的潮流, 更好地满足了工程实际的需要, 提高了传感器的标定效率, 采用该方法建立随机振动自动校准装置有十分重要的意义。

## 参考文献

- [1] R. R. 布歇. 冲击与振动传感器校准. 北京: 计量出版社. 1984
- [2] 特本·李斯特. 加速度计校准的动向. B&K 技术评论. 1987

## CALIBRATION METHOD FOR ACCELEROMETER

Li Dechun, Meng Xianshu, Zheng Yi, Cui Wei

(Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

**Abstract** This paper presents principally the new calibration method i. e. random calibration method and error analysis for vibration transducer——accelerometer, the improved random calibration method is proposed and the corresponding error analysis are performed. The various calibration methods such as sine comparison calibration method, laser interferometer calibration method, random calibration method etc. are compared and the experimental researches are achieved.

**Key words** accelerometer; random calibration; sensitivity; standard transducer