

文章编号 1004-924X(2026)18-2844-14

高温压电式力传感器的动力学建模与实验研究

王桂从^{1,2}, 甄子锐¹, 陈茹琳¹, 穆超强¹, 李映君^{1,2*}, 李宏宇¹

(1. 济南大学 机械工程学院, 山东 济南 250022;

2. 山东省传感器技术与高精度衡器重点实验室, 山东 济南 250004)

摘要:针对传统测力传感器在高温工况动态力监测中普遍存在的测量精度不足与高温稳定性弱的问题,研发了一款适配常温至 350 °C 中高温工况、具备优秀动态响应能力的新型压电式力传感器,并提出一种融合单因素敏感性分析-非线性回归建模-爱情进化算法参数优化的传感器设计方法。通过机理建模方法构建传感器质量-刚度-阻尼集中参数动力学模型,采用控制变量法筛选出影响固有频率的 5 项核心参数,结合逐步回归法建立含交互项与高次项的高精度非线性回归模型。以最大化固有频率为优化目标,采用爱情进化算法完成传感器结构优化。搭建高温动态性能测试系统,对所研制传感器的高温动态性能进行实验测试。结果表明:研制的传感器非线性度为 1.07%,重复性误差为 1.37%,在预设温度范围内,动态灵敏度稳定保持在 30.33 pC/N 以上,温度漂移系数仅为 $-0.014\%/^{\circ}\text{C}$ 。该研究结果可为高温工况用压电式力传感器的结构设计与参数优化提供理论参考。

关键词:高温;压电式力传感器;爱情进化算法;动态力检测;结构优化

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A

doi: 10.3724/OPE.20263418.2844

CSTR: 32169.14.OPE.20263418.2844

Dynamic modeling and experimental study of high-temperature piezoelectric force sensors

WANG Guicong^{1,2}, ZHEN Zirui¹, CHEN Rulin¹, MU Chaoqiang¹, LI Yingjun^{1,2*}, LI Hongyu¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Sensor Technology and High Precision Weighing Instruments, Jinan 250004, China)

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

Abstract: Aiming at the common problems of insufficient measurement accuracy and poor high-temperature stability of traditional force sensors in dynamic force monitoring under high-temperature conditions, a novel piezoelectric force sensor suitable for medium and high-temperature environments ranging from room temperature to 350 °C and featuring excellent dynamic response performance was developed. Meanwhile, a sensor design method integrating single-factor sensitivity analysis, nonlinear regression modeling, and parameter optimization based on the Love Evolutionary Algorithm (LEA) was proposed. A lumped-parameter dynamic model of the sensor considering mass, stiffness and damping was established via mecha-

收稿日期: 2026-05-16; 修订日期: 2026-07-07.

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 (No. 2024TSGC0966); 山东省自然科学基金项目 (No. ZR2023ME109); 济南市“新高校 20 条”科研带头人工作资助项目 (No. 202228116)

nism modeling. Five core parameters affecting the natural frequency were screened out using the control variable method, and a high-precision nonlinear regression model with interaction terms and higher-order terms was constructed in combination with stepwise regression. Taking the maximization of natural frequency as the optimization objective, the structural optimization of the sensor was completed using the Love Evolutionary Algorithm. A high-temperature dynamic performance test system was built to experimentally evaluate the dynamic characteristics of the developed sensor at elevated temperatures. The results show that the nonlinearity of the sensor is 1.07%, and the repeatability error is 1.37%. Within the preset temperature range, its dynamic sensitivity remains stable above 30.33 pC/N, and the temperature drift coefficient is only $-0.014\%/^{\circ}\text{C}$. The research results can provide a theoretical reference for the structural design and parameter optimization of piezoelectric force sensors used in high-temperature working conditions.

Key words: high temperature; piezoelectric force sensor; love evolution algorithm; dynamic force detection; structural optimization

1 引 言

高温压电式力传感器在机械制造、航空航天、能源动力等领域应用广泛,以机械加工高温工况为例,加工过程中产生的瞬时冲击作用力可达数千牛顿^[1],核心受力部件温度通常在 $200\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2-3]。目前能够满足此类高温工况动态力高精度测量的传感器市场主要由国外企业主导,如瑞士奇石乐等品牌凭借其成熟的技术积累,在高温动态力传感领域占据优势地位^[4],国内相关产品在高温稳定性与动态响应性能方面仍存在差距。

持续高温环境中,电阻应变式压力传感器虽可通过组桥实现温度补偿^[5],但应变片基底与弹性体间的热膨胀失配仍会引发显著灵敏度漂移^[6],产生虚假信号,致使高温环境下测量精度大幅降低。同时,该类传感器固有频率低、响应速度慢,无法满足高温动态力实时、精准、可靠的测量需求^[7]。压电式力传感器凭借压电材料优异的高温稳定性与高频响应特性,成为高温动态力测量领域的理想选择。该类传感器基于压电效应工作,相较于传统传感器,压电式高温传感器依托材料本征电荷输出特性展现出显著优势,同时兼具固有频率高、动态响应快、线性度优等特点,是高温工况下动态力监测的优选技术方案^[8]。近年来,国内外针对高温压电传感器的研究多聚焦于耐高温压电材料研发与高温压电加速度传感器设计领域。Kim K^[9]等人采用 $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ 单

晶(YCOB)设计制作剪切型压电加速度计,用于高温振动传感,样机在测试频率、温度和加速度范围内灵敏度为 $5.9\pm 0.06\text{ pC/g}$,但 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温过程中,灵敏度降至初始值的 72%。梁晓瑞等^[10]以硅酸镓钽(LGS)制备声表面波(SAW)高温压力传感器,针对 LGS 硬脆性难加工的特性研发其微结构加工技术,所制样机可在 $25\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\sim 500\text{ kPa}$ 环境下稳定工作,验证了该加工技术在高温恶劣环境下的应用可行性。李强^[11]等人为了提高碳化硅(SiC)动态高温压力传感器的灵敏度,采用 p 型 SiC 材料,同时对传感器的敏感单元的不同结构进行了静力学仿真与分析,结果表明优化后的传感器 $100\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内非线性误差小于 1.53%,但其固有频率偏低,高温稳定性仍然不足。纵观现有成果,行业研究重心仍偏向高温压电加速度传感器及配套耐高温压电材料,专门针对高温压电式力传感器的系统性研究较为匮乏。

综上所述,现有高温压电传感器研究多集中于耐高温压电材料、高温加速度传感器及压力传感器,针对高温动态力测量场景下传感器结构参数建模、优化设计及高温标定验证的系统研究仍相对不足。如何保障传感器在持续高温环境下稳定、精准地捕捉动态力,仍是行业亟待解决的核心难题^[12]。为攻克这一技术挑战,拟采用机理建模方法构建传感器质量-刚度-阻尼集中参数动力学模型,借助控制变量法筛选影响固有频率的核心参数,并结合逐步回归法建立含交互项与高

次项的高精度非线性回归模型。以最大化固有频率为优化目标,采用爱情进化算法(Love Evolution Algorithm, LEA)开展核心结构参数优化设计。依据优化结果试制传感器样机,搭建高温动态性能测试系统并完成性能验证实验,研制出了一款新型高温压电式力传感器。

2 传感器结构与模型建立

2.1 传感器结构设计

传感器的结构设计是影响其力学测量性能的关键因素^[13],该因素不仅作用于压电灵敏度等静态表征参数,同时决定传感器固有频率等核心动态特性。综合压电转换效率、高温工况服役要求,设计了由壳体、调整块、氧化铝绝缘陶瓷、金属铂电极片和高温压电陶瓷构成的高温压电式力传感器结构,具体结构如图 1 所示。

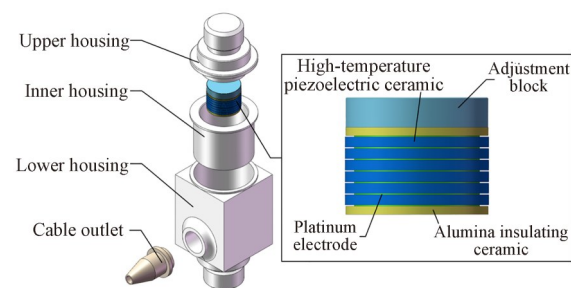


图 1 传感器结构
Fig. 1 Sensor structure

上壳体实现压电陶瓷组件的封装集成,并将外部载荷传递至压电陶瓷组,下壳体用于压电陶瓷组及其他传感器组件的装配承载,内壳体主要起到支撑和保护力敏元件的作用。壳体零件均采用 316L 不锈钢材料。调整块由耐高温氧化铝绝缘陶瓷制备,用于消除装配误差导致的压电陶瓷组与上壳体之间的间隙,保证传感器灵敏度稳定。压电陶瓷组主要由氧化铝绝缘陶瓷片、金属铂电极片及高温压电陶瓷片构成。氧化铝绝缘陶瓷片实现压电陶瓷组与壳体间的电气隔离,防止电荷泄漏造成信号衰减。高温压电陶瓷片基于正压电效应将外部载荷转换为电荷信号,实现载荷定量检测。金属铂电极片高效采集电荷信号并完成向外传输。绝缘陶瓷与电极材料均具备优异耐高温性能,使用温度可达 600 ℃^[14]以上。

结合传感器实际安装空间要求,压电陶瓷、绝缘片、调整块、电极片及壳体核心结构的适配尺寸参数如表 1 所示。

表 1 传感器零件尺寸参数表

Tab. 1 Dimensional parameters of sensor components

Dimensional parameter	Value/mm
Piezoelectric ceramic thickness h_1	0.5
Insulating sheet thickness h_2	0.45
Adjustment block thickness h_3	1.5
Electrode plate thickness h_4	0.1
Piezoelectric ceramic outer diameter r_1	5.2
Piezoelectric ceramic inner diameter r_2	2.0
Adjustment block radius r_3	5.5
Upper housing load-sharing radius r_4	6.0

2.2 传感器动力学模型建立

高温压电式力传感器的测量对象为动态力,其动态性能主要体现在动态响应能力和测量精度两个方面。固有频率是衡量传感器动态响应能力的重要指标,直接影响其对高频动态力的跟随能力及测量过程中的信号失真程度。当传感器固有频率显著高于被测动态力的主频时,可避免共振现象引发的测量误差,保障信号传输的真实性与响应时效性。

为精准求解传感器固有频率、揭示其动力学响应规律,采用机理建模方法构建传感器动力学模型^[16]。对传感器整体结构进行简化,将核心部件等效为集中质量单元,将弹性变形特性等效为刚度元件。等效质量根据各零部件材料密度和几何尺寸计算获得。等效刚度结合轴向载荷传递路径、材料弹性模量、受力截面积和等效变形长度确定。接触和装配连接区域根据主要受力方向进行等效简化,以反映传感器轴向动态载荷传递特性。明确各等效单元的力学边界条件,梳理外部载荷传递路径与内部力学作用机制。构建典型的质量-刚度-阻尼集中参数力学系统,反映传感器在动态载荷作用下的振动特性与能量传递规律,其结构示意图如图 2。

图中, k_D, c_D, m_D, x_D 分别为上壳体上端的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_{b1}, c_{b1} ,

m_x, x_x 分别为上壳体与分载结构接触部位的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_0, c_0, m_0, x_0 分别为上壳体分载部位的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_5, c_5, m_5, x_5 分别为调整块接触部位的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_2, c_2, m_2, x_2 分别为氧化铝绝缘陶瓷片组合体的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_3, c_3, m_3, x_3 分别为金属铂电极片组合体的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_4, c_4, m_4, x_4 分别为高温压电陶瓷组合体的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 $k_{12}, c_{12}, m_{12}, x_{12}$ 分别为下壳体剩余结构的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_7, c_7, m_7, x_7 分别为下壳体与内壳体接触部位的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 K_d, c_d, m_d, x_d 分别为下壳体底座部位的等效刚度、等效阻尼系数、等效质量与位移。 k_{a1}, c_{a1} 分别为上、下、内壳体接触部位的等效刚度、等效阻尼系数。

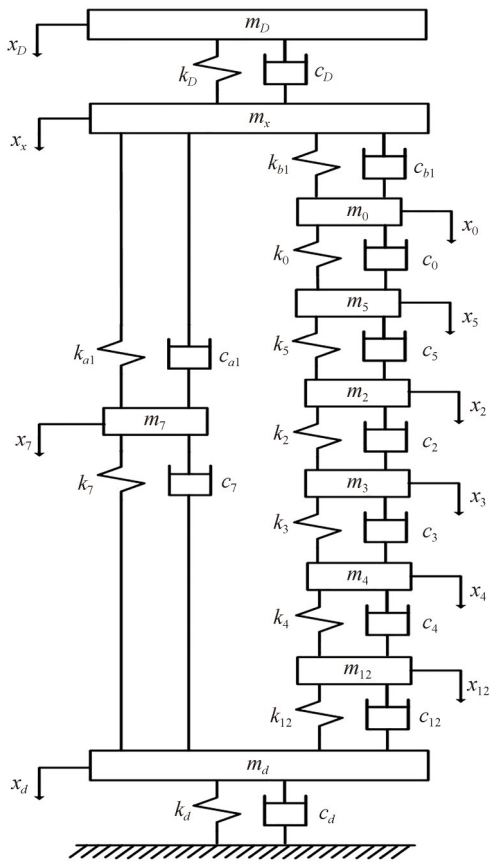


图2 传感器动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of the sensor

该动力学模型为包含惯性质量 M 、刚度 K 与阻尼 C 三要素的集中参数振动系统,其动力学控制微分方程如式(1)所示:

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [f(t)], \quad (1)$$

其中: $[M]$ 为传感器质量矩阵, $[C]$ 为传感器阻尼矩阵, $[K]$ 为传感器刚度矩阵。传感器壳体材料为 316L 不锈钢,其阻尼比 ζ 取值范围为 0.002~0.008,属于低阻尼材料。从振动理论可知,阻尼的核心作用是改变系统振动幅值与衰减特性,对固有频率的影响。

$$[M][\ddot{X}] + [K][X] = [0]. \quad (2)$$

设动力学模型中振子的位移函数为:

$$X = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

其中: A 为振幅, ω 为无阻尼固有频率, φ 为相角。代入位移方程,传感器系统的振幅 A 不能为 0,当系统处于固有频率时,振动系统运动方程的系数行列式满足:

$$|[K] - \omega_n^2[M]| = 0. \quad (4)$$

展开可得:

$$\begin{vmatrix} m_{11}\omega_i^2 - k_{11} & m_{12}\omega_i^2 - k_{12} & \cdots & m_{1n}\omega_i^2 - k_{1n} \\ m_{22}\omega_i^2 - k_{22} & m_{21}\omega_i^2 - k_{21} & \cdots & m_{2n}\omega_i^2 - k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{nn}\omega_i^2 - k_{nn} & m_{n2}\omega_i^2 - k_{n2} & \cdots & m_{nn}\omega_i^2 - k_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (5)$$

展开行列式后为一关于 ω_i^2 的 n 阶方程,对该特征方程进行求解,得到表征系统振动特征的若干实根 ω_n , ω_n 绝对值中的最小值为系统的一阶角频率,该参数直接反映传感器对动态力的跟随能力与共振规避能力。将所求得的一阶角频率除以 2π ,得到传感器的固有频率。

2.3 尺寸参数变化对传感器固有频率的影响

各尺寸参数的微小波动均会对传感器力学特性产生显著影响^[18]。针对传感器的压电陶瓷厚度 h_1 、氧化铝绝缘片厚度 h_2 、调整块厚度 h_3 、金属铂电极片厚度 h_4 、上壳体分载部分高度 h_5 、压电陶瓷外径 r_1 、压电陶瓷内径 r_2 、调整块半径 r_3 、上壳体分载部分半径 r_4 和下空腔半径 r_5 共 10 项关键尺寸参数。各尺寸参数的变化范围主要依据传感器整体安装空间、压电陶瓷及绝缘片规格、零件加工可行性和装配间隙要求确定,并保证参数变化过程中传感器基本结构形式和载荷传递路径不发生改变。固定其余尺寸参数,以零件尺

寸为调控变量,将参数代入动力学模型,通过 MATLAB 计算,获取不同参数下传感器的固有频率值。图 3 系统地呈现了各参数变化对传感器固有频率的影响规律。

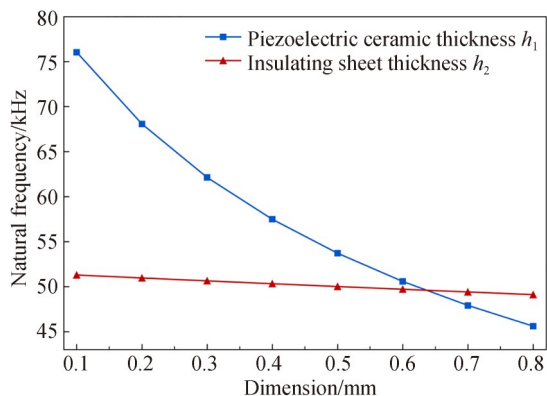


图 3 h_1, h_2 分别对固有频率的影响规律

Fig. 3 Influence law of h_1 and h_2 on natural frequency

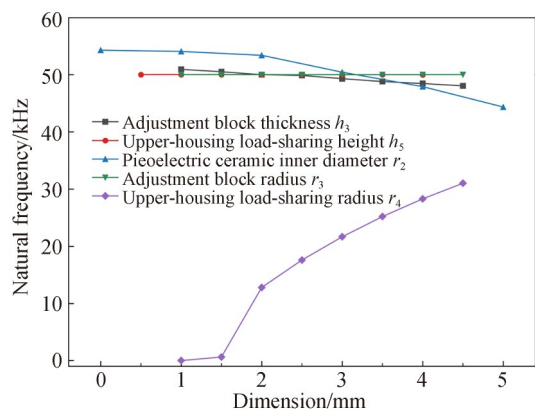


图 4 h_3, h_5, r_2, r_3, r_4 分别对固有频率的影响规律

Fig. 4 Influence law of h_3, h_5, r_2, r_3 and r_4 on natural frequency

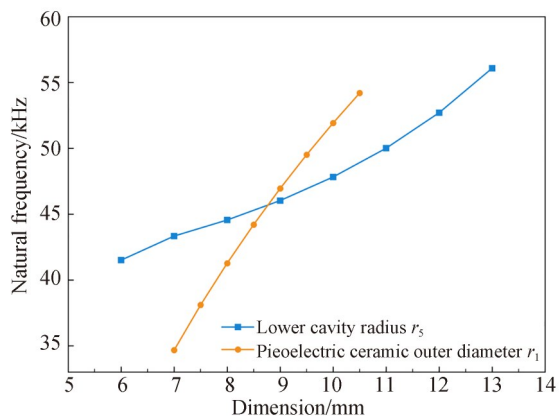


图 5 r_5, r_1 分别对固有频率的影响规律

Fig. 5 Influence law of r_1 and r_5 on natural frequency

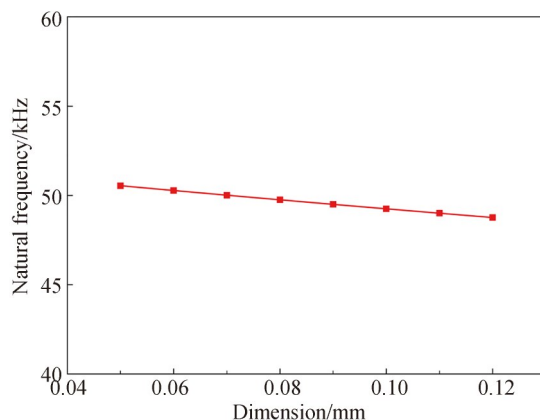


图 6 h_4 对固有频率的影响规律

Fig. 6 Influence law of h_4 on natural frequency

通过单因素敏感性分析曲线可知,传感器固有频率随各尺寸参数变化呈现明显的差异化规律。随着氧化铝绝缘片厚度 h_2 、压电陶瓷内径 r_2 增大,固有频率呈下降趋势。随着上壳体分载部分半径 r_4 、下空腔半径 r_5 及压电陶瓷外径 r_1 增大,固有频率呈明显上升趋势。因此,压电陶瓷厚度 h_1 、压电陶瓷外径 r_1 、压电陶瓷内径 r_2 、上壳体分载部分半径 r_4 、下空腔半径 r_5 是决定传感器固有频率的 5 项核心参数。

3 基于多元回归分析和爱情进化算法的传感器结构优化

3.1 多元回归模型的建立

传感器动力学性能受多因素耦合交互影响,周长、截面面积等关键力学特征参数在动力学模型中常以直径、半径的高次幂形式表征。构建传感器固有频率优化目标模型时,需考虑各尺寸参数的高次项效应及参数间的交互效应。目标函数包含交互项与平方项,呈现显著非线性特征,多元线性回归方程无法拟合其实际影响规律,需建立多元非线性回归模型开展分析^[19]。影响传感器动力学性能的核心尺寸参数共 5 项,经扩展其一次项、两两交互项及二次项后,总因子数为 20 项。构建含 m 个自变量的多元二次回归模型,其通用表达式如式(6)所示:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{ii=1}^m \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon, \quad (6)$$

其中: β_0 为常数项、 $\{\beta_i\}$ 为一次项回归系数、 $\{\beta_{ii}\}$ 为二次项回归系数、 $\{\beta_{ij}\}$ 为交互项回归系数、 ϵ 为随机误差项。为保证模型可识别性、降低拟合误差,需满足样本量 $n > m(m+3)/2$ 。因为自变量数量 m 对应的总项数过多,所以需从 20 项因子中筛选对固有频率影响显著的变量。多元回归分析中常用的变量筛选方法包括前进法、后退法及逐步回归法等,逐步回归法可通过显著性检验动态引入或剔除变量,兼顾模型拟合精度与简洁性^[20],采用该方法筛选影响传感器动力学性能的关键因子,建立回归方程。

回归分析中,显著性检验用于判断自变量与因变量间是否存在统计学意义上的线性关联,常用 p 值验证回归系数的有效性^[21]。若 $p < 0.05$,则认为该自变量对因变量的影响显著,反之则影响不显著。采用逐步回归法对经单因素筛选后的 20 项因子进行分析,建立的回归方程如式(7)所示:

$$f_r = -38.26 + 0.173r_4r_5 + 5.347r_1 - 3.197h_1r_2 - 1.085r_2^2 + 10.227r_2, \quad (7)$$

其中: r_4r_5 为上壳体分载部分半径与下空腔半径交互项、 h_1r_2 为压电陶瓷厚度与压电陶瓷内径交互项、 r_2^2 为压电陶瓷内径的高次项、 r_2 为压电陶瓷内半径、 r_1 为压电陶瓷外半径。回归模型的拟合优度指标如表 2 所示,各因子的显著性检验结果如表 3 所示。

表 2 固有频率优化目标模型参数

Tab. 2 Parameter model for natural frequency optimization objective

Attribute	Value
SSE	1.633
R^2	99.30%
R^2 (Adjustment)	98.60%
R^2 (Prediction)	97.80%

分析结果表明,所建立的高精度非线性回归模型,精准量化了 5 项核心尺寸参数与传感器固有频率之间的非线性耦合映射关系,该回归方程可直接作为优化算法的目标函数。

表 3 固有频率方程显著性分析

Tab. 3 Significance analysis of the natural frequency equation

Model	P
Constant term	<0.001
r_1	0.002 5
r_2	0.003
r_2^2	0.001 5
r_4r_5	<0.001
h_1r_2	0.001

3.2 基于爱情进化算法的传感器结构优化

针对传感器高温动态力测量的工程需求,结合多元回归分析结果,对 5 项核心结构尺寸参数开展非线性约束优化。考虑到目标函数包含交互项和高次项,且优化过程受尺寸边界和动态灵敏度约束,采用无需梯度信息、适用于小维度非线性寻优问题的爱情进化算法(Love Evolution Algorithm, LEA)实现参数寻优。算法以心理学中的刺激-价值-角色理论为核心理论依据,将决策变量映射为个体特征、目标函数值映射为幸福度,通过刺激、价值、角色三阶段迭代与反思操作,完成解空间的高效全局寻优^[22]。本研究以传感器固有频率为优化目标,以动态灵敏度 ≥ 30 pC/N 以及尺寸参数加工范围为约束条件开展传感器结构优化。爱情进化算法流程如图 7 所示。

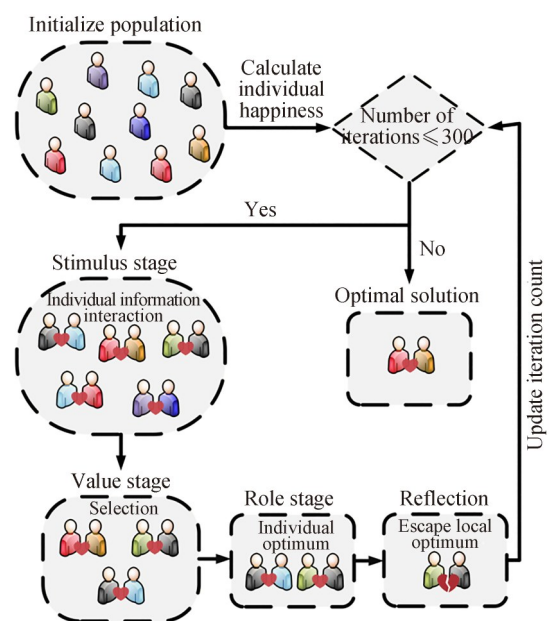


图 7 爱情进化算法优化流程图

Fig. 7 Love evolutionary algorithm optimization flowchart

LEA 的优化过程围绕相遇-三阶段进化-种群更新的核心逻辑展开,通过模拟人类爱情关系的建立与发展实现种群个体的自适应迭代。首先将 5 项传感器核心尺寸参数构成的可行解映射为个体特征向量,传感器固有频率映射为幸福度,全局最优解对应理想爱情匹配结果,确保算法与优化目标直接关联。考虑到 LEA 两人配对的核心设定,种群个数 N 设为偶数,通过 randperm 函数将其随机均分为 A, B 两组,既保障种群多样性,又避免局部最优陷阱。

进入刺激阶段后,核心是通过计算接受度 c 判断配对个体的适配性,仅考量目标函数值差异完成初步筛选,接受度 c 的计算方式如式(8)所示:

$$\begin{cases} c = r_c \cdot (H_A - H_B)^2 \\ c = c / (\max(c) + \min(c) + \epsilon) \end{cases}, \quad (8)$$

其中: r_c 为 0.5~1.5 的随机向量, H_A, H_B 分别为配对个体 A, B 的适应度值, ϵ 为极小正数, λ_c 为接受率。当 $c > \lambda_c$ 时,个体进入反思操作,否则进入价值阶段。该阶段无需更新特征向量,仅完成配对筛选,适配传感器参数优化的初步探索需求。针对配对失败的个体,反思操作的核心是融合全局最优解更新特征向量,既保留个体原有优势,又吸收全局优质特征,有效避免传感器参数优化陷入局部最优,个体特征向量的更新遵循式(9):

$$\begin{cases} A_{ij} = G_j + \mu s_{ij}^A \delta \\ B_{ij} = G_j + \mu s_{ij}^B \delta \end{cases}, \quad (9)$$

其中: G_j 为全局最优解的第 j 维特征, μ 为特征距离, $\mu d_{ij}^A (\mu d_{ij}^B)$ 为个体自我反思算子, δ 为学习算子。该公式既保留个体原有优势,又吸收全局优质特征,有效避免传感器参数优化陷入局部最优。经价值阶段融合优质特征后,算法进入角色阶段,需动态平衡探索与利用能力,收敛因子 h 随迭代进程线性调整,计算方法如式(10):

$$h = (1 - t/T)(h_{\max} - h_{\min}) + h_{\min}, \quad (10)$$

其中: t 为当前评价次数, $T=300$, $h_{\max}=0.7$, $h_{\min}=0$ 。 h 随迭代线性递减,实现前期探索、后期利用的自适应切换。结合高温压电式力传感器的工程实际需求,经过多轮对比测试与参数敏感性分析,最终确定算法初始参数。种群个数 $N=60$, 目标函数自变量数量 $D=5$, 最大迭代次数 300。

在算法迭代过程中加入参数边界约束,避免出现超出装配空间的理论最优解。传感器 5 项核心尺寸参数的优化取值范围如式(11)所示:

$$\begin{aligned} \max f(h_1, r_1, r_2, r_4, r_5) &= S_v \\ s. t. \quad &\begin{cases} 4.5 \leq f_r \\ 0.5 \leq h_1 \leq 0.65 \\ 4 \leq r_1 \leq 5 \\ 2 \leq r_2 \leq 2.2 \\ 5.5 \leq r_4 \leq 6 \\ 6 \leq r_5 \leq 6.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

基于上述参数设置与约束条件开展爱情进化算法迭代优化。迭代 300 次后,目标函数逐渐收敛,优化后传感器固有频率预测值由 8.54 kHz 提升至 9.50 kHz,提升幅度为 11.23%。优化后,传感器 5 项核心尺寸参数的最优取值及固有频率预测值如表 4 所示,其迭代收敛过程如图 8 所示。

表 4 基于爱情进化算法的传感器优化结果

Tab. 4 Optimization results of sensors based on love evolutionary algorithm

Parameter	Lower limit	Upper limit	Pre-opt. data	Post-opt. data
h_1/mm	0.5	0.65	0.5	0.5
r_1/mm	4.0	5.5	5.0	5.2
r_2/mm	2.0	2.2	2.2	2.2
r_4/mm	5.5	6.0	6.0	5.8
r_5/mm	6.0	6.5	6.1	6.2
F_r/kHz			8.54	9.50

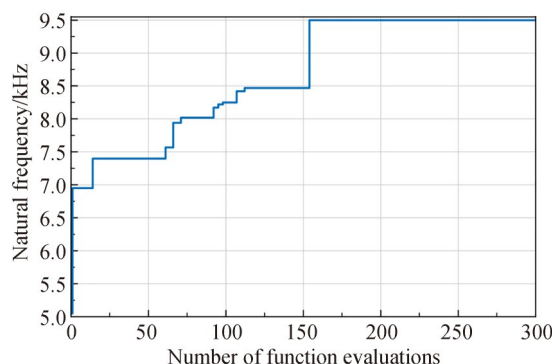


图 8 爱情进化算法迭代过程

Fig. 8 Iteration process of the love evolutionary algorithm

4 压电式力传感器样机试制与高温实验研究

4.1 样机试制

装配洁净度直接决定传感器性能稳定性与测量可靠性,传感器各零件在机械加工完成后,对其进行去毛刺、除油污、清洗杂质等预处理,以去除加工残留物与表面污染物,为高精度装配提

供基础保障。装配过程在防尘环境下进行,装配人员全程佩戴无尘手套、发套及防静电手环,避免外界污染物对传感器零部件造成污染。

传感器全流程清理、性能检测与装配工艺流程如图 9 所示,该流程系统涵盖了从陶瓷片预处理、性能表征到传感器整机封装的关键环节,为保障传感器性能一致性与长期可靠性提供了完整工艺支撑。

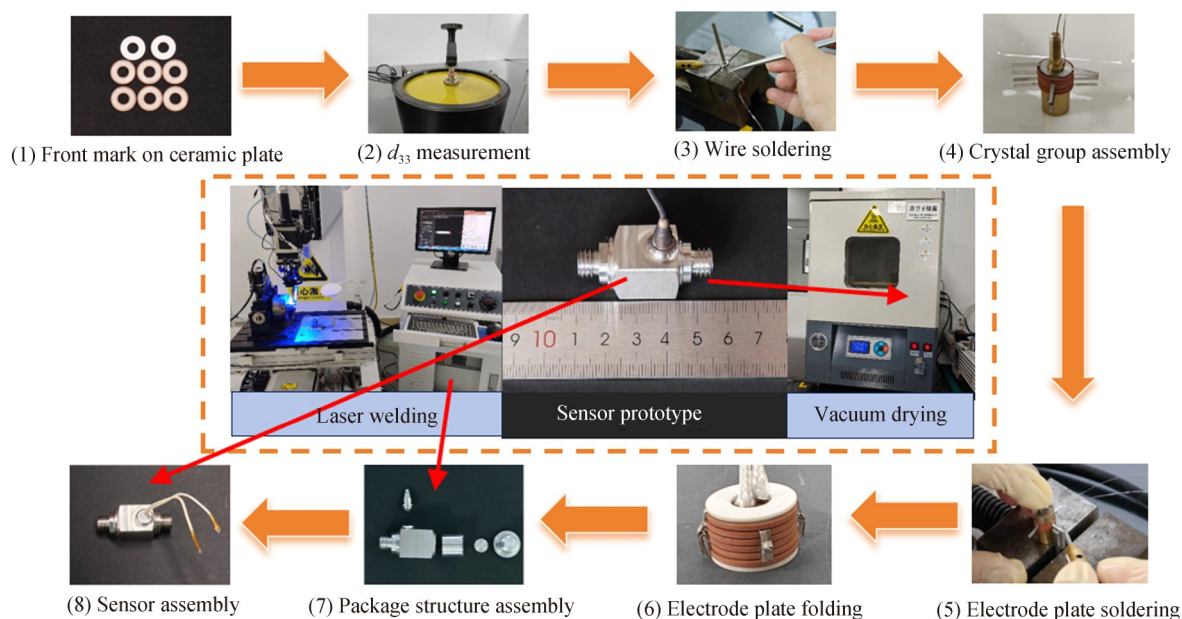


图 9 传感器全流程清理、性能检测与装配工艺流程图

Fig. 9 Flow chart of sensor whole-process cleaning, performance detection and assembly process

4.2 实验系统搭建与测试方案设计

为了精准测试自研高温压电式力传感器在高温工况下的动态响应性能,验证其在常温至 350 ℃区间内的测量精度与稳定性,基于正弦激励法搭建了一套专用的高温压电式力传感器动态性能测试系统。其完整工作流程为:KDDASP 信号采集分析软件向 KD8-LP02Y 信号分析仪发送控制指令,信号分析仪输出正弦控制信号,经 KD5708 功率放大器放大后驱动 KDZ-50 激振器产生幅值与频率可控的正弦激振力并作用于待测传感器。待测传感器在激振力作用下输出电荷信号,信号经 KD5007 电荷放大器调理为标准电压信号后回传至 KD8-LP02Y 信号分析仪,最终由 KDDASP 软件完成动态响应数据的采集、处理与分析。

实验过程中,待测传感器通过螺纹连接方式固定于激振台面,传感器上端安装标准负载质量块,以保证激振力沿传感器轴向稳定传递。信号采集过程中,由电荷放大器对传感器输出电荷信号进行调理,信号分析仪采集稳定正弦响应信号后,通过幅值提取和多次重复测试取均值的方式获得传感器动态输出结果。

测试方案具体设计如下:通过温控仪编程设定升温程序,以室温 25 ℃为初始温度,先升温至 100 ℃,后续采用 50 ℃为标准升温步长,逐级升温至 350 ℃,每级温度的升温-保温总时长设定为 30 min,确保传感器整体温度均匀稳定,避免因温度梯度引发的性能波动。为模拟典型动态力特征,实验采用质量为 2 000 g 的标准负载质量块,通过激振台施加频率 160 Hz、加速度 9.8 m/

s²的正弦激振力,该频率避开传感器固有频率,避免共振干扰。待温度稳定至 350 ℃后,施加 19.6 N,39.2 N,58.8 N,78.4 N,98.0 N 的分级动态激振力,每级载荷的力值重复测试 6 次,保障数据统计有效性。最后由动态性能标定测试系统完成传感器输出信号的采集与分析。标定系统图如图 10 所示。

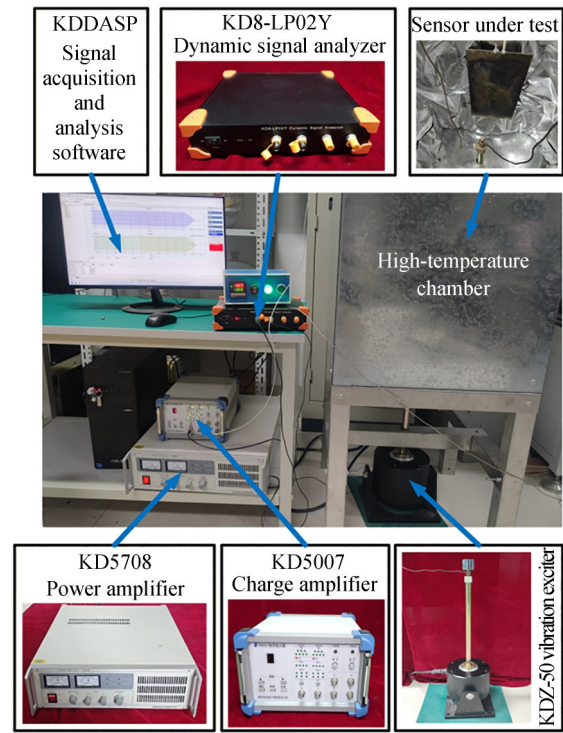


图 10 传感器动态标定测试系统
Fig. 10 Sensor dynamic calibration test system

4.3 温度对绝缘阻抗与动态灵敏度的影响规律

4.3.1 绝缘阻抗温度特征分析

基于上述高温动态性能测试方案,对传感器开展 25~350 ℃全温度区间动态激励测试,精准采集各温度下的动态输出电信号。测试过程中,幅值随加载力值线性变化。对采集信号完成幅值提取、基线校正与数据归一化处理后,进一步拟合得到传感器动态灵敏度随温度的变化曲线。此外,绝缘阻抗是决定传感器电荷保持能力的核心参数,其随温度的变化数据如表 5 所示。

为进一步直观表征绝缘阻抗随温度变化的趋势,根据表 5 数据绘制了传感器绝缘阻抗随温度变化曲线,如图 11 所示。由测试数据趋势可知,传感器绝缘阻抗随温度升高呈单调递减规

表 5 绝缘阻抗随温度变化数据

Tab. 5 Insulation resistance versus temperature data

Temp. /℃	Ins. Res. /Ω
25	8.11×10^9
100	5.31×10^9
150	3.15×10^9
200	1.12×10^9
250	7.65×10^8
300	2.43×10^8
350	1.26×10^8

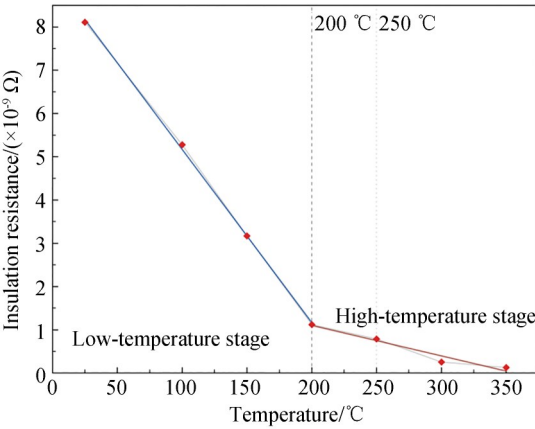


图 11 绝缘阻抗随温度变化
Fig. 11 Trend of insulation resistance with temperature

律,且不同温度区间的衰减速率存在显著差异。绝缘阻抗在室温至 350 ℃范围内的变化可分为两个特征阶段:25~200 ℃低温阶段,阻抗从 $8.11 \times 10^9 \Omega$ 缓慢降至 $1.12 \times 10^9 \Omega$,累计衰减 $6.99 \times 10^9 \Omega$,平均衰减速率约 $3.99 \times 10^7 \Omega/^\circ\text{C}$,阻抗始终维持在 $10^9 \Omega$ 量级,电荷泄漏效应微弱。200~350 ℃高温阶段,阻抗从 $1.12 \times 10^9 \Omega$ 进一步降至 $1.26 \times 10^8 \Omega$,累计衰减 $9.94 \times 10^8 \Omega$,平均衰减速率约 $6.63 \times 10^6 \Omega/^\circ\text{C}$,较低温阶段速率下降约一个数量级,阻抗降至 $10^8 \Omega$ 量级,电荷泄漏成为影响输出性能的主要因素。从曲线连续性来看,各温度点对应的绝缘阻抗变化衔接平稳,未出现反向波动或孤立突变点。

这一变化规律与压电陶瓷的材料特性直接相关。高温环境下,陶瓷内部晶格热运动加剧,导致介电常数稳定性下降、漏导电流增大,进而表现为绝缘阻抗的显著衰减,温度超过 250 ℃后,

介电性能的非线性变化进一步加剧了阻抗衰减趋势。

4.3.2 动态灵敏度漂移特征分析

传感器动态灵敏度随温度的变化数据如图 12 所示。

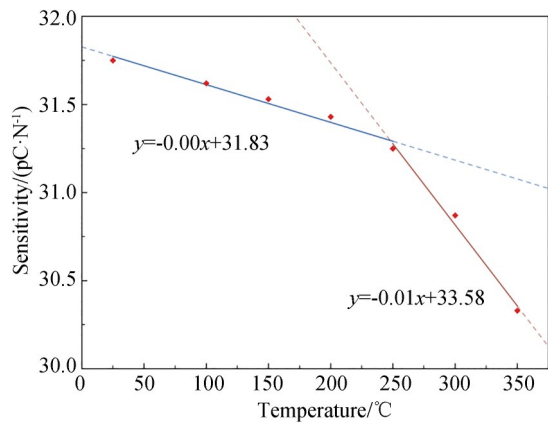


图 12 动态灵敏度随温度变化
Fig. 12 Dynamic sensitivity trend with temperature variation

由图知,动态灵敏度衰减规律分为两个特征阶段,与绝缘阻抗的温度特性呈现强相关性: 25~250 °C 为缓慢衰减阶段,动态灵敏度从 31.75 pC/N 平稳降至 31.25 pC/N,累计衰减 0.50 pC/N,平均衰减速率仅 0.002 2 pC/(N·°C),该阶段绝缘阻抗仍处于较高水平,电荷泄漏量小,动态灵敏度衰减主要源于压电陶瓷压电常数 d_{33} 的轻微温漂,表现为线性缓慢下降。250~350 °C 为加速衰减阶段,动态灵敏度从 31.25 pC/N 降至 30.33 pC/N,累计衰减 0.92 pC/N,平均衰减速率升至 0.009 2 pC/(N·°C),为前一阶段的 4.18 倍,随着绝缘阻抗大幅下降,力敏元件受载产生的电荷出现明显泄漏,导致相同外力下输出电荷量减小,动态灵敏度衰减速率显著加快。从曲线平滑性来看,动态灵敏度随温度升高连续下降,相邻温度点之间未出现异常跳变。为量化传感器的温度稳定性,以 25 °C 时的动态灵敏度为基准,采用式 (12) 计算 350 °C 下的温度漂移系数:

$$\alpha = \frac{S_T - S_0}{S_0 \cdot (T - T_0)}, \tag{12}$$

其中: α 为传感器温漂系数, S_T 为 350 °C 下传感器灵敏度; S_0 为 25 °C 下传感器动态灵敏度; T 为

350 °C, T_0 为 25 °C。代入计算得温度漂移系数为 $-0.014\%/^{\circ}\text{C}$ 。优于现有文献报道的同类传感器的温度漂移系数^[23-24],表明自研传感器结构与参数优化方案可有效保障 350 °C 工况下传感器动态力检测的灵敏度和稳定性。

4.4 350 °C 高温下动态性能标定与误差分析

4.4.1 重复性与线性度分析

在完成动态响应及温度稳定性分析的基础上,为进一步评价传感器在高温条件下的测量精度,开展了基于分级加载的重复性与线性度动态性能标定实验。350 °C 时传感器在不同力值载荷下的六组重复测试数据如表 6 所示。

350 °C 为本文测试范围内的最高温度工况,此时绝缘阻抗下降和电荷泄漏对输出稳定性的影响更为明显,因此本文重点评估该温度下的重复性误差和非线性度。

表 6 350 °C 下传感器动态标定实验电荷输出幅值(pC)
Tab. 6 Charge output amplitude of dynamic calibration experiment for sensor at 350 °C

Test No.	Force/N				
	19.6	39.2	58.8	78.4	98.0
1	606.15	1 200.19	1 805.70	2 413.60	3 019.43
2	603.92	1 195.06	1 796.89	2 398.10	3 012.85
3	599.63	1 192.71	1 792.63	2 396.58	3 012.67
4	592.05	1 188.92	1 789.69	2 376.79	3 001.66
5	589.26	1 186.57	1 777.34	2 373.11	2 986.31
6	586.31	1 181.62	1 771.55	2 365.96	2 965.63
Average	596.22	1 190.85	1 788.97	2 387.36	2 999.76

为直观反映各组测试数据的离散程度与分布规律,将上述 6 次重复测试的电荷输出幅值以可视化形式整理为图 13。

采用贝塞尔公式计算重复性误差^[25],量化传感器在相同工况、相同输入下的输出一致性,重复性误差计算公式如式 (13):

$$\delta_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \times 100\%, \tag{13}$$

其中: $n=6$ (测试次数), x_i 为单次测试输出值, $\bar{x}$ 为某力值下 6 次测试均值。计算得各力值下 6 次测量输出的实验标准差,并以该力值下输出均值为基准求得相对重复性误差。各力值下相对重

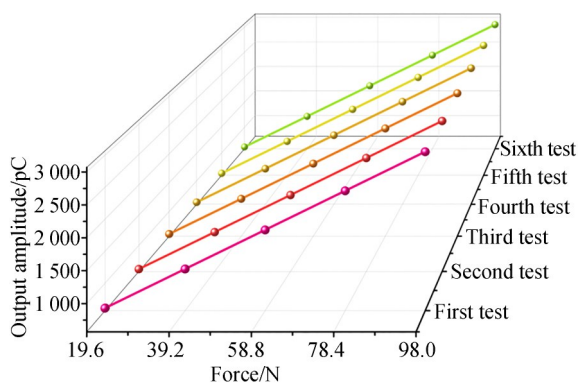


图13 350 °C下负载不同力值电荷输出幅值

Fig. 13 Charge output amplitude under different force loads at 350 °C

复性误差分别为1.37%, 0.56%, 0.68%, 0.75%和0.72%,取最大值1.37%作为传感器的整体重复性误差,远低于行业标准规定的3%阈值^[26],表明传感器在高温工况下的输出稳定性优异,温度波动、装配应力释放等因素对其性能无显著影响。

采用最小二乘法对表6中测试输出均值进行线性拟合,得到电荷输出幅值均值与输入力值的拟合曲线如图14所示,从图中可以看出传感器输出幅值与输入力值之间具有良好的线性关系。

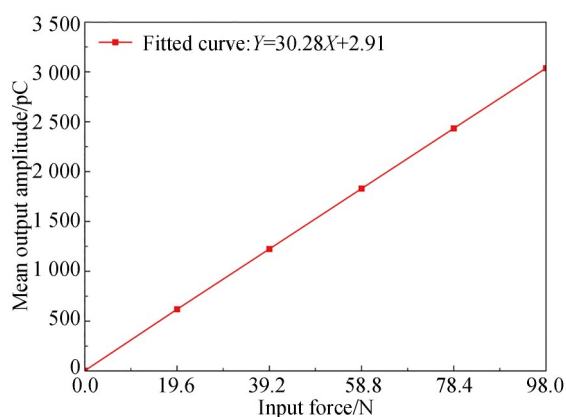


图14 350 °C负载动态输出幅值均值拟合曲线图

Fig. 14 Fitting curve of mean dynamic output amplitude under load at 350 °C

计算得到决定系数 $R^2=0.999\ 8$,表明传感器输出幅值与输入力值呈现极强的线性相关性。拟合方程斜率30.28 pC/N与350 °C下传感器动

态灵敏度实测均值30.33 pC/N基本一致。采用端基法计算非线性度,公式如式(14):

$$\delta_L = \frac{\max |y_i - (ax_i + b)|}{\max y_i - \min y_i} \times 100\%, \quad (14)$$

其中: y_i 为实测电荷输出均值, $ax_i + b$ 为拟合直线理论值,计算得非线性度为1.07%。表明传感器在19.6~98 N量程内的非线性失真极小,动态响应准确性优异。

4.4.2 灵敏度与误差综合评估

350 °C下传感器的动态灵敏度均值为30.33 pC/N,与室温下灵敏度31.75 pC/N的差异仅为1.42 pC/N,衰减率仅4.47%,误差水平控制在5%内。为明确自研传感器的综合性能优势,选取国内外具有代表性的高温压电式力传感器产品(Dytran 1051C、Kistler 9101A及振中测试ZT-F2002)进行对比分析,从最高工作温度、灵敏度、非线性度及适用场景等维度开展横向比较,结果如表7所示。

表7 高温压电式力传感器性能对比

Tab. 7 Performance comparison of high-temperature piezoelectric force sensors

Index	Dev. sensor	Dytran 1051C	Kistler 9101A	ZT-F2002
Maximum temperature/°C	350	260	120	150
Sensitivity pC/N	30.33	4	45	2
Nonlinearity/%	±1.07	±1	±1.5	±0.1

由表7可知,自研传感器最高工作温度达350 °C,高于所列对比产品,表明其具备较好的高温适应能力。其动态灵敏度为30.33 pC/N,高于Dytran 1051C和振中测试ZT-F2002,但低于Kistler 9101A。非线性度为±1.07%,优于Kistler 9101A,但与振中测试ZT-F2002相比仍存在一定差距。综合来看,自研传感器在最高工作温度和动态灵敏度方面表现出一定优势,可满足350 °C高温动态力测量需求。

5 结 论

设计了一款新型高温压电式力传感器结构并提出了一种融合单因素敏感性分析、非线性回

归建模与遗传进化算法的传感器结构优化方法。基于该优化方法,对传感器进行了机构优化并试制样机。

试制样机的性能测试结果表明,传感器在 25~350 ℃ 全温区范围内动态灵敏度保持在 30.33 pC/N 以上,温度漂移系数低至 -0.014%/℃。在 350 ℃ 高温工况下,非线性度为 1.07%,重复性误差为 1.37%,表明传感器兼具较好的动态响应能力和测量稳定性,可满足高温动态力监测工程需求。

该优化方法不仅为本次高温力传感器的研制与性能提升提供了关键支撑,也为同类高温压电式力传感器的结构设计 with 性能优化,提供了具有实操性的理论依据。

后续研究将进一步围绕传感器结构轻量化、高温长期稳定性和测量精度提升开展优化设计,并在更宽温度范围及复杂动态载荷工况下进行

实验验证。同时,将结合实际高温装备监测需求,进一步拓展该类传感器在航空航天、能源动力及高端制造等领域的应用。

作者贡献声明:

王桂从:实验设计及数据整理和分析,论文撰写;

甄子锐:实施研究和执行调查过程,对发表的内容进行准备、创建或表述,特别是撰写初稿,包括实质性翻译;

陈茹琳:论文审核与编辑写作;

穆超强:检测数据整理与分析;

李映君:对原始研究团队提出的发表内容进行准备、创建或表述,特别是评论、注释或修改,包括发表前和发表后所发生的这些工作;

李宏宇:产生想法,构造发展主要的研究目的。

参考文献:

- [1] 邹吉才,段云乾,李新,等. 刀具磨损和变摩擦系数对切削力的影响[J]. 光学精密工程, 2024, 32(14): 2211-2224.
KUAIJ C, DUAN Y Q, LI X, *et al.* Effect of tool wear and variable friction coefficient on cutting force [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(14): 2211-2224. (in Chinese)
- [2] 马珮羽,杨宝锋,陈晖,等. 液体火箭发动机涡轮泵多维度传感器优化布置[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(9): 72-82.
MA P Y, YANG B F, CHEN H, *et al.* Multidimensional sensor optimization placement for turbopump in liquid rocket engines[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(9): 72-82. (in Chinese)
- [3] LIU Y, XU J Y, XIAO G J, *et al.* Thermo-mechanical coupling during belt grinding and corresponding surface integrity of titanium alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(9): 6599-6609.
- [4] WANG H, SATAKE U, ENOMOTO T. Modeling of oscillating bone sawing forces with instantaneous cutting speed and depth of cut[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 324: 118225.
- [5] MATSUNO M, ADACHI S, NAKAYAMA M, *et al.* A bridge circuit for temperature drift cancellation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, 42(4): 870-872.
- [6] TIAN B H, SHANG H P, WANG W B. Research on temperature zero drift of SiC piezoresistive pressure sensor based on asymmetric Wheatstone bridge[J]. *Silicon*, 2022, 14(10): 5445-5451.
- [7] LI B J, SUN G L, ZHANG H C, *et al.* Design of MEMS pressure sensor anti-interference system based on filtering and PID compensation[J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5765.
- [8] 余慧芬,祁核,涂小牛,等. 高温压电振动传感器及其压电材料研究进展[J]. 物理学报, 2025, 74(2): 1-30.
YU H F, QI H, TU X N, *et al.* Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, 74(2): 1-30. (in Chinese)
- [9] KIM K, ZHANG S J, SALAZAR G, *et al.* Design, fabrication and characterization of high temperature piezoelectric vibration sensor using YCOB crystals[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 178: 40-48.
- [10] 梁晓瑞,徐芳萌,薛涛,等. 基于硅酸镓镧的声表面波高温压力器件的微结构加工制造技术研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 81-89.
LIANG X R, XU F M, XUE T, *et al.* Micro-

- structure manufacturing technology of acoustic surface wave high temperature pressure devices based on langasite[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(8): 81-89. (in Chinese)
- [11] 李强, 梁庭, 雷程, 等. 高灵敏度 SiC 动态高温压力传感器仿真研究[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(1): 62-64, 68.
LI Q, LIANG T, LEI C, *et al.* Research on simulation of high sensitivity SiC dynamic high temperature pressure sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(1): 62-64, 68. (in Chinese)
- [12] 张军, 甄田甜, 蔡佳乐, 等. 不同作用点下压电测力仪灵敏度规律及其预测[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(18): 2656-2663.
ZHANG J, ZHEN T T, CAI J L, *et al.* Sensitivity laws and prediction of piezoelectric force sensors at different loading points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(18): 2656-2663. (in Chinese)
- [13] 徐兴盛, 李映君, 王桂从, 等. 轮辐结构压电式六维力传感器设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(12): 2655-2664.
XU X S, LI Y J, WANG G C, *et al.* Design of six-axis force piezoelectric sensor with spoke structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(12): 2655-2664. (in Chinese)
- [14] LI H M, ZHANG M, WU X W, *et al.* Effect of electrical modes on dielectric and insulation properties of plasma electrolytic oxidation ceramic films on Al [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 485: 130881.
- [15] ÖZIN M C, SÜMER B, KOÇ İ M. Theoretical modeling and error analysis of a compliant Y-shaped mechanism including beam joint stiffness and stress topology for size optimization of six-axis force/moment sensors[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, 46(9): 558.
- [16] 刘俊, 徐军领, 李敏, 等. 垫圈式压电六维力传感器静态灵敏度解析[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 901.
LIU J, XU J L, LI M, *et al.* Static sensitivity analysis of washer-type piezoelectric six-axis force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 901. (in Chinese)
- [17] 何晴光, 张释伦, 朱前坤, 等. 模块化建筑阵列多调谐质量阻尼系统的实现与减震研究[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(6): 262-272.
- HE Q G, ZHANG S Q, ZHU Q K, *et al.* Implementation and vibration control of an array multi-tuned mass damping system for modular buildings [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(6): 262-272. (in Chinese)
- [18] 张军, 张鹏, 滕玄德, 等. 压电四维测力仪扭矩测量精度提升[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(10): 1584-1593.
ZHANG J, ZHANG P, TENG X D, *et al.* Improvement of torque measurement accuracy in piezoelectric four-dimensional force sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(10): 1584-1593. (in Chinese)
- [19] 孙世政, 庞珂, 于竞童, 等. 基于白鲨优化极限学习机的三维力传感器非线性解耦[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(18): 2664-2674.
SUN S Z, PANG K, YU J T, *et al.* Nonlinear decoupling of 3d force sensors based on WSO-ELM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(18): 2664-2674. (in Chinese)
- [20] 游士兵, 严研. 逐步回归分析法及其应用[J]. *统计与决策*, 2017, 33(14): 31-35.
YOU S B, YAN Y. Stepwise regression analysis and its application[J]. *Statistics & Decision*, 2017, 33(14): 31-35. (in Chinese)
- [21] BLESS H, WÄNKE M. The crucial role of linearity when comparing effects across studies[J]. *Nature Reviews Psychology*, 2023, 2(9): 516-517.
- [22] GAO Y S, ZHANG J H, WANG Y L, *et al.* Love Evolution Algorithm: a stimulus - value - role theory-inspired evolutionary algorithm for global optimization [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2024, 80(9): 12346-12407.
- [23] 卮正利, 冯云云, 费璇, 等. WO₃ 掺杂 Na_{0.5}Bi_{4.5}Ti₄O₁₅ 压电陶瓷及其加速度传感器的制备与特性研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(6): 2216-2227.
HUAN Z L, FENG Y Y, FEI X, *et al.* Preparation and characterization of WO₃-doped Na_{0.5}Bi_{4.5}Ti₄O₁₅ piezoelectric ceramics and its acceleration sensor [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2025, 56(6): 2216-2227. (in Chinese)
- [24] CHEN Y K, XU Q, ZHANG X Q, *et al.* Materials and sensing mechanisms for high-temperature pressure sensors: a review[J]. *IEEE Sensors Jour-*

nal, 2023, 23(22): 26910-26924.

- [25] 张军,王郁赫,任宗金,等. 考虑角度偏差的压电三维力传感器标定[J]. 光学精密工程, 2023, 31(17): 2546-2554.

ZHANG J, WANG Y H, REN Z J, *et al.* Calibration of piezoelectric three-dimensional force sensor considering angle deviation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(17): 2546-2554. (in Chinese)

- [26] 颜明慧,高卫峰,赵少美,等. 基于蒙特卡洛法的压力传感器测量模型不确定度评定[J]. 计量学报, 2025, 46(8): 1156-1163.

YAN M H, GAO W F, ZHAO S M, *et al.* Uncertainty evaluation of measurement model of pressure sensor based on Monte Carlo method[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2025, 46(8): 1156-1163. (in Chinese)

作者简介:



王桂从(1981—),女,山东菏泽人,2003年于济南大学获得学士学位,2008年于山东大学获得博士学位,现为济南大学副教授,主要研究方向为制造业信息化、传感测控技术、现代启发式智能算法。E-mail: me_wanggc@ujn.edu.cn

通讯作者:



李映君(1982—),男,山东烟台人,2004年于山东科技大学获得学士学位,2007年于沈阳理工大学获得硕士学位,2010年于大连理工大学获得博士学位,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领域的研究。E-mail: me_liyj@ujn.edu.cn