

一种新型三维力传感器结构设计与优化

郭 飞, 卢 朋, 李立建

华北水利水电大学, 河南 郑州

收稿日期: 2022年11月4日; 录用日期: 2022年12月7日; 发布日期: 2022年12月14日

摘要

针对特定领域对一维力和二维力矩的测量需求, 本文提出一种基于并联结构的对称布置装配式三维力传感器弹性体结构, 利用Solidworks软件建立传感器的三维模型, 并基于Workbench软件的响应面优化和拓扑优化模块对传感器简化模型进行优化设计。首先, 对所提出的三维力传感器弹性体结构特点及关键部件进行详细描述, 提炼出传感器弹性体结构的关键设计参数。接着, 通过制定优化目标和约束条件, 利用中心组合设计实验法对传感器弹性辐板的结构尺寸参数进行优化, 得到了传感器关键参数对其性能的影响及最佳优化参数组; 最后, 为进一步提升传感器性能和降低重量对其性能的影响, 利用拓扑优化对传感器的测力平台和固定平台进行了轻量化设计。结果表明: 优化前后, 传感器虽变形量增加约6.25%和20%, 但灵敏度明显增加, 期望应变分别增加257%和293%, 总体质量减少9.4%。本文的研究结果将为多分量力传感器的结构设计与优化提供有益指导。

关键词

三维力传感器, 弹性体, 响应面优化, 拓扑优化

Design and Optimization of a Novel Three-Axis Force Sensor

Fei Guo, Peng Lu, Lijian Li

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Nov. 4th, 2022; accepted: Dec. 7th, 2022; published: Dec. 14th, 2022

Abstract

This work suggests a symmetrically formed three-dimensional force sensor elastic body construction based on a parallel structure to address the measurement needs of one-dimensional force and two-dimensional moment in a particular field. The design of the streamlined sensor model is op-

timized by the optimization and topology optimization module. The key design parameters of the proposed three-dimensional force sensor elastomer are derived after a detailed description of its structural properties and essential parts. The structural size parameters of the elastic web of the sensor are then improved using the center combination design experiment method, and the effect of the key sensor parameters on performance as well as the best optimization parameter group are discovered. And finally, to further enhance the sensor's force-measuring platform and fixed platform were made lightweight via topology optimization, and the performance of the sensor and the effect of weight reduction on its performance were examined. The findings indicate that although the sensor's deformation increases by roughly 6.25% and 20% before and after optimization, the sensitivity greatly rises, the anticipated strain rises by 257% and 293%, and the overall mass falls by 9.4%. The findings of this research will be helpful in optimizing the structural design of multi-component force sensors.

Keywords

Three-Dimensional Force Sensor, Elastomer, Response Surface Optimization, Topology Optimization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多维力传感器能同时感知三维空间中多维的力和力矩分量信息[1] [2]，作为重要的载体，在机器人、航空航天、国防安全、生物医疗以及智能制造等众多领域有着广泛应用[3] [4] [5]。多维力传感器按不同的工作原理可划分为电阻式、电感式、电容式以及光纤等，在弹性体结构设计上，传统三维力传感器常采用筒式、柱式、环式悬臂梁等结构[4] [6]。传感器的弹性体结构直接影响着其性能，因此开展传感器弹性体的结构设计尤为重要。方立[7]等根据跆拳道拳击运动员日常训练的科学性，设计出一种新型三维力传感器。潘桂梅等[8]用于多维力分量静态和动态测试，设计制作出三维压力传感器。张强等[9]设计一种用于仿人性灵巧手的指尖三维力传感器，采用十字梁与中心直梁相结合的结构实现对三维力的感知。于常安等[10]基于材料力学和有限元分析，对盒式装配式六分量天平核心部件的三分量力传感器弹性体结构进行设计，实现力的完全分解和测量。Huang 等[11]为了测量加载平台上的外部载荷，研制出一种新型三维力传感器。赵鹏等[12]针对三维力传感器存在的非线性、维间耦合误差过大等瓶颈问题，设计一款组合式自解耦压电薄膜三维力传感器。Yang [13]利用并联机构设计一种三维力传感器。

整体式结构具有测量精度和线性度高、迟滞小、无摩擦间隙、结构紧凑及无需装配等优势，但存在测量分支较多难以采用传统机加工方式，导致制造困难以及贴片位置难以确定等问题[5]。本文提出一种装配式三维力传感器构型。基于 Workbench 中的 Response Surface Optimization (RSO 响应面优化)模块[14] [15] [16] [17]和 Topology Optimization (TO 拓扑优化)模块[18] [19] [20]对传感器简化模型进行优化设计。在满足强度以及稳定性的前提下，分别利用中心组合实验(CCD)，完成对三维力传感器结构中的弹性辐板响应面优化，获得优化尺寸；利用拓扑优化对实现对三维力传感器结构动平台和定平台的轻量化设计。本文提出的三维力传感器满足设定的使用要求的同时丰富了三维力传感器的构型，研究结果将为多分量力传感器的结构设计与优化提供有益指导。

2. 三维力传感器结构特点

所设计的可同时测量沿 Z 向的力、绕 X 和 Y 向弯矩的三维力传感器如图 1 所示，其中传感器弹性体采用装配式结构，具有对称性，包含固定平台、中间立柱、测量平台以及四条结构相同的柔性测量支链， $O\text{-}XYZ$ 为建立于测力平台上表面几何中心处的参考坐标系。

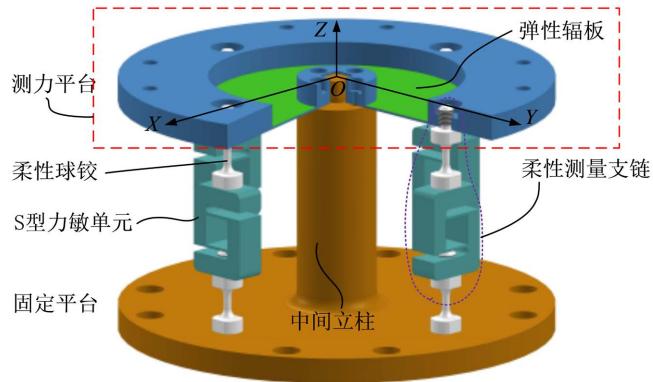


Figure 1. Three-dimensional force sensor's general construction
图 1. 三维力传感器整体结构图

传感器测力平台包含环形外环、环形弹性辐板以及盘形安装台，安装台通过方形孔槽定位和螺纹链接与其同轴线的中间立柱紧固连接。每条柔性测量支链由 S 型力敏单元和两个相同的柔性球铰经串联组合组成，四条柔性测量支链呈 90° 均匀分布同一圆柱面上，且上下柔性球铰分别通过螺纹固结于固定平台的上表面和测力平台环形外环的下表面，同时上下柔性球铰回转轴线共线并平行于中间立柱的回转轴线。大刚度中间立柱和弹性辐板固定连接可有效限制弹性辐板和测力平台相对于固定平台沿 X 和 Y 向的移动和绕 Z 轴的转动，提高了传感器抗横向载荷的能力和绕 Z 向扭转的能力。

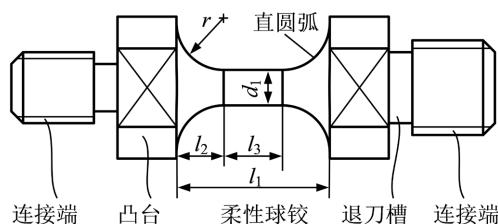


Figure 2. Flexible joint structure diagram
图 2. 柔性球铰结构示意图

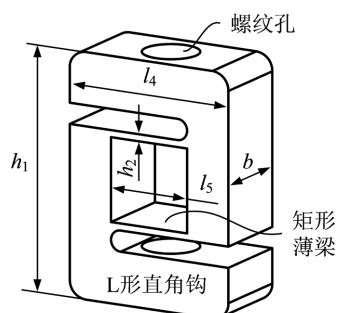


Figure 3. S-type force-sensitive unit structure diagram
图 3. S 型力敏单元结构示意图

2.1. 柔性球铰结构特点

柔性球铰是柔性机构的基本运动单元，利用其自身弹性变形传递力、能量和运动。柔性球铰在三维力传感器除起到连接作用外，因其自身具有三个正交的转动自由度，故而还可使扭转和弯曲变形集中在其槽口上，而使柔性测量支链的 S 型柔性力敏单元仅承受拉压力作用。**图 2** 所示结构是两端带有螺纹的柔性球铰，由柔性球铰、螺纹连接端和侧边铣削平面的圆盘形凸台三部分组成，凸台和螺纹之间有退刀槽，两端采用不同大小的螺纹。柔性球铰槽口曲线是由左右两个半径为 r 直圆弧线和长为 l_1 距中心轴线为 $d_1/2$ 的直线组成。两端的螺纹用于连接三维力传感器固定或测力平台和 S 型力敏单元。为便于安装，对两个凸台进行铣平处理。其中 l_1 、 l_2 、 l_3 、 r 和 d_1 分别表示柔性球铰的长度、圆弧长度矩形长度、圆弧半径以及矩形宽度。

2.2. S 型力敏单元结构特点

S 型力敏单元作为传感器的力觉感知单元，主要用于检测柔性测量支链的拉压力，其结构如**图 3** 所示，其两端的 L 形直角钩体几何中心处设有螺纹孔，与柔性球铰的连接端的外螺纹相连接，矩形薄梁是 S 型力敏单元的主要变形单元。S 型力敏单元是一体结构。其中 S 型结构的外形高度 h_1 、长度 l_4 、矩形薄梁的高度 h_2 和长度 l_5 和 S 型结构外形和矩形薄梁的宽度 b 。

2.3. 测力平台结构特点

传感器测力平台通过其上的力加载孔与外部待测载荷相接触，其结构如**图 4** 所示。在圆环形测力平台上均匀分布 4 个柔顺测量支链安装孔，8 个力加载孔，圆盘形安装台的中心有一个方形的安装孔，用于动平台和中间立柱的安装，方形孔四面中间分布有 4 个螺纹孔，用于动平台和中间立柱之间的固定连接。其中测力平台的外径 D_1 、测力平台的内径(弹性辐板的外径) D_2 、安装台的外径(弹性辐板的内径) D_3 、测力平台和安装台的厚度 h_3 以及弹性辐板的厚度 h_4 。

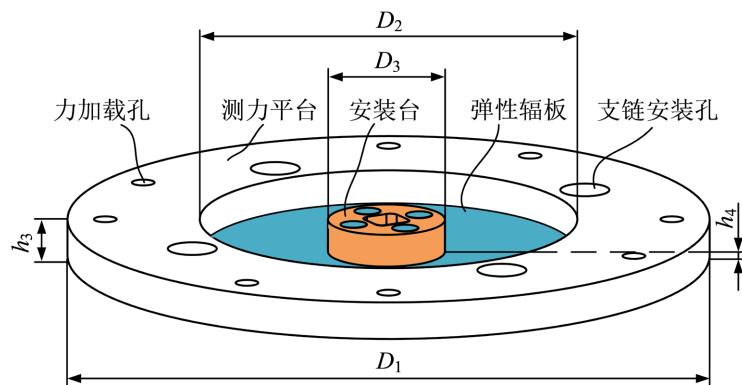


Figure 4. Moving platform structural diagram

图 4. 动平台结构示意图

3. 传感器静力学仿真分析

前面对传感器结构中各关键部件进行了详细的描述，下面讲对传感器结构关键尺寸参数加以确定。

图 2 所示柔性球铰作为非标零件，在设计时根据材料的强度准则，在满足连接工作的要求，柔性球铰最小直径由设计公式(1)计算得，当设计最小直径 d 大于理论最小直径时，满足设计强度要求。柔性球铰主要参数如**表 1** 所示。

$$d \geq \sqrt{4 \times 1.3 F / \pi [\sigma]} \quad (1)$$

其中, d 为球铰柔性单元直径, F 为轴向载荷, $[\sigma]$ 为材料许用应力。

Table 1. Flexible joint's primary parameters
表 1. 柔性球铰主要参数

d_1	l_1	r	l_2	l_3
3 mm	13 mm	4 mm	4 mm	5 mm

图 3 所示 S 型力敏单元和图 4 所示测力平台结构尺寸如表 2 和表 3 所示。

Table 2. S-type force-sensitive unit structural parameters
表 2. S 型力敏单元结构参数

柔性梁 $l_4 \times b \times h_1$	外形 $l_5 \times b \times h_2$
12 mm × 12 mm × 1 mm	25 mm × 12 mm × 35 mm

Table 3. Moving platform structural characteristics
表 3. 动平台结构参数

D_1	D_2	D_3	h_1	h_2
170 mm	100 mm	30 mm	1 mm	10 mm

3.1. 建立三维模型和定义材料属性

利用 SolidWorks 软件建立传感器三维实体模型, 导入到有限元 Workbench 软件的 Static Structural 模块, 分别对 S 力敏单元和三维力传感器结构进行静力学分析, 分别获得其等效应力、整体变形量及路径上的应变曲线, 为后续对柔性单元的尺寸优化提供基础。传感器结构各部件均采用 6061T6 型铝质合金, 在有限元分析 Workbench 软件中定义材料属性, 其材料的属性见表 4 所示。

Table 4. Engineering properties of materials 6061T6
表 4. 6061T6 材料工程属性

材料	弹性模量	泊松比	密度	屈服强度
	E/Pa	μ	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^3$	σ_s/MPa
6061T6	6.89×10^{10}	0.33	2700	260

3.2. 定义路径和网格划分

S 型力敏单元受力时弹性变形主要集中在矩形薄梁上, 在 S 型结构上矩形薄梁的下表面的几何中心定义一条路径, 沿梁的方向为 X 轴, 用于查看矩形薄梁受力时发生在路径上的应力变化曲线, 为后续寻找应变片贴片位置提供基础。同样, 在三维力传感器力敏单元中相同的位置定义一条相同路径, 用于查看三维力传感器结构受力时路径上应变的变化。分别对 S 型结构和三维力传感器结构进行网格划分, 采用四面体网格, 网格划分结果如图 5 所示。

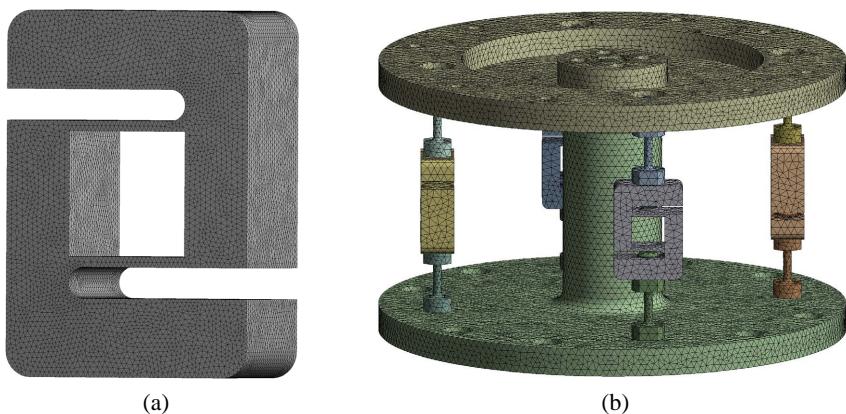


Figure 5. Finite element mesh. (a) S-type force-sensitive unit; (b) Three-dimensional force sensor

图 5. 有限元网格。 (a) S 型力敏单元；(b) 三维力传感器

3.3. 静力学分析

对 S 型力敏单元静力学分析，建立选择以沿梁向右方向为 X 轴，对 S 型结构下底面施加固定约束，上底面施加沿 Z 轴方向 50N 的拉力。静力学分析结果如表 5 所示，其结构最大等效应力约为 65.6 MPa，远远小于材料的许用应力；整体最大变形量约为 0.056 mm；其路径上最大应变值约为 806 $\mu\epsilon$ 。根据图 6 所示，S 结构路径上应变的分布情况，在初始点约 0.5 mm 和约 10.5 mm 处是路径上应变输出最大值和最小值的点。根据路径上应变曲线的变化选择在应变值约为 500 $\mu\epsilon$ 处的位置贴片。

Table 5. S-type force-sensitive unit force analysis

表 5. S 型力敏单元受力分析

载荷	变形量	应力	应变
	Δ_{max}/mm	σ_{max}/MPa	$\varepsilon_{max}/\mu\epsilon$
$F_z = 50N$	0.056	65.6	8.06×10^{-4}

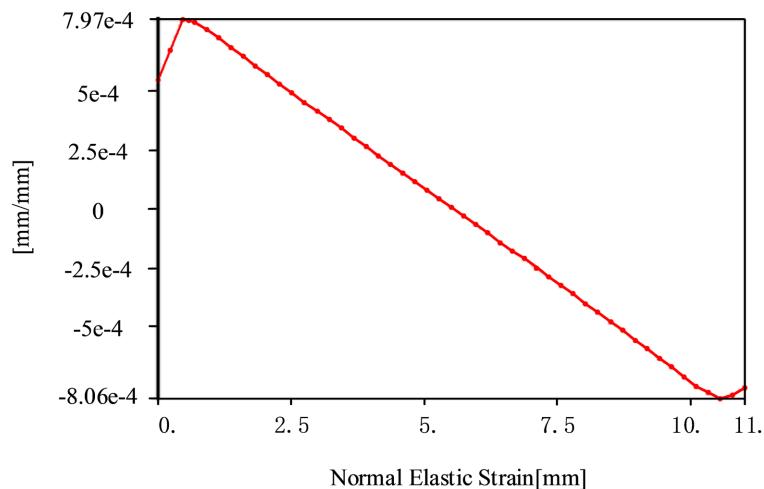


Figure 6. Flexible path mapping

图 6. 路径上应变曲线图

对三维力传感器结构进行静力学分析, 建立选择以向右为 X 轴, 考虑传感器柔性测量支链结构和边界约束的对称性, 在传感器底面施加固定约束, 在力加载平台上施加单维力载荷。在测力平台上施加载荷时, M_x 于 M_y 的计算结果基本相同, 因此, 只需考虑 F_z 和 M_x 两种不同的工况。在传感器结构测力平台分别施加单维 $F_z = 200\text{N}$ 和 $M_x = 2\text{Nm}$ 。其静力学分析结果如表 6 所示。在拉力 200 N 时, 传感器的等效应力约为 46.47 MPa、动平台的变形量约为 0.049 mm、应变约为 526 $\mu\epsilon$; 在弯矩为 2 Nm 时其结构的等效应力为 16 MPa、动平台的变形量约为 0.020 mm、最大应变约为 184 $\mu\epsilon$ ($1\mu\epsilon = 10^{-6}\text{mm/mm}$)。两种在单维力工况下其等效应力都远远小于材料的许用应力, 说明设计此传感器的结构是可靠的。

Table 6. Three-dimensional force sensor structural force analysis
表 6. 三维力传感器结构受力分析

	$F_z = 200\text{N}$	$M_x/M_y = 2\text{Nm}$
Δ_{\max}/mm	0.049	0.024
σ_{\max}/MPa	46.47	16.25
$\varepsilon_{\max}/\mu\epsilon$	5.26×10^{-4}	1.84×10^{-4}

4. 基于响应面的传感器结构优化

三维力传感器为获得更好的性能, 根据前面静力学分析对其弹性体的关键重要尺寸进行优化设计。在 Workbench 软件中通过静力学模块和响应面优化模块相结合对三维力传感器弹性体结构尺寸进行分析与优化。

在传感器中, 弹性辐板的尺寸对传感器的性能有着显著的影响。优化三维力传感器结构的弹性辐板尺寸, 其他数值设为固定值。在 Workbench 软件 DM 模块中将辐板的外径 D_2 、内径 D_3 以及厚度 h_4 参数化作为优化的输入变量, 将静力学分析结果中总变形和路径上的最大应变参数化, 作为输出变量。初定弹性辐板内、外径及厚度参数为参照, 给予初始尺寸值 10% 的变化范围, 各设计变量优化范围如表 7 所示。在 RSO 响应面优化模块中的使用中心组合实验设计的实验点, 确定各实验条件下响应值并得到 16 组实验点数据。

Table 7. The design parameters and their bounds
表 7. 设计参数及变化范围

名称	D_3	D_2	h_4
初始值/mm	30	100	1
最小值/mm	27	90	0.9
最大值/mm	33	110	1.1

使用 S 型力敏单元受拉力状态下的最大变形量 δ_{\max} 和柔性梁路径上正向应变值最大值 ε_{\max} 作为传感器的输出参数和边界条件分别为:

$$\sigma_{\max} < [\sigma] \quad (2)$$

$$\delta_{\max} \leq 0.056\text{ mm} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\max} \leq 700\text{ }\mu\epsilon \quad (4)$$

其中, σ_{\max} 为传感器结构的最大等效应力。

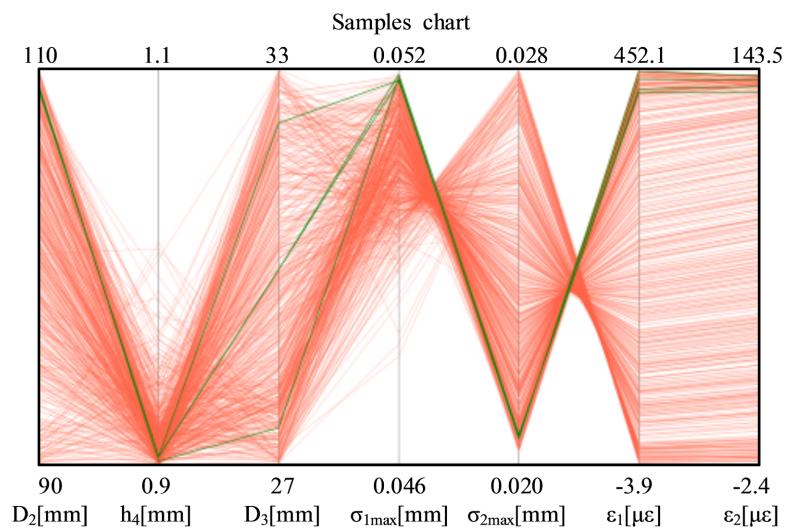


Figure 7. Samples chart with objectives

图 7. 目标参数

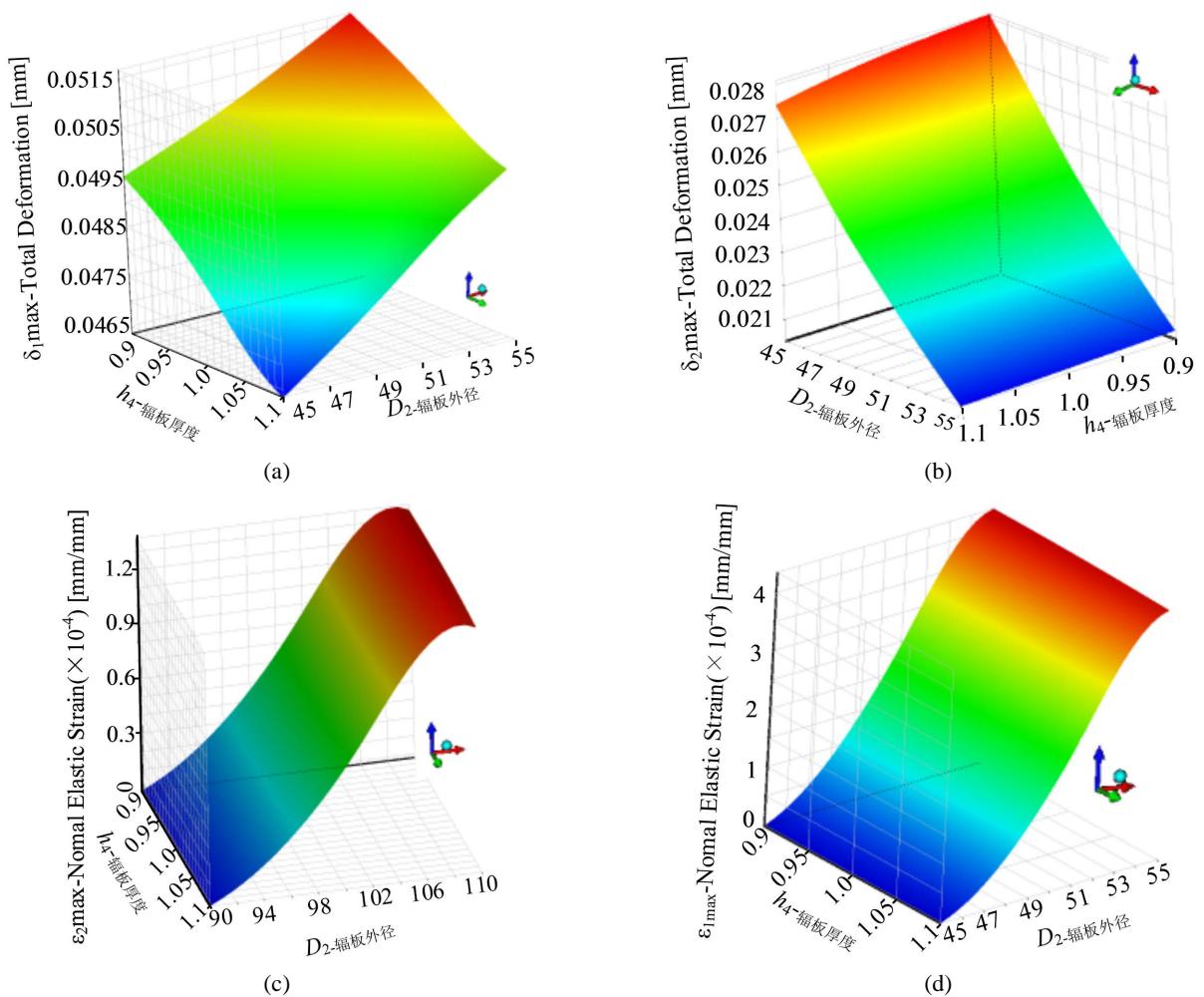


Figure 8. Response surface model

图 8. 响应面图示

图 7 所示,是在确定的输入参数、输出参数及边界条件下响应面优化后得到的三条候选点曲线。图 8 所示为响应面优化过程中辐板外径和厚度对整体变形量和定义在力敏单元中路径上应变的响应面图,从图 8(a)和图 8(b)中分析出,拉力和弯矩的状态下整体变形量随之辐板厚度的减小而增加、随外径的增加而增加;从图 8(c)和图 8(d)分析出,拉力和弯矩的状态下,路径上的应变变化随着辐板外径的增加而增加、不会随辐板厚度的变化而变化。从图 9 所示,分析出弹性辐板外径对输出参数的影响最大,拉力状态下辐板厚度对整体变形量又很小的影响,弯矩状态下辐板内径对输出参数没什么影响。

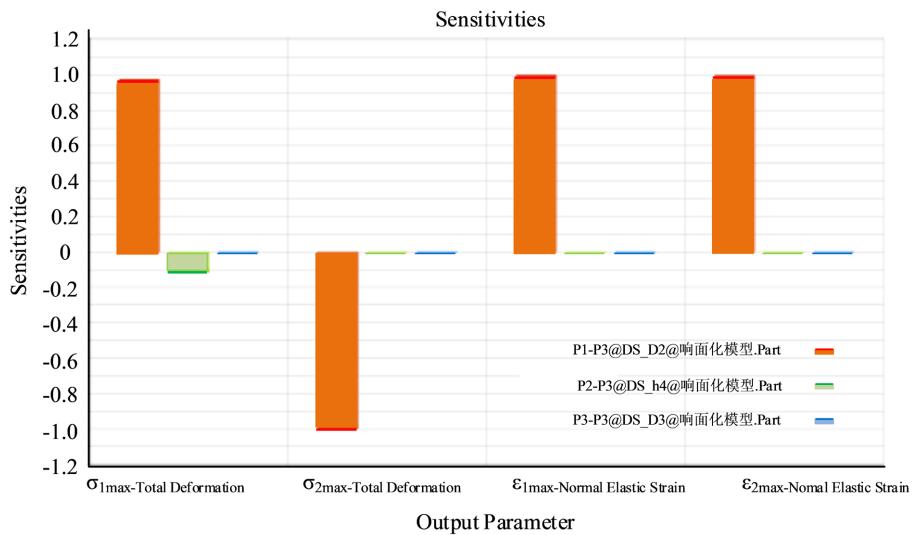


Figure 9. Sensitivities of parameters

图 9. 参数的灵敏性

结果得到三个优化方案,得到优化后的传感器优化参数如表 8 所示。同时考虑变量之间的敏感性分析与加工,对表 8 中的数值进行处理,选取第二组数据经圆整后取内径 $D_1 = 32 \text{ mm}$ 、 $D_2 = 109 \text{ mm}$ 以及厚度 $h_1 = 0.9 \text{ mm}$ 作为优化后的尺寸。重新对优化后的总变形 Δ 、应力 σ 和路径上的应变 ε 进行求解,并与初始设计值进行对比。

Table 8. Optimal candidate points for three-dimensional force sensor structural
表 8. 三维力传感器结构的最佳候选点

名称	内径 D_3	外径 D_2	厚度 h_1
候选点 1/mm	27.56	109.21	0.902
候选点 2/mm	32.18	109.07	0.904
候选点 3/mm	29.96	108.99	1.04

由表 9 所示,优化后在相同条件下比较结果: 拉力条件下整体变形量增加 0.0031 mm, 整体变形量增加 6.25%; 路径上最大应变增加约 $424 \mu\varepsilon$, 最大应变增加约 257%; 等效应力减少约 10.4 MPa, 等效应力减少约 18.2%。在弯矩条件下整体变形量增加 0.004 mm, 整体变形提高约 20%; 路径上最大应变增加约 $153 \mu\varepsilon$, 提高约 293%, 等效最大应力增加 0.24 MPa, 增加约 1.5%。通过对比结果发现在保证三维力传感器强度和稳定性的前提下,优化弹性辐板尺寸后得到的三维力传感器性能有很大提升。

Table 9. Optimal structural force sensors
表 9. 优化结构受力分析

	$F_z = 200 \text{ N}$	$M_x/M_y = 2 \text{ N}\cdot\text{m}$
Δ_{\max}/mm	0.051	0.024
σ_{\max}/MPa	46.6	16.24 MPa
$\varepsilon_{\max}/\mu\varepsilon$	5.89×10^{-4}	2.06×10^{-4}

5. 三维力传感器轻量化

拓扑优化的目标是在受到给定约束条件下,为了使某个目标量(总变形量、应力、应变等)最小或最大化而寻求实体材料的最佳方案。三维力传感器测力平台和固定平台自重对传感器的性能有影响,为减少自重对传感器的影响,采用拓扑优化实现三维力传感器的轻量化设计。

利用 Workbench 软件的 Static Structural 和 Topology Optimization 模块组合对优化后三维力传感器结构进行轻量化设计。在静力学分析中其他材料和约束条件保持不变,载荷条件变为施加复合载荷($F_z + M_x/M_y$)共同作用,静力学求解。在拓扑优化模块,选择优化区域为测量平台和定平台,优化目标为定平台的上表面和测量平台的上表面,响应约束设置为保留优化区域质量的 70%,计算结果如图 10(a)所示。优化得到的结构不具有对称性,为满足三维力传感器的普适性,对其优化后的结构重新进行对称结构设计,其优化后对称设计的结构如图 10(b)所示。拓扑结构优化后静力学分析结果如表 10 所示。

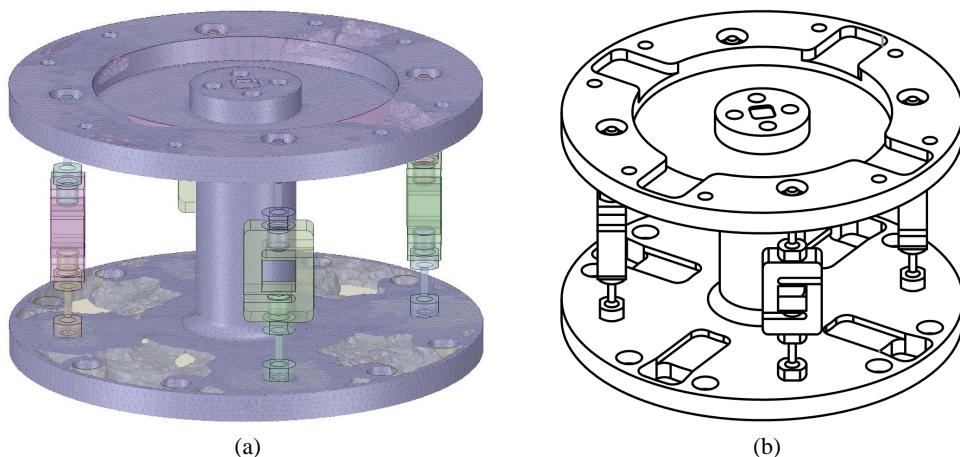


Figure 10. Optimal three-dimensional force structural. (a) Results of topology optimization; (b) Optimized structure

图 10. 三维力传感器优化结果。(a) 拓扑优化结果; (b) 优化后结构

Table 10. Analysis of light-weight structures
表 10. 轻量化结构受力分析

	$F_z = 200 \text{ N}$	$M_x/M_y = 2 \text{ N}\cdot\text{m}$
Δ_{\max}/mm	0.055	0.025
σ_{\max}/MPa	46.8	15.72 MPa
$\varepsilon_{\max}/\mu\varepsilon$	5.68×10^{-4}	1.91×10^{-4}

优化后在相同条件下对比优化后的结果：拉力条件下整体变形量增加了 0.004 mm，等效最大应力增加 0.2 MPa，路径上的最大应变减小了约 $21 \mu\epsilon$ ；在弯矩条件下，整体变形增加了约 0.001 mm，应力减少约 0.52 MPa，路径上的最大应变减少约 $15 \mu\epsilon$ 。优化后质量由原来的 1.05 kg 减少为 0.94 kg，总体质量减少约 9.4%。从上面对比结果可以看出拓扑优化后三维力传感器性能基本没有变化，实现了三维力传感器的轻量化。

6. 结论

本文提出一种基于并联结构的对称布置装配式三维力传感器弹性体结构，利用 Solidworks 软件建立传感器的三维模型，并基于 Workbench 软件的响应面优化和拓扑优化模块对传感器简化模型进行优化设计。通过制定优化目标和约束条件，利用中心组合设计实验法对传感器弹性辐板的结构尺寸参数进行优化，得到了传感器关键参数对其性能的影响及最佳优化参数组；利用拓扑优化对传感器的测力平台和固定平台进行了轻量化设计。结果表明：优化前后，传感器虽变形量增加约 6.25% 和 20%，但灵敏度明显增加，期望应变分别增加 257% 和 293%，总体质量减少 9.4%。本文提出的三维力传感器结构满足设定的使用要求的同时丰富了三维力传感器的构型，研究结果将为多分量力传感器的结构设计与优化提供有益指导。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(52005181)。

参考文献

- [1] 胡珊珊. 两种新型应变式多维力传感器的设计与研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [2] 孙志成, 朱保峰, 李修钰. 一种十字梁结构多维力传感器结构优化[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(8): 115-117.
- [3] 刘晓东, 顾小稳, 班炯, 等. 高灵敏度三维力矩传感器设计与标定[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(8): 76-79.
- [4] 骆训煌, 周兴林, 关佳希, 等. 高精度应变式三维力传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(5): 64-67, 71.
- [5] 李立建. 柔顺并联多维力传感器机理建模与应变解析研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [6] Templeman, J.O., Sheil, B.B. and Sun, T. (2020) Multi-Axis Force Sensors: A State-of-Art Review. *Sensors and Actuators A: Physical*, **304**, Article ID: 111772. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111772>
- [7] 方立, 孙怡宁, 王理丽. 新型三维力传感器的研制与应用[J]. 传感器技术, 2002, 21(7): 49-51.
- [8] 潘桂梅, 罗毅, 黄文通, 等. 应变计式三维压力传感器的设计[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 118-122.
- [9] 张强, 宋爱国, 刘玉庆, 等. 一种指尖三维力传感器设计[J]. 计量学报, 2018, 39(1): 52-55.
- [10] 于常安, 李平, 王罗. 三分量应变传感器弹性体结构设计[J]. 传感技术学报, 2012, 25(3): 333-337.
- [11] Huang, G., Zhang, D., Guo, S. and Qu, H. (2018) Design and Optimization of a Novel Three-Dimensional Force Sensor with parallel structure. *Sensors*, **18**, Article No. 2416. <https://doi.org/10.3390/s18082416>
- [12] 赵鹏, 王桂从, 李映君, 等. 组合式自解耦压电薄膜三维力传感器研制[J]. 西安交通大学学报, 2022(3): 1-9.
- [13] Yang, C.Y. (2016) Design and Sensitivity Analysis Simulation of a Novel 3D Force Sensor Based on a Parallel Mechanism. *Sensors*, **16**, Article No. 2147. <https://doi.org/10.3390/s16122147>
- [14] 王洋滨, 王丽君, 王儒轩, 等. AUV 耐压舱多目标优化设计[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(5): 59-64.
- [15] Liang, Q., Zhang, D., Song, Q. and Ge, Y. (2010) Simulation-Driven Development and Optimization of a High-Performance Six-Dimensional Wrist Force/Torque Sensor. *Sensors & Transducers Journal*, **116**, 49-60.
- [16] Shi, C., Li, M., Lv, C., Li, J. and Wang, S. (2020) A High-Sensitivity Fiber Bragg Grating-Based Distal Force Sensor for Laparoscopic Surgery. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 2467-2475. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2951782>
- [17] Han, K., Chen, L., Xia, M., et al. (2020) Design and Optimization of a High Sensitivity Joint Torque Sensor for Robot Fingers. *Measurement*, **152**, Article No. 107328. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107328>

- [18] 张少星. 拓扑优化结构刚度性能精确制造中的精度设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [19] 赵海滨, 孙少纯, 余自. 基于 ANSYS Workbench 的电主轴支架有限元分析及拓扑优化[J]. 中国铸造装备与技术, 2015(6): 69-72.
- [20] 李修钰. 新型六维力传感器设计及模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2020.