

文章编号 1004-924X(2019)04-0901-10

## 垫圈式压电六维力传感器静态灵敏度解析

刘俊\*, 徐军领, 李敏, 秦岚, 刘京诚, 张登卓  
(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**为实现基于垫圈式压电六维力传感器灵敏度指标的多结构参数设计与优选,必须开展传感器的静态灵敏度解析数学模型研究。首先,分析了传感器的结构特点和工作原理,根据载荷在传感器内部的传递路径推导其静态灵敏度解析数学模型;然后,使用解析数学模型和基于 ANSYS 软件的数值模型对 9 组不同结构参数模型分别进行了解析计算和数值模拟,在运用统计学理论对两种方法得到的结论进行分析的基础上,验证了解析数学模型的有效性;最后,引入正交试验,结合解析数学模型研究了多个结构参数对传感器灵敏度的影响规律,优选了传感器结构参数并研制了实验样机,完成了静态灵敏度标定实验。研究表明:垫圈式压电六维力传感器的解析数学模型与数值模型之间的综合相关系数为 0.988;实验原型相对于解析数学模型和数值模型的平均载荷传递系数分别为 0.73 和 0.75;解析数学模型、数值模型和实验原型的综合各向同性度分别为 0.71,0.71 和 0.67,3 种模型对传感器的灵敏度研究结论一致。以解析数学模型为基础的正交试验可实现对该类传感器的多参数主动设计和优选。

**关键词:**六维力传感器;灵敏度;解析数学模型;正交试验

**中图分类号:**TP212.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192704.0901

### Static sensitivity analysis of washer-type piezoelectric six-axis force sensor

LIU Jun\*, XU Jun-ling, LI Min, QIN Lan, LIU Jing-cheng, ZHANG Deng-zhuo

(Chongqing University, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and  
System of the Education Ministry of China, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: junliu@cqu.edu.cn

**Abstract:** To achieve a multi-structure parameter design and optimization based on the sensitivity index of a washer-type piezoelectric six-axis force sensor, an analytical mathematical model of the static sensitivity of the sensor must be studied. First, the structural characteristics and working principle of the sensor are analyzed, and a static sensitivity analytical mathematical model is derived based on the load transfer path inside the sensor. Then, an analytical mathematical model and a mathematical model based on ANSYS software are used to conduct analytical calculations and a numerical simulation for nine structural parameter models, respectively. Based on an analysis of results obtained from the two methods using statistical theory, the effectiveness of the analytical mathematical model was verified. An orthogonal experiment was conducted, and the influence rule of multiple structural parameters on sensor sensitivity was examined by combining the analytical

收稿日期:2018-08-21;修订日期:2018-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475060);重庆市自然科学基金资助项目(No. CSTC2015JCYJBX0071)

mathematical models. Finally, the structural parameters of the sensor were optimized, an experimental prototype was developed, and a static sensitivity calibration experiment was conducted. Results show that the comprehensive correlation coefficient between the analytical mathematical and numerical models of the washer-type piezoelectric six-axis force sensor was 0.988. The average load transfer coefficients of the experimental prototype were 0.73 and 0.75 for the analytical mathematical and numerical models, respectively. The synthetic isotropy of the analytical mathematical model, numerical model, and experimental prototype was 0.71, 0.71, and 0.67, respectively, and the results of the sensitivity study of the three models were consistent. The study thus showed that an orthogonal experiment based on an analytical mathematical model could realize an active multi-structure parameter design and optimization of a washer-type piezoelectric six-axis force sensor.

**Key words:** six-axis force sensor; sensitivity; analytic mathematical model; orthogonal experiment

## 1 引言

多维力/力矩传感器可同时感知空间多维力/力矩信息和力的作用点位置信息<sup>[1]</sup>,在机器人触觉力及脚部作用力测量、空间站对接<sup>[2-4]</sup>等多个领域都有重要的应用,是智能机器人、航空航天等领域技术发展不可缺少的一种新型传感器。

根据转换元件感知被测量方式不同可将六维力传感器分为弹性体式和非弹性体式两类;前者典型代表是应变式六维力传感器,可以实现对静态力的测量,动态特性差,因敏感元件与转换元件分离,始终存在三大瓶颈问题;后者典型代表是垫圈式压电六维力传感器,其可以克服弹性体式六维力传感器存在的瓶颈问题,动态特性好,但实现静态力的测量需要外加补偿。传感器部件的结构参数影响着传感器的静态灵敏度性能,解析数学模型、有限元仿真等是研究传感器灵敏度的常用方法,由于六维力传感器的结构相对复杂,采用解析数学模型的研究难度较大。李立建等<sup>[5]</sup>基于虚功原理和几何相容条件,推导了柔性并联 Stewart 平台六维力传感器的六维外力与柔性分支杆上轴向拉压力的解析映射关系,为结构参数优化提供了指导;赵延治等<sup>[6]</sup>针对一种 6-UPUR 的六维力传感器,利用螺旋理论及变形协调条件,建立传感器的数学模型并进行相关的实验研究;姚建涛等<sup>[7]</sup>针对一种全预应力双层并联六维腕力传感器,推导了传感器结构参数与任务模型之间

的解析表达式;李映君等<sup>[8]</sup>推导了一种自解耦压电六维力传感器分载比与传感器结构参数之间的关系,找到了影响分载比的主要影响因素;左国坤等<sup>[9]</sup>推导了十字梁结构六维力传感器的应变与尺寸参数的解析方程,并通过约束条件优化了传感器的结构参数;Kang 等<sup>[10]</sup>采用 ANSYS 有限元软件和 Matlab 对传感器模型交互进行优化设计,实现结构参数的优化。这些解析数学模型和仿真方法主要集中在弹性体式六维力传感器,相关研究结论对 Stewart 结构和十字梁结构六维力传感器的设计有很好的指导作用,但无法用于对垫圈式压电六维力传感器灵敏度的设计。

本文在前期研究<sup>[11]</sup>的基础上,针对垫圈式压电六维力传感器多结构参数优化的需要,在研究载荷在传感器内部传递规律的基础上,建立了传感器的静态灵敏度解析数学模型,验证了该解析数学模型的有效性;将解析数学模型与正交试验相结合研究了传感器结构参数对其静态灵敏度的影响规律;根据优选结论研制了传感器实验原型样机,完成灵敏度标定实验;研究结论为垫圈式压电六维力传感器的多结构参数优化设计提供了新的思路。

## 2 垫圈式压电六维力传感器静态灵敏度解析数学模型

图 1 是面向机械加工刀具健康在线监测需要设计的垫圈式压电六维力传感器,图中传感器的被测力作用点坐标系为 O-XYZ,石英晶组布局坐

标系为  $O_1-X_1Y_1Z_1$ , 传感器安装坐标系为  $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。传感器主要由外壳、上下盖子、内筒、石英晶组及电极等组成。其中石英晶组采用两片石英晶片叠装的方式排列,同时承担敏感元件和转换元件的功能,将外力转换为电荷输出。因  $XO^\circ$ 切型石英晶片只对轴向力载荷敏感, $YO^\circ$ 切型石英晶片只对剪切力载荷敏感,故 4 组  $XO^\circ$ 切型石英晶组和 4 组  $YO^\circ$ 切型石英晶组交替分布,均匀夹装在上下盖子之间。 $YO^\circ$ 切型石英晶组分布在  $X_1, Y_1$  轴与晶组分布圆的交点上,用于测量  $X, Y$  向力和  $Z$  向力矩;  $XO^\circ$ 切型石英晶组分布在  $O_1-X_1Y_1$  平面的 4 个象限的角平分线与晶组分布圆交点处,用于测量  $Z$  向力和  $X, Y$  向力矩;被测力作用点与石英晶组的距离为  $h$ ,石英晶组的分布圆半径为  $R$ 。

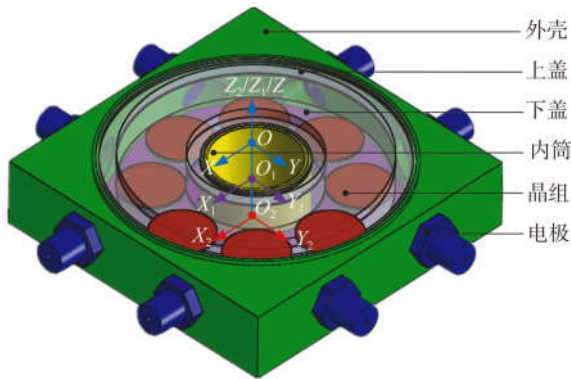


图 1 垫圈式压电六维力传感器结构图

Fig. 1 Structure diagram of washer-type piezoelectric six-axis force sensor

### 2.1 静力载荷映射解析

图 2 为传感器测量原理图。设被测六维力/力矩为  $f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z$ , 由于作用于垫圈式压电六维力传感器上的力/力矩的响应最终都表现为力的响应,故 8 组石英晶组上的分力分别为  $F_{X1}, F_{X5}, F_{Y3}, F_{Y7}, F_{Z2}, F_{Z4}, F_{Z6}, F_{Z8}$ , 解算后的传感器输出分别为  $Q_{F_x}, Q_{F_y}, Q_{F_z}, Q_{M_x}, Q_{M_y}$  和  $Q_{M_z}$ ; 由于传感器加工精度、装配工艺、晶片材料参数等的影响,石英晶组实际受到的有效分力与分力之间还存一个比例系数,定义其为载荷传递系数,记作  $k_{f_x}, k_{f_y}, k_{m_x}, k_{m_y}$  和  $k_{m_z}$ ; 两种切型石英晶体的压电系数为  $d_{11}$  和  $d_{26}$ ,  $S$  为石英晶组底面积,  $S_c$  为电极片面积。

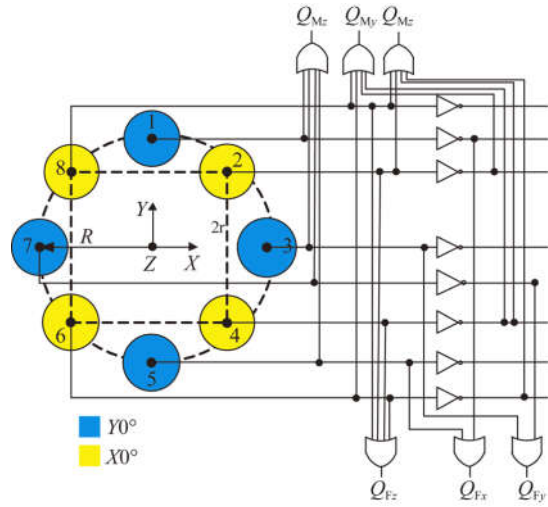


图 2 传感器测量原理图

Fig. 2 Diagram of measuring principle for sensor

由传感器测量原理图可得到石英晶组所受分力与传感器响应输出的映射关系为:

$$\begin{cases} Q_{F_x} = k_{f_x} (F_{X5} - F_{X1}) d_{26} \\ Q_{F_y} = k_{f_y} (F_{Y3} - F_{Y7}) d_{26} \\ Q_{F_z} = k_{f_z} (F_{Z2} + F_{Z4} + F_{Z6} + F_{Z8}) d_{11} \\ Q_{M_x} = k_{m_x} ((F_{Z2} + F_{Z8}) - (F_{Z4} + F_{Z6})) d_{11} \\ Q_{M_y} = k_{m_y} ((F_{Z6} + F_{Z8}) - (F_{Z2} + F_{Z4})) d_{11} \\ Q_{M_z} = k_{m_z} (F_{X1} + F_{X3} + F_{X5} + F_{X7}) d_{26} \end{cases} \quad (1)$$

作用在石英晶组上的分力可用式(2)表示。由式(1)、式(2)可建立传感器响应输出与被测六维力/力矩的解析表达式(3),其中  $C_Q$  为静态灵敏度解析数学模型,展开后表示为式(4)。可以看出,研究传感器静态灵敏度解析数学模型还需要研究载荷传递系数。

$$\begin{cases} F_{X1} = -f_x/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{X5} = f_x/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{Y3} = f_y/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{Y7} = -f_y/8 + m_z/(8 \times R) \\ F_{Z2} = f_z/8 + [-f_y h - f_x h + m_x - m_y]/(3 \times r) \\ F_{Z4} = f_z/8 + [f_y h - f_x h - m_x - m_y]/(3 \times r) \\ F_{Z6} = f_z/8 + [f_y h + f_x h - m_x + m_y]/(3 \times r) \\ F_{Z8} = f_z/8 + [-f_y h + f_x h + m_x + m_y]/(3 \times r) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{F_x} \\ Q_{M_x} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} f \\ m \end{bmatrix}^T C_Q \quad (3)$$

$$C_Q = \begin{bmatrix} 0.5k_{f_x}d_{26}S_e/S & 0 & 0 & 0 & bk_{m_y}d_{11}S_e/rS & 0 \\ 0 & 0.5k_{f_y}d_{26}S_e/S & 0 & -bk_{m_x}d_{11}S_e/rS & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{f_z}d_{11}S_e/S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4k_{m_x}d_{11}S_e/3rS & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4k_{m_y}d_{11}S_e/3rS & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{m_z}d_{26}S_e/RS \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 载荷传递系数

图 3 是传感器的结构剖面简图。当被测六维力/力矩作用在传感器的上盖表面,将从 A、B、C 三处向下传递,分别通过壳体、上盖内外弹性膜、上石英晶片、电极片及下石英晶片、内筒、下盖内外弹性膜等部件作用到下盖上凸台。

图 4 为传感器静力学弹簧等效模型。 $k_0$  为上盖受载荷部分等效刚度, $k_1$  为上盖敏感部分等效刚度, $k_2$  为上盖内环弹性膜等效刚度, $k_3$  为上

盖外环弹性膜等效刚度, $k_4$  为外壳等效刚度, $k_5$  为下盖外环弹性膜等效刚度, $k_6$  为下盖凸台等效刚度, $k_7$  为内筒等效刚度, $k_8$  为上石英晶片等效刚度, $k_9$  为下石英晶片等效刚度, $k_{10}$  为电极片等效刚度, $k_{11}$  为下盖内环弹性膜等效刚度, $k_{3/4/5}$  为  $k_3, k_4, k_5$  串联刚度, $k_{1/8/10/9}$  为  $k_1, k_8, k_{10}, k_9$  串联刚度, $k_{2/7/11}$  为  $k_2, k_7, k_{11}$  串联刚度。 $E_i, \rho_i, \mu_i, b_i, r_i$  ( $i=0, 1, 2, \dots, 11$ ) 分别是传感器各个部件的杨氏模量、密度、泊松比、厚度与半径。

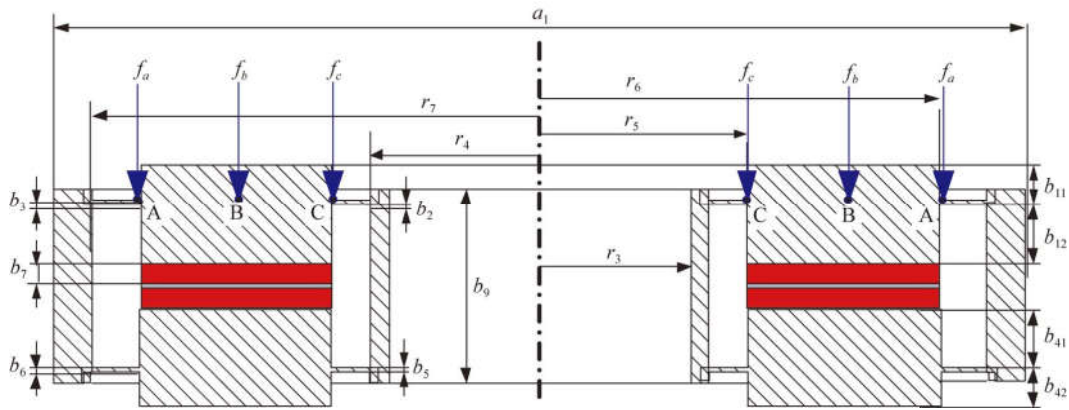


图 3 传感器结构剖面简图  
Fig. 3 Sketch of structural section of sensor

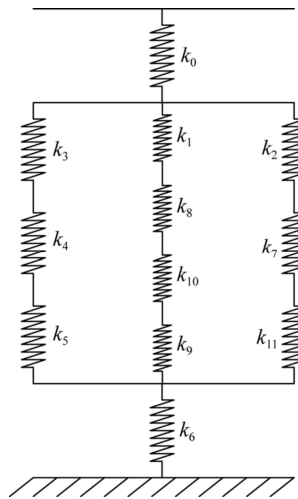


图 4 传感器静力学弹簧等效模型  
Fig. 4 Equivalent model of static spring of sensor

根据 Hooke 定理可得作用于 A, B, C 三处的载荷如式(5)所示,其中  $f_b$  作用于石英晶组上,因此传感器的载荷传递系数  $k_f$  及  $k_m$  即为式(6),式(6)中的  $k_{3/4/5}, k_{1/8/10/9}$  和  $k_{2/7/11}$  分别在  $f_x, f_y, f_z$  的作用下会有不同的取值。

$$\begin{cases} f_a = \frac{k_{3/4/5}}{k_{3/4/5} + k_{1/8/10/9} + k_{2/7/11}} \times f \\ f_b = \frac{k_{1/8/10/9}}{k_{3/4/5} + k_{1/8/10/9} + k_{2/7/11}} \times f \\ f_c = \frac{k_{2/7/11}}{k_{3/4/5} + k_{1/8/10/9} + k_{2/7/11}} \times f \end{cases} \quad (5)$$

$$k_f \text{ 或 } k_m = \frac{k_{1/8/10/9}}{k_{3/4/5} + k_{1/8/10/9} + k_{2/7/11}} \quad (6)$$



表 2 传感器灵敏度计算结果与仿真结果

Tab. 2 Sensitivity calculation and simulation results of sensor (pC/N or pC/N · m)

组别	数学模型						数值模型					
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
No. 1	0.613	0.613	0.964	181.707	181.707	257.948	1.685	1.685	2.154	376.654	376.957	359.755
No. 2	0.701	0.701	1.000	188.536	188.536	317.653	1.893	1.893	2.184	385.889	385.889	431.916
No. 3	0.486	0.486	0.916	172.788	172.788	200.744	1.363	1.364	2.099	364.383	364.383	267.304
No. 4	0.506	0.506	0.907	171.110	171.110	222.213	1.463	1.463	2.085	361.059	361.061	290.411
No. 5	0.613	0.613	0.964	181.707	181.707	257.948	1.697	1.697	2.153	376.114	376.119	362.967
No. 6	0.605	0.605	0.954	180.211	180.282	268.866	1.705	1.705	2.152	375.967	376.143	365.589
No. 7	0.600	0.600	0.957	180.368	180.368	256.124	1.611	1.611	2.147	376.174	376.036	357.946
No. 8	0.590	0.590	0.952	179.544	179.544	255.146	1.588	1.588	2.143	375.116	375.095	351.053
No. 9	0.517	0.517	0.910	171.505	171.505	222.713	1.490	1.490	2.096	361.328	361.394	290.537

表 3 两种模型所得灵敏度的样本相关系数及样本相关系数 T 检验结果

Tab. 3 Sample correlation coefficient and its T test results for sensitivity of the two models

统计量	维度						综合
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$	
$r$	0.981	0.981	0.988	0.994	0.994	0.988	0.988
$t$	13.248	13.282	16.692	23.197	23.950	16.705	17.846

将传感器 6 个方向的解析数学模型计算结果和数值模型计算结果分别看作待评估的两组变量,对其做相关性分析,若两组变量完全正相关,即总体相关系数  $\rho=1$ 。由于数值模型的结构简化、网格划分、计算结果的取舍等原因会带来误差,可认为当样本相关系数  $r>0.8$  时,两组变量存在高度相关关系。为防止抽样误差对结果造成误判,可进一步采用 T 检验法对样本相关系数  $r$  进行显著性检验。假设:  $H_0: \rho=0$ ,即解析数学模型与数值模型之间无线性相关关系;  $H_1: \rho \neq 0$ ,即解析数学模型与数值模型之间存在线性相关关系。表 3 是 9 组模型的相关系数和相关系数显著性检验结果。

根据表 3 可知,传感器 6 个方向的样本相关系数均大于 0.98,数学模型与数值模型高度相关;在显著性水平  $\alpha=0.025$  时( $t_{\alpha}(7)=2.365$ ),传感器 6 个方向相关系数的统计量  $t$  计算结果均大于 2.365;故传感器解析数学模型与数值模型存在显著线性相关关系,即传感器解析数学模型有效。

## 4 传感器结构参数优选与实验

### 4.1 正交试验与参数优选

影响垫圈式压电六维力传感器灵敏度的结构参数很多,通过试验来选择各个结构参数的最佳组合,工作量大,难以实现;借助解析数学模型来研究不同结构参数对传感器的灵敏度的影响,往往采用固定部分结构参数而改变一个结构参数,绘制其对灵敏度的影响曲线,很难通过图形直观展示 3 个及 3 个以上结构参数同时变化对传感器灵敏度的综合影响。正交设计通过正交表巧妙的安排部分试验,将多个结构参数综合考虑,不仅能得到结构参数的影响强弱和最佳组合方式,同时具有较高的统计推断效力。

根据实际,正交试验是在限定传感器整体几何尺寸条件下开展,传感器边长  $a_1$  为 50 mm,壳体壁厚 2 mm,内筒及壳体高度  $b_3$  为 12.05 mm,

内筒半径  $r_3$  为 7.5 mm,内筒壁厚 0.5 mm。综合考虑影响传感器的灵敏度的因素,选择石英晶片的半径  $r_1$  及厚度  $b_7$ 、影响内外环弹性模的宽度尺寸  $r_5, r_6$  及厚度  $b_2, b_3$  这 6 个结构参数作为试验影响因素,并以传感器的原始尺寸为基本尺寸,在此基础上变动,表 4 为因素水平表。

表 4 正交试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels of orthogonal experiment (mm)

水平	因素					
	$b_2$	$b_3$	$b_5$	$r_6$	$r_1$	$b_7$
1	0.3	0.3	10	20	3.5	0.75
2	0.4	0.4	9.8	20.25	4	0.85
3	0.5	0.5	9.6	20.5	4.5	1
4	0.6	0.6	9.4	20.75	5	1.2

假设各个影响因素之间无交互作用,根据标准正交表,选择  $L_{32}(4^9)$  正交表。由于在六维力传感器的设计中很难保证各方向灵敏度具有完全一致性,选择 3 个方向的最小力灵敏度与 3 个方向的最小力矩灵敏度的乘积作为正交试验的试验指标 S。借助数学模型计算各组试验的试验指标 S,试验方案及结果如表 5 所示。

表 6 是基于正交试验结果的极差分析,表中  $\bar{R}_i(i=1,2,3,4)$  代表各结构参数所对应的水平下试验结果平均值; $R_i$  为同一结构参数不同水平下的试验结果的极差值。图 5 是极差分析柱状图,横轴代表不同因素的 4 个水平,纵轴为试验指标;同一因素下不同水平的柱状图高度差异越大,表明该因素对传感器灵敏度的影响就越大;同一因素下柱状图高度最高时所对应的水平即为该因素的最佳水平。由图 5 可得到影响传感器的灵敏度的强弱顺序为:晶片半径 > 外环弹性模厚度 > 晶片厚度 > 影响外环弹性模宽度尺寸 > 内环弹性模厚度 > 影响内环弹性模宽度尺寸。最佳水平组合为:晶片半径  $r_1=5$  mm,晶片厚度  $b_7=0.85$  mm,内外环弹性模厚度  $b_2(b_3)=0.3$  mm,影响内、外环弹性模宽度的结构参数  $r_5=9.8$  mm,  $r_6=20$  mm。

表 5 试验方案及结果

Tab. 5 Scheme and result of experiment

类别	$b_2$	$b_3$	$r_5$	$r_6$	$r_1$	$b_7$	空列			S
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	232.522 5
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	202.726 7
3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	172.775 4
4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	144.504 1
5	2	1	1	2	2	3	3	4	4	217.565 5
6	2	2	2	1	1	4	4	3	3	131.942 5
7	2	3	3	4	4	1	1	2	2	228.810 9
8	2	4	4	3	3	2	2	1	1	171.571 1
9	3	1	2	3	4	1	2	3	4	321.069 9
10	3	2	1	4	3	2	1	4	3	209.186 2
11	3	3	4	1	2	3	4	1	2	162.812 0
12	3	4	3	2	1	4	3	2	1	87.217 2
13	4	1	2	4	3	3	4	2	1	224.698 1
14	4	2	1	3	4	4	3	1	2	205.464 2
15	4	3	4	2	1	1	2	4	3	153.550 1
16	4	4	3	1	2	2	1	3	4	161.797 3
17	1	1	4	1	4	2	3	2	3	331.431 9
18	1	2	3	2	3	1	4	1	4	258.067 5
19	1	3	2	3	2	4	1	4	1	121.647 4
20	1	4	1	4	1	3	2	3	2	87.562 0
21	2	1	4	2	3	4	1	3	2	226.559 6
22	2	2	3	1	4	3	2	4	1	260.557 0
23	2	3	2	4	1	2	3	1	4	118.096 3
24	2	4	1	3	2	1	4	2	3	156.373 7
25	3	1	3	3	1	2	4	4	2	187.088 7
26	3	2	4	4	2	1	3	3	1	192.252 4
27	3	3	1	1	3	4	1	2	4	170.958 7
28	3	4	2	2	4	3	2	1	3	190.918 6
29	4	1	3	4	2	4	2	1	3	163.917 3
30	4	2	4	3	1	3	1	2	4	132.549 6
31	4	3	1	2	4	2	4	3	1	238.437 9
32	4	4	2	1	3	1	3	4	2	211.552 5

表 6 极差分析结果

Tab. 6 Result of range analysis ( $\text{pC}^2/\text{N}^2 \cdot \text{m}$ )

项目	$b_2$	$b_3$	$r_5$	$r_6$	$r_1$	$b_7$
$\bar{K}_1$	193.9	238.1	189.8	208.0	141.3	219.3
$\bar{K}_2$	188.9	199.1	190.3	196.9	172.4	202.5
$\bar{K}_3$	190.2	170.9	190.0	183.6	205.7	181.2
$\bar{K}_4$	186.5	151.4	189.4	171.1	240.2	156.5
$R_i$	7.4	86.7	0.9	36.8	98.8	62.8

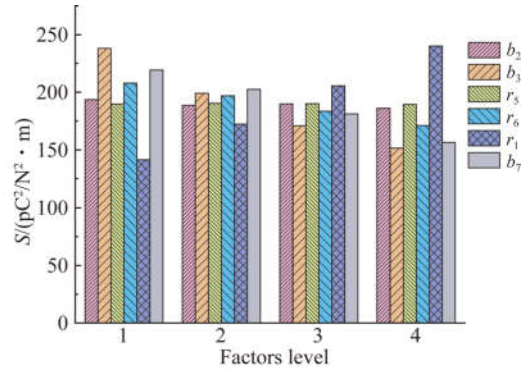


图 5 极差分析柱状图

Fig. 5 Histogram of range analysis

4.2 实验

在正交试验中得到了最佳结构参数组合,这是在有限的试验分组方案条件下得到的结果。实

际中需要考虑到传感器加工工艺水平,对传感器部件的结构参数进行逼近。最终传感器样机的结构参数选择如表 7 所示。

表 7 传感器样机结构参数

Tab. 7 Structural parameters of sensor prototype

(mm)

参数	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_2$	$b_3$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$a_1$
数值	2.5	3.5	0.3	0.3	3.5	2.5	0.3	0.3	1	0.05	12	12	5	5	7.5	8	9.8	20.75	23	50

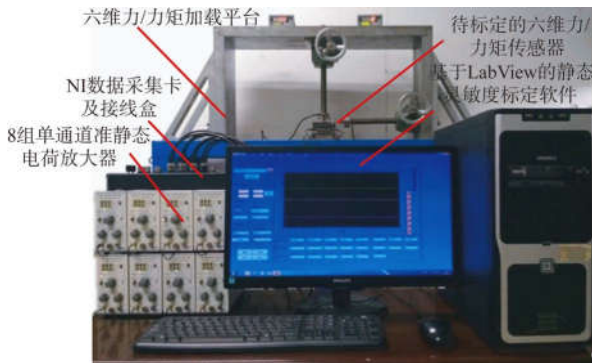


图 6 传感器静态灵敏度标定实验系统

Fig. 6 Static sensitivity calibration experimental system of sensor

图 6 是传感器静态标定实验系统照片。标定实验系统包括六维力/力矩加载平台(1)、NI 数据采集卡及接线盒(2)、8 组单通道准静态电荷放大器(3)、基于 LabView 的静态灵敏度标定软件(4)和待标定的六维力/力矩传感器(5)等。实验中,在传感器的各维量程范围内分别取 10 个加载点进行标定实验,在标定软件上解算出传感器的灵敏度。

表 8 是相同结构参数下,传感器 6 个方向的数值模型、数学模型计算和实验样机标定得到的

灵敏度;实验原型相对于数值模型的载荷传递系数  $ESLTC = \text{实验原型灵敏度} / \text{数值模型灵敏度}$ ,实验原型相对于数学模型的载荷传递系数  $EMLTC = \text{实验原型灵敏度} / \text{数学模型灵敏度}$ 。表 9 是三种研究方法得到的传感器灵敏度各向同性度研究结论。数值模型和解析数学模型得到的传感器灵敏度综合各向同性度均为 0.71;因数值模型和解析数学模型简化过程未考虑加工工艺参数、装配工艺等因素的影响,实验样机的灵敏度各向同性度与其它两种方法的各向同性度有 0.04 的差异。

表 8 传感器样机灵敏度对比

Tab. 8 Sensitivity comparison of sensor prototype

( $\text{pC}^2/\text{N}^2 \cdot \text{m}$ )

类别	$F_x$	$f_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
数值模型	2.052	2.071	2.237	389.593	389.540	294.831
数学模型	2.016	2.016	2.306	362.418	362.418	280.403
实验原型	1.855	1.639	2.382	211.91	220.036	144.743
ESLTC	0.904	0.791	1.065	0.544	0.565	0.491
EMLTC	0.920	0.813	1.033	0.585	0.607	0.516

表9 传感器样机灵敏度各向同性度对比

Tab. 9 Isotropy comparison of sensitivity of sensor prototype

类别	力各向同性度	力矩各向同性度	综合各向同性度
数值模型	0.65	0.76	0.71
数学模型	0.65	0.77	0.71
实验原型	0.71	0.62	0.67

## 5 结 论

针对垫圈式压电六维力传感器多结构参数优化设计需求,建立了传感器灵敏度解析数学模型;运用基于 ANSYS 软件的数值模型分析结果,论证了解析数学模型的有效性;根据解析数学模型计算的 32 组正交试验模型灵敏度,研究了传感器多结构参数对其灵敏度的综合影响规律,在限制传感器空间几何参数条件下完成了传感器部件结构参数优选;最后,根据传感器部件结构优选参数研制了实验样机,开展了相关实验。实验结果表明:运用材料力学、理论力学等理论研究的垫圈式压电六维力传感器灵敏度解析数学模型能根据传感器部件结构参数计算传感器的灵敏度,基于

ANSYS 软件建立的传感器数值模型能实现对传感器灵敏度有效预估。运用基于垫圈式压电六维力传感器解析数学模型的正交试验法可以在少量有限计算条件下,获得传感器部件结构参数对其灵敏度的综合影响规律,并实现基于传感器灵敏度指标的多传感器结构参数综合设计与优选。垫圈式压电六维力传感器的解析数学模型与数值模型之间的综合相关系数为 0.988,各维度相关系数的综合检验水平  $t=17.846 > t_{0.025}(7)=2.365$ ,解析数学模型与数值模型之间具有强正相关,两种模型均有效,可用于传感器灵敏度设计。垫圈式压电六维力传感器的解析数学模型、数值模型和实验原型的综合各向同性度分别为 0.71、0.71、0.67,实验原型相对于解析数学模型和数值模型的平均载荷传递系数分别为 0.73 和 0.75。

由于实验标定误差的影响,Z 向力维度的载荷传递系数已大于 1;由于解析数学模型和数值模型都未考虑传感器部件加工工艺参数和装配工艺的影响,导致传感器的平均载荷传递系数均小于等于 0.75;要实现垫圈式压电六维力传感器的灵敏度精准解析计算和数值模拟,需要在建模中引入传感器部件微观加工工艺参数。

## 参考文献:

- [1] WANG Z, LIU W, CUI B, *et al.*. Research on robot surface tracking motion based on force control of six-axis wrist force sensor [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 7(1):249-696.
- [2] HUANG B. A flexible tactile sensor calibration method based on an air-bearing six-dimensional force measurement platform [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7):636-643.
- [3] WU B, YAN Q, LUO J, *et al.*. Signal Processing and Application of Six-axis Force/Torque Sensor Integrated in Humanoid Robot Foot [J]. *Journal of Signal Processing Systems*, 2014, 74(2):263-271.
- [4] SUN Y, LIU Y, ZOU T, *et al.*. Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot [J]. *Measurement*, 2015, 65:135-148.
- [5] 李立建, 马爱霞, 姚建涛, 等. 柔性并联六维力传感器力映射解析研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(7):30-38.
- [6] LI L J, MA A X, YAO J T, *et al.*. Force mapping analytical research of flexure parallel six-axis [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2017, 53(7):30-38. (in Chinese)
- [7] ZHAO Y ZH, ZHANG C F, ZHANG D, *et al.*. Mathematical model and calibration experiment of a large measurement range flexible joints 6-UPUR six-axis force sensor [J]. *Sensors*, 2016, 16(8):1271.
- [8] YAO J T, CAI D J, ZHANG H Y, *et al.*. Task-oriented design method and research on force compliant experiment of six-axis wrist force sensor [J]. *Mechatronics*, 2016, 35:109-121.
- [9] LI Y J, YANG C, WANG G C, *et al.*. Research on the parallel load sharing principle of a novel self-decoupled piezoelectric six-dimensional force sensor [J]. *Isa Trans*, 2017, 70:447-457.
- [10] WANG Y J, ZUO G K, CHEN X L, *et al.*. Strain analysis of six-axis force/torque sensors based on analytical method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(14):4394-4404.
- [11] KANG M K, LEE S, KIM J H. Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor [J]. *Sensors & Actuators A Physical*

cal, 2014, 209(5):41-51.

- [11] 刘俊,杜晶晶,吕华溢. 垫圈式压电六维力传感器的安装动态特性 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10z):279-285

LIU J, DU J J, LV H Y. Mounted dynamic characteristics of washer type piezoelectric six-axis force sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10z): 279-285. (in Chinese)

作者简介:



刘俊(1977—),男,四川遂宁人,博士,副研究员,博士生导师,2005年、2011年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要从事多维力、加速度传感技术及精密测量等方面的研究。  
E-mail: junliu@cqu.edu.cn



徐军领(1992—),男,河南南阳人,硕士研究生,2015年于河南科技大学获得学士学位,主要从事六维力、加速度传感器方面的研究。E-mail: 20160802030@cqu.edu.cn

(本栏目编辑:秦 思)