

高冲击三维加速度传感器横向灵敏度校准技术*

林 然, 张振海, 李科杰, 何 响, 张 亮

(北京理工大学机电学院 北京, 100081)

摘要 探讨了高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度的校准技术。新制定的国标已规范化了传感器的相对横向灵敏度这一参数,它是加速度传感器的一个重要指标,但其定义仅对一维加速度传感器而言。为了扩展到高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度的校准上,笔者采用在空气炮上实现高冲击三维加速度传感器的校准方法采集数据,以三维加速度传感器的拟合直线代替校准曲线、用侧向芯片和主向芯片输出之比计算相对横向灵敏度,更便于使用者评价传感器的性能。完善了高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度测试和校准的技术。相比其他技术,采用的校准装置和校准方法既符合传感器峰值高、脉宽大的特点,又能完整地呈现三轴向间的输出关系。

关键词 三维加速度传感器; 相对横向灵敏度; 高冲击; 空气炮; 校准

中图分类号 TP202; TB934; TJ06; TH824.4

引 言

根据最新的标准,GB/T 20485.31-2011/ISO 16063-31^[1]规范化了加速度传感器相对横向灵敏度这一参数,它代替了原标准中横向灵敏度比的概念,它是加速度传感器的一个重要指标,它表征传感器在主向工作时,其横向效应的大小。高冲击三维加速度传感器的横向效应一直是研究者高度关注的问题。同原标准中关于横向灵敏度比的定义,根据GB/T 20485.31-2011^[1],ISO16063-1^[2],ISO5347-12^[3],GJB5439-2005^[4],加速度传感器相对横向灵敏度是横向灵敏度和主向灵敏度之比,定义主要是对于一维加速度传感器而言,现在讨论如何扩展到高冲击三维加速度传感器的相对横向灵敏度计算方法。

笔者所采用的空气炮校准装置,远远超出国标中推荐的装置测量范围 $0\sim 1\,000\text{ m/s}^2$ (约 100 g),其峰值能够达到 $2\times 10^5\text{ g}$,脉宽超过 $100\text{ }\mu\text{s}$;国标中推荐的是振动激励的方法,而笔者采用的是一次性冲击、碰撞激励的方法;更重要的是,这项技术一次性解决了三轴都能在高 g 值的满量程范围内的校准,通过解算三轴的相对横向灵敏度反应出轴向间的大小关系,为使用者了解传感器性能提供有效参数。文中同时体现高峰值和传感器三维的性能,在

计算相对横向灵敏度的过程中,也解算出了主向冲击灵敏度、横向灵敏度及线性度。

电子测试技术实验室^[5],中北大学^[6]等单位对于加速度传感器的相对横向灵敏度的测试方法进行了研究。国内外研究,多见对于一维加速度传感器的相对横向灵敏度进行了测试,而对于高冲击的三维加速度传感器,尚未发现同时展现高冲击和三维(特别是横向)的特性。

中北大学、中科院上海微系统所研究的共同的特点是只研究了传感器主向^[7],对非主轴校准的峰值较低^[8]。他们通过拟合直线的斜率作为主向灵敏度、并计算端基线性度,或者仅仅计算平均灵敏度^[9],都没有给出相对横向灵敏度的方法;他们将各个测点的横向电压和主向加速度之比作为横向灵敏度,取一组中的最大值为最大横向灵敏度,横向灵敏度和主向灵敏度之比为横向灵敏度比,其实质是横向电压和主向电压之比。用横向输出电压和主向输出电压之比计算相对横向灵敏度,实质上是校准曲线的斜率之比,校准曲线上各实测点是在线性度范围内偏离拟合直线,各个点的斜率都不同,这会给使用者带来不便。笔者以三轴拟合直线斜率代替校准曲线的斜率,斜率之比就是横向灵敏度和几何轴向灵敏度之比,校准结果只要这一个参数就可以让使用者了解传感器横向效应的大小。中北大学使用马

* 国防基础科研项目;国家自然科学基金面上资助项目(61273346);教育部博士点基金资助项目(20121101120009);北京理工大学“优青资助计划”项目(2012YG0203)和基础研究基金资助项目(2014CX02031)

收稿日期:2015-03-07;修回日期:2015-03-25

歌特锤^[10],中科院上海微系统所^[11]使用自由落杆装置,三向的数据都没有超过 $5 \times 10^5 g$ 。

另外,根据一维加速度传感器的相对横向灵敏度的模型,探索适合于高冲击三维加速度传感器的相对横向灵敏度的测试方法。GB/T 20485. 31-2011/ISO 16063-31^[1]采用三轴激振台等校准方法,不适合于高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度测试。因为振动台不能为加速度传感器提供峰值高、脉冲宽的激励,并且校准装置的结构也不能采用该标准中推荐的八面体,只能在少数和特定的横向灵敏度方位角对传感器进行测试,从而合成出横向灵敏度,再计算相对横向灵敏度。

被测试的对象是高冲击三维加速度传感器。高冲击三维加速度传感器有 4 种结构:中北大学^[10]和中科院上海微系统所^[12]研制了单片集成的结构;北京理工大学研制的 3 个芯片正交安装的组合式结构和三维敏感芯片^[13],实质上前二者是 3 个独立的敏感单元;第 3 种仅有三个相同敏感单元、三轴正交安装;最后一种通过电桥合理布设在芯片上来解算三维加速度。但是 4 种结构的敏感方向都是相互正交的,完全校准三轴向的主向冲击灵敏度、横向灵敏度以及相对横向灵敏度须有适合的校准转接装置。

1 校准转接装置

空气炮是峰值达到 $20 \times 10^5 g$ 的传感器标定装置,并且脉宽大于 $100 \mu s$ 。空气炮用于标定高冲击三维加速度传感器的主向冲击灵敏度和横向灵敏度、线性度。空气炮是长管形状,中部是碰撞激励体系,前侧和尾端回收系统在此处为分开的两段,传感器要通过校准转接装置在试验前固定于空气炮上,试验中传感器受到激励加速度,自由飞行进入尾端的回收系统,数采装置采集传感器的输出电压。

校准转接装置也被称为砧体,其锥面和空气炮安装板压紧,空气炮驱动弹丸和砧体相碰,砧体自由飞行进入回收装置,并且应力波通过砧体再传递到传感器壳体。砧体的作用是保护传感器和传递应力的作用,砧体上粘结的反射膜将激光信号反射,激光多普勒测速装置感应出砧体的速度,进而由软件计算加速度。砧体是一个圆柱体,轴线方向就是校准的冲击方向,图 1 中 3 向砧体的特点是在冲击校准时,冲击方向是被校主芯片的敏感方向,即被校主芯片的外法线方向和冲击方向一致。传感器的 3 个敏感方向都能作为主向分别在 3 向砧体上进行测试。

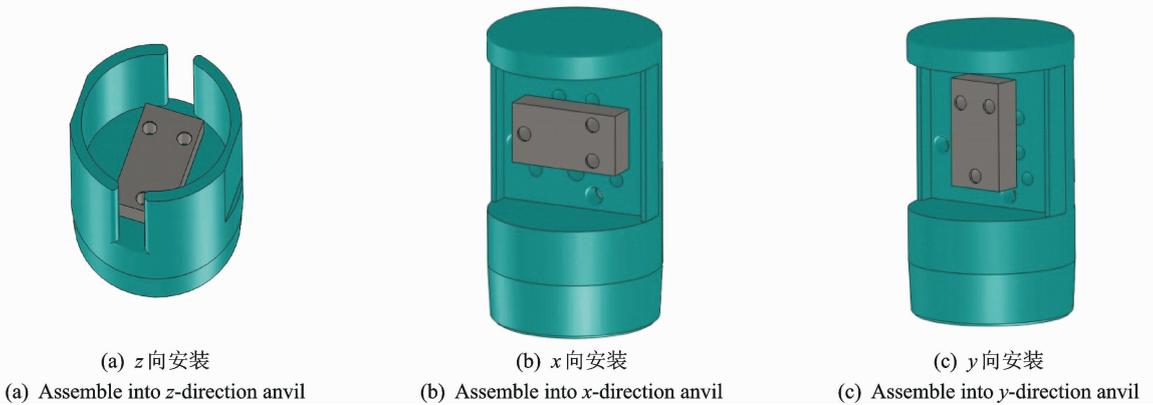


图 1 校准转接装置

Fig. 1 Calibration transfer devices

2 灵敏度

高冲击三维加速度传感器有 3 个主向冲击灵敏度,分别是 S_{xx}, S_{yy}, S_{zz} 。由于被测传感器是 3 个敏感芯片独立的形式,垂直于冲击方向安装或布设的芯片,其应力应变都大于其余两块芯片,所以其输出也是最大,在该冲击方向是主向芯片,主向芯片的灵敏度是主向冲击灵敏度。

根据国标的定义,灵敏度是输出变化量和输入变化量之比。传感器在第 i 个测点处的灵敏度为

$$S_i = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \right) = \frac{dY_i}{dX_i} \quad (1)$$

即传感器工作特性曲线的斜率,根据每个冲击方向取 4 个点(包含零点),获取传感器的主向芯片的输出,并计算出主向冲击灵敏度。

图 2~图 4 为 3 向冲击下传感器的 3 芯片输出曲线。

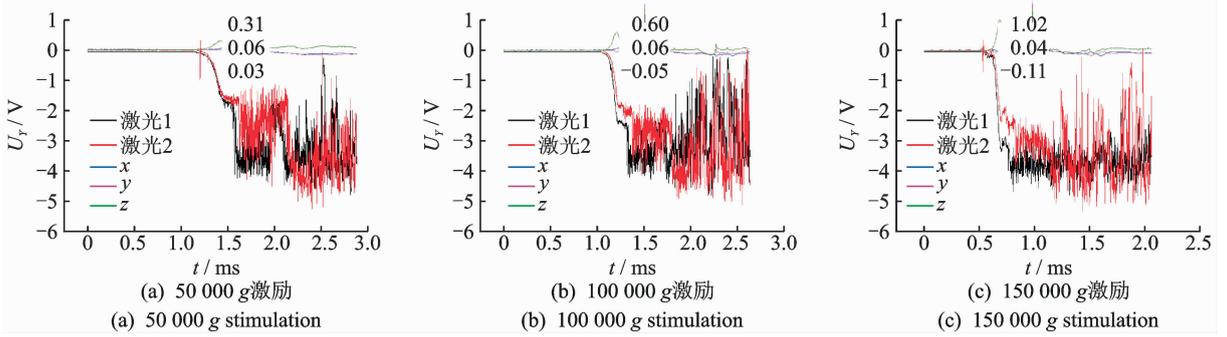


图 2 z 向冲击时传感器输出

Fig. 2 Output of accelerometer when calibrated in z-direction

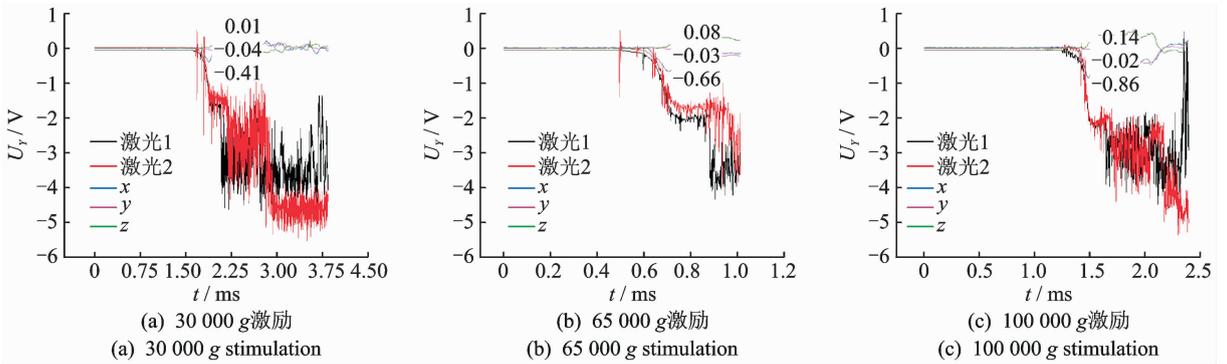


图 3 x 向冲击时传感器输出

Fig. 3 Output of accelerometer when calibrated in x-direction

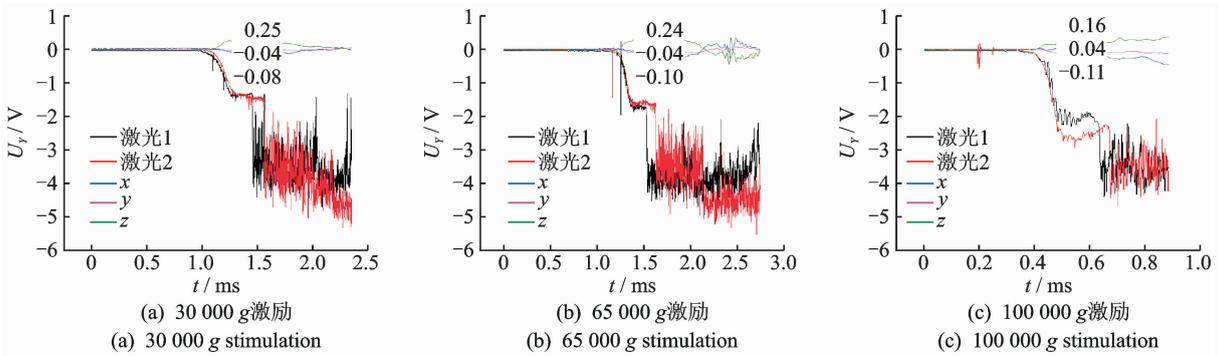


图 4 y 向冲击时传感器输出

Fig. 4 Output of accelerometer when calibrated in y-direction

表 1 列出了同峰值时刻的三向输出峰值读数。用最小二乘法按照各激励和输出峰值的关系拟合直线。在每一个冲击方向下,除了主向芯片的特性曲线外,还根据侧向芯片的数据拟合出两条横向特性曲线,曲线的斜率就是两轴向的横向灵敏度。

在工程领域中最小二乘法使用较为广泛,其原理是使数据和拟合函数的加权残差平方和最小,假设拟合直线

$$y = a_0 + a_1 x \tag{2}$$

$$\text{其中: } a_0 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}, \quad a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}.$$

图 5(a~c)分别描绘了在 z 向冲击, x 向冲击, y 向冲击的情况下,用最小二乘法拟合出的三维加速

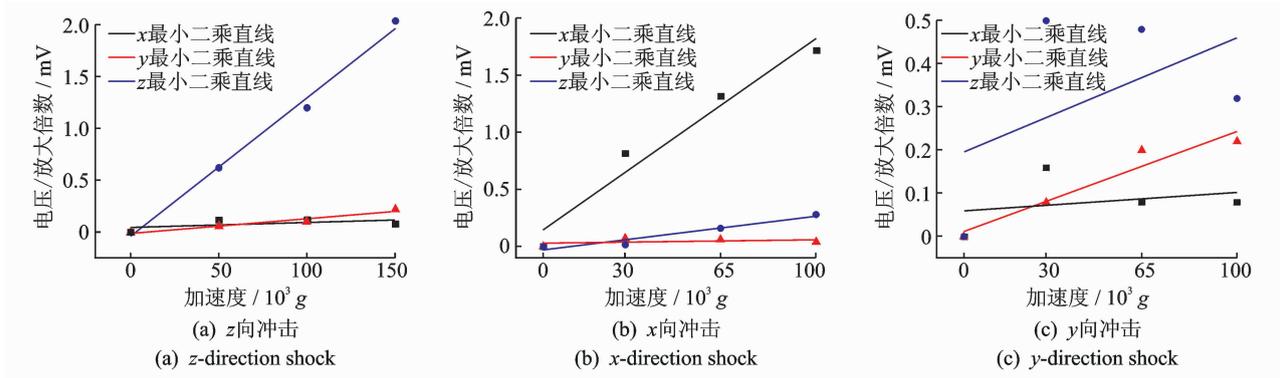


图 5 拟合直线

Fig. 5 Fitting straight line

度传感器的 3 个轴向的输入输出特性曲线。横坐标为表 1 中的激励加速度,纵坐标为与该加速度对应的行中的输出峰值电压/放大倍数。

表 1 高冲击三维加速度传感器测试结果

Tab. 1 Testing results of high shock tri-axis accelerometer

冲击方向	放大倍数	激励加速度/g	输出峰值电压/V		
			x 轴	y 轴	z 轴
z	500	50 000	0.06	0.03	0.31
z	500	100 000	0.06	0.05	0.60
z	500	150 000	0.04	0.11	1.02
x	500	30 000	0.41	0.04	0.01
x	500	65 000	0.66	0.03	0.08
x	500	100 000	0.86	0.02	0.14
y	500	30 000	0.08	0.04	0.25
y	500	65 000	0.04	0.10	0.24
y	500	100 000	0.04	0.11	0.16

在表 2 的第 3 行中的数字为图 5(a)中三维加速度传感器的 3 个轴向的输入输出特性曲线的斜率,3 个斜率分别为 z 轴主向冲击灵敏度和两个横向灵敏度。同样,在表 2 的第 1 行中的数字为图 5(b)中三维传感器 x 轴、y 轴和 z 轴的输入输出特性曲线的斜率,分别是 x 轴主向冲击灵敏度和两个横向灵敏度。在表 2 的第 2 行中的数字为图 5(c)中的三维传感器的三轴向输入输出特性曲线的斜率,分别是 y 轴主向冲击灵敏度和两个横向灵敏度。

表 2 最小二乘法计算灵敏度

Tab. 2 Sensitivity computed by Least square method

冲击方向	灵敏度 $\mu V/g$		
	x 轴	y 轴	z 轴
x	0.017 20	0.000 27	0.002 95
y	0.000 43	0.002 20	0.002 64
z	0.000 48	0.001 40	0.013 60

3 相对横向灵敏度

一维加速度传感器的相对横向灵敏度是 8 字形曲线,传感器相对横向灵敏度大小取决于传感器的安装角度,振动频率越高八字形最大半径越小,相对横向灵敏度的测试方法可以采用离心机^[5],簧片梁^[14],振动台^[15]和分度台^[16]等。根据 GB/T 20485.31-2011^[1]中的振动校准方法,8 面体装置将传感器安装为 0~360°之间的 8 个角度,但是振动试验只能激励出较低的 g 值^[17],而高冲击三维加速度传感器,要在最高量程范围内对传感器进行测试,获得越高 g 值,冲击能量也越大,冲击次数较多将使传感器受疲劳而失效,这样限制了试验次数;并且要试验达到高 g 值,校准装置不宜采用质量重、体积大的砧体,所以高冲击三维加速度传感器一般仅在单一的横向灵敏度角下试验,完整的相对横向灵敏度的模型还没有能建立。

$$\text{在国标中,相对横向灵敏度 } S_T^* = \frac{S_T}{S} \times 100\%, S$$

为几何轴向灵敏度, S_T 为横向灵敏度。但是这只是针对一个输出端口的传感器,即一维加速度传感器相对横向灵敏度。例如: x 向为冲击方向时, x 轴横向灵敏度为 S_{xz} ; y 向为冲击方向时, y 轴横向灵敏度为 S_{yz} ; 几何轴灵敏度为 S_{zz} , 下角注第 1 个字母表示冲击加速度方向,第 2 个字母表示哪个轴传感器输出;相对横向灵敏度

$$\begin{cases} S_T^*(X) = \frac{S_{xz}}{S_{zz}} \times 100\% \\ S_T^*(Y) = \frac{S_{yz}}{S_{zz}} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

三维加速度传感器实质上有 3 个一维加速度传感器构成,3 个一维加速度传感器的敏感方向相互

正交,使用者希望主向冲击灵敏度尽量大,而横向灵敏度尽可能小。相对横向灵敏度正是反映这一关系的参数。能否按照一维加速度传感器相对横向灵敏度的定义来计算三维加速度传感器呢?即某块芯片作为横向时的输出和作为主向时的输出之比。

表3中的结果,y向冲击时,x芯片和z芯片相对横向灵敏度都<20%,而实际的输出情况是如图4中,y轴信号大小比z轴小。所以若用一维的定义计算三维,实质上只考核了某一块芯片的性能,并不能反映在该向冲击时,3个轴输出之间的大小关系,而对于使用者而言,更关注的是传感器整体性能,一般横轴输出的大小不要比主轴大。对于三维加速度传感器,相对横向灵敏度按侧向芯片和主向芯片输出大小之比计算更能考核传感器整体的性能。

表3 高冲击三维加速度传感器3向芯片相对横向灵敏度
Tab.3 Relative transverse sensitivity of three sensing chips of high shock tri-axis accelerometer

冲击方向	相对横向灵敏度/%		
	x 芯片	y 芯片	z 芯片
x	—	12.3	21.7
y	2.5	—	19.4
z	2.8	63.6	—

图6中标示出三维加速度传感器的各主轴灵敏度和横向灵敏度。 S 表示灵敏度,第1个下标为冲击方向,第2个下标表示哪个轴传感器输出。 S_{max} 表示合成出的近似最大的灵敏度, $S_{T,max}$ 为合成出的近似最大的平面横向灵敏度, θ 为主轴灵敏度与近似最大灵敏度的夹角。

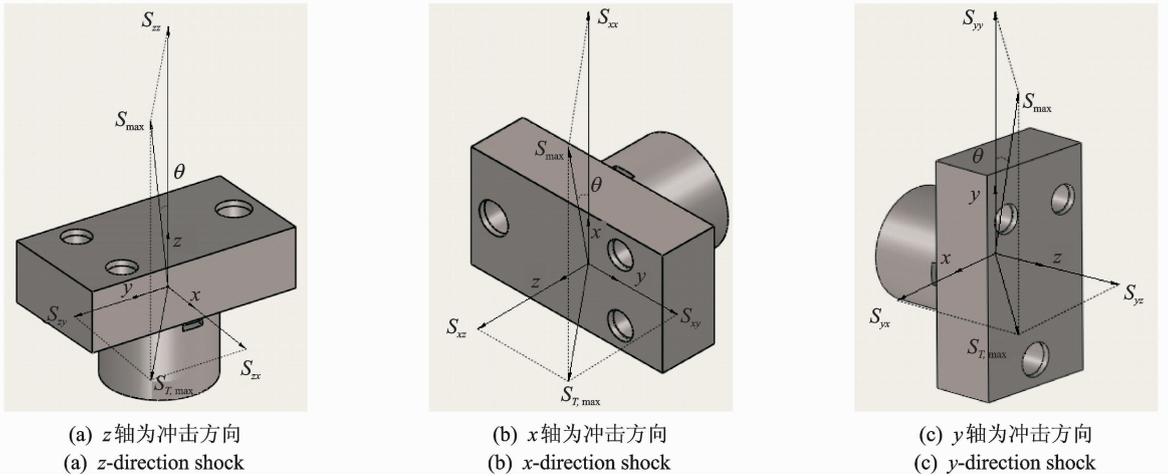


图6 各冲击方向的灵敏度

Fig.6 General view of sensitivity when calibrated in three direction respectively

例如,z向冲击时,相对横向灵敏度

$$\begin{cases} S_T^*(X)' = \frac{S_{zx}}{S_{zz}} \times 100\% \\ S_T^*(Y)' = \frac{S_{zy}}{S_{zz}} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

比较式(3)和式(4)可知,分子不同,输出轴传感器不同。另外有

$$\begin{cases} S_T^*(X)' = \frac{S_{zx}}{S_{zz}} \times 100\% = \frac{S_{zx}a_x}{S_{zz}a_z} = \frac{Y_{zx}}{Y_{zz}} \\ S_T^*(Y)' = \frac{S_{zy}}{S_{zz}} \times 100\% = \frac{S_{zy}a_y}{S_{zz}a_z} = \frac{Y_{zy}}{Y_{zz}} \end{cases} \quad (5)$$

即由拟合直线计算出的横向输出和主向输出之比,但并不是各个校准点的实际输出之比,因为实际输出是在线性度范围内偏离拟合直线的。

表4根据拟合直线计算,可见在y冲击时,z轴的输出是y轴的120%,即横轴比主轴大。所以这一结果反映了三维加速度传感器横向效应的大小。

表4 高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度

Tab.4 Relative transverse sensitivity of high shock tri-axis accelerometer

冲击方向	相对横向灵敏度/%		
	x 轴	y 轴	z 轴
x	—	1.6	17.2
y	19.5	—	120
z	0.04	10.3	—

由两轴横向灵敏度合成出近似最大的平面横向灵敏度 $S_{T,max}$

$$S_{T,max} = \sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2} \quad (6)$$

高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度 S_T^* , 为近似最大的平面横向灵敏度和主向灵敏度之比

$$S_T^* = \frac{S_{T,max}}{S} = \frac{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}}{S_{zz}} \times 100\% \quad (7)$$

表5根据上式分别计算出三向的相对横向灵敏

度, y 向时最大。

表 5 高冲击三维加速度传感器相对横向灵敏度

Tab. 5 Relative transverse sensitivity of high shock tri-axis accelerometer

冲击方向	相对横向灵敏度/%	
	计算公式	结果
x	$\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2} / S_{xx}$	17.2
y	$\sqrt{S_{yx}^2 + S_{yz}^2} / S_{yy}$	121.6
z	$\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2} / S_{zz}$	10.9

在抗冲击能力、安装条件允许的情况下, 传感器相对一个初始的安装角度 θ , 以间隔一定的角度 α 旋转, 在 $\theta + \alpha$ 下校准, 计算出相应的 S_T^* 值, 再进行直到旋转完一周, 获得 S_T^* 的最大值即三维最大相对横向灵敏度。

4 试验结果分析

x 轴主向灵敏度要大于 y 轴主向灵敏度, y 轴和 x 轴分别作为冲击方向时, y 轴的相对横向灵敏度大很多。由图 4 和图 5 可以看出, y 向冲击时, y 轴作为主轴, 其输出较小, 比此时的横轴 z 轴要小。根据表 5, y 向冲击时, 相对横向灵敏度过大, 也反映出了这一现象。

据判断是由传感器封装、芯片的非对称性和安装方式带来的。由于芯片是膜片式的, 所以其发生的扭曲和弯矩很小, 主因判断来自于传感器封装的结构, 被测试传感器封装为立方体, 下部分圆柱形螺柱连接安装面, y 轴为长度方向, x 轴为宽度方向, 受冲击时, 应力波从螺柱传递到敏感单元。如图 7 所示, 在 x 轴或 y 轴作为冲击方向时, 最大应力或应变都集中在螺柱根部, x 轴芯片距离螺柱约束面最近, 所以形变导致的输出变化也最大。

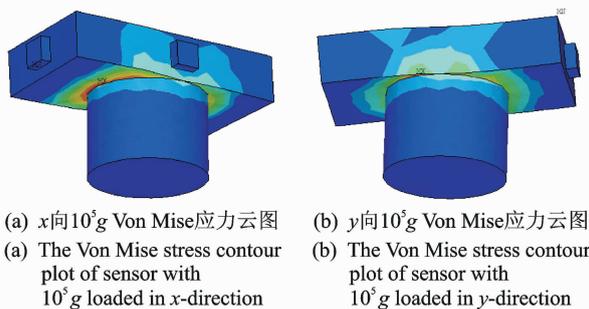


图 7 x 向、 y 向冲击受力分析

Fig. 7 Stress analysis with x -direction or y -direction inertial loading

未来将把传感器结构改为 x 轴和 y 轴对称的正方体, 验证 y 向冲击时, 相对横向灵敏度过大的原因。并且将传感器反向安装, 即相对于初始安装角度, 以方位角 $\theta + \pi$ 进行测试, 完善和深入研究高冲击三维加速计相对横向灵敏度的模型。

5 结 论

1) 三维加速度传感器的拟合直线代替校准曲线计算相对横向灵敏度, 即用拟合直线斜率代替各校准点的横轴电压和主轴电压之比, 更便于使用者评价传感器的性能。

2) 三维加速度传感器相对横向灵敏度是横向灵敏度和主向灵敏度之比, 可由式(3)计算, 一般不会为 0; 考虑到高冲击试验不宜过多, 可由 x, y, z 的 3 个冲击加速度方向中, 其他两轴横向灵敏度合成后的近似最大值代表最大横向灵敏度, 并依此来进行相对横向灵敏度计算。

3) 目前三维加速度传感器相对横向灵敏度过大, 判断和传感器结构的非对称性有关。

参 考 文 献

[1] 朱沙, 李新良, 秦宇, 等. GB/T 20485. 31-2011/ISO 16063-31:2009-2011, 振动与冲击传感器的校准方法, 第 31 部分: 横向振动灵敏度测试[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

[2] 马明德, 李学瑞, 张宏宇, 等. GB/T 20485. 1-2008/ISO 16063-1:1998-2008, 振动与冲击传感器的校准方法, 第 1 部分: 基本概念[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[3] ISO 5347-12-1993. Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups-part 12: Testing of transverse shock sensitivity[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.

[4] 陈勤, 范树新. GJB 5439-2005, 压阻式加速度传感器通用规范[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005.

[5] 李彬, 郑宾, 刘佳钰. 加速度计横向灵敏度测试方法研究[J]. 航空兵器, 2008, 12(6): 14-16, 22. Li Bin, Zheng Bin, Liu Jiayu. Research for testing transverse sensitivity of accelerometers [J]. Aero Weaponry, 2008, 12(6): 14-16, 22. (in Chinese)

[6] 于景玲, 范锦彪. 三轴高 g 值加速度传感器的横向效应研究[J]. 传感器世界, 2012, 18(6): 10-12. Yu Jingling, Fan Jinbiao. Research on transversal

- effect of high-g three-axis accelerometer[J]. *Sensor World*, 2012,18(6):10-12. (in Chinese)
- [7] 石云波,朱政强,刘晓鹏,等. 高g值加速度计的设计与冲击特性分析[J]. *爆炸与冲击*, 2010,30(3):329-332. Shi Yunbo, Zhu Zhengqiang, Liu Xiaopeng, et al. Design and impact analysis of a high-g accelerometer[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010,30(3):329-332. (in Chinese)
- [8] 周智君,石云波,唐军,等. 一种大量程加速度传感器的性能测试[J]. *传感技术学报*, 2013,26(6):834-836. Zhou Zhijun, Shi Yunbo, Tan Jun, et al. Performance testing of a high range accelerometer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(6): 834-836. (in Chinese)
- [9] 夏烈芳,高鹏,战丰丰,等. 基于Hopkinson杆的高g值冲击传感器校准[J]. *电子设计工程*, 2009,17(8):68-70. Xia Liefang, Gao Peng, Zhan Fengfeng, et al. Shock sensor calibration for high-g value based on Hopkinson bar[J]. *Electronic Design Engineering*, 2009,17(8):68-70. (in Chinese)
- [10] 石云波,赵锐,唐军,等. 单片三轴大量程加速度传感器性能测试与分析[J]. *传感技术学报*, 2012,25(9):1236-1241. Shi Yunbo, Zhao Rui, Tang Jun, et al. Testing and analysis of a single-chip triaxial high measure range MEMS accelerometer[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012,25(9):1236-1241. (in Chinese)
- [11] Bao Haifei, Song Zhaohui, Lu Deren, et al. A simple estimation of transverse response of high-g accelerometers by a free-drop-bar method[J]. *Microelectronics Reliability*, 2009,49(1):66-73.
- [12] 黎渊. 三轴高g加速度计的测试理论与实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.
- [13] Zhang Zhenhai, Li Kejie. Design, simulation and multi-dimension coupling research of monolithic MEMS three-axis high-g accelerometer[C]// *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition*. Seogwipo-si:IEEE, 2007:280-284.
- [14] 钟良,赵海云. 压电加速度计横向灵敏度研究[J]. *传感器技术*, 2003,22(12):18-21. Zhong Liang, Zhao Haiyun. Research on transverse sensitivity of the piezoelectric accelerometers[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, 22(12): 18-21. (in Chinese)
- [15] Veldman C S. Implementation of an accelerometer transverse sensitivity measurement system[J]. *INCS-LI Measure*, 2013,8(2):40-44.
- [16] 刘佳钰,郑宾. 惯性加速度计横向灵敏度测量方法及特性分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2008,28(4):49-50. Liu Jiayu, Zheng Bin. The test method and analysis on characteristic of inertia accelerometer transverse sensitivity[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008,28(4):49-50. (in Chinese)
- [17] 彭孝东,张铁民,李继宇,等. 三轴数字MEMS加速度计现场标定方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2014,34(3):544-547. Peng Xiaodong, Zhang Tiemin, Li Jiyu, et al. Field calibration of three-axis MEMS digital acceleration[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014,34(3):544-547. (in Chinese)



第一作者简介:林然,男,1983年11月生,博士生。主要研究方向为高g值传感器与高冲击校准技术。曾发表《高g值加速度计高冲击校准技术综述》(《探测与控制学报》2015年第37卷第4期)等论文。

E-mail:linhu3456@163.com

通信作者简介:张振海,男,1974年5月生,日本名古屋大学博士、博士后、副教授。主要研究方向为军用特种MEMS/NEMS微纳传感与测控技术,全景视觉与图像处理,无人系统环境感知、识别与控制,微机器人编队协同与智能微系统,生物MEMS、微纳机器人与生物医学机器人化微纳操作等。

E-mail:zhzhang@bit.edu.cn