

文章编号 1004-924X(2017)05-1266-06

基于径向基函数神经网络的压电式 六维力传感器解耦算法

李映君, 韩彬彬, 王桂从*, 黄舒, 孙杨, 杨雪, 陈乃建
(济南大学机械工程学院, 山东济南 250022)

摘要:针对四点支撑结构的压电式六维力传感器线性度差, 维间耦合严重的问题, 提出了基于径向基函数(RBF)神经网络的解耦算法。分析了耦合产生的主要原因, 建立了 RBF 神经网络模型。通过对六维力传感器进行标定实验获取解耦所需的实验数据, 并对实验数据进行处理。然后采用 RBF 神经网络优化传感器输出系统的多维非线性解耦算法, 解耦出传感器的输入输出映射关系, 得到解耦后的传感器输出数据。对传感器解耦后的数据分析表明: 采用 RBF 神经网络的解耦算法得到的最大 I 类误差和 II 类误差分别为 1.29%、1.56%。结果显示: 采用 RBF 神经网络的解耦算法, 能够更加有效地减小传感器的 I 类误差和 II 类误差, 满足了传感器两类误差指标均低于 2% 的要求。该算法有效地提高了传感器的测量精度, 基本解决了传感器解耦困难的难题。

关键词:六维力传感器; 压电式传感器; 径向基函数神经网络; 解耦算法

中图分类号: TP212.9; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172505.1266

Decoupling algorithms for piezoelectric six-dimensional force sensor based on RBF neural network

LI Ying-jun, HAN Bin-bin, WANG Gui-cong*,
HUANG Shu, SUN Yang, YANG Xue, CHEN Nai-jian

(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

* Corresponding author, E-mail: me_wanggc@ujn.edu.cn

Abstract: For problems of poor linearity and too many inter-dimensional coupling errors of a four-point supporting piezoelectric six-dimensional force sensor, the decoupling algorithms based on Radial Basis Function (RBF) neural network were proposed. Main factors to produce coupling errors were analyzed and the RBF neural network was established. The six-dimensional force sensor was calibrated experimentally to obtain experimental data for decoupling, and the data were processed by the nonlinear decoupling algorithm based on RBF neural network. Then the mapping relation between input and output was acquired by decoupling and the decoupled data from the sensor was obtained. These data were analyzed, and the result shows that the biggest class I error and class II error by the proposed nonlinear decoupling algorithm based on RBF neural network are 1.29% and 1.56% respectively. The experimental analysis shows that it will effectively reduce the class I errors and the

收稿日期: 2016-09-22; 修订日期: 2016-12-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51205165); 山东省自然科学基金联合专项资助项目 (No. ZR2015EL031); 山东省教育厅科技发展计划资助项目 (No. TJY1405)

class II errors through nonlinear decoupling algorithm based on RBF neural network, and meets the requirements that the two kinds of error indicators of the sensor should be less than 2%. The proposed algorithm improves the measuring accuracy of sensors and overcomes the difficulty on decoupling.

Key words: six-dimensional force sensor; piezoelectric sensor; Radial Basis Function(RBF) neural network; decoupling algorithm

1 引言

六维力传感器是指能够同时测量三维空间任意力系中的三维正交力(F_x 、 F_y 、 F_z)及三维正交力矩^[1](M_x 、 M_y 、 M_z)的测力仪器。压电式六维力/力矩传感器是一种非弹性体式电量型传感器,特别适合动态测量,在智能机器人、重载制造装备、航空航天等领域都有着广泛的应用,并且对这些领域的发展起着关键性的作用^[2]。在设计、加工、制造、安装等过程中,六维力传感器的精度会由于工艺技术条件的限制和使用环境的变化而受到很大程度的影响,维间信号不同程度的耦合也约束了传感器在高、精、尖领域的应用。因此,消除传感器维间信号的耦合,是提高传感器测量精度的关键。

近年来,国内外众多学者针对六维力传感器提出了多种解耦算法,对传感器的多维力信息进行了大量相关的解耦研究^[2-6]。一般来说,对不同结构的传感器会有各不相同的解耦算法,而各种算法具有一定的适用性和针对性。目前,针对应变式传感器的解耦研究较多,对于压电式传感器的解耦研究却鲜有报道。本文根据径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的解耦原理,提出了基于RBF神经网络的解耦算法,并将其应用于课题组研制的四点支撑结构的压电式六维力/力矩传感器的解耦研究。文中最后对实验提出算法得到的实验结果与采用均值解耦算法得到的实验结果进行了对比分析。

2 六维力传感器检测原理及评价指标

2.1 六维力传感器的测量原理

本实验的研究对象所选用的压电材料为石英晶组,通过多组石英晶组的合理布置检测广义的六维力。课题组研制的四点支撑结构的压电式六

维力/力矩传感器如图1所示。

三维正交力(F_x 、 F_y 、 F_z)的测量是通过传感的4个支撑点测出后同向代数相加得到的,三维正交力矩(M_x 、 M_y 、 M_z)的测量是通过各维分力和测力点的位置关系确定的。

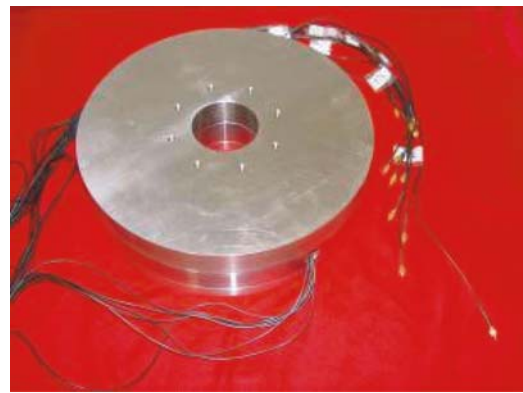


图1 六维力/力矩传感器实物图

Fig. 1 Photo of six-dimensional force sensor

2.2 六维力/力矩传感器测量性能评价指标

传感器的测量精度性能一般采用Ⅰ类误差和Ⅱ类误差作为评价指标^[7]。基于Ⅱ类误差可以构建传感器的静态耦合率矩阵,其定义为:当传感器施加单维力向量 α 时,剩余各维力向量 β 由于受到单维力向量 α 的耦合作用,其输出并不为零。传感器的静态耦合率矩阵 $E_{\beta V \alpha}$ 表示为:

$$E_{\beta V \alpha} = \frac{|\beta \text{向无作用力时,受单维力 } \alpha \text{ 影响的 } \beta \text{ 的输出}|}{|\beta \text{ 的全量程值}|} \quad (1)$$

3 压电式六维力传感器的耦合分析

六维力/力矩传感器产生耦合误差的因素主要有两种:结构性耦合和误差性耦合^[8]。目前,主要采取的解耦算法是对传感器的输出进行补偿解耦。对传感器进行解耦,就是对传感器的误差性耦合采取补偿计算的方式降低维间耦合。

以输入向量 F 代表传感器所受输入力值向

量,即 $\mathbf{F}=[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$,以输出向量 \mathbf{U} 代表传感器的输出信号,即 $\mathbf{U}=[UF_x, UF_y, UF_z, UM_x, UM_y, UM_z]^T$ 。由传感器标定实验得到的施加载荷值 F 与输出力值 U 的部分测试数据,得到六维力测力性能关系曲线如图 2~图 7 所示。

通过各维的测力性能曲线,能够反映出传感器在解耦前各维施加载荷值与输出力值之间的对应关系。从图 2~7 中可以看出,当施加各维力载荷时,其输出力值与实际期望值相差较大,并且当施加某一单维力载荷时,其余各维力均有大小不等的力值输出,耦合影响严重,因此需要对传感器进行解耦。

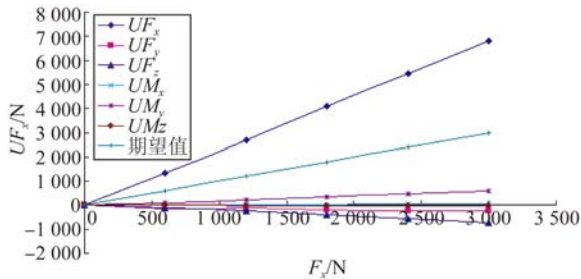


图 2 解耦前横向载荷 F_x 的测试性能

Fig. 2 Measuring performance of the F_x before decoupling

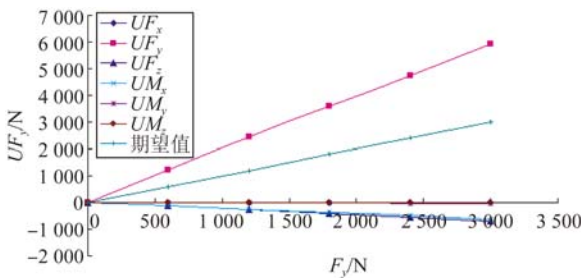


图 3 解耦前横向载荷 F_y 的测试性能

Fig. 3 Measuring performance of the F_y before decoupling

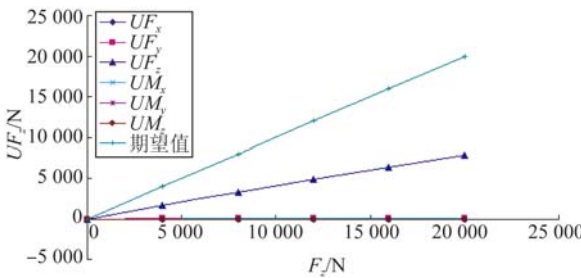


图 4 解耦前轴向载荷 F_z 的测试性能

Fig. 4 Measuring performance of the F_z before decoupling

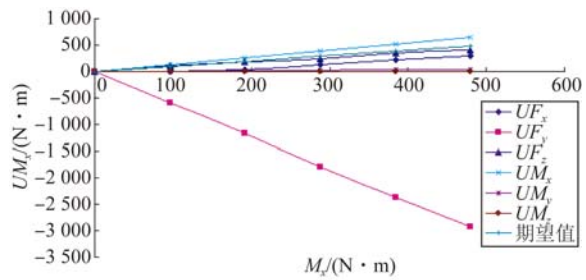


图 5 解耦前弯矩载荷 M_x 的测试性能

Fig. 5 Measuring performance of the M_x before decoupling

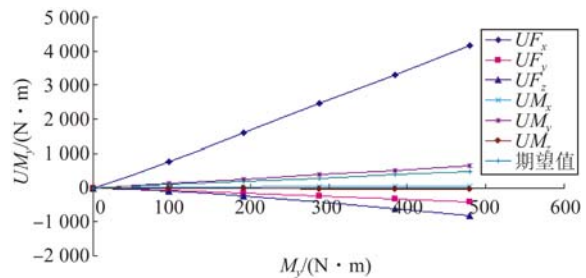


图 6 解耦前弯矩载荷 M_y 的测试性能

Fig. 6 Measuring performance of the M_y before decoupling

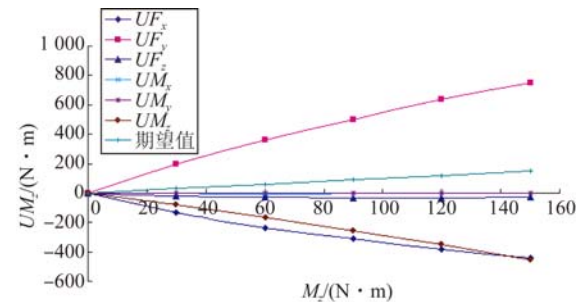


图 7 解耦前扭矩载荷 M_z 的测试性能

Fig. 7 Measuring performance of the M_z before decoupling

4 基于径向基函数的解耦算法

由于传感器在实际输出过程中并不是纯线性的,所以虽然采用线性解耦能够减少传感器的干扰误差,提高测量精度,但是解耦效果并不理想。因此,需要对传感器进行非线性解耦,而采用非线性模型能够逼真地反映出多维力/力矩传感器的实际输出,理论上能够完全解决传感器的静态耦合问题。

径向基函数(RBF)一般采用输入层、隐含层和输出层的三层神经网络非线性解耦算法模型。将六维力的 6 个输出力值信号 \mathbf{U} 作为神经网络的输入层数据,输入层神经元个数为 6,将传感器的加载力向量 \mathbf{F} 作为输出层数据,输出层神经元

个数为 6。采用基于 MATLAB 的 RBF 神经网络工具箱并采用高斯径向基函数 (radbas 型) 表示隐含层神经元的激活函数,用 S 表示隐含层神经元个数,线性函数 (purelin 型) 表示输出层神经元的激活函数, \mathbf{R}_1 表示隐含层的权值向量, \mathbf{R}_2 表示输出层的权值向量, \mathbf{B}_1 表示隐含层的阈值向量, \mathbf{B}_2 表示输出层的阈值向量, \mathbf{A}_1 表示隐含层输出向量,建立的 RBF 神经网络模型如图 8 所示。

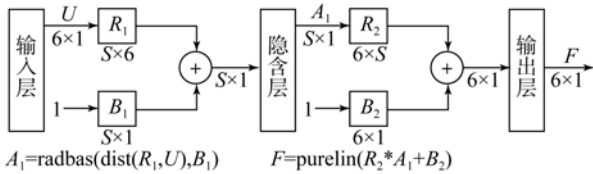


图 8 传感器的 RBF 神经网络模型

Fig. 8 RBF neural network model of the sensor

对神经网络进行训练,通过多次仿真试验,设置网络训练的扩展速度为 1,隐含层神经元最大数目为 30 个。另外,设定目标误差为 10^{-5} ,当隐含层神经元调整为 23 个并经过 23 次训练后,样本训练误差可达到指标要求。RBF 径向基函数神经网络的训练误差性能曲线如图 9 所示。

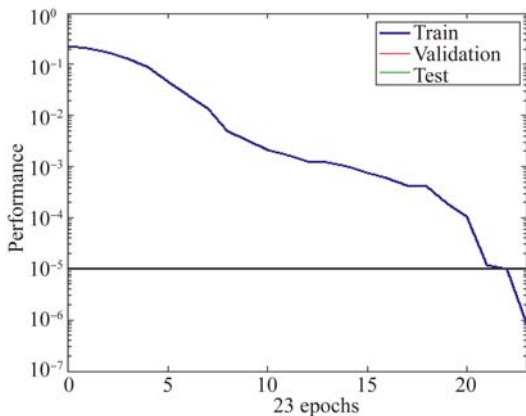


图 9 RBF 神经网络训练性能误差曲线

Fig. 9 Training error curve of RBF neural network model

训练得到的输入层到隐含层的权值为 138 个,阈值为 23 个;隐含层到输出层的权值为 138 个,阈值为 6 个。由于参数较多,本文不再列出。

利用训练获得的 RBF 神经网络算法,得到解耦后的输出力值 U 的部分数据。根据施加载荷值与输出 U 的部分数据,获得解耦后六维力测力性能关系曲线,如图 10~图 15 所示。

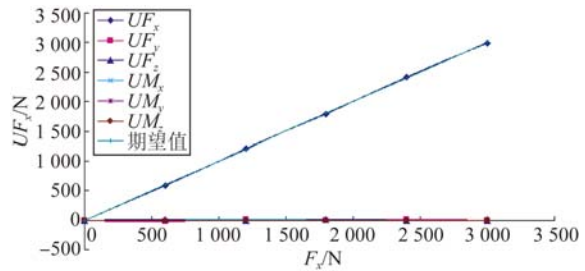


图 10 RBF 解耦后横向载荷 F_x 的测试性能

Fig. 10 Measuring performance of the F_x after RBF decoupling

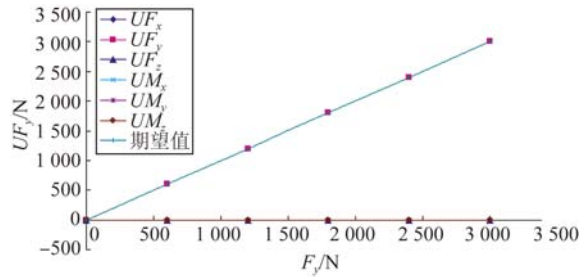


图 11 RBF 解耦后横向载荷 F_y 的测试性能

Fig. 11 Measuring performance of the F_y after RBF decoupling

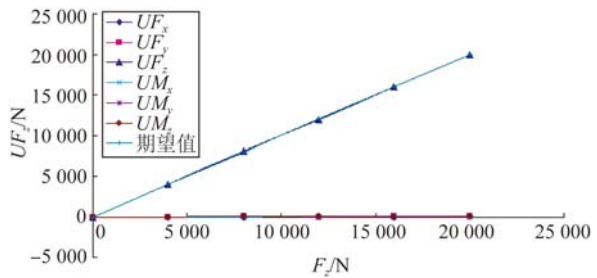


图 12 RBF 解耦后轴向载荷 F_z 的测试性能

Fig. 12 Measuring performance of the F_z after RBF decoupling

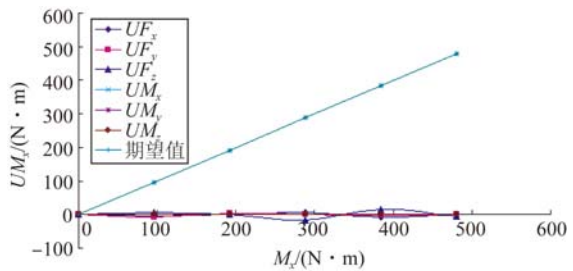


图 13 RBF 解耦后弯矩载荷 M_x 的测试性能

Fig. 13 Measuring performance of the M_x after RBF decoupling

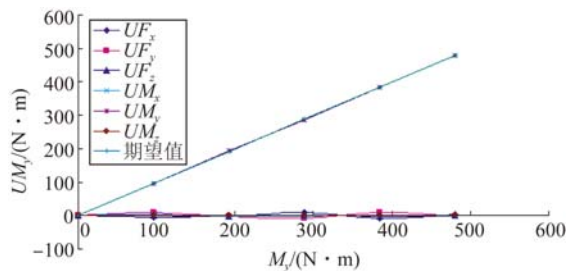
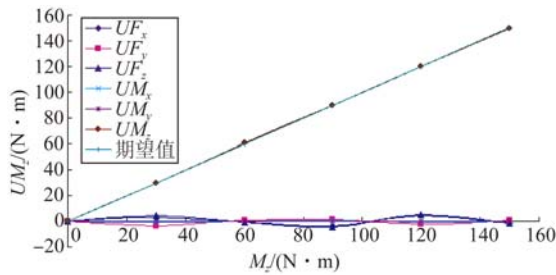


图 14 RBF 解耦后弯矩载荷 M_y 的测试性能

Fig. 14 Measuring performance of the M_y after RBF decoupling

图 15 RBF 解耦后扭矩载荷 M_z 的测试性能Fig. 15 Measuring performance of the M_z after RBF decoupling

从 RBF 神经网络解耦后的六维测力关系图(图 10~图 15)中可以看出:解耦后,当分别施加六维力/力矩载荷时,其输出力值与期望值接近完全重合,线性度较好。同时在六维力分别加载的过程中,对于其他方向的耦合输出数值较小,解耦效果非常理想。

当加载力值矩阵 \mathbf{F} 时,则采集到输出力值矩阵 \mathbf{U} 。采用未经训练过的实验数据 \mathbf{U} 作为 RBF 神经网络解耦算法的输入层数据,获得对应的输出力值 \mathbf{F}'_{RBF} 。 \mathbf{F} 、 \mathbf{U} 、 \mathbf{F}'_{ave} 分别由式(2)、(3)、(4)表示:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 3\ 000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3\ 000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 20\ 000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 480 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 480 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 150 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 6\ 825.3 & 8.1 & -22 & 303.33 & 4150.33 & -443.33 \\ -222.9 & 5\ 936.4 & 67 & -2\ 923 & -403.67 & 747.33 \\ -704.1 & -715.2 & 7\ 790 & 410 & -819.33 & -29 \\ 54.6 & -616.5 & 12 & 654.31 & 54.20 & -0.78 \\ 599.4 & -24.9 & -8 & 42 & 642.00 & -0.02 \\ -12.9 & -13.5 & -14 & -5.1 & -51.84 & -453.21 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}'_{\text{RBF}} = \begin{bmatrix} 2\ 995.83 & -0.04 & 0.77 & 2.01 & 3.06 & -1.53 \\ -0.51 & 2\ 999.87 & 0.05 & 0.58 & -3.20 & 0.70 \\ 0.54 & 0.33 & 19\ 997.72 & -4.27 & 0.15 & -1.81 \\ 0.07 & 0.03 & 0.06 & 480.00 & -0.70 & 0.19 \\ 0.07 & -0.01 & -0.09 & 0.04 & 479.67 & 0.02 \\ -0.03 & 0.02 & 0.09 & -0.06 & -0.09 & 149.91 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将解耦后的输出力值 \mathbf{F}'_{RBF} 与实际施加载荷的百分比耦合误差矩阵 \mathbf{E}_{RBF} 。
值 \mathbf{F} 进行比较,从而获得 RBF 神经网络解耦算法

$$\mathbf{E}_{\text{RBF}} = \begin{bmatrix} 0.922\ 3 & 0.421\ 5 & 0.289\ 1 & 0.021\ 3 & 1.102\ 6 & 0.080\ 5 \\ 0.152\ 5 & 0.092\ 9 & 0.015\ 1 & 0.040\ 5 & 0.039\ 9 & 0.235\ 3 \\ 0.025\ 1 & 0.165\ 1 & 0.026\ 1 & 0.170\ 7 & 0.008\ 6 & 0.114\ 2 \\ 0.199\ 7 & 0.169\ 4 & 0.001\ 1 & 0.341\ 9 & 0.020\ 6 & 0.101\ 6 \\ 1.557\ 6 & 0.407\ 1 & 0.297\ 8 & 0.091\ 2 & 1.292\ 4 & 0.120\ 0 \\ 0.031\ 5 & 0.664\ 9 & 0.426\ 3 & 1.088\ 5 & 0.049\ 9 & 0.082\ 8 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

从耦合误差矩阵可以得到,经过 RBF 径向基函数解耦算法解耦后,分别获得六维力传感器的 I 类误差: F_x 为 0.92%, F_y 为 0.09%, F_z 为 0.03%, M_x 为 0.34%, M_y 为 1.29%, M_z 为 0.08%, 即解耦后最大 I 类误差为 1.29%。当加载力 F_x 时, M_y 向受到 F_x 较强的耦合作用, 维间耦合强度最大, 即解耦后最大 II 类误差为 1.56%。

5 实验结果与分析

基于 RBF 径向基函数解耦算法对传感器的解耦研究,得到了四点支撑结构的压电式六维力/力矩传感器的解耦算法模型及百分比耦合误差矩阵,从而获得传感器解耦后的六维力测量精度。传感器经过 RBF 解耦后的测量精度如表 1 所示。

表1 RBF解耦后的性能指标

Tab.1 Performance indicators after RBF decoupling

力分量	I类误差/%	II类误差/%
F_x	0.92	1.10
F_y	0.09	0.24
F_z	0.03	0.17
M_x	0.34	0.20
M_y	1.29	1.56
M_z	0.08	1.09

表1的性能指标分析显示,采用基于RBF径向基函数解耦后得到传感器的最大I类误差为1.29%,最大II类误差为1.56%,表明经过RBF径向基函数解耦算法解耦后,解耦特性较好,解耦效果非常理想。传感器的测量精度整体性能有极大的提高,满足了传感器两类误差指标均低于2%的要求。

参考文献:

- [1] 刘砚涛,郭冰,尹伟,等. 六维力传感器静态标定及解耦研究[J]. 强度与环境,2013,40(1):44-49.
LIU Y T, GUO B, YIN W, *et al.*. Research on static calibration and decoupling for six-axis force sensor [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2013,40(1):44-49. (in Chinese)
- [2] 曹哲. 一种轻量级主动式的无线传感器网络时间同步算法[D]. 长春:东北师范大学,2009.
CAO Z. *A lightweight and active time synchronization algorithm in wireless sensor network* [D]. Changchun: Northeast Normal University,2009. (in Chinese)
- [3] 梁桥康,王耀南. 超薄六维力/力矩传感器优化设计及其解耦[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2012,39(6):53-57.
LIANG Q K, WANG Y N. Optimal design of a thin six-dimensional F/T sensor and its nonlinear decoupling [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2012,39(6):53-57. (in Chinese)
- [4] 马迎坤,张希农. 多维传感器标定的支持向量机复合式方法[J]. 航空动力学报,2011,26(6):1274-1281.
MA Y K, ZHANG X N. Support vector machine

作者简介:



李映君(1982—),男,山东烟台人,副教授,硕士生导师,主要从事传感器与执行器测控技术、工业机器人技术、智能化仪器仪表技术等方面的研究。
E-mail: me_liyj@ujn.edu.cn

6 结论

本文针对四点支撑结构的压电式六维力传感器线性度差、维间耦合严重的问题,提出了基于RBF径向基函数神经网络的解耦算法,并简要分析了耦合产生的原因,建立了RBF神经网络模型。在已经获得的标定实验数据的基础上,进行了实验验证。采用RBF神经网络解耦算法得到的最大I类误差和II类误差分别为1.29%、1.56%。实验结果表明:采用RBF神经网络解耦算法能够有效地减小传感器的I类误差和II类误差,满足传感器两类误差指标均低于2%的要求。采用RBF的非线性解耦算法有效地提高了传感器的测量精度,基本解决了传感器解耦困难的难题,为本课题组研制的压电式六维力/力矩传感器的工程应用提供了依据。

complex method for multi-dimensional sensor calibration[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011,26(6):1274-1281. (in Chinese)

- [5] DWARAKANATH T A,DASGUPTA B,MRUTHYUNJAYA T S. Design and development of a Stewart platform based force-torque sensor[J]. *Mechatronics*, 2001,11(7): 793-809.
- [6] KANG C G. Closed-form force sensing of a 6-axis force transducer based on the Stewart platform[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001,90(1-2): 31-37.
- [7] 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.
MA J Q, SONG A G, WU J. Research and application of static decoupling for 3-axis wrist force sensor [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2011, 32(6): 517-521. (in Chinese)
- [8] 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.
CAO H B, SUN Y X, LIU L M, *et al.*. Coupling analysis of multi-axis force sensor and research of decoupling method[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011,24(8): 1136-1140. (in Chinese)

通讯作者:



王桂丛(1981—),女,山东菏泽人,讲师,主要从事制造业信息化技术、遗传算法、智能化仪器仪表技术等方面的研究。
E-mail:me_wanggc@ujn.edu.cn