

## Design of Three-Dimensional Force Sensor and Research on the Static Decoupling Algorithm \*

PENG Xiaowu<sup>1</sup>, MA Guolu<sup>1\*</sup>, ZHAO Yong<sup>2,3</sup>, SONG Zijun<sup>2,3</sup>, WANG Qingqing<sup>1</sup>

(Southwest University of Science and Technology, Key Laboratory of Manufacturing Process Testing Technology,  
Ministry of Education, Mianyang Sichuan 621000)

**Abstract:** For low precision and inter-dimensional coupling in obtaining a large range three-dimensional force sensor, it can be improved by the modification of elastomer from the perspective of mechanical decoupling. The elastomer adopts a cross-beam structure, with grooves are opened on both sides of the vertical beam and the resistance strain gauges pasted on the both sides of the cross beam, connecting through group bridging of resistance strain gauges. Based on the calibration load analysis of the sensor with a universal tester, by fitting data through multiple measurements under the guidance of least squares theory, the decoupling matrix between the input load and output voltage of the sensor can be made. Through calibration of the sensor, together with mechanical decoupling of the elastomer, the experiment of the three-dimensional force sensor is to be carried out. The results show that the type I and type II errors of the large range three-dimensional force sensor are 2.36% and 2.1% respectively, which can better control inter-dimensional coupling and the expected precision of the sensor can be guaranteed.

**Key words:** three-dimensional force sensor; static calibration; least square theory; structural decoupling; inter-dimensional coupling

EEACC: 7230 doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.11.015

## 三维力传感器的设计和静态解耦算法研究 \*

彭小武<sup>1</sup>, 马国鹭<sup>1\*</sup>, 赵涌<sup>2,3</sup>, 宋子军<sup>2,3</sup>, 王清清<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621010; 3. 航空发动机高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 针对三维力传感器在获取大量程空间三维力时存在精度低、维间耦合的问题, 从机械解耦角度进行改进, 弹性体采用十字梁型结构, 竖梁两侧开设通槽, 并将电阻应变片粘贴于竖梁和横梁两侧, 通过电阻应变片组桥方式连接。利用万能试验机对传感器进行标定加载分析, 基于最小二乘理论对经多次测量筛选出的数据进行拟合, 得出该传感器输入载荷与输出电压之间解耦矩阵。采用研制出的三维力传感器进行论证实验, 通过对传感器标定并结合弹性体本身机械结构解耦。实验结果表明, 所研制的大量程三维力传感器的 I 类误差和 II 类误差分别为 2.36% 和 2.1%, 能够较好地抑制各维间的耦合, 并达到了该传感器的预期精度要求。

**关键词:** 三维力传感器; 静态标定; 最小二乘理论; 结构解耦; 维间耦合;

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2021)11-1518-05

近年来, 随着科技革命的不断深入, 传感器的应用领域逐渐宽泛。如在风洞测力试验、飞机称重、智能机器人、军事国防等领域, 三维力传感器都是获取感知信息必不可少的器件。通过三维力传感器获取空间各分量力的大小, 但由于传感器在设计结构、制

造工艺上仍需极大改进, 这也导致传感器在测量空间各分量力时会出现不同程度上的维间耦合, 在大量程、高精度的测量领域更是如此。而在实际应用中, 要使传感器各维间的干扰尽可能的降低, 机械结构简单, 以满足测量的精度要求<sup>[1]</sup>。

项目来源: 航空发动机尾喷流中颗粒物参数检测关键技术研究项目(20zh0074)

收稿日期: 2021-04-28 修改日期: 2021-07-14

突破多维力传感器维间耦合的难题一度成为国内外学者们的研究热点<sup>[2]</sup>。

一是通过机械解耦途径解决。张海霞、崔建伟等<sup>[3]</sup>设计的一种基于结构解耦的新型应变式三维力传感器。它的弹性体是由两组二维通槽通孔结构的力传感器和横梁组成, 测力点位于横梁中心, 使得传感器自身结构存在很好地解耦性能<sup>[4-5]</sup>。吴强、俞志伟等<sup>[1]</sup>设计的一种小型电阻应变式三维力传感器, 其新颖之处在于使弹性体尺寸减小到与应变片尺寸为同一个数量级, 既省去加工(形成应力集中位置), 又减小传感器的体积。二是通过优化解耦算法。张景柱等<sup>[6]</sup>开发了一种基于最小二乘法<sup>[7-10]</sup>线性解耦算法的集成解耦模块。茅晨等<sup>[11]</sup>提出了基于耦合误差建模的静态解耦算法并结合实验验证, 得到了很好的效果。崔劲等<sup>[12]</sup>采用基于全回归线性解耦算法, 对比传统的基于求广义逆矩阵线性静态解耦得到更高的解耦精度。

目前, 传统静态解耦算法大多针对小量程的多维力传感器, 对于量程大的传感器的计算精度有待提高。本文结合机械解耦方式和解耦算法研制出一种大量程、高精度的三维力传感器。该传感器采用如图 1 所示的弹性体结构设计, 基于最小二乘法线性解耦, 为防止解耦过程中出现病态矩阵, 取多次试验数据中最为精确的值, 将其进行拟合, 得到静态线性解耦矩阵<sup>[13]</sup>。该传感器建立起负载与输出电压之间的数学关系, 从而获得空间三维力的大小。

### 1 传感器三维力学分解设计

三维力传感器主要由弹性体、电阻应变片与测量电路三部分构成。对弹性体施加单向载荷, 粘贴在应变梁上的电阻应变片产生微变形, 根据电阻应变片测量应变的理论可知, 弹性体在载荷的作用下, 电阻丝的电阻变化率与应变是成一种线性的关系, 其数学关系式即:

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon, \quad \frac{dL}{L} = \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $dR/R$  为电阻变化率;  $K$  为单根金属丝的灵敏系数,  $\varepsilon$  为金属丝材料的应变值;  $dL$  为金属丝长度伸长量(m);  $L$  为金属丝的长度(m)。通过式(1)可知, 应变值  $\varepsilon$  随电阻丝的变形发生相应地变化, 而电阻值的变化又由电阻应变片组成的电桥测量电路将机械量转变成电信号, 再通过惠斯通电桥组桥的方式, 建立起载荷与输出电压间的数学关系。

从传感器结构上进行优化改进, 弹性体采用十字梁型结构, 竖梁两侧开设通槽, 并将电阻应变片合理粘贴于竖梁和横梁两侧。通过搭建惠斯通全

桥测量电路, 使其他分量的载荷所产生的电阻增量尽可能不改变电桥的平衡状态, 实现传感器在结构上对力和力矩的机械分解或部分机械分解。

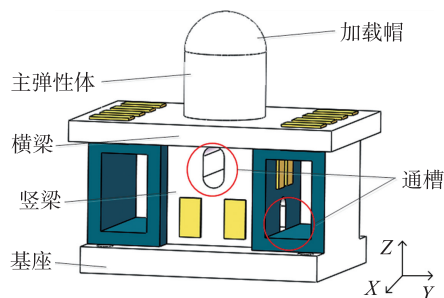


图 1 主弹性体结构示意图

在三维力传感器中, 弹性体一端与被测物体相接触, 一端连接着三维力传感器外壳, 是主要的承力结构部件。此传感器采用等截面梁式弹性元件设计, 对传感器主体中心(加载帽)施加集中载荷, 贴在横梁和竖梁上的应变片发生形变, 再通过测量电桥输出为电压<sup>[14]</sup>。弹性体三维结构模型如图 2 中(a)图所示。

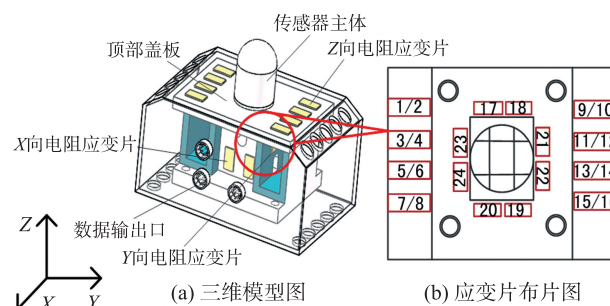


图 2 三维模型及应变片贴片位置示意图

因弹性主体结构不同, 则在受力后会, 不同部位所产生的应变值也不同, 并且各应变值之间存在着巨大的差异。为保证设计的三维力学传感器有足够好的应变灵敏度, 电阻应变片的粘贴位置, 如图 2 中(b)图所示。

三维力学传感器的  $X$ 、 $Y$  方向应变域均贴有 4 片电阻应变片,  $Z$  轴方向应变域共有  $4 \times 4 = 16$  片(正反面各贴有 8 片)电阻应变片, 整个三维力学传感器共 24 片电阻应变片。组成 6 个惠斯通全桥电路,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三组测量电压的输出信号。

图 3 为简化桥路用于测量  $X/Y/Z$  方向的力, 当

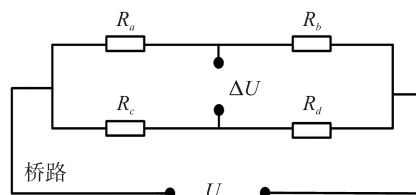


图 3 电压输出电路

在力  $F_z$  的作用下,桥路 1 中有 8 个应变片位于压应力区,另外 8 个应变片位于拉应力区,使电桥获得最大输出。 $R_a(a=1\sim4)$  表示为四个应变片组成的一个全桥。同理, $R_b/R_c/R_d$  依次类推。由于电阻应变片的压变效应,电阻值的变化量经惠斯通电桥转变为电压输出信号,就可得到作用在  $Z$  方向的力  $F_z$  的大小,实现负载与电压之间的转化。

当测量  $X$  方向的力  $F_x$ 、 $Y$  方向的力  $F_y$  时, $R_a/R_b/R_c/R_d$  表示为四个电阻应变片。在  $F_x$  或  $F_y$  作用时,利用惠斯通电桥的和差特性可知,相邻桥臂电阻反向变化,这时产生的电压输出相互叠加,电桥获得最大输出。反之,输出电压相互抵消。三维力学传感器的电阻应变片均采用等臂全桥接法,即所有电阻应变片的阻值均为  $R$ 。在连接桥路时,为保证惠斯通电桥拥有较高的灵敏度,同时也能降低因灵敏度过高所产生自我响应对实验数据造成的影响。故采用相互对称的连接方式,即相邻桥臂上的电阻应变片产生应变的方向相反,而相对桥臂上的电阻应变片产生应变的方向相同。

## 2 传感器的标定

整个标定实验平台由电子万能试验机、标定加载台、数据采集装置等搭建组成。而对传感器数据的采集以及分析处理采用的是德国福公司研发的 TwinCAT PLC Control 系统,最终完成了三维力传感器的静态标定。通过电子万能试验机对三维力传感器进行标定加载试验,如图 4 所示。



图 4 传感器标定装置实物图

在计算三维力学传感器标定时,理想情况下,只需考虑单方向产生的应变,通过应变片桥路的转化后所得到的电压信号只对被测力的某一个分量敏感,不必考虑受其余分量的影响。由于三维力传感器的结构和制造工艺等原因,单向力作用在 3 个应变梁上均会产生应变并输出数据。因此,维间耦合使三维力传感器的测量精度受到明显影响。为实现三维力学传感器的准确标定,从建立数学模型着手,采用最小二乘法对实验数据进行拟合,得出三维力学传感器标定的算法。

对三维力学传感器施加单向集中载荷力  $F$ ,则三坐标轴的 3 个分力分别为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ,传感器在三坐标轴上相应的应变  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$  经惠斯通电桥组桥电路处理后的输出信号分别为  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$ 。显然,此 3 个输出信号是输入量  $F = \{X, Y, Z\}^T$  的函数,即:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

用矩阵形式可表示为  $U = C \times F$ ,式中  $U$  为各分量输出的电压值, $C$  为解耦矩阵, $F$  为外加载荷。解耦矩阵可以通过静态标定得到,其反应了各维输入载荷与输出电压之间的耦合关系。解耦矩阵中  $C_{xy}$  表示的含义为:在  $Y$  方向施加载荷时, $X$  方向上的电压输出值,其余元素含义同理。

为防止出现病态解耦矩阵对实验结果产生干扰,对传感器进行重复性加载试验,将较为精确的几组数据进行拟合。实验基于微型电子万能试验机,按照国家标准对传感器进行施加载荷,设置加载速度为 0.1 mm/min,每个负荷按照一定梯度加载并保持时间暂定 2 min 使其达到稳定。通过万能试验机分别对  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向按照 4 kN 的级差作为一个测量点进行单向加载试验,将得到的部分标定数据如表 1 所示。

表 1 力传感器标定数据表

| $F_x/\text{KN}$ | $F_y/\text{KN}$ | $F_z/\text{KN}$ | $U_x/\text{mV}$ | $U_y/\text{mV}$ | $U_z/\text{mV}$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| 4               | 0               | 0               | 0.187 5         | 0.008 2         | 0.006 1         |
| 8               | 0               | 0               | 0.375 0         | 0.016 5         | 0.012 2         |
| 16              | 0               | 0               | 0.749 9         | 0.032 3         | 0.024 4         |
| 24              | 0               | 0               | 1.125 0         | 0.049 4         | 0.036 6         |
| 0               | 2               | 0               | 0.003 2         | 0.095 4         | 0.003 3         |
| 0               | 8               | 0               | 0.013 0         | 0.381 7         | 0.013 2         |
| 0               | 16              | 0               | 0.025 6         | 0.763 3         | 0.026 5         |
| 0               | 28              | 0               | 0.045 4         | 1.336 0         | 0.046 3         |
| 0               | 0               | 8               | 0.107 3         | 0.031 1         | 1.192 0         |
| 0               | 0               | 16              | 0.058 2         | 0.066 1         | 2.187 0         |
| 0               | 0               | 24              | 0.071 2         | 0.104 7         | 3.183 0         |
| 0               | 0               | 56              | 0.136 6         | 0.070 6         | 7.146 0         |

## 3 解耦测试分析

通过最小二乘法将表 1 中的数据进行拟合成线性曲线,如图 5 所示。将该直线转化成  $y = kx + b$  的形式,故该直线的斜率  $k$  对应于解耦矩阵  $C$  中的一个元素。

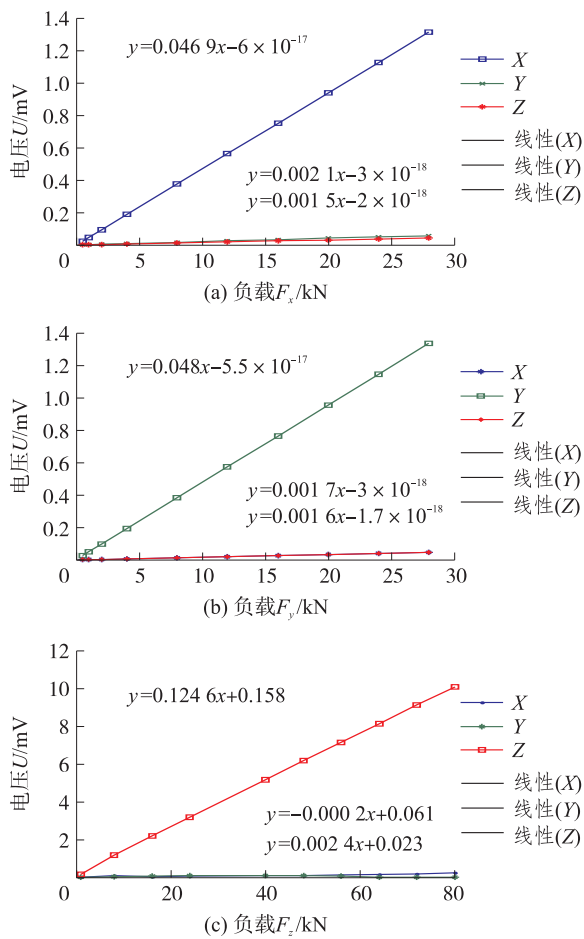


图 5  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  方向标定结果曲线

根据图 5 的  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  方向标定结果曲线可获得解耦矩阵  $C$ :

$$C = \begin{bmatrix} 0.046\ 9 & 0.001\ 6 & 0.002\ 4 \\ 0.002\ 1 & 0.047\ 7 & -0.000\ 2 \\ 0.001\ 5 & 0.001\ 7 & 0.124\ 6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

联立式(1)~式(3)可知,对弹性体三个分量分别进行加载试验,可以计算出各桥路输出的电压值。反之,已知  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  桥路输出的电压值通过矩阵求逆便可得到施加在弹性体上的力,即

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21.366\ 6 & -0.702\ 0 & -0.412\ 7 \\ -0.941\ 7 & 20.994\ 1 & 0.051\ 8 \\ -0.244\ 4 & -0.278\ 0 & 8.029\ 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

将解耦算法写入数据采集系统程序中,进行解耦验证。通过万能试验机分别对  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向进行单向加载试验,再对比分析解耦矩阵计算得到的实际三维力,其误差值如表 2 所示,可以得出  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向加载力的 I 类误差(静态非线性率)最大值为 2.36%。

通过 II 类误差(静态耦合率)表征传感器各方向间的耦合程度<sup>[15]</sup>,经实验数据计算可知: $Z$  方向

与  $X$ 、 $Y$  方向的耦合率分别为 0.62%、2.1%, $X$  方向与  $Y$  方向的耦合率为 0.064%,即  $Z$  方向加载时, $Z$  方向与  $Y$  方向最大维间耦合误差为 2.1%F.S。

利用以上方法对该传感器各维间进行多次重复性验证试验,整理出部分相关数据,如表 3 所示。

表 2 力传感器解耦测试结果对比表

| $F/\text{kN}$ | 理论值 | 测量值      | I 类误差/% |
|---------------|-----|----------|---------|
| $Z$ 向         | 54  | 55.275 0 | 2.360   |
| $X$ 向         | 24  | 23.981 0 | 0.063   |
| $Y$ 向         | 24  | 24.016 3 | 0.068   |

表 3 传感器部分参数表

| 方向    | 测量范围    | 非线性度     | 分辨率    | 温漂        |
|-------|---------|----------|--------|-----------|
| $Z$ 向 | 0~60 kN | 0.05%F.S | 0.015% | 0.04%/10K |
| $X$ 向 | 0~30 kN | 0.50%F.S | 0.250% | 0.20%/10K |
| $Y$ 向 | 0~30 kN | 0.50%F.S | 0.250% | 0.20%/10K |

## 4 结论

①设计了一种新型的电阻应变式 3 维力传感器,通过改进弹性体的结构以及应变片排布方式,有效减小了传感器的体积,从机械结构解耦的途径进一步提高了弹性体本身的解耦性能。

②试验结果表明,该传感器主分量( $Z$  向分量)保证 I 类误差控制在 2.36% 范围内,II 类误差最大值仅达到 2.1%,传感器的测量精度显著提高,验证了传感器有较好地解耦性能,攻克了各分量量程大且极度不匹配的难点,能够满足实际应用的需求。

## 参考文献:

- [1] 吴强,俞志伟,吉爱红,等. 一种小型电阻应变式三维力传感器的仿真设计[J]. 中国机械工程,2011(11):32-37.
- [2] 于常安,李平,王罗. 三分量应变传感器弹性体结构设计[J]. 传感技术学报,2012,25(3):333-337.
- [3] 张海霞,崔建伟,陈丹凤,等. 一种结构解耦的新型应变式三维力传感器研究[J]. 传感技术学报,2014,27(2):162-167.
- [4] Zhao Y, Jiao L, Weng D, et al. Decoupling Principle Analysis and Development of a Parallel Three-Dimensional Force Sensor[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1506.
- [5] 张晨,张元开,王均. 基于串并混联柔顺机构的三维力传感器设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(8):4-7.
- [6] 张景柱,郭凯,徐斌. 六维力传感器静态解耦算法应用研究[J]. 传感器与微系统,2007(12):58-59,62.
- [7] 何洪军,刘福强,马传宝,等. 基于伺服关节用三维压力传感器的设计研究[J]. 微特电机,2017,45(1):41-43.
- [8] He X, Ran Z, Xiao Y, et al. Three-Dimensional Force Sensors Based on All-Fiber Fabry-Perot Strain Sensors[J]. Optics Communications, 2021, 490: 126694.
- [9] Huang G, Zhang D, Sheng G, et al. Design and Optimization of a

Novel Three-Dimensional Force Sensor with Parallel Structure[J].  
Sensors, 2018, 18(8):2416.

- [10] 姜力,刘宏,蔡鹤皋,等. 基于神经网络的多维力传感器静态解耦的研究[J]. 中国机械工程, 2002(24):37-40+5.
- [11] 茅晨,宋爱国,高翔,等. 六维力/力矩传感器静态解耦算法的研究与应用[J]. 传感技术学报, 2015, 28(2):205-210.
- [12] 崔劲,高震,彭博. 三维力传感器静态解耦算法研究[J]. 软件,

2020, 41(11):102-105.

- [13] 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.
- [14] 曹会彬,孙玉香,刘利民,等. 多维力传感器耦合分析及解耦方法的研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8):1136-1140.
- [15] 马俊青,宋爱国,吴涓. 三维力传感器静态解耦算法的研究与应用[J]. 计量学报, 2011, 32(6):517-521.



彭小武(1996—),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事先进测试技术方面的研究, pengxiaowu666@163.com;



马国鹭(1981—),男,四川巴中人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光学精密工程、现代测试方法以及机械系统装备等方面的研究, maguolu999@163.com。