

基于 NDE-FLNN 与零极点配置法的六维加速度传感器动态性能补偿

郝喆¹ 于春战¹ 张佳林¹ 孙治博²

(1. 北京林业大学工学院 北京 100083; 2. 北京航空航天大学北航学院 北京 100191)

摘要:六维加速度传感器可广泛应用于类人机器人领域的动态全息检测,从而保障机器人运动柔顺性与稳定性。现有六维加速度传感器存在响应速度慢、响应范围窄等动态特性差的问题,限制了传感器对测量载体实时动态位姿信息的敏锐、宽范围响应。针对这一问题,开展六维加速度传感器时频域动态性能补偿研究。利用差分方程建立传感器的动态模型,提出一种基于 NDE-FLNN 的高精度动态模型参数辨识算法,并进一步推导动态补偿模型补偿传感器的响应速度,提升传感器的时域动态性能。之后,基于零极点配置法设计传感器各通道动态补偿器,消除原极点并引入新极点,拓展传感器响应范围,改善传感器频域动态性能。实验结果表明,相比于 DE-FLNN 算法,改进后的 NDE-FLNN 算法能够更高精度地辨识传感器动态模型参数,传感器补偿后各分量的调节时间减少至原先一半左右,均在 150 ms 以内,工作带宽由 22 Hz 拓展至 84 Hz,传感器时频域动态性能得到显著提升。

关键词:六维加速度传感器;差分方程;NDE-FLNN;零极点配置法;动态性能补偿

中图分类号: TP212; TN609 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Dynamic performance compensation of six dimensional acceleration sensor based on NDE-FLNN with zero-pole configuration method

Hao Zhe¹ Yu Chunzhan¹ Zhang Jialin¹ Sun Zhibo²

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. School of Beihang, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Six dimensional acceleration sensor can be widely used for dynamic holographic detection in the field of humanoid robotics, so as to guarantee the flexibility and stability of robot motion. The existing six dimensional acceleration sensor have the problems of slow response speed, narrow response range and other poor dynamic characteristics, which limit the sensor's sharp and wide-range response to the real-time dynamic position information of the measurement carrier. To address this problem, a study on the compensation of the dynamic performance of the six dimensional acceleration sensor in the time-frequency domain is carried out. The dynamic model of the sensor is established using differential equations, a high-precision dynamic model parameter identification algorithm based on NDE-FLNN is proposed, and the dynamic compensation model is further derived to compensate for the response speed of the sensor and to enhance the dynamic performance of the sensor in the time domain. After that, the dynamic compensator of each channel of the sensor is designed based on the zero-polarity configuration method, which eliminates the original poles and introduces new poles to expand the response range of the sensor and improve the dynamic performance of the sensor in the frequency domain. The experimental results show that compared with the DE-FLNN algorithm, the improved NDE-FLNN algorithm is able to identify the dynamic model parameters of the sensor with higher accuracy, and the adjustment time of each component of the sensor compensation is reduced to about half of the original one, which is within 150 ms, and the operating bandwidth is expanded from 22 Hz to 84 Hz, so the dynamic performance of the sensor in the time-frequency domain has been significantly improved.

Keywords: six dimensional acceleration sensor; difference equation; NDE-FLNN; zero-pole configuration method; dynamic performance compensation

0 引言

机器人各种作业运动中的柔顺性和稳定性离不开传感器技术的辅助,典型的例子是类人机器人进行空翻这种复杂全身运动时,需要六维加速度传感器精确采集机器人整身的实时动态位姿信息,并及时反馈给机器人系统以提高机器人运动性能。多维传感器因其测量信息丰富,在机械振动与冲击^[1]、惯性导航^[2]、医疗康复^[3]、人体运动模式识别^[4-5]等领域也有着广泛应用前景。这些实际应用环境中的信息均具有连续实时动态变化特性,需要传感器有良好的实时动态测量能力,这与传感器动态性能的优劣直接关联,提高六维加速度传感器的动态特性是实现传感器对测量载体的动态位姿信息敏锐宽范围响应的关键问题。

针对多维传感器存在的响应速度慢、响应范围窄等动态性能差的问题,众多学者使用各类补偿方法对传感器进行动态补偿来提高传感器的动态响应特性。其中基于软件算法的动态性能补偿方法因其具有良好的灵活性、便捷性及通用性,已逐渐成为传感器动态性能补偿的研究热点。姬莉霞等^[6]提出了一种传感器非线性动态建模方法,使用最小二乘支持向量机建立传感器的动态模型,将传感器动态建模精度作为目标函数,使用蚁群算法优化模型参数,提高了传感器动态建模的效率和精度。Wang 等^[7]采用差分建模和融合处理校准压力传感器的输出,根据阶跃响应下的动态标定数据,使用 QR 分解法建立传感器的动态模型,并对传感器进行频域实验,验证了动态模型表征传感器动态性能的有效性。付立悦^[8]提出了一种基于差分进化算法(differential evolution, DE)的多维力传感器动态模型的辨识方法,并基于 PID 神经网络解耦控制器对传感器进行了动态性能补偿,有效提高了传感器的响应速度,拓展了工作带宽,改善了传感器的动态性能。朱同宝^[9]采用冲击响应法对压电式六维加速度传感器进行动态标定,并建立相应的动态模型。根据该动态模型,设计解耦补偿器来提升传感器的动态特性。Lai 等^[10]使用负阶跃响应法对称重传感器进行动态标定实验,并采用零极点配置法进行动态补偿。通过动态标定数据和补偿方法,拓展了传感器的工作带宽,提升其动态响应能力。Gu 等^[11]基于带白化滤波器的广义最小二乘法辨识了力传感器的动态数学模型,并构建补偿单元对力传感器系统的动态特性进行补偿,改善了应变式力传感器的动态性能。

上述研究多集中于对各类单维或三维传感器进行动态性能补偿,目前缺少对六维加速度传感器的动态性能补偿研究。不同于单维或三维传感器,六维加速度传感器作为一种可以同时测量空间六维加速度信息的新颖传

感器,其应用场景信息更加丰富多变。但受弹性元件设计、制造以及外部干扰源影响,六维加速度传感器丰富的六维测量信息会带来更大的动态误差,因此需要采用高精度的动态补偿方法对传感器输出进行补偿,使得补偿后输出尽可能接近理论不失真输出,得到具有良好动态特性的六维加速度传感器。

根据六维加速度传感器应用场景对其动态特性的高度要求,利用差分方程建立传感器的动态模型,描述其动态性能。在已有动态性能补偿算法基础上进行优化改进,使用基于邻域双变异运算的变异策略和聚类环境选择策略的改进差分进化算法优化函数链神经网络(new differential evolution - functional link neural network, NDE-FLNN)辨识传感器动态模型参数,并推出动态补偿模型来补偿传感器的时域动态性能。采用零极点配置法设计传感器各通道动态补偿器,改善传感器频域动态性能。根据六维加速度传感器冲击标定实验数据,进行时频域动态性能补偿,结果验证了这两种方法在传感器动态性能补偿方面的高效性。

1 六维加速度传感器动态建模

1.1 六维加速度传感器动态性能

六维加速度传感器弹性元件结构如图 1 所示,是一种基于 Stewart 的并联结构,其结构主要分为上平台球形质量块、6 个双弯曲梁弹性分支杆和下平台,弹性分支杆通过柔性铰链与上下平台连接^[12]。

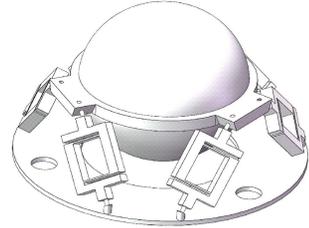


图 1 六维加速度传感器弹性元件

Fig. 1 Elastic element of six dimensional acceleration sensor

六维加速度传感器的动态性能是指随时间变化的输入信号与相应随之变化的输出信号之间的关系,主要分为时域和频域动态性能,其中时域动态性能体现了传感器对外界振动信号的响应速度,而频域动态性能体现了传感器对振动信号的响应范围,这两方面动态性能通过时域和频域动态性能指标进行评估量化。

1.2 基于差分方程的动态模型

六维加速度传感器各通道动态性能中的输入输出关系可采用差分方程建立关系式如下:

$$u(k) = b_0\alpha(k) + b_1\alpha(k-1) + \dots + b_m\alpha(k-m) -$$

$$a_1 u(k-1) - \dots - a_n u(k-n) + e(k) \quad (1)$$

式中： $\alpha(k)$ 、 $u(k)$ 分别表示传感器的输入加速度信号和输出电压信号， m 和 n 为传感器输入和输出信号阶次， $e(k)$ 为零均值同分布不相关的随机变量序列。

基于差分方程的动态模型可用来描述六维加速度传感器各通道的动态性能，其中 a_1, a_2, \dots, a_n 与 b_0, b_1, \dots, b_m 是动态模型的核心参数，由传感器结构及原理决定，需要对这些参数高精度辨识，才能得到准确表述传感器动态性能的动态模型。

1.3 基于函数链神经网络的参数辨识

FLNN 目前广泛应用于建模及模型多参数辨识领域^[13]，基于 FLNN 建立六维加速度传感器动态模型的网络结构如图 2 所示，传感器的输入信号 $\alpha(k)$ 及时延信号 $\alpha(k-1), \dots, \alpha(k-m)$ 与传感器输出信号的时延信号 $u(k-1), \dots, u(k-n)$ 即为神经网络的输入，各输入之间可通过连接权值 w_i 加权求和得到神经网络的预测输出 $u_1(k)$ ，建立网络输入与输出之间的表达式如下：

$$u_1(k) = w_0 \alpha(k) + w_1 \alpha(k-1) + \dots + w_m \alpha(k-m) + w_{m+1} u(k-1) + \dots + w_{m+n} u(k-n) \quad (2)$$

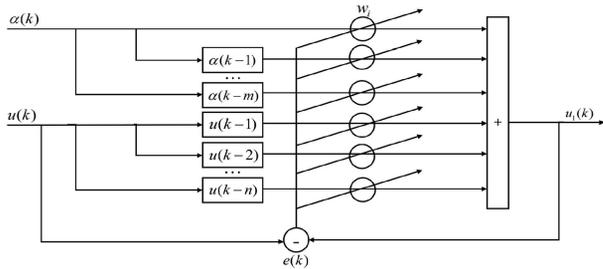


图 2 FLNN 网络结构图

Fig. 2 FLNN network structure diagram

将网络输出与传感器实际输出之间的均方差定义为损失函数，如式 3 所示。通过网络连接权值 w_i 的训练，使损失函数 e 最小，从而拟合出准确的网络输出。

$$e = \frac{\sum_{k=1}^N [u(k) - u_1(k)]^2}{N} \quad (3)$$

式中： N 表示网络中输出数据数量。

由网络结构可知，网络训练得到的连接权 $[w_0, w_1, \dots, w_{m+n}]$ 即为传感器动态模型的参数 $[b_0, b_1, \dots, b_m, -a_1, \dots, -a_n]$ ，以此便可得到六维加速度传感器输入输出之间的动态模型。

1.4 差分进化算法优化 FLNN

然而 FLNN 是基于梯度下降原理进行的网络训练，且网络初始权值具有随机性导致网络输出易陷入局部最优解情况，使得建模及模型参数辨识精度不足。故可使用差分进化算法优化 FLNN，对网络初始权值进行全局最

优搜索，解决 FLNN 建立传感器动态模型精度不足、不稳定等问题^[14]。

可将 FLNN 网络中的初始连接权值作为 DE 初始种群进行寻优，通过变异、交叉和选择等操作的迭代循环，最终得到 FLNN 的最佳连接权值。然而经典的 DE 算法存在收敛过快、搜索效果及范围不足等问题，而变异、交叉和选择 3 项操作中的更新策略直接影响着 DE 算法的搜索效果，可对这些操作中的更新策略进行改进，来进一步提高 DE 算法的寻优能力^[15-16]。

1.5 基于 NDE-FLNN 的动态建模

针对经典 DE 算法存在的过早收敛、搜索能力不足等问题，现对算法中的变异策略和选择策略进行改进，得到一种新的差分进化算法—NDE 算法。变异操作方面，提出基于邻域双变异 (neighborhood-based dual mutation, NDM) 运算的变异策略，NDM 运算可以有效解决过早收敛的问题，实现最佳个体的高效搜索。而选择操作方面，设计了基于聚类的环境选择机制 (clustering-based environmental selection, CES)，这种机制可以在迭代进化过程中选择更合适、更高效的个体^[17]。这两种改进策略的具体内容如下：

1) 基于邻域双变异运算的变异策略

为了扩大搜索范围，提高种群的多样性，可采用基于索引的领域结构如图 3 所示，所有个体随机编号并分布在基于索引的半径为 N_r 的领域环形结构中。由于邻域是基于索引的环形拓扑结构构建的，因此不同邻域中的个体不能直接相互交互。这种方式限制了信息在种群中的传递，这样可以在搜索过程中形成多个稳定的生态圈，从而保持了种群多样性。

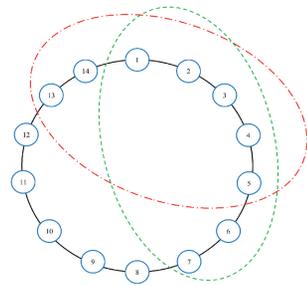


图 3 基于索引的领域结构

Fig. 3 Index based domain structure

为了搜索多个高适应度个体，提出 NDM 运算。使用 NDM 运算对变异策略进行改进后，添加了两个不同搜索特性的新型变异运算策略，表示如下：

$$v_{i1} = x_{nbest} + F_i \times (x_{r1'} - x_{r2'}) + F_i \times (x_{r3'} - x_{r4'}) \quad (4)$$

$$v_{i2} = x_{nearest} + F_i \times (x_{r1'} - x_{r2'}) + F_i \times (x_{r3'} - x_{r4'}) \quad (5)$$

式中： x_{nbest} 、 $x_{nearest}$ 分别为某邻域中目标个体 x_i 的最佳、最

近个体, x_{i1}, \dots, x_{id} 是邻域中不同随机个体, F_i 是与适应度值相关的自适应变异因子, 其计算公式如下:

$$F_i = \text{randn} \left(\frac{\text{rank}_i}{\text{MAX_rank}}, 0.1 \right) \quad (6)$$

其中, rank_i 为邻域中所有个体适应度值排名, MAX_rank 为最大排名值, randn 表示正态分布。上述的两个新型变异运算策略中, 领域中的最佳和最近个体 $x_{\text{best}}, x_{\text{nearest}}$ 分别通过适应度值排名和欧氏距离来获取。这种自适应更新的变异因子保证了搜索效率, 提高了种群多样性, 这样有助于更准确地调整搜索区域的大小, 提高算法的搜索性能。

2) 基于聚类的环境选择策略

CES 机制目的是选择多个更佳的个体组成下代种群, 该机制的核心是 AP (affinity propagation, AP) 聚类方法。AP 方法原理是在迭代过程中会选择合适个体作为聚类中心, 识别种群其他个体的数量以及这些个体和聚类中心的位置, 最终使所有选择个体与聚类中心个体之间的相似度之和最大化。不同个体之间的相似度可用式 15 个体间欧氏距离平方的负值来表示。

$$s(i, k) = - \|x_i - x_k\|^2 \quad (7)$$

CES 机制会将前代和当代种群形成的组合种群分为适应度较高和适应度较差的两类集合, 根据两类集合形成新的种群作为下代更优种群。这种机制保证 DE 算法具有良好的收敛性, 且提高了搜索种群的多样性。

综上所述, NDE 算法具有良好的收敛性和极强的搜索能力, 可使用 NDE 算法高效搜索 FLNN 的最佳连接权值, 得到高精度表征六维加速度传感器动态性能的动态模型。基于 NDE 算法优化 FLNN, 建立六维加速度传感器的动态模型以及参数辨识流程如图 4 所示。

主要步骤如下:

Step 1) 传感器输入 $\alpha(k)$ 及其时延信号 $\alpha(k-1), \dots, \alpha(k-m)$ 与输出的时延信号 $u(k-1), \dots, u(k-n)$ 设为网络输入, 初始化连接权值 w_i ;

Step 2) 初始连接权值 w_i 设为 NDE 算法的初始种群, 计算初始种群中各个个体的适应度值;

Step 3) 使用基于邻域双变异运算的变异策略, 交叉策略和基于聚类的环境选择策略进行迭代循环, 搜索得到最佳种群个体, 即为最佳连接权值;

Step 4) 搜索得到的最佳连接权值作为六维加速度传感器差分方程表示的动态模型参数, 得到高精度的传感器动态模型并获得准确拟合的网络输出。

2 传感器动态性能补偿及分析

2.1 冲击标定实验

传感器在动态性能补偿之前, 一般首先需要对其进

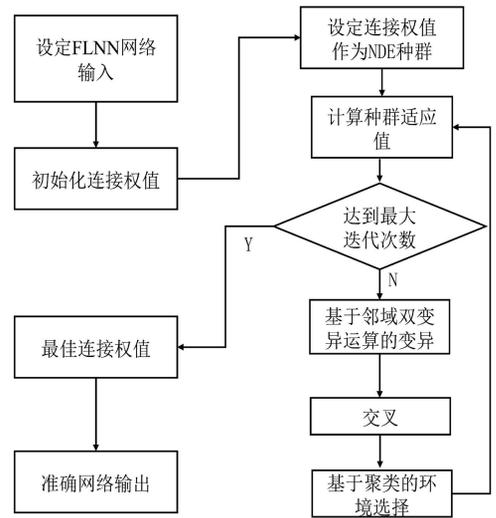


图 4 基于 NDE-FLNN 的动态模型参数辨识流程

Fig. 4 NDE-FLNN based dynamic model parameter identification process

行动态标定, 获得传感器在动态标定载荷下的输入输出数据。传感器动态标定实验主要包括频率响应、阶跃响应和冲击响应标定法^[18], 其中冲击响应标定法是采用摆锤或者落球冲击装置对传感器施加冲击信号, 该方法所需设备及操作简单, 较易获取传感器时频域的动态响应曲线, 得到传感器动态特性。因此可基于冲击响应标定法对六维加速度传感器进行动态标定实验, 以此进行传感器后续的动态性能补偿。

课题组基于落球和摆锤冲击法设计了冲击实验台, 如图 5(a)、(b) 所示。通过将六维加速度传感器和标准线、角加速度计固定在冲击台基座上, 利用落球和摆锤对传感器产生冲击信号。传感器在受到冲击信号后, 经过连接好的动态应变仪和采集仪, 最终在计算机采集程序中获取传感器输入输出数据。

整个冲击实验台中的落球装置通过使用棉线将带吊环的钢球悬挂在上方横梁上, 剪断棉线让钢球做自由落体, 可以对传感器产生 α_z, ε_x 以及 ε_y 方向上的三维冲击信号。摆锤装置中锤柄通过紧固螺栓与轴承横梁孔固定, 通过做 1/4 圆周摆动对传感器产生 α_x, α_y 以及 ε_z 方向上的三维冲击信号。

2.2 动态性能补偿

六维加速度传感器的动态性能补偿需要在动态模型基础上进一步推导动态补偿模型, 将动态补偿模型的输出电压作为补偿环节串接在传感器实际输出后, 得到补偿后输出, 从而提升传感器的动态性能。

在对传感器进行动态性能补偿时, FLNN 网络结构如图 6 所示。此时网络输入为传感器输出电压信号 $u(k)$ 及时延信号 $u(k-1), \dots, u(k-n)$ 与输入加速度

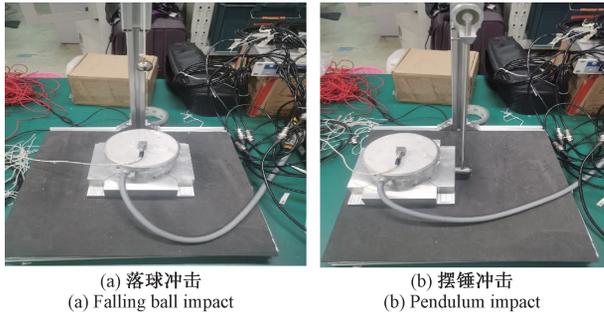


图 5 传感器冲击标定实验

Fig. 5 Shock calibration experiment of sensor

信号的时延信号 $\alpha(k-1), \dots, \alpha(k-m)$, 网络输出为 $\alpha_1(k)$, 连接权值为 w'_i , 传感器动态性能补偿模型如下:

$$\alpha_1(k) = w'_0(k)\alpha(k-1) + \dots + w'_{m-1}(k)\alpha(k-m) + w'_m(k)u(k) + \dots + w'_{m+n}(k)u(k-n) \quad (8)$$

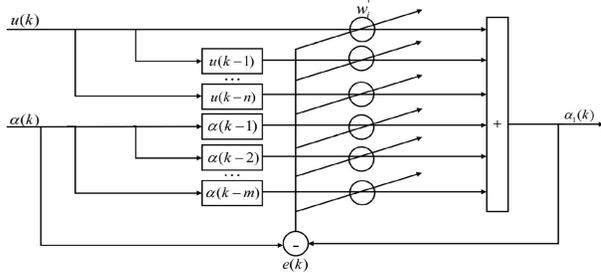


图 6 传感器动态性能补偿网络

Fig. 6 Sensor dynamic performance compensation network

2.3 补偿结果分析

1) 基于 NDE-FLNN 的时域动态性能补偿

为了验证 NDE-FLNN 动态建模效果, 使用该方法建立六维加速度传感器的动态模型。具体流程如下:

Step 1) 根据传感器冲击实验获得的输入输出数据, 每次选择单维分量加速度以及该分量下传感器的输出电压数据(以所有分量对应的第一通道为例)代入程序;

Step 2) 设定优化后的 FLNN 神经网络输入为 $\alpha(k)$ 及 $\alpha(k-1), \alpha(k-2)$ 与 $u(k-1), u(k-2)$, 网络输出为 $u_1(k)$, 初始化连接权值 w_i ;

Step 3) 设定 NDE 算法的搜索上下界为 $[-1, 1]$, 最大迭代次数为 300, 种群数量设定为 50, 变异因子按式 6 自适应更新, 交叉概率 CR 为 0.3;

Step 4) 将网络预测输出 $u_1(k)$ 与传感器输出 $u(k)$ 的均方差作为适应度函数, 计算初代种群个体适应度值;

Step 5) 对种群个体进行改进的变异、交叉及改进的选择操作, 不断迭代更新并计算每一代种群个体适应度值, 达到最大迭代次数为止;

Step 6) 循环结束搜索得到的连接权值即为动态模型

参数, 模型输出为拟合预测的传感器输出电压。

选择六维加速度传感器 x 方向线加速度冲击实验下的数据运行程序, 图 7 显示了网络预测输出与传感器实际输出的均方差 MSE 的迭代训练曲线, 可用该指标来表征动态模型的建模精度。为了评估 NDE-FLNN 的建模效果, 采用 DE-FLNN 进行建模实验并与 NDE-FLNN 的结果进行了对比, 对如表 1 所示。由图 7 及表 1 可知, 提出的 NDE-FLNN 算法能够准确建立传感器的动态模型, 建模精度优于 DE-FLNN 算法。

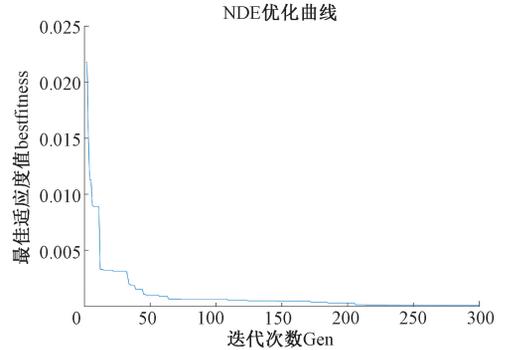


图 7 传感器建模迭代训练曲线

Fig. 7 Iterative training curve for sensor modeling

表 1 各类方法建模结果比较

Table 1 Comparison of modeling results by various methods

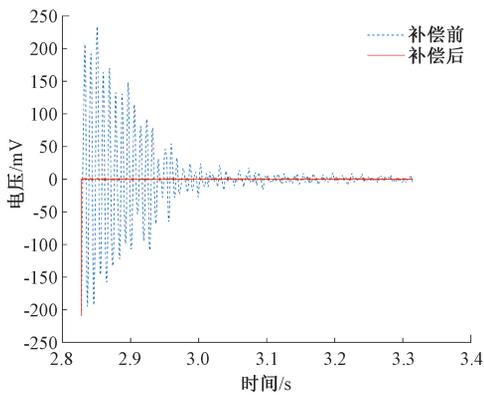
方法	MSE
DE-FLNN	3.745×10^{-5}
NDE-FLNN	3.931×10^{-6}

六维加速度传感器的调节时间体现了传感器的响应速度, 可通过计算补偿前后的调节时间来说明补偿效果。图 8(a)~(f) 表示传感器六维分量下第一通道的输出电压补偿前后的时域曲线图, 表 2 计算对比了传感器各分量第一通道补偿前后的调节时间。从图 8 及表 2 中可看出, 采用 NDE-FLNN 算法对传感器进行动态性能补偿的效果显著, 各分量补偿后的调节时间和响应振荡有效减少, 调节时间均保持在 150 ms 以内, 响应更快达到稳态, 传感器响应速度明显提高, 传感器时域动态性能得到显著提升。

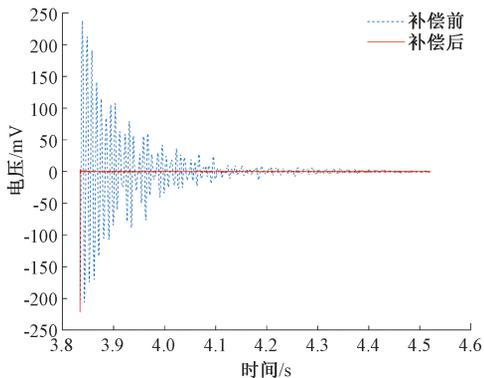
表 2 传感器各分量第一通道补偿前后的调节时间

Table 2 Adjustment time of the first channel compensation for each component of the sensor before and after compensation

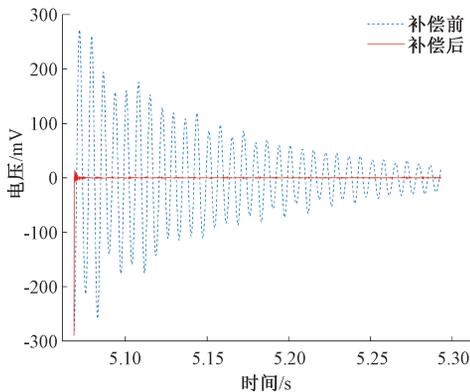
调节时间/ ms	α_x	α_y	α_z	ε_x	ε_y	ε_z
补偿前	275	253	230	207	194	201
补偿后	139	130	119	108	102	104



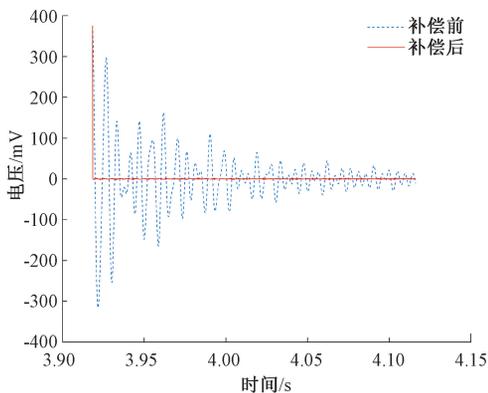
(a) Linear acceleration component in the x-direction



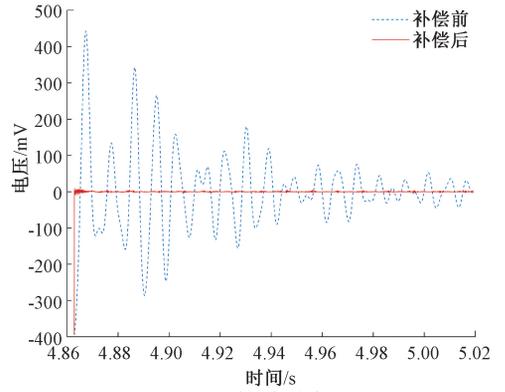
(b) Linear acceleration component in the y-direction



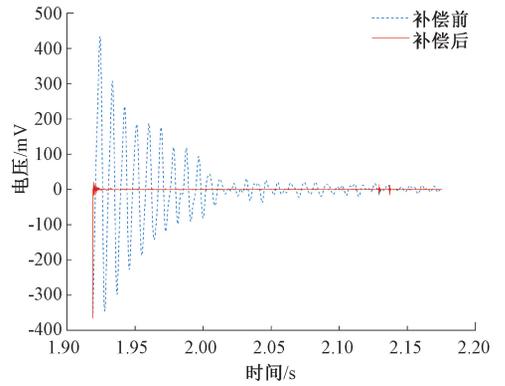
(c) Linear acceleration component in the z-direction



(d) Angular acceleration component in the x-direction



(e) Angular acceleration component in the y-direction



(f) Angular acceleration component in the z-direction

图 8 传感器输出电压补偿前后的时域图

Fig. 8 Time domain diagram of sensor output voltage before and after compensation

2) 基于零极点配置法的频域动态性能补偿

基于 NDE-FLNN 算法对六维加速度传感器进行动态性能补偿有效提升了传感器时域方面的动态性能,而传感器的频域动态性能反映了传感器实际应用中测量信息的响应范围,同样至关重要。现基于零极点配置法,设计传感器各通道动态补偿器,拓展传感器响应范围,从而改善传感器频域动态性能^[19-20]。六维加速度传感器作为二阶系统,s 域连续传递函数为:

$$H(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (9)$$

相比于极点影响,传感器系统动态特性主要受传递函数中极点影响,可通过串接一个二阶补偿器来消除原极点并引入新极点,从而改善传感器动态性能。二阶补偿器主要通过选取 ξ 、 w_n 的值控制引入位置,其表达式如下:

$$C(s) = \frac{(s^2 + \frac{a_1}{a_0} s + \frac{a_2}{a_0}) w_n^2}{(s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2) \frac{a_2}{a_0}} = \frac{B_0 s^2 + B_1 s + B_2}{A_0 s^2 + A_1 s + A_2} \quad (10)$$

式中: $A_0 = 1, A_1 = 2\xi w_n, A_2 = w_n^2, B_0 = \frac{a_0 w_n^2}{a_2}, B_1 = \frac{a_1 w_n^2}{a_2}$,

$B_2 = w_n^2, \xi$ 一般取系统阻尼比为 0.707, w_n 一般取适当高于传感器固有频率的值。

补偿后的传递函数可表示为:

$$H'(s) = H(s) \cdot C(s) \quad (11)$$

六维加速度传感器的工作带宽是体现传感器实际工作性能的最重要指标之一,一般取一阶固有频率的 1/3 左右,该传感器一阶固有振型表现为 x, y 方向平动^[21],现选择传感器 x 方向线加速度标定下的数据基于零极点配置法进行补偿,以此提升传感器工作带宽。传感器某一分量下的六个通道数据描绘的频域曲线大体一致,现以传感器 x 方向线加速度分量下 α_x 的第一通道为例,根据该方法建立的传感器二阶补偿器模型以及补偿后的传递函数如下:

$$C_1(s) = \frac{13.4s^2 + 3\,048s + 4e^6}{s^2 + 2\,800s + 4e^6} \quad (12)$$

$$H'_1(s) = \frac{2\,208s - 4.005e^6}{s^2 + 2\,800s + 4e^6} \quad (13)$$

图 9 所示为六维加速度传感器 α_x 分量下的第一通道补偿前后的幅频特性曲线,得出传感器该通道补偿前工作带宽为 22 Hz,补偿后的工作频率拓展至 84 Hz,这表明基于零极点配置法可以有效拓展传感器工作带宽,提升传感器频域方面的动态性能。

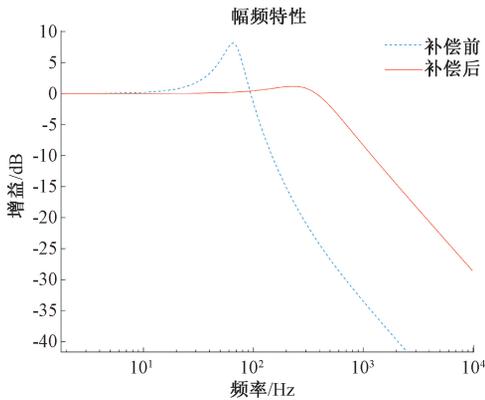


图 9 第一通道补偿前后的幅频特性曲线

Fig. 9 Amplitude frequency characteristic curve of the first channel before and after compensation

综上所述,基于 NDE-FLNN 算法可以建立高精度表征六维加速度传感器动态性能的动态模型,使用该算法对传感器时域动态性能进行补偿后,各分量的调节时间减少至原先一半左右,均在 150 ms 以内,有效提高了传感器的响应速度。基于零极点配置法对传感器频域动态性能进行补偿后,传感器工作带宽由 22 Hz 拓展至 84 Hz,增大了传感器的响应范围。由此可知,基于这两

种方法对六维加速度传感器进行动态性能补偿,能够显著提升传感器时、频域方面的动态性能。

3 结 论

针对六维加速度传感器测量六维信息时响应速度慢、响应范围窄等动态性能差的问题,开展了传感器时频域动态性能补偿研究。采用差分方程建立传感器动态模型,基于 NDE-FLNN 算法辨识动态模型参数,并提出补偿模型来提升传感器时域动态性能,各分量补偿后调节时间减少至原先一半左右,均在 150 ms 以内。基于零极点配置法,设计传感器各通道动态补偿器,改善传感器频域动态性能,补偿后传感器工作带宽由 22 Hz 拓展至 84 Hz。综上所述,这两种方法显著提升了传感器时频域的动态性能,为六维加速度传感器进一步的敏锐、宽范围动态测量应用奠定理论基础。

参考文献

- [1] WANG J, LIU X, LIU F, et al. The great wall vibration monitoring of traffic and natural hazards using MEMS accelerometers[J]. Sensors, 2023, 23(4): 1-11.
 - [2] GHASEMZADEH V, AREFI M M. Design modeling and simulation of an INS system using an asymmetric structure of six accelerometers and its error analysis in the ECEF frame[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2017, 231(13): 2345-2361.
 - [3] LIU T ZH, GOU G Y, GAO F P, et al. Multichannel flexible pulse perception array for intelligent disease diagnosis system [J]. ACS Nano, 2023, 17(6): 5673-5685.
 - [4] MCMORRAN D, SAMARASINGHE S K, MURADOGLU M, et al. Sensor and actuator simulation training system for enroute intravenous procedure [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 680-687.
 - [5] HU J H, QIU Y, WANG X ER, et al. Flexible six-dimensional force sensor inspired by the tenon-and-mortise structure of ancient Chinese architecture for orthodontics[J]. Nano Energy, 2022, 96: 107073.
 - [6] 姬莉霞, 马建红. 一种非线性动态的传感器建模算法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(6): 370-373.
- JI L X, MA J H. A sensor modeling algorithm for nonlinear dynamics [J]. Computer Simulation, 2013, 30(6): 370-373.

- [7] WANG ZH Y, LI Q, WANG ZH R, et al. Novel method for processing the dynamic calibration signal of pressure sensor[J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 17748-17766.
- [8] 付立悦. 多维力传感器的静态性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- FU L Y. Research on static and dynamic performance of multi-dimensional force sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [9] 朱同宝. 压电式六维加速度传感器动态解耦方法与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- ZHU T B. Dynamic decoupling method and experimental study of piezoelectric six dimensional acceleration sensor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [10] LAI ZH CH, OUYANG ZH J, ZHONG SH C, et al. Dynamic characterization of optical coherence-based displacement-type weight sensor [J]. *Sensors*, 2023, 23(21): 8911.
- [11] GU T W, YUAN SH J, GU L, et al. Research on dynamic calibration and compensation method of strain-gauge type force sensor [J]. *Sensor Review*, 2024, 44(1): 68-80.
- [12] 郝喆, 于春战, 张佳林, 等. 基于 SSA-GB-ELM 的并联式六维加速度传感器非线性解耦[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(10): 106-114.
- HAO ZH, YU CH ZH, ZH J L, et al. Nonlinear decoupling of parallel six dimensional acceleration sensor based on SSA-GB-ELM [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(10): 106-114.
- [13] 徐桂林, 黄彦, 孙振庭. 基于函数链神经网络的智能传感器非线性校正方法[J]. *气象水文海洋仪器*, 2021, 38(1): 20-22, 50.
- XU G L, HUANG Y, SUN ZH T. A nonlinear correction method for smart sensors based on function chain neural network [J]. *Meteorological Hydrological and Oceanographic Instrumentation*, 2021, 38(1): 20-22, 50.
- [14] ROUT N K, DAS D P, PANDA G. Particle swarm optimization based nonlinear active noise control under saturation nonlinearity [J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 41: 275-289.
- [15] 简兆圣, 艾剑良. 差分进化算法在气动力参数辨识中的应用[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2017, 56(5): 545-550.
- JIAN ZH SH, AI J L. Application of differential evolutionary algorithm in aerodynamic parameter identification [J]. *Journal of Fudan (Natural Science Edition)*, 2017, 56(5): 545-550.
- [16] 高源蓬, 张泉, 李清灵, 等. 压电陶瓷执行器迟滞非线性补偿与最优控制[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(8): 163-172.
- GAO Y P, ZHANG Q, LI Q L, et al. Hysteresis nonlinearity compensation and optimal control of piezoelectric ceramic actuator [J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, 43(8): 163-172.
- [17] ZHOU T, HU ZH B, SU Q H, et al. A clustering differential evolution algorithm with neighborhood-based dual mutation operator for multimodal multiobjective optimization[J]. *Expert Systems with Application*, 2023, 216(4): 119438. 1-119438. 18:119438.
- [18] 于梅, 胡红波, 左爱斌, 等. 新一代冲击加速度国家基准装置的研究与建立 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(10): 124-129.
- YU M, HU H B, ZUO AI B, et al. Research and establishment of a new generation of national reference device for shock acceleration [J]. *Vibration and Shock*, 2013, 32(10): 124-129.
- [19] 吴义平, 徐科军, 杨双龙. 应变天平自适应零极点配置动态补偿方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(8): 857-864.
- WU Y P, XU K J, YANG SH L. Dynamic compensation method for adaptive zero-pole configuration of strain balance [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(8): 857-864.
- [20] 杨文杰, 张志杰, 赵晨阳, 等. 基于零极点配置理论的压力传感器动态特性补偿 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(2): 78-82, 99.
- YANG W J, ZHANG ZH J, ZHAO CH Y, et al. Compensation of dynamic characteristics of pressure sensors based on zero-pole configuration theory [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(2): 78-82, 99.
- [21] 于春战, 刘晋浩, 孙治博. 基于 Kane 方法的并联式六维加速度传感器动态特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(7): 1611-1617.

YU CH ZH, LIU J H, SUN ZH B. Dynamic characterization of parallel six dimensional acceleration sensor based on Kane method [J]. Journal of Instrumentation, 2015, 36(7): 1611-1617.

作者简介



郝喆, 2021 年于北京林业大学获得学士学位, 2024 年于北京林业大学获得硕士学位, 主要研究方向为并联式六维加速度传感器。

E-mail: 1196611832@qq.com

Hao Zhe received his B. Sc. degree from Beijing Forestry University in 2021 and M. Sc. degree from Beijing Forestry University in 2024. His main research interest includes parallel six dimensional acceleration sensor.



于春战(通信作者), 1997 年于山东工程学院获得学士学位, 2005 年于燕山大学获得硕士学位, 2013 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为北京林业大学副教授。主要研究方向为林业车辆稳定性检测和失稳预警, 并联机器人机构学, 多

维传感器。

E-mail: yczvicky@bjfu.edu.cn

Yu Chunzhan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 1997, M. Sc. degree from Yanshan University in 2005 and Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2013. Now he is an associate professor in Beijing Forestry University. His main research interests include testing and warning on stability of forestry vehicle, parallel robot mechanism and multi-sensors.