

文章编号 1004-924X(2016)04-0954-07

过约束平面并联三维力/力矩传感器的研制

赵延治^{1,2*}, 张彩凤^{1,2}, 杨真真^{1,2}, 刘晓晓^{1,2}, 赵铁石^{1,2}

- (1. 燕山大学 河北省并联机器人与机电系统实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对轴承的故障早期诊断和在线实时监测,提出了一种新型过约束平面并联三维力/力矩传感器。通过采用分支轴线均不过传感器中心的 6 条对称分布的测力分支,该传感器可同时测量轴承径向载荷和轴向力矩。根据静力学平衡方程,求解了其测量数学模型;基于传感器测量模型与性能指标分析了传感器性能,进而对其各结构参数进行优化设计。研制了传感器样机及其加载标定实验系统,开展了加载标定实验,得到了该传感器的测量精度。标定实验结果显示:传感器径向力测量精度为 2.56%,力矩测量精度为 0.92%,I 类误差为 2.56%,最大 II 类误差为 2.29%。文中所做工作,为将该新型过约束平面并联三维力/力矩传感器应用于在线实时测量轴承径向载荷和轴向摩擦力矩奠定了基础。

关键词:轴承; 并联三维力/力矩传感器; 过约束; 性能分析; 标定实验

中图分类号: TP212.12; TH133.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0954

Development of planar parallel and over restraint three-component force/torque sensor

ZHAO Yan-zhi^{1,2*}, ZHANG Cai-feng^{1,2}, YANG Zhen-zhen^{1,2}, LIU Xiao-xiao^{1,2}, ZHAO Tie-shi^{1,2}

- (1. Hebei Provincial Key Laboratory of Parallel Robot and Mechatronic System, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
 2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of the Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)
- * Corresponding author, E-mail: yz Zhao@ysu.edu.cn

Abstract: To achieve early diagnosis and online real-time monitoring of faults for a bearing, a new type of over constraint three-dimension force and moment sensor was put forward. By adopting six symmetrical distribution load branches which all did not pass their centers, the sensor could simultaneously measure the bearing radial load and axial moment. According to the static equilibrium equation, the mathematical model of measurement was established. Based on sensor measurement model and performance index, the performance of the sensor was analyzed, and the structure parameters were optimized. Then a sensor prototype and its load calibration experiment system were developed. Meanwhile, the load calibration experiment was carried out, and the measuring accuracy of the sensor was obtained. The calibration experiment shows that the radial force measuring accuracy is 2.56%, torque

收稿日期: 2015-07-14; 修订日期: 2015-08-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51105322); 河北省自然科学基金资助项目(No. E2014203176), 河北省高等学校自然科学研究基金项(No. QN2015040)

measurement accuracy is 0.92%, type I error is 2.56%, and the maximum of type II error is 2.29%. The work lays a foundation for the applications of new constraint planar parallel three dimensional force/torque sensor to the online real-time measurements of bearings on radial loads and axial friction torques.

Key words: bearing; parallel three-component force/torque sensor; over-constraint; performance analysis; calibration experiment

1 引言

滚动轴承是机械结构中最容易损坏的零部件之一。对于旋转机械,由轴承故障引起的机械故障占总故障的30%之多。因此,国内外一直把滚动轴承的故障诊断和监测技术作为机械故障的研究重点^[1-3]。目前大多数的轴承故障诊断和检测都是间接实现的,如测温笔,振动笔、轴承故障分析仪^[3]、油质检查器等。然而,这些仪器只能监测轴承是否已经发生了故障,均不能在受力载荷发生突变初期监测到轴承的受力信息,从而实现故障早期预测。实时监测轴承的两维径向力及摩擦转矩,实现轴承在线力载荷检测,是目前提前预测与判定设备故障的关键。

近年来,国内外对多维力传感器的研究取得了诸多成果^[4-7]。Min-Kyung Kang等发明了十字梁六维力传感器^[8]。文献[9]提出并研制了一种大量程柔性铰六维力传感器。文献[10]在改进3-RRR机构的基础上设计了一种三维力传感器。文献[11]研制了一种提高运动员训练质量的三维力传感器。但目前针对轴承故障检测,开展可同时测量轴承径向力和摩擦转矩的这类新型的具有两维力,一维转矩的三维力传感器的研究较少。

针对上述问题,本文提出了一种可同时实时测量轴承径向载荷和轴向摩擦力矩的新型过约束平面并联三维力/力矩传感器。该传感器的结构采用了平面6-PS并联结构,在该新型平面并联过约束三维力/力矩传感器进行数学建模、性能分析与参数优化设计的基础上,研制出了过约束平面并联三维力/力矩传感器样机与加载标定实验系统,并对其开展了加载标定实验研究。

2 传感器测量原理与测量模型

2.1 传感器测量原理

对轴承的径向载荷和摩擦转矩的测量是实现轴承故障实时监测的关键。因此,所设计的传感器必须可以同时实现对平面径向二维力以及轴向力矩的测量。该三维力传感器的应用安装示例,如图1所示,轴承座固定,外工装与轴承座固定,三维力传感器与外工装固定,传感器内侧连接内工装,轴承嵌入内工装内。内外工装可分别进行调节,以适应安装并可监测不同直径的轴承。

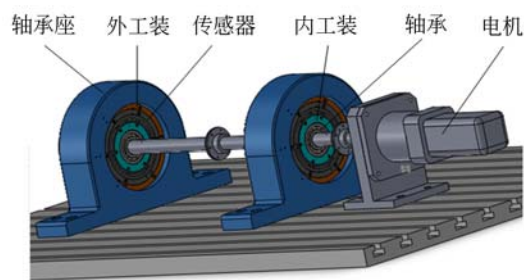


图1 三维力传感器的安装示例

Fig.1 Installation example of three-dimension force sensor

本文所提出的新型6-PS过约束三维力/力矩传感器结构如图2所示。该传感器是由固定环,受力环和由3组对称分布,各分支轴线均不过传感器中心的PS测量分支并联组成的双环形平面过约束结构构成。其中 A_1A_2 , B_1B_2 , C_1C_2 , D_1D_2 , E_1E_2 , F_1F_2 为6条PS测量分支,它们均由单维力传感器和钢球组成。此处S副采用钢球接触的形式实现机械解耦,从而保证受力环在与钢球接触点处的受力始终在测力分支轴线方向,即各测内力分支只承受轴向单维力载荷。

该6-PS过约束并联三维力传感器的测力原理为:平面二维力的测量是通过平面内分布的6

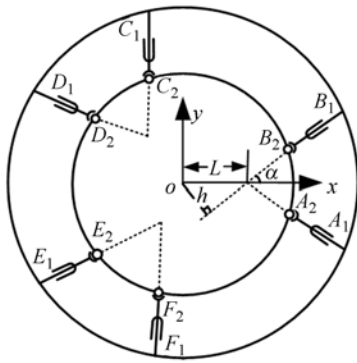


图 2 三维力传感器结构简图

Fig. 2 Structure diagram of sensor

条单维力传感器示数按其分支方向计算得到的。轴向力矩是通过单维力传感器的测量值与分支轴线到圆心距离的乘积计算得到的。单维力传感器与钢球采用点接触连接,其通过机械解耦避免了间隙与摩擦的同时,较大减小了传感器的维间耦合误差,提高了该新型并联三维力/力矩传感器的测量精度。

2.2 传感器测量模型

单维力传感器结构可视为柔性体,钢球与受力环的接触可视为 S 副,所以传感器模型可简化为图 3 所示。将坐标系 $o-xy$ 的坐标原点建立在传感器的圆心处,3 组对称分布的分支的交点与圆心 o 的距离均为 L ,分支 $B_1 B_2$ 的轴向与 x 轴的夹角为 α 。 h 为各分支相对原点的力臂。通过建立 6-PS 过约束传感器的静力平衡方程,对传感器进行力学分析及建立测量模型。

x 轴方向的合力为:

$$\mathbf{F}_x = \cos \alpha \cdot \mathbf{f}_1 + \cos \alpha \cdot \mathbf{f}_2 + \cos(2\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_3 + \cos(\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_4 + \cos(\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_5 + \cos(2\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_6, \quad (1)$$

$$\mathbf{G}_f^F = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha & \cos(2\pi/3 - \alpha) & \cos(\pi/3 - \alpha) & \cos(\pi/3 - \alpha) & \cos(2\pi/3 - \alpha) \\ \sin \alpha & \sin \alpha & \sin(2\pi/3 - \alpha) & \sin(\pi/3 - \alpha) & \sin(\pi/3 - \alpha) & \sin(2\pi/3 - \alpha) \\ L \sin \alpha & L \sin \alpha & L \sin \alpha & L \sin \alpha & L \sin \alpha & L \sin \alpha \end{bmatrix}.$$

若 \mathbf{G}_f^F 非奇异,则传感器分支力 \mathbf{f} 与施加于传感器受力环的外力 \mathbf{F}_w 的静态传递关系为:

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \mathbf{F}_w, \quad (7)$$

矩阵 \mathbf{J} 即为传感器的力雅克比矩阵

$$\mathbf{J} = [\mathbf{G}_f^F]^{-1}. \quad (8)$$

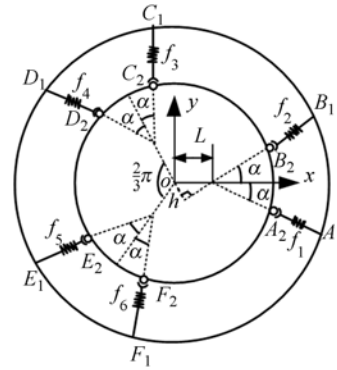


图 3 传感器模型受力图

Fig. 3 Force analysis chart of sensor model

y 轴方向的合力为:

$$\mathbf{F}_y = \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_1 + \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_2 + \sin(2\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_3 + \sin(\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_4 + \sin(\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_5 + \sin(2\pi/3 - \alpha) \cdot \mathbf{f}_6, \quad (2)$$

z 轴方向合的力矩为:

$$\mathbf{M}_z = h \cdot \mathbf{f}_1 + h \cdot \mathbf{f}_2 + h \cdot \mathbf{f}_3 + h \cdot \mathbf{f}_4 + h \cdot \mathbf{f}_5 + h \cdot \mathbf{f}_6, \quad (3)$$

$$\text{其中: } h = L \sin \alpha, \quad (4)$$

$$\text{即 } \mathbf{M}_z = L \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_1 + L \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_2 + L \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_3 + L \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_4 + L \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_5 + L \sin \alpha \cdot \mathbf{f}_6, \quad (5)$$

将上述 3 个方程改写为矩阵形式,表达如下:

$$\mathbf{F}_w = \mathbf{G}_f^F \mathbf{f}, \quad (6)$$

其中: $\mathbf{F}_w = [\mathbf{F}_x \quad \mathbf{F}_y \quad \mathbf{M}_z]$ ——传感器受力环所受的外力矢;

$\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \mathbf{f}_3 \quad \mathbf{f}_4 \quad \mathbf{f}_5 \quad \mathbf{f}_6]^T$ ——传感器各分支力矢;

因此,该 6-PS 并联三维力传感器的静力影响系数矩阵为:

3 传感器性能分析与优化设计

3.1 传感器性能分析

该 6-PS 平面并联过约束三维力传感器由 3

组均匀分布的 6 条分支组成,组内分支对称分布。由其静力影响系数矩阵可知,其性能与结构参数、夹角 α 和距离 L 有关。

无论是从上述 6-PS 平面并联过约束三维力传感器结构存在的对称性角度分析,还是通过其影响系数矩阵进行计算,均可得到该传感器具有如下特点:传感器力和力矩是各向同性的;传感器力灵敏度和力矩灵敏度均是各向同性的。

传感器力灵敏度,可定义为力雅克比矩阵的 Frobenius 范数。由于静力影响系数矩阵与力雅克比矩阵互逆,故计算得到的该传感器力灵敏度为一恒定值 0.816 5。也就是说无论 α 和 L 如何变化,传感器力灵敏度是恒定不变的。

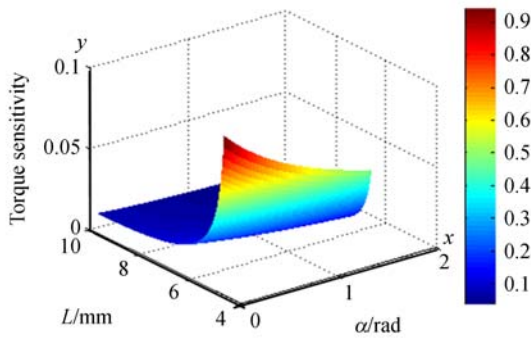


图 4 传感器力矩灵敏度空间性能图谱

Fig. 4 Space performance atlas of torque sensitivity for sensor

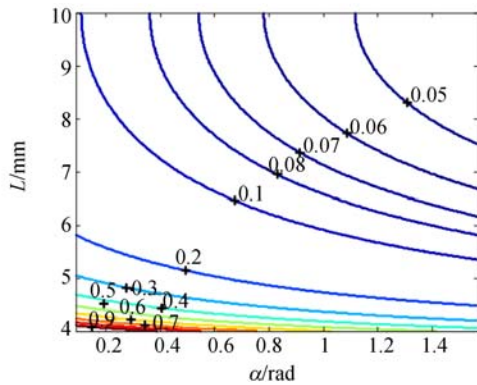


图 5 传感器力矩灵敏度等高线图

Fig. 5 Contour map of torque sensitivity for sensor

传感器力矩灵敏度定义为力矩雅克比矩阵的 Frobenius 范数。基于空间模型理论,绘制出传感器力矩灵敏度空间性能图谱和等高线图,分别如图 4 和图 5 所示,其中, x 轴代表 α , y 轴代表 L 。可以看出,当 L 和 α 较小时,力矩灵敏度较

大;随着 L 和 α 变大,力矩灵敏度逐渐减小。

3.2 传感器结构参数优化

在传感器的实际测量过程中,若各分支受力差异较大,则会使某分支传感器超出量程或变形过大,进而损坏传感器结构。为使传感器各分支力的分布更加均匀,结构更为合理,运用 MATLAB 优化工具箱对其结构参数进行了参数优化。将优化目标函数定义为分支力最小目标函数 $Obj = \text{Min}(F_i)$,优化结果为 $\alpha = 30^\circ, h = 2.986$ 。

若给定输入 $F_w = [1\ 000t\ -1\ 000t\ 1\ 000t]$, t 取值从 0 到 1,优化前 6 个分支力的变化曲线如图 6 所示,优化后 6 个分支受力变化曲线如图 7 所示,可以看出优化前分支受力最大值为 900 N,最小值为 0。优化后分支受力最大值为 450 N,此时分支中受力最小值为 240 N。因此优化后的分支受力更加均匀,结构更为合理。

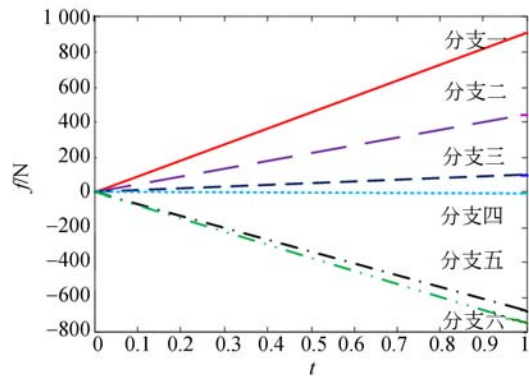


图 6 优化前传感器各分支力变化图

Fig. 6 Force change map in each branch before optimization

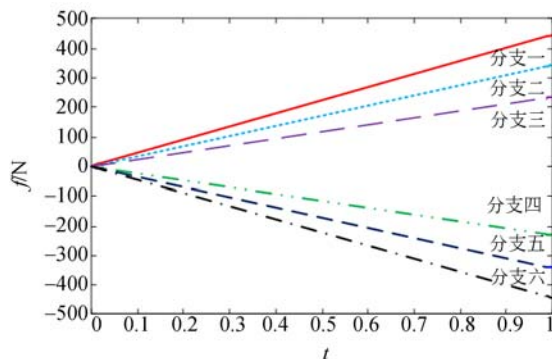


图 7 优化后传感器分支力变化图

Fig. 7 Force change map in each branch after optimization

4 传感器研制与标定实验

4.1 传感器研制

在传感器理论建模分析与优化的基础上,设计并研制了该新型过约束并联三维力/力矩传感器样机,样机实物如图 8 所示。

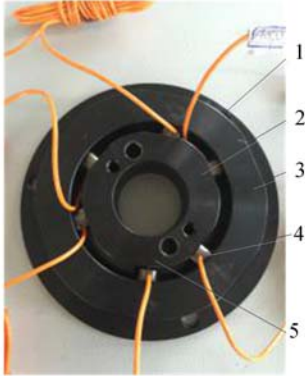


图 8 传感器样机实物图

Fig. 8 Prototype figure of sensor

其中 1 为预紧螺钉,采用细牙螺纹来施加各分支预紧力;2 为解耦钢球;3 为传感器固定环;4 为单维力传感器;5 为受力环,用于直接连接被测轴承。

4.2 传感器标定实验

由于该并联平面三维力传感器结构的限制,标定力的加载方向无法呈直角分布,文中采用夹角为 120° 的两方向力来进行加载标定,如图 9 所示,加载力大小分别为 F_1 和 F_2 ,则加载二维力 F_x, F_y 可根据力的转换间接求出。此外,该加载力穿过三维力传感器固定环侧面的中间开孔,直接施加于受力环的侧面,因此受力环的上表面不

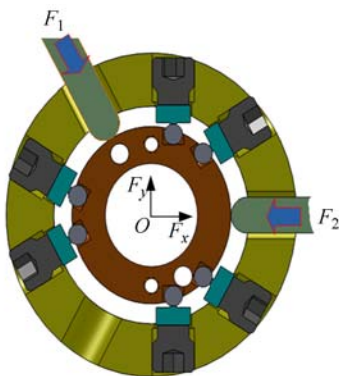


图 9 力加载标定示意图

Fig. 9 Calibration diagram of force loading

受力,从而可有效避免偏载,保证三维力传感器标定加载力精度,如图 10 所示。

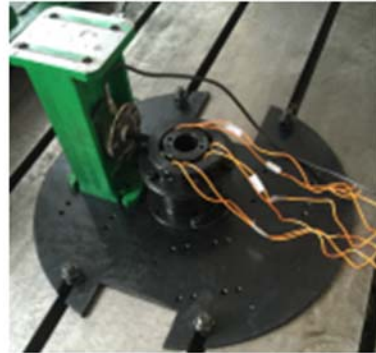


图 10 传感器力加载标定实验

Fig. 10 Force loading and calibration experiment

实际标定加载力 F_1, F_2 与二维力 F_x, F_y 的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sin(2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

如图 11 所示,通过由两个大小相等,方向相反,间隔一定距离的力构成的力偶矩进行传感器力矩加载。



图 11 传感器力矩加载标定实验

Fig. 11 Moment loading and calibration experiment

加载标定过程中选取了 15 个加载点,加载完成后依次卸载,共记录 30 个测量点。首先沿 F_1 方向分别从 $0 \sim 600$ N,每隔 40 N 加载一次,并进行数据采集,由记录的数据可以绘制出各分支内单维力传感器输出力值随 F_1 方向加载力变化曲线,如图 12 所示。同样沿 F_2 方向加载,得到各分支力变化曲线,如图 13 所示。

力矩加载时,力的最大加载值为 150 N。两

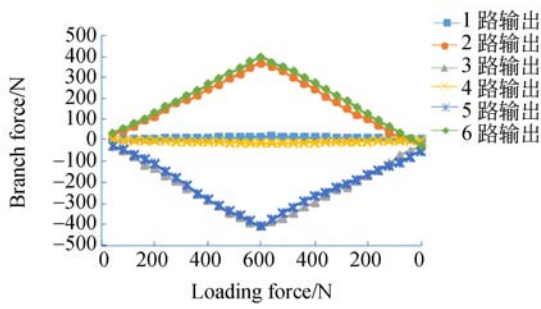


图 12 F_1 方向力加载时各分支力的输出变化曲线
Fig. 12 Force change map in each branch when loading force along F_1

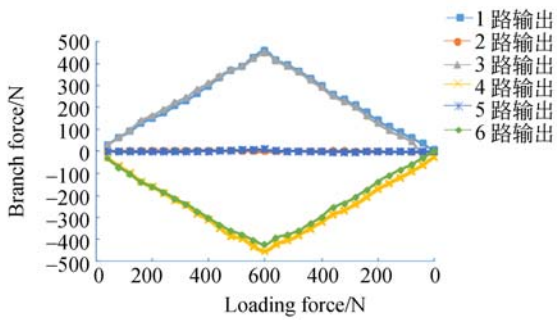


图 13 F_2 方向力加载时分支力的输出变化曲线
Fig. 13 Force change map in each branch when loading force along F_2

$$\hat{G}_i = \begin{bmatrix} 4.787 & 7.054 & -4.518 & 11.777 & 4.763 & -2.413 \\ 4.761 & 2.035 & -2.224 & -3.216 & -2.988 & 1.744 \\ -0.007 & -0.006 & -0.005 & -0.004 & -0.017 & 0.014 \end{bmatrix}$$

计算得到的测量误差矩阵为:

$$Err = \begin{bmatrix} 0.0256 & 0.0187 & 0.0060 \\ 0.0131 & 0.0165 & 0.0027 \\ 0.0229 & 0.0172 & 0.0092 \end{bmatrix} \quad (14)$$

该误差矩阵主对角线上的元素构成 I 类误差,其它元素构成 II 类误差。可知,该传感器 F_x 向误差为 2.56%, F_y 向误差为 1.65%, M_z 向误差为 0.92%。最大 I 类误差为 2.56%,出现在 F_x 上。最大 II 类误差为 2.29%,为 M_z 上加载时在 F_x 上的误差。

5 结 论

本文提出了一种可同时在线实时测量轴承的

个力的加载同时进行,它们分别从 0 到 150 N,每隔 10 N 加载一次,然后依次卸载,由记录数据绘制出各输出力值随 M_z 方向加载力矩的变化曲线,如图 14 所示。

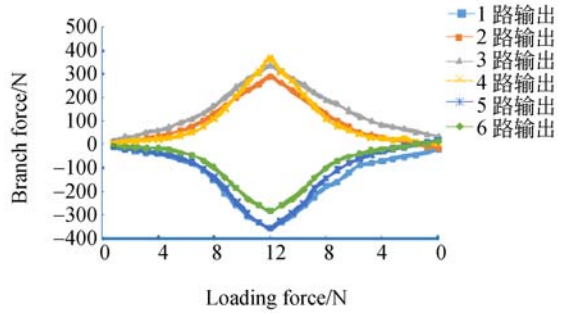


图 14 力矩加载时分支力的输出变化曲线
Fig. 14 Force change map in each branch when loading moment along Z axis

采用最小二乘法标定算法^[13-15]得到的标定矩阵为:

$$\hat{G} = FV^T(VV^T)^{-1} \quad (13)$$

将加载数据按奇偶数行分为两组,一组作为加载标定数据,一组作为加载测试数据。根据式(13)求得标定矩阵 \hat{G}_i 。

径向载荷和轴向摩擦力矩的新型过约束并联三维力/力矩传感器构型。采用分支轴线均不过传感器中心的 6 条对称分布的测力分支,对三维力/力矩进行测量。在建立了测量数学模型的基础上,对该传感器行了性能分析与参数优化,研制出了该传感器样机,并开展了加载与标定实验。实验结果表明:传感器径向力的测量精度为 2.56%,力矩测量精度为 0.92%; I 类误差为 2.56%,出现在 F_x 上,最大 II 类误差为 2.29%,为 M_z 上加载时在 F_x 上的误差。文中所做工作为将该新型过约束并联三维力/力矩传感器应用于轴承在线实时监测奠定了基础。

参考文献:

- [1] HO D, RAND R B. Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signal [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000, 14 (5): 763-788.
- [2] TSE P W, PENG Y H, YAM R. Wave let analysis and envelope detection for rolling element bearing for rolling element bearing fault diagnosis-their affectivities and flexibilities [J]. *Journal of Vibration and Acoustic*, 2001, 123: 303-310.
- [3] 张晓鸽. 基于振动信号分析的滚动轴承故障诊断仪的设计与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
ZHANG X G. *Design and implementation of fault diagnosis of rolling bearing based on vibration signal analysis*[J]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [4] 赵磊, 刘巍, 巩岩. 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19 (12): 2954-2962.
ZHAO L, LIU W, GONG Y. Pre-stressed six-axis force/torque sensor based on Stewart platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2954-2962. (in Chinese)
- [5] 侯雨雷, 曾达幸, 姚建涛, 等. 超静定并联式六维力传感器动力学[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17 (7): 1594-1601.
HOU Y L, ZENG D X, YAO J T, et al.. Dynamics of hyperstatic parallel six-component force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 2954-2962. (in Chinese)
- [6] WU J, HAN H J, LIU T. Resolution and precision measurement of a three dimension force sensor based on piezoresistive conductive ink [C]. 2014 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, 2014, 10: 321-325.
- [7] 刘俊, 秦岚, 李敏, 等. 平板式压电六维力/力矩传感器的研制[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19 (7): 1569-1579.
LIU J, QIN L, LI M, et al.. Development of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (7): 1569-1579. (in Chinese)
- [8] KANG M K, LEE S, KIM J H. Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 209: 41-51.
- [9] 赵延治. 大量程柔性铰并联六维力传感器基础理论与系统设计研制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
ZHAO Y ZH. *Basic theoretics and system development on wide range parallel six-component force sensor with flexible joints*[D]. Qinhuangdao: Yanshan university, 2009. (in Chinese)
- [10] 陶壹, 胡鹏浩, 杜旭超, 等. 三维微力/力矩传感器结构设计及各向同性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(8): 100-103.
TAO Y, HU P H, DU X CH, et al.. Study on structural design and isotropic of three-dimensional micro force/moment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28 (8): 100-103. (in Chinese)
- [11] 余跃庆, 田浩. 运动副间隙引起的并联机器人误差及其补偿[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23 (5): 1331-1339.
YU Y Q, TIAN H. Error and compensation of parallel robot with joint clearances[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1332-1339. (in Chinese)
- [12] 荣誉, 金振林. 五自由度并联机械腿静力学性能评价与优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2012, 06: 1233-1242.
RONG Y, JIN Z L. Five degrees of freedom static performance evaluation and optimal design of parallel mechanical leg [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 06: 1233-1242. (in Chinese)
- [13] 丁长涛. 6-UPUR 并联式六维测力平台静态性能标定研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
DING CH T. *6-UPUR parallel type six dimensional force calibration research on the static performance of the platform* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010. (in Chinese)
- [14] 陈雄标, 袁哲梭, 姚英学. 机器人用六维腕力传感

器标定研究[J]. 机器人,1997,19(1):7-12.

CHEN X B, YUAN ZH S, YAO Y X. Study on calibration of axis wrist force sensors for robot[J].

Robot,1997,19(1):7-12. (in Chinese)

[15] 石中盘. 大量程柔性铰六维测力平台标定关键技术

与实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013.

SHI ZH P. Study on the key techniques and experimental calibration of large range of flexible hinge six dimensional force measuring platform [D]. Qin-

huangdao: Yanshan University,2013. (in Chinese)

作者简介:



赵延治(1981—),男,河北沧州人,博士,副教授,硕士生导师,2003年、2009年于燕山大学分别获得学士、博士学位,研究方向为并联多维力加载与测量、并联机构学理论与应用。E-mail: yzzhao@ysu.edu.cn



张彩凤(1990—),女,河北衡水人,硕士研究生,2014年于燕山大学获得学士学位,研究方向为并联多维力传感器研究。E-mail: 1535002047@qq.com

(本栏目编辑:李自乐)