

MEMS 压阻式压力传感器梁-膜-三岛膜结构设计及优化



郭威¹, 李辉¹, 罗登玲¹, 刘细辉¹, 邹力¹, 李绍荣¹,
郭小伟^{1,2*}, 唐普英¹

(1. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 610054; 2. 电子科技大学 长三角研究院(湖州), 湖州 313001)

摘要 传统的压阻式压力传感器虽然灵敏度高但非线性度也高。针对该问题, 设计了一种以敏感膜片为梁-膜-三岛结构新型压阻式压力传感器, 通过在敏感膜片上设计 3 个方岛结构来提高传感器的线性度和抗过载能力; 同时, 利用敏感膜片上设计的短窄梁结构形成应力集中区, 保证压力传感器的高灵敏度。对结构进行仿真分析, 建立压力膜尺寸参数与力学性能之间的数学模型, 对数学模型参数进行了分析、拟合和求解, 最后求解非线性约束条件下的极值, 完成尺寸优化, 传感器性能得到提升。结果表明: 在保证传感器低非线性度的条件下, 提高了压力传感器的灵敏度, 具有良好的力学性能。

关键词 MEMS; 压力传感器; 有限元仿真; 设计与优化

中图分类号 TP73 文献标志码 A DOI 10.12178/1001-0548.2023010

Design and Optimization of a Beam-Membrane-Three-Island Structure of MEMS Piezoresistive Pressure Sensor

GUO Wei¹, LI Hui¹, LUO Dengling¹, LIU Xihui¹, ZOU Li¹, LI Shaorong¹, GUO Xiaowei^{1,2*}, and TANG Puying¹

(1. School of Optical Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313001, China)

Abstract The traditional piezoresistive pressure sensor has high sensitivity but also high nonlinearity. To solve this problem, this paper designs a new piezoresistive pressure sensor with a sensing diaphragm of beam-membrane-three-island structure. By designing three square island structures on the sensing diaphragm, the linearity and overload resistance of the sensor are improved. At the same time, the stress concentration zone is formed by the short narrow beam structure designed on the sensitive diaphragm to ensure the high sensitivity of the pressure sensor. The structure is simulated and analyzed, the mathematical model between the size parameters of the pressure film and the mechanical properties is established, and the parameters of the mathematical model are analyzed, fitted and solved. Finally, the extreme values under the nonlinear constraint conditions are solved to complete the size optimization, so that the performance of the sensor is improved. The optimization results show that the sensitivity of the pressure sensor is improved and the mechanical properties are good under the condition of ensuring the low nonlinearity of the sensor.

Key words MEMS; pressure sensor; finite element simulation; design and optimization

MEMS 行业近年来发展迅速, 基于 CMOS 制造工艺的 MEMS 技术开发正在应用于越来越多的系统和设备中^[1]。基于压阻效应的 MEMS 压力传感器在航空航天、生物医学、汽车和海洋科学等领域的测量、管理和监测压力的变化等方面也有着广泛且重要的应用^[2]。在这些领域, MEMS 压阻式压力传感器的高灵敏度和低非线性度, 小型化和轻量化以及极高的可靠性是其发挥重要作用的保障^[3]。

随着航空航天科技的发展, 许多压阻式压力传感器需要用于微压力测量。根据压力与高度的关系, 通过测量压力可以得到飞机测高。由于高空压力极低, 需要很高的灵敏度和低非线性度来保证轨道修正的精度和准确性。此外, 微压力传感器在地球大气环境下的抗过载性能要求也很高。因此, 研制具有高灵敏度、低非线性度和高抗过载的微型压力传感器对航空航天科技事业的发展具有重要的意

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2024-03-18

作者简介: 郭威, 主要从事 MEMS 传感器设计及制造方面的研究。

*通信作者 E-mail: gxw@uestc.edu.cn

义和必要性^[4]。

MEMS 压阻式压力传感器是利用材料的压阻效应, 在外加压力的作用下, 使传感器敏感膜片材料的电阻率发生变化, 导致电阻的变化从而使输出电压发生变化, 即将敏感膜片压力的变化转化为输出电压信号的变化, 然后通过惠斯通电桥电路和外加信号放大电路等电路测量出电压的变化, 从而得到传感器的压力值^[5]。敏感膜片是压阻式压力传感器的核心部件^[6]。当外加压力作用于压力传感器的敏感膜片上时, 敏感膜片会发生弯曲形变, 外加压力对敏感膜片做的功会以应变能的形式储存在压力薄膜中, 使得敏感膜片表面形成压力梯度^[7]。为了提高传感器的检测灵敏度, 通常需要将压阻条放置在应力集中区, 也就是压力膜表面应力较大区域, 来最大限度地提高压力传感器的灵敏度^[8]。对于压力传感器中传统的 C 型与 E 型膜片结构, 在外加输入压力时, 压力膜表明产生的应力会随着膜片厚度的减小而增大。应力越大, 灵敏度越高, 但压力膜的形变也越大, 导致其非线性度也增大^[9]。因此, 通过对压力膜结构进行合理的设计与优化来提高灵敏度、降低非线性度, 具有十分重要的工程意义。

针对这一问题, 国内外学者展开了许多关于改进压力膜结构以提高灵敏度并降低非线性度的研究。文献 [10] 提出一种以梁-膜-单岛膜结构构成的高灵敏度 MEMS 压力传感器。传感器通过在传统的有槽膜片中引入敏感梁和方岛结构的形式, 提高传感器的局部刚度和抗过载性。与传统的有槽膜片和平膜片结构相比, 该结构具有高灵敏度和高抗过载的优点。当梁-膜-单岛膜结构传感器在室温下, 外界施加压力 0.5 kPa 时, 该压力传感器的灵敏度为 11.098 (mV/V)/kPa。文献 [11] 设计研发了一种以梁-膜-四岛结构为压力膜结构的 MEMS 压阻式压力传感器。这种膜结构在传统的 C 型膜中引入岛和短梁结构, 是梁-膜-单岛结构的一种改进结构。该压力膜结构通过引入一段短窄梁和方岛结构, 在压力膜边缘的 4 根短梁上形成应力集中区域以增强灵敏度, 在压力膜正面引入 4 个方岛结构来降低压力膜的变形挠度以降低非线性度。该膜结构传感器在室温下施加外界压力为 0.5 kPa 时, 灵敏度可达到 17.795 (mV/V)/kPa。文献 [12] 设计了一种以梁-膜-双岛结构为压力膜结构的新型 MEMS 压阻式压力传感器。该压力传感器的膜结构包含 2 个方岛结构和 3 个短窄梁结构。2 个方岛和 3 个短窄梁串联在压力膜中, 方岛

结构用来减小压力膜的变形挠度, 提高过载, 降低其非线性度。3 根短窄梁上形成应力集中区域, 提高压力传感器的灵敏度。这种梁-膜-二岛膜结构的压力传感器在室温下, 当外界压力为 0.5 kPa 时, 灵敏度可达到 17.339 (mV/V)/kPa。

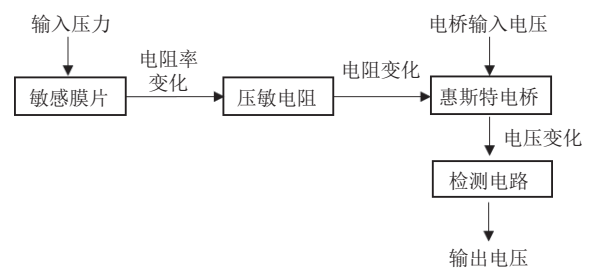
虽然梁-膜-单岛结构、梁-膜-双岛结构和梁-膜四岛结构被提出来, 但是兼具高灵敏度和低非线性度的压阻式压力传感器依然难以实现。本文从传统的 C 型和 E 型压力膜片出发, 结合以上 3 种岛状结构特点, 设计了一种以梁-膜-三岛结构为压力膜结构的压阻式压力传感器, 在保证其低非线性度的条件下, 提高了压力传感器的灵敏度, 获得了良好的力学性能。本文设计的压力传感器测量范围为 0~0.5 kPa, 具有超 200 倍的抗过载能力, 主要适用于需要高灵敏度和高抗过载性能的航空航天、无人驾驶、消费电子等领域。

1 压力膜设计

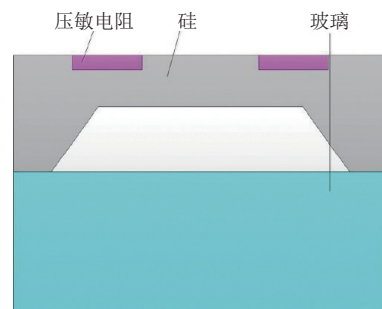
1.1 原理

1.1.1 压阻式压力传感器的基本理论

MEMS 压阻式压力传感器的压力膜因外界压力而发生形变, 导致压力膜上产生不均匀的应力应变。将压敏电阻放置在应力较高区域, 受到应力作用的压敏电阻的阻值发生相对变化, 通过惠斯通电桥电路实现压力的输出, 然后检测电阻发生相对变化后电压的变化即可实现对压力大小的测量, 图 1 为 MEMS 压阻式压力传感器原理图。



a. MEMS 压阻式压力传感器工作流程图



b. MEMS 压阻式压力传感器原理结构图

图 1 MEMS 压阻式压力传感器原理图

MEMS 压阻式压力传感器传感原理的核心为材料的压阻效应。本文设计的压力传感器压力膜的材料选用轻掺杂的 N 型硅, 压敏电阻材料选用轻掺杂的 P 型硅, 因此压敏电阻 R 的相对变化可写为^[13]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi E \nu = \pi \sigma \quad (1)$$

式中, σ 为压敏电阻受到的应力; ν 为压敏电阻受到的应变; π 为硅材料的压阻系数; E 为硅材料弹性模量。

由于 P 型硅和 N 型硅的压阻系数不一致, 在弹性膜片受到压力作用时, P 型压敏电阻的相对变化关系式为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \quad (2)$$

式中, π_l 为纵向压阻系数; π_t 为横向压阻系数; σ_l 为压敏电阻受到的纵向应力; σ_t 为压敏电阻受到的横向应力; ΔR 为压敏电阻的变化量; R 为压敏电阻; π_{44} 为剪切压阻系数。压力传感器信号输出电路主要由惠斯通电桥电路构成, 假设惠斯通电桥的 4 个电阻器阻值变化量均为 ΔR , 则输出电压与输入电压的关系为:

$$V_{out} = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) V_{in} = (\pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t) V_{in} \quad (3)$$

式中, V_{out} 为输出电压; V_{in} 为输入电压。

当压敏电阻为 P 型硅时, 则压阻系数 $\pi_l = \pi_{44}/4$, $\pi_t = -\pi_{44}/4$, $\pi_{44} = 138.1 \times 10^{-11}/\text{Pa}$, 则式 (3) 可写成:

$$V_{out} = \frac{\pi_{44}}{2} (\sigma_l - \sigma_t) V_{in} \quad (4)$$

从式 (4) 中可以看出, 输出电压与压敏电阻的纵、横向应力之差 σ_d ($\sigma_d = \sigma_l - \sigma_t$) 成正比关系, 因此, 如何提升传感器的灵敏度, 即如何提升压敏电阻的纵、横向应力之差 σ_d , 对压力传感器性能的提升有重要作用。

同时, 为了保证压力传感器结构的有效性和安全性, 压力传感器敏感膜片所受到的屈服点应力应不大于传感器冯·米赛斯应力的 $1/n$ 倍, 即:

$$\sigma_{overload} \leq \frac{\sigma_b}{n} \quad (5)$$

式中, $\sigma_{overload}$ 为屈服点应力; σ_b 为冯·米赛斯应力; n 为材料的安全系数, 通常 n 取大于 1 的安全系数, 保证结构的有效性。

1.1.2 薄板弯曲的小挠度理论

当弹性压力薄膜的形变挠度相对于膜的厚度超过一定的尺寸时, 传统的大挠度理论就无法有效利用, 挠度与外界施加压力之间的线性关系变为非线

性。为了解决弹性压力薄膜变形挠度过大引起非线性度升高的问题, 采用了一种已知边界条件下的薄板固支小挠度理论^[14]。建立外界施加的总压力荷载 P 与薄板的大挠度方程如下:

$$\frac{Pa^4}{E_h^4} = 68.44 \times \left(\frac{w_0}{h} \right) + 43.27 \times \left(\frac{w_0}{h} \right)^3 \quad (6)$$

a^4/E_h^4 为相对压力; w_0/h 为相对膜厚的挠度变化。将小挠度理论与大挠度理论的相对压力与挠度变化进行对比, 关系如图 2 所示。

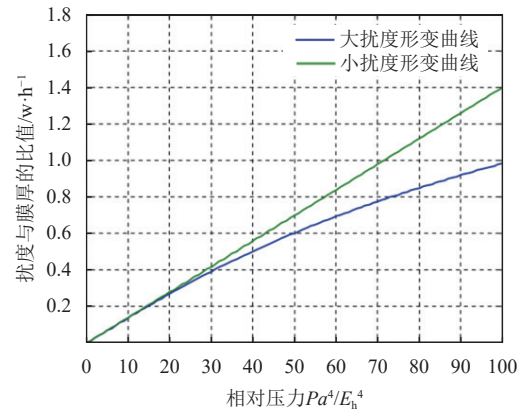


图 2 不同挠度理论的相对压力与挠度变化关系图

当大挠度效应时, 应变-位移关系为非线性。只有当挠度小于膜厚度的 $1/5$ 时, 小挠度理论成立, 此时的应变-位移关系为线性关系^[15]。

非线性误差表征的是压力传感器输出的线性程度, 为了降低压力传感器的非线性度, MEMS 压阻式压力传感器在设计时应该遵循小挠度形变原则, 即压力传感器的敏感膜片在满量程压力作用下的最大变形挠度应不大于敏感膜片膜厚尺寸的 0.2 倍。当最大变形挠度小于或等于敏感膜片膜厚尺寸的 0.2 倍时, 理论上可以获得不高于 $1\%FSS$ 的非线性度, 如果超过了膜厚的 0.2 倍, 压力传感器的非线性误差会显著增大, 影响其输出性能。

1.1.3 膜片形状的选择

在压力传感器膜片整体形状的选择中, 由于平面方形膜片在相同条件下比圆形膜片和矩形膜片应力分布较集中。根据弹性理论, 方形膜、矩形膜和圆形膜的最大机械应力公式如下:

$$\sigma_{sm} = 0.308P \left(\frac{L}{H} \right)^2 (1 - \mu^2) \quad (7)$$

$$\sigma_{cm} = 0.75P \left(\frac{R}{H} \right)^2 (1 - \mu^2) \quad (8)$$

$$\sigma_{rm} = 0.383P \left(\frac{B}{H} \right)^2 (1 - \mu^2) \quad (9)$$

式中, σ_{sm} 、 σ_{cm} 和 σ_{rm} 为方形膜、圆形膜和矩形膜的最大应力; P 为施加的压力; H 为膜厚度; μ 为泊松比; L 为方形膜的边长; R 为圆形膜的半径; B 为矩形膜的宽度。假设 3 种模型的膜厚 H 和外加载荷 P 完全相同, 正方形边长 L 分别为圆形半径 R 的 2 倍和矩形边长 B 的 1.2 倍, 则可得:

$$\sigma_{sm} \approx 1.16\delta_{rm} \approx 1.64\sigma_{cm} \quad (10)$$

当传感器的弹性膜片形状为方形膜片时, 其应力较同尺寸的圆形膜片提升约 60%, 较同尺寸的矩形膜片提升约 15%, 极大地改善了弹性膜片表面的应力分布, 提高了传感器的灵敏度^[16]。

1.1.4 岛状结构的优势

对于压力膜抗过载结构的设计, 由传统 E 型膜片结构和传统 C 型膜片结构对比可知, E 型结构的灵敏度、线性度和抗过载特性也都优于 C 型结构, 岛状结构具有显著的力学性能优势。

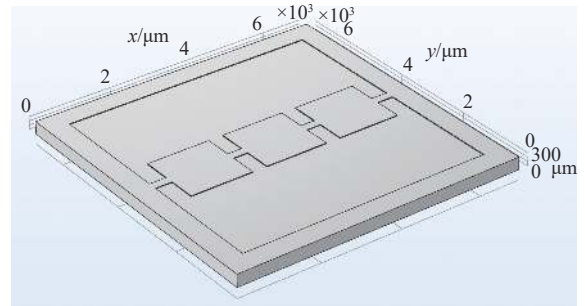
因此, 在平面压力弹性膜中设计方岛结构能够有效提高压力膜的局部刚度, 增强其抗过载能力, 并且减少压力弹性膜片的最大变形扰度, 使其发生小扰度形变, 极大地降低了非线性度。如文献 [17] 设计了一种敏感膜片形状为 E 型结构的压阻式压力传感器; 文献 [18] 设计了一种压力敏感膜片结构为十字架结构的平面方膜压阻式压力传感器; 文献 [10] 研发了一种压力膜结构为梁-膜-单岛结构的压阻式压力传感器; 文献 [12] 设计了一种压力膜结构为梁-膜-双岛结构的压阻式压力传感器; 文献 [11] 设计了一种压力膜结构为梁-膜-四岛结构的压阻式压力传感器。

本文研究和设计的思路是在保证敏感膜片最大变形扰度 w_{max} 满足小扰度形变原则的基础上, 形成应力集中区来提升压敏电阻的纵向、横向应力之差 σ_d , 即提升传感器的灵敏度, 同时采用一些新的结构设计, 增强压力膜的抗过载性, 设计优化得到力学性能更好的压阻式压力传感器。

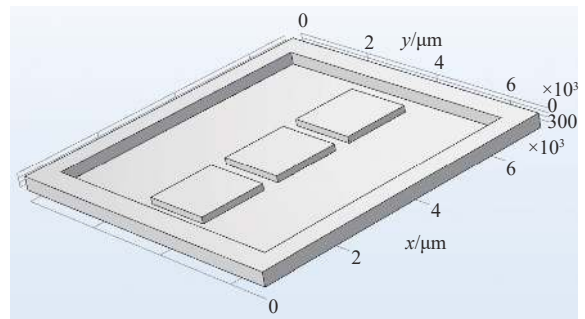
1.2 结构设计

利用仿真分析软件, 采用参数化建模方式, 建立梁-膜-三岛压力膜三维结构如图 3 所示。敏感膜片整体选择方形膜片, 这样能获得相对于圆形膜片更高的机械应力; 同时, 膜片中的短窄梁结构形成高应力集中区, 将压敏电阻放置在此区域, 且与惠斯通电桥和外部的检测电路等相连接, 来测量压力传感器的电压值, 有助于提高传感器的灵敏度; 敏感膜片中的方岛结构有助于增加压力膜片的局部刚度, 进而提高传感器的抗过载能力, 减小传感器压力膜因受外部压力而产生的变形扰度, 降低传感

器的非线性度, 对传感器的压力薄膜也形成一种保护。其中, 两相邻的方岛之间通过短窄梁结构相连接, 短窄梁和方岛的高度一致, 这样有利于传感器敏感膜片的加工制造以及敏感膜片的结构尺寸优化。



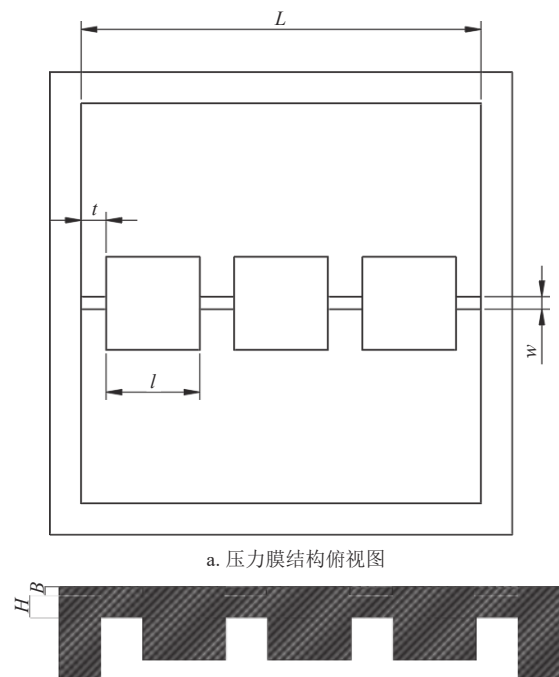
a. 压力膜三维结构正投影



b. 压力膜三维结构逆投影

图 3 梁-膜-三岛压力膜三维结构图

图 4 为压力传感器的二维视图和主要的几何尺寸参数, 包括模长 L 、膜厚 H 、短窄梁长度 t 、短窄梁宽度 w 、方岛宽度 l 和方岛与短窄梁的高度 B 。



a. 压力膜结构俯视图

b. 压力膜3个方岛中线A-A横截面视图

图 4 梁-膜-三岛压力膜二维结构图

2 性能仿真

2.1 确定几何尺寸参数范围

结合敏感膜片的小扰度变形原则, 即压力传感器的敏感膜片在满量程压力作用下的最大变形扰度应不大于敏感膜片膜厚尺寸的 0.2 倍, 当梁-膜-三岛结构的设计量程为 0~500 Pa 时, 综合分析压力传感器的设计要求、制作工艺和实际需求, 得出梁-膜-三岛结构的敏感膜片几何尺寸参数范围如表 1 所示。

表 1 压力膜的几何尺寸参数范围

参数	范围
模长 L	$5\ 400 \leq L \leq 6\ 400$
膜厚 H	$20 \leq H \leq 30$
短窄梁长度 t	$150 \leq t \leq 600$
短窄梁宽度 w	$150 \leq w \leq 600$
方岛宽度 I	$1\ 500 \leq I \leq 1\ 600$
方岛与短窄梁的高度 B	$5 \leq B \leq 20$

2.2 性能仿真分析

在敏感膜片的参数范围内取 $L=6\ 000\ \mu\text{m}$, $H=20\ \mu\text{m}$, $t=400\ \mu\text{m}$, $w=200\ \mu\text{m}$, $I=1\ 500\ \mu\text{m}$, $B=20\ \mu\text{m}$ 。利用仿真分析软件对其进行建模和仿真分析, 得到梁-膜-三岛结构的位移挠度 w_{max} 分布的仿真分析结果如图 5 所示, 梁-膜-三岛结构的纵、横应力之差 σ_{d} 分布的仿真分析结果如图 6 所示。

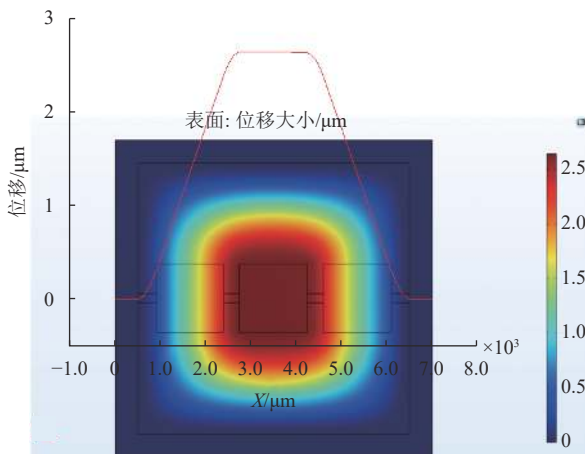


图 5 梁-膜-三岛结构挠度 w 分布

由仿真分析结果可以得知, 梁-膜-三岛结构在 4 个短窄梁处形成了高应力集中区域, 其中靠近敏感膜片边缘的两个短窄梁应力集中区的最大纵、横应力之差最大, 为 $\sigma_{\text{dmax}} = 5\ 374\ 282.89\ \text{Pa}$; 最大位移扰度为 $w_{\text{max}} = 2.691\ 3\ \mu\text{m}$, 位于敏感膜片的几何中心处。

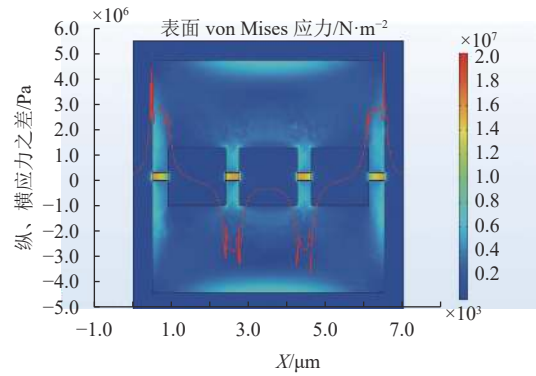


图 6 梁-膜-三岛结构纵、横应力之差 σ_{d} 分布

3 数学建模

为了提高压力传感器的灵敏度, 降低其非线性, 同时确定压力传感器的几何尺寸参数, 便于后期的尺寸优化和性能提升, 建立压力传感器敏感薄膜的几何尺寸与压力传感器力学性能之间的关系, 即几何尺寸与最大变形挠度 w_{max} 和最大纵、横应力之差 σ_{dmax} 之间的关系^[19]。在建立数学模型时, 先建立模型关系式的数学函数, 再通过参数化扫描分析出敏感薄膜的各尺寸参数变化对压力传感器力学性能的影响, 通过曲线拟合的办法, 拟合出压力膜各几何尺寸参数变量与最大变形挠度 w_{max} 和最大纵、横应力之差 σ_{dmax} 的幂指数函数关系式, 最后利用待定系数法计算出各个待系数并求出数学关系式具体函数。

3.1 确定数学模型

根据压阻式压力传感器传统 C 型敏感膜片结构的数学模型公式, 其应力和最大挠度是关于敏感膜片结构尺寸参数变量的幂函数, 结合敏感膜片的小扰度变形原则和梁-膜-三岛膜结构与 C 型膜片结构相似的特点, 同时, 弹性模量 E 与压力膜受压变形时的挠度 w 成反比关系, 但弹性模量 E 对应力 σ 几乎没有影响的特点^[20], 建立梁-膜-三岛结构的数学模型函数, 其关系式可写为:

$$w_{\text{max}} = K_1 P E^{-1} L^{m_1} H^{n_2} t^{m_3} w^{n_4} I^{m_5} B^{n_6} \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{dmax}} = K_2 P L^{m_1} H^{m_2} t^{m_3} w^{m_4} I^{m_5} B^{m_6} \quad (12)$$

式中, w_{max} 是敏感膜片受压力时的最大变形挠度; σ_{dmax} 是敏感膜片表面纵向应力与横向应力的最大差值, 即 $\sigma_{\text{d}} = \sigma_x - \sigma_y$; L 为压力传感器压力膜长度, 简称模长; H 为压力膜厚度, 简称膜厚; t 为压力膜中短窄梁长度, 简称梁长; w 为压力膜中短窄梁的宽度, 简称梁宽; I 为压力膜中方岛的

宽度, 简称岛宽; B 为压力膜中方岛与短窄梁的高度, 简称梁和岛高; P 为压力膜上表面受到的压力, E 为传感器的弹性模量; K_1 、 K_2 为函数的待定系数。 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 、 n_6 和 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 、 m_6 是尺寸参数曲线的拟合系数。

为了确定出式 (11) 和式 (12) 中的各项系数, 当压力膜每一个尺寸参数变量在其确定的范围内变化时, 其余参数变量应设置为任意常数。对其进行有限元仿真时, 压力设置为 500 Pa, 梁-膜-三岛结构的其他几何尺寸变量设定的常数值与选取尺寸一致, 如表 2 所示。

表 2 压力膜的几何尺寸变量的常数值

参数	值	μm
膜长 L	6 000	
膜厚 H	20	
短窄梁长度 t	400	
短窄梁宽度 w	200	
方岛宽度 I	1 500	
方岛与短窄梁的高度 B	20	

3.2 曲线拟合及拟合误差分析

当对压力膜的一个尺寸参数变量的拟合函数系数确定时, 压力膜参数变量应该在其确定的范围内变化, 其余的参数应设置为任意常数, 再利用相关绘图软件对变化的数据进行绘制和曲线拟合, 得出某一尺寸参数变化对压力传感器力学性能的影响和具体的拟合系数, 分析拟合误差并且求出拟合函数。

如对压力传感器压力膜长度 L 进行曲线拟合时, 先用有限元仿真软件对膜长 L 进行参数化扫描, 参数范围选择表 1 中的几何尺寸参数范围, 然后再利用软件绘制和拟合参数化扫描后的数据, 拟合的图像如图 7 所示。利用参数化扫描后拟合图形的变化趋势和式 (11) 和式 (12) 确定膜长 L 的拟合函数如下:

$$w_{\max}(L) = K_{1L} L^{n_1} \quad (13)$$

$$\sigma_{d\max}(L) = K_{2L} L^{m_1} \quad (14)$$

式中, w_{\max} 为最大变形扰度; $\sigma_{d\max}$ 为最大纵、横应力之差; K_{1L} 、 K_{2L} 为膜长 L 参数拟合时的待定系数。

软件对尺寸参数膜长 L 变化拟合后的函数结果为:

$$w_{\max}(L) = 7.11978 \times 10^{-15} L^{3.85974} \quad (15)$$

$$\sigma_{d\max}(L) = 0.00553 L^{2.3748} \quad (16)$$

对仿真计算的数据 w_{\max} 、 $\sigma_{d\max}$ 进行曲线拟合后, 对拟合方程的拟合误差进行评估时, 优先选用决定系数 R^2 和残差平方和 RSS。决定系数 R^2 越趋近于 1 时, 表明回归曲线与真实数据吻合度越好, RSS 是指预测数据与实际经验值之间的偏差, RSS 的值越小, 表明拟合程度越好^[21]。

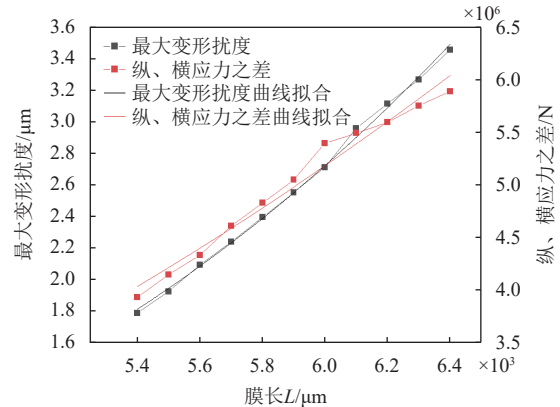


图 7 膜长 L 的参数化扫描拟合图像

拟合结果中, 最大变形扰度 w_{\max} 拟合函数的决定系数 $R^2=0.997 83$, 残差平方和 $RSS=0.006 81$, 具有很好的拟合效果; 最大纵、横应力之差 $\sigma_{d\max}$ 拟合后函数决定系数 $R^2=0.976 3$, 残差平方和 $RSS=1.092 57 \times 10^{11}$, 有很好的拟合效果, 具有很高的拟合度。

采用相同的方法, 对压力膜的其余 5 个尺寸参数逐一仿真计算, 曲线拟合和误差分析后得到各尺寸参数与压力膜力学性能之间的幂函数关系式如下:

$$w_{\max}(H) = 3.18817212 \times 10^3 H^{-2.35538} \quad (17)$$

$$\sigma_{d\max}(H) = 4.81294 \times 10^{-8} H^{-1.51822} \quad (18)$$

对膜厚 H 进行拟合后, 拟合的图像如图 8 所示, 最大变形扰度 w_{\max} 拟合函数的决定系数 $R^2=0.998 57$, 残差平方和 $RSS=0.004 45$, 最大纵、横应力之差 $\sigma_{d\max}$ 拟合函数的决定系数 $R^2=0.957 19$, 残差平方和 $RSS=2.595 26 \times 10^{11}$, 具有很高的拟合度。

$$w_{\max}(t) = 0.82427 t^{0.20139} \quad (19)$$

$$\sigma_{d\max}(t) = 4.71918 \times 10^{-7} t^{-0.36956} \quad (20)$$

对梁长 t 进行拟合后, 拟合的图像如图 9 所示, 最大变形扰度 w_{\max} 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.984 15$, 残差平方和 $RSS=0.008 41$, 最大纵、横应力之差 $\sigma_{d\max}$ 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.970 42$, 残差平方和 $RSS=2.621 92 \times 10^{11}$, 具有很

高的拟合度。

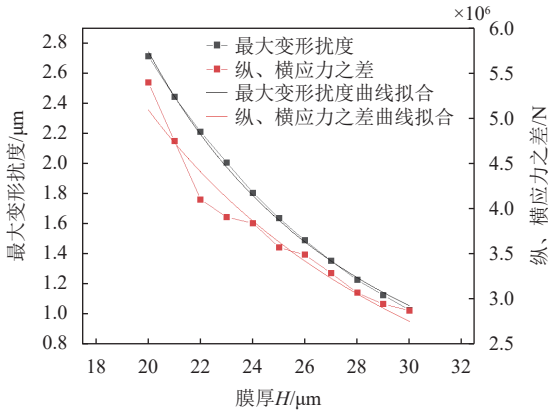


图 8 膜宽 H 的参数化扫描拟合图像

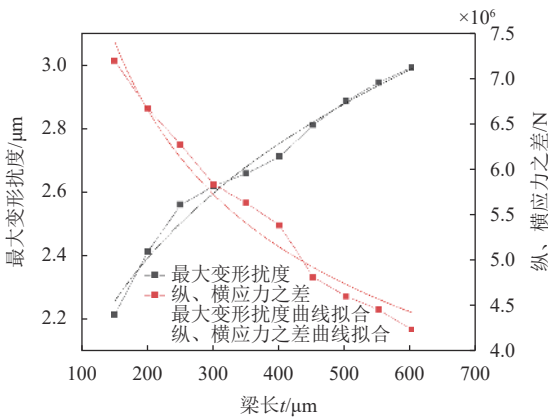


图 9 梁长 l 的参数化扫描拟合图像

$$w_{\max}(w) = 1.08732 \times 10^1 w^{-0.2647} \quad (21)$$

$$\sigma_{d\max}(w) = 4.43625 \times 10^{-7} w^{-0.40361} \quad (22)$$

对梁宽 w 进行拟合后, 拟合的图像如图 10 所示, 最大变形扰度 w_{\max} 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.98924$, 残差平方和 $RSS=0.00828$, 最大纵、横应力之差 $\sigma_{d\max}$ 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.96685$, 残差平方和 $RSS=2.12359 \times 10^{11}$, 具有很高的拟合度。

$$w_{\max}(I) = 6.64412283 \times 10^3 I^{-1.06335} \quad (23)$$

$$\sigma_{d\max}(I) = 4.76686 \times 10^{-8} I^{-0.61275} \quad (24)$$

对岛宽 I 进行拟合后, 拟合的图像如图 11 所示, 最大变形扰度 w_{\max} 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.99838$, 残差平方和 $RSS=5.77748 \times 10^5$, 最大纵、横应力之差 $\sigma_{d\max}$ 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.99901$, 残差平方和 $RSS=4.76082 \times 10^8$, 具有很高的拟合度。

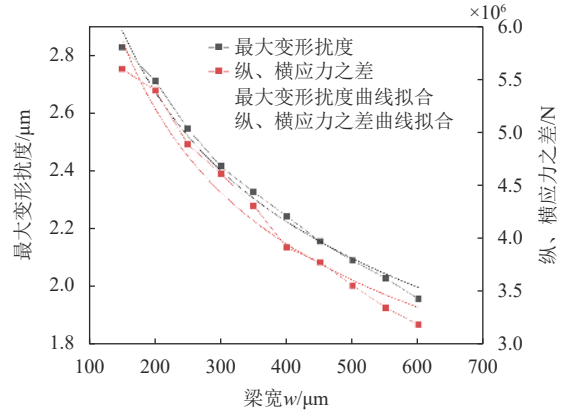


图 10 梁宽 w 的参数化扫描拟合图像

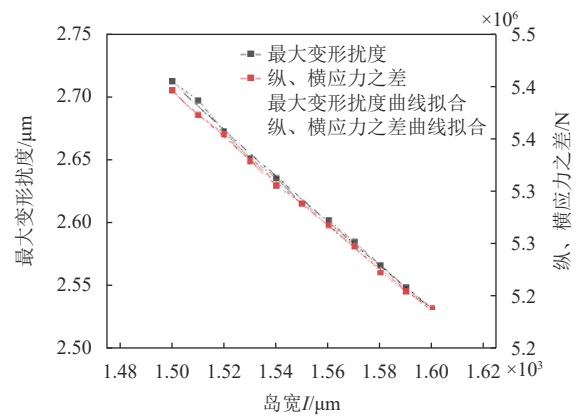


图 11 岛宽 I 的参数化扫描拟合图像

$$w_{\max}(B) = 5.23245B^{-0.20422} \quad (25)$$

$$\sigma_{d\max}(B) = 1.31944 \times 10^{-7} B^{-0.30903} \quad (26)$$

对梁和岛高 B 进行拟合后, 拟合的图像如图 12 所示, 最大变形扰度 w_{\max} 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.89616$, 残差平方和 $RSS=0.14266$, 最大纵、横应力之差 $\sigma_{d\max}$ 的拟合函数的决定系数 $R^2=0.87878$, 残差平方和 $RSS=1.48534 \times 10^{12}$, 具有很好的拟合度。

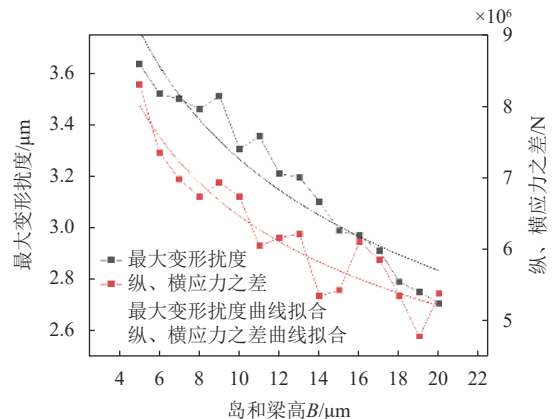


图 12 梁和岛高 B 的参数化扫描拟合图像

3.3 数学建模求解

将式(15)~式(26)中的拟合函数的系数代入建立的梁-膜-三岛结构关系式(11)和式(12)中,得到:

$$w_{\max} = K_1 P E^{-1} L^{3.85974} H^{-2.35538} t^{0.20139} w^{-0.2647} \times I^{-1.06335} B^{-0.20422} \quad (27)$$

$$\sigma_{\text{dmax}} = K_2 P L^{2.3748} H^{-1.51822} t^{-0.36956} w^{-0.40361} \times I^{-0.61275} B^{-0.30903} \quad (28)$$

接下来确定式(27)和式(28)中的 K_1 和 K_2 的值,将选取的尺寸、仿真参数和仿真分析得到的最大变形扰度 w_{\max} 和最大纵、横应力之差 σ_{dmax} 代入式(27)和式(28)中,计算得到系数 $K_1=2.7815$,系数 $K_2=0.2179 \times 10^6$ 。则梁-膜-三岛结构的压力膜的数学模型关系为:

$$w_{\max} = 2.7185 P E^{-1} L^{3.85974} H^{-2.35538} t^{0.20139} w^{-0.2647} \times I^{-1.06335} B^{-0.20422} \quad (29)$$

$$\sigma_{\text{dmax}} = 0.2179 \times 10^{-6} P L^{2.3748} H^{-1.51822} \times t^{-0.36956} w^{-0.40361} I^{-0.61275} B^{-0.30903} \quad (30)$$

4 尺寸优化

对于MEMS压阻式压力传感器,设计思路是在保证传感器的高线性度的同时,尽可能提升传感器的灵敏度。因此,在保证敏感膜片在受到满量程压力作用下的最大变形扰度 w_{\max} 满足小扰度变形原则的基础上,尽量增大敏感膜片的感压面积和应力集中性来提升压敏电阻的纵向、横向应力之差 σ_d ,即提升传感器的灵敏度,优化得到更好的性能。

4.1 确定优化模型函数

对压力膜的尺寸参数进行优化时,优化的变量应该在尺寸变量的范围内,其他尺寸变量应设置为常数,具体尺寸参数范围见表1,尺寸常数见表2。

为了使得梁-膜-三岛结构的压力传感器力学性能得到提升,首先应该优化对最大变形扰度 w_{\max} 和最大纵、横应力之差 σ_{dmax} 影响最大的两个尺寸变量:模长 L 和膜厚 H 。

将其他尺寸变量和仿真参数分别设置为 $t=400 \mu\text{m}$, $w=200 \mu\text{m}$, $I=1500 \mu\text{m}$, $B=20 \mu\text{m}$, $P=500 \text{ Pa}$, $E=170 \text{ GPa}$ 。代入式(29)和式(30),得到优化模型:

$$w_{\max}(L, H) = 1.4248 \times 10^{-12} \times L^{3.85974} \times H^{-2.35538} \quad (31)$$

$$\sigma_d(L, H) = 0.560977 \times 10^{-10} \times L^{2.3748} \times H^{-1.51822} \quad (32)$$

4.2 优化模型函数求解

本文中的尺寸优化就是求非线性约束条件下的最大值,优化目标是找到使得敏感膜片的最大纵、横应力 σ_{dmax} 之差为最大的膜宽 L 与膜厚 H 的取值。同时,敏感膜片的最大变形扰度也应满足小挠度变形原则,即 $w_{\max}(L, H) \leq 0.2H$ 。膜宽 L 、膜厚 H 最终的优化模型如下所示,式(33)为极值函数,式(34)为约束函数,式(35)和式(36)为线性约束条件。

$$f(x_1, x_2) = 0.560977 \times 10^{-10} x_1^{2.3748} x_2^{-1.51822} \quad (33)$$

$$g(x_1, x_2) = 1.4248 \times 10^{-12} x_1^{3.85974} x_2^{-2.35538} - 0.2x_2 \leq 0 \quad (34)$$

$$5400 \leq x_1 \leq 6400 \quad (35)$$

$$20 \leq x_2 \leq 30 \quad (36)$$

式中, $f(x_1, x_2)$ 为目标函数; $g(x_1, x_2)$ 为约束函数; x_1 为膜长 L ; x_2 为膜厚 H 。

利用数学分析方法求非线性约束条件下的极值,对优化模型进行求解,得到优化后的膜长 $L=6400 \mu\text{m}$,膜厚 $H=20 \mu\text{m}$ 。同理,得到其他敏感膜片优化后的尺寸参数如表3所示。利用优化后的尺寸参数仿真分析得到此时的最大变形扰度 $w_{\max}=3.86537 \mu\text{m} < 4 \mu\text{m}$,满足小扰度变形原则,最大纵、横应力之差 $\sigma_{\text{dmax}}=14.793 \text{ MPa}$ 。

表3 敏感膜片几何尺寸变量的优化后常数值 μm

参数	优化后值
模长 L	6400
膜厚 H	20
短窄梁长度 t	150
短窄梁宽度 w	200
方岛宽度 I	1500
方岛与短窄梁的高度 B	8

5 性能计算与结果分析

5.1 输出电压计算与灵敏度分析

本文设计的压力传感器应力集中于敏感薄膜的短窄梁结构,靠近膜片边缘的短窄梁,沿 x 轴上的坐标点 $x=512 \mu\text{m}$ 处左右的纵、横应力之差最大, $\sigma_{\text{dmax}}=1.4793 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。

当输入电压为 $V_{\text{in}}=3 \text{ V}$ 、压力 $P=500 \text{ Pa}$ 时,根据式(4)计算得到输出电压 $V_{\text{out}}=30.664 \text{ mV}$ 。

MEMS压力传感器的灵敏度 S 是指传感器在

稳态条件下输出量变化与输入量变化的比值^[22]:

$$S = \frac{\Delta V_{\text{out}}}{\Delta V_{\text{in}}} \frac{1}{\Delta P} = \frac{1}{\Delta P} \times \frac{\pi 44}{2} (\delta_x - \delta_y) \quad (37)$$

式中, S 为灵敏度; ΔV_{in} 为输入电压的变化量; ΔV_{out} 为输出电压的变化量; ΔP 为压力的变化量; σ_x 为纵向应力; σ_y 为横向应力。当膜片受到满量程压力 $P=500 \text{ Pa}$ 时, 此时最大纵、横应力之差 $\sigma_{\text{dmax}}=1.4793 \times 10^7 \text{ Pa}$, 代入式 (37) 计算出传感器的灵敏度 $S=20.429 \text{ (mV/V)/KPa}$ 。

5.2 非线性度计算与分析

通过有限元仿真软件分析计算出梁-膜-三岛膜结构不同外加压力下压力膜产生的纵、横应力之差和输出电压值, 然后通过非线性度公式计算出压力膜在量程 $0 \sim 500 \text{ Pa}$ 范围内的非线性度, 当梁-膜-三岛压力膜结构在外加压力值为 0.4 KPa 时, 其非线性最大, 为 $1.04\% \text{ FSS}$, 故 MEMS 梁-膜-三岛膜结构压阻式压力传感器的非线性度 NL 理论最大值为 $1.04\% \text{ FSS}$ 。其不同外界压力下压力膜的纵、横应力之差、输出电压、非线性度等数据如表 4 所示, 不同外界压力下压力膜的输出电压如图 13 所示, 不同外界压力下压力膜的非线性度如图 14 所示。

表 4 梁-膜-三岛结构不同压力下的输出数据

压力值/KPa	纵、横应力之差 σ_d/MPa	输出电压/mV	非线性度 NL/%FSS
0	0	0	0
0.05	1.461	3.026	-0.13
0.10	2.922	6.053	-0.26
0.15	4.383	9.079	-0.39
0.20	5.844	12.106	-0.52
0.25	7.305	15.132	-0.65
0.30	8.766	18.159	-0.78
0.35	10.227	21.182	-0.92
0.40	11.688	24.212	-1.04
0.45	13.149	27.356	-0.79
0.50	14.793	30.664	0

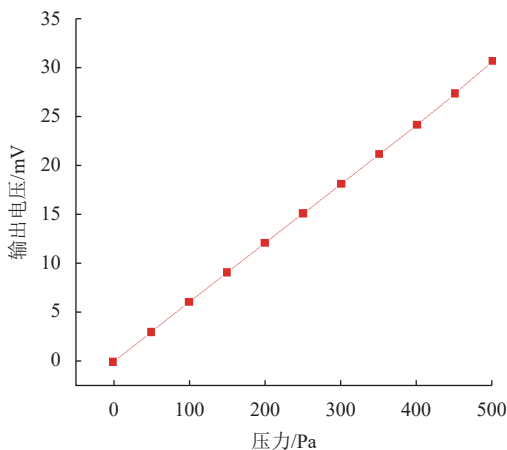


图 13 不同外界压力下压力膜的输出电压

由单晶硅材料压力传感器的极限过载压力计算式 (5) 可知, 单晶硅材料极限应力值取 7 GPa , 安全系数 n 取 11, 当传感器梁-膜-三岛压力膜结构外加最大过载压力为 100 KPa 时, 满足设计要求和传感器单晶硅材料的特性, 具有 200 倍的抗过载特性。

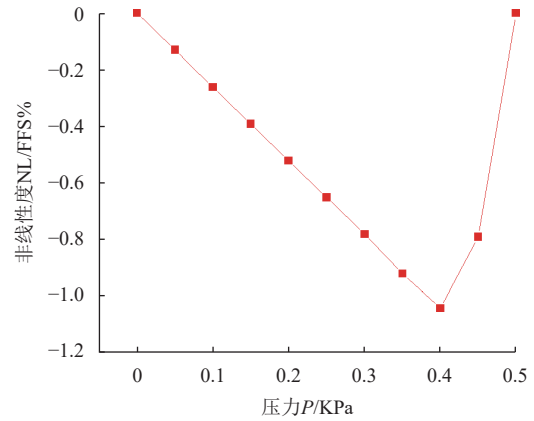


图 14 不同外界压力下压力膜的非线性度

5.3 结果对比与分析

梁-膜-三岛膜结构优化后的性能结果与其他参考结构的性能结果对比数据如表 5 所示。

表 5 梁-膜-三岛结构与参考结构性能对比

结构	量程/Pa	输出电压/mV	灵敏度 $(\mu\text{V}\cdot\text{V}^{-1})\cdot\text{Pa}^{-1}$	非线性度/%FSS
C型 ^[23]	$0 \sim 500$	—	12	—
CBM ^[18]	$0 \sim 500$	14.44	7.081	0.190
单岛 ^[10]	$0 \sim 500$	15.981	11.098	3.046
双岛 ^[12]	$0 \sim 500$	23.781	17.339	2.566
四岛 ^[11]	$0 \sim 500$	26.693	17.795	0.140
三岛	$0 \sim 500$	30.664	20.429	1.040

由上述实验的实测数据可得, 本文设计的梁-膜-三岛膜结构在满足最大变形扰度遵循小扰度变形原则的情况下, 敏感薄膜尺寸参数优化后得到的满量程输出电压 $V_{\text{out}}=30.664 \text{ mV}$, 灵敏度为 $S=20.429 \text{ (}\mu\text{V/V)/Pa}$, 均远高于 C 型膜结构和传统的梁-膜结构; 高于参考文献中的梁-膜-单岛结构、梁-膜-双岛结构和梁-膜-四岛结构。在保证压力传感器具有低非线性度和高抗过载特性的条件下, 提高了压阻式压力传感器的灵敏度, 具有良好的力学性能, 达到了设计效果。

6 结束语

针对压阻式压力传感器压力膜表面应力增大、灵敏度增大, 从而导致压力膜的形变和传感器的非线性度随之增大的这一普遍问题, 通过对压力膜结构进行合理的设计与优化来提高传感器的灵敏度的

同时降低其非线性度这一思路,设计了一种以梁-膜-三岛结构为压力膜结构的压阻式压力传感器,利用有限元仿真软件完成压力膜的结构设计和初步性能仿真,根据压力膜结构和几何尺寸参数建立敏感膜片的数学模型,再利用有限元仿真软件和绘图软件完成对压力膜几何参数变化参数化扫描后数据的曲线拟合和数学建模求解,并在此基础上利用数学分析软件求解非线性约束条件下的极大值完成对几何尺寸参数的优化,最终得到优化后的梁-膜-三岛压力膜结构。与相关文献中的5种结构对比可知,本文设计和优化后的梁-膜-三岛膜结构在最大变形扰度满足小扰度变形原则和低非线性度的条件下,提高了压阻式压力传感器的灵敏度,改善了压阻式压力传感器的力学性能,达到了设计效果。

参考文献

- [1] 韩允. MEMS 传感器的发展概况[J]. *电子产品世界*, 2019, 26(1): 4-8.
HAN Y. Development of MEMS sensors[J]. *Electronic Engineering & Product World*, 2019, 26(1): 4-8.
- [2] BOSER B E, HOWE R T. Surface micromachined accelerometers[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1996, 31(3): 366-375.
- [3] 孙圣. MEMS 谐振式压力传感器谐振器设计与分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
SUN S. Design and analysis of MEMS resonant pressure sensor resonator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [4] XU Y Z, HU X D, KUNDU S, et al. Silicon-based sensors for biomedical applications: A review[J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 2908.
- [5] JAVED Y, MANSOOR M, ALI SHAH I. A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications[J]. *Sensor Review*, 2019, 39(5): 652-664.
- [6] 卢鹏. 新型 MEMS 压阻式压力传感器的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
LU P. Design of new MEMS piezoresistive pressure sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [7] LI C, CORDOVILLA F, JAGDHEESH R, et al. Design and optimization of a novel structural MEMS piezoresistive pressure sensor[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(10): 4531-4541.
- [8] CHEN M, LI K, CHENG G M, et al. Touchpoint-tailored ultrasensitive piezoresistive pressure sensors with a broad dynamic response range and low detection limit[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(2): 2551-2558.
- [9] TIAN B, LI H F, YANG N, et al. A MEMS flow velocity sensor with low kinetic energy dissipation rate[J]. *Sensor Review*, 2017, 37(3): 247-256.
- [10] YU Z L, ZHAO Y L, SUN L, et al. Incorporation of beams into bossed diaphragm for a high sensitivity and overload micro pressure sensor[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(1): 015004.
- [11] MENG X W, ZHAO Y L. The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 348.
- [12] YU Z L, ZHAO Y L, LI L L, et al. Realization of a micro pressure sensor with high sensitivity and overload by introducing beams and islands[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(4): 739-747.
- [13] 廖黎明. 高灵敏度压阻式碳化硅压力传感器设计与仿真[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
LIAO L M. Design and simulation of high sensitivity piezoresistive silicon carbide pressure sensor[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.
- [14] XU T, LU D, ZHAO L. Application and optimization of stiffness abrupt structures for pressure sensors with high sensitivity and anti-overload ability[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 1965-1990.
- [15] TRAN A V, ZHANG X M, ZHU B L. Mechanical structural design of a piezoresistive pressure sensor for low-pressure measurement: A computational analysis by increases in the sensor sensitivity[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2023.
- [16] HUANG X, ZHANG D C. 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.
- [17] 王峰, 谭晓兰, 张敏亮. 压阻式微压力传感器结构参数设计[J]. *自动化仪表*, 2013, 34(3): 83-86.
WANG F, TAN X L, ZHANG M L. Design of the structural parameters for piezoresistive micro pressure sensor[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2013, 34(3): 83-86.
- [18] TIAN B, ZHAO Y L, JIANG Z D, et al. The design and analysis of beam-membrane structure sensors for micro-pressure measurement[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(4): 045003.
- [19] 李丹丹. 基于 MEMS 技术 SOI 微压传感器研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
LI D D. Research on SOI micro-pressure sensor based on MEMS technology[D]. Harbin: Helongjiang University, 2018.
- [20] 平瑶. 基于硅基纳米梁谐振技术的重金属离子检测[D]. 南京: 东南大学, 2018.
PING Y. Detection of heavy metal ions based on silicon nanobeam resonance technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [21] 曹钢. 硅微压力传感器设计、制造及批量调理与测试技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
CAO G. Research on design, manufacture, batch conditioning and testing technology of silicon micro pressure sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [22] 郑志霞. 硅微机械传感器[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.
ZHENG Z X. Mechanical microsensors[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2012.
- [23] BERNIS A, BUDER U, OBERMEIER E, et al. AeroMEMS sensor array for high-resolution wall pressure measurements[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(1): 104-111.