

# 压阻式大扭矩动态六轴力传感器设计

赵 友, 赵玉龙

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

**摘要:** 六轴力传感器在智能制造、精密装配、运动医疗等领域有着重要应用价值。本研究以大量程六轴力传感器为研究目标, 针对六轴力解耦测量和交叉干扰抑制的技术难题, 提出了一种压阻式大扭矩动态六轴力传感器的设计方法。在传感器结构设计中, 采用 4 个直梁式三轴力传感器组合的方式进行载荷分摊, 满足大力值和大扭矩的测量需求; 在三轴力传感器设计中, 利用弹性体应力对称性分布的特点和惠斯通电桥平衡原理, 布置传感器敏感电阻并组合成测量电桥, 实现三轴力的解耦测量; 根据六轴力传感器在三轴力和三轴力矩作用下的应力变化规律, 采用矩阵解耦的方式实现六轴力解耦测量。

**关键词:** 六轴力传感器; 解耦测量; 交叉干扰; 矩阵解耦

**中图分类号:** TH823; TP212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)03-0078-08

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20221203003

**引用格式:** 赵友, 赵玉龙. 压阻式大扭矩动态六轴力传感器设计[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 78-85.

## Design of piezoresistive high-torque dynamic six-axis force sensor

ZHAO You, ZHAO Yulong

(Xi'an Jiaotong University, State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Six-axis force sensor has important application value in intelligent manufacturing, precision assembly, sports medicine and other fields. Aiming at the technical problems of decoupling measurement and cross interference suppression of six-axis force sensor, this study puts forward a design method of piezoresistive high-torque dynamic six-axis force sensor. In sensor structure design, four straight beam three-dimensional force sensors are combined to share the load, so as to meet the requirements of high load. In three-dimensional force sensor design, the symmetry of elastomer stress distribution and the principle of Wheatstone bridge balance were used, and the sensitive resistors were organized into measuring circuit for three-dimensional force decoupling measurement. According to the stress variation law of the combined sensor under six-axis forces and torques, the six-axis forces and torques are measured by matrix decoupling.

**Keywords:** Six-axis force sensor; Decoupling measurement; Cross interference; Matrix decoupling

**Citation:** ZHAO You, ZHAO Yulong. Design of piezoresistive high-torque dynamic six-axis force sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 78-85.

## 引 言

六轴力传感器在精密制造与装配<sup>[1,2]</sup>、机器人微创手术<sup>[3,4]</sup>、体育竞技设备<sup>[5,6]</sup>, 以及大型建筑物安全监测<sup>[7,8]</sup>等领域应用广泛。交叉干扰误差是评价六轴力传感器测量精度的重要指标。国内外学者对六轴力解耦测量技术进行了大量研究, 以瑞士奇石乐(Kistler)公司为典型代表的国外公司已经开发出相关产品, 并占据主要市场。例如, 奇石乐 9139AA 型压电式多分量传感器通过 4 个三轴力

传感器组合<sup>[9]</sup>, 可进行六轴力测量( $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ), 其力测量范围为 $-30\sim+30$  kN、力矩测量范围为 $-3\sim+3$  kN·m, 三轴力测量的交叉干扰误差 $\leq\pm 2\%$ 。浙江大学报道了一种基于 Y 形弹性梁的电阻应变式六轴力传感器设计方案<sup>[10]</sup>, 采用铁木辛柯梁理论进行理论分析, 得到各个方向的力和力矩作用下弹性梁上应变的解析解。济南大学研制了一种四点支承结构的压电式六轴力传感器<sup>[11,12]</sup>, 该传感器的力测量范围为 $0\sim 3$  kN、力矩测量范围为 $0\sim 500$  N·m, 通过基于最小二乘支持向量

机回归优化的解耦方法使交叉干扰误差低于1%。上海交通大学的高峰等人提出了一种基于 Stewart 平台的六轴力传感器解耦设计方法<sup>[13]</sup>, 传感器的力测量范围为 0~1.5 kN、力矩测量范围为 -70~+70 N·m, 通过结构优化和矩阵解耦, 使传感器交叉干扰误差低于 1.43%。中国电子科技集团第四十九研究所研制了一种轮辐式四梁结构重型机械手六轴力传感器<sup>[14]</sup>, 传感器的力测量范围为 0~200 N、力矩测量范围为 0~50 N·m, 采用线性平均标定算法进行六轴力解耦测量, 最大交叉干扰误差为 3.26%。

从以上研究成果的技术指标来看, 六轴力解耦测量中交叉干扰抑制是一个技术难题, 并且面向大量程测试应用的六轴力传感器研究较少。本文针对大量程六轴力测试需求, 提出一种压阻式大扭矩动态六轴力传感器设计方法, 传感器力测量范围为 0~30 kN、力矩测量范围为 0~15 kN·m, 固有频率不低于 2 kHz。

## 1 六轴力传感器结构设计与分析

### 1.1 传感器弹性体结构设计

六轴力传感器主要由上、下基板和 4 根弹性直梁组成, 每根弹性直梁上粘贴有多个力敏芯片, 构成一个三轴力传感器, 如图 1(a)所示。为便于进行计算和结构设计, 规定直梁结构的长度为  $L$ 、宽度为  $b$ 、厚度为  $h$ , 并且  $L=1.2b=1.2h$ , 如图 1(b)所示。

为了满足传感器对 0~30 kN 的力和 0~15 kN·m 的力矩测量要求, 选择具有高强度、小滞后特性的 17-4PH 不锈钢加工传感器结构, 17-4PH 不锈钢的机械特性参数如表 1 所示。材料许用正应力为屈服极限的 2/3(安全系数 1.5), 许用剪应力为许用正应力的 3/5。根据正应力强度条件、剪应力强度条件进行传感器尺寸设计。

#### 1.1.1 按照正应力强度条件

根据直梁式弹性体受力分析模型, 弹性体在同时受到力/力矩作用时, 其表面最大正应力由两部分组成, 其一是由力  $F_x$ 、 $F_z$  和力矩  $M_x$ 、 $M_z$  引起

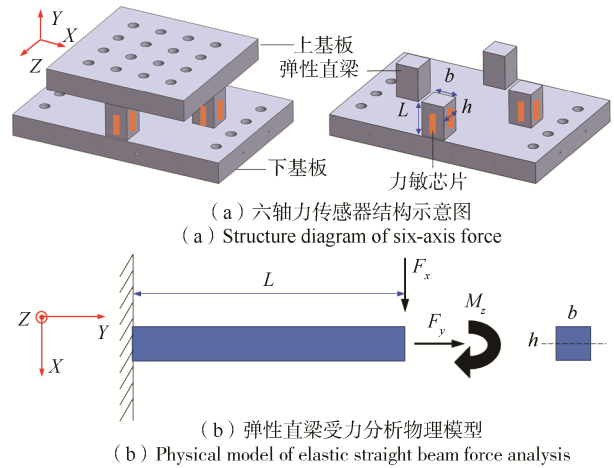


图 1 六轴力传感器与弹性直梁结构示意图

Fig.1 Structural diagram of six-axis force sensor and elastic beam

的弯曲正应力, 其二是由  $F_y$  引起的拉应力。由 4 个三轴力传感器平均分摊所有的力和力矩。弹性体应满足公式(1)的强度条件, 计算得到  $b \geq 39.80 \text{ mm}$ 。

$$\sigma_{\max} = \frac{\frac{1}{4} \times (F_x + F_z) \times L + \frac{1}{4} \times (M_x + M_z)}{\frac{1}{6} \times b \times h^2} + \frac{\frac{1}{4} \times F_y}{b \times h} \leq [\sigma] \quad (1)$$

#### 1.1.2 按照剪应力强度条件

弹性体在同时受到力/力矩作用时, 其表面最大剪应力分为两部分:

①  $F_x$ 、 $F_z$  引起的弯曲剪应力, 对于等截面梁, 最大剪应力为平均剪应力的 1.5 倍, 最大剪应力出现在剪力最大的面上;

②  $M_y$  引起的扭转剪应力, 最大剪应力发生在截面长边中点处, 对于方形截面,  $\alpha$  取 0.208。

由 4 个三轴力传感器平均分摊所有的力, 传感器弹性体应满足公式(2)的强度条件, 计算得到  $b \geq 34.02 \text{ mm}$ 。

$$\tau_{\max} = 1.5 \times \frac{\frac{1}{4} \times (\sqrt{F_x^2 + F_z^2})}{b \times h} + \frac{1}{4} \times \frac{M_y}{\alpha \times h \times b^2} \leq [\tau] \quad (2)$$

以上各式中,  $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ 、 $[\sigma]$ 、 $[\tau]$  分别表示传感

表 1 17-4PH 不锈钢机械特性参数

Table 1 Mechanical characteristic parameters of 17-4PH stainless steel

密度	弹性模量	泊松比	屈服强度	抗拉强度	耐压强度	许用正应力	许用剪应力	许用压应力
7.80 g/cm <sup>3</sup>	202 GPa	0.272	1 180 MPa	1 310 MPa	1 200 MPa	786.7 MPa	472 MPa	800 MPa

器弹性体受到的最大正应力、最大剪应力以及材料的许用正应力、许用剪应力。综合以上强度条件分析结果, 取传感器直梁式弹性体的宽度  $b=40\text{ mm}$ 。因此, 传感器直梁式弹性体的长度  $L=48\text{ mm}$ 、宽度  $b=40\text{ mm}$ 、厚度  $h=40\text{ mm}$ 。传感器上下基板的体积分别为  $200\times 200\times 30(\text{mm}^3)$  和  $300\times 200\times 30(\text{mm}^3)$ 。

### 1.2 有限元仿真分析

为明确组合传感器各弹性直梁在六轴力作用下的受力特性和表面应力分布规律, 并进一步验证所设计传感器的结构安全性, 采用 Workbench 对所设计的传感器整体结构进行有限元仿真分析。将组合传感器下基板固定, 在传感器上基板的中心位置分别施加六轴力(力值为  $30\text{ kN}$ , 力矩为  $15\text{ kN}\cdot\text{m}$ ), 得到传感器整体结构的应力分布情况如图 2 所示。

以任意一根弹性梁为对象, 提取弹性梁四个侧面中轴线上的正应力变化曲线, 如图 3 所示。在

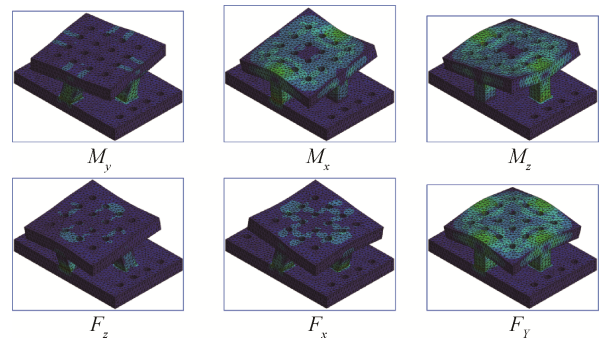


图 2 六轴力传感器表面等效应力分布云图

Fig.2 Diagram of surface equivalent stress distribution of six-axis force sensor

弹性梁分别受到六轴力单独作用的情况下, 弹性梁的各个侧面应力分布呈现出良好的线性变化规律, 说明弹性梁侧面应力输出具有良好的线性特性。但是不同侧面应力的具体数值并不完全对称, 不适合利用结构对称性和测量电桥平衡原理进行六轴力的直接解耦测量。

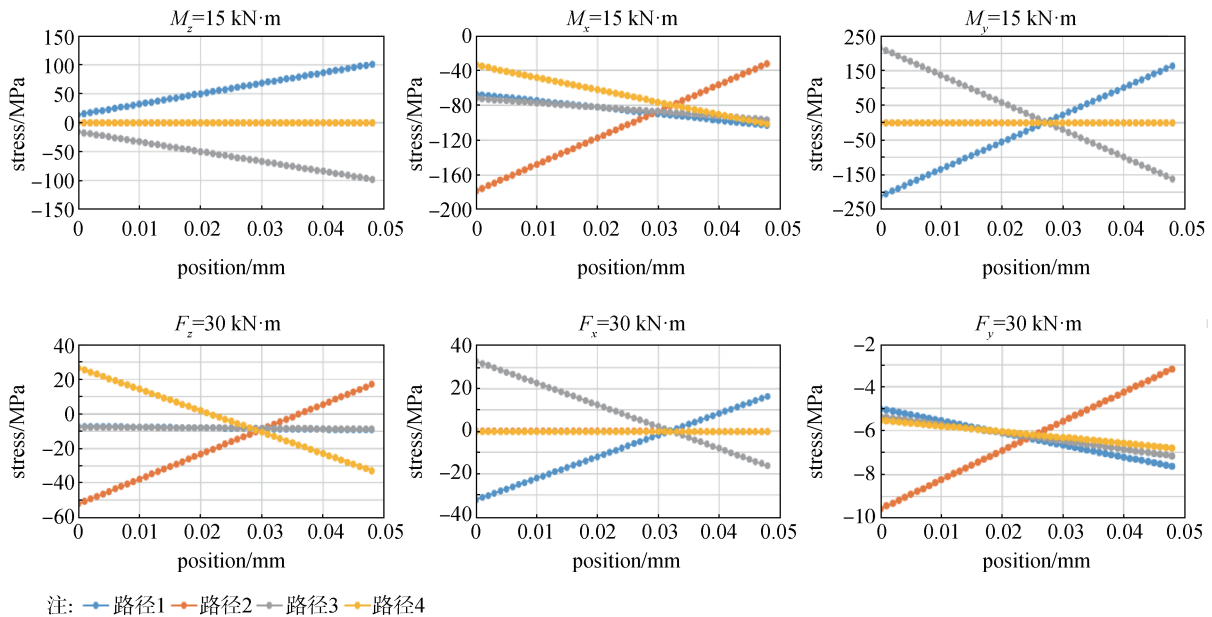


图 3 弹性梁表面正应力变化曲线

Fig.3 Surface normal stress variation curve of the elastic beam

为了验证传感器的结构安全性, 对传感器同时施加满量程的六轴力, 得到传感器结构的等效应力云图, 如图 4 所示。传感器结构的最大等效应力为  $478.71\text{ MPa}$ , 小于传感器材料的许用应力  $786.7\text{ MPa}$ , 因此该结构安全。

此外, 高频响的应用要求传感器的固有频率  $\geq 2\text{ kHz}$ 。采用有限元模态分析方法得到该传感器

前六阶模态振型如图 5 所示, 各阶模态对应的振型频率如表 2 所示, 满足  $2\text{ kHz}$  的技术要求。

### 1.3 传感器封装方案设计

六轴力传感器采用金属外壳进行封装保护, 如图 6 所示。在金属外壳的表面设置有通孔, 用于安装螺钉和航空插头。传感器内部设置有传感器信号处理电路板, 电路板与粘贴在传感器弹性梁

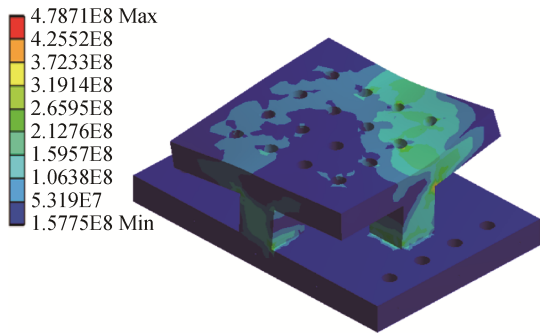


图4 六轴力共同作用下的传感器等效应力云图

Fig.4 Equivalent stress nephogram of the sensor under six-axis forces and torques

表2 传感器模态振型频率

Table 2 Modal frequency of the sensor (单位: Hz)

1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
2 690	2 795	3 124	3 823	4 413	4 420

上的压阻式半导体力敏芯片相连。经过电路板放大、滤波、采集、运算后输出的传感器信号，通过航空插头连接到外部采集设备。

表3 半导体敏感电阻的关键技术参数

Table 3 Key technical parameters of semiconductor sensitive resistor

电阻材料	电阻体积	电阻值	灵敏系数	最高工作温度	工作电流	应变极限
P型硅	3.8×0.22×0.05(mm <sup>3</sup> )	1 000 Ω	150±2%	≤80 °C	≤5 mA	6 000 με

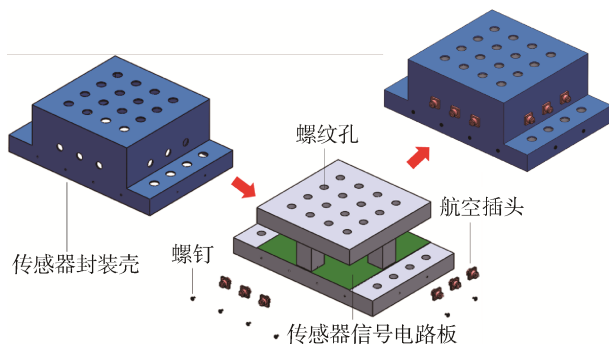


图6 传感器封装方案示意图

Fig.6 Schematic diagram of sensor package

## 2 传感器电桥设计与多维力解耦测量

### 2.1 直梁式弹性体表面应力变化规律

六轴力传感器是由四个三轴力传感器组合而成。三轴力传感器解耦的关键在于设计合理的测量电路，使测量电路只敏感单一方向的力，对其

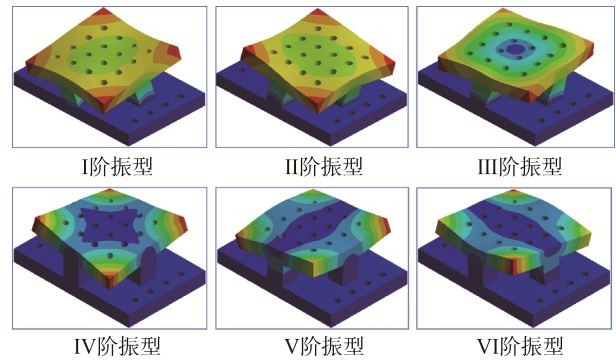


图5 传感器前6阶模态振型

Fig.5 The first six modal shapes of the sensor

压阻式半导体力敏芯片是一种基于单晶硅半导体压阻效应、采用微纳制造工艺制备的小型化力敏芯片。该芯片粘贴在传感器弹性梁的表面，当传感器受力后会引引起弹性梁表面产生应力/应变，力敏芯片内部的半导体敏感电阻在压阻效应作用下，电阻值发生明显变化；再由敏感电阻组成的测量电路输出与施加的力值对应的电信号，从而实现力测量。所采用的小型化力敏芯片上的半导体敏感电阻的关键技术参数如表3所示。

他方向的力不敏感。对于直梁式三轴力传感器，建立传感器弹性体模型，通过有限元仿真研究弹性体在  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  三轴力作用下的表面应力分布规律，如图7所示。

在  $F_x$  作用下，弹性体左右两个表面(路径1和路径3)对应位置的应力大小相等、符号相反；前后两个表面(路径2和路径4)对应位置的应力大小相等、符号相同，并且中轴线上的应力为零。在  $F_y$  作用下，弹性体四个表面对应位置的应力大小相等、符号相同。在  $F_z$  作用下，弹性体表面应力分布规律与  $F_x$  作用时相同。

### 2.2 传感器芯片布置与测量电路

利用上述弹性体表面应力分布规律，结合惠斯通电桥平衡原理，设计了如图8所示的三轴力传感器敏感电阻布置和测量电路组合方式。图9为传感器弹性体表面半导体敏感电阻的位置参数，其中， $h$  是  $R_1 \sim R_8$  这8个敏感电阻到它所在粘贴面下端

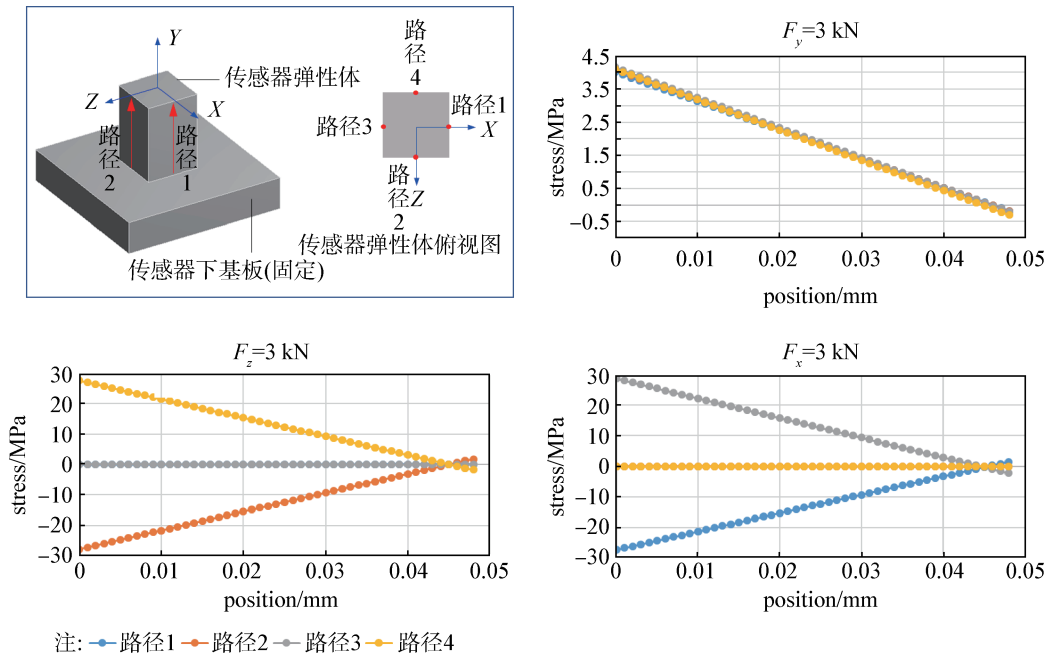


图 7 三轴力传感器弹性体及其表面正应力变化规律

Fig.7 Elastic model of three-dimensional force sensor and its surface normal stress variation law

的距离,  $H$  是  $R_9$  和  $R_{10}$  这 2 个敏感电阻到它所在粘贴面下端的距离,  $L$  是两个相互对称的敏感电阻之间的距离,  $h=3\text{ mm}$ ,  $H=20\text{ mm}$ ,  $L=2\text{ mm}$ 。按照该方案布置敏感电阻并组合成测量电路, 每个测量电路在受到其敏感方向力作用时, 两个桥臂中对应的敏感电阻的电阻值分别朝反方向变化, 测量电路产生差动输出; 在非敏感方向力作用时, 两

个桥臂中对应的敏感电阻的电阻值朝同方向变化, 测量电路保持平衡, 输出电压不变。表 4 给出了三轴力传感器测量电路中各个敏感电阻在三轴力作用下的电阻值变化量, 假设所有敏感电阻的初始值为  $R_0$ , 在  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  三轴力作用下产生的电阻值变化量分别记为  $\Delta R_x$ 、 $\Delta R_y$ 、 $\Delta R_z$ 。

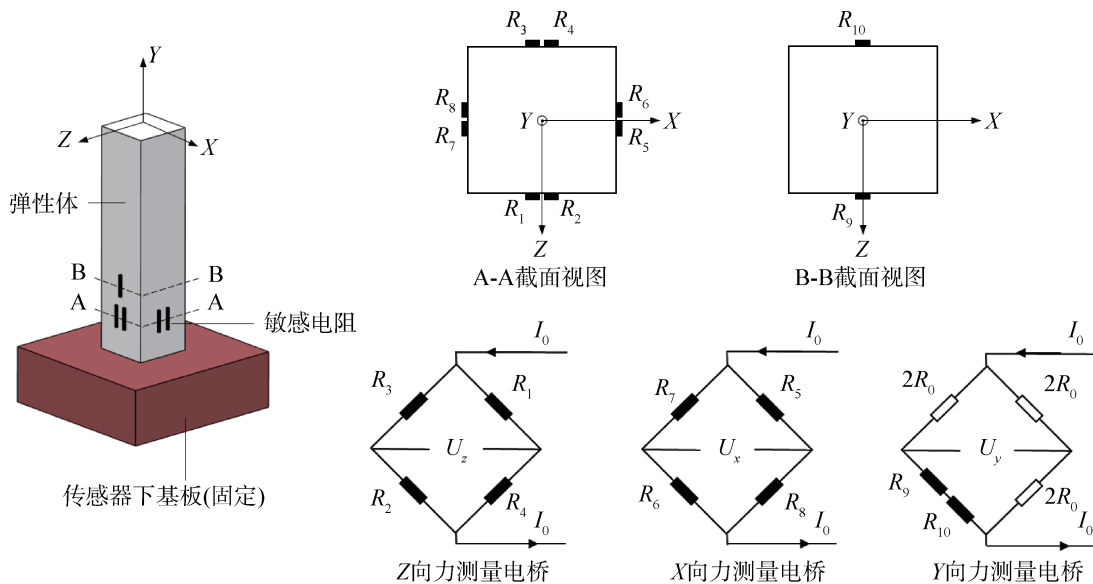


图 8 三轴力传感器敏感电阻分布与测量电路设计

Fig.8 Design of sensitive resistance distribution and measuring circuit of three-dimensional force sensor

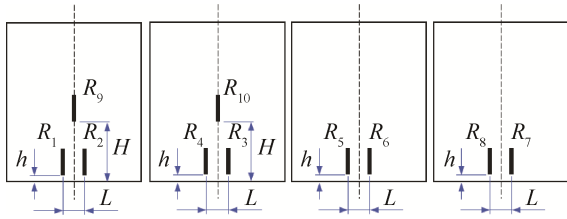


图9 传感器弹性体表面半导体敏感电阻的位置参数

Fig.9 Position parameters of semiconductor sensitive resistance on the surface of sensor elastomer

以 $x$ 方向力测量电路为例,在单独受到 $F_x$ 作用时,各个电阻值变化量和电桥输出分别为:

$$R_5 = R_0 - \Delta R_x, R_6 = R_0 - \Delta R_x, R_7 = R_0 + \Delta R_x, R_8 = R_0 + \Delta R_x \quad (3)$$

$$U_2 = \frac{R_7 \cdot R_8 - R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6 + R_7 + R_8} I_0 = \frac{(R_0 + \Delta R_x)^2 - (R_0 - \Delta R_x)^2}{4R_0} I_0 = \Delta R_x \cdot I_0 \quad (4)$$

同时受到 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 作用时,各个电阻值变化量和电桥输出分别为:

$$\begin{aligned} R_5 &= R_0 - \Delta R_z + \Delta R_y - \Delta R_x \\ R_6 &= R_0 + \Delta R_z + \Delta R_y - \Delta R_x \\ R_7 &= R_0 - \Delta R_z + \Delta R_y + \Delta R_x \\ R_8 &= R_0 + \Delta R_z + \Delta R_y + \Delta R_x \end{aligned} \quad (5)$$

$$U_2 = \frac{R_7 \cdot R_8 - R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6 + R_7 + R_8} I_0 = \frac{4(R_0 + \Delta R_y)\Delta R_x}{4(R_0 + \Delta R_y)} I_0 = \Delta R_x \cdot I_0 \quad (6)$$

对比公式(4)和公式(6)可以看出, $F_x$ 测量电路能够单独测量 $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 不会影响 $F_x$ 测量电路的输出结果。同理, $F_y$ 和 $F_z$ 测量电路亦具有单独测量 $y$ 和 $z$ 方向力而不受其他方向干扰的能力。根据惠斯通电桥输出原理,推导得到三轴力传感器的输出

表达式分别为:

$$U_x = \frac{R_7 \cdot R_8 - R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6 + R_7 + R_8} I_0 = \Delta R_x \cdot I_0 \quad (7)$$

$$U_z = \frac{R_3 \cdot R_4 - R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} I_0 = \Delta R_z \cdot I_0 \quad (8)$$

$$U_y = \frac{2R_0(R_9 + R_{10}) - 4R_0^2}{6R_0 + R_9 + R_{10}} I_0 = \frac{2R_0 \Delta R_y}{4R_0 + \Delta R_y} \cdot I_0 \quad (9)$$

传感器的输出灵敏度 $S$ 一般表示为传感器的满量程输出 $U$ 与量程 $F$ 的比值,如公式(10)所示。并且,根据半导体压阻效应原理,本文中半导体敏感电阻的电阻值变化量 $\Delta R$ 与初始电阻值 $R_0$ 的比值可表示为应变系数 $GF$ 与受到的应力 $\sigma$ 以及弹性材料杨氏模量 $E$ 倒数的乘积,如公式(11)所示。

$$S = \frac{U}{F} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{GF \cdot \sigma}{E} \quad (11)$$

联立公式(7)~(11),以 $S_x$ 、 $S_y$ 和 $S_z$ 分别代替 $S$ , $U_x$ 、 $U_y$ 和 $U_z$ 分别代替 $U$ , $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 分别代替 $F$ ,推导得到三轴力传感器三个测量电路的理论输出灵敏度分别为:

$$S_x = \frac{GF \cdot \sigma_{F_x} \cdot R_0 \cdot I_0}{E \cdot F_x} \quad (12)$$

$$S_z = \frac{GF \cdot \sigma_{F_z} \cdot R_0 \cdot I_0}{E \cdot F_z} \quad (13)$$

$$S_y = \frac{2R_0^2 \cdot GF \cdot \sigma_{F_y} \cdot I_0}{(4E \cdot R_0 + R_0 \cdot GF \cdot \sigma_{F_y}) \cdot F_y} \quad (14)$$

根据图7中仿真结果可知:在3 kN作用下, $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 测量电路中敏感电阻受到的平均应力分别为24.4 MPa、2.1 MPa和24.4 MPa,取传感器的供电电流为1.5 mA,计算得到 $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 测量电路的理论输出灵敏度分别为 $9.1 \times 10^{-3}$  mV/N、 $3.9 \times 10^{-4}$  mV/N和 $9.1 \times 10^{-3}$  mV/N。

表4 三轴力作用下敏感电阻值变化量

Table 4 Change of sensitive resistance value under three-dimensional force

三轴力	电阻值变化									
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
$F_x$	$+\Delta R_x$	$-\Delta R_x$	$+\Delta R_x$	$-\Delta R_x$	$-\Delta R_x$	$-\Delta R_x$	$+\Delta R_x$	$+\Delta R_x$	0	0
$F_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$	$+\Delta R_y$
$F_z$	$-\Delta R_z$	$-\Delta R_z$	$+\Delta R_z$	$+\Delta R_z$	$-\Delta R_z$	$+\Delta R_z$	$-\Delta R_z$	$+\Delta R_z$	$-\Delta R_z$	$+\Delta R_z$

### 2.3 六轴力解耦测量

六轴力传感器的静力学仿真分析显示:每个

三轴力传感器针对不同的力和力矩,都会产生相应的输出。因此难以通过电阻布置和电桥组合的

方式直接实现多维力解耦测量。由于三轴力传感器的线性特点, 其输出必定是六轴力线性组合的结果, 如公式(15)所示。

$$U_i = a_{i1}F_x + a_{i2}F_y + a_{i3}F_z + a_{i4}M_x + a_{i5}M_y + a_{i6}M_z \quad (i=1, 2, \dots, 12) \quad (15)$$

上式中,  $U_i$  为第  $i$  个测量电桥的输出电压,  $a_{i1} \sim a_{i6}$  为线性常系数,  $b_i$  为定常数。因此, 对相邻两个三轴力传感器的六组输出进行矩阵运算, 就可以解算得到六轴力, 如公式(16)所示。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (16)$$

以图 10 所示的六轴力传感器相邻的两根弹性梁(1号梁和2号梁)为例, 依次选取每根梁上传感器沿  $Z$ 、 $X$  和  $Y$  方向的三组输出并分别记为  $U_1 \sim U_6$ , 根据公式(7)~(9)可知  $U_1 \sim U_6$  的输出表达式如公式(17)所示。根据图 3 中六轴力传感器弹性梁表面应力仿真结果, 确定在  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  以及  $M_x$ 、 $M_y$  和  $M_z$  分别作用下,  $U_1 \sim U_6$  测量电路中半导体敏感电阻依次受到的平均应力, 如公式(18)所示。每一行中的 6 组数据分别对应  $U_1 \sim U_6$  测量电路中, 半导体敏感电阻依次受到的平均应力。

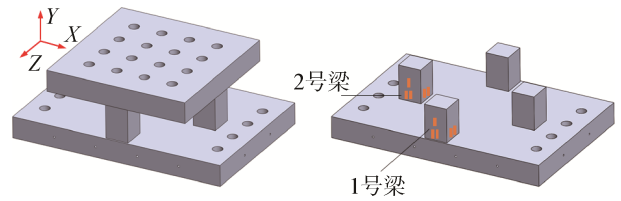


图 10 六轴力传感器弹性梁选择与编号示意图

Fig.10 Schematic diagram for selection and numbering of elastic beam of six axis force sensor

$$\begin{aligned} U_1 &= \Delta R_z \cdot I_0 \\ U_2 &= \Delta R_x \cdot I_0 \\ U_3 &= \frac{2R_0 \Delta R_y}{4R_0 + \Delta R_y} \cdot I_0 \\ U_4 &= \Delta R_z \cdot I_0 \\ U_5 &= \Delta R_x \cdot I_0 \\ U_6 &= \frac{2R_0 \Delta R_y}{4R_0 + \Delta R_y} \cdot I_0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} 0.47 & 20.5 & 0.28 & 4.81 & 19.59 & 4.9 \\ 4.94 & 3.86 & 4.56 & 4.08 & 4.65 & 4.82 \\ 20.75 & 4.29 & 8.94 & 20.5 & 0.1 & 9.43 \\ 58.71 & 42.19 & 51.68 & 21.15 & 0.11 & 41.95 \\ 0.32 & 101.4 & 0.23 & 101.42 & 0.68 & 35.09 \\ 0.36 & 19.44 & 0.11 & 45.32 & 55.53 & 55.9 \end{bmatrix} \quad (18)$$

联立公式(11)、(17)和(18), 并以 30 kN 和 15 kNm 作为满量程, 计算得到六轴力传感器的灵敏系数矩阵(19), 将该系数矩阵中的灵敏系数分别求导并代入公式(16)即得到六轴力传感器的理论输出表达式, 如公式(20)所示。

$$\begin{bmatrix} 0.01745 & 0.18342 & 0.77042 & 4.35965 & 0.02376 & 0.02673 \\ 0.76114 & 0.14332 & 0.15928 & 3.13292 & 7.52969 & 1.44356 \\ 0.00520 & 0.08458 & 0.16569 & 1.90058 & 0.00854 & 0.00408 \\ 0.17859 & 0.15148 & 0.76114 & 1.57054 & 7.53118 & 3.36534 \\ 0.72735 & 0.17265 & 0.00371 & 0.00817 & 0.05049 & 4.12351 \\ 0.09088 & 0.08940 & 0.17476 & 1.54551 & 1.29441 & 2.05418 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.73050 & 0.54521 & 0.12980 & 0.02294 & 4.20834 & 3.74075 \\ 0.13138 & 0.69776 & 0.62782 & 0.03192 & 0.01328 & 0.06927 \\ 19.23910 & 1.18229 & 0.60354 & 0.05262 & 11.71064 & 24.48535 \\ 0.55995 & 0.66013 & 0.13138 & 0.06367 & 0.01328 & 0.02971 \\ 0.13749 & 0.57921 & 26.93337 & 12.24244 & 1.98039 & 0.02425 \\ 1.10032 & 1.11857 & 0.57223 & 0.06470 & 0.07726 & 0.04868 \end{bmatrix} \times 10^7 \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (20)$$

### 3 结束语

本文围绕六轴力解耦测量和交叉干扰抑制的技术难题, 以大量程六轴力传感器为研究目标,

提出了一种压阻式大扭矩动态六轴力传感器的设计方法。根据 0~30 kN 的力和 0~15 kN·m 的力矩测试要求和固有频率 2 kHz 的技术指标, 对传感器的整体结构、直梁式三轴力传感器进行了设计分析;

根据六轴力的解耦测量要求,对传感器弹性体表面应力变化规律、敏感电阻布置和测量电路组合方式进行了分析研究,提出了基于矩阵解耦的六轴力测量方法。研究结论如下:

① 利用传感器结构对称性和测量电桥平衡原理,可以实现三轴力的解耦测量;

② 对于六轴力传感器,难以直接通过物理结构和电路组合的方式实现解耦测量,需借助传感器线性特性进行矩阵运算和解耦测量。

下一步将对所设计的六轴力传感器进行加工、封装和性能测试研究。

### 参考文献

- [1] NOH Y, SAREH S, WÜRDEMANN H, et al. Three-axis fiber-optic body force sensor for flexible manipulators[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(6): 1641-1651.
- [2] XIONG L, JIANG G, GUO Y, et al. A multi-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(9): 3632-3639.
- [3] LI T, PAN A, REN H. A high-resolution triaxial catheter tip force sensor with miniature flexure and suspended optical fibers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 5101-5111.
- [4] NOH Y, HAN S, GAWENDA P, et al. A contact force sensor based on S-shaped beams and optoelectronic sensors for flexible manipulators for minimally invasive surgery (MIS)[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3487-3495.
- [5] WANG L, JONES D, CHAPMAN G J, et al. Design of a digital triaxial force sensor for plantar load measurements [C]// Proceedings of 2019 IEEE Sensors, Montreal, QC, Canada, October 27-30, 2019: 8956606.
- [6] STEPHANIE E, OSAMA A M, MOJTABA A. A 6 DoF, wearable, compliant shoe sensor for total ground reaction measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2018, 67(11): 2714-2722.
- [7] XU H C, WANG S, MIAO X G. Research of multi-dimensional force sensor based on multiplexed fiber Bragg grating strain sensors[J]. Optical Engineering, 2017, 56(4): 047103.
- [8] HE X, RAN Z, XIAO Y, et al. Multi-dimensional force sensors based on all-fiber Fabry-Perot strain sensors[J]. Optics Communications, 2021, 490: 126694.
- [9] KISTLER. 测力产品-多分量测力计-9139AA[EB/OL]. (2021-12-19) [2021-07-01]. <https://www.kistler.com/zh/product/type-9139aa/>.
- [10] 左盟, 陈伟球, 杨明, 等. Y形横梁六维力/力矩传感器的应变分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(12): 1-8. ZUO M, CHEN W Q, YANG M, et al. Strain analysis of six-axis force/torque sensors with Y-shaped crossbeam [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(12): 1-8.
- [11] LI Y J, WANG G C, HAN B B, et al. Research on non-linear decoupling method of piezoelectric six-dimensional force sensor based on BP neural network[C]// 3rd International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE 2018), 19-22 July 2018, Chengdu, China.
- [12] LI Y J, WANG G C, YANG X, et al. Research on static decoupling algorithm for piezoelectric six axis force/torque sensor based on LSSVR fusion algorithm[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 110: 509-520.
- [13] ZHOU S L, SUN J, CHEN W X, et al. Method of designing a six-axis force sensor for stiffness decoupling based on Stewart platform[J]. Measurement, 2019, 148: 106966.
- [14] LI X Y, YIN Y Z, SUN Q, et al. Design and calibration experiment of six-dimensional force sensor for heavy-duty manipulator[C]// International Conference on Mechanical Engineering, Measurement Control, and Instrumentation, 2021.

### [作者简介]

赵友 1990年生,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为MEMS高温压力/振动传感器、切削力传感器与智能刀具。

赵玉龙 1968年生,教授,博士生导师,主要研究方向为MEMS技术、传感器技术及微纳制造领域基础理论和工程应用。

(本文编辑:傅杰)