

DOI: 10.3901/JME.2022.10.024

基于遗传算法和 Elman 神经网络的接触式 探头动态特性补偿^{*}

程真英 江文姝 方旭 李瑞君 黄强先
(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

摘要: 动态特性不理想是接触式探头系统动态测量误差的重要来源, 严重制约探头测量速度和精度的提升。提出一种基于遗传算法优化 Elman 神经网络的探头动态特性补偿方法。针对微纳米接触式探头, 采用遗传算法优化 Elman 神经网络的方法对其动态响应输出信号进行了补偿, 使用自适应递推最小二乘方法辨识出补偿前后的探头系统动态模型。探头系统的动态测量不确定度由补偿前的 77.8 nm 减小至 12.1 nm。遗传算法具有较好的全局搜索能力, 克服了 Elman 神经网络容易陷入局部极值的缺陷, 该动态补偿方法具有较快的网络训练速度和较高的动态补偿精度。仿真分析及不确定度评定结果都验证了该方法的有效性。

关键词: 接触式探头; 动态补偿; 遗传算法; Elman 神经网络; 测量不确定度

中图分类号: TP212

Dynamic Compensation for Contact Probe Based on Genetic Algorithm and Elman Neural Network

CHENG Zhenying JIANG Wenshu FANG Xu LI Ruijun HUANG Qiangxian

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: The undesired dynamic characteristic is an important source for dynamic measurement errors of contact probe systems, which greatly restricts the improvement of measurement speed and precision. A dynamic compensation method based on genetic algorithm(GA) and Elman neural network(ENN) is presented to compensate the dynamic characteristics of probes. The genetic algorithm is used to optimize the ENN method to dynamically compensate the output signal of dynamic response. The adaptive recursive least-square method is used to identify the dynamic models of the probe system before and after compensation. The dynamic measurement uncertainty of the probe system is reduced from 77.8 nm to 12.1 nm. The global search ability of GA is utilized to overcome ENN's shortcoming of easy convergence to the local extreme values. This method has fast network training speed and high dynamic compensation precision. The effectiveness of this method is verified by the simulation analysis and the uncertainty evaluation results.

Key words: contact probe; dynamic compensation; genetic algorithm; elman neural network; measurement uncertainty

0 前言

为满足微型器件高精度检测需求, 开发了很多微纳米接触式探头^[1-4]。这些探头的静态测量精度大多可以达到纳米级, 但是其动态测量精度只能达到

微米级, 精度和速度不可兼得, 无法满足大批量微型器件的快速检测要求^[5]。因此, 在保证探头静态精度的同时, 需要显著改善探头的动态特性, 提高其动态测量精度。

探头的动态误差和动态特性研究受到了国内外有关专家学者的高度重视。PEREIRA 等^[6]通过试验测试, 建立了扫描探头的动态综合误差修正模型。郭敬滨等^[7]通过试验方法找到了触发式探头动态误差的主要来源, 建立了补偿探头动态误差的模糊神

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51805136)。20210824 收到初稿, 20211109 收到修改稿

神经网络模型。曲颖等^[8]分析了探头的动态误差来源,得出测量速度是影响探头动态误差的主要因素,并用径向基函数(Radial basis function, RBF)神经网络对探头动态误差进行建模。NAWARA 等^[9]给出了在点对点测量模式下扫描探头的动态测试试验结果,将扫描探头模拟成一个受到冲击力激励的机械系统,根据其分析结果,测量力和测量误差随扫描速度的增加而增加。KRAJEWSKI 等^[10-11]用两个标准量块搭建了一个角度可调的动态误差校准装置,让探头以不同速度扫描该装置表面,以辨识不同速度下探头的动态误差。接触式探头在进行测量时,除了受测量速度影响外,探头的动态预行程也会影响其测量精度。LI 等^[12]基于刚体单元模型提出了一种接触式探头动态预行程误差的估计模型,该模型能准确描述探头在测量过程中的动力学效应。LI 等^[13]提出了一种应变式探头的预行程补偿方法,建立了包含触发信号传递误差、触发力误差和重力误差三个误差源的触发探头的力学模型。WOZNIAC 等^[14-15]分析了探头自身的六大主要误差源,建立了预行程误差的三维补偿模型,并进行了试验验证。除了动态预行程之外,动态触发力也是接触式探头动态误差的主要来源之一。ASTON^[16]对探头不同方向上的动态力进行了试验测试与分析,建立了误差补偿模型。WOZNIAC 等^[17-18]通过使用探头对一个连接了力传感器的角度标准件进行扫描测量,分析探头接触力的变化情况,确定探头系统的频率特性。然而,以上这些研究主要侧重于通过测量标准件或标准量来校准探头的动态误差,校准结果会随着所采用的标准件、测量策略和试验条件的不同而变化,无法有效补偿探头的动态误差^[19]。为减小接触式探头的动态误差,改善或补偿探头的动态特性是一种有效可靠的方法。XU 等^[20]提出了通过增加敏感元件的刚度来优化传感器结构,进而改进其动态特性的方法。但同时会导致测量力增大而容易损坏被测件的问题,不适合微纳米测量探头。相比之下,通过在探头系统中串联动态补偿器来完善其动态特性是一种有效且经济的方法。

以自研的微纳米接触式探头为例,提出了采用 Elman 神经网络和遗传算法相结合的动态补偿方法实现探头系统的动态特性补偿。Elman 神经网络能够直接对探头输出数据进行补偿,而不需要预先辨识探头的动态模型,避免了模型辨识误差的影响。但传统的 Elman 模型主要适用于具有周期性和相似性的短期负荷预测,存在着学习速度慢、算法速度慢和收敛于局部极值等问题^[21]。而遗传算法能够求

出优化问题的全局最优解,且具有较强的鲁棒性,适合于求解复杂的优化问题。该方法具有鲁棒性强、补偿效果好、自适应性强等优点,其补偿效果通过一个实际的探头系统进行了验证。

1 动态特性补偿原理和方法

构建探头系统补偿环节的过程相当于对原有系统进行逆建模,即将探头系统的输出信号作为补偿系统的输入信号,将探头系统的输入信号作为补偿系统的期望输出,并使用拟合算法得到补偿系统输入和输出之间的对应关系。其动态补偿原理如图 1 所示,其中 $u(k)$ 为探头系统输入, $z(k)$ 为探头系统输出, $y(k)$ 为补偿后输出。在探头系统后串联动态补偿环节,使得 $y(k)$ 尽量逼近 $u(k)$ 。

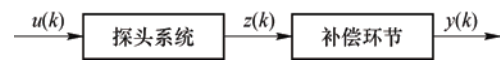


图 1 探头系统动态补偿示意图

以 Elman 神经网络算法构建探头系统的补偿环节。动态补偿时的 Elman 网络结构如图 2 所示, $z(k)=[z_1(k), z_2(k), \dots, z_m(k)]$ 为探头系统输出, $x(k)=[x_1(k), x_2(k), \dots, x_l(k)]$ 为隐含层输出, $c(k)=[c_1(k), c_2(k), \dots, c_l(k)]$ 为承接层输出, $y(k)=[y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k)]$ 为动态补偿后输出, k 为每组数据点数, m 、 n 、 l 分别为输入层、隐含层和输出层节点数。 $w_1(k)$ 、 $w_2(k)$ 、 $w_3(k)$ 分别表示隐含层到承接层、输入层到隐含层、隐含层到输出层的连接权值。使用 Sigmoid 函数作为隐含层神经元的传递函数,使用误差平方和函数 $E(k)$ 作为 Elman 网络的学习目标函数^[22]

$$E(k) = \sum_{i=1}^n [y_i(k) - \tilde{y}_i(k)]^2 \quad (1)$$

式中, $y_i(k)$ 为动态补偿后输出, $\tilde{y}_i(k)$ 为目标输出,一般设定为理想输入信号。

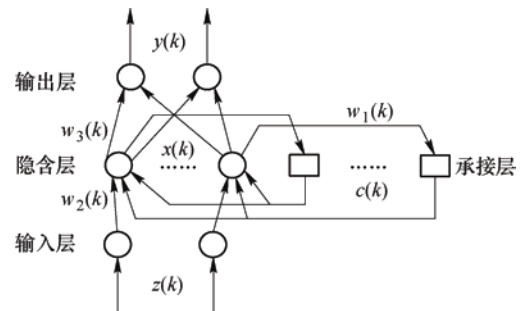


图 2 动态补偿时的 Elman 网络结构

为了进一步改善探头系统动态测量精度和动态

补偿效率,使用遗传算法对 Elman 神经网络的权值和阈值作优化设计,以克服 Elman 神经网络容易收敛于局部极值的问题。遗传算法优化 Elman 神经网络算法流程如图 3 所示,其主要步骤如下。

(1) 对探头输出数据进行归一化处理。

(2) 使用经验公式初拟并结合试凑的方法确定隐含层节点数^[23],经验公式为

$$l = \sqrt{m + n} + \alpha \quad (2)$$

式中, l 为隐含层节点数; m 为输入层节点数; n 为输出层节点数; α 为 1~10 的常数。

(3) 根据 Elman 网络权值阈值的优化目标,适应度函数为输出值与期望值之间的误差平方和的倒数,即

$$f(k) = \frac{1}{E(k)} \quad (3)$$

(4) 初始化进化次数、种群规模、交叉概率以及变异概率。

(5) 对种群进行实数编码。

(6) 循环进行选择操作、交叉操作、变异操作、计算适应度值等步骤,不断产生新的种群,直到达到进化次数,获得最优权值和阈值。

(7) 将得到的最优权值和阈值更新至 Elman 神经网络,并进行网络训练,满足结束条件即终止。

(8) 用探头输出数据测试优化后的 Elman 神经网络,并输出动态补偿结果。

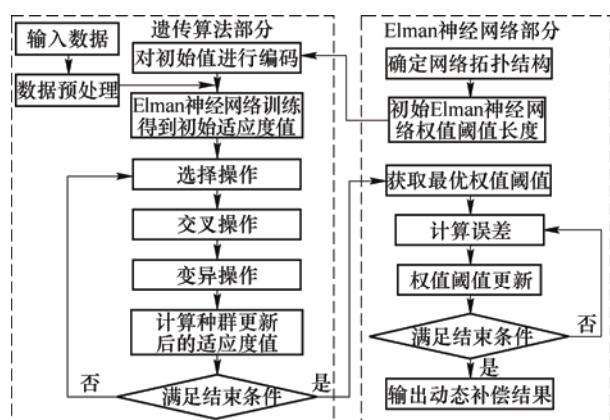


图 3 遗传算法优化 Elman 神经网络算法流程图

2 动态特性补偿试验

在对探头系统进行动态补偿之前,首先获取其动态特性模型,判断其是否满足设计要求。微纳米接触式探头感测原理^[24]及其实物如图 4 所示。根据探头系统的阶跃响应数据对其动态特性进行建模,

试验装置如图 5 所示。采用一个行程为 50 μm 、分辨力为 0.2 nm 的一维纳米定位平台(P-620.1CD)来产生 15 μm 的阶跃响应输出信号,电涡流传感器^[25]作为参考传感器,使用一块 16 位同步采集卡(Keysight 2542A)采集探头和电涡流传感器的输出信号。在相同条件下重复进行 10 次试验。在试验中,设定的采样时间为 4 s,采样间隔为 2.5×10^{-4} s。根据 10 次试验电涡流传感器和探头输出信号的平均值,采用自适应递推最小二乘法对探头系统进行辨识^[26],可以得到探头系统的模型为

$$G(s) = \frac{996\,500}{s^2 + 3.12s + 994\,300} \quad (4)$$

式中, s 为复频率。

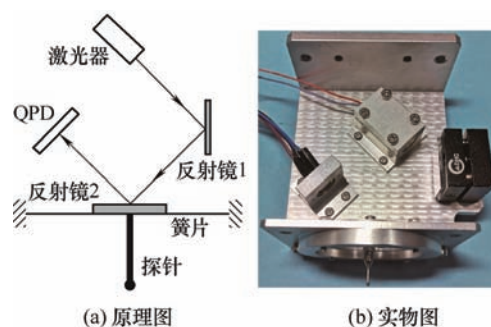


图 4 探头

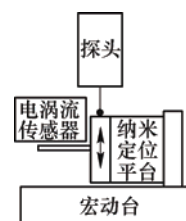


图 5 试验装置示意图

利用辨识得到的探头系统模型可以得出补偿前探头系统的动态特性参数,如表 1 所示,探头阶跃响应的超调量达 99.15%,响应时间约为 2.48 s,导致信号超出探头感测范围,且系统动态过渡时间较长,无法满足探头快速精确测量的要求,动态特性不理想。为了进一步提升探头的测量效率,并减小测量误差,采用基于遗传算法优化 Elman 神经网络的方法对探头动态特性进行了补偿。参照式(2),对比不同隐含层节点数时的仿真误差,选择最优的动态补偿结果对应的参数,确定了隐含层节点数为 1,故网络拓扑结构为 1-1-1。设置遗传算法初始种群为 20,遗传代数 60 代,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.01。经过 37 次迭代后,测试样本的仿真误差趋于稳定,进化过程如图 6 所示,均方误差 $E(k)$ 达到 1.8×10^{-4} 。

探头系统动态补偿前后的阶跃响应输出如图 7 所示 (“基于遗传算法优化 Elman 神经网络的动态补偿”简称“GA-Elm 补偿”)。从图 7 可以看出 0~4 s 内探头系统补偿前的阶跃响应输出振荡幅度较大, 输出信号极不稳定, 而补偿后的输出信号振荡幅度明显减小。因此, GA-Elm 补偿方法有效提升了探头系统的动态特性。使用自适应递推最小二乘算法对 GA-Elm 补偿后的动态模型进行辨识, 得出补偿后探头系统的模型为

$$G(s) = \frac{1.276 \times 10^6}{s^2 + 226.2s + 1.275 \times 10^6} \quad (5)$$

根据式(5)所示探头系统动态补偿后的模型, 可以得到补偿后探头系统的动态特性参数, 如表 1 所示。经过 GA-Elm 补偿后, 探头系统阶跃响应输出的超调量和响应时间有大幅度地减小, 系统的动态特性得到了较大的改善。

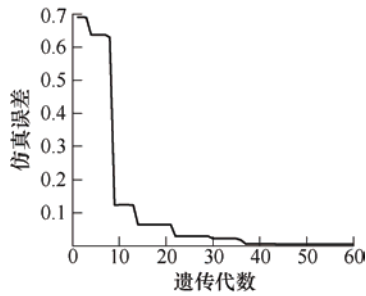


图 6 进化过程

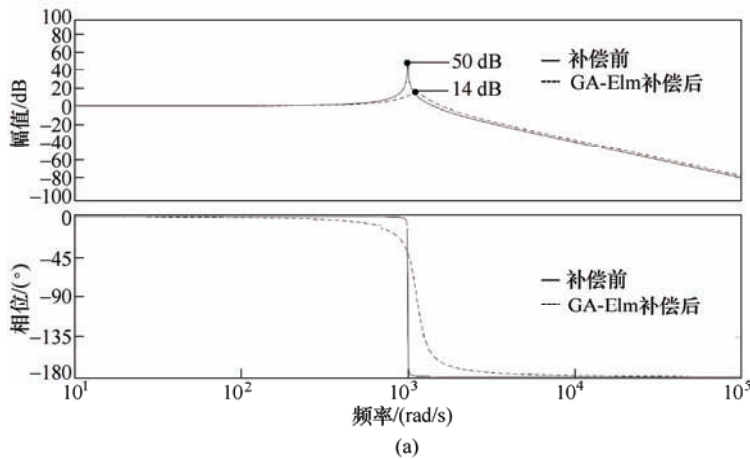


图 8 探头补偿前后频率响应特性曲线

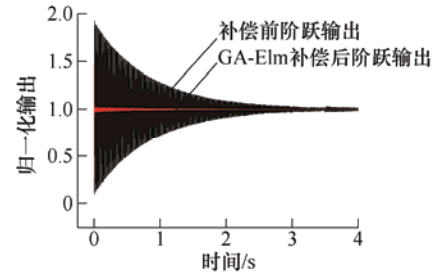
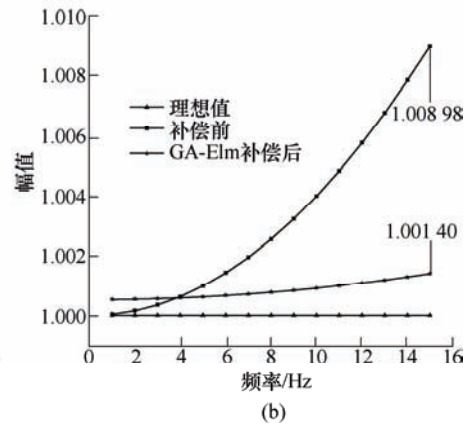


图 7 探头阶跃输出补偿结果

表 1 补偿前后探头动态特性参数比较

动态特性参数	动态补偿前	GA-Elm 补偿后
上升时间 t_r/s	0.001 6	0.002 3
峰值时间 t_p/s	0.003 3	0.003 0
响应时间 t_s/s	2.482 5	0.004 3
超调量 $\sigma_p(\%)$	99.15	7.45

根据式(4)、(5)所示探头系统动态补偿前后的模型, 使用 Matlab 软件仿真可以得到探头补偿前后频率响应特性曲线, 如图 8a 所示, 探头补偿前的最大振荡幅值为 50 dB, 而补偿后的最大振荡幅值为 14 dB, 且拓宽了工作频带。由探头系统的固有频率约为 158 Hz, 取其 10% 作为工作频带^[27]。在工作频带内的理想幅频特性、补偿前和 GA-Elm 补偿后的幅频特性如图 8b 所示, 补偿后探头系统在工作频带范围内的幅值误差降低了约 84%。



3 不确定度分析与评定

3.1 动态特性不理想引起的不确定度评定

3.1.1 动态不确定度评定过程

探头系统的动态不确定度是由探头系统的频率响应特性 $G(j\omega)$ 与理想系统 $H(j\omega)$ 在幅值和相位上的

偏差 $\Delta H(j\omega)$ 引起的, 可以通过分析其幅频特性和相频特性来获得其动态不确定度^[28]。

$$\Delta H(j\omega) = G(j\omega) - H(j\omega) \quad (6)$$

为计算 $\Delta H(j\omega)$, 设定理想系统的幅频特性为一个恒定值, 相频特性为从 0 Hz 起的一条拟合直线, 使各频率分量的延迟时间成严格的线性关系。理想

系统的频率响应函数可表示为

$$H(j\omega) = K_0 \exp[j\varphi_0(\omega)] \quad (7)$$

式中, K_0 是理想系统自 0 Hz 起至整个工作频段的幅频特性, 归一化后 $K_0=1$; $\varphi_0(\omega)$ 是理想系统在工作频段的线性相角。

探头系统的实际频率特性可以由系统辨识得到

$$G(j\omega) = K_r(\omega) \exp[j\varphi_r(\omega)] \quad (8)$$

式中, $K_r(\omega)$ 是探头系统的幅频特性, $K_r(\omega) = |G(j\omega)|$; $\varphi_r(\omega)$ 是探头系统的相频特性。探头系统的频率特性与理想系统的频率特性的差值为

$$\Delta K(\omega) = K_r(\omega) - K_0 \quad (9)$$

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_r(\omega) - \varphi_0(\omega) \quad (10)$$

在 Nyquist 图上, $G(j\omega)$ 和 $H(j\omega)$ 是两个幅值分别为 $K_r(\omega)$ 和 K_0 , 夹角为 $\Delta\varphi(\omega)$ 的矢量, 两个矢量尖端的连线就是实际系统与理想系统的差值 $\Delta H(j\omega)$, 根据余弦定理可得

$$|\Delta H(j\omega)|^2 = K_r(\omega)^2 + K_0^2 - 2K_r(\omega)K_0 \cos[\Delta\varphi(\omega)] \quad (11)$$

式中, $|\Delta H(j\omega)|$ 即为频率响应特性偏差的模。

得到各个频率 ω 的 $|\Delta H(j\omega)|$ 后, 探头系统动态响应误差的最大值可表示为

$$e_{\max} = d \cdot |\Delta H(j\omega)|_{\max} \quad (12)$$

式中, d 是探头测量范围半宽。由于其一般属于未定系统误差, 假设服从均匀分布, 则探头系统动态响应特性引起的动态不确定度分量为

$$u_d = \frac{e_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

3.1.2 补偿前后探头系统的动态不确定度评定

实现动态不确定度评定的关键是要计算得到工作频带内探头系统动态特性相对于理想系统动态特性的偏差 $|\Delta H(j\omega)|$ 。基于辨识出的探头系统补偿前后的动态模型, 使用 Matlab 软件可得工作频带内探头系统的相频特性, 如图 9 所示。可以看出, 补偿前后探头系统的相频特性曲线在整个工作频带内线性特性理想, 由相位误差引起的系统输出误差可以忽略。因此, 补偿前后探头系统由频率响应特性引起的输出偏差为

$$|\Delta H(j\omega)| = |K_r(\omega) - K_0| \quad (14)$$

已知探头的测量范围为 $\pm 15 \mu\text{m}$, 再根据图 8b 中补偿前后探头系统的幅频特性曲线, 可得到补偿前、后探头系统的最大幅值误差分别为 0.008 98 和 0.001 40, 代入式(12)、(13)即可得探头系统补偿前

后的动态不确定度分别为 $u_{d1}=77.8 \text{ nm}$, $u_{d2}=12.1 \text{ nm}$ 。

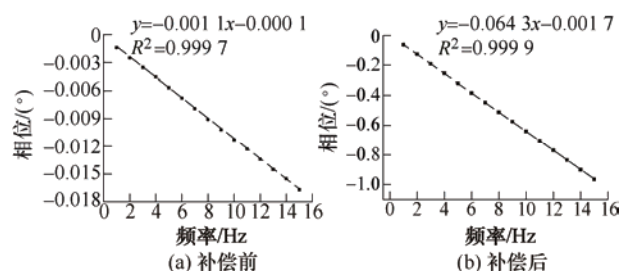


图 9 探头系统相频特性曲线

3.2 静态不确定度评定

根据量值特性分析法^[29]可知, 探头系统的静态不确定度主要来源于示值误差、分辨力、温漂和重复性。本研究所用探头是根据文献[24]中介绍的探头改良而来, 除示值误差外, 获取探头系统其他静态误差参数的试验方案已由文献[24]给出。而探头系统的示值误差可以由量程为 $50 \mu\text{m}$ 、重复性为 1 nm 、分辨力为 0.2 nm 的一维纳米定位平台输出 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 的标准位移量, 通过探头测量范围内 10 次重复试验的平均值与标准量的最大差值计算得到。各静态误差参数的测量结果如表 2 所示。

表 2 探头系统的静态误差参数 nm

名称	示值误差	分辨力	两小时漂移	重复性
值	38.8	13	5	10

由表 2 中的静态误差参数可以得出探头系统的静态不确定度分量, 然后将这些静态不确定度分量合成, 得到探头系统静态不确定度 u_s 为 15.6 nm , 如表 3 所示。

表 3 探头系统静态不确定度分量

来源	最大误差/nm	误差半宽/nm	分布	不确定度/nm
示值误差	38.8	19.4	均匀分布	11.2
分辨力	13	6.5	均匀分布	3.8
漂移	5	2.5	均匀分布	1.4
重复性	—	—	—	10
探头系统静态不确定度合成				15.6

3.3 不确定度合成

将探头的静态不确定度和动态不确定度进行合成, 分别得到了探头系统动态补偿前、后的测量不确定度

$$u_{c1} = \sqrt{u_s^2 + u_{d1}^2} = 79.3 \text{ nm} \quad (15)$$

$$u_{c2} = \sqrt{u_s^2 + u_{d2}^2} = 19.7 \text{ nm} \quad (16)$$

可以看出, 补偿后探头系统的不确定度相较于补偿前明显减小了, 该动态补偿方法能有效补偿探头系统的动态误差, 显著提升探头动态测量精度。

4 结论

为了在提升探头系统测量速度的同时保证其测量精度, 提出了一种基于遗传算法优化 Elman 神经网络的探头动态特性补偿方法, 用遗传算法的全局搜索能力弥补了 Elman 神经网络容易陷入局部极值的缺陷。利用该方法, 将微纳米接触式探头的动态测量精度由补偿前的 77.8 nm 减小至 12.1 nm。该方法具有鲁棒性强、效率高、简单实用等优点, 可以有效减小微纳米接触式探头的动态误差, 也可被用于补偿其他传感器的动态误差。在显著改善系统幅频特性、减小动态误差的同时, 虽然相频特性有所下降, 但由于探头系统工作于中低频, 故其影响非常有限。后续将继续探索其他更有效的低迟滞、高精度探头系统动态特性补偿方法, 并有针对性地对探头内部结构进行分析、建模与优化, 进一步提高探头系统的测量速度和动态测量精度。

参 考 文 献

- [1] PEINER E, BALKE M, DOERING L, et al. Tactile probes for dimensional metrology with microcomponents at nanometre resolution[J]. *Measurement Science & Technology*, 2008, 19(6): 64001.
- [2] KUNG A, MELI F, THALMANN R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(2): 319-327.
- [3] LIU Fangfang, FEI Yetai, XIA Haojie, et al. A new micro/nano displacement measurement method based on a double-fiber Bragg grating (FBG) sensing structure[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(5).
- [4] 李志渤, 黄强先, 史科迪, 等. 基于 PVDF 的三维纳米谐振触发测头及定位系统[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(2): 1-6.
LI Zhibo, HUANG Qiangxian, SHI Kedi, et al. Three-dimensional nano resonant trigger probe and positioning system based on PVDF film[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(2): 1-6.
- [5] WANG Dongxia, SONG Aiguo, WEN Xiulan, et al. Measurement uncertainty evaluation of conicity error inspected on CMM[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(1): 212-218.
- [6] PEREIRA P, HOCKEN R. Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine[J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(1): 22-32.
- [7] 郭敬滨, 丁航, 李醒飞, 等. 基于模糊神经网络的接触式测头动态误差补偿[J]. *纳米技术与精密工程*, 2016, 14(4): 278-282.
GUO Jingbin, DING Hang, LI Xingfei, et al. Dynamic error compensation of touch probe based on fuzzy neural network[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(4): 278-282.
- [8] 曲颖, 罗哉, 陆艺, 等. 基于 RBF 神经网络的坐标测量机接触式测头动态误差建模研究[J]. *计量学报*, 2011, 32(5): 413-418.
QU Ying, LUO Zai, LU Yi, et al. Research on dynamic error modeling of contact probe of coordinate measuring machine based on RBF neural network[J]. *Acta Metrology*, 2011, 32(5): 413-418.
- [9] NAWARA L, KOWALSKI M. The investigations on selected dynamical phenomena in the heads of multi-coordinate measuring devices[J]. *CIRP Annals*, 1984, 33(1): 373-375.
- [10] KRAJEWSKI G, WOZNIAK A. Simple master artefact for CMM dynamic error identification[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(1): 64-70.
- [11] ALI S. Probing system characteristics in coordinate metrology[J]. *Measurement Science Review*, 2010, 10(4): 120-129.
- [12] LI Yamin, ZENG Long, TANG Kai, et al. A dynamic pre-travel error prediction model for the kinematic touch trigger probe[J]. *Measurement*, 2019, 146: 689-704.
- [13] LI Simi, ZENG Long, FENG Pingfa, et al. An accurate probe pre-travel error compensation model for five-axis on-machine inspection system[J]. *Precision Engineering*, 2020, 62: 256-264.
- [14] WOZNIAK A, DOBOSZ M. Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part I: 3D theoretical model of probe pretravel[J]. *Measurement*, 2003, 34(4): 273-286.
- [15] JANKOWSKI M, WOZNIAK A. Mechanical model of errors of probes for numerical controlled machine tools[J]. *Measurement*, 2016, 77: 317-326.
- [16] ASTON R, DAVIS J, STOUT K. Forced touch-down: A customer's further examination of a touch trigger probe[J]. *International Journal of Machine Tools and*

- Manufacture, 1997, 37(10): 1383-1392.
- [17] WOZNIAK A, JANKOWSKI M. Random and systematic errors share in total error of probes for CNC machine tools[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018, 2(1): 17.
- [18] WOZNIAK A, KRAJEWSKI G, BYSZEWSKI M. A new method for examining the dynamic performance of coordinate measuring machines[J]. Measurement, 2019, 134: 814-819.
- [19] CHEN Ziran, LIU Xiaokang, PENG Kai, et al. A self-adaptive interpolation method for sinusoidal sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7675-7682.
- [20] XU An, XIE Zhuangning, GU Ming, et al. A new method for dynamic parameters identification of a model-balance system in high-frequency force-balance wind tunnel tests[J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(5): 2609-2623.
- [21] WANG Yingmin, ZHANG Fujun, CUI Tao, et al. Fault diagnosis for manifold absolute pressure sensor(MAP) of diesel engine based on elman neural network observer[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 386-395.
- [22] 张健美, 周步祥, 林楠, 等. 灰色 Elman 神经网络的电网中长期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 145-149.
- ZHANG Jianmei, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Gray elman neural network for mid- and long-term load forecasting of power grids[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2013, 25(4): 145-149.
- [23] 李彬, 张云, 王立平, 等. 基于遗传算法优化小波神经网络数控机床热误差建模[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 215-220.
- LI Bin, ZHANG Yun, WANG Liping, et al. Modeling for CNC machine tool thermal error based on genetic algorithm optimization wavelet neural networks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 215-220.
- [24] LI Ruijun, XIANG Meng, HE Yaxiong, et al. Development of a high-precision touch-trigger probe using a single sensor[J]. Applied Sciences, 2016, 6(3): 86.
- [25] WANG Hongbo, FENG Zhihua. Ultrastable and highly sensitive eddy current displacement sensor using self-temperature compensation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 203: 362-368.
- [26] CHENG Zhenying, JIANG Wenshu, LEI Yingjun, et al. Uncertainty evaluation for dynamic identification of a micro contact probe based on signal transmission chain analysis method[J]. Measurement Science and Technology, 2020(31): 125007.
- [27] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- HUANG Junqin. Test system dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.
- [28] 祖静, 马铁华, 裴东兴, 等. 新概念动态测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- ZU Jing, MA Tiehua, PEI Dongxing, et al. Dynamic testing of new concepts[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [29] 李红莉. CMM 尺寸测量不确定度模型与评定方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- LI Hongli. CMM size measurement uncertainty model and evaluation method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
-
- 作者简介: 程真英(通信作者), 女, 1980 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为仪器精度理论及其应用。
E-mail: chengzhenying01@hfut.edu.cn
- 江文姝, 女, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为动态误差建模与补偿。
E-mail: 2019110028@mail.hfut.edu.cn