

文章编号 1004-924X(2025)10-1584-10

压电四维测力仪扭矩测量精度提升

张 军, 张 鹏, 滕玄德, 蔡佳乐, 王郁赫, 任宗金*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 现有压电式四维力测量方法中, 扭矩有通过侧向力解算和直接测量两种方式, 解算法适用性广但受分力间交叉耦合影响大, 直接测量理论精度较高但传感器布置方式受限。本文提出通过传感器内增加石英晶组, 不依赖传感器特殊布置而实现扭矩直接测量的四维力测量方案。首先, 确定传感器布局方案, 在现有三向力测量基础上, 各传感器内新增剪切力测量晶组用以测量扭矩; 定义传感器加工、装配过程的误差, 建立两种测量方法下扭矩测量误差传递模型, 通过数值仿真对比测量精度上的差异; 设计制备了测力仪, 对测力仪关键尺寸进行参数化分析; 开展静、动态性能检定实验, 在此基础上, 开展了多点扭矩加载标定实验, 利用两种测量方案计算扭矩。实验结果表明: 测力仪最大非线性误差、重复性误差 $< 0.5\%$, 向间干扰 $< 3\%$, 测力仪各向固有频率 > 1400 Hz, 静、动态性能符合设计要求; 多点扭矩加载实验中新方案均方误差降低 83.4% , 最大测量误差降低 26.5% 。验证了新方案在提高扭矩测量精度方面的有效性, 具有广泛的应用前景。

关键词: 扭矩测试精度; 四维力测量; 四向力传感器; 测力仪设计; 参数化分析

中图分类号: O342.1; TH703 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253310.1584 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253310.1584

Improvement of torque measurement accuracy in piezoelectric four-dimensional force sensors

ZHANG Jun, ZHANG Peng, TENG Xuande, CAI Jiale, WANG Yuhe, REN Zongjin*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

* Corresponding author, E-mail: renzongjin@dlut.edu.cn

Abstract: In current piezoelectric four-dimensional force measurement methods, torque is determined through two approaches: calculation based on lateral forces or direct measurement. The calculation method offers broad applicability but is significantly affected by cross-coupling between force components, while direct measurement theoretically achieves higher accuracy but is constrained by sensor arrangement limitations. This paper proposed a novel four-dimensional force measurement solution that enabled direct torque measurement without relying on specialized sensor configurations by incorporating quartz crystal sets within the sensor. First, the sensor layout scheme was determined. Based on the existing three-axis force measurement, additional shear force measurement crystal groups were incorporated into each sensor to measure torque. The errors in sensor machining and assembly processes were defined, and a torque measurement error transmission model was established for both measurement methods. A numerical simu-

收稿日期: 2025-01-06; 修订日期: 2025-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金支持项目 (No. 52125504)

lation was conducted to compare the accuracy differences between the two methods. A force measuring instrument was designed and fabricated, and the key dimensions of the instrument were analyzed parametrically. Static and dynamic performance calibration experiments were carried out, followed by a multi-point torque loading calibration experiment, in which torque was calculated using both measurement schemes. Experimental results show that the maximum nonlinearity error and repeatability error of the force measuring instrument are both less than 0.5%, the inter-axis interference is less than 3%, and the natural frequency of each axis exceeds 1 400 Hz, meeting the design requirements for static and dynamic performance. In the multi-point torque loading experiment, the root mean square error of the new scheme is reduced by 83.4%, and the maximum measurement error is reduced by 26.5%. These results verify the effectiveness of the new scheme in improving torque measurement accuracy, demonstrating its broad application potential.

Key words: torque measurement accuracy; four-dimensional force measurement; four-axis force sensor; force measurement instrument design; parametric analysis

1 引 言

四维力测量技术能够同时获取三向力和扭矩的信息,相比传统的单轴或低维度测量方法,更适用于复杂力学环境的精确分析,广泛应用于航空航天、机器人技术、智能制造、汽车工业等领域^[1-3],为多自由度系统的精确控制、故障诊断和材料加工测试提供强有力的数据支持^[4]。扭矩作为空间力矢量解耦的关键参数,直接影响多维力场的完整表征。因此,设计合理的四维力测量方案,提高扭矩测量精度,是突破现有测量瓶颈的关键方向^[5]。

目前,压电式四维测力仪中扭矩测量主要采用力测量晶组解算和扭矩测量晶组直接输出两种方法。解算法利用剪切力晶组测量水平分力间接计算扭矩;优点是扭矩测量不依赖于传感器特殊布置,布置灵活性较强。如 Kislter9255C 型测力仪^[6]采用四个三向力传感器矩形布置的方式测量四维力,该方式存在水平分力之间交叉耦合引发扭矩测量偏差呈非线性增长的问题,往往需要通过提高装配精度^[7]、优化标定方法^[8-9]、数据解耦^[10-11]等方式进行改善。相比之下,扭矩直接输出的方式通过在传感器中新增剪切力测量晶组以测量扭矩,避免了交叉耦合,实现扭矩的单独测量和直接输出,理论上有更高的扭矩测量精度。但该测量方法要求测量晶组与传感器布置圆相切,导致传感单元空间排布自由度显著受限。曲国杰等^[12]设计钻削四维测力仪,将四个传

感器布置在力测量轴线上,每个传感器新增一组剪切力晶组以测量扭矩,该种方式有效提高扭矩测量精度,装配难度降低,但因为传感器布置在坐标轴上引起结构刚度降低,变加载点测量精度有所欠缺;Kislter 公司 9272 型测力仪^[13]通过在圆周均匀布置 40~60 片剪切力测量晶组以实现扭矩的直接测量,但该方法对剪切力测量晶组装配精度要求极高,随着面域增大,晶组数目与装配难度成几何倍数增加,有效测量面域仅为半径 20 mm 分布圆;李映君等^[14]设计轮辐结构测力仪,利用并联分载原理将力与力矩测量传感器区分开,但所用传感器较多,适用于大量程重载测量。

综上所述,压电式四维力测力仪存在解算法测量扭矩受交叉耦合影响大、直接测量法传感器布置受限的问题。基于此,提出一种不依赖传感器特殊布置的扭矩直接测量方案,建立误差输出模型对比不同测量方法的精度,设计测力仪结构并进行静、动态标定,并通过实验对其与解算法下扭矩测试精度进行对比分析。

2 测量方案设计与测量误差分析

2.1 压电式四维力测量方案设计

现有压电式四维测力仪以三向力传感器为核心,传感器以矩形布置的方式固定在测力仪上下板之间,各传感器之间的间距称之为跨距,测力仪上表面受到矢量力作用时,对各传感器产生

的输出汇总后进行三向正交力及扭矩的计算,力学模型如图 1。

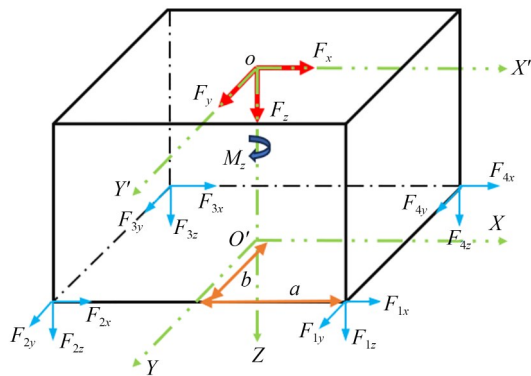


图 1 压电式四支点测力仪力学模型

Fig. 1 Mechanical model of the piezoelectric four-point support force-measuring instrument

三向力计算公式如式(1):

$$F_j = \sum_{i=1}^4 F_{ij}, \quad (1)$$

其中: F_{ij} 为*i*号传感器*j*向受力, F_j 为测力仪*j*向总受力。实际加载时,传感器受外力 F_{ij} 产生电荷信号,经电荷放大器转换为电压信号 U_{ij} ,设置电荷灵敏度为 1 pC/mV 时,两者关系见式(2):

$$F_{ij} = U_{ij}/k_{ij}, \quad (2)$$

其中: k_{ij} 为*i*号传感器*j*向灵敏度,测力仪经*j*向标定可得总灵敏度 k_j 。

扭矩测量采用“力×力臂”法解算,公式见式(3):

$$M_z = (U_{1x} + U_{2x} - U_{3x} - U_{4x})b/k_x + (U_{1y} + U_{4y} - U_{2y} - U_{3y})a/k_y. \quad (3)$$

该测量方法复用传感器的水平分力来解算力矩,水平分力之间存在交叉耦合,降低测量精度。现提出基于四向力传感器的新型测量方案(如图 2 所示)。

传感器采用正方形布置,在现有三向力测量基础上,新增一组力敏感方向与传感器布置圆相切的石英晶组,力敏感方向分别沿X轴正向顺时针旋转 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 。定义该晶组为M晶组,定义 F_{im} 为*i*号传感器所测剪切力。

该布置方式下三向力计算公式同式(1),扭矩利用M晶组输出结果解算,见式(4):

$$M_z = (\sum_{i=1}^4 F_{im}) \times \sqrt{2} a = (\sum_{i=1}^4 U_{im})/k_m, \quad (4)$$

其中: k_m 由标定时标准扭矩与输出电压直接拟合

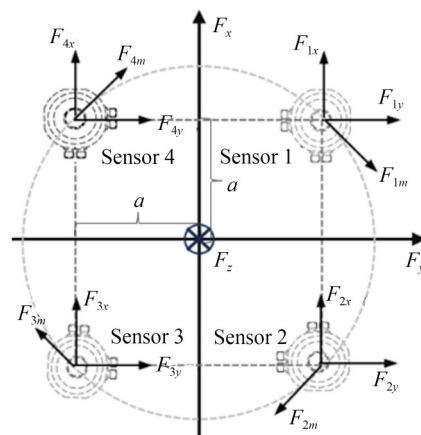


图 2 传感器布置形式

Fig. 2 Sensor arrangement

得到,单位为: $\text{pC}/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。

四向力传感器结构如图 3,核心部件为正八边形石英晶片组成的晶组,正八边形晶片的特殊设计可以实现传感器内晶组的精准装配^[15],通过不同切型晶组的特定角度布置,实现对三向正交力与X-O-Y平面与坐标轴成 45° 剪切力的测量。

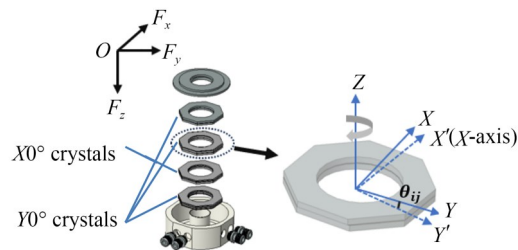


图 3 四向力传感器结构与晶组偏转现象

Fig. 3 Structure of four-directional force sensor and crystal deflection phenomenon

该测量方案在保证三向力高精度测量的基础上,提供了两种扭矩测量途径:一是通过传统的三向力解算扭矩;二是利用新增的剪切力敏感方向实现扭矩的单独测量,下面将通过理论与实验相结合的方式对两种途径的精度和适用性进行对比。

2.2 扭矩测量误差输出模型

结合测力仪敏感元件设计、装配与实际测试全过程,归纳影响扭矩测量精度的主要误差因素与传递路径,建立误差输出模型。

影响测力仪测量精度的主要误差因素如下:

传感器位置和方向的装配偏差:传感器位置偏差为传感器中心位置相较于理想位置的偏移,见图4,定义为 Δl_{ij} (i 号传感器沿 j 向正方向偏移的距离);方向偏差包括传感器整体绕 Z 轴旋转角度 α_i (见图4)和传感器组装时晶组转角 θ_{ij} (见图3),二者共同作用致使石英晶组力敏感轴偏离理想测力方向,引发维间耦合,降低扭矩测量精度。

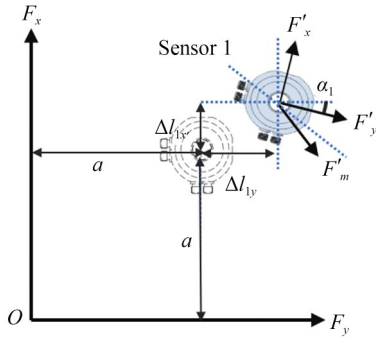


图4 传感器装配误差

Fig. 4 Sensor assembly error

传感器灵敏度差异:不同传感器灵敏度系数 k_{ij} 存在差异,相同载荷作用下,不同传感器输出幅值不一致,降低输出的稳定性。

力矢量经测力仪上表面传递至传感器平面,传感器因误差因素产生耦合输出 U_{ij} ,电压信号经两种测量方法处理得到输出结果。标准扭矩输入记为 M_z ,传统方法计算结果记为 M_{z1} ,M晶组直接测量结果记为 M_{z2} ,上述因素在扭矩测量过程中的传递路径见图5。

下面通过公式推导分析误差传递过程。

矢量力由测力仪上表面传递至传感器平面,定义 i 号传感器三向输出为:

$$F_i = [F_{ix} \ F_{iy} \ F_{iz}] \quad (5)$$

输入力矩 M_z 可由传感器受力与力臂相乘得到,定义理想情况下传感器与坐标轴间距为 a ,因装配误差致使传感器偏移 Δl_{ij} 。则标准力矩 M_z

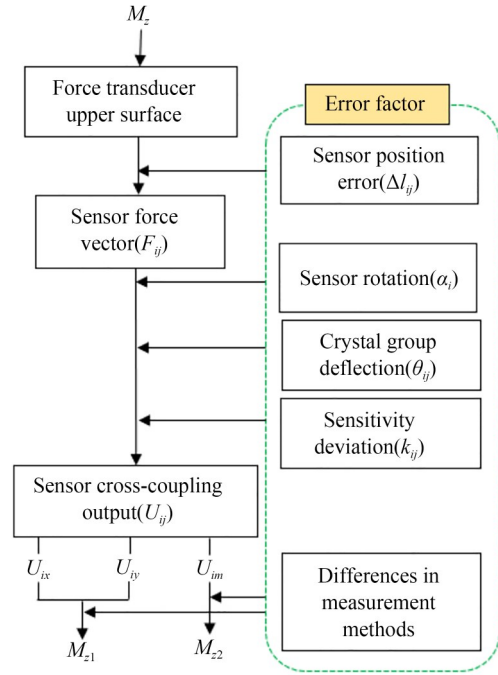


图5 扭矩测量误差传递路径

Fig. 5 Torque measurement error transmission path

计算结果为:

$$M_z = F_{1x}(a - \Delta l_{1y}) + F_{2x}(a - \Delta l_{2y}) - F_{3x}(a + \Delta l_{3y}) - F_{4x}(a + \Delta l_{4y}) - F_{3y}(a - \Delta l_{3x}) - F_{2y}(a - \Delta l_{2x}) + F_{1y}(a + \Delta l_{1x}) + F_{4y}(a + \Delta l_{4x}). \quad (6)$$

因传感器装配和晶组偏转引起各力敏感方向偏离理想方向,定义 i 号传感器 j 向晶组沿顺时针方向偏转 φ_{ij} rad。则各晶组总偏转角度为:

$$\varphi_{ij} = \theta_{ij} + \alpha_i. \quad (7)$$

力敏感轴较理想坐标轴在 X - O - Y 平面发生偏转,致使输出电压受多向力影响,产生维间耦合现象。则测量力分量与传感器输出电压计算需要经过旋转矩阵变换,计算结果为:

$$\begin{cases} U_{ix} = k_{ix} [\cos \varphi_{ix} F_{ix} + \sin \varphi_{ix} F_{iy}] \\ U_{iy} = k_{iy} [-\sin \varphi_{iy} F_{ix} + \cos \varphi_{iy} F_{iy}] \end{cases} \quad (8)$$

传感器 M 向输出计算同 X, Y 向,计算各传感器 M 向输出分别为:

$$\begin{cases} U_{1m} = k_{1m} [-\sin(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{1x} + \cos(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{1y}] \\ U_{2m} = k_{2m} [-\cos(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{2x} - \sin(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{2y}] \\ U_{3m} = k_{3m} [\sin(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{3x} - \cos(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{3y}] \\ U_{4m} = k_{4m} [\cos(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{4x} + \sin(\pi/4 + \varphi_{im}) F_{4y}] \end{cases} \quad (9)$$

计算 X, Y 向实际灵敏度。以 X 向输出为例,

在理想标定下对测力仪中心施加标准力,传感器

受力有:

$$F_{1x} = F_{2x} = F_{3x} = F_{4x}. \quad (10)$$

在测力仪 X 向施加标准力,得到 X 向电压输出,拟合输入-输出曲线,计算 X 向灵敏度系数 k_x 见式(10):

$$k_x = \frac{\sum_{i=1}^4 U_{ix}}{\sum_{i=1}^4 F_{ix}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [k_{ix} \cos(\pi/4 + \varphi_{ix})]. \quad (11)$$

Y 向测量原理相同,计算 k_y 如式(11):

$$k_y = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [k_{iy} \cos(\pi/4 + \varphi_{iy})]. \quad (12)$$

中心加载扭矩,理想标定情况下,传感器受力为:

$$\begin{aligned} -F_{1x} &= -F_{2x} = F_{3x} = F_{4x} \\ F_{1x} &= -F_{2x} = -F_{3x} = F_{4x} \end{aligned} \quad (13)$$

测力仪施加标准扭矩,根据扭矩测量晶组 M 向输出电压与标准扭矩 M_z 计算 M 向晶组灵敏度,见式(13):

$$\begin{aligned} k_m &= \frac{\sum_{i=1}^4 U_{mi}}{M_z} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^4 [\sin(\pi/4 + \varphi_{im})(\sum_{j=1}^4 h(j)k_{jm}) + 8a + \sum_{j=1}^4 -h(j)\Delta l_{jy} + \sum_{t=1}^4 g(t)\Delta l_{jx}]}{8a + \sum_{j=1}^4 -h(j)\Delta l_{jy} + \sum_{t=1}^4 g(t)\Delta l_{jx}} \cdot \\ &\quad \frac{\cos(\pi/4 + \varphi_{im})(\sum_{t=1}^4 g(t)k_{im})}{8a + \sum_{j=1}^4 -h(j)\Delta l_{jy} + \sum_{t=1}^4 g(t)\Delta l_{jx}}. \end{aligned}$$

$$h(j) = \begin{cases} -1 & j=1, 2 \\ 1 & j=3, 4 \end{cases}$$

$$g(t) = \begin{cases} 1 & t=1, 4 \\ -1 & t=2, 3 \end{cases} \quad (14)$$

根据式(3)、式(4),可得 M_{z1}, M_{z2} 引入实际测试条件下的样本数据与误差分布,进一步分析两种测量方法的性能表现。

2.3 理论测量精度对比

结合测力仪的实际测试需求,模拟不同受力状态下的力输出样本,确定测力仪的量程为:Z 向 $-6 \sim 8$ kN,侧向量程为 ± 6 kN,扭矩量程为 ± 400 N·m。为保证样本的多样性和覆盖性,采用超立方体分布的采样方法,设测力仪可测量方向为 N 维力学空间,通过均匀分布生成 500 个样本点,得到样本矩阵 S_{sample} 见式(16):

$$S_{\text{sample}} = \begin{bmatrix} F_{x,1} & F_{y,1} & F_{z,1} & M_1 \\ F_{x,2} & F_{y,2} & F_{z,2} & M_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{x,500} & F_{y,500} & F_{z,500} & M_{500} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中:本式 $F_{i,j}$ 为测力仪第 j 次样本下 i 向输入力

根据样本矩阵,基于刚体假设和力学分配原则下测力仪受力与传感器受力关系得到每一组样本数据下传感器理论输出^[16]。

根据实际加工与装配精度,假定满足正态分布,定义各误差的随机变量。如表 1 所示。

表 1 测力仪误差分布

Tab. 1 Result of system scale calibration

类别	符号	数量	分布
位置误差	Δl_{ij}	8	$N(0, (6.67 \times 10^{-5})^2)$
传感器转角	α_i	4	$N(0, 0.0058^2)$
晶组转角	θ_{ij}	12	$N(0, 0.0029^2)$
灵敏度误差	k_{ij}	12	$N(1, 0.01^2)$

随机生成 5 000 种误差组合,将样本数据和误差代入测量模型,根据公式(3)、公式(4)计算 M_{z1}, M_{z2} 。

为全面评估两种方法的精度,分别计算两种测量输出模型的均方差(MSE),确定系数(R^2),最大绝对误差(MaxAE),计算结果如图 6 所示。

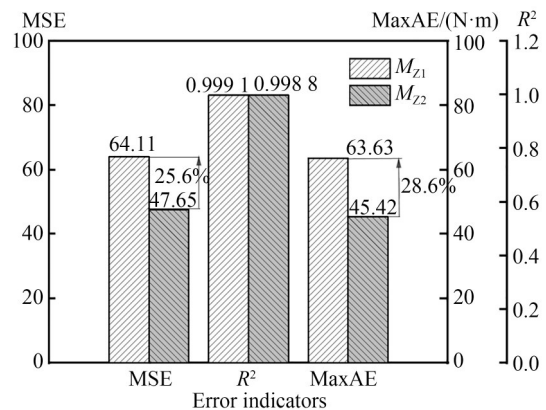


图 6 测量方法误差指标

Fig. 6 Error metrics of measurement methods

由图示结果可知,新型测量方法均方误差相较于传统方法降低 25.6%,最大绝对误差降低 28.6%,验证了该方案在多误差条件下的适用性和可靠性。

3 测力仪结构设计

确定传感器布置方案后,设计测力仪结构如

图 7 所示,该测力仪由测力仪体、4 个四向力传感器组成。传感器呈正方形布置在测力仪底板上,由预紧螺栓施加预紧。

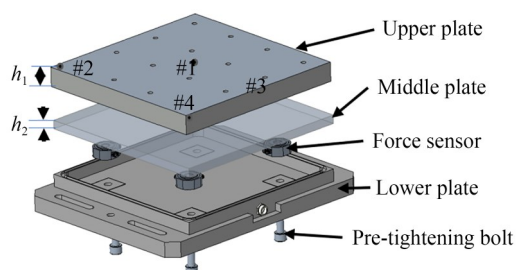


图 7 测力仪结构

Fig. 7 Structural of the force-measuring instrument

传感器跨距 $2a$ 和上、中板总厚度 ($H=h_1+h_2$) 作为测力仪关键参数,直接影响测力仪变形与测量精度。利用 Ansys workbench 进行参数化分析,在测力仪上表面设置四个加载点,包括主向中心加载、主向偏心加载、侧向中心加载及侧向偏心加载(加载点布置如图 6 中 #1-#4 所示),以传感器跨距和板厚为自变量,以传感器输出力值与上板变形为因变量进行参数化分析。厚度 h 变化范围为 20~38 mm,跨距变化为 150~170 mm。

传感器实际受力和跨距的关系如图 8。传感器实际受力随跨距呈先增大,后减小的趋势。跨距在 160 mm 左右时,传感器受力最大,结合传感器安装空间需要,确定传感器跨距为 160 mm。

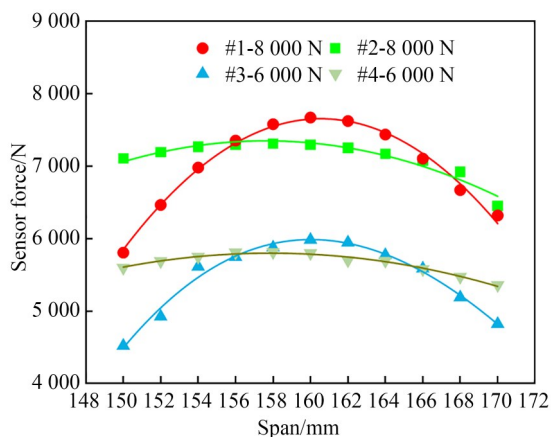


图 8 测力仪受力随跨距变化

Fig. 8 Force variation of the force-measuring instrument with span

测力仪上板厚度直接影响测力仪的整体刚度,板厚太薄引起测力仪刚度降低,实际加载产生变形,影响测力仪输出。进行测力仪板厚的参数化分析,测力仪上板变形随板厚变化如图 9 所示。

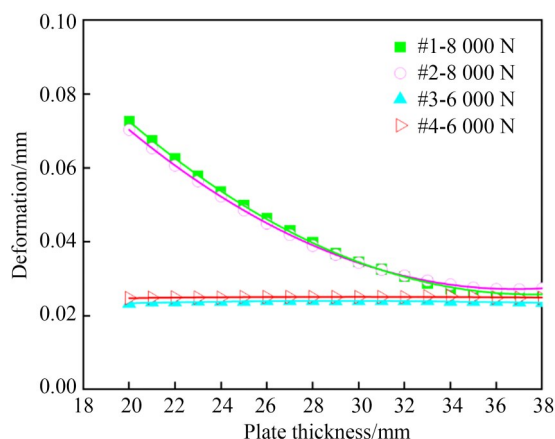


图 9 板变形随厚度变化

Fig. 9 Plate deformation with thickness variation

随上板板厚增加,测力仪整体变形较小,板厚增大到 36 mm 时,变形量下降趋势缓慢并接近平稳。

综合考虑传感器受力与上板变形,确定测力仪支撑跨距 $2a$ 为 160 mm,测力仪板厚 H 为 36 mm。

4 测力仪标定

4.1 测力仪性能标定

为评估测力仪输出性能,进行静态标定实验。保持实验室温度为 20~25 °C 之间,控制环境湿度 $<60\%RH$,分别在四维力方向 (Z 向、 X 向、 Y 向、扭矩 M_z) 以各向量程的 1/4 为阶梯加载。

实验装置见图 10,测力仪固定于标定台上,施加载荷,使用最大非线性误差 $\leq 0.01\%F \cdot S$ 的应变式标准力传感器测量输入力值,并通过精度等级为 0.02 mm 的倾角仪校准力源倾斜后进行实验,采用两标准力源对加的方式施加扭矩,使用最小量程为 0.1 cm 的直角尺校准力臂。

传感器内石英晶组受力产生电荷,经电荷放

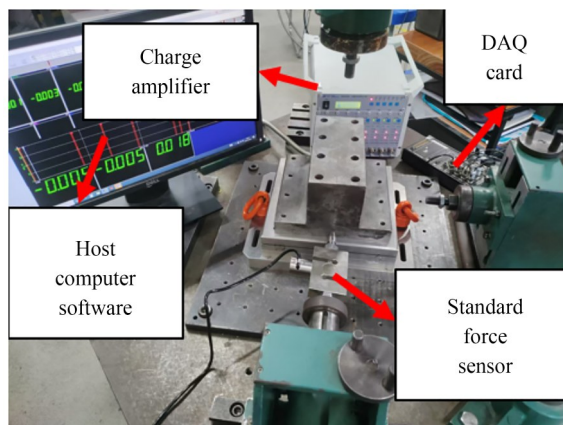


图 10 标定装置及实验

Fig. 10 Calibration flowchart and experiment diagram

大器转换为电压信号,随后经DT9804型数据采集卡完成模数转换,最终用DEWSOFT软件实现

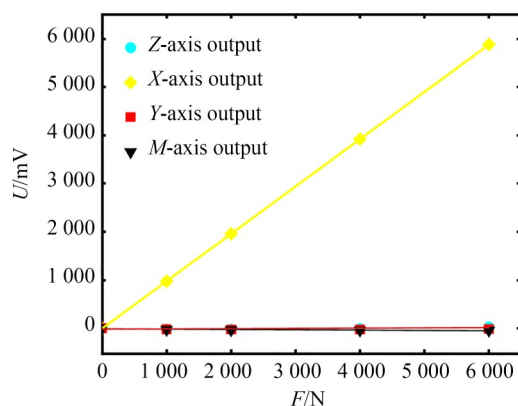
信号同步采集并处理。

记录加载过程中电压输出,拟合输出特征曲线见图 11。

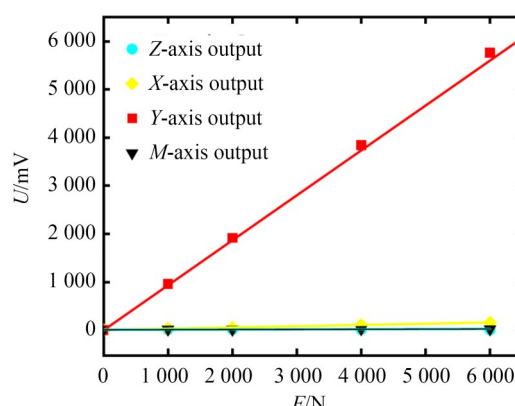
计算静态性能指标如表 2 所示。

由表 2 可知,测力仪最大非线性误差与重复性误差均小于 0.5%,向间干扰小于 3%,静态性能优异,符合压电测力仪静态性能要求。同时基于拟合曲线计算传感器灵敏度,得到的 k_z , k_x , k_y , k_m 灵敏度分别为: 3.84 pC/N, 7.85 pC/N, 7.75 pC/N 和 70.72 pC/(N·m)。

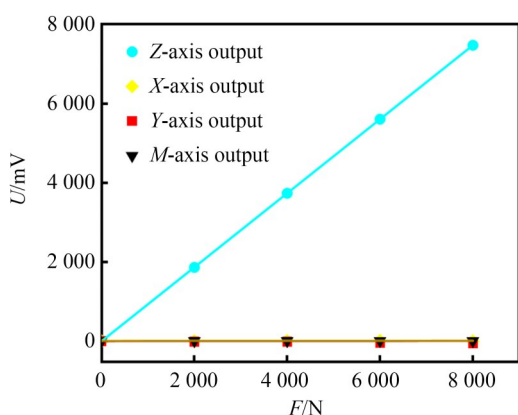
为评估测力仪的动态响应特性,使用脉冲激励法获取三向固有频率,测量结果见图 12,得到测力仪 X, Y, Z 向固有频率分别为 1 451.75, 1 496.44, 2 391.57 Hz,符合动态测试要求。



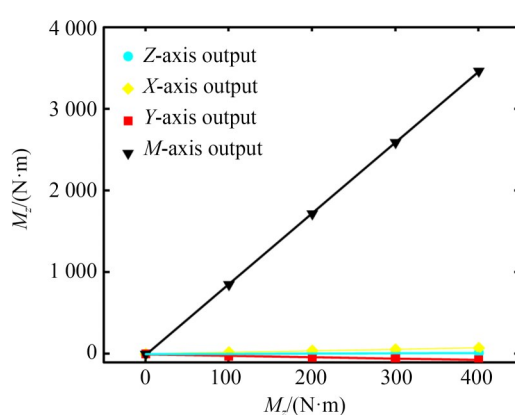
(a) X向标定结果
(a) X-axis calibration results



(b) Y向标定结果
(b) Y-axis calibration results



(c) Z向标定结果
(c) Z-axis calibration results



(d) 扭矩标定结果
(d) Torque calibration results

图 11 测力仪标定结果

Fig. 11 Plate deformation with thickness variation

表 2 静态性能指标

Tab. 2 Static performance metrics

测量方向	向间干扰/%				线性度/%	重复性误差/%
	Z向	X向	Y向	M向		
Z向	—	0.17	−0.78	0.09	−0.16	−0.34
X向	0.44	—	2.70	−0.81	0.06	0.03
Y向	0.55	0.17	—	0.04	0.06	0.06
M_z	0.46	2.16	−2.07	—	0.35	0.35

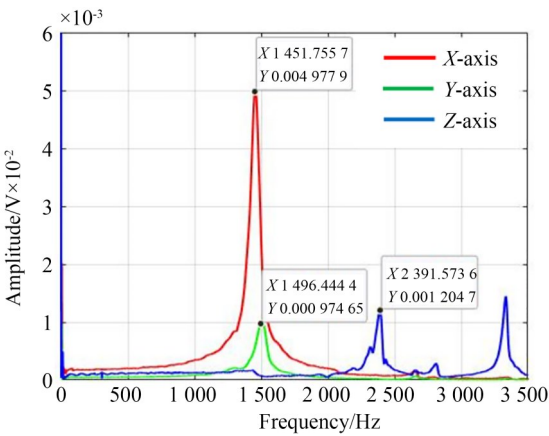


图 12 测力仪固有频率

Fig. 12 Natural frequency of force sensor

4.2 扭矩测量精度对比实验

为验证两种扭矩测量方式的精度,设计扭矩变加载点实验,在传感器布置跨距范围内设置加载点:绕上板中心位置 60 mm×60 mm 的正方形范围内,均匀设置点 b1-b8;在对角线长为 24 mm×24 mm 的菱形中心与边界设置点 a1-a5,加载点布置见图 13。

以满量程(400 N·m)加载扭矩,标定结果见表 3。

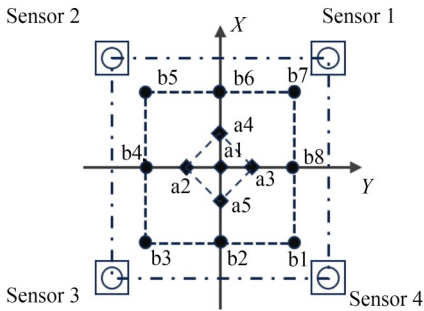


图 13 加载点布置

Fig. 13 Arrangement of variable loading points

表 3 测力仪输出电压

Tab. 3 Force sensor output voltage (mV)

加载点	$U_{1x}+U_{2x}$	$U_{3x}+U_{4x}$	$U_{1y}+U_{4y}$	$U_{2y}+U_{3y}$	$\sum_{i=1}^4 U_{im}$
a1	10 043	−10 259	10 216	−9 366	28 291
a2	9 657	−10 386	10 745	−9 634	28 676
a3	9 584	−10 384	10 626	−9 626	28 533
a4	9 522	−10 180	10 785	−9 648	28 484
a5	10 196	−10 109	9 875	−9 080	27 841
b1	10 134	−10 185	9 847	−8 983	27 764
b2	10 281	−10 211	9 974	−9 057	28 044
b3	10 115	−10 110	10 255	−9 429	28 298
b4	10 032	−10 199	10 279	−9 444	28 335
b5	10 322	−10 461	10 248	−9 402	28 673
b6	10 335	−10 212	9 972	−9 066	28 066
b7	10 290	−10 053	10 281	−9 360	28 365
b8	9 818	−10 106	10 417	−9 558	28 294

根据公式(3)和公式(4)处理输出数据,结果见图 14。

由图 11 所示, M_{z1} 、 M_{z2} 最大误差波动量分别

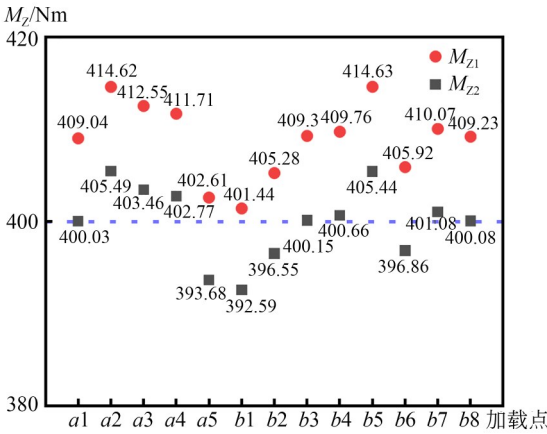


图 14 变加载点测量结果

Fig. 14 Change measurement results of loading points

为:12.90,13.19 N·m,相差较小,且测量结果变化趋势近似。但 M_{z2} 测量结果更接近标准值,验证了通过对扭矩的单独测量,补偿结果更接近标准值。为进行详细对比,进行误差指标计算,指标如图15所示。

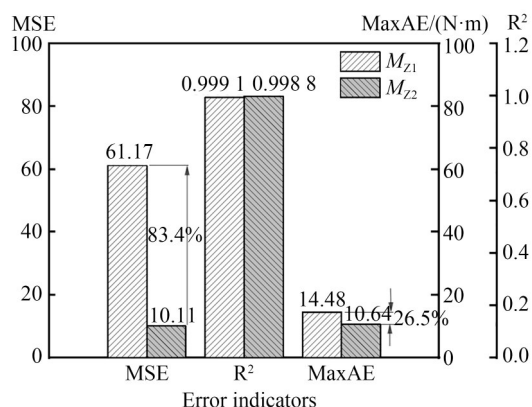


图15 结果误差指标计算

Fig. 15 Automatic image measuring system

根据计算结果,使用 M 向晶组进行测量相较于传统方法,均方差降低83.4%,整体测量精度较高,且最大测量误差降低26.5%,符合理论推导。

参考文献:

- [1] LI T L, KING N K K, REN H L. Disposable FBG-based tridirectional force/torque sensor for aspiration instruments in neurosurgery [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(4): 3236-3247.
- [2] 于昌新,何彦霖,何超江,等. 用于微创手术探针的光纤力传感器设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(20): 2421-2429.
YU C X, HE Y L, HE C J, *et al.* Design of fiber force sensors for surgical probes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(20): 2421-2429. (in Chinese)
- [3] 王云灏,孙铭会,辛毅,等. 基于压电薄膜传感器的机器人触觉识别系统[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(4): 702-710.
WANG Y H, SUN M H, XIN Y, *et al.* Robot tactile recognition system based on piezoelectric film sensor[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(4): 702-710. (in Chinese)

5 结 论

为提高压电式四维测力仪扭矩测量精度,提出了一种在传感器内新增剪切力晶组以实现扭矩单独测量的方案,定义传感器加工、装配各过程误差,推导了不同测量方法下的误差传递模型,通过数值仿真进行理论对比;设计测力仪并确定关键尺寸参数;进行了静、动态标定及扭矩变加载点试验。

实验验证:测力仪静、动态性能良好;该方案扭矩误差补偿结果更接近标准值,均方差降低83.4%,最大测量误差降低26.5%。该方案下测力仪可以实现扭矩单独测量和精度提升,为多支点四维测力仪提供技术参考。

作者贡献声明:

张军:梳理思路,提供理论与试验支持,设计结构,整体指导学生工作;

张鹏:设计思路,主导实验制定,数据分析,撰写论文;

滕玄德:协助实验、整理数据;

蔡佳乐:参与实验调试,协助分析新旧方案;

王郁赫:提供灵感和协助验证;

任宗金:提供理论支持,审核论文内容。

- [4] 任宗金,李洋,徐田国,等. 组合支撑方式下气动多维力多点测量研究[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(2): 170-175, 186.
REN Z J, LI Y, XU T G, *et al.* Research on multi-point measurement of pneumatic multi-dimensional forces under combined support mode[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(2): 170-175, 186. (in Chinese)
- [5] LI X B, LIU X L, YUE C X, *et al.* Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022, 176: 103882.
- [6] KISTLER INSTRUMENTE AG. Quartz 3-Component Dynamometer Type 9255C [Z]. Winterthur, Switzerland: Kistler Instrumente AG, 2010.
- [7] ZHANG J, MA Y X, REN Z J, *et al.* Research on the reliable test range of four-point supported piezo-

- electric dynamometer[J]. *Sensor Review*, 2022, 42(2): 230-240.
- [8] 张军,王郁赫,任宗金,等. 考虑角度偏差的压电三维力传感器标定[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(17): 2546-2554.
- ZHANG J, WANG Y H, REN Z J, *et al.* Calibration of piezoelectric three-dimensional force sensor considering angle deviation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(17): 2546-2554. (in Chinese)
- [9] YU Y Q, SHI R, LOU Y J. Bias estimation and gravity compensation for wrist-mounted force/torque sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(18): 17625-17634.
- [10] 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 Transactions*, 2017, 70: 447-457.
- [11] 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 and Signal Processing*, 2018, 110: 509-520.
- [12] QU G J, QIAN M, ZHANG J, *et al.* Investigation on unitary piezoelectric four-component cutting dynamometer [J]. *Materials Science Forum*, 2009, 626/627: 93-98.
- [13] KISTLER INSTRUMENTE AG. Quartz 3-Component Dynamometer Type 9272 [Z]. Winterthur, Switzerland: Kistler Instrumente AG, 2020.
- [14] 徐兴盛,李映君,王桂从,等. 轮辐结构压电式六维力传感器设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(12): 2655-2664.
- XU X S, LI Y J, WANG G C, *et al.* Design of six-axis force piezoelectric sensor with spoke structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(12): 2655-2664. (in Chinese)
- [15] 张军,仲育颖,任宗金,等. 压电式多维力传感器研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2024(3): 29-32, 56.
- ZHANG J, ZHONG Y J, REN Z J, *et al.* Research of piezoelectric multidimension force sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(3): 29-32, 56. (in Chinese)
- [16] ZHANG J, SHAO J, REN Z J, *et al.* A high-accuracy calibration method using sensor sensitivity difference for piezoelectric dynamometer[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2020, 142(1): 011004.

作者简介:



张 军(1970—),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,1994年、2000年于大连理工大学分别获得硕士和博士学位,现为大连理工大学机械工程学院传感与振动工程研究所所长,主要从事压电式传感器与测力仪研制、火箭发动机矢量力测量。E-mail: zhangj@dlut.edu

通讯作者:



任宗金(1978—),男,博士,教授,博士生导师,2000年、2009年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,现为大连理工大学机械工程学院传感与振动研究所教授,主要从事压电机理与压电式传感器在气动力学方面的测量研究。E-mail: renzongjin@dlut.edu.cn