



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 33929—2017

---

## MEMS 高 $g$ 值加速度传感器性能试验 方法

Test methods of the performance for MEMS high  $g$  accelerometer

2017-07-12 发布

2018-02-01 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

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国微机电技术标准化技术委员会(SAC/TC 336)提出并归口。

本标准起草单位:中北大学、中机生产力促进中心。

本标准主要起草人:石云波、程红兵、唐军、李海斌、马宗敏、朱悦。



# MEMS 高 $g$ 值加速度传感器性能试验 方法

## 1 范围

本标准规定了 MEMS 高  $g$  值加速度传感器的电气性能和基本性能的术语和定义、试验条件、试验的一般规定、试验项目及方法。

本标准适用于量程在  $1 \times 10^4 g \sim 2 \times 10^5 g$  范围的 MEMS 高  $g$  值加速度传感器(以下简称加速度传感器)性能试验。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注明日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2421.1 电工电子产品环境试验 概述和指南

GB/T 7665 传感器通用术语

GB/T 26111 微机电系统(MEMS)技术 术语

JJF 1156 振动 冲击 转速计量术语及定义

## 3 术语和定义

GB/T 7665、GB/T 26111 和 JJF 1156 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**霍普金森杆 Hopkinson rod**

采用弹性波在细长杆中传播而产生冲击运动的冲击装置。

## 4 试验条件

### 4.1 环境条件

#### 4.1.1 标准大气条件

除非详细规范另有规定,所有试验应在 GB/T 2421.1 所规定的试验用标准大气条件下进行。

#### 4.1.2 电磁条件

除产品技术条件另有规定,试验场地除地磁场外,应无其他外界电磁场。

#### 4.1.3 振动条件

除产品技术条件另有规定,试验场地测试台应无机械振动。

## 4.2 测试系统

### 4.2.1 绝对校准测试系统

绝对校准测试系统主要由霍普金森杆、激光干涉仪、数据采集装置等组成。

- a) 冲击加速度幅值:  $1 \times 10^4 g \sim 2 \times 10^5 g$ ;
- b) 冲击加速度脉冲宽度:  $2 \times 10^{-4} s \sim 1 \times 10^{-5} s$ ;
- c) 激光干涉仪最大测速: 不小于 100 m/s;
- d) 速度测量不确定度: 不大于 3%;
- e) 用于激光干涉仪光电信号的采集设备模拟带宽应不小于 200 MHz, 用于加速度传感器输出采集设备模拟带宽不小于  $(10^3/t) \text{ Hz}$  或更高 ( $t$  为脉冲持续时间, s)。

### 4.2.2 冲击比较测试系统

冲击比较校准测试系统主要由冲击激励源、标准加速度传感器、数据采集装置等组成。冲击比较校准冲击激励源主要有冲击台、马歇尔锤等。

- a) 冲击加速度幅值:  $1 \times 10^2 g \sim 4 \times 10^4 g$ ;
- b) 冲击加速度脉冲宽度:  $1 \times 10^{-3} s \sim 5 \times 10^{-2} s$ ;
- c) 用于加速度传感器输出采集设备模拟带宽不小于  $(10^3/t) \text{ Hz}$  ( $t$  为脉冲持续时间, s)。

### 4.2.3 证书文件(实验设备和计量器的检定)

试验用的试验设备和计量器具应经过计量检定。

## 5 试验的一般规定

### 5.1 被测加速度传感器安装

若被测加速度传感器使用说明书对安装和连接做了详细规定,应符合使用说明书要求。

加速度传感器安装于冲击运动体上,安装面应清洁平滑,粗糙度  $Ra < 1.6 \mu\text{m}$ 。冲击运动体和被测加速度传感器组合体的共振频率应高于  $(10/t) \text{ Hz}$  ( $t$  为脉冲持续时间, s); 应注意控制冲击体的旋转和横向运动; 应避免冲击机结构谐振对冲击运动体的影响。连接导线采用低噪声屏蔽电缆, 尽可能避免和被测加速度传感器相对运动。

### 5.2 放置和预热

被测加速度传感器和与试验有关的试验装置正确安装、连接后,应使其在试验环境条件下放置时间不少于 1 h。

试验前,测试系统应进行通电预热;被测加速度传感器应通电预热 0.5 h。



## 6 试验项目及方法

### 6.1 电气性能试验

#### 6.1.1 试验项目

电气性能试验项目如下:

- a) 输入阻抗;

- b) 输出阻抗;
- c) 绝缘电阻。

6.1.2 试验方法

6.1.2.1 输入阻抗

在加速度传感器输出端开路情况下,用欧姆表或相应仪表测量其输入端的阻抗。

6.1.2.2 输出阻抗

在加速度传感器输入端短路情况下,用欧姆表或相应仪表测量其输出端的阻抗。

6.1.2.3 绝缘电阻

在加速度传感器相互绝缘的部件之间,各引出线和壳体之间,或绝缘的部件与地之间施加直流电压,用绝缘电阻测试仪测量绝缘电阻。

6.2 基本性能试验

6.2.1 试验项目

基本性能试验项目如下:

- a) 零点输出;
- b) 峰值灵敏度;
- c) 灵敏度;
- d) 非线性误差;
- e) 灵敏度重复性;
- f) 阈值;
- g) 频率响应;
- h) 满量程输出;
- i) 零点漂移;
- j) 零点温度漂移;
- k) 横向灵敏度比;
- l) 抗过载能力。



6.2.2 试验方法

6.2.2.1 总则

采用绝对校准的方法测试时,被测加速度传感器与光栅座一同安装在霍普金森杆的末端面,当子弹冲击时,杆中产生激励加速度信号。激光干涉仪测量光栅的移动速度,对时间微分后可得到加速度传感器的移动加速度,数据采集装置采集记录的被测加速度传感器输出信号,与激光干涉仪测得加速度信号进行比较分析,以得到加速度传感器的基本性能,见附录 A 中 A.1。采用冲击比较校准的方法测试时,被测加速度传感器与标准加速度传感器“背对背”安装在冲击运动体上,冲击锤冲击砧座时,运动体上产生激励加速度信号。用数据采集装置记录标准加速度传感器与被测加速度传感器输出信号进行比较分析,以得到加速度传感器的基本性能,见 A.2。

6.2.2.2 零点输出

在 4.1 试验环境条件下,按 5.2 连接好测试系统,加速度传感器通电预热 0.5 h 后试验。在不加载

荷的条件下测量加速度传感器的输出值。

### 6.2.2.3 峰值灵敏度

在 4.1 试验环境条件下,按 5.2 连接好测试系统,加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击试验。被测加速度传感器感受到冲击发生装置的冲击加速度信号,输出相应的电压信号,电压信号峰值与输入冲击加速度信号峰值的比值为峰值灵敏度。峰值灵敏度用式(1)计算:

$$S_p = \frac{Y_p}{X_p} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$S_p$  ——加速度传感器的峰值灵敏度,相当于单位  $g$  值输出的电压(电流、数字量),mV(mA、LSB);

$Y_p$  ——加速度传感器输出峰值,mV(mA、LSB);

$X_p$  ——输入加速度峰值, $g$ 。

### 6.2.2.4 峰值灵敏度重复性

在 4.1 试验环境条件下,按 5.2 连接好测试系统,加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击试验。在加速度传感器规定的量程范围内,在同一冲击条件下,按照 6.2.2.3 对加速度传感器峰值灵敏度进行多次测量,测量点不少于五点。记录各示值,然后按下面的方法计算峰值灵敏度重复性。

首先计算第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n, n \geq 5$ ) 个测试点峰值灵敏度  $S_{pi}$  的平均值  $\overline{S_R}$ :

$$\overline{S_R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{pi} \dots\dots\dots (2)$$

然后按式(3)计算各测试点的重复性  $\xi_{Ri}$ :

$$\xi_{Ri} = \frac{|\overline{S_R} - S_{pi}|}{\overline{S_R}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

找出  $\xi_{Ri}$  中的最大值,此即为被测加速度传感器的峰值灵敏度重复性。

### 6.2.2.5 灵敏度

在 4.1 试验环境条件下,按 5.2 连接好测试系统,加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击试验。作用正向激励加速度,从零逐渐增大直至近似等于测量范围上限,再从测量范围上限逐渐减小直至近似等于零。记录下每个测量点的输入加速度值  $X_i$  和加速度传感器的输出值  $Y_i$ ,单个行程测量点的个数不少于 6 个。对测得的数据进行最小二乘拟合:

$$Y_{LS} = a + S \cdot X \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$Y_{LS}$  ——加速度传感器的理论输出,mV(mA、LSB);

$S$  ——最小二乘直线的斜率,即被测加速度传感器的灵敏度,相当于单位  $g$  值输出的电压(电流、数字量),mV(mA、LSB);

$a$  ——最小二乘直线的截距,mV(mA、LSB);

$X$  ——加速度传感器的输入加速度, $g$ 。

其中截距  $a$  和灵敏度  $S$  分别按式(5)、式(6)求出:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \dots\dots\dots (6)$$

式中：  
 $X_i$ ——第  $i$  个测量点输入加速度值， $g$ ；  
 $Y_i$ ——第  $i$  个测量点加速度传感器输出值， $mV(mA、LSB)$ ；  
 $n$ ——测试点个数。

6.2.2.6 非线性误差

在 4.1 试验环境条件下，按 5.2 连接好测试系统，加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击试验。在加速度传感器规定的测量范围内(含最大值)调整冲击加速度值，从零逐渐增大直至近似等于测量范围上限，按照 6.2.2.3 对加速度传感器峰值灵敏度进行多次测量，测量点不少于六点。记录各示值，然后按下面的方法计算非线性误差。

首先计算第  $i(i=1、2、\cdots、n、n\geq 6)$  个测试点峰值灵敏度  $S_{Pi}$  的平均值  $\overline{S_L}$ ：

$$\overline{S_L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Pi} \dots\dots\dots (7)$$

然后按式(8)计算各测试点的非线性误差  $\xi_{Li}$ ：

$$\xi_{Li} = \frac{|\overline{S_L} - S_{Pi}|}{\overline{S_L}} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

找出  $\xi_{Li}$  中的最大值，此即为被测加速度传感器的非线性误差。

6.2.2.7 阈值

在 4.1 试验环境条件下，按 5.2 连接好测试系统，加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击/振动试验。从低到高或从高到低改变激励加速度信号时，能够检测到的最小输出值与灵敏度的比值。阈值用式(9)计算：

$$X_{Ta} = \frac{\Delta Y}{S} \dots\dots\dots (9)$$

式中：  
 $X_{Ta}$ ——加速度传感器的阈值， $g$ ；  
 $\Delta Y$ ——能够检测到的最小输出值， $mV(mA、LSB)$ ；  
 $S$ ——加速度传感器灵敏度，相当于单位  $g$  值输出的电压(电流、数字量)， $mV(mA、LSB)$ 。

6.2.2.8 频率响应

在 4.1 试验环境条件下，按 5.2 连接好测试系统，加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击试验。校准装置在测量范围内冲击加速度传感器，经过解算可以得到加速度传感器的传递函数，进而计算幅频特性、相频特性，从而可以找出加速度传感器的工作频带。被测加速度传感器的传递函数  $G_p(s)$ ，可通过式(10)计算：

$$G_p(s) = \frac{L[a_o(t)]}{L[a_i(t)]} = \frac{L[a_o(t)]}{s \times L[V_{Li}(t)]} \dots\dots\dots (10)$$

式中：  
 $t$ ——时间， $s$ ；  
 $L$ ——拉氏变换；

$a_i(t)$ ——被测加速度传感器的输入的激励加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$a_o(t)$ ——被测加速度传感器的输出加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$V_{Li}$ ——激光干涉仪测量的杆末端面的速度,  $\text{m/s}$ 。

冲击比较法频响测试方法见附录 B。

#### 6.2.2.9 满量程输出

加速度传感器测量范围上限输出值与测量范围下限输出值之差的绝对值(以理论特性直线的计算值为依据)为满量程输出值。满量程输出值用式(11)计算:

$$Y_{F.S} = |S \cdot (X_H - X_L)| \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$S$ ——加速度传感器灵敏度,相当于单位  $g$  值输出的电压(电流、数字量),  $\text{mV}(\text{mA}, \text{LSB})$ , 试验方法应满足 6.2.2.4 的要求;

$X_H, X_L$ ——分别为测量上、下限的加速度值,  $g$ 。

#### 6.2.2.10 零点漂移

在 4.1 试验环境条件下,加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行测试。测量加速度传感器未施加载荷下的零点输出,每隔 0.5 h 读取一次,连续读取 2 h(共 5 次)。加速度传感器的零点漂移按式(12)计算:

$$Y_0 = \left| \frac{\Delta Y_{0\max}}{Y_{F.S}} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$\Delta Y_{0\max}$ ——零点输出的最大差值,  $\text{mV}(\text{mA}, \text{LSB})$ ;

$Y_{F.S}$ ——被测轴的满量程输出值,  $\text{mV}(\text{mA}, \text{LSB})$ 。

#### 6.2.2.11 零点温度漂移

在 4.1 试验环境条件下,将传感器置于高、低温试验箱内,加速度传感器通电预热 0.5 h,首先记录室温时的零点输出值。然后按规定的温度档和升(降)温顺序进行试验,测量传感器从工作温度下限至工作温度上限,不同温度时的零点输出值,测试时在各温度保温 0.5 h 后进行测试。将不同温度下测得的零点输出值分别代入式(13),求出不同温度下的零点温度漂移值,其中最大值为传感器的零点温度漂移。

$$K_0(T) = \left| \frac{Y_0(T) - Y_0(T_c)}{Y_{F.S} \cdot (T - T_c)} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$K_0(T)$ ——温度为  $T$  时的零点温度漂移值,  $\%/^{\circ}\text{C}$ ;

$T_c$ ——参考温度(室温),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$Y_0(T)$ ——温度  $T$  时零点输出,  $\text{mV}(\text{mA}, \text{LSB})$ ;

$Y_0(T_c)$ ——参考温度  $T_c$  时零点输出,  $\text{mV}(\text{mA}, \text{LSB})$ ;

$Y_{F.S}$ ——静态校准的满量程输出值,  $\text{mV}(\text{mA}, \text{LSB})$ 。

#### 6.2.2.12 横向灵敏度比

在 4.1 试验环境条件下,加速度传感器安装在校准装置上,被测加速度传感器敏感轴垂直于冲击方向,加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行冲击试验。在相同的冲击条件下沿垂直于灵敏轴方向冲击,记录被测加速度传感器输出和输入加速度值,按 6.2.2.3 计算加速度传感器的横向灵敏度。加速度传感器的横向灵敏度比 TSR 按式(14)计算:



$$TSR = \frac{S_T}{S_z} \times 100\% \dots\dots\dots (14)$$

式中：  
TSR —— 横向灵敏度比；  
 $S_T$  —— 被测加速度传感器横向灵敏度，相当于单位  $g$  值输出的电压（电流、数字量），mV（mA、LSB）；  
 $S_z$  —— 被测加速度传感器敏感轴向灵敏度，相当于单位  $g$  值输出的电压（电流、数字量），mV（mA, LSB）。

6.2.2.13 抗过载能力

抗过载能力是指加速度传感器在规定允许范围内，加在加速度传感器上不导致加速度传感器性能永久性变化的极限加速度值。确定极限加速度，采用逐次加大冲击的方法。在 4.1 试验环境条件下，按 5.2 连接好测试系统，加速度传感器通电预热 0.5 h 后进行极限冲击试验。给加速度传感器灵敏轴正负两个方向上分别施加极限加速度，然后放置 2 h，再测其灵敏度。如果灵敏度变化大于±1 dB，说明极限加速度值低于此值。否则，根据需要可加大极限加速度的冲击值，重新试验。



## 附录 A (规范性附录) 测试装置

### A.1 霍普金森杆装置

光栅激光干涉式霍普金森杆校准装置组成如图 A.1 所示,主要由霍普金森杆、多普勒激光干涉仪、动态信号分析仪组成。霍普金森杆用于在校准端面获得波形良好、横向运动小的冲击过程。多普勒激光干涉仪用于检测由于光栅运动产生的多普勒频移信号。

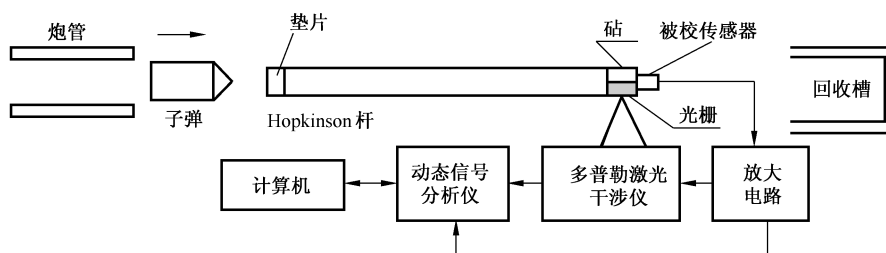


图 A.1 光栅激光干涉冲击校准系统原理图

由压缩空气发射弹体,同轴撞击校准杆的起始端,产生冲击加速度,同时作用于光栅和被测加速度传感器。通过测量 Hopkinson 杆端部加速度传感器安装座上光栅的速度—时间关系曲线,微分得到加速度—时间关系曲线,以此作为加速度传感器的激励,与加速度传感器的响应输出联合处理,可得到加速度传感器的动态特性(包括幅频和相频特性曲线)甚至传递函数。所以采用激光多普勒原理,用衍射光栅获取多普勒频移信号,可以绝对复现冲击加速度量值并对加速度进行校准。

被测加速度传感器安装在冲击运动体上,其敏感方向和冲击运动体的运动方向一致。当冲击运动体承受冲击运动时,运动速度的时间函数  $v(t)$  和所应用的激光干涉系统的多普勒频移时间函数之间的存在确定的数学关系:

$$v(t) = k_{fv} \cdot \Delta f_d(t) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$v(t)$  ——冲击运动速度, m/s;

$\Delta f_d(t)$  ——激光多普勒频移, Hz;

$k_{fv}$  ——比例系数, m。

将上式作微分处理可得:

$$a(t) = k_{fv} \cdot \frac{d[\Delta f_d(t)]}{dt} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$a(t)$  ——冲击运动加速度, m/s<sup>2</sup>。

典型的差动式光栅激光干涉法测量加速度示意如图 A.2 所示:

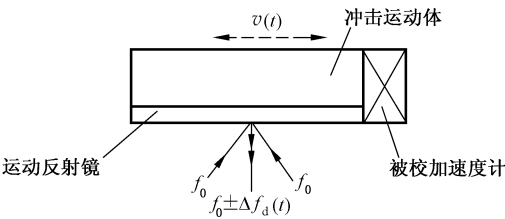


图 A.2 差动式光栅激光干涉方法的加速度测量示意图

差动式光栅激光干涉方法比例系数  $k_{fv}$  为：

$$k_{fv} = \frac{d}{|m_1 - m_2|}$$

.....( A.3 )

式中：

- $d$  —— 光栅常数, m;
- $m_1、m_2$  —— 光栅衍射级数。

A.2 冲击锤装置

冲击锤包括冲击台、马歇特锤等。马歇特落锤是由砧子、锤头、连杆和吊锤等组成的冲击试验装置。将被测加速度传感器和参考标准加速度传感器固定在锤头同一校准平面,加速度传感器的外围测试电路和导线固定在连杆上,转动转轮将锤头抬起后释放,对加速度传感器进行冲击。冲击台则是将同时载有标准加速度传感器和被测加速度传感器的台体,抬升到一定高度释放,自由落下时撞击底座来产生冲击加速度。

相对校准中,参考标准加速度传感器的灵敏度和全部技术性能是已知的;另一只为被测加速度传感器,用同样的加速度  $a$  激励它们,则它们的输出分别为：

$$u_S = S_S a$$

.....( A.4 )

$$u_T = S_T a$$

.....( A.5 )

式中：

- $u_S、S_S$  —— 标准加速度传感器的输出、灵敏度;
- $u_T、S_T$  —— 被测加速度传感器的输出、灵敏度。

则：

$$S_T = S_S \cdot \frac{u_T}{u_S}$$

.....( A.6 )

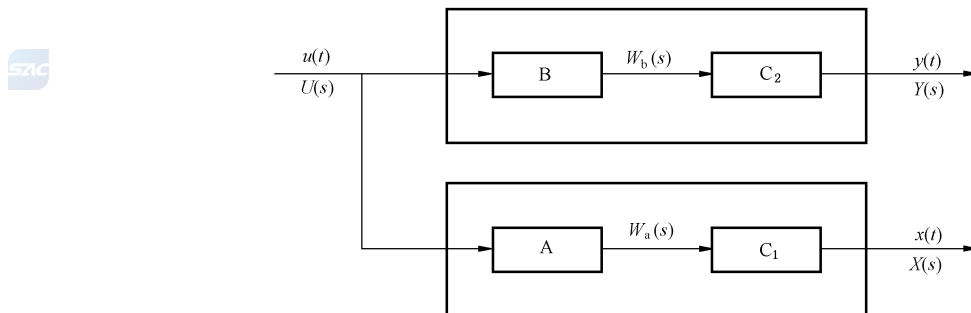


## 附 录 B

(规范性附录)

## 冲击比较法频响测试方法

当落锤自某一初始高度自由下落冲击砧座时,产生一个瞬时加速度脉冲  $u(t)$ 。两个加速度传感器同时受到相同冲击加速度脉冲的激励,其响应分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ ,见图 B.1。



说明:

A —— 标准加速度传感器;

B —— 被测加速度传感器;

$C_1$ 、 $C_2$  —— 前置放大器。

图 B.1 冲击比较校准法说明图

将加速度传感器系统看做线性定常环节,设其传递函数分别为  $W_b(s)$  和  $W_a(s)$ ,则有

$$Y(s) = W_b(s) \cdot U(s) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

$$X(s) = W_a(s) \cdot U(s) \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

从而

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_b(s)}{W_a(s)} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

即

$$W_b(s) = W_a(s) \cdot \frac{Y(s)}{X(s)} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

若  $x(t)$  与  $y(t)$  的傅里叶变换存在,分别为  $X(j\omega)$  与  $Y(j\omega)$ ,令

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

$$W_a(j\omega) = A_a(\omega) e^{j\varphi_a(\omega)} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

$$W_b(j\omega) = A_b(\omega) e^{j\varphi_b(\omega)} \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

则有

$$W_b(j\omega) = W_a(j\omega) \cdot W(j\omega) \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

或

$$A_b(\omega) = A_a(\omega) \cdot A(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

$$\varphi_b(\omega) = \varphi_a(\omega) + \varphi(\omega) \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

可见,若标准加速度传感器的频率特性已知,则可由  $x(t)$  与  $y(t)$  的频谱之比,求得被测加速度传感器的频率特性  $W_b(j\omega)$ 。

一般选用工作频带很宽的加速度传感器作为标准加速度传感器,当其工作频带将被测加速度传感器工作频带充分覆盖时,可认为在此频率范围内,有  $A_a(\omega) \equiv K_a, \varphi_a(\omega) = 0$  (被测加速度传感器工作频带范围内,标准加速度传感器被看作纯放大环节),且不失一般性,可令  $K_a = 1$ ,从而

$$W_b(j\omega) = W(j\omega) \dots\dots\dots (B.11)$$

此时认为  $x(t)$  完全复现了  $u(t)$ ,可将其作为被测加速度传感器的输入观测量加以分析。



参 考 文 献

- [1] JJF 233 压电加速度计
  - [2] JJF 1153 冲击加速度计(绝对法)校准规范
  - [3] SJ 20811 压阻式加速度传感器总规范
-