

六维力传感器实时解耦方法及系统实现^{*}

王 鹏^{1,2,3} 李 威^{1,2} 付麒瑞^{1,2} 张昌明^{1,2,3} 戴裕强^{1,2} 晏志鹏⁴

石宇航^{1,2} 吴佳敏^{1,2} 孙茹雪^{1,2} 杨 帆^{1,2,3}

(1. 陕西理工大学机械工程学院 汉中 723001; 2. 陕西理工大学陕西省工业自动化重点实验室 汉中 723001;

3. 陕西理工大学起落架及飞机结构件加工检测陕西省高校工程研究中心 汉中 723001;

4. 中航电测仪器(西安)有限公司汉中分公司 汉中 723001)

摘 要:针对六维力传感器存在的维间耦合误差问题,提出一种基于改进灰狼优化算法(IGWO)与反向传播神经网络(BP)的解耦方法。通过引入动态分布参数调节、自适应非线性控制因子及改进的位置更新策略,对BP神经网络的初始权重和阈值进行优化,从而提升模型的收敛性能与全局寻优能力。基于六维力传感器的静态标定数据建立解耦模型,并将所提方法与最小二乘法、标准BP、GA-BP、PSO-BP及GWO-BP等方法进行了对比分析。实验结果表明,所提出的IGWO-BP解耦方法能够有效降低传感器的维间耦合误差,其中I类分量的最大相对误差为0.267%,II类分量的最大相对误差为0.127%,整体解耦精度优于对比方法。为进一步验证该方法在嵌入式系统中的应用性能,将解耦模型嵌入STM32F103C8T6微控制器,并构建了由AD7606模块与传感器标定装置组成的实时数据采集系统。在500 Hz采样频率下开展实时测试,上位机显示的六维力/力矩解耦输出与标准加载值之间的最大相对误差未超过 $\pm 1.6\%$,系统运行过程中未出现明显延迟或数据丢失,验证了所嵌入解耦算法在实时解耦精度与系统稳定性方面的可行性与有效性。

关键词:六维力传感器;改进灰狼优化算法;BP神经网络;解耦建模;嵌入式系统

中图分类号: TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Real-time decoupling method and system implementation for six-dimensional force sensors

Wang Peng^{1,2,3} Li Wei^{1,2} Fu Qirui^{1,2} Zhang Changming^{1,2,3} Dai Yuqiang^{1,2} Yan Zhipeng⁴

Shi Yuhang^{1,2} Wu Jiamin^{1,2} Sun Ruxue^{1,2} Yang Fan^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China; 3. Engineering Research Center of Manufacturing and Testing for Landing Gear and Aircraft Structural Parts, Universities of Shaanxi Province, Hanzhong 723001, China; 4. Zhonghang Electronic Measuring Instruments (Xi'an) Co., Ltd., Hanzhong Branch, Hanzhong 723001, China)

Abstract: To address inter-dimensional coupling errors in six-axis force sensors, a decoupling method based on an improved grey wolf optimization (IGWO) algorithm combined with a back propagation (BP) neural network is proposed. Dynamic distribution parameter adjustment, an adaptive nonlinear control factor, and an improved position update strategy are introduced to optimize the initial weights and thresholds of the BP network, thereby enhancing convergence performance and global optimization capability. A decoupling model is established using static calibration data of the six-axis force sensor and is compared with the least squares method, standard BP, GA-BP, PSO-BP, and GWO-BP approaches. Experimental results indicate that the proposed IGWO-BP method effectively reduces inter-dimensional coupling errors. The maximum relative errors of type I and type II components are 0.267% and 0.127%, respectively, demonstrating higher decoupling accuracy than the comparative methods. To evaluate practical performance, the decoupling model is

收稿日期: 2025-07-26 Received Date: 2025-07-26

^{*} 基金项目: 陕西省教育厅创新团队项目(24JP032)、陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-198)、陕西省秦创原四连融合项目(2024PT-ZCK-38) 资助

implemented on an STM32F103C8T6 microcontroller, and a real-time data acquisition system consisting of an AD7606 module and a sensor calibration platform is developed. Real-time tests at a sampling frequency of 500 Hz show that the maximum relative error between the decoupled six-axis force/torque outputs and the reference loads does not exceed $\pm 1.6\%$. No evident delay or data loss is observed during operation, confirming the feasibility and effectiveness of the proposed method in terms of real-time decoupling accuracy and system stability.

Keywords: six-dimensional force sensor; IGWO; BP; decoupling modeling; embedded system

0 引言

六维力传感器因其能够同时感知空间三维方向上的力与力矩,在航空航天精密装配、医疗机器人和智能制造等工业 4.0 核心应用场景中扮演着关键角色^[1-2]。力作为一种不可直接测量的物理量,通常需通过弹性敏感元件的变形或位移进行间接测量。在众多实现方式中,电阻应变片式传感器凭借成本低、易于集成等优点被广泛采用。在理想状态下,多维力传感器的每个测量通道应仅反映该通道所受的载荷分量,而不受其他通道的影响。然而,由于结构设计上的非理想性及机械加工误差等因素,不同通道之间存在不可避免的耦合效应,导致施加载荷之间发生相互影响。这种维间耦合现象显著限制了传感器的测量精度,成为影响六维力传感器应用性能的主要瓶颈^[3-4]。测量精度作为用户最为关注的性能指标之一,直接决定了传感器在复杂环境下的适用性与可靠性。因此,实现六维力传感器的高精度、实时解耦,对于满足工业 4.0 环境下的高效智能感知需求具有重要的研究意义和应用价值。

现有的解耦技术主要分为硬件解耦与软件解耦两类。硬件解耦通过优化传感器的结构设计、选材或制造工艺,旨在从源头上降低通道之间的耦合度。尽管部分研究在传感器构型优化方面取得了进展,但受限于制造成本高、结构复杂及难以大规模推广等因素,硬件解耦方案在工业应用中仍面临较大挑战^[5]。相比之下,软件解耦因具备灵活性高、适应性强的优势而更具实用性。传统的软件解耦方法如最小二乘法(ordinary least squares, OLS)在处理线性耦合问题时具有效率高、实现简便的特点,但面对六维力传感器复杂的非线性输出特性,其性能难以满足精度要求。近年来,随着人工智能技术的快速发展,基于机器学习的建模方法在多维力传感器解耦中逐渐兴起^[6]。尤其是反向传播(BP)神经网络,凭借其其对非线性关系的强表征能力,成为解决此类问题的研究热点。然而,传统 BP 网络依赖梯度下降算法进行训练,容易陷入局部最优,影响模型的全局拟合性能^[7]。为提升解耦精度,研究者将 BP 网络与智能优化算法如遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)等结合使用,优化其初始权重和偏置,其中灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)因参数少、

收敛速度快受到广泛关注。然而,标准 GWO 在高维空间中易发生早熟收敛现象,限制了其在复杂模型优化中的应用效果。

为解决上述问题,本文提出一种基于改进灰狼优化算法与 BP 神经网络相结合的六维力传感器解耦方法(IGWO-BP),在算法层面引入非线性收敛因子与动态位置更新策略,提升全局搜索能力与收敛稳定性,增强模型在高维非线性耦合问题中的优化效果。在系统实现方面,本文基于 STM32F103 微控制器与 AD7606 采集模块构建嵌入式实时解耦平台,将解耦模型嵌入微控制器,通过在线标定系统开展加载实验,验证所提方法在三维力和力矩方向上的解耦精度与系统线性响应性能。研究结果表明,本文所提出的方法在保持高精度的同时兼具优良的实时性,适用于高能力控系统。

1 六维力传感器解耦模型与耦合特性

本文使用两种六维力传感器的标定数据验证所提出的改进算法,一种是指尖六维力传感器,另一种是商业化的应变基平面十字梁传感器。指尖传感器适用于与微型机器人手或复杂环境的集成,其内部应变片通过检测外力引起的微小变形来实现高灵敏度和快速响应如图 1 所示。与此不同,商业化的应变基平面交叉梁传感器采用惠斯登电桥技术,优化用于需要高负载能力和稳定性的工业应用^[7-9]。该传感器通过平面交叉梁结构将力/力矩转化为微应变信号,输出通常以电压变化的形式表示,图 2 中的标定数据显示了输入力/力矩与输出微应变信号之间的关系,当某一方向施加载荷时,其他方向的输出电压都会对施加载荷的方向产生或小的串扰,因此六维力传感器之间的维间耦合一定存在。六维力传感器的解耦本质是消除各测量通道间的维间耦合干扰,其耦合特性源于弹性体结构非正交应变传递、加工公差及应变片贴装误差。理论模型中,六维力传感器的输入输出关系可表示为非线性映射方程,如式(1)所示。

$$\mathbf{V} = \mathbf{C} \times \mathbf{F} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\mathbf{V}=[V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6]^T$ 为传感器的 6 个输出电压信号; $\mathbf{F}=[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$ 为六维力/力矩分量; $\mathbf{C}$ 为耦合矩阵(6×6),描述输出电压与力/力矩分量之间的耦合关系,在室温条件下的静态标定数据得到,在

标定与实时测试环境一致的前提下,可将 C 近似视为常数矩阵,并用于后续解耦计算。

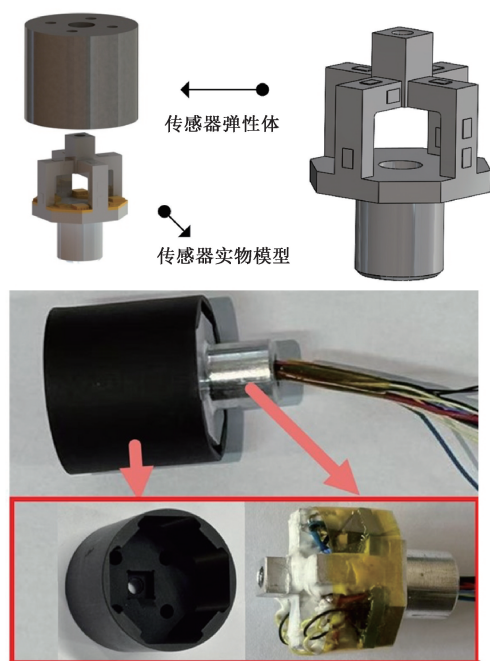


图1 六维力传感器模型

Fig. 1 Six-dimensional force sensor model

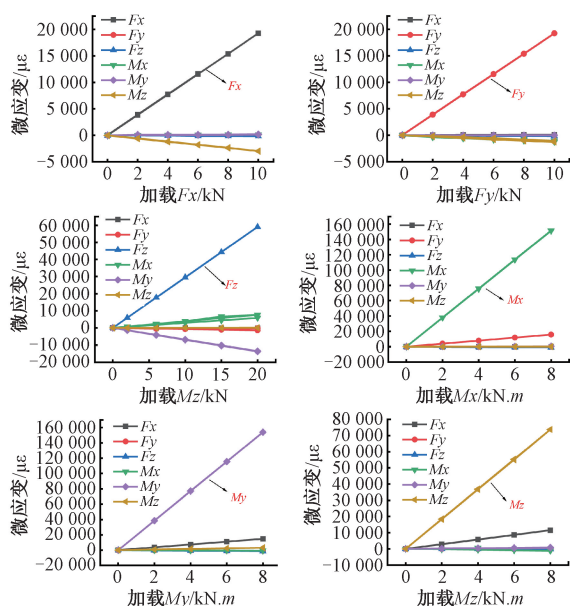


图2 十字梁六维力传感器标定结果

Fig. 2 Calibration results of cross beam six-axis force sensor

2 六维力传感器解耦方法

2.1 灰狼优化算法原理

GWO 算法是 Mirjalili 等于 2014 年提出的一种新型

群体智能优化算法^[10-11]。该算法受灰狼群体的协同捕猎行为和社会等级结构的启发,成功模拟了灰狼在自然界中的领导层级和动态捕猎策略,具备结构简洁、优化高效等特点。与 PSO、人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 和蚁群算法 (ant colony optimization, ACO) 等其他群体智能算法相比, GWO 具有实现简单、参数设置少和鲁棒性强等优势,在求解非线性连续优化问题中表现出更快的收敛速度和更高的求解精度,因而被广泛应用于多个领域。

在 GWO 算法中,个体根据适应度值被划分为 4 个等级: α 、 β 、 δ 和 ω 。其中, α 狼代表当前全局最优解, β 和 δ 分别为第 2 和第 3 优的个体,其余个体均归为 ω 类。在算法框架中,围捕与猎物追踪行为通过搜索空间中的位置更新过程来模拟,具体由式(2)和(3)定义。猎捕过程高度依赖该等级结构,以提升优化效率。如图 3 所示, α 狼处于整个群体的顶层,具备最强的领导与决策能力; β 狼作为 α 的重要助手,协助管理和组织群体活动; δ 狼排名第 3,既服从 α 和 β 的指令,同时对 ω 狼具有一定的指挥权,主要负责侦察与警戒任务;而处于最底层的 ω 狼则负责维持群体秩序和照顾幼崽等工作。

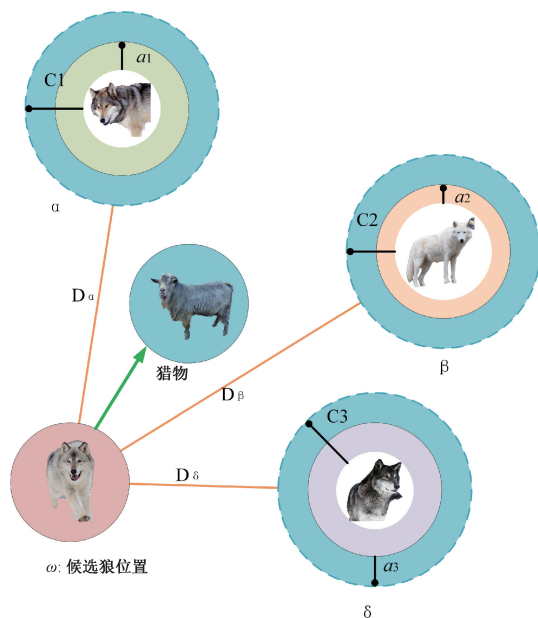


图3 灰狼更新位置

Fig. 3 Grey wolf update location

$$D = |C \times X_p(t) - X(t)| \quad (2)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \times D \quad (3)$$

式中: D 为灰狼个体与猎物间的距离向量; t 为当前迭代次数; $X_p(t)$ 为猎物的位置向量; $X(t)$ 为灰狼个体位置向量; 收敛因子 $A = 2a \times r_1 - a$, $C = 2 \times r_2$; r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 的随机向量; a 为控制参数。

2.2 改进灰狼优化算法

灰狼优化算法因其结构简单、参数设置少以及良好的收敛性能,已被广泛应用于约束优化、机器人路径规划、时间序列预测、数据拟合与参数识别、分子结构优化等多个领域^[12-13]。然而,GWO 在全局搜索与局部搜索能力的平衡方面仍存在一定局限性,尤其是在领导狼位置选择上并不总是最优,常导致算法过早收敛于局部最优解,且整体收敛速度相对较慢。为了解决上述问题,本文对算法进行了以下 3 项改进。

1) 引入动态分布参数调整方法,提出了一种适用于高维搜索空间的自适应初始化策略。该策略根据搜索空间维度的奇偶性采用不同的分布方式:对于偶数维空间,采用正态分布以提升局部搜索精度;对于奇数维空间,则采用均匀分布以增强全局搜索能力。此外,还引入了标准差调节机制与边界约束条件,以保证候选位置分布的合理性,如式(4)~(9)所示。该策略有效增强了算法的鲁棒性,使其能够根据搜索空间的规模及解的分布特性灵活调整,从而保持良好的全局探索能力,显著缓解早熟收敛问题。

$$L = \sqrt{S} \quad (4)$$

$$L_e = \frac{S}{L} \quad (5)$$

$$N = 0.15 + (l - 1) \times \left(\frac{0.05}{L - 1} \right) \quad (6)$$

式中: L 表示狼群的层数; S 指搜索代理的数量; L_e 表示每层代理的数量; N 代表标准差; l 表示总狼群层数。

初始化代理位置,对于偶数维度,位置 P 的初始化采用正态分布模型,公式如下:

$$P(idx, d) = Ib(d) - (ub(d) - Ib(d)) \times n(0.5, N) \quad (7)$$

对于奇数维度,位置 P 的初始化采用均匀分布模型,公式如下:

$$P(idx, d) = Ib(d) + (ub(d) - Ib(d)) \times h \quad (8)$$

确保每一种分布生成的位置均在搜索空间内,公式如下:

$$P(idx, d) = \max(Ib(d), \min \times (P(idx, d), ub(d))) \quad (9)$$

式中: $ub(d)$ 、 $Ib(d)$ 分别表示上、下边界; h 表示随机数。

2) 位置向量更新策略: 本文引入非线性收敛因子以替代传统的线性因子,从而显著提升算法在全局搜索与局部搜索阶段的效率。该改进增强了狼群在搜索空间中的运动机制,使其在跳出局部最优解时具有更强的适应性。传统 GWO 算法中,收敛因子采用线性递减策略,其数值通常在 $[-\alpha, \alpha]$ 变化,如式(8)所示。尽管该线性调整方法结构简单,但在调控搜索行为时存在局限性,难以实现对全局探索与局部开发之间的充分权衡,易导致搜

索能力下降。为解决这一问题,本文提出了一种非线性更新策略,如式(9)所示,以更精确地调节灰狼的探索行为与开发行为。通过对收敛因子 a 引入非线性函数调整机制,算法在不同搜索阶段表现出更强的适应性与进程的变化,有效提高算法的收敛速度与搜索性能。

$$a_1 = b_{\max} - (b_{\max} - b_{\min}) \times \frac{t}{T} \quad (10)$$

$$a_2 = b_{\max} - (b_{\max} - b_{\min}) \times \tan\left(\frac{\pi \times t \times K_1}{T \times K_2}\right) \times 1.5 - 0.5 \quad (11)$$

式中: $b_{\max} = 2$, $b_{\min} = 0$; t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数; K_1 、 K_2 为调节系数,其取值范围为 $(0, 1)$,改进后的控制参数 a_2 为非线性递减。根据算法反复测试训练,得出 K_1 、 K_2 的最优值分别为 0.7、0.9。控制参数 a_2 前期递减速率降低,增强全局搜索能力,后期递减速率加快,改善了算法局部寻优的收敛速度,这种调整机制有利于在算法的不同阶段平衡探索和开发,提升优化效率和效果。

3) 步长调整与领导狼影响力增强,在理论上,灰狼优化算法中的 3 只领导狼 α 、 β 和 δ 对群体的影响是等权的。然而在实际应用中,这 3 只领导狼表现出不同的特性及领导效能,尤其是 α 狼往往更接近全局最优解。因此,在位置更新过程中若持续加大对 α 狼的权重,可能会导致算法陷入局部最优,从而引发解耦失败,如式(10)所示。为克服这一问题,通过相关文献,引入位置权重扰动机制,并基于改进后的欧几里得步长距离提出了一种比例权重策略,如式(11)所示。该策略能够实现对算法全局探索与局部开发能力的持续动态调节,从而提升搜索过程在不同迭代阶段对环境变化的适应能力。

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \left(1 - \frac{t}{T}\right) + W \vec{X}_1 \frac{t}{T} \quad (12)$$

$$W = \sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \quad (12)$$

$$\begin{cases} W_1 = \frac{|\vec{X}_1|}{|\vec{X}_1| + |\vec{X}_2| + |\vec{X}_3|} \\ W_2 = \frac{|\vec{X}_2|}{|\vec{X}_1| + |\vec{X}_2| + |\vec{X}_3|} \\ W_3 = \frac{|\vec{X}_3|}{|\vec{X}_1| + |\vec{X}_2| + |\vec{X}_3|} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(12)和(13)的自适应度位置更新策略,优化后的灰狼位置更新可表示为:

$$\vec{X}(t+1) = \frac{W_1 \vec{X}_1 + W_2 \vec{X}_2 + W_3 \vec{X}_3}{3} \left(1 - \frac{t}{T}\right) + W \vec{X}_1 \frac{t}{T} \quad (14)$$

其中, W_1 、 W_2 、 W_3 分别为灰狼种群对 α 、 β 、 δ 的学习率。 ω 狼在每轮位置更新的最终公式为式(14)所示。
算法具体优化流程如图 4 所示。

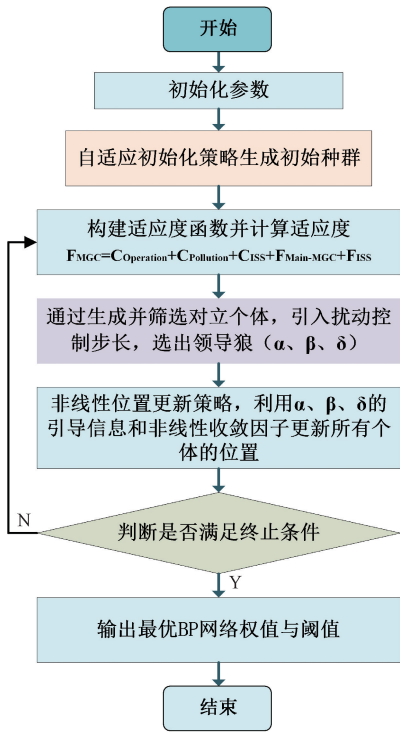


图 4 改进灰狼算法优化流程

2.3 IGWO-BP 六维力传感器解耦分析

在六维力传感器解耦建模中,采用了典型的 3 层 BP 神经网络结构,包括输入层、隐藏层和输出层^[14-15]。隐藏层中神经元的数量 m 依据以下经验公式确定: $m = a + n + l$, 其中, a 参数表示输入神经元的数量,对应传感器采集到的多通道应变信号的维度,本文 $a = 6$; 参数 n 表示输出神经元的数量,对应力和力矩的 6 个分量,因此 $n = 6$; 常数 l 为经验系数,通常取值范围为 1~10。综合考虑预测精度与网络复杂度,最终将隐藏层神经元数量设定为 10。在激活函数的选择上,输入层与隐藏层之间采用对数 S 型函数 (sigmoid),以增强网络的非线性映射能力; 隐藏层与输出层之间采用线性函数 (purelin),以适应力学输出的连续性特征。

BP 神经网络结构能够有效建立输入应变信号与六维力输出之间的非线性映射关系,从而构建出用于力传感器解耦的预测模型。该模型的结构如图 5 所示。

3 实时解耦系统设计与实现

3.1 系统架构设计

六维力传感器的实时解耦系统属于信号处理单元和数据处理单元,主要由信号采集、解耦算法嵌入与执行、数据传输和上位机显示 4 个模块组成。

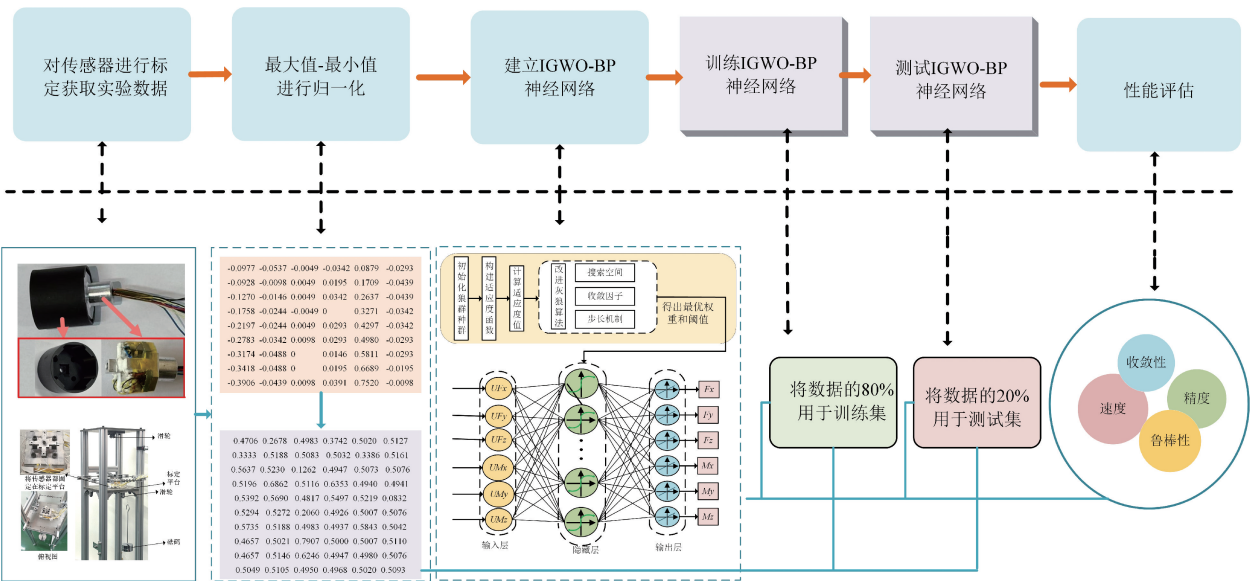


图 5 IGWO-BP 六维力传感器解耦模型

Fig. 5 Decoupling model of IGWO-BP six-axis force sensor

实时解耦系统的设计分为数据采集模块、数据处理模块和输出模块,系统架构需要确保能够高速实时处理六维力传感器的原始数据并输出解耦后的力/力矩值,具

有良好的可扩展性和稳定性。本系统采用异构计算构架,如图 6 所示,以高精度实时解耦为核心目标,集成多模块协同设计,传感器接口模块基于 AD7606 同步采样

ADC 实现六通道应变信号同步采样 (± 10 V 输入范围, 16-bit 分辨率, 串行接口, 200 kS/s 采样率, 有效位数 $ENOB = 14.3$ bits); 实时处理单元选用 STM32F103C8T6 微控制器, 部署经硬件优化的轻量化 IGWO-BP 模型; 通信接口采用 UART 串口通信; 电源管理模块通过 TPS7A4700 低

噪声 LDO (噪声密度 $4.7 \mu V_{rms}$) 与 π 型滤波网络 (截止频率 1 kHz) 确保模拟供电噪声峰值 $< 50 \mu V_{pp}$; 最后, 为保障解耦的实时性, 系统采用中断驱动架构 (ADC 采样触发最高优先级硬件中断, 解耦计算任务优先级次之), 结合双缓冲机制, 消除数据传输阻塞风险。

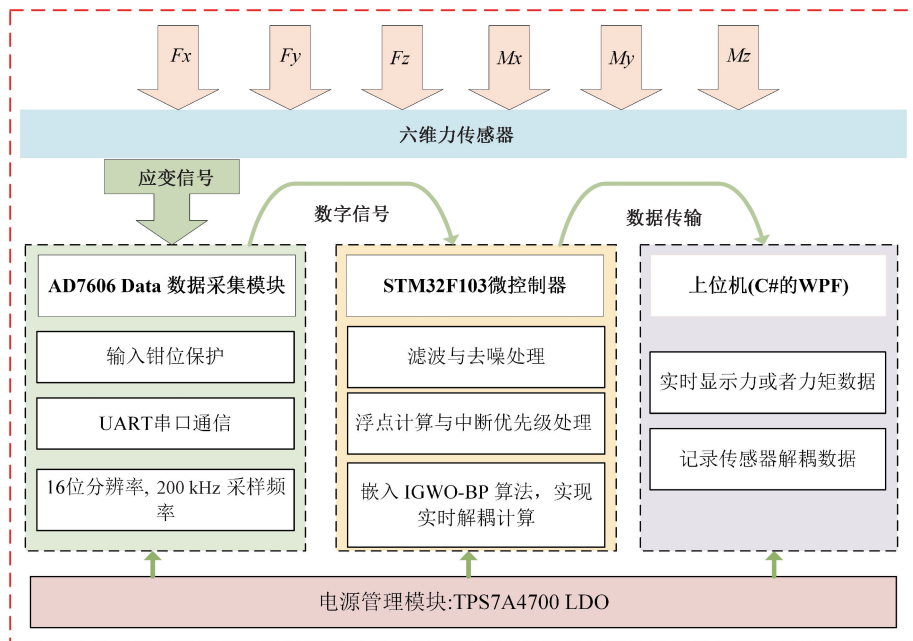


图6 硬件解耦系统设计

Fig. 6 Design of hardware decoupling system

3.2 IGWO-BP 算法嵌入实现

IGWO-BP 算法的嵌入是本系统中的关键技术挑战之一。首先, 以六维力传感器标定数据集为输入, 构建单隐藏层的 BP 神经网络。输入层节点数和输出层节点数均设置为 6 (对应输入层各通道电压和输出层各通道力或力矩), 隐藏层节点数通过灵敏度阈值法动态确定, 最终选定 10 节点架构, 满足计算复杂度与解耦精度的平衡。其中, 隐藏层的激活函数为 $\tansig$, 输出层激活函数为 purelin , 分别如式 (15) 和 (16) 所示, 向前传播公式如式 (17) 所示。在训练过程中, 为了保证神经网络的训练速度、提高模型的收敛性和解耦精度的保证, 数据集需经过归一化和反归一化处理, 采用滑动窗口归一化技术消除量纲差异, 具体如式 (18) 和 (19) 所示。接下来, 将训练得到的最优模型参数转换为 C 语言代码, 并通过嵌入式开发环境 Keil 将其加载到 STM32 微控制器中, 由于 STM32 微控制器的内存和计算能力有限, 因此直接存储和计算神经网络中的大规模参数会导致系统运行不稳定。为此, 将模型参数转化为适合嵌入式平台的数据格式, 并存储在 RAM 中, 以提高数据访问效率, 之后进行数据采集和解耦计算。STM32 通过 UART 串口与 AD7606 模块进行数据

采集, 获取 6 个通道的传感器输出电压信号。每次采集到新的信号后, 数据将通过嵌入的 IGWO-BP 模型进行解耦计算, 得到 6 个方向的力和力矩值。由于系统需要实时完成数据采集、解耦计算和数据传输, 通过 TIM2 定时器与中断机制精确控制各个模块的任务调度, 确保数据采集与解耦计算在毫秒级时间内完成, 并且避免了任务调度的延迟。最后, 解耦后的力和力矩数据通过串口传输至基于 Visual Studio 2022 开发的上位机界面, 该界面可实时更新采集波形图和数值表, 确保数据变化的实时可视化, 并且上位机支持自动保存解耦数据至本地文件。

$$\tansig(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (15)$$

$$\text{purelin}(x_1) = x_1 \quad (16)$$

式中: x 是神经元的输入; x_1 是隐藏层传递函数的输入。

$$\begin{cases} z = \mathbf{IW}_1 \times x + \mathbf{b}_1 \\ y = \mathbf{LW}_2 \times a + \mathbf{b}_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{IW}_1$ 为输入层的权值矩阵; x 为传感器的输入数据; $\mathbf{b}_1$ 为隐藏层偏置向量; $\mathbf{LW}_2$ 为隐藏层到输出层的权值矩阵; a 隐藏层的输出; $\mathbf{b}_2$ 输出层的偏置向量。

$$x_n = \frac{2(x - \frac{2x_{\max} + x_{\min}}{2})}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (18)$$

$$y_n = y \times (\frac{y_{\max} - y_{\min}}{4}) + \frac{2y_{\max} + y_{\min}}{2} \quad (19)$$

式中: x_n 为归一化的数据,取值范围为 $[-1, 1]$; x 为原始输入数据; $x_{\max}$ 为输入数据中每个维度的最大值; $x_{\min}$ 为输入数据中每个维度的最小值。 y_n 为归一化的数据,恢复到原始的输出范围; y 为神经网络的输出数据(经过归一化处理后的解耦值); $y_{\max}$ 为输入数据中每个维度的最大值; $y_{\min}$ 为输入数据中每个维度的最小值。

3.3 系统集成与性能优化

在完成各个模块的设计与实现后,进行了整个系统的集成。集成过程中,硬件模块、软件模块与解耦算法之间的协同工作是系统性能的关键,如图7所示。通过合理安排数据流,优化硬件与算法的接口,系统能够高效地采集、处理和输出传感器信号。通过对 IGWO-BP 算法的嵌入实现进行了优化和集成,减少了每次数据处理的计算时间,优化后的算法能迅速完成数据采集、解耦计算和结果输出,通过硬件和算法的协同优化,进一步降低了系统的延迟,提高了实时响应能力。

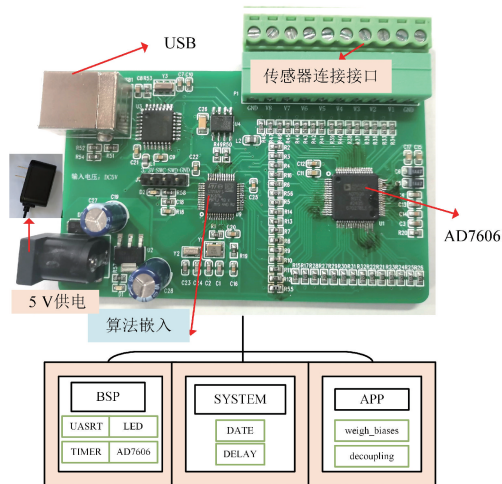


图7 六维力传感器采集系统设计

Fig. 7 Design of six-axis force sensor acquisition system

4 实验验证与结果分析

4.1 解耦误差评价指标

六维力传感器之间的耦合需要评价指标,以文献[16-17]所述的误差率为主要评价指标。采用 I 类误差和 II 类误差,其中, i 方向上的 I 类误差定义式如式(20)所示。

$$\delta_i = \left| \frac{F_{(i)R} - F_{(i)M}}{F_{(i)(\max)}} \right| \quad (20)$$

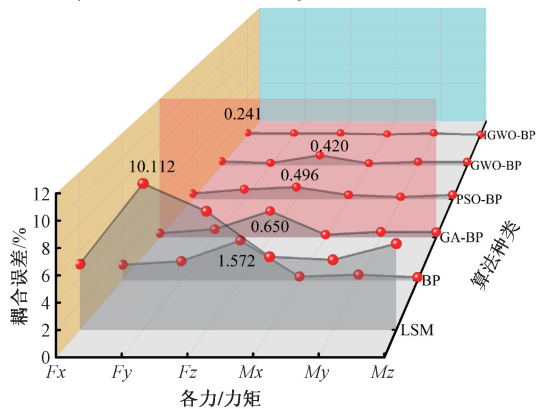
II 类误差表示某一方向施加载荷导致其他方向产生附加的力/力矩,称为耦合误差,其中 v 方向施加载荷对 i 方向产生的耦合误差定义式如式(21)所示。

$$\delta_{iv} = \frac{|F_{iv}|}{F_{i(\max)}} \quad (21)$$

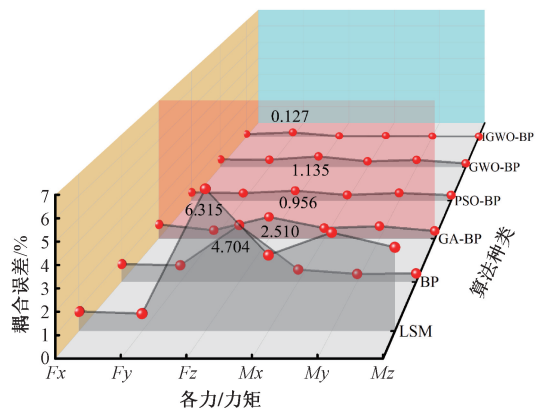
式中: $F_{(i)R}$ 为 i 方向实际加载到传感器各个方向上的力/力矩; $F_{(i)M}$ 为 i 方向解耦的实际测量值。

4.2 解耦算法性能分析

为验证 IGWO-BP 算法的优势,本文首先使用指尖六维力传感器的标定数据进行解耦测试,使用几种经典的解耦算法进行对比,包括传统的最小二乘法 (LSM)、遗传算法优化的 BP (GA-BP) [18]、灰狼算法优化 BP 神经网络 (GWO-BP),以及粒子群优化的 BP (PSO-BP) [19]。对比的主要评估指标包括解耦精度 (I 类误差、II 类误差),解耦精度如图8所示,IGWO-BP 算法的 I 类误差最大为 0.241% FS (对比 PSO-BP 的 0.49%、GWO-BP 的 0.42%),精度显著提升;II 型误差方面,IGWO-BP 在 M_x 、 M_y 和 M_z 方向分别达到 0.038% FS、0.042% FS、0.045% FS,显著优于其他算法。



(a) I 类误差
(a) Class I error



(b) II 类误差
(b) Class II error

图8 各类算法耦合误差

Fig. 8 Coupling error of various algorithms

为进一步评估 IGWO-BP 算法的通用性,本文采用商用十字梁式六维力传感器的标定数据进行解耦验证,标定曲线如图 2 所示。在实验中,考虑六维力/力矩各分量的随机加载特性,共采集 160 组单维加载标定数据。其中 80% 的数据用于训练,20% 用于测试。训练集与测试集通过随机函数进行划分,以减弱数据排列顺序对模型训练与测试结果的影响,并保证训练样本与测试样本在统计意义上的独立性。

基于 MATLAB 对传感器标定数据进行解耦计算,解耦后各个方向的线性度如图 9 所示,在各方向施加不同载荷时,传感器输出的力/力矩曲线呈现出良好的线性关系。此外,在单独施加某一方向的载荷时,其他方向的输出值接近零,表明传感器的维间耦合已被有效抑制。在多次随机划分条件下重复开展训练与测试,各次实验所得测试集最大相对误差均未超过 $\pm 1.6\%$,解耦性能保持稳定。上述实验结果表明,所提出的 IGWO-BP 解耦方法在不同数据划分条件下均能够获得一致的解耦性能,有效提高了六维力传感器在复杂耦合条件下的测量精度。

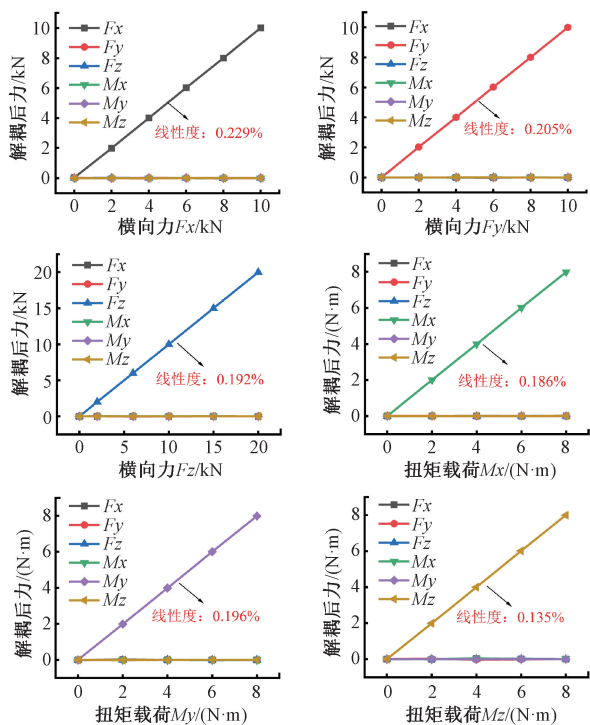


图 9 线性度特性曲线

Fig. 9 Linearity characteristic curves of the sensor

4.3 解耦系统测试分析

为系统评估 IGWO-BP 算法在嵌入式平台上的实时解耦性能与工程适应性,构建了基于指尖六维力传感器的实验验证平台。该平台由六维力传感器、静态标定加

载装置、AD7606 模数转换模块、STM32F103 微控制器及上位机组成^[20-21]。集数据采集、解耦计算与结果显示于一体。数据采集系统采用 STM32F103 与 AD7606 协同工作,具备多通道同步采样能力,可实时采集传感器六通道输出信号。解耦模型基于 IGW 优化 BP 神经网络构建,已固化于 STM32 微控制器内部,实现传感器信号的实时解耦。系统结构框图如图 10 所示,展示了从传感器信号采集、信号处理到解耦输出的完整流程,验证了解耦算法在资源受限平台上的部署能力与运行稳定性。

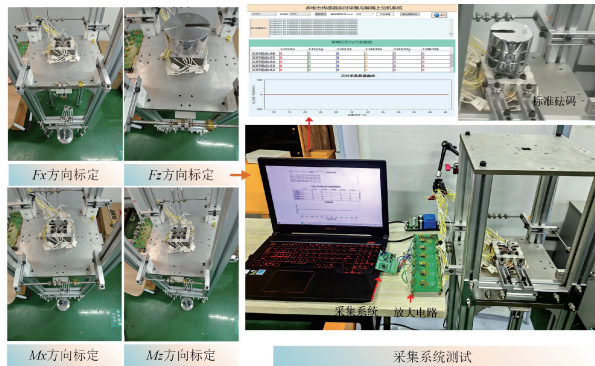


图 10 六维力传感器在线标定系统

Fig. 10 Online calibration system of six-axis force sensor

在实验过程中,采用单维加载策略,即每次仅向某一力或力矩分量施加加载,其余分量保持为零,以排除多维耦合干扰。加载范围方面, F_x 、 F_y 、 F_z 3 个方向的力加载区间设定为 0~60 N,步长为 5 N; M_x 、 M_y 、 M_z 3 个方向的力矩加载区间设定为 0~600 N·mm,步长为 10 N·mm。在每一级加载和卸载状态下,采集 20 组数据,增强样本稳定性,提高解耦模型的响应一致性。测试流程如下:首先将六维力传感器固定在标定平台,并且连接至数据采集系统,确保其处于无外力干扰的稳定环境,随后将传感器采集系统调零,对采集系统进行单向加载测试,在传感器的任一方向(如 x 轴正向),悬挂已知重量的标准砝码,并记录上位机显示的实时解耦结果,依次加载不同重量的砝码,每个重量保持稳定 5 min,进行多方向复合加载测试时,重复单向加载的过程。

在实时系统测试中,数据采集模块基于 AD7606 实现六通道同步采样,系统采样频率设置为 500 Hz(采样周期 2 ms)。解耦模型部署于 STM32F103C8T6(主频 72 MHz),采用前向推理方式完成六维解耦计算。解耦结果通过串口传输至上位机显示;在 500 Hz 条件下系统可连续稳定运行,未出现数据堆积、明显延迟累积或丢包现象,能够满足实时测量与在线显示需求。

为验证解耦系统在 6 个自由度下的精度与稳定性,分别对 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 6 个方向施加标准单轴载荷,并实时记录解耦输出。实验结果如图 11 所示,三维

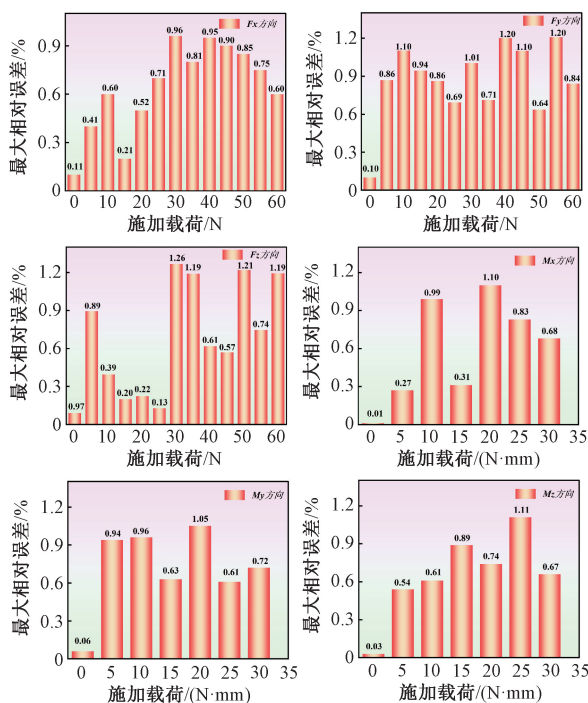


图 11 采集系统误差

Fig. 11 Acquisition system error diagram

力方向 (F_x 、 F_y 、 F_z) 的解耦输出与理论加载值高度吻合,最大相对误差不超过 $\pm 1.6\%$,平均误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,展现出良好的线性响应性能,最大相对误差如式(22)所示。在 3 个力矩方向 (M_x 、 M_y 、 M_z) 的加载实验中,系统同样表现出较高的精度与方向分辨能力,大多数测点误差维持在 $\pm 1\%$ 以内,最大相对误差未超过 $\pm 1.26\%$ 。同时,在任一方向加载过程中,其他未加载方向的输出值始终维持在接近零的范围内,未出现明显串扰,说明所提出的解耦算法具备良好的方向隔离特性和稳定的解耦能力。总体来看,该解耦系统在 6 个自由度范围内均表现出可靠的输出精度和实时性,验证了 IGWO-BP 神经网络解耦模型在嵌入式平台中的有效性及其实用价值。

$$\varepsilon = \frac{F_m - F_t}{F_t} \times 100\% \quad (22)$$

式中: ε 为该方向的相对误差; F_m 为解耦系统输出的该方向力或力矩值; F_t 为理论施加的该方向标准载荷。

为了进一步验证采集系统的稳定性,在相同加载条件下,记录上位机显示的力/力矩的最大值与最小值。系统的稳定性通过计算静态标定过程中最大值与最小值之差,并将其与该方向的满量程之比进行量化,具体结果如图 12 所示。

使用 IGWO-BP 解耦算法后,传感器的相对误差和稳定性得到了显著提高。在实时解耦过程中,系统能够稳

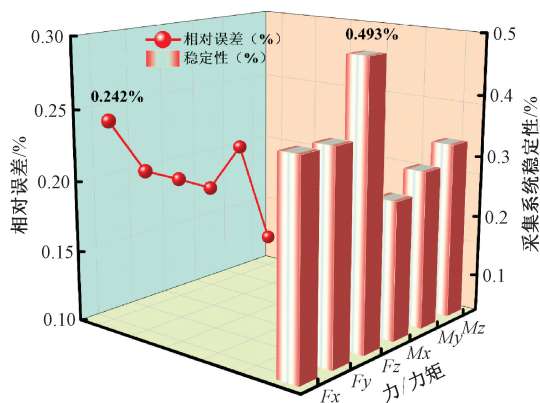


图 12 采集系统误差分析

Fig. 12 Acquisition system error analysis diagram

定输出经过解耦后的力矩/力值,且采集系统数据的平均相对误差最大值在 1.26%,该采集系统的准确度和实时性特性满足后续六维力传感器的实时采集要求;采集系统的最大波动出现在 M_z 通道,为 0.493%,并且最大波动出现在满量程状态,在其他通道中,表现良好,因此采集系统数值波动完全在可控范围内,满足多维力传感器数据采集要求,测试结果显示系统具有良好的准确性和稳定性。上述测试充分证明系统在实时性和高精度方面的优越性能,为实际应用提供有利支持。

5 结论

本文针对六维力传感器在使用过程中存在的维间耦合问题,提出一种基于改进灰狼算法优化 BP 神经网络的多输入多输出回归预测模型来实现传感器的耦合补偿。研究表明,解耦以后的应变式六维力传感器 I 类最大相对误差为 0.267%, II 类最大相对误差为 0.127%,满足传感器使用的精度要求,并为了实时得到传感器的解耦输出,使用 STM32 微控制器和 AD7606 模块设计了六维力传感器信号采集系统,并将解耦算法模型嵌入微控制器中,可实时得到解耦以后的力或力矩输出,研究表明,系统能够稳定输出经过解耦后的力矩/力值,且采集系统数据的平均相对误差最大值在 1.26%,因此,它能够准确地测量力/力矩的输出,满足实际应用对高精度测量的需求。这种高精度实时解耦输出使得六维力传感器在机器人领域和医疗行业的应用更加可靠和有效。

本解耦算法和实时采集解耦系统的适用性较为广泛,实验证明其综合性能优于传统的解耦算法,在传感器性能提升领域具有很高的应用价值。后续研究可着力于算法对六维力传感器的温度补偿,进一步提升传感器的测量精度。

参考文献

- [1] HSUEH I C, LAN Y H, LIN D H, et al. A compact compliant robot for the grinding of spherical workpieces with high force control accuracy [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, 91: 102856.
- [2] DE TOMMASI F, PULCINELLI M, MASSARONI C, et al. A 3D-printed sensing element based on fiber Bragg grating technology for grasping force measurement in surgical forceps [J]. *Measurement*, 2025, 242: 116236.
- [3] 戴裕强,王鹏,张昌明,等. 基于堆叠学习的六维力传感器解耦方法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2025(3): 20-24.
- DAI Y Q, WANG P, ZHANG CH M, et al. Research on a Decoupling Method for Six-Dimensional Force Sensors Based on Stacked Learning [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2025(3): 20-24.
- [4] PU M, WANG Y, ZHAO R, et al. Optimization of capacitive six-axis force/torque sensors based on error analytical model [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(8): 12225-12236.
- [5] 陈铭杰,蒲明辉. 基于 OOA-RBF 的电容式六维力传感器解耦算法[J]. *仪表技术与传感器*, 2025(6): 13-19, 27.
- CHEN M J, PU M H. Decoupling algorithm for capacitive six-dimensional force sensor based on OOA-RBF [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2025(6): 13-19, 27.
- [6] 李保丰,卢文科,左锋. 利用 GWO-LSSVM 算法对光纤压力传感器进行温度补偿[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(5): 143-150.
- LI B F, LU W K, ZUO F. Temperature compensation of optical fiber pressure sensor based on GWO-LSSVM [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(5): 143-150.
- [7] ZHOU C, XU Z, XIA M. Steel-ball-type six-dimensional dynamic force measurement platform with fault-tolerant performance [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2024, 106: 105329.
- [8] 陈伟,张晓,袁栋,等. 农田耕整载荷六维力传感器结构优化与解耦研究[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 28-35, 89.
- CHEN W, ZHANG X, YUAN D, et al. Structural optimization and decoupling of six dimensional force sensor for farmland tillage load [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 28-35, 89.
- [9] 黄禾艺,李正农,任志刚,等. 基于压电纤维复合材料
- 的波浪冲击压力传感器研究[J]. *电子测量技术*, 2024, 47(14): 26-34.
- HAUNG H Y, LI ZH N, REN ZH G, et al. Research on wave impact pressure sensor based on piezoelectric fiber composites [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(14): 26-34.
- [10] 刘杰,曹静,赵昕. 基于 OOB-GWO-SVR 的风电机齿轮箱故障预警[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(12): 97-105.
- LIU J, CAO J, ZHAO X. Wind turbine gearbox fault warning based on OOB-GWO-SVR [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(12): 97-105.
- [11] KUMAR S P, JAT D, SAHNI R K, et al. Measurement of droplets characteristics of UAV based spraying system using imaging techniques and prediction by GWO-ANN model [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114759.
- [12] 韩继科,王鹏,张昌明,等. 基于 GWO-BP 和 TOP 算法的全对中式三维车削力传感器多目标优化设计及研究[J]. *传感技术学报*, 2025, 38(6): 983-990.
- HAN J K, WANG P, ZHANG CH M, et al. Multi-Objective optimization design and research of completely centered 3D cutting force sensor based on GWO-BP and TOP algorithm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2025, 38(6): 983-990.
- [13] HUANG Z, JIA L, JIANG J, et al. Research on the prediction of breakdown voltage of transformer oil based on multi-frequency ultrasound and GWO-RF algorithm [J]. *Measurement*, 2025, 240: 115575.
- [14] YAN X, WANG J, SHEN Z, et al. A self-decoupling contactless overvoltage measurement method based on optimization of measuring point [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-11.
- [15] LI Y, WANG G, 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.
- [16] 查浩,费少华,傅云,等. 基于 EtherCAT 总线的六维力传感器在线解耦技术[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2023, 57(10): 2042-2050.
- ZHA H, FEI SH H, FU Y, et al. Online decoupling technology of six-dimensional force sensor based on EtherCAT bus [J]. *Journal of ZheJiang University (Engineering Science)*, 2023, 57(10): 2042-2050.
- [17] 蒲明辉,胡世通,罗祺,等. 两种电容效应的六维力传感器结构设计及解耦[J]. *机械设计与制造*, 2022(8):

65-69.

PU M H, LUO SH T, LUO Q, et al. Design and decoupling of a six-axis force sensor with two kinds of capacitor effects [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(8):65-69.

[18] LI H J, SONG A G, LI A, et al. Static calibration and decoupling for six-axis force/torque sensors based on genetic algorithm [J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2019, 14(3): 431-441.

[19] FU R, XIAO D, FAN Y. A novel cell phone localization solution for trapped victims based on compressed RSSI fluctuation range and PSO-BP neural network [J]. Measurement, 2024, 225: 114014.

[20] 张春涛,王勇. 工业机器人六维力传感器在线标定方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 161-168.

ZHANG CH T, WANG Y. Research on online calibration method of six-axis force sensor for industrial robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 161-168.

[21] LI J, WANG Y. A high-precision data acquisition system designed by using AD7606 and LabVIEW [C]. 2024 3rd International Symposium on Semiconductor and Electronic Technology (ISSET). IEEE, 2024: 561-565.

作者简介



王鹏, 2017 年于西安交通大学获得博士学位, 现为陕西理工大学机械工程学院副教授, 主要研究方向为多维力传感器及其应用研究、应变计动态特性测试方法及系统研究等。

E-mail: wangpeng1851@163.com

Wang Peng received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in December 2017. He is currently an associate professor at the School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology. His main research interests include multi-dimensional force sensors and their applications, as well as testing methods and systems for the dynamic characteristics of strain gauges.



李威(通信作者), 2023 年于洛阳理工学院获得学士学位, 现为陕西理工大学硕士研究生, 主要研究方向为六维力传感器的解耦及其信号处理。

E-mail: 13759611897@163.com

Li Wei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Luoyang Institute of Science and Technology in 2023. He is currently a M. Sc. candidate at Shanxi University of Technology. His main research interests include the decoupling and signal processing of six-dimensional force sensors.