

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413259

基于 BP+NSGA-II 梳齿电容压力传感器结构多参数优化*

梁瑞梅, 李平华, 刘 阳, 苗家齐, 庄须叶
(山东理工大学机械工程学院 淄博 255000)

摘 要:针对梳齿电容式压力传感器存在灵敏度低、灵敏度与量程难以同时优化的问题,提出了一种新型梁-膜结构梳齿电容式压力传感器,并采用曲线拟合与 BP+NSGA-II 结合的方法对传感器进行优化。在膜片上表面添加锚点和悬臂梁构成杠杆放大结构,活动梳齿连接在杠杆输出端,通过杠杆的放大原理增加了活动梳齿的位移,提高了传感器的灵敏度。针对数据集维度高、计算量大的问题,利用 MATLAB 对结构与性能参数进行数据拟合和定量分析。通过对锚点、悬臂梁等结构几何参数与性能指标的相关性进行量化分析,筛选出对传感器性能影响显著的关键参数,并去除冗余变量,降低了数据集的复杂性。在确保结果准确性不退化的前提下,通过降维方法将数据集从 14 维降至 6 维,既提高了数据采集效率,又降低了算力损耗。对降维后的数据集利用 BP 神经网络进行训练,并结合 NSGA-II 算法实现了灵敏度与量程的协同优化,增强了输出结果的可靠性。结果表明,在 0~50 kPa 的压力范围内,优化后的传感器灵敏度为 0.106 pF/kPa,提高了 30.4%,非线性误差为 0.4% F.S.。该优化方法为多参数复杂结构的优化提供了参考,所设计的传感器具有高灵敏度和低非线性,为 MEMS 压力传感器的研发提供了新思路。

关键词: 电容压力传感器; NSGA-II; 梳齿; 优化

中图分类号: TP212 TH812 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Multi-parameter optimisation of comb capacitive pressure sensors structure based on BP+ NSGA- II

Liang Ruimei, Li Pinghua, Liu Yang, Miao Jiaqi, Zhuang Xuye

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: To address the challenges of low sensitivity and the difficulty in simultaneously optimizing sensitivity and range in comb-type capacitive pressure sensors, this paper proposes a novel beam-membrane structured comb-type capacitive pressure sensor. An optimization approach combining curve fitting with BP (Backpropagation) and NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) methods is utilized to enhance the sensor's performance. By introducing anchor points and cantilever beams to the diaphragm, creating a lever amplification structure, and connecting the movable comb fingers to the lever's output, the displacement of the comb fingers is amplified, improving sensitivity. To handle the high dimensionality and substantial computational demands of the dataset, MATLAB is employed for data fitting and quantitative analysis of the structural and performance parameters. A correlation analysis between geometric parameters (such as anchor points and cantilever beams) and performance metrics identifies key factors influencing sensor performance, allowing for the elimination of redundant variables and reduction of dataset complexity. The dimensionality reduction process decreases the dataset from 14 to 6 dimensions without compromising accuracy, thus enhancing data collection efficiency and reducing computational resource consumption. The reduced dataset is trained using a BP neural network, and the NSGA-II algorithm is applied for co-optimization of sensitivity and range, improving output reliability. The results show that within the 0~50 kPa range, the optimized sensor achieves a sensitivity of 0.106 pF/kPa, a 30.4% improvement, with a non-linearity error of 0.4% F.S. This optimization methodology provides valuable insights for refining complex structures with multiple parameters. The proposed sensor, with its enhanced sensitivity and reduced nonlinearity, offers an innovative perspective for advancing MEMS pressure sensor technology.

Keywords: capacitive pressure sensors; NSGA-II; comb tooth; optimisation

收稿日期: 2024-09-05 Received Date: 2024-09-05

* 基金项目: 泰山学者青年专家项目 (tsqn201909108)、山东省自然科学基金面上项目 (ZR2021MF042) 资助

0 引言

结构优化对提升传感器的性能至关重要。目前,通过优化传感器的结构尺寸或者材料分布等提高传感器的输出性能,主要有以下几种方式:第1种方法为有限元参数优化(finite element parameter optimization, FEPO)^[1-7]。例如, Li等^[8]通过对压敏电阻的加工位置进行FEPO,测试得到其灵敏度为 $1.06 \mu\text{V/g}$,线性度为 1.95% 。Chuai等^[9]利用FEPO,对传感器中的硅岛、扭梁和谐振腔等结构进行优化,优化后输出的灵敏度达到 50.48 Hz/kPa 。

第2种优化方法是 将 FEPO 与 曲线拟合(curve fitting, CF)相结合进行优化^[10]。如 Hao等^[11]建立了FEPO与CF相结合的理论模型,进行优化后的结构精度为 $0.241\% \text{ F.S.}$,非线性度为 $0.180\% \text{ F.S.}$ 。Thaworn-sathit等^[12]对微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)压阻式压力传感器中的横梁、半岛及中心凸台等结构进行优化。优化后的传感器灵敏度为 34 mV/kPa ,非线性误差为 $0.11\% \text{ FS}$ 。

第3种方法为拓扑优化(topology optimization, TO),通过优化材料的分布来提升性能。如 Guo等^[13]对传统薄膜和四叶薄膜结构进行TO,优化后灵敏度为 5.202 mV/V/kPa ,非线性为 $-0.26\% \text{ F.S.}$ 。Meng等^[14]对压阻式压力传感器进行TO,优化后灵敏度为 $17.5 \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1}$,非线性为 $0.03\% \text{ F.S.}$ 。

第4种方法是人工智能算法进行优化^[15],常见的包括BP神经网络(backpropagation neural network, BP)与非支配排序遗传算法II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)结合优化或者单独使用NSGA-II优化等。如 Lyu等^[16]基于BP+NSGA-II算法优化谐振压力传感器结构,在 $1 \sim 10 \text{ MPa}$ 压力范围内,测得其线性影响因子为 38.07 ,且灵敏度达到 4.23 Hz/kPa 。Varasteanu等^[17]通过NSGA-II算法优化表面等离子体共振(sprint planning review, SPR)传感器架构,实现了灵敏度最优输出。此外,还有基于仿真的无参量结构优化、位置优化等方法。Meng等^[18]提出了一种基于仿真的半自动无参量MEMS结构优化设计新方法,结果表明,与传统无岛膜片和带岛膜片相比,优化后膜片应力分别增加了 10% 和 16% ,非线性减少了 57% 和 77% 。

上述4种方法中,前两种方法的主要区别在于第2种方法引入了CF分析,FEPO适用于模型简单且尺寸参数较少的结构,在参数规模较大时,其计算效率较低。通过添加CF对数据进行筛选,可以有效降低计算量并提高效率。然而,这两种方法的优化机理均为对结构参数的依次优化,容易陷入局部最优。TO主要通过优化材料布局实现结构性能的最优设计。不依赖于原始结

构,能够实现全局优化。但拓扑优化对网格划分的依赖性较强,想要得到高精度优化结果,需要对网格进行细致划分,导致计算复杂度呈指数级增长。此外,拓扑优化后的结构几何形状较为复杂,需要进行后处理以提高结构的可制造性,模型重建增加了计算和时间成本。除了单目标优化,拓扑优化也可用于多目标优化,但多目标优化需要复杂的边界条件且对硬件要求较高。此外,多场耦合可能导致优化结果不收敛,需要在收敛性和多样性之间找到平衡,通常收敛性好的算法多样性较弱,多样性强的算法收敛性较差,因此拓扑优化更多用于单目标优化问题。

进行TO需要建立准确的约束边界与性能目标函数之间的量化关联。在优化过程中,结构参数与性能之间的函数关系越精确,优化结果越接近实际需求。然而,对于复杂结构,参数与性能之间往往存在复杂的非线性关系,这种关系难以通过简单的数学模型精确描述。而BP神经网络能够通过训练数据得到输入与输出之间的复杂关系,适用于处理复杂的非线性问题,能够为优化过程提供准确的预测模型。

BP+NSGA-II在多目标优化领域是最常见的一种智能算法。该算法融合了BP神经网络的高精度预测能力及NSGA-II的优化机制,结合非支配排序和拥挤度计算,生成Pareto最优解集,从而有效解决多目标冲突问题^[19-20]。然而,对于复杂结构,影响性能的参数较多,若全部采集则工作量大,若选择性采集则可能漏掉重要参数,导致优化结果的精度下降,而且针对大数据集,BP神经网络的训练效率会有所降低。因此,在BP训练前,需要对影响参数进行分析,找到关键参数,降低维度以提高数据采集的效率并确保输出结果的准确性。

为此,提出了一种CF与BP+NSGA-II结合的压力传感器优化方法。在数据采集前,利用MATLAB数据拟合工具对12个结构参数和2个性能参数进行拟合分析,定量确定结构参数与输出性能的关系。按对性能影响的大小排序后,找出4个对器件性能影响最大的结构参数,将数据集从14维降至6维,显著减少了工作量。为了证明降维不会对输出结果产生显著影响,同时确保结果的准确性,进一步选取2个结构参数,构成包含6个结构参数和2个性能参数的8维数据集进行优化,并与6维数据集优化结果相比。结果显示,8维数据集的性能提升不足 1% (约 0.432%),但计算成本显著增加。证实了数据降维不会对优化结果产生显著影响,但大大降低了工作量。

1 优化流程设计模型

传统的平行板结构存在灵敏度低和非线性差的问题^[21-22],为了提高传感器的性能,研究人员进行了多种结构优化设计^[23-28],如改变电极形状^[29-30]和采用接触结

构^[31]等。为提高灵敏度,提出了一种新型梁-膜结构 MEMS 梳齿式电容压力传感器。通过在膜片上表面添加锚点与悬臂梁构成杠杆结构,利用杠杆放大了活动梳齿的位移,提高了灵敏度。并定量分析了传感器的杠杆结

构和耦合梁结构对传感器输出性能的影响。然后,利用 BP 神经网络对结构参数与输出性能数据集进行训练,并将训练结果导入 NSGA-II 算法进行多参数同时优化,优化流程如图 1 所示。

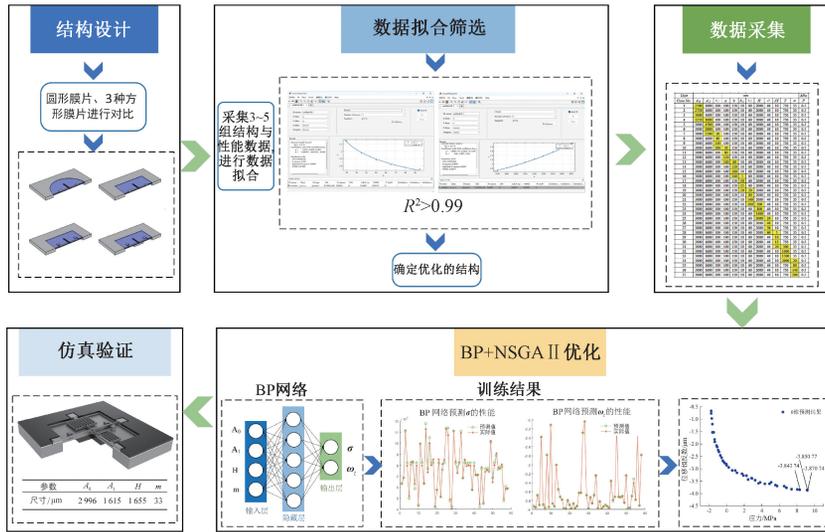


图 1 结构优化流程

Fig. 1 Flowchart of structural optimization

2 传感器结构设计及原理

梁-膜结构 MEMS 梳齿电容压力传感器的示意图如图 2 所示。固定梳齿通过悬臂梁连接在膜片边缘,活动梳齿连接在中间耦合梁上,中间为二氧化硅层,除膜上 4 个锚点外,固定梳齿、活动梳齿以及悬臂梁等结构均不与膜片相连,膜片背面经深腔刻蚀形成背腔及凸台结构。

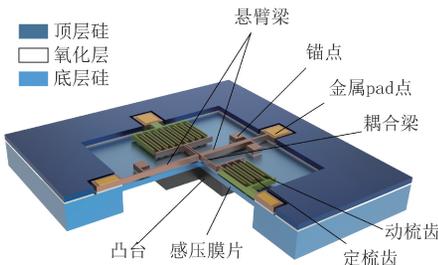


图 2 传感器示意图

Fig. 2 Sensor schematic diagram

2.1 4 种结构对比

在传感器设计中,为降低加工难度,感压膜片通常设计为方形或圆形。对于杠杆结构,锚点可直接与杠杆相连,也可不直接相连。此外,凸台的有无也会对结构产生影响。因此,设计了 4 种结构,如图 3 所示。

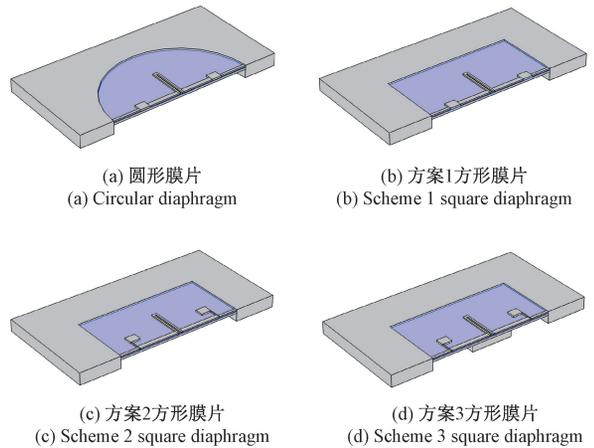


图 3 4 种结构示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of four structures

图 3(a) 为圆形膜片,悬臂梁与膜片通过两个锚点固定;图 3(b) 方案 1 的结构与图 3(a) 结构区别在于将圆形膜片改为方形膜片,膜片大小相同;图 3(c) 方案 2 中的结构是在图 3(b) 结构的基础上将锚点一分为二,每侧用两个锚点固定,悬臂梁与锚点之间的通过细梁连接;图 3(d) 方案 3 中的结构与图 3(c) 中结构区别在于添加了膜下凸台。

在 0~50 kPa 的压力作用下,耦合梁末端的位移(等于活动梳齿位移)输出结果如图 4 所示,由图 4 可知,与圆形膜片相比,方形膜片受压后输出位移明显大于圆形

膜片,且 4 种结构的线性度均大于 0.999,方案 1 结构线性度为 0.999 8,其他 3 种结构线性度为 0.999 9。

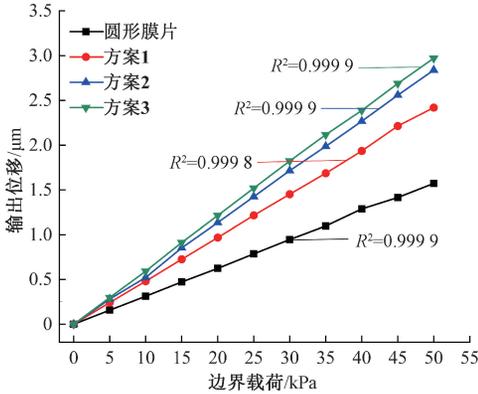


图 4 4 种结构边界载荷与最大位移结果

Fig. 4 Boundary load and maximum displacement results for four structures

4 种结构在 0~50 kPa 压力下位移输出如表 1 所示,在 50 kPa 压力下,圆形膜片结构输出最大位移为 1.573 μm,而方案 1 结构的最大输出位移为 2.42 μm,相比圆形膜片增加了 53.8%。方案 2 结构的最大输出位移为 2.838 μm,相比方案 1 结构提高了 17.3%。方案 3 结构的最大输出位移为 2.97 μm,相比于方案 2 又提高了 4.65%。因此,采用方案 3 作为压力压力传感器的基本结构进行优化。

表 1 4 种结构边界载荷及位移输出参数

Table 1 Boundary load and displacement output parameters of four structures

边界载荷/kPa	圆形膜片/μm	方案 1/μm	方案 2/μm	方案 3/μm
0	0	0	0	0
5	0.157	0.242	0.281	0.297
10	0.312	0.481	0.522	0.593
15	0.472	0.726	0.853	0.913
20	0.624	0.968	1.135	1.214
25	0.786	1.215	1.425	1.520
30	0.946	1.452	1.716	1.824
35	1.097	1.687	1.987	2.117
40	1.288	1.936	2.268	2.388
45	1.416	2.214	2.559	2.689
50	1.573	2.420	2.838	2.970

2.2 电容传感原理

在施加压力下悬臂梁与膜的变形如图 5 所示。当外界压力为 P_o 时,动梳齿随耦合梁移动 ω_i ,膜下凸台使膜

片刚度增大,只有未被凸台覆盖的环形部分变形。

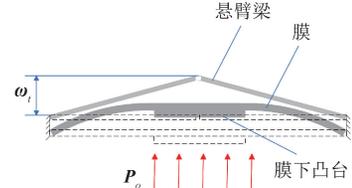


图 5 压力 P_o 下悬臂梁与膜的变形

Fig. 5 Deformation of cantilever beam and membrane under pressure P_o

理想情况下,相邻两梳齿之间的电场均匀分布,它们之间的电容 C_{p1} 可表示为:

$$C_{p1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l h}{d} \quad (1)$$

其中, ϵ_0 为介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, d 为相邻活动梳齿与固定梳齿之间的间隔距离, l 为活动与固定梳齿的重叠长度, h 为梳齿的厚度。当受到外界压力 P_o 时,动梳齿向上移动位移 ω_i ,则梳齿之间的总电容可表示为:

$$C_{p1} = 2n \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l}{d} \cdot (h - \omega_i) \quad (2)$$

其中, n 为固定梳齿电极的个数, ω_i 为活动梳齿位移。因此,只需要计算出在压力 P_o 作用下的位移 ω_i ,即可得到电容 C_{p1} 的大小。

2.3 灵敏度和非线性

灵敏度是衡量压力传感器性能的一个重要参数,压力传感器的灵敏度可以表示为:

$$S_s = [C_{to}(P_{max}) - C_{to}(P_{min})] / (P_{max} - P_{min}) \quad (3)$$

其中, S_s 为灵敏度, P_{max} 为最大压力, P_{min} 为最小压力, $C_{to}(P_{max})$ 为外界压力 P_{max} 时测得的总电容, $C_{to}(P_{min})$ 为外界压力 P_{min} 时测得的总电容。

根据式 (2),则式 (3) 可以简化变形为:

$$S_s = \left(2n \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l \Delta \omega_i}{d} \right) / (P_{max} - P_{min}) \quad (4)$$

$\Delta \omega_i$ 为外界压力从 P_{min} 变化为 P_{max} 时动梳齿位移变化。

非线性是另一个评价压力传感器的重要参数,可定义为:

$$N_l = \left[C_{to}(P_i) - P_i \cdot \frac{C_{to}(P_{max})}{P_{max}} \right] / C_{to}(P_{max}) \times 100\% \quad (5)$$

其中, N_l 是非线性, P_i 是 N_l 的值最大时的压力。

根据式 (2),则式 (5) 可以变形为:

$$N_l = \left[\frac{\omega_i}{\omega_{max}} - \frac{P_i}{P_{max}} \right] \times 100\% \quad (6)$$

其中, ω_i 为压力 P_i 时的位移, ω_{\max} 为压力 P_{\max} 时的位移。

3 数据拟合筛选

传感器结构尺寸参数示意图如图 6 所示, 需要优化的结构参数及其初始值如表 2 所示。待优化的结构参数数量共 12 个, 输出性能指标有 2 个。首先, 利用 MATLAB 的数据拟合工具对这 12 个结构参数与 2 个性能指标之间的关系进行定量分析, 并对数据集进行降维处理。

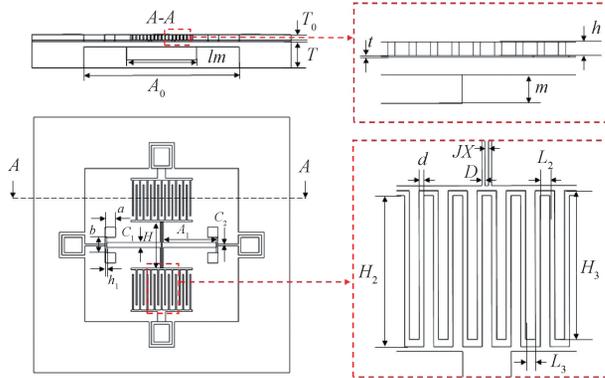


图 6 传感器结构尺寸参数

Fig. 6 Structural dimension parameters of the sensor

表 2 传感器待优化结构参数及初始值

Table 2 Structural parameters of the sensor to be optimized and their initial values (μm)

参数	描述	初始值
A_0	膜宽	3 000
A_1	悬臂梁长度	800
C_1	悬臂梁宽度	100
a	锚点边长	100
b	锚点间梁长	150
h_1	锚点间梁宽	10
C_2	锚点外侧横梁宽度	60
H	耦合梁长度	1 000
D	耦合梁宽度	40
JX	耦合梁之间的间隙	10
lm	凸台宽度	750
m	凸台厚度	35

在常规平膜片(c型)结构中, 最大挠度与各变量呈幂函数关系。因此, 所提出的传感器结构与性能之间函数关系近似采用幂函数来拟合, 如式(7)所示。

$$\omega_1 = K_1 \cdot A_0^{\epsilon_1} \cdot A_1^{\epsilon_2} \cdot C_1^{\epsilon_3} \cdot a^{\epsilon_4} \cdot b^{\epsilon_5} \cdot h_1^{\epsilon_6} \cdot C_2^{\epsilon_7} \cdot H^{\epsilon_8} \cdot D^{\epsilon_9} \cdot JX^{\epsilon_{10}} \cdot l_m^{\epsilon_{11}} \cdot m^{\epsilon_{12}} \cdot P_0 \cdot E^{-1} \quad (7)$$

其中, ω_1 为输出挠度, P_0 为施加压力, E 为杨氏模量。 A_0 的影响如式(8)所示。

$$\omega_1(A_0) = K_{1A_0} \cdot A_0^{\epsilon_1} \quad (8)$$

将有限元仿真得到的数据参数导入 MATLAB 进行幂函数拟合, 其中 $R^2 = 0.9997$ 得到:

$$\omega_1(A_0) = 1.402 \times 10^{-14} \cdot A_0^{4.157} \quad (9)$$

同理, 其他参数采用相同方式得到其指数, 其 R^2 均大于 0.99, 拟合较好, 得到的关系式如式(10)所示。

$$\omega_1 = K_1 \cdot A_0^{4.157} \cdot A_1^{0.2367} \cdot C_1^{0.01488} \cdot a^{-0.026} \cdot b^{-0.05527} \cdot h_1^{-0.04202} \cdot C_2^{0.01627} \cdot H^{0.1471} \cdot D^{-0.01807} \cdot JX^{-0.04558} \cdot l_m^{0.02147} \cdot m^{-0.06479} \cdot P_0 \cdot E^{-1} \quad (10)$$

将初始值带入式(10), 进行有限元仿真, 得到 $\omega_1 = 3.99 \mu\text{m}$, 计算得 $K_1 = 5.0409 \times 10^{-9}$ 。

最终得到的完整关系式, 如式(11)所示。

$$\omega_1 = 5.0409 \times 10^{-9} \cdot A_0^{4.157} \cdot A_1^{0.2367} \cdot C_1^{0.01488} \cdot a^{-0.026} \cdot b^{-0.05527} \cdot h_1^{-0.04202} \cdot C_2^{0.01627} \cdot H^{0.1471} \cdot D^{-0.01807} \cdot JX^{-0.04558} \cdot l_m^{0.02147} \cdot m^{-0.06479} \cdot P_0 \cdot E^{-1} \quad (11)$$

通过参数指数分析, 对结果影响较大的主要参数共有 6 个, 分别为 A_0 、 A_1 、 H 、 m 和 b 和 JX , 其中, 前 3 个参数 (A_0 、 A_1 、 H) 对结果的影响最为显著; 第 4 个参数 (m) 的影响程度相对较小, 与前 3 个参数相比降低了一个数量级, 而后两个参数 (b 、 JX) 的影响比第 4 个参数影响更小。为验证结果的准确性, 构建了两个数据集, 并对其进行分析与比较: 一个包含 6 个结构参数和 2 个性能参数的 8 维数据集, 另一个仅包含前 4 个结构参数和 2 个性能参数 6 维数据集。

4 数据采集与 BP+NSGA-II 优化

传感器灵敏度与活动梳齿位移大小有关, 采用固体力学模块分析。传感器的材料参数如表 3 所示。在优化过程中, 保持恒定不变的结构参数如表 4 所示。

表 3 材料参数

Table 3 Material properties

材料	参数	值
硅	杨氏模量	170 GPa
	泊松比	0.278
二氧化硅	杨氏模量	72 GPa
	泊松比	0.16

从数据集中随机抽取 300 组样本, 其中 260 组用于构建训练集, 其余 40 组作为验证集, 以进行 BP 神经网络

表 4 传感器结构固定参数

Table 4 Fixed parameters of the sensor structure

参数	描述	值
L_2	固定梳齿宽度	5 μm
H_2	固定梳齿长度	610 μm
L_3	移动梳齿宽度	5 μm
H_3	移动梳齿长度	610 μm
d	梳齿间隙	2 μm
HM	膜片厚度	50 μm
h	梳齿厚度	35 μm
P_0	边界载荷	50 kPa
T	底层硅厚度	400 μm
t	二氧化硅层厚度	3 μm
T_0	顶层硅厚度	35 μm
n	固定梳齿数目	96 μm

络的训练。数据集分为两种:第 1 种为 8 维数据集,包含参数 A_0 、 A_1 、 H 、 m 、 b 、 JX 、 ω_i 和 σ (最大应力);第 2 种为 6 维数据集,不包含参数 b 和 JX ,其余参数与 8 维数据集相同。其中,6 维数据集部分参数值如表 5 所示。

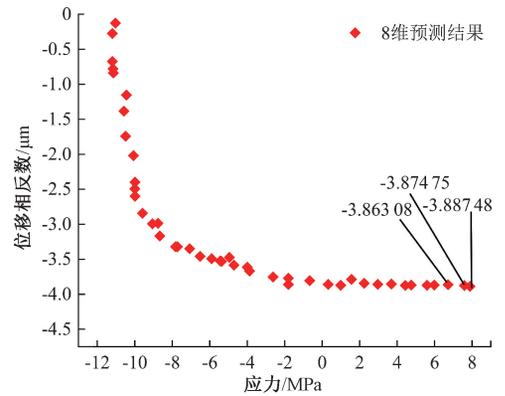
表 5 6 维度数据集部分参数值

Table 5 Partial parameter values for the 6-dimensional dataset

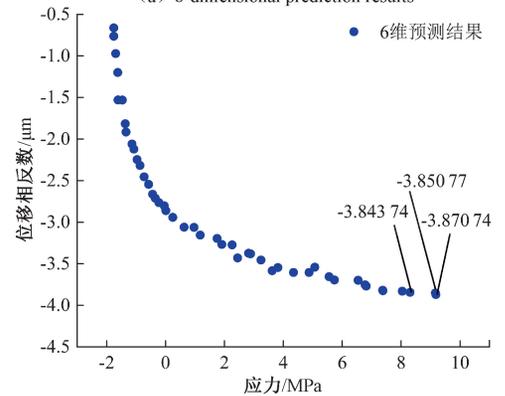
$A_0/\mu\text{m}$	$A_1/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$	$m/\mu\text{m}$	$\omega_i/\mu\text{m}$	σ/GPa
2 500	800	1 000	35	-3.143	0.054
2 750	800	1 000	35	-3.698	0.062
3 000	800	1 000	35	-3.755	0.065
3 250	800	1 000	35	-3.794	0.066
3 000	500	1 000	35	-2.060	0.061
3 000	750	1 000	35	-2.546	0.061
3 000	1 000	1 000	35	-2.971	0.065
3 000	1 250	1 000	35	-3.544	0.062
3 000	800	200	35	-2.829	0.063
3 000	800	800	35	-3.184	0.062
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

将 BP 神经网络的训练结果导入 NSGA- II 算法,进行多参数协同优化,优化结果如图 7 所示。

8 维预测输出如图 7(a)所示,最大位移为 3.887 48 μm ,对应的最大应力为 7.89 MPa。6 维预测输出如图 7(b)所示,最大位移为 3.870 74 μm ,对应的最大应力为



(a) 8 维预测结果
(a) 8-dimensional prediction results



(b) 6 维预测结果
(b) 6-dimensional prediction results

图 7 8 维与 6 维数据集 NSGA- II 预测结果

Fig. 7 NSGA- II prediction results for the 8-and 6-dimensional datasets

9.12 MPa;两者的输出应力均远低于硅的断裂应力(7 GPa)。虽然 8 维数据集优化后的最大位移比 6 维数据集高 0.016 74 μm (约 0.432% < 1%),但对结构性能的提升有限,且计算成本显著上升。因此,综合考虑性能和计算效率,最终选择 6 维数据集进行传感器结构优化,对应的最优结构参数如表 6 所示。

表 6 优化后结构参数尺寸

Table 6 Optimized parameter results

参数	A_0	A_1	H	m
尺寸/ μm	2 998	1 615	1 655	33

将优化后的结构尺寸代入有限元进行仿真验证,在 0~50 kPa 的压力范围内,方案 3 结构优化前后的活动梳齿的位移如图 8 所示。在 50 kPa 压力下,优化前后的输出位移分别为 2.97 和 3.87 μm 。根据式(4)计算,优化前后的灵敏度分别为 0.060 5 和 0.078 9 pF/kPa,优化后灵敏度提高了 30.4%。此外,优化前后结构的线性度都较高, $R^2=0.999 9$ 。

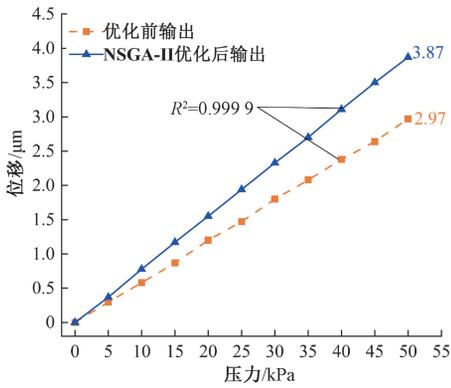


图8 优化前后压力与活动梳齿位移的关系

Fig. 8 Plot of pressure versus displacement of movable comb teeth before and after optimization

5 加工测试

采用 SOI 片 (P 型<100>) 对所设计的传感器进行加工。首先进行备片 (顶硅 $35 \pm 1 \mu\text{m}$, 埋氧层 $30\ 000 \pm 500 \text{ \AA}$, 底硅 $400 \pm 10 \mu\text{m}$), 如图 9-I 所示; 然后正面刻蚀对准标记以及划片槽如图 9-II 所示; 第 3 步刻蚀金属 Pad 点窗口; 第 4 步溅射 Pad 点 (溅射钛/铂, 厚度 $400/2\ 000 \text{ \AA}$), 如图 9-IV 所示; 刻蚀加工梳齿等结构如图 9-V 所示; 然后进行背腔刻蚀, 首先在背面刻蚀对准标记与正面进行对准, 并加工凸台结构如图 9-VII 所示, 然后二次深腔刻蚀 (深度 $350 \pm 1 \mu\text{m}$), 形成带凸台的背腔结构; 最后进行划片和结构释放, 如图 9-VIII 所示。

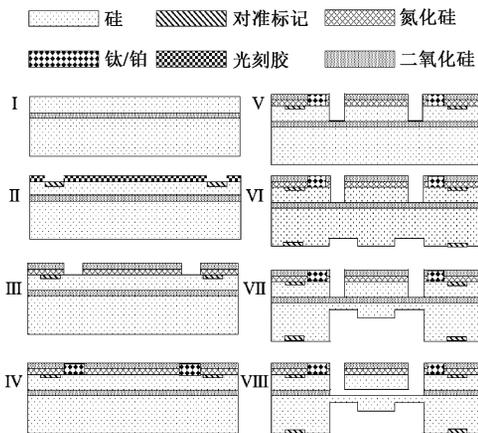


图9 传感器加工工艺流程

Fig. 9 Process flow diagram of sensor manufacturing

对加工后的芯片进行封装, 首先使用环氧树脂粘合剂将定制的多引脚 PCB 板粘结在压力测试管壳上, 然后将芯片粘结在 PCB 板上。粘结后的整体结构如图 10 所示。测试压力平台如图 11 所示, 压力源提供所需的外界

压力, 传感器通过定制的转接头固定在压力源输出端的支架上。当压力源施加压力时, 传感器的电容信号发生变化, 其输出的模拟电容信号, 经过数模转换最终形成数字信号输出到计算机上显示。

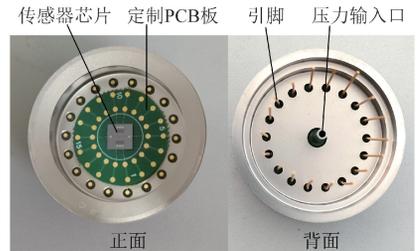


图10 传感器芯片粘好后的示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the sensor chip after bonding process



图11 传感器压力测试平台

Fig. 11 Sensor pressure test platform

在 0~50 kPa 的压力范围内, 每间隔 10 kPa 进行测试, 重复 3 次测试, 其输出结果如图 12 所示。

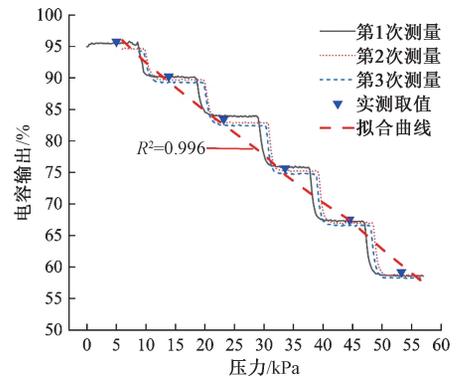


图12 0~50 kPa 压力范围内电容输出结果

Fig. 12 Capacitor output results for the pressure range of 0~50 kPa

随着施加压力的增大, 活动梳齿向上移动, 与固定梳齿的相对面积减小, 电容输出逐渐下降, 3 次测试输出结果基本一致, 最大误差 < 1%, 显示出较好的稳定性。在电容输出稳定时计算取平均值, 对取值点进行线性拟合, 线

性度 $R^2=0.996$,线性度较好,传感器的灵敏度经计算为 0.106 pF/kPa 。

优化后传感器与其他传感器的性能对比如表7所示。所设计传感器的灵敏度为 0.106 pF/kPa ,高于其他研究。非线性误差为 $0.4\% \text{ F.S.}$,略高于文献[23]。这主要是因为文献[23]中传感器的膜厚为 $70 \text{ }\mu\text{m}$,而本研究设计的传感器膜厚为 $50 \text{ }\mu\text{m}$ 。膜片厚度增加刚性提高,非线性减小。文献[28]中的传感器膜片较薄,但灵敏度较低且非线性较差,验证了平面梳齿结构相比平行板结构具有更优的性能。

表7 本研究与其他研究的对比

Table 7 Comparison between the results of this study and other studies

文献	压力范围 /kPa	膜片厚度 / μm	灵敏度 /($\text{pF}\cdot\text{kPa}^{-1}$)	非线性 /%FS
[23]	75~125 125~200	70	0.009 3 0.010 6	0.083 0.074
[24]	0~30	20	0.017 0	1.370
[28]	0~30	10	0.001 1	3.630
本研究	0~50	50	0.106 0	0.400

6 结 论

针对梳齿电容式压力传感器灵敏度低、灵敏度与量程难以同时优化的问题,提出了一种新型梁-膜结构梳齿电容式压力传感器,并采用CF与BP+NSGA-II结合的方法对传感器进行优化。在膜片上表面设置锚点和悬臂梁,构成杠杆放大结构,增大了活动梳齿的位移,进而提高了传感器的灵敏度。利用MATLAB对结构与性能参数进行数据拟合和定量分析,将数据集从14维降至6维,降维后的数据对输出结果无显著影响,同时确保了结果的准确性,并提升了数据采集效率。通过NSGA-II算法实现了灵敏度与量程的共同优化。结果表明,在 $0\sim 50 \text{ kPa}$ 的压力范围内,测得传感器灵敏度为 0.106 pF/kPa ,非线性误差为 $0.4\% \text{ F.S.}$ 。该方法为多参数复杂结构的优化设计提供了参考。展望未来,所设计的新型梁-膜结构电容式压力传感器具有灵敏度高、非线性低、易集成、低成本等优势,在生物医学及医疗保健等领域展现出广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 蒲明辉,冯向楠,罗国树,等. 基于结构解耦的新型电容式力矩传感器设计[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):10-17.
PU M H, FENG X N, LUO G SH, et al. Design of novel capacitive type torque sensor based on structural decoupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(2):10-17.
- [2] 李传昊,王军波,商艳龙,等. 介质隔离高精度MEMS谐振式压力传感器[J]. 仪器仪表学报,2023,44(4):219-227.
LI CH H, WANG J B, SHANG Y L, et al. Dielectrically isolated high-precision MEMS resonant pressure sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(4):219-227.
- [3] XU T ZH, ZHAO L B, JIANG ZH D, et al. A high sensitive pressure sensor with the novel bossed diaphragm combined with peninsula-island structure[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244:66-76.
- [4] XU T ZH, LU D J, ZHAO L B, et al. Application and optimization of stiffness abruption structures for pressure sensors with high sensitivity and anti-overload ability[J]. Sensors, 2017, 17(9):1965.
- [5] 黎琪慧,陈亚新,辛璟焘,等. 微型化三轴FBG振动传感器的角振动测量研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(5):43-50.
LI Q H, CHEN Y X, XIN J T, et al. Research on the angular vibration measurement of miniaturized triaxial FBG vibration sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(5):43-50.
- [6] 张龙赐,周国方,蓝镇立. 钛合金纳米薄膜压力传感器非线性及灵敏度研究[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(8):153-159.
ZHANG L C, ZHOU G F, LAN ZH L. Study for the nonlinearity and sensitivity of the titanium alloy nano film pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(8):153-159.
- [7] 郭志恒,任嘉铭. 一种新型应用于平面电容层析成像系统的电容阵列传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(6):195-203.
GUO ZH H, REN J M. Design of a novel capacitance array sensor for capacitance tomography system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,

- 2024,38(6):195-203.
- [8] LI C, ZHANG R, HAO L, et al. Development of a MEMS piezoresistive high-g accelerometer with a cross-center block structure and reliable electrode [J]. *Sensors*, 2024, 24(17):5540.
- [9] CHUAI S H, DENG J Y, LI H R, et al. Method for sensitivity improvement of MEMS pressure sensor: Structural design and optimization of concave resonant pressure sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(4):6206-6217.
- [10] KANEKAL D, JINDAL S K. Optimizing piezoresistive MEMS pressure sensor on a double cross beam silicon diaphragm with statistical curve-fitting and optimization techniques[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(1):169-176.
- [11] HAO L, LI C, WANG L K, et al. Design and fabrication of a high-temperature SOI pressure sensor with optimized crossbeam membrane[J]. *Micromachines*, 2023, 14(5):1045.
- [12] THAWORNATHIT P, JUNTASARO E, RATTANASONTI H, et al. Mechanical diaphragm structure design of a MEMS-based piezoresistive pressure sensor for sensitivity and linearity enhancement [J]. *Engineering Journal*, 2022, 26(5):43-57.
- [13] GUO X H, SHAO SH, HU B, et al. Topology optimization research and simulation analysis of high-performance MEMS pressure sensor [J]. *Microsystem Technologies*, 2024, 30:231-241.
- [14] MENG Q G, WANG J B, CHEN D Y, et al. A piezoresistive pressure sensor with centralized piezoresistors and a diamond-shape composite diaphragm[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 369:115134.
- [15] 许浩源,李媛媛. GA-BP 神经网络对 SAW 压力传感器测量数据的拟合[J]. *电子测量与仪器学报*,2021, 35(4):7-14.
- XU H Y, LI Y Y. Fitting analysis of SAW micro pressure sensor measurement data by ga optimized BP neural network [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021,35(4):7-14.
- [16] LYU M CH, LI P H, MIAO J Q, et al. Design and optimization of MEMS resonant pressure sensors with wide range and high sensitivity based on BP and NSGA-II [J]. *Micromachines*, 2024, 15(4):509.
- [17] VARASTEANU P, KUSKO M. A multi-objective optimization of 2D materials modified surface plasmon resonance (SPR) based sensors: An NSGA II approach[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(10):4353.
- [18] MENG Q G, WANG J B, CHEN D Y. et al. A novel evolutionary method for parameter-free MEMS structural design and its application in piezoresistive pressure sensors [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9(1):134.
- [19] LIU J H, LI P H, ZHUANG X Y, et al. Design and optimization of hemispherical resonators based on PSO-BP and NSGA-II [J]. *Micromachines*, 2023, 14(5):1054.
- [20] MIAO J Q, LI P H, LYU M CH, et al. Resonant MEMS accelerometer with low cross-axis sensitivity—optimized based on BP and NSGA-II algorithms [J]. *Micromachines*[J]. 2024, 15(8):1049.
- [21] HUANG X, ZHANG D CH. A high sensitivity and high linearity pressure sensor based on a peninsula-structured diaphragm for low-pressure ranges [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 216:176-189.
- [22] KANG M C, RIM C S, PAK Y T, et al. A simple analysis to improve linearity of touch mode capacitive pressure sensor by modifying shape of fixed electrode[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 263:300-304.
- [23] LI X J, JIANG ZH D, ZHAO L B, et al. The design of a high precision capacitive pressure sensor based on comb electrode [J]. 2019 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall*, 2019:2965-2971.
- [24] LIU ZH Y, PAN Y CH, WU P, et al. A novel capacitive pressure sensor based on non-coplanar comb electrodes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 297:111525.
- [25] LIU ZH Y, ZHU Y S, DU L D, et al. Modeling and analysis of MEMS capacitive pressure sensors with vertical comb fingers [J]. *Microsystem Technologies*, 2023, 29(6):795-805.
- [26] SHAO Q Q, YANG G X, JIA J X, et al. A sensitivity enhanced touch mode capacitive pressure sensor with double cavities [J]. *Microsystem Technologies*, 2023, 29(5):755-762.
- [27] GHANAM M, GOLDSCHMIDTBOEING F, BILGER T, et al. MEMS shielded capacitive pressure and force sensors with excellent thermal stability and high operating temperature[J]. *Sensors*, 2023, 23(9):4248.

- [28] CHEN W J, YANG Q, LIU Q, et al. Study of a novel capacitive pressure sensor using spiral comb electrodes[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(12):125111.
- [29] KANG M C, RI CH, CHOE J H. Capacitance response of concave well substrate touch-mode capacitive pressure sensor: Mathematical analysis and simulation [J]. *Microelectronics Journal*, 2021, 114:105118.
- [30] 贾宝惠,丁梓航,肖海建,等. 基于梳状式电容传感器的滑油磨粒检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(12):49-57.
JIA B H, DING Z H, XIAO H J, et al. Detection method of lube wear particle based on comb type capacitance sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(12):49-57.
- [31] VARMA M A, JINDAL S K. Novel design for performance enhancement of a touch-mode capacitive pressure sensor: Theoretical modeling and numerical simulation[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2018, 17(3):1324-1333.

作者简介



梁瑞梅,2022年于山东理工大学获得学士学位,现为山东理工大学在读硕士研究生,主要研究方向 MEMS 电容式传感器。

E-mail: lrm25790@163.com

Liang Ruimei received her B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2022. She is currently a master student at Shandong University of Technology. Her main research interest includes MEMS capacitive pressure sensors.



庄须叶(通信作者),2004年于西南石油大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为山东理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为 MEMS 传感器。

E-mail: zxye@sdu.edu.cn.

Zhuang Xuye (Corresponding author) received his B. Sc. degree from SouthWest Petroleum University in 2004 and received his Ph. D. degree from Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2009. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Shandong University of Technology. His main research interest includes MEMS sensors.