

基于ANSYS的称重传感器弹性体结构参数优化

王鑫, 陶为戈*

江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2024年3月21日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月27日

摘要

为提升称重传感器的动态响应能力, 本文通过结构参数优化仿真调整现有模型关键尺寸, 增强其动态性能。首先, 建立弹性体的数学模型, 通过Matlab仿真其传递函数, 研究固有频率与动态响应之间的关系。随后, 根据实际工况, 完成了弹性体的结构设计, 利用ANSYS软件建立了仿真模型, 通过静力学和模态仿真获得最大等效应变值和二阶固有频率, 为优化设计提供初始方案数据。进一步, 利用ANSYS优化设计模块对仿真模型进行了结构参数优化, 通过仿真响应曲面分析输入参数对优化目标的影响, 并确定了最佳优化方案。仿真优化结果表明: 与初始方案相比, 优化后的弹性体固有频率提高了1.82%, 增强了传感器的动态响应能力和稳定性。

关键词

称重传感器, 有限元分析, 结构参数优化, 固有频率

Optimization of Elastomer Structure Parameters of Load Cell Based on ANSYS

Xin Wang, Weige Tao*

School of Electrical & Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: Mar. 21st, 2024; accepted: May 20th, 2024; published: May 27th, 2024

Abstract

In order to improve the dynamic response ability of the load cell, this paper adjusts the key dimensions of the existing model through structural parameter optimization simulation to enhance its dynamic performance. Firstly, the mathematical model of elastic body is established, and its transfer function is simulated by Matlab to study the relationship between natural frequency and dynamic response. Then, according to the actual working conditions, the structural design of the elastomer is completed, the simulation model is established by ANSYS software, and the maximum equivalent strain value and second-order natural frequency are obtained by statics and modal si-

*通讯作者。

simulation, which provides initial scheme data for optimal design. Furthermore, the structural parameters of the simulation model are optimized by ANSYS optimization design module, and the influence of input parameters on the optimization target is analyzed by simulation response surface, and the best optimization scheme is determined. The simulation results show that the natural frequency of the optimized elastomer is increased by 1.82% compared with the original scheme, and the dynamic response capability of the sensor is enhanced.

Keywords

Weighing Sensor, Finite Element Analysis, Structural Parameter Optimization, Natural Frequency

Copyright © 2024 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

电阻应变式称重传感器由于其结构简单、成本低、性能优异,在制造、物流、医疗、土木行业应用广泛[1][2]。弹性体是称重传感器的核心组件,其结构样式包括悬臂梁式、双端固定梁式、八角环式和薄壁圆筒式等[3],不同结构的弹性体应用工作场景不同。本文研究对象是一种用于电梯称重的E形称重传感器,通过有限元分析软件 ANSYS 对传感器弹性体模型进行仿真,对其进行结构参数优化来提高称重传感器的响应特性,以满足电梯运行需求。在电梯运行的过程中载重会频繁变化,称重传感器需要迅速捕捉这些变化并将准确数据传递给控制系统,因此安全性高的电梯对称重传感器的响应速度要求很高,提高称重传感器动态响应对电梯正常运行具有重大意义。

针对提高传感器动态响应,国内许多学者做出了一系列研究。路峻岭[4]等人研究了传感器的响应时间与固有频率、阻尼比之间的关系,发现在轻度欠阻尼状态下和增大敏感头的固有频率能提高传感器响应速度。杨宇新[5]为提升悬臂梁-质量块 MEMS 加速度敏感结构的固有频率,设计了一种带有直拉直压微梁的新型压阻式加速度敏感芯片。与传统的 MEMS 加速度敏感结构对比,发现新结构显著提高了其固有频率。肖锋[6]针对一种剪切型压电加速度传感器,研究其刚度和几何结构参数对传感器固有频率的影响。研究发现,中心支柱的几何尺寸对固有频率影响最大,质量块长宽以及压电片高度对固有频率也有较大影响。经过对其结构参数优化,传感器的固有频率较之前提升约 20%。吕浩然[7]发现四柱式传感器的固有频率主要受四立柱结构参数影响,通过增加立柱横截面尺寸或降低其高度,均可有效提升固有频率。同时,提高材料弹性模量并降低材料密度,也能进一步提高其固有频率。崔宏敏[8]针对某型号压阻式绝压传感器在环境载荷下易产生谐振的问题,采用 FEMtools 参数识别优化软件,识别并调整影响传感器固有频率最显著的三个敏感结构参数。经过优化后,传感器的动力学性能和可靠性均有所提升,有效降低了谐振风险。

本文针对一种 E 形梁式结构的电梯称重传感器作为研究对象,通过 ANSYS Workbench 对传感器进行三维建模并进行结构静态分析和模态分析,得到传感器模型的等效应变图和二阶固有频率云图,并利用 ANSYS Workbench 的优化设计模块对传感器模型进行优化分析计算,确定传感器的最优方案,使得传感器固有频率得到提高。

2. 弹性体动态响应理论

传感器的动态特性是指传感器对于时间变化输入量的响应特性,对称重传感器而言,动态特性就是

其随着时间变化的压力信号的响应特性。将称重传感器的数学模型近似理解为单自由度的二阶线性系统, 简称二阶系统, 并采用相应方程来描述称重传感器的动态特性。称重传感器可以用如图 1 所示的典型质量—弹簧系统来表示, 其中 k 表示弹性系数, c 为阻尼, m 为质量, $X(t)$ 为被测载荷。

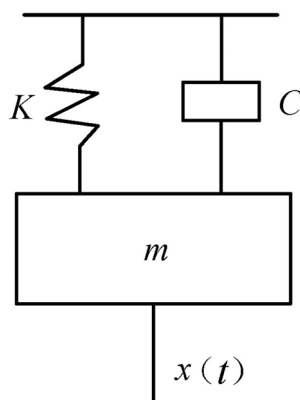


Figure 1. Damped mass-spring system

图 1. 有阻尼的质量 - 弹簧系统

当称重传感器处于欠阻尼的状态下, 其传递函数为[9]:

$$Y(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中 ζ 为阻尼比, ω_0 是称重传感器的固有频率, 二阶系统的动态性能可以由 ω 和 ζ 这两个重要参数来描述。通过 Matlab 对传递函数进行仿真如图 2 所示, 其中 $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$, 观察三个固有频率对应调整时间: $t_{s1} < t_{s2} < t_{s3}$, 可以分析得出: 当阻尼比一定时, 固有频率越大, 系统达到稳态的时间越短, 响应的速度越快。

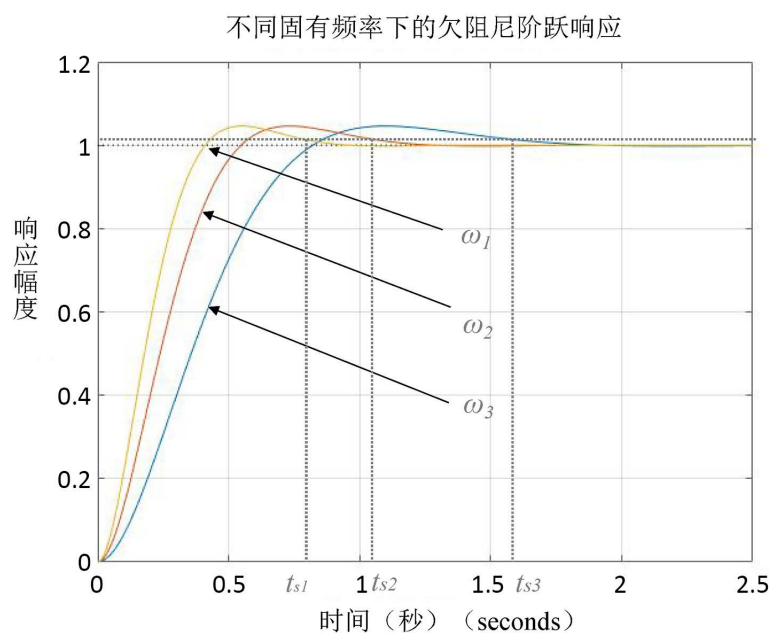


Figure 2. System response curves at different natural frequencies

图 2. 不同固有频率下的系统响应曲线

3. 称重传感器弹性体结构设计

弹性体是称重传感器的重要组成部分, 如图 3 所示, 该电梯称重传感器弹性体的特征部分有: 应变片贴片区域、钢带装配槽、接线端子贴片区域、缺口等。其中电梯曳引钢带穿插在三个金属板上的钢带装配槽中, 用于传感器的整体固定; 应变片、接线端子是工作电路的必要组件, 缺口的设计用于增加应变片位置的应变从而传感器的灵敏度。

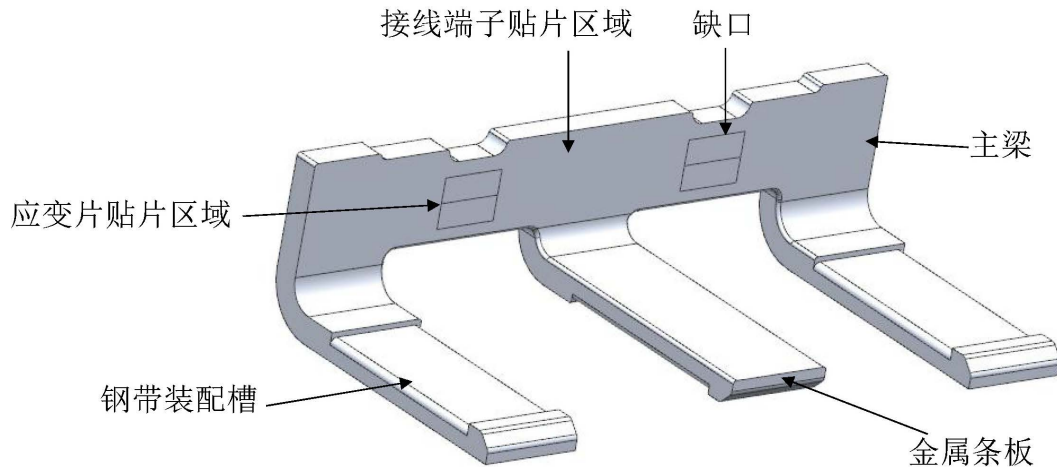


Figure 3. Elastomer three-dimensional model
图 3. 弹性体三维模型

弹性体的材料为 51CrV4 弹簧钢, 这种金属材料具有高强度、高韧性和高耐腐蚀性等特点, 同时拥有优秀的弹性恢复能力, 其材料参数如表 1 所示。

Table 1. Mechanical properties parameters of spring steel 51CrV4
表 1. 弹簧钢 51CrV4 力学性能参数

牌号	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^3$	弹性模量 E/MPa	泊松比	屈服强度 σ_s/MPa
51CrV4	7.8×10^3	2.10×10^5	0.28	1170

图 4 中称重传感器弹性体二维视图, 其主要特征尺寸为: $A = 1 \text{ mm}$, $B = 3 \text{ mm}$, $C = 1 \text{ mm}$, $D = 68 \text{ mm}$, $E = 16 \text{ mm}$, $F = 99 \text{ mm}$, $G = 44 \text{ mm}$, $H = 49.6 \text{ mm}$, $I = 0.8 \text{ mm}$, $J = 61 \text{ mm}$ 。

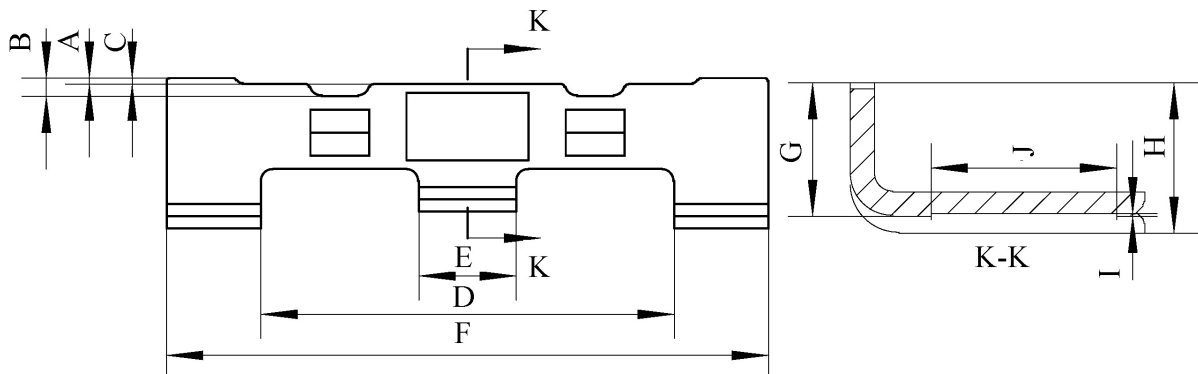


Figure 4. Two-dimensional view of elastomer
图 4. 弹性体二维视图

4. 传感器弹性体的有限元分析

该称重传感器弹性体安装在电梯钢带上, 由钢带受载荷拉伸时引起弹性体变形, 在静力学仿真中需要设置该称重传感器弹性体的受载荷情况, 因此需要得知弹性体三个钢带装配槽面的载荷状况, 由于用理论计算三个接触面的载荷过程较为复杂, 可通过建立钢带模型与弹性体进行装配得到仿真模型。其中, 钢带是由钢丝和包覆层组成, 钢丝的材料为 65 钢, 材料密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 204 GPa, 泊松比为 0.26; 包覆层的材料为 PU-80A, 材料密度为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 78.4 GPa, 泊松比为 0.47。对仿真模型进行约束条件设置: 弹性体与钢带包覆层之间接触方式设置为摩擦接触(摩擦系数 0.2), 钢丝与包覆层设置绑定接触; 钢带左端端面设置固定约束, 右端端面设置向右的钢带最大拉伸载荷 $F = 10730 \text{ N}$ 。接着, 对仿真模型进行网格自由划分, 网格划分后的仿真模型如图 5 所示, 单元格类型为六边形, 尺寸设置为 1 mm, 共划分了 174,326 单元和 625,040 节点。

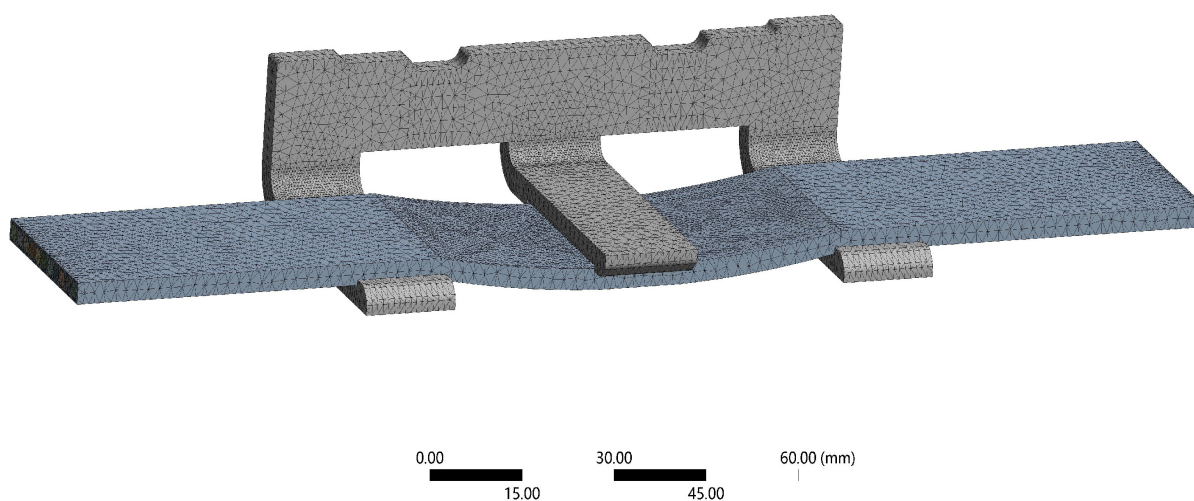


Figure 5. Simulation model

图 5. 仿真模型

在本研究中, 对于传感器弹性体来说, 由于外部的激励不是很高, 在弹性体的振动中, 高阶能量占比较低, 对整个结构振动的响应不大, 因此不考虑高阶模态。本文中求解了弹性体前 6 阶状态下的模态, 在不考虑高阶模态的情况下, 只分析传感器弹性体的二阶模态, 研究其固有频率和振型。经过有限元求解后得出的二阶模态振型如图 6 所示, 可以看出弹性体的二阶固有频率为 312.86 Hz。

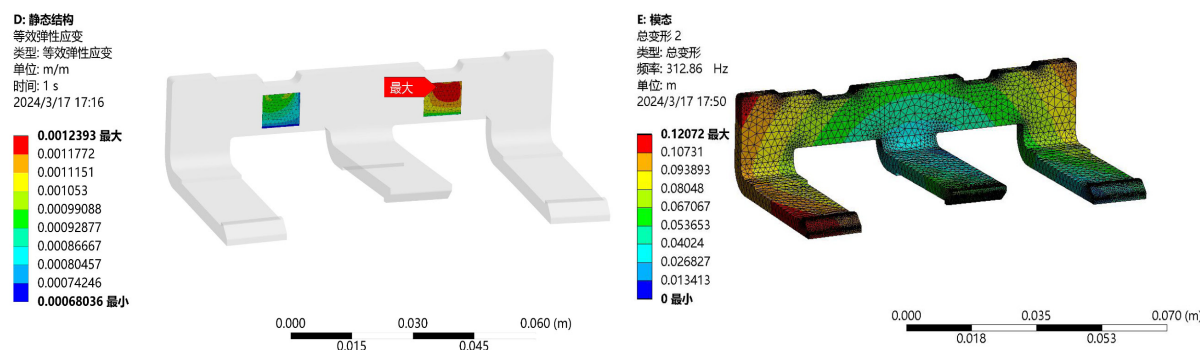


Figure 6. Finite element simulation results

图 6. 有限元仿真结果

5. 传感器弹性体的结构参数优化

5.1. 传感器弹性体的结构参数对目标的影响

在 ANSYS Workbench 中使用 optiSlang 来研究传感器弹性体的结构参数对目标的影响, 通过设置设计参数与输出参数(最大等效应变值、二阶固有频率)在优化模块中求解, 将得到的有限个设计点通过运用回归分析方法(如线性回归、多项式回归等)拟合响应面模型。由图 4 中选定输入尺寸参数 A, B, D 作为设计参数, 通过响应面分析, 得到输入参数和输出参数的响应曲面, 如图 7 所示。

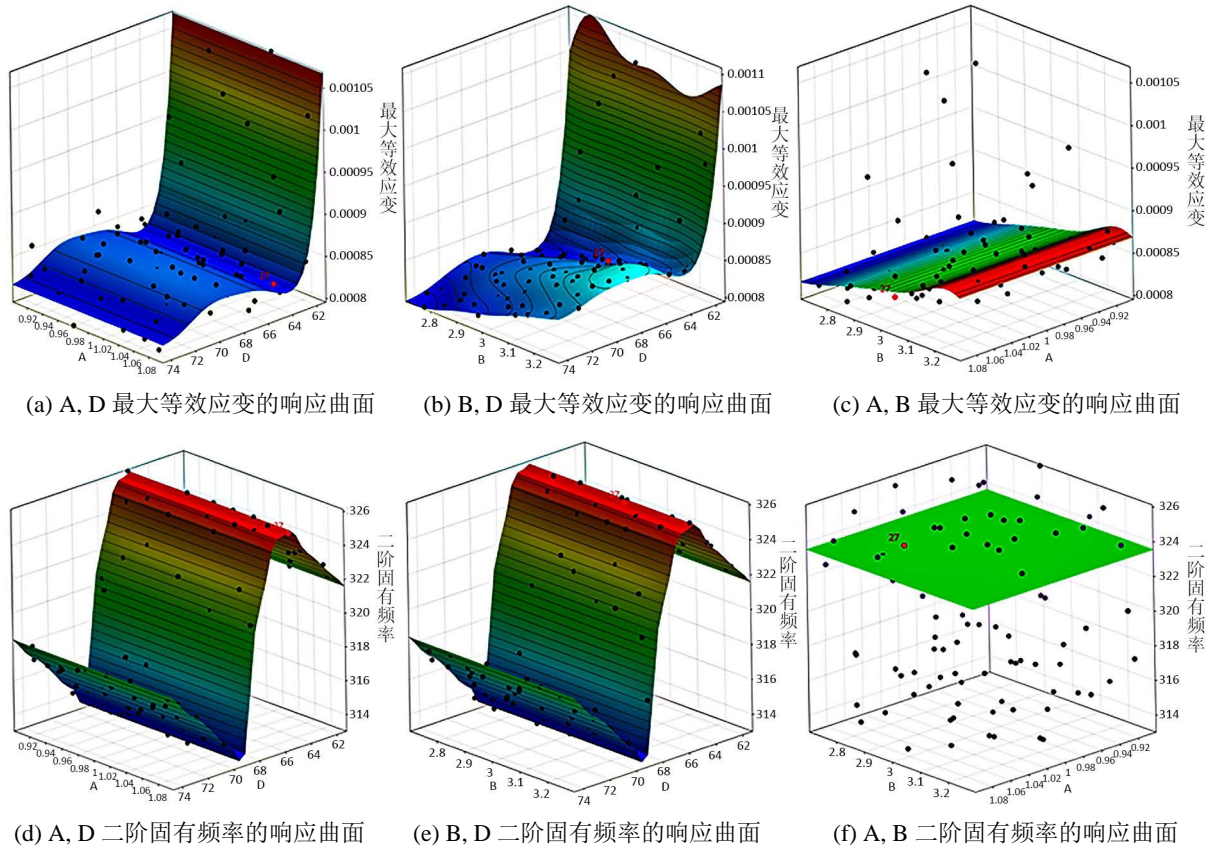


Figure 7. Parametric response surface
图 7. 参数响应曲面

从响应曲面图中可以看出, 尺寸变量 D 对最大等效应变影响最大, 尺寸变量 A 对最大等效应变影响最小; 尺寸变量 B 越大、尺寸变量 D 越小, 则称重传感器的最大等效应变越大。同时, 尺寸变量 A、B 的数值变化对模型最大等效应变影响微弱, 对二阶固有频率影响基本不变。尺寸 D 从 68 mm 到 74 mm 段二阶固有频率呈上升趋势, 从 64 mm 到 69 mm 段二阶固有频率呈下降趋势, 在 62 mm 到 64 mm 段, 尺寸变量 D 在 64 mm 左右, 二阶固有频率存在极大值。

5.2. 传感器弹性体的结构参数优化

响应曲面优化方法可以同时多个目标进行优化。从样本中得出最佳设计点, 可设定不同优化目标以优化设计。优化设计须有 3 个要素: 设计变量、约束条件和目标函数。优化的数学模型如下式所示[10]

$$\begin{cases} \text{find : } X = X_1, X_2 \cdots X_n \\ \quad \max(\varepsilon) \\ \quad \max(f_2) \\ \text{subject to : } \varepsilon_{\max}(X) \geq \varepsilon_{\max} \\ \quad \quad \quad f_2(X) \geq f_2 \\ \quad X_j^L \leq X_j \leq X_j^U (j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $X = X_1, X_2, \dots, X_n$ 为设计变量; X_j^L 为尺寸变量的下限值, X_j^U 为尺寸变量的上限值; ε_{\max} 为优化前传感器弹性体模型的等效应变最大值, $\varepsilon_{\max}(X)$ 为优化后的等效应变最大值; f_2 为优化前传感器弹性体模型的二阶固有频率, $f_2(X)$ 为优化后的二阶固有频率。由灵敏度分析的结果, 将选取 3 个结构尺寸参数作为设计变量, 等效应变最大值、二阶固有频率作为目标函数进行响应面优化。根据设定好的优化目标, ANSYS 通过优化计算得到如下四组优化设计方案, 如表 2 所示。

Table 2. Optimum proposal

表 2. 优化方案

	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	最大等效应变/ 10^{-3}	二阶固有频率/Hz
初始	1	3	1	68	1.239	312.86
1	0.921	3.117	1.013	74.46	1.348	318.31
2	0.981	3.219	1.055	74.052	1.381	317.89
3	1.011	3.159	0.955	74.324	1.359	318.13
4	1.067	3.261	0.941	71.196	1.430	318.55

根据表 2 中的四个优化方案对比初始方案, 在最大等效应变不变或者变大的情况下, 四个优化方案的二阶固有频率均有一定提升, 总体提升的范围在 318 Hz 左右, 方案 4 二阶固有频率最大, 且尺寸 D 变动幅度最小。若尺寸 D 过大, 则弹性体的两端金属条板则越窄, 从疲劳失效的角度来看, 金属条板越窄越容易过早失效。把方案 4 作为最终的优化方案, 其二阶固有频率为 318.55 Hz, 较初始方案的二阶固有频率 312.86 Hz 提高了 1.82%。

6. 结束语

首先, 为称重传感器的建立动态响应数学模型, 通过使用 Matlab 对其传递函数进行仿真, 分析仿真图得出: 当传感器弹性体固有频率越大时, 其调整时间越短, 响应速度越好。其次, 对称重传感器弹性体进行结构设计以满足使用要求, 通过有限元软件 ANSYS 完成对称重传感器弹性体的静力学仿真和模态仿真, 研究初始方案下最大等效应变值和二阶固有频率并为优化设计提供依据。最后, 选取弹性体的三个结构参数作为优化设计变量, 使用 ANSYS 的优化模块对弹性体进行结构参数优化, 通过仿真得到的响应曲面分析设计变量对目标函数的影响, 从四个优化方案中选择最佳的参数组合方案, 使传感器二阶固有频率较初始模型提高到了 1.82%, 增强了传感器的动态响应能力和稳定性。

基金项目

常州市 5G+工业互联网融合应用重点实验室(CM20223015)。

参考文献

- [1] 张炜. 电子皮带秤称重传感器灵敏度对散货计量精度的影响[J]. 衡器, 2024, 53(1): 11-15.

- [2] 夏睿, 徐玮, 刘雷, 等. 电阻应变式传感器在下肢牵引手术中的应用[J]. 中国现代医学杂志, 2023, 33(15): 32-37.
- [3] 郑朝阳. 一种机器人腕力传感器弹性体结构设计及力学性能分析[J]. 仪表技术与传感器, 2017(11): 14-16.
- [4] 路峻岭, 田文杰, 张伟, 等. 压电谐振式力传感器响应时间的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2005(12): 49-51.
- [5] 杨宇新, 揣荣岩, 张冰, 等. 高固有频率压阻加速度敏感芯片的结构与特性分析[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 18-22.
- [6] 肖峰, 彭斌, 张万里. 三角剪切型压电加速度传感器固有频率计算及优化[J]. 仪表技术与传感器, 2023(4): 11-14.
- [7] 吕浩然, 赵印明, 王敏宁, 等. 四柱式力传感器固有频率提升研究[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 48-54.
- [8] 崔宏敏, 陈宝成, 丁钟凯, 等. 压力传感器结构参数识别及优化方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2805-2812.
- [9] 吴四清. 基于 MATLAB 的二阶系统仿真与分析[J]. 咸宁学院学报, 2009, 29(3): 79-80.
- [10] 冯强, 仲梁维, 李磊. ANSYS Workbench 仿真平台在支架优化设计中的应用[J]. 软件导刊, 2017, 16(11): 172-175.