DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2108006

冲击力传感器灵敏度系数的三轴同步校准方法研究*

高 猛1,徐宇珩2,巨荣博3,郭伟国1,杜 鹏1

(1. 西北工业大学航空学院 西安 710072; 2. 中航工业西安飞行自动控制研究所 西安 710065;3. 航空工业飞机强度研究所 西安 710065)

摘 要:为了对三轴力传感器灵敏度系数进行冲击校准,提出一种斜端面 Hopkinson 杆实现可计量的三轴冲击力脉冲方法。通过数值计算,分析斜面角度 θ 对 Z-轴计量误差的影响。利用直端面 Hopkinson 杆对 B25B 型三轴力传感器 Z-轴单轴校准,分析 两种构型子弹冲击下传感器的频率特性,建立子弹构型与加载信号带宽之间的关系。通过斜端面 Hopkinson 杆,对 B25B 型三 轴力传感器进行三轴同步冲击校准,利用最小二乘法对其进行解耦分析,结果表明, X-、Y-轴之间具有正耦合关系, X-、Z-及 Y-、Z-轴之间具有负耦合关系,且灵敏度系数随冲击速度线性变化。最后,将同步校准结果用于 Z-轴方向力的测试,结果表明,相比于单轴校准,同步校准结果计算的力更接近于实测力,最大相对误差为1.73%。

关键词: Hopkinson 杆;三轴冲击力传感器;同步冲击校准;动态解耦

中图分类号: TP212 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on the triaxial synchronous calibration method of sensitivity for the impact force sensor

Gao Meng¹, Xu Yuheng², Ju Rongbo³, Guo Weiguo¹, Du Peng¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China; 3. Aviation Industry Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To calibrate the sensitivity coefficient of the triaxial force sensor, a new method for achieving a measurable triaxial impact force pulse with an inclined end Hopkinson bar is proposed. The influence of oblique angle θ on *Z*-axis measurement error through numerical calculation is analyzed. The vertical end Hopkinson bar is used to calibrate the *Z*-axis sensitivity of the B25B triaxial force sensor. The frequency characteristics of the sensor under the impact of the two configurations of bullets is analyzed. The relationship between the bullet configuration and the bandwidth of the loaded signal is established. Triaxial synchronous shock calibration for B25B triaxial force sensor is achieved by the inclined end Hopkinson bar, and the decoupling analysis realized by using the least square method. Results show that the sensor has a positive coupling relationship between the *X*-axis and *Y*-axis, and a negative coupling relationship between the *X*- $_{x}$ and *Y*- and *Z*-axis. The sensitivity coefficient varies linearly with the impact speed. Finally, the synchronous calibration result is used to test the force in the *Z*-axis direction. Compared with the uniaxial calibration, results show that the force calculated by the synchronous calibration result is closer to the measured force. The maximum relative error is 1.73%.

Keywords: Hopkinson bar; triaxial impact force sensor; synchronization shock calibration; dynamic decoupling

0 引 言

三轴冲击力传感器是一种可同时检测空间三维 力随时间变化的传感器。在航空、航天发动机推动力 测试、飞机起落架着陆冲击力测试、风洞实验气动力 测试^[1]及汽车碰撞冲击力测试^[2-3]等方面有着广泛的 应用。由于受敏感原理、制造工艺、弹性单元结构及 检测模型的影响^[4-6],三轴力传感器各轴之间存在高 度耦合测量误差,因此,对三轴冲击力传感器同步冲

收稿日期:2021-05-27 Received Date: 2021-05-27

^{*}基金项目:国家自然科学基金 (11872051,12072287)项目资助

击校准和轴间动态解耦,尤其是在宽频带、大量程下的冲击校准和解耦已成为传感器使用和研发亟需解 决的问题。

目前,多轴力传感器主要以静态校准方法为 主[7-10]。通过将力传感器安装于固定基座上,在传感器 上固定一加载帽。用钢丝将砝码与加载帽连接,可实 现传感器一维或多维同步加载。利用最小二乘法、神 经网络等方法实现传感器解耦,求解过程中认为传感 器灵敏度系数不随加载条件而变化(对于小量程静态 校准是成立的)。该加载方式可实现 10² N 的静态加 载,主要针对小量程多轴力传感器同步校准。石中盘 等[11]为了得到更高的加载力,将液压加载系统作为加 载手段,对大量程六维力传感器进行静态解耦,最大加 载力也只有10³N左右,这对于量程为吨级的冲击力传 感器,仍然无法满足校准需求。而且,Park 等^[12]指出, 力传感器性能参数受加载频率及激励脉冲构型的影 响,动态环境下传感器性能参数与静态相比会有较大 的差别。同时,文献[13-14]发现在动态环境下,传感 器轴间耦合效应大于静态环境下的耦合效应。因此, 为了得到三轴冲击力传感器在冲击环境下输入-输出关 系,必须对其进行冲击校准和动态解耦。目前,对于多 轴力传感器动态同步校准方法研究较少,且还不成熟, 但也有些相关文献进行报道。Meymand 等^[15]提出一种 类似转动台的校准装置,校准范围为8 kN,通过设计多 维冲击力传感器安装方式,可实现六维力/力矩传感器 同步校准。Park 等^[12]基于振动台,通过设计不同的工 装,对6维力/力矩传感器进行动态校准,最大校准力 为200 N,频率范围为20~1000 Hz。校准结果表明,传 感器灵敏度系数随加载频率的增大而减小。Garland 等[16],通过将单轴冲击锤加载方向与传感器轴向设置 一定角度,实现传感器轴向和切向两个方向的同时加 载,并通过两个轴输出信号比值来衡量传感器轴间耦 合效应。对于大量程的冲击力传感器来说,上述校准 方法主要存在以下两个问题,1)校准量程有限,无法实 现大载荷加载下传感器的动态性能测试;2)频带较窄, 无法实现传感器高频加载,实现全频段冲击性能测试。 为此,需寻求一种新的加载方式,实现对大量程的三轴 冲击力传感器动态校准及解耦。

本文借鉴 Hopkinson 杆在高 g 值加速度计校准方面的研究^[17-19],提出一种斜端面 Hopkinson 杆,将一维加载脉冲在传感器 X-、Y-、Z-3 个轴同步分解,实现幅值 10⁵ N,脉宽微秒级、带宽 10⁵ Hz 的同步冲击校准。并建立一种考虑轴间耦合作用及灵敏度系数随加载速度变化的输入-输出模型,利用最小二乘法实现传感器轴间解耦分析。

1 力传感器灵敏度系数冲击校准

1.1 力传感器单轴冲击校准

分离式 Hopkinson 压杆因其加载端力信号的可测 量、Färm^[20]及Nuffel等^[21]将其应用到单轴力传感器冲击 校准中,施加到传感器上的力可溯源到透射杆上应变片 测得的应变信号及透射杆截面积。然而,力传感器在实 际使用时,通常一端固定于基座,而另一端为受载端。为 了更接近传感器实际使用过程中受载方式,将文 献[20-21]中的校准方法做进一步改进,基本原理如图1 所示。力传感器受载端与校准杆端面紧密相贴,另一端 固支。通过压缩空气炮发射一锥形子弹,并与安装在校 准杆一端的波形整型器发生正碰,产生类似半正弦压缩 波,并沿杆轴传播,子弹冲击速度通过两光电门测得。通 过改变气压、子弹构型及波形整型器材料可实现构型(形 状、幅值、脉宽)可控的加载脉冲。当入射波传播到传感 器受载端时,由于校准杆与传感器接触面两端波阻抗不 匹配,一部分入射波反回校准杆,另一部分经透射传递到 传感器内部,引起敏感元件变形,进而转化为电压信号 (压阻式传感器)输出。入射波、反射波通过粘贴在校准 杆中间位置的高精度电阻应变片测得,其敏感栅长为 3 mm,频响高达 300 kHz^[22],可完整记录输入到传感器的 所有频率信号。因校准杆为直径较小的金属杆,且锥形 子弹激发的波为类似半正弦波,可忽略波传播过程中的 弥散和衰减[23],认为杆中间位置应变片采集应变信号与 杆端相同。





因校准杆与传感器接触面两端力相等,施加到传感 器受载端的力为:

$$F(t) = \left[\sigma_{\rm I}(t) + \sigma_{\rm R}(t)\right]A\tag{1}$$

其中, $\sigma_{I}(t)$ 、 $\sigma_{R}(t)$ 、A分别为入射、反射应力及校准 杆截面积。根据胡克定律及应变片测得的电压信号得, 入射、反射应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{I}(t) = E \cdot \varepsilon_{I}(t) = E \cdot \frac{U_{I}(t)}{S_{g}K_{g}} \\ \sigma_{R}(t) = E \cdot \varepsilon_{R}(t) = E \cdot \frac{U_{R}(t)}{S_{g}K_{g}} \end{cases}$$
(2)

式中: E 为校准杆弹性模量; $U_{I}(t)$ 、 $U_{R}(t)$ 为应变片测得 的入射、反射电压信号; $\varepsilon_{I}(t)$ 、 $\varepsilon_{R}(t)$ 为对应的入射、反射 应变信号。 S_{g} 、 K_{g} 分别为应变片灵敏度系数及信号放大 系数。联立式(1)、(2) 可准确测量施加到传感器受载端 的冲击力信号,并可准确溯源到杆端应力和校准杆截面 积,杆端应力通过粘贴高精度电阻应变片测得。

1.2 三轴冲击力传感器同步冲击校准

由 1.1 知, Hopkinson 杆可实现一维冲击力脉冲加载,但如何将一维冲击力脉冲沿加载端正交分解在 X-、 Y-、Z-3 个测量轴,且分解力 $F_x(t)$ 、 $F_y(t)$ 、 $F_z(t)$ 可被计量是实现三轴力传感器同步校准的关键。为此,借助斜端面 Hopkinson 杆,将杆轴向的一维加载脉冲沿斜面切向和法向正交分解,根据传感器的安装方位不同,实现双轴、三轴同步冲击加载,如图 2 所示。图 2(a)中传感器受载端与斜面固连,另一端固支,Y-、Z-轴分别指向斜面切向和法向,通过加载波在斜面的分解,施加到传感器各轴上的力由式(3)可得。

$$\begin{cases} F_{X}(t) = 0\\ F_{Y}(t) = [\sigma_{I}(t) + \sigma_{R}(t)]A\cos(\theta)\\ F_{Z}(t) = [\sigma_{I}(t) + \sigma_{R}(t)]A\sin(\theta) \end{cases}$$
(3)

若进一步将图 2(a) 中传感器绕斜面法向旋转一角 度 ω, 如图 2(b) 所示, 施加到传感器各轴上的力为:

$$\begin{cases} F_{X}(t) = \left[\sigma_{I}(t) + \sigma_{R}(t)\right]A\cos(\theta)\sin(\omega) \\ F_{Y}(t) = \left[\sigma_{I}(t) + \sigma_{R}(t)\right]A\cos(\theta)\cos(\omega) \\ F_{Z}(t) = \left[\sigma_{I}(t) + \sigma_{R}(t)\right]A\sin(\theta) \end{cases}$$
(4)



图 2 三轴力传感器校准原理



为了验证式(4)的准确性,通过 ls-dyna 有限元软件 分别对 $\theta=20^{\circ},\omega=30^{\circ}$ 和 $\theta=60^{\circ},\omega=30^{\circ}$ 两种工况进行数 值分析。图3为两种工况下,式(4)计算施加到传感器各 轴上的力与有限元模拟输出各轴上力的对比。从图3中 可以看出,各轴力的计算结果与直接输出之间相对误差 不超过4%,且 θ 越大Z轴方向的误差越小。这是因为在 斜面部分不同截面处广义波阻抗不匹配,波在斜面上传 播是一个复杂叠加的过程,当 θ 值越大,斜面沿杆轴向投 影越小,对于相同脉宽的加载波,越容易达到均匀加载, 对波的分解影响也越小。





1.3 三轴冲击力传感器输入-输出关系表达

尽管在静态校准中,学者们建立了各种各样的传感 器输入-输出模型,但均认为模型中灵敏度系数不随加载 条件变化而变化,但根据文献[12-14],显然这一假设对 动态加载是不成立的。为此本文提出一种考虑轴间耦合 作用及灵敏度系数为冲击速度函数的输入-输出关系,如 式(5)所示。

$$\boldsymbol{U} = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{v}) \cdot \boldsymbol{F} \tag{5}$$

式中: $U_{3\times1} = U_i$ 为3个轴输出电压向量; $F_{3\times1} = F_i$ 为3个 轴输入力向量; $S_{3\times3}(v) = S_{ij}(v)$ 为灵敏度系数矩阵,第1 个下标代表输出轴,第2个下标代表输入轴,其中,主对 角线元素表示各轴主灵敏度系数,非主对角线元素表示 交叉灵敏度系数,且矩阵中各元素为冲击速度的函数, *i,j=X,Y,Z*。式(5)中包含9个未知参数,而每次校准实 验可以得到3组输入、输出数据,为此,至少需要3次实 验来求9个参数。现以p次实验为例,在冲击载荷下,传 感器输出电压信号可表示为(6)式。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{1}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{U}_{2}^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{U}_{p}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{1}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{F}_{2}^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{F}_{p}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{S}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$
(6)

根据最小二乘法可得灵敏度系数矩阵为:

 $[S^{T}] =$

$\left[\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{F}_2^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \cdots \right]$	$\boldsymbol{F}_{p}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{1}^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{F}_{2}^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{F}_{p}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \right)^{\mathrm{T}}$	$\begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{F}_2^{\mathrm{T}} & \cdots \end{bmatrix}$	$oldsymbol{F}_{p}^{\mathrm{T}} \left[egin{matrix} oldsymbol{U}_{1}^{\mathrm{T}} \ oldsymbol{U}_{2}^{\mathrm{T}} \ dots \ oldsymbol{U}_{p}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \left[egin{matrix} oldsymbol{U}_{1}^{\mathrm{T}} \ dots \ oldsymbol{U}_{p}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} ight]$
			(7)

2 实验分析

实验所用压阻式三轴冲击力传感器为 B25B 型,由 航空工业飞机强度研究所(623 所)提供(中航电测研 制),其主要性能参数如表1 所示,灵敏度系数为单轴 依次标定结果。冲击校准系统如图4 所示,校准杆为 7075 铝合金方杆,截面尺寸为20 mm×20 mm,长为 1 200 mm。传感器加载端与校准杆通过螺纹固连,另 一端固定于基座上。为保证实验数据有效、准确,每组 实验重复3次。

表 1 B25B 三轴力传感器性能参数



测量轴	灵敏度系数 /(mV/kN)	一阶谐振 频率/kHz	量程 /kN	供电电 压/V	精度 /%FS
Х-	0.48	12. 275	15	10	2
<i>Y</i> -	0.48	12. 275	15	10	2
<i>Z</i> -	0. 223	12. 273	30	10	2



图 4 三轴力传感器动态校准系统 Fig. 4 Dynamic calibration system of the triaxial force sensor

2.1 三轴力传感器 Z-轴准静态、冲击校准

在同步校准之前,首先对传感器 Z-轴进行准静态和冲击校准(因 Z-轴加载比较方便,而另外两个轴单向加载需设计相应的工装)。准静态校准实验装置为电子万能试验机 DNS100,最大拉伸/压缩载荷为 100 kN。图 5 为供电电压 10 V、压缩速度分别为 0.5 mm/min 和 1 mm/min 下传感器输入力及输出电压曲线。在曲线上选取不同时刻输入的力信号及对应输出电压信号,并对 其线性拟合。最终得到 0.5 mm/min、1 mm/min 加载速度下,传感器的 Z-轴灵敏度系数分别为 0.217 mV/kN、0.227 mV/kN、与厂商给定值的相对误差分别为-2.7%、1.8%。 Z-轴单轴冲击校准装置示意图如图 1 所示,校准杆端面与传感器加载端紧密贴合,加载方向与力传感器 Z-轴同轴。超动态应变仪连接应变片通道的桥压、增益、低通滤波截止频率分别为 2 V、100 倍、100 kHz。连接传感器 X-、Y-、Z-轴的 3 个通道设置相同,桥压、增益分别为 10 V、20 倍,为了避免过度滤掉传感器输出信号,将低通滤波截止频率调至 F 档(2.5 MHz)。传感器、应变片的信号采样频率均为 10 MHz。光电门 1、2 分别记录子弹穿过的时间如图 6 所示,根据两束光之间的距离 Δs 及子弹穿过的时间差 Δt ,计算子弹撞击速度 $v = \Delta s / \Delta t$ 。为了分析频带宽度对传感器动态特性的影响,选取 1#和 2#两种不同锥度的子弹进行校准实验,如图 4 所示。图 7 为



Fig. 5 The quasi-static calibration result of the Z-axis of the force sensor



图 6 子弹通过两光电门时间曲线

Fig. 6 Time curves of the bullet passing through two photogates

对传感器 Z-轴冲击下,应变片及传感器 3 个测量轴输出 电压信号。可以看出,因轴间耦合作用,即使 X-、Y-轴没 有输入冲击力载荷,同样有明显的信号输出。

对两种构型子弹加载下,传感器 Z-轴输入、输出信号进行快速傅里叶变换(FFT),如图 8 所示。图 8(a)中 锥度为 140.6°(1#)和 109°(2#)的子弹所激发输入信号 带宽分别为 30 kHz 和 12.27 kHz。可以看出,子弹锥度 越大,所激发带宽越宽。已知传感器 Z-轴一阶固有频率



Fig. 7 The output curves of Z-axis dynamic calibration

为 12. 273 kHz,而锥度为 140. 6°的子弹输入脉冲信号 在 12. 27~25 kHz 内有较高的幅值,将引起传感器发生 谐振,使得输出信号在该频率范围内(为 15.8 kHz 时) 出现较大振幅,如图 8(b)所示。然而,锥度为 109°的 子弹激发输入信号带宽小于 Z-轴一阶固有频率,可在 不引起传感器谐振的情况下,最大限度的对传感器输 入不同频率成分的激励信号,实现全频带动态性能 测试。



Fig. 8 The FFT of the Z-axis input and output signals

两种构型子弹加载下,传感器输入、输出曲线如图9 所示。可以看出,因传感器阻尼比较低,1#子弹冲击所产 生高频信号足以引起传感器发生谐振,因输出信号中包 含引起谐振的频率成分,导致传感器输入、输出波形相差 较大。通过对图9(a)中波形分析,谐振频率约为 16.3 kHz,与图8(b)中谐振频率接近。而2#子弹加载 下,输入信号带宽小于传感器一阶固有频率,输入、输出 波形基本相同。因此,本文选取2#子弹,对传感器灵敏 度系数进行校准。不同冲击速度下,*Z*-轴动态灵敏度系 数时显小于准静态校准结果,并且随着输入幅值的增大, 灵敏度系数有所减小。图10为速度13.68 m/s冲击下 *Z*-轴校准后的输入、输出力曲线,可以看出校准后的输出 曲线与输入曲线重合良好。

2.2 力传感器三轴同步冲击校准及结果分析

根据厂商给出传感器的一阶固有频率及上节中不同 子弹输入信号的频谱分析,选取 2#子弹进行三轴同步冲 击校准实验。同步校准装置如图 4 所示。选取 θ 为 60° 的斜面杆,在旋转角度 ω 分别为 45°、60°、150°、235°、 338°下分别进行三组实验。不同速度、不同 ω 对应 X-、



图 10 2#子弹在 v=13.68 m/s下 Z-轴输入与校准后 输出力对比

Fig. 10 The comparison of the Z-axis input and the output force after calibration under v = 13.68 m/s of the 2# bullet

Y-、Z-轴输入、输出结果如表 3 所示。

将表 3 中各轴的输入、输出数据带入(7)式,得到传感器在三组数据下的灵敏度系数如表 4 所示。从表 4 中可以看出,三轴同步校准的主灵敏度系数 S_{xx}、S_{yy}、S_{zz}

Table 2	The value of the quasi-s	static and shock calibra	tion of the Z-axis sensitiv	vity of the sensor
	加载速度/(mm/min)	加载时间/s	加载幅值/kN	Z-灵敏度/(mV/kN)
准静态校准	0.5	38	27.7	0. 217
	1.0	20	24.5	0. 227
	速度/(m/s)	输入脉宽/µs	输入幅值/kN	Z-灵敏度/(mV/kN)
动态校准	13.68	177	18.3	0. 193
	19.65	175	24.9	0. 190
	29.08	172	34.3	0. 183

表 2 传感器 Z-轴灵敏度系数准静态、冲击校准值

表 3 三轴冲击力传感器各轴输入-输出结果

Fable 3	Input-output result	s of	each	axis of	the	triaxial	impact	force	sensor
---------	---------------------	------	------	---------	-----	----------	--------	-------	--------

伯旦	油田 (((-))	夹角	输入/kN				输出/V		
编号	述度/(m/s)	ω ∕(°)	X-轴	<i>Y-</i> 轴	<i>Z</i> -轴	X-轴	<i>Y</i> -轴	Z-轴	
	11.37	45	-5.38	-5.38	-13.17	-0.044	-0.043	0.053	
	16.78	60	-9.20	-5.31	-18.41	-0.075	-0.041	0.076	
第1组	11.12	150	-3.72	6.44	-12.88	0.031	-0.050	0.052	
	9.25	235	5.07	3. 55	-10.72	0.039	0.029	0.044	
	8.71	338	2.18	-5.40	-10.08	-0.017	0.043	0.041	
	18.24	45	-8.17	-8.17	-20.02	-0.064	-0.065	0.079	
第2组	18.52	60	-10.16	-5.86	-20.32	-0.078	-0.044	0.083	
	23.12	150	-6.81	11.80	-23.59	0.054	-0.089	0.097	
	16.11	235	8.36	5.85	-17.67	0.066	0.048	0.072	
	16.17	338	3.84	-9.50	-17.74	-0.031	0.075	0.071	
	23.41	45	-9.76	-9.76	-23.91	-0.075	-0.076	0.094	
	17.91	60	-9.82	-5.67	-19.65	-0.074	-0.043	0.079	
第3组	25.96	150	-7.66	13.26	-26.52	0.058	-0.102	0.106	
	30.15	235	14. 57	10.20	-30.80	0.111	0.079	0. 123	
	19.09	338	4. 53	-11.22	-20.96	-0.035	0.087	0.083	

均为正,且随冲击速度的增大而减小。而交叉灵敏度系数*S₁₁x*为正、*S_{2x}*为负表明*X*-轴方向的激励使*Y*-轴输出增大,使*Z*-轴输出减小;*S_{xy}*为正,*S_{2y}*为负表明*Y*-轴方向的激励使*X*-轴输出增大,使*Z*-轴输出减小;*S_{xz}、S_{yz}*为负表明*Z*-轴方向的激励使*X*-、*Y*-轴输出均减小。即*X*-、*Y*-轴 之间为正耦合关系,*X*-、*Z*-及*Y*-、*Z*-轴之间为负耦合关系。 若认为传感器交叉灵敏度主要因三轴非正交安装产生, 则各敏感轴安装误差如图 11 所示,其中,XYZ 为输入力 坐标系,即理想情况下敏感轴方向,为正交坐标系, xyz 为传感器实际敏感轴坐标系, α_{ij} 表示输入力方向与实际 敏感轴方向的夹角,其中,*i* 表示输入力方向,*j* 表示敏感 轴方向。经上述分析可知,输入力方向与敏感轴方向夹 角关系为, α_{xy} 、 α_{yx} 小于 90°, α_{xx} 、 α_{xx} 、 α_{zy} 大于 90°, 可 初步判断传感器实际敏感轴相对于输入力轴的位置。

表 4 三轴冲击力传感器灵敏度系数校准结果 Ta ble 4 Calibration results of sensitivity of the triaxial impact force sensor

20日日	平均冲击				灵敏	度系数/(mV	/kN)			
姍丂	速度/(m/s)	S_{XX}	S_{XY}	S_{XZ}	S_{YX}	S_{YY}	S_{YZ}	S _{ZX}	S_{ZY}	S_{ZZ}
第1组	9.45	0. 427	0. 028	-0.020	0.055	0.456	-0.046	-0.074	-0.097	0. 272
第2组	18.43	0.412	0.041	-0.024	0.037	0.421	-0.028	-0.049	-0.057	0. 245
第3组	23.30	0.404	0.031	-0.021	0.026	0.418	-0.023	-0.041	-0.052	0. 236



图 11 三轴非正交安装示意图

Fig. 11 Schematic diagram of three-axis nonorthogonal installation

为了提高三轴力传感器在不同冲击速度下的测量精度,需建立灵敏度系数随冲击速度变化的函数关系。 图 12 为灵敏度系数随冲击速度变化曲线,可以看出,灵 敏度系数随冲击速度具有线性变化趋势,其关系可表示 为式(8),*a* 表示灵敏度系数随冲击速度的变化率,*b* 表示 速度为零时的灵敏度系数,即静态校准下的灵敏度系数。 不同冲击速度下的*a*、*b* 值如表 5 所示,通过表 5 可以准确 获得不同冲击速度下力传感器的灵敏度系数矩阵。





表 5 a, b参数拟合 Table 5 Fitting of a and b parameters

Tuble e	I tung of a una o pe	il uniceer 5
灵敏度系数	a	b
$S_{\chi\chi}$	-0.001 7	0.4427
S_{XY}	0.000 4	0.027 0
S_{XZ}	-0.000 1	-0.019 6
S_{YX}	-0.002 1	0.074 9
S_{YY}	-0.002 9	0.480 9
S_{YZ}	0.001 7	-0.061 4
S_{ZX}	0.002 4	-0.096 2
S_{ZY}	0.003 4	-0.126 7
S_{ZZ}	-0.002 7	0.296 2

为了对灵敏度系数校准结果进行验证,将安装角度 ω 旋转为 30°,斜面角度 θ 仍然为 60°,在速度分别为 10.46、17.61、27.13 m/s 冲击下进行 3 组实验,这 3 组实 验不参与对灵敏度系数矩阵的求解,将不同速度下传感 器 Z-轴单轴校准及同步校准结果用于 Z-轴力的计算,计 算结果如表 6 所示,可以看出,同步校准灵敏度系数用于 力测量的相对误差明显低于单轴校准,最大相对误差为 1.73%。

表 6 单轴校准及同步校准所测 Z-轴力与实际输入 Z-轴力 相对误差

Table 6	The relative error between the measured Z-ax	is
force a	nd the actual input Z-axis force for single-axis	
	calibration and synchronous calibration	

速度 /(m/s)	实际输 入力 /kN	单轴校 准所测力 /kN	单轴校准 所测力相 对误差/%	同步校准 所测力 /kN	同步校准所 测力相对误 差/%
10.46	12. 12	12.95	6.85	12.33	1.73
17.61	19.31	20.00	3.57	19.11	-1.04
27.13	27.71	30.32	9.42	28.10	-1.41

3 结 论

本文采用斜端面 HPB 杆加载模式,使单轴冲击矢量 力分解成二轴或三轴的方法,实现对三轴冲击力传感器 灵敏度同步校准。通过 Ls-dyna 有限元软件对该方法的 有效性进行系统分析。结合对商用 B25B 型三轴冲击力 传感器 Z-轴的准静态、动态及三轴同步冲击校准实验分 析,主要结论为:

1) HPB 斜端面杆可将轴向一维冲击力脉冲沿斜面 法向及切向矢量分解,根据传感器相对杆端斜面的安装 方位关系,可实现对传感器灵敏度系数的二轴和三轴同 步冲击校准,进而实现三轴传感器轴间解耦关系的测试。

2)不同几何构形的子弹可产生带宽不同的冲击加载 脉冲。对锥形子弹来说,锥度越大,脉冲带宽越宽。对于 不同锥度的子弹, Hopkinson 杆产生的脉冲信号幅值可 达 10⁵ N、带宽可达 10⁵ Hz,可实现对大量程、宽频带特性 的冲击力传感器动态性能测试。

3) B25B 型三轴力传感器在 Z-轴单轴校准下,冲击 灵敏度系数明显小于静态校准结果,且随着冲击速度的 增大,冲击灵敏度系数有所减小。当速度达到 29.08 m/s 时,冲击灵敏度系数与静态灵敏度系数之间的最大相对 差值为 21.9%。

4)对 B25B 型三轴冲击力传感器实测结果表明,各 轴主灵敏度系数大于各轴单独计算(不考虑耦合作用) 时的灵敏度系数;且 X-、Y-轴之间为正耦合关系,X-、Z-及 Y-、Z-之间为负耦合关系。将单轴依次校准和三轴同步 校准结果用于对 Z-轴所测力的对比,发现同步校准结果 所测力误差最大为 1.73%,远小于单轴依次校准结果所 对应的误差。

参考文献

[1] 贺德馨.风洞天平[M].北京:国防工业出版社, 2001.

HE D X. Wind tunnel balance [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2001.

- [2] KRUMMENACHER G, CHENG S O, KOLLER S, et al. Wheel defect detection with machine learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(4):1176-1187.
- [3] LIN G, PANG H, ZHANG W, et al. A self-decoupled three-axis force sensor for measuring the wheel force [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2014, 228(3):319-334.
- BROOKHUIS R A, DROOGENDIJK H, BOER M D, et al. Six-axis force-torque sensor with a large range for biomechanical applications [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2014, 24 (3): 595-598.
- [5] KANG M K, LEE S, KIM J H. Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor[J].
 Sensors & Actuators A Physical, 2014, 209:41-51.
- [6] TAVAKOLPOUR-SALEH A R, SADEGHZADEH M R. Design and development of a three-component force/ moment sensor for underwater hydrodynamic tests [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2014, 216:84-91.
- [7] LIANG Q, WU W, COPPOLA G, et al. Calibration and decoupling of multi-axis robotic force/moment sensors[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49(feb.); 301-308.
- [8] 崔晶,张锦涛,宋婷,等. 三轴力解耦测量的高灵敏 触觉传感器[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(11): 2410-2419.
 CUI J, ZHANG J T, SONG T, et al. High-sensitive tactile sensor with triaxial force decoupling measurements[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(11):2410-2419.
- [9] 姚斌,张建勋,代煜,等.用于微创外科手术机器人的多维力传感器解耦方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(1):150-156.
 YAO B, ZHANG J X, DAI Y, et al. Research on

decoupling method of multi-dimensional force sensor used in minimally invasive surgical robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1):150-156.

[10] 周山,刘利平,高建宇,等.三维力传感器静态解耦方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(8):181-187.
ZHOU S, LIU L P, GAO J Y, et al. Research on static decouping algorithm for 3-axis wrist force sensor[J].

Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8):181-187.

- [11] 石中盘,赵铁石,厉敏,等.大量程柔性铰六维力传 感器静态解耦的研究[J].仪器仪表学报,2012, 33(5):1062-1069.
 SHI ZH P, ZHAO T SH, LI M, et al. Research on static decoupling of large range flexible joint six-axis force sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(5):1062-1069.
- [12] PARK Y K, KUMME R, KANG D I. Dynamic investigation of a binocular six-component force-moment sensor[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13:654-659.
- [13] 徐科军,杨双龙,张进,等.杆式风洞应变天平动态 实验、建模与补偿[J]. 仪器仪表学报,2009, 30(10):2123-2130.
 XU K J, YANG SH L, ZHANG J, et al. Dynamic experiment, modeling and compensation of bar-shaped strain gauge balance for wind tunnel[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10):2123-2130.
- YANG S, XU K. Numerical derivation-based serial iterative dynamic decoupling-compensation method for multiaxis force sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63 (12): 2950-2962.
- [15] MEYMAND S Z, AHMADIAN M. Design, development, and calibration of a force-moment measurement system for wheel-rail contact mechanics in roller rigs [J]. Measurement, 2016, 81:113-122.
- [16] GARLAND P P, ROGERS R J. Dynamic calibration of tri-axial piezoelectric force transducers[J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19(9):44-46.
- [17] 李玉龙,郭伟国,贾德新,等.高g值加速度传感器校 准系统的研究[J]. 爆炸与冲击,1997,17(1):90-96.
 LIYL, GUOWG, JIADX, et al. An equipment for calibrating high shock acceleration sensors[J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1): 90-96.
- [18] YUAN K, GUO W, SU Y, et al. Study on several key

problems in shock calibration of high-g accelerometers using Hopkinson bar [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2017, 258:1-13.

 [19] 郭伟国, 袁康博, 李鹏辉. 具有真三轴动态加载及 测试功能的 Hopkinson 压杆系统及方法: CN108548942A[P]. 2018.
 GUOWG, YUANKB, LIPH. Hopkinson pressure

bar system and method with true three-axis dynamic loading and testing functions: CN108548942A [P]. 2018.

- [20] FÄRM J. Split hopkinson pressure bar technique for dynamic calibration of force transducers [C]. XVII IMEKO World Congress on Metrology in the 3rd Millennium, Croatia, 2003, 418-421.
- [21] NUFFEL D V, PEIRS J, BAERE I D, et al. Calibration of dynamic piezoelectric force transducers using the hopkinson bar technique [C]. 15th International Conference on Experimental Mechanics Porto/Portugal, 2012: 341-342.
- [22] UEDA K, UMEDA A. Dynamic response of strain gages up to 300 kHz [J]. Experimental Mechanics, 1998, 38(2):93-98.
- [23] UEDA K, UMEDA A. Characterization of shock accelerometers using davies bar and strain-gages [J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(3):228-233.

作者简介



高猛,分别在2013年、2016年于中北大 学获得学士和硕士学位,现为西北工业大学 博士研究生,主要研究方向为多维力传感器 及加速度计校准方法研究。

E-mail: gaomeng891023@163.com

Gao Meng received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from North University of China in 2013 and 2016, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Northwestern Polytechnical University. His main research interests include the calibration method of multi-dimensional force sensor and accelerometer.



郭伟国(通信作者),2007 年于西北工 业大学获得博士学位,现为西北工业大学教 授、博士生导师,主要研究方向为极端环境 下材料的动态力学行为研究及 Hopkinson 杆 动态加载实验技术研究。

E-mail: weiguo@ nwpu. edu. cn

Guo Weiguo (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Northwestern Polytechnical University. His main research interests include dynamic mechanical behavior of materials in extreme environments and experimental technology of Hopkinson bar dynamic loading.