

doi: 10.7690/bgzd.2016.02.010

压电冲击传感器方向敏感量化分析研究

刘天国, 张 德, 赵宝林, 陶逢刚

(中国工程物理研究院电子工程研究所传感器与执行器中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对压电引信中的压电冲击传感器输出受到冲击加速度方向的影响, 提出一种评价压电冲击传感器方向敏感特性的方法。基于压电引信中压电传感器的工作原理和应用特点, 构建多向压电冲击加速度传感器多角度冲击响应输出数学模型, 并通过量化分析冲击传感器多角度冲击输出, 掌握单向、多向压电传感器的多方向冲击响应规律, 得到冲击传感器的最佳冲击方向。仿真结果表明: 多向压电冲击传感器方向敏感特性优于单向传感器, 方向敏感特性与传感器的各向灵敏度之比有关, 该评价方法可为压电引信研制提供理论依据。

关键词: 冲击传感器; 压电引信; 方向敏感; 量化分析

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

A Quantitative Study on Orientation Effect of Piezoelectric Impact Sensor

Liu Tianguo, Zhang De, Zhao Baolin, Tao Fenggang

(Center of Advanced Sensor & Actuator, Institute of Electronic Engineering,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The output of piezoelectric impact sensors used in piezoelectric fuse is influenced by the shock orientation, a quantitative analysis method of sensors orientation effect is proposed. Based on the working principle of piezoelectric sensors, a mathematical model of piezoelectric impact accelerometer's orientation output is constructed. Using this model, quantitative analysis of orientation effect on impact sensors is studied, and the directional response laws of piezoelectric sensors is obtained, the best impact orientation can be calculated. It's shown from the simulation experiment that the multi direction sensors are superior to single direction sensors, and orientation effect is related to the ratio of direction sensitivities, this evaluation method provides a theoretical basis for the development of piezoelectric fuse.

Keywords: impact sensors; piezoelectric fuse; orientation effect; quantitative analysis

0 引言

压电引信作为一种机电引信^[1], 目前具有不可替代的地位, 比纯机械式引信(如撞针式、惯性开关、冲击开关等)响应快, 具有工作可靠且结构简单的特点, 是引信系统中不可缺少的触发类引信。在研制中, 希望压电引信具有万向性^[2], 即以任意姿态、任意角度碰撞目标时给出触发信号。

压电冲击传感器作为压电引信的核心部件, 在碰撞目标过程中, 感受高冲击加速度, 及时、可靠地输出动作信号。而碰撞时受目标表面的形貌以及弹体落地姿态的影响, 无法保证冲击加速度的方向与传感器的敏感轴向一致, 故压电冲击传感器的输出受到方向的影响, 从而会影响引信的动作。为了增强压电引信万向性, 设计中采用多向敏感的压电冲击传感器代替初始的单向压电冲击传感器^[3], 但万向性提高还没有定量的研究。

与测试传感器的使用存在差异, 压电引信中的冲击传感器在碰撞时作为机电换能器, 与接收电路

配合使用^[4], 把各个方向的输出信号交由调理电路处理求和, 然后进行门限判断, 输出触发信号; 实现系统对角度的高敏感性, 从而提高工作可靠性。压电引信的万向性本质是使用的压电冲击传感器的方向敏感特性; 因此, 笔者对压电冲击传感器进行各个角度方向的冲击加速度输出响应建模, 研究传感器合成输出对方向性的敏感情况, 并提出一种评价压电冲击传感器方向敏感特性的方法。

1 压电冲击传感器

压电冲击传感器基于其核心敏感材料—压电材料的正压电效应而工作, 由基座、电极、压电元件、质量块、外壳等组成。在冲击过程中, 传感器内质量块敏感冲击加速度, 施加惯性力在压电元件上, 从而导致压电元件发生应变输出电信号, 该输出信号与冲击加速度成正比^[5-7]。压电冲击传感器输出检测有电荷、电压两种模式, 但输出规律是相同的, 笔者以电荷输出为例进行研究。传感器的电荷输出可用下式表示:

$$Q = S_0 a \quad (1)$$

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2015-11-10

作者简介: 刘天国(1984—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事传感器设计与应用、机电引信研制研究。

式中： Q 为传感器的输出电荷； a 为传感器敏感方向感受的冲击加速度； S_Q 为传感器的电荷灵敏度。

电压输出模式时，灵敏度用电压灵敏度表示。

2 压电冲击传感器方向响应输出模型

图 1 中传感器感受的冲击加速度为 a ，加速度方向与纵向即 Z 向的夹角为 α 。当 $\alpha=0^\circ$ 时，即为正碰，加速度方向在 X - Y 平面的投影方向与 X 向的夹角为 β ，则与 Y 向的夹角为 $90^\circ-\beta$ 。

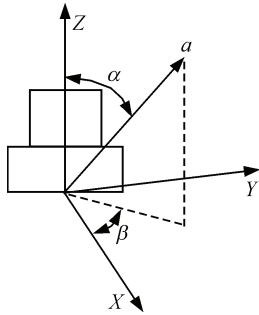


图 1 冲击加速度方向角度

考虑加速度的方向时，则其为向量，用式 (2) 矩阵表示，各分量为 3 个正交方向加速度分量，式中 a 为加速度幅值。

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \sin \alpha \cos \beta \\ a \sin \alpha \sin \beta \\ a \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

压电引信中使用的压电冲击传感器有单向、多向传感器两类，多向一般为三向传感器或三向安装，各个轴向有相应的灵敏度，去掉表示电荷的下标 Q ，灵敏度表示如下：

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{XX} & S_{XY} & S_{XZ} \\ S_{YX} & S_{YY} & S_{YZ} \\ S_{ZX} & S_{ZY} & S_{ZZ} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 S_{ij} 表示传感器 $i(X,Y,Z)$ 方向感应 $j(X,Y,Z)$ 方向单位加速度的输出。

当压电冲击传感器感受冲击加速 \mathbf{a} 时，输出 \mathbf{Q} 的数学计算模型为

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{pmatrix} = \mathbf{S} \times \mathbf{a} = \begin{pmatrix} S_{XX} & S_{XY} & S_{XZ} \\ S_{YX} & S_{YY} & S_{YZ} \\ S_{ZX} & S_{ZY} & S_{ZZ} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a \sin \alpha \cos \beta \\ a \sin \alpha \sin \beta \\ a \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

为提高压电引信的方向敏感能力，压电冲击传感器的信号由调理电路接收进行求和，则传感器的合成输出 Q 为向量 \mathbf{Q} 的 1-范数 (列范数)^[8]，即：

$$Q = \|\mathbf{Q}\|_1 = |Q_x| + |Q_y| + |Q_z| \quad (5)$$

压电传感器的横向灵敏度一般很低 ($<5\%$)，不考虑横向效应，则 $S_{ij}=0(i \neq j)$ ，单向 (Z 向敏感) 压电传感器的 S_{ZZ} 不为零，即为传感器的轴向灵敏度 S_z ，其他分量为零；三向压电传感器的 $S_{XX}=S_x$ 、 $S_{YY}=S_y$ 、 $S_{ZZ}=S_z$ ，为 3 个轴向的灵敏度，其他分量为零。

由式 (5)，对于单向压电冲击加速度传感器，电荷灵敏度为 S_z ，感受冲击加速度幅值 a 时，输出电荷

$$Q_0 = S_z a \cos \alpha \quad (6)$$

对于多向 (三向) 压电冲击加速度传感器， Z 向电荷灵敏度为 S_z ， X 向电荷灵敏度为 S_x ， Y 向电荷灵敏度为 S_y ，感受冲击加速度幅值 a 时，合成输出电荷

$$Q_1 = S_x a \sin \alpha \cos \beta + S_y a \sin \alpha \sin \beta + S_z a \cos \alpha \quad (7)$$

3 仿真实验与分析

由式 (6) 可以看到，单向压电传感器的输出只与角度 α 有关，而三向传感器的合成输出与角度 α 、 β 有关，当纵向灵敏度 S_z 相同时，三向压电加速度传感器的方向敏感特性优于单向传感器；另式 (6) 是式 (7) 的一种退化情况，即 $S_x = S_y = 0$ 时的情景。

三向压电加速度传感器分为三向集成式和三向安装式，各向灵敏度存在差异。

研究三向压电加速度传感器方向敏感特性时，传感器主敏感轴 (最大灵敏度轴) 为 Z 向，引入参数 r 、 s ，表示 X 、 Y 向灵敏度与 Z 向灵敏度相对关系， $S_x = rS_z$ ， $S_y = sS_z$ ($0 \leq r, s \leq 1$)，则输出为

$$Q_2 = S_z a (r \sin \alpha \cos \beta + s \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha) \quad (8)$$

另用无量纲 k 来定义传感器的方向敏感系数，物理意义为相对正碰时的输出值，相同方向时， k 值越大表示方向敏感性能越好， k 用下式表示。

$$k = \frac{Q_2}{aS_z} = r \sin \alpha \cos \beta + s \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \quad (9)$$

当 r 、 s 均为 0 时，传感器为单向传感器，只与纵向角度 α 有关，方向敏感特性为随 α 变化的曲线，如图 2(a)；当 r 、 s 中至少一个不为零时，传感器为两向敏感或三向敏感，传感器输出合成灵敏度与 2 个角度都有关系，如图 2(b)、(c)、(d)，方向敏感特性为随 2 个角度变量变化的曲面。

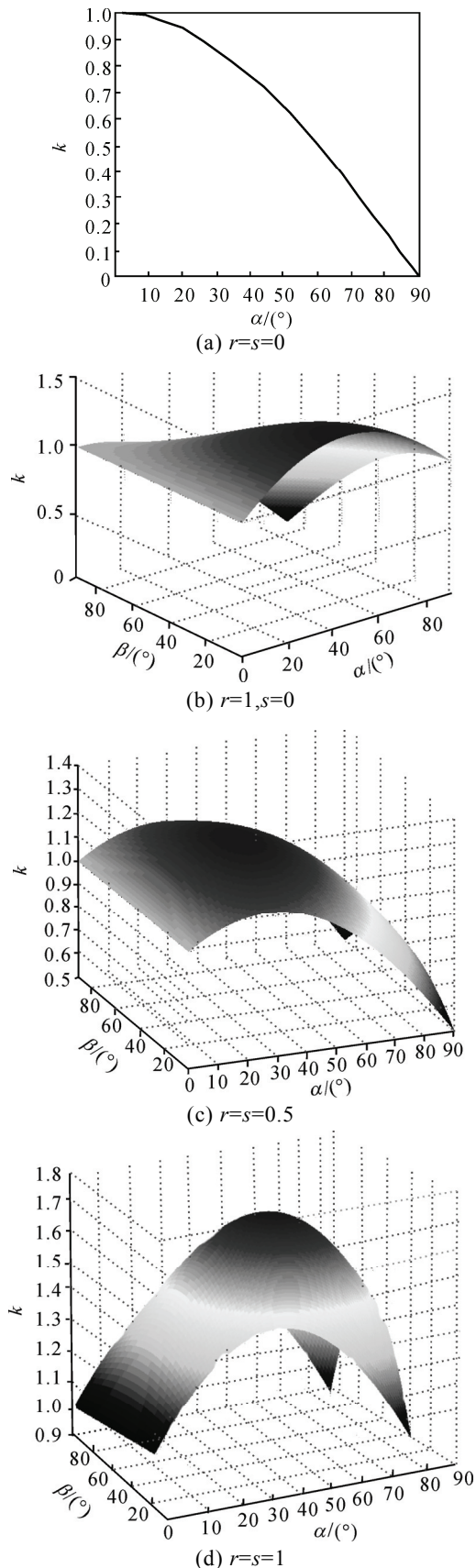


图 2 压电冲击传感器的方向敏感特性

由图 2(a)可见：单向压电加速度传感器的合成

方向敏感系数 k 在 0 与 1 之间，与角度 α 呈余弦关系；当集成其他方向敏感时， k 会超过 1，斜碰时 ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$, $0^\circ < \beta < 90^\circ$) 由于各个方向的集成作用，大大增强了传感器的方向敏感性。不同 r, s 对应的方向敏感系数不同， r, s 增加时，方向敏感性增强。

对式 (9) 进行分析，当 $\alpha_0 = \arctan \sqrt{r^2 + s^2}$ ， $\beta_0 = \arctan(s/r)$ 时，方向敏感系数 k 取得最大值 $k_p = \sqrt{1+r^2+s^2}$ ，该方向为三向压电冲击传感器最大输出对应冲击加速度方向。

如图 3，三向压电冲击传感器最佳冲击方向的确定方法为：建立沿 X, Y, Z 向长度分别为 $r, s, 1$ 的长方体模型，过 O 点长方体的对角线方向即为最佳冲击方向，此时压电冲击传感器的输出最大，方向敏感系数值为对角线的长度。

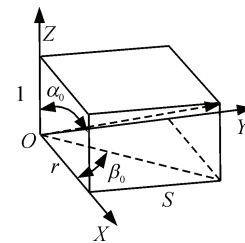


图 3 传感器最佳冲击方向示意图

若为各向灵敏度相当的三向压电冲击传感器时，即 $r=s=1$ 时，长方体变为立方体， $\alpha_0 = 54.736^\circ$ ， $\beta_0 = 45^\circ$ ， $k_p = \sqrt{3} = 1.732$ ，若为单向压电冲击传感器，此时 $k' = \cos \alpha_0 = 1/\sqrt{3}$ ，为三向压电传感器相对输出的 1/3。

4 结论

仿真结果表明：相同条件下，方向敏感系数越大，传感器的方向敏感性越好；三向压电传感器方向敏感性能优于单向传感器，且传感器的方向敏感系数与三轴向的灵敏度之比有关，当各方向灵敏度相当时，方向性最好；三向压电冲击传感器方向敏感系数最大值为 1.732，相对自身轴向正碰时提高 73.2%，相对单向压电冲击传感器相同条件下提高 2 倍；通过量化分析研究冲击传感器的方向敏感特性，可为压电引信的研制提供理论依据。

参考文献：

[1] 吕东升, 张怀伟, 杨理明. 引信之三: 触发引信篇[J]. 轻兵器, 2003(7): 44-46.

[2] 石庚辰, 王忠洲, 李科杰. 信万向触发起爆技术研究[J]. 兵工学报, 1996, 17(3): 270-273.