

基于负泊松比结构的板簧压电称重传感器增敏设计

刘冲^{1*}, 殷仁松^{1*}, 梅思雨^{1*}, 巫晟逸², 谢龙涛¹, 郁峰¹, 赵岷江², 陈晖^{1,3#}

¹宁波大学力学与工程科学学院, 极端环境交叉力学研究中心, 浙江 宁波

²台晶(宁波)电子有限公司, 浙江 宁波

³宁波大学力学与工程科学学院, 压电器件技术实验室, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年6月20日; 录用日期: 2026年7月13日; 发布日期: 2026年7月21日

摘要

针对传统板簧压电称重传感器输出信号较弱、灵敏度受板簧表面自然应变限制的问题, 本文提出一种基于负泊松比结构的板簧压电称重传感器增敏设计方法。在不改变板簧主体结构和不削弱其承载能力的前提下, 将凹入六边形负泊松比结构作为应变放大附件布置于板簧表面应变较大的区域, 利用其拉胀效应实现板簧弯曲变形向压电薄膜有效应变的转换与放大。首先建立半板簧有限元模型, 分析板簧在动态载荷作用下的应变分布, 并确定压电薄膜的优先布置位置; 随后对负泊松比结构的几何参数进行分析, 建立板簧-负泊松比结构-压电薄膜耦合模型, 研究其应变放大效果和电压输出特性。仿真结果表明, 在0~10 t载荷和1~10 Hz频率范围内, 压电薄膜输出电压与载荷质量保持良好的线性关系。与传统直接贴片方式相比, 负泊松比结构能够显著提高压电薄膜的有效应变和输出电压; 在10 Hz工况下, 传感器灵敏度由5.72 mV/t提高至8.74 mV/t, 为传统直接贴片方式的1.53倍。研究结果表明, 该方法能够在保持板簧结构完整性的同时有效提升板簧压电称重传感器的输出性能, 可为高灵敏度车载称重传感器设计提供参考。

关键词

板簧, 压电薄膜, 负泊松比结构, 应变放大, 称重传感器

Sensitivity Enhancement Design of a Leaf-Spring Piezoelectric Weighing Sensor Based on an Auxetic Structure

Chong Liu^{1*}, Rensong Yin^{1*}, Siyu Mei^{1*}, Chengyi Wu², Longtao Xie¹, Feng Yu¹, Minjiang Zhao², Hui Chen^{1,3#}

*共同一作。

#通讯作者。

文章引用: 刘冲, 殷仁松, 梅思雨, 巫晟逸, 谢龙涛, 郁峰, 赵岷江, 陈晖. 基于负泊松比结构的板簧压电称重传感器增敏设计[J]. 建模与仿真, 2026, 15(7): 38-48. DOI: 10.12677/mos.2026.157105

¹Center for Mechanics Plus under Extreme Environments, School of Mechanics and Engineering Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

²TXC (Ningbo) Corporation, Ningbo Zhejiang

³Piezoelectric Device Laboratory, School of Mechanics and Engineering Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Received: June 20, 2026; accepted: July 13, 2026; published: July 21, 2026

Abstract

To address the weak output signal and sensitivity limitation caused by the limited natural surface strain of conventional leaf-spring piezoelectric weighing sensors, this paper proposes a sensitivity-enhanced design method based on an auxetic structure. Without changing the main structure of the leaf spring or weakening its load-bearing capacity, a re-entrant hexagonal auxetic structure is attached to the high-strain region on the leaf-spring surface as a strain-amplifying component. The tensile-expansion effect of the auxetic structure is used to convert and amplify the bending deformation of the leaf spring into effective strain in the piezoelectric film. First, a half leaf-spring finite element model is established to analyze the strain distribution of the leaf spring under dynamic loading and determine the preferred placement of the piezoelectric film. Then, the geometric parameters of the auxetic structure are analyzed, and a coupled leaf spring-auxetic structure-piezoelectric film model is developed to investigate the strain amplification effect and voltage output characteristics. The simulation results show that, within the load range of 0~10 t and frequency range of 1~10 Hz, the output voltage of the piezoelectric film maintains a good linear relationship with the load mass. Compared with the conventional direct-bonding method, the auxetic structure significantly increases the effective strain and output voltage of the piezoelectric film. Under the 10 Hz condition, the sensor sensitivity increases from 5.72 mV/t to 8.74 mV/t, which is 1.53 times that of the conventional direct-bonding method. The results indicate that the proposed method can effectively improve the output performance of the leaf-spring piezoelectric weighing sensor while maintaining the structural integrity of the leaf spring, providing a reference for the design of high-sensitivity onboard weighing sensors.

Keywords

Leaf-Spring, Piezoelectric Film, Auxetic Structure, Strain Amplification, Weighing Sensor

Copyright © 2026 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

随着公路货运规模的持续扩大, 载货车辆超载问题日益突出。车辆超载不仅会加速道路、桥梁等基础设施的损伤, 还会引起制动距离增加、悬架系统受力恶化以及车辆操纵稳定性下降等问题, 对道路交通安全和运输管理带来不利影响。因此, 对车辆载荷状态进行实时、准确监测, 是提升车辆运行安全性、实现超载预警和智能交通监管的重要技术基础[1]-[3]。传统车辆称重方式多依赖固定式地磅或检测站设备, 虽然测量精度较高, 但存在检测地点固定、车辆需停车、实时性不足等局限。相比之下, 车载动态称重技术能够在车辆运行过程中获取载荷信息, 更适合与车载控制、无线通信和智能预警系统结合, 在车

辆载荷在线监测领域具有较高的应用价值[4]-[6]。

钢板弹簧是载货汽车悬架系统中的关键承载与弹性元件, 具有承载、导向、缓冲和减振等功能。车辆载荷变化会直接引起板簧弯曲变形和表面应变变化, 因此, 利用板簧变形或应变信息反演车辆载重, 是车载称重系统中一种结构简单、安装方便且工程适应性较强的方法[7]-[10]。现有研究通常将电阻应变片、压电元件或其他敏感元件直接粘贴于板簧表面, 通过测量局部应变、电压或频率响应, 并结合标定模型实现载荷估计[11]-[13]。其中, 压电材料具有响应速度快、结构紧凑、易于集成等特点, 在动态载荷检测和车载称重传感中具有潜在优势。然而, 当压电薄膜直接粘贴于板簧表面时, 其输出信号主要取决于板簧局部自然应变。在低载荷、小变形或传感区域应变幅值有限的情况下, 压电输出信号较弱, 容易影响称重系统的分辨能力和测量稳定性。

为提高传感输出, 一种直接思路是在板簧主体上开孔、挖槽或改变局部截面, 以提高局部应变水平。然而, 该方法会改变板簧原有承载路径和刚度分布, 可能引起应力集中, 并对板簧强度和疲劳可靠性产生不利影响[14]。因此, 如何在不破坏板簧主体结构、不削弱其承载能力的前提下, 实现传感区域应变放大, 是提升板簧压电称重传感器灵敏度的关键问题。近年来, 机械超材料和负泊松比结构因具有可设计的几何构型和特殊变形模式, 在应变调控、能量吸收和柔性传感等领域受到广泛关注[15]-[17]。与常规材料受拉横向收缩不同, 负泊松比结构在受拉时会产生横向扩张, 即拉胀效应。该特性可用于实现应变方向转换和局部应变放大, 为压电传感器增敏设计提供了新的结构调控思路[18]。

基于上述分析, 本文提出一种基于负泊松比结构的板簧压电称重传感器增敏设计方法。该方法将凹入六边形负泊松比结构作为应变放大附件布置于板簧表面应变较大的区域, 在不改变板簧主体结构和承载能力的前提下, 将板簧受载弯曲产生的表面变形传递至负泊松比结构, 并利用其拉胀效应将板簧表面主应变转换和放大为压电薄膜的有效工作应变, 从而提高压电薄膜的输出电压和称重灵敏度。本文首先建立半板簧有限元模型, 分析动态载荷下板簧表面应变分布并确定压电薄膜布置位置; 随后设计凹入六边形负泊松比结构, 研究其几何参数对泊松比特性的影响; 最后建立板簧-负泊松比结构-压电薄膜耦合模型, 对比分析传统直接贴片方式与负泊松比结构增敏方式下的电压输出和传感灵敏度, 验证所提出结构在板簧压电称重传感器增敏设计中的有效性。

2. 板簧压电称重传感器建模与基准响应分析

2.1. 板簧结构简化与有限元模型

钢板弹簧是载货汽车悬架系统中的主要承载弹性元件, 通常由多片不同长度的钢板叠加组成, 如图 1 所示。车辆载荷经车桥、板簧座及固定连接结构传递至板簧, 使板簧产生弯曲变形。由于板簧的弯曲变形和表面应变与车辆载荷之间存在对应关系, 因此可通过测量板簧表面应变或由应变引起的传感信号变化, 间接反映车辆载重。对于基于压电薄膜的板簧称重传感器而言, 在结构安全允许范围内, 压电薄膜所在区域的有效应变越大, 其受到的机械激励越明显, 输出电压信号也越强, 有利于提高载荷测量灵敏度。

实际车辆板簧结构通常关于中部固定位置近似对称, 中部通过铆钉、压板或 U 型螺栓等结构与车架或车桥连接。为降低计算复杂度并提高建模效率, 本文根据结构对称性建立半板簧有限元模型, 如图 2(a) 所示。完整板簧所受载荷由左右两侧共同承担, 因此在简化模型中, 外部载荷取作用于该板簧总成载荷的一半。本文考虑由 5 块钢板组成的多片板簧结构, 各簧片长度分别为 $L_1 = 130 \text{ mm}$ 、 $L_2 = 270 \text{ mm}$ 、 $L_3 = 400 \text{ mm}$ 、 $L_4 = 570 \text{ mm}$ 、和 $L_5 = 575 \text{ mm}$, 厚度均为 h_0 。模型左端和右端分别设置长度为 $L_s = 25 \text{ mm}$ 的堆叠钢板区域, 用于等效模拟板簧中部铆接固定结构和端部卷耳连接结构。图 2(a) 中左侧虚线表示板簧中心对称面。棕色区域为中部锚定区域, 在该区域施加 z 方向位移约束, 以模拟铆钉固定结构对板簧

中部的限制作用; 右端堆叠区域用于模拟板簧端部卷耳及其连接约束。为突出板簧整体弯曲响应与传感区域应变分布, 本文在初始模型中将各簧片之间的接触关系等效为连续连接, 使载荷能够在多层簧片之间传递。板簧材料设置为线弹性钢材, 并采用固体力学模块求解其受载后的变形和应变分布。该简化模型能够较好反映板簧在外载作用下的整体弯曲变形特征, 并为后续压电薄膜布置位置确定及负泊松比结构增敏设计提供基础。

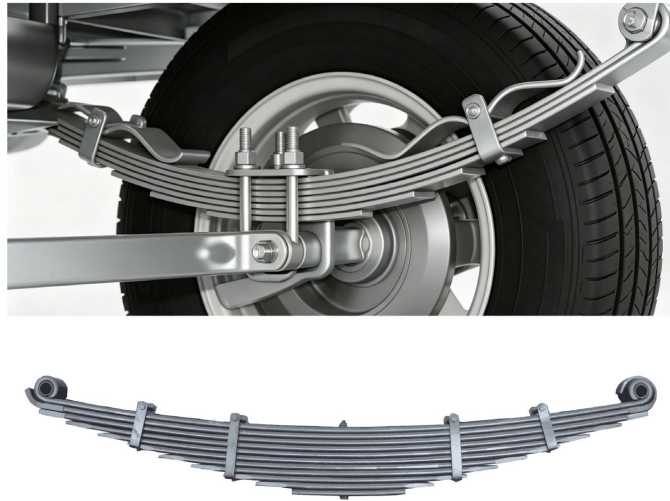


Figure 1. Schematic diagram of the automotive leaf-spring suspension and multi-leaf spring
图 1. 汽车板簧悬架及多片板簧结构示意图

2.2. 压电薄膜布置与传感模型建立

压电薄膜能够通过正压电效应将机械变形转化为电信号输出。当车辆载荷作用于板簧时, 板簧发生弯曲变形, 其表面产生拉伸或压缩应变。粘贴于板簧表面的压电薄膜随板簧同步变形, 并在上下电极之间产生电荷或电压响应。通过测量压电薄膜两端的输出电压, 即可建立外部载荷与电压信号之间的对应关系, 从而实现车辆载重检测。本文采用 COMSOL Multiphysics 建立板簧-压电薄膜耦合模型。板簧部分采用固体力学模块进行计算, 材料设置为线弹性钢材; 压电薄膜选用 PVDF 作为敏感材料, 并采用压电材料模型描述其机电耦合响应。压电薄膜与板簧表面之间设置为绑定连接, 以保证板簧表面变形能够有效传递至压电材料。压电薄膜上下表面分别设置电极边界, 其中一侧接地, 另一侧作为电压输出端, 用于读取外载作用下产生的电势响应。

由于压电薄膜的输出电压与其所受机械应变密切相关, 因此薄膜安装位置对传感器输出性能具有重要影响。一般而言, 压电薄膜应布置在板簧表面应变较大的区域, 以获得更明显的机械激励和更高的电压输出。基于此, 本文首先对未粘贴压电薄膜的板簧模型进行有限元分析, 获得其受载后的 x 方向应变分布, 如图 2(b)所示。结果表明, 在给定载荷作用下, 板簧表面存在明显的高应变区域, 图中黑色圆形标记位置为 x 方向应变较大的区域, 因此将该区域作为压电薄膜的优先布置位置。随后, 在上述高应变区域粘贴压电薄膜, 建立板簧-压电薄膜直接贴片模型, 其 x 方向应变分布如图 2(c)所示。由图可见, 压电薄膜安装后, 板簧整体应变分布规律基本保持一致, 说明薄膜传感器对板簧主体承载和整体变形影响较小。局部放大结果进一步表明, 在传统直接贴片方式下, 压电薄膜的 x 方向应变主要由板簧弯曲变形控制, 幅值明显大于 y 方向应变; 而 y 方向应变相对较小, 说明直接贴片模型主要利用板簧表面轴向弯曲应变进行传感。

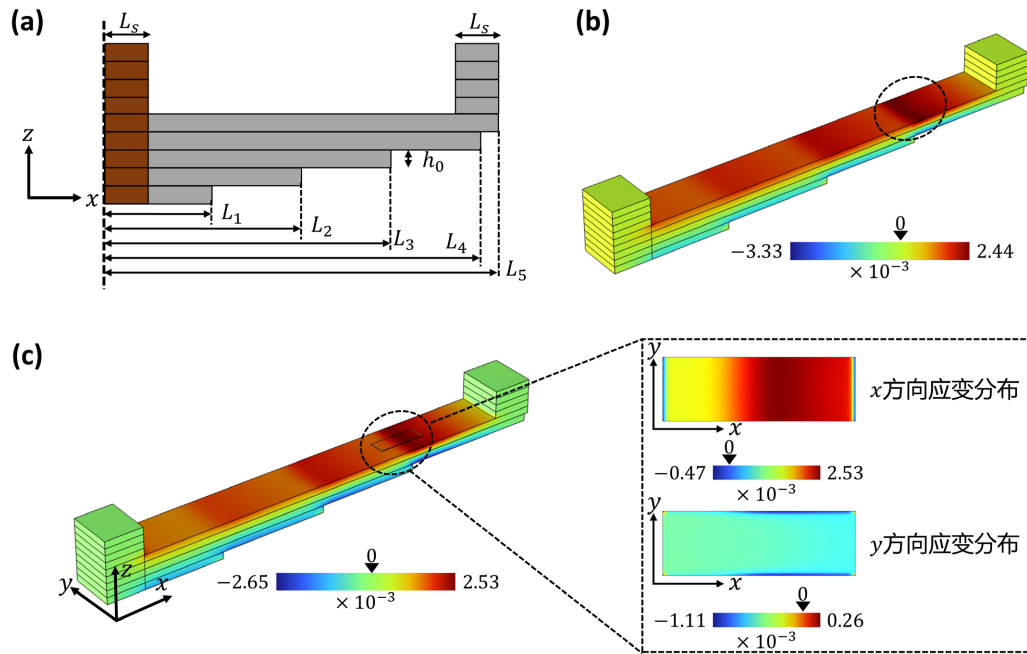


Figure 2. Finite element model of the leaf spring and x-direction strain distributions. (a) Leaf-spring model; (b) strain distribution without the PVDF film; (c) strain distribution after bonding the PVDF film

图 2. 板簧有限元模型及 x 方向应变分布。(a) 板簧模型; (b) 未粘贴 PVDF 薄膜时的应变分布; (c) 粘贴 PVDF 薄膜后的应变分布

上述分析表明, 直接粘贴压电薄膜能够实现板簧载荷信号的压电转换, 但压电薄膜的有效应变主要受板簧表面自然应变限制。当载荷较小或传感区域应变幅值有限时, 输出电压仍存在不足。因此, 后续将以该直接贴片模型作为基准模型, 并在此基础上引入负泊松比结构对压电薄膜有效应变进行转换与放大, 以提高传感器输出性能。

2.3. 压电转换理论与负载阻抗说明

压电薄膜的电压输出来源于机械应变引起的电位移变化。对于上下表面设置电极、沿厚度方向输出电压的 PVDF 薄膜, 其线性压电本构关系可写为

$$D_3 = d_{31}T_1 + d_{32}T_2 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (1)$$

式中 D_3 为厚度方向电位移, T_1 和 T_2 分别为薄膜面内两个主方向上的应力, d_{31} 和 d_{32} 为压电应变常数, ε_{33}^T 为恒应力介电常数, E_3 为厚度方向电场为输出电压。由上式可知, 压电薄膜的输出不仅与应变幅值有关, 也与应变方向、材料坐标系和极化方向有关。当薄膜主要受到某一面内方向的拉伸或压缩时, 该方向上的应力分量将通过相应的压电系数转化为厚度方向电荷输出。当压电薄膜外接负载电阻 R_L 时, 薄膜可等效为压电电流源与自身电容 C_p 并联后连接外部负载。对于简谐激励, 外部负载上的输出电压满足

$$(1/R_L + i\omega C_p)V = i\omega A_p (d_{31}T_1 + d_{32}T_2) \quad (2)$$

其中 $\omega = 2\pi f$, A_p 为压电薄膜有效电极面积。由此可得

$$V = i\omega R_L A_p (d_{31}T_1 + d_{32}T_2) / (1 + i\omega R_L C_p) \quad (3)$$

该表达式表明, 压电薄膜输出电压同时受机械应力、激励频率、薄膜电容和外接负载电阻影响。因此, 外接负载电阻会影响输出电压的绝对幅值和频率响应特性。需要说明的是, 本文仿真中采用的

$R_L = 2000 \Omega$ 并非实际车载压电传感器信号调理电路输入阻抗的推荐值, 而是作为有限元频域计算中的统一等效外接负载, 用于在相同电学边界条件下对比传统直接贴片模型与负泊松比结构增敏模型的相对输出差异。实际压电传感测试中, 通常应采用高输入阻抗电荷放大器或电压调理电路, 以减小电荷泄漏并提高低频输出稳定性。因此, 本文给出的电压幅值和灵敏度应理解为该等效负载条件下的仿真结果; 工程应用中的绝对输出幅值仍需结合实际信号调理电路输入阻抗进行重新标定。

2.4. 动态载荷下直接贴片模型的基准输出响应

车辆实际行驶过程中, 板簧所受载荷并非完全静态, 而是会随着道路激励、车辆振动和载荷变化呈现一定的动态特征。为分析板簧压电称重传感器在动态载荷作用下的电压输出特性, 本文采用频域方法对板簧-压电薄膜直接贴片模型进行有限元仿真。频域载荷可表示为简谐形式:

$$F(t) = F_0 \exp(i2\pi ft) \quad (4)$$

式中, F_0 为端部载荷, f 为激励频率, t 为时间。设车辆质量载荷为 M , 对应重力为 Mg , 其中 g 为重力加速度。由于本文采用半板簧模型, 完整板簧所承受的载荷由左右两侧共同承担, 因此施加于半模型端部的等效载荷幅值为: $F_0 = Mg/2$ 。本文首先以 $M = 1 \text{ t}$ 、激励频率 $f = 1 \text{ Hz}$ 为基准工况, 对直接贴片模型进行频域计算, 获得板簧和压电薄膜在动态载荷下的稳态响应。随后, 为进一步研究载荷质量和激励频率对压电输出电压的影响, 在外接负载电阻为 2000Ω 的条件下, 对不同载荷和频率工况进行参数化分析。其中, 载荷质量范围取 $0 \sim 10 \text{ t}$, 激励频率范围取 $1 \sim 10 \text{ Hz}$, 分别计算各工况下压电薄膜两端的输出电压。

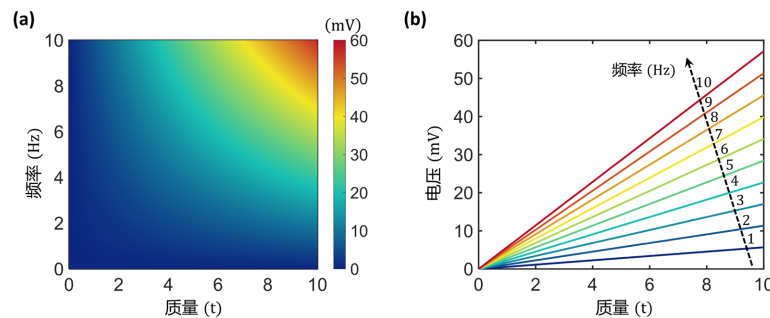


Figure 3. Output voltage response of the directly bonded PVDF film under different loads and excitation frequencies. (a) Voltage distribution map; (b) relationship between load mass and output voltage

图 3. 直接贴片 PVDF 薄膜在不同载荷和激励频率下的输出电压响应。(a) 电压分布图; (b) 载荷质量与输出电压的关系

图 3(a)给出了不同载荷质量和激励频率下压电薄膜输出电压的分布结果。可以看出, 输出电压随载荷质量和激励频率的增大而逐渐提高。当载荷质量较小或激励频率较低时, 板簧弯曲变形较弱, 压电薄膜所受机械激励有限, 因而输出电压较低; 随着载荷质量增大, 板簧弯曲变形增强, 压电薄膜有效应变随之增加, 输出电压相应升高。同时, 在相同载荷质量条件下, 激励频率升高也会增强压电薄膜的电压响应, 说明频率对压电输出具有一定影响。为进一步明确载荷质量与输出电压之间的关系, 图 3(b)给出了不同激励频率下输出电压随载荷质量变化的曲线。由图可见, 在 $1 \sim 10 \text{ Hz}$ 频率范围内, 各频率对应的电压-质量曲线均呈近似线性关系, 说明直接粘贴于板簧表面的压电薄膜能够实现载荷变化到电压信号的线性转换。该线性关系可表示为:

$$V = \chi M + b \quad (5)$$

式中, V 为压电薄膜输出电压, M 为外部载荷质量, b 为拟合截距, χ 为电压 - 质量曲线的斜率。本文将 χ 定义为称重传感灵敏度, 其单位为 mV/t 。 χ 越大, 表示在相同载荷变化下压电薄膜能够产生更明显的电压变化, 传感信号更易被检测, 从而有利于提高称重系统的分辨能力和测量灵敏度。由图 3(b) 还可以看出, 随着激励频率由 1 Hz 增加至 10 Hz, 电压 - 质量曲线斜率逐渐增大, 说明频率升高会提高压电薄膜的输出响应和称重灵敏度。总体而言, 传统直接贴片模型能够实现较好的线性载荷检测, 但其输出电压主要受板簧表面局部自然应变幅值限制。当载荷较小或传感区域应变不足时, 压电薄膜输出信号仍有进一步提升空间。因此, 后续将以该直接贴片模型作为基准模型, 引入负泊松比结构对压电薄膜有效应变进行转换与放大, 以进一步提高板簧压电称重传感器的输出电压和称重灵敏度。

3. 负泊松比结构增敏设计与性能分析

3.1. 负泊松比结构设计及参数分析

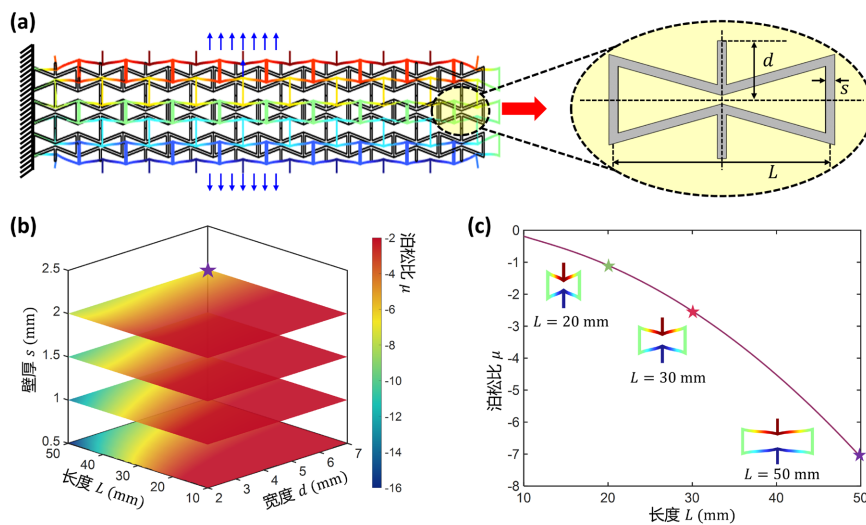


Figure 4. Design and parameter analysis of the re-entrant hexagonal auxetic structure. (a) Tensile deformation and geometric parameters; (b) Poisson's ratio under different geometric parameters; (c) effect of cell length on Poisson's ratio
图 4. 凹入六边形负泊松比结构设计及参数分析。(a) 拉伸变形与几何参数; (b) 不同几何参数下的泊松比; (c) 单胞长度对泊松比的影响

由第二节分析可知, 传统直接贴片模型中, 压电薄膜主要随板簧表面产生轴向弯曲应变, 其输出电压受板簧局部自然应变幅值限制。当载荷较小或传感区域应变不足时, 压电薄膜的有效机械激励较弱, 限制了传感器灵敏度的进一步提高。为增强压电薄膜的有效应变, 本文引入凹入六边形负泊松比结构作为应变放大附件, 利用其拉胀效应实现板簧表面变形的方向转换与局部放大。图 4(a) 给出了凹入六边形负泊松比结构的几何构型、主要参数及受拉变形特征。该结构左端固定, 右端沿 x 方向施加拉伸位移。不同于常规结构在受拉时发生横向收缩, 凹入六边形结构在 x 方向受拉后会沿 y 方向产生外扩变形, 表现出典型的负泊松比特性。该结构的主要几何参数包括单胞长度、内凹宽度和壁厚, 结构高度保持不变。本文利用该横向拉胀特性, 将板簧表面沿 x 方向的弯曲变形转化为负泊松比结构沿 y 方向的放大变形, 从而提高压电薄膜的有效工作应变。

为定量评价不同结构参数对负泊松比效应的影响, 定义等效泊松比为:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (6)$$

式中, ε_y 和 ε_x 分别表示结构在 x 和 y 方向上的平均应变。若 $\mu < 0$, 结构具有负泊松比特性。图 4(b) 给出了不同几何参数条件下结构泊松比的变化结果。可以看出, 内凹宽度对泊松比的影响相对较小, 而单胞长度和壁厚对负泊松比效应具有更显著影响。壁厚较小时, 结构杆件更易发生转动和展开; 单胞长度较大时, 结构在受拉过程中的横向外扩变形更加明显, 因此负泊松比效应更强。基于参数分析结果, 本文选取图 4(b) 中紫色星形标记对应的几何参数作为后续板簧集成模型的代表性结构参数。为进一步说明单胞长度对结构变形能力的影响, 图 4(c) 给出了不同单胞长度条件下泊松比的变化曲线。结果表明, 随着单胞长度增加, 泊松比逐渐减小, 其负值绝对值增大, 说明较长的凹入单胞更有利于产生横向拉胀变形。图中插图所示的变形模式也表明, 单胞长度越大, 结构横向外扩程度越明显。因此, 在满足结构强度和安装空间要求的前提下, 适当增大单胞长度有利于提高负泊松比结构的应变转换和放大能力。

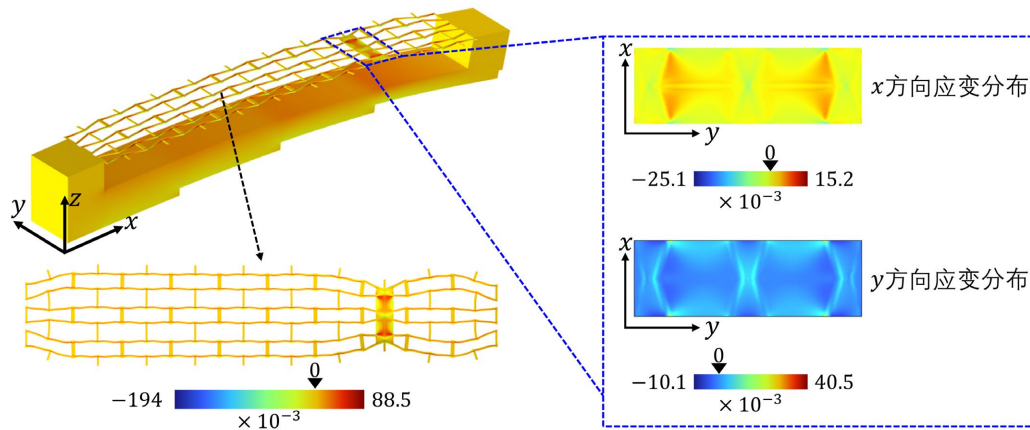


Figure 5. Strain distribution of the leaf-spring integrated with the auxetic structure and PVDF film

图 5. 集成负泊松比结构和 PVDF 薄膜后的板簧应变分布

3.2. 板簧 - 负泊松比结构 - 压电薄膜集成模型

在确定负泊松比结构参数后, 将其作为应变放大附件布置于板簧表面高应变区域, 建立板簧 - 负泊松比结构 - 压电薄膜一体化有限元模型, 如图 5 所示。该布置方式不需要在板簧主体上开孔、挖槽或削弱截面, 能够在保持板簧原有承载结构完整性的前提下, 实现传感区域应变的局部调控。在该集成模型中, 板簧受载弯曲后, 其表面轴向变形首先传递至负泊松比结构。负泊松比结构在 x 方向变形驱动下产生 y 方向横向扩张, 从而将板簧表面的主导弯曲应变转换为压电薄膜所在方向的有效应变。压电薄膜安装于负泊松比结构的放大变形区域, 使其能够获得比直接贴片方式更强的机械激励。与传统直接粘贴于板簧表面的方式相比, 该结构不仅可以改变压电薄膜的主要受力方向, 还可以通过几何变形机制提高局部应变水平。

需要注意的是, 压电薄膜的输出响应与其材料坐标系和极化方向密切相关。在 COMSOL Multiphysics 中建立集成模型时, 本文为安装于负泊松比结构上的压电薄膜单独设置局部材料坐标系。由于负泊松比结构主要产生横向拉胀变形, 若仍采用默认材料坐标系, 压电薄膜的主压电响应方向可能与结构放大应变方向不匹配, 难以充分利用拉胀效应。因此, 本文将压电薄膜的局部材料坐标系旋转 90° , 使其主响应方向与负泊松比结构的横向拉胀方向相匹配, 从而提高压电薄膜的有效机电转换效率。图 5 给出了板簧集成负泊松比结构后的应变分布结果。可以看出, 在板簧弯曲变形驱动下, 负泊松比结构发生明显变形, 并在压电薄膜安装区域形成较大的局部应变。局部放大结果表明, 负泊松比结构能够有效增强压电薄膜的 y 方向应变, 使压电薄膜的主要工作应变由传统直接贴片方式下的 x 方向弯曲应变, 转变为由拉胀效

应产生的 y 方向放大应变。该结果说明, 负泊松比结构能够实现板簧表面变形的有效传递、方向转换和局部放大, 为提高板簧压电称重传感器的输出电压和灵敏度提供了结构基础。

负泊松比结构的增敏作用可从应变方向转换与机械放大两方面理解。传统直接贴片模型中, 压电薄膜主要随板簧表面发生 x 方向弯曲应变, 其有效压电输入可近似表示为 $\varepsilon_{eff}^{dir} \approx \varepsilon_x^{leaf}$ 。而在负泊松比结构增敏模型中, 板簧表面的 x 方向变形首先作为输入变形传递至凹入六边形结构。由于该结构具有负泊松比特性, 其在 x 方向受拉时会沿 y 方向产生横向扩张, 因此压电薄膜的有效工作应变可表示为 $\varepsilon_{eff}^{aux} \approx \varepsilon_y^{PVDf} = \eta_m \varepsilon_x^{leaf}$, 其中 η_m 为由负泊松比结构几何构型决定的等效机械应变转换与放大系数。若忽略两种模型中电学边界条件的差异, 则输出电压增益可近似写为 $G = V_{aux}/V_{dir}$ 。

3.3. 输出电压特性与灵敏度对比分析

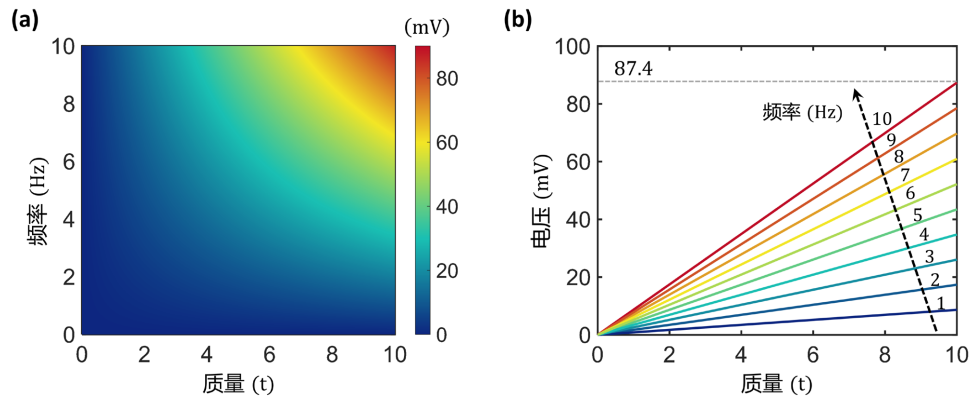


Figure 6. Output voltage response of the PVDF film with the auxetic structure under different loads and excitation frequencies. (a) Voltage distribution map; (b) relationship between load mass and output voltage

图 6. 负泊松比结构增敏后 PVDF 薄膜在不同载荷和激励频率下的输出电压响应。(a) 电压分布图; (b) 载荷质量与输出电压的关系

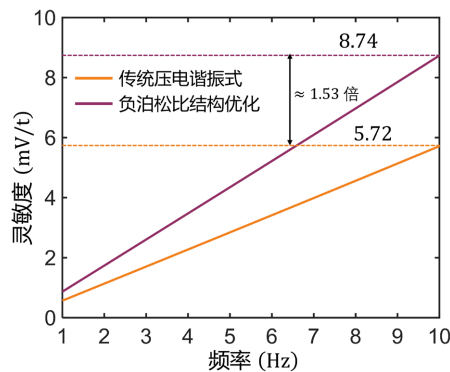


Figure 7. Sensitivity comparison between the conventional direct-bonding model and the auxetic-structure-enhanced model

图 7. 传统直接贴片模型与负泊松比结构增敏模型的灵敏度对比

为验证负泊松比结构对压电输出的增敏效果, 本文在与第二节相同的仿真条件下, 对板簧 - 负泊松比结构 - 压电薄膜集成模型进行频域计算。外接负载电阻保持不变, 载荷质量范围为 0~10 t, 激励频率范围为 1~10 Hz, 分别计算不同工况下压电薄膜两端的输出电压, 并与传统直接贴片模型进行对比。图 6(a) 给出了集成负泊松比结构后, 压电薄膜输出电压随载荷质量和激励频率变化的分布结果。可以看出, 输出电压随着载荷质量和频率的增加而逐渐增大, 整体变化规律与传统直接贴片模型一致。这说明负泊松

比结构的引入并未改变传感器载荷 - 电压响应的基本趋势, 而是在原有响应基础上提高了输出幅值。当载荷质量增大时, 板簧弯曲变形增强, 传递至负泊松比结构的输入变形增大, 进而使压电薄膜获得更大的有效应变; 当激励频率升高时, 压电薄膜在外接负载条件下的电压响应也随之增强。图 6(b) 进一步给出了不同频率下输出电压与载荷质量之间的关系。结果表明, 在 1~10 Hz 频率范围内, 各频率对应的电压 - 质量曲线均保持良好的线性关系, 说明集成负泊松比结构后的传感器仍具有稳定的线性称重响应。与图 3 所示传统直接贴片模型相比, 集成负泊松比结构后的输出电压整体明显提高。例如, 在 10 Hz、10 t 工况下, 压电薄膜输出电压可达到约 87.4 mV, 高于传统直接贴片模型的输出结果。

为进一步定量评价负泊松比结构的增敏效果, 图 7 对比了传统直接贴片模型和负泊松比结构增敏模型在不同频率下的传感灵敏度。可以看出, 两种模型的灵敏度均随激励频率升高而增大, 但在整个频率范围内, 负泊松比结构增敏模型的灵敏度均高于传统直接贴片模型。在 10 Hz 工况下, 传统直接贴片模型的灵敏度约为 5.72 mV/t, 而引入负泊松比结构后, 灵敏度提高至 8.74 mV/t, 约为传统直接贴片方式的 1.53 倍。上述结果表明, 负泊松比结构能够利用拉胀效应将板簧表面的 x 方向变形转换为压电薄膜的 y 方向放大应变, 从而显著提高压电薄膜的输出电压和称重灵敏度。与通过改变板簧主体结构来提高局部应变的方法相比, 该方法无需破坏板簧原有承载结构, 能够在保持板簧结构完整性的同时实现传感信号增强, 为高灵敏度板簧压电称重传感器设计提供了一种有效方案。

4. 结论

本文提出了一种基于负泊松比结构的板簧压电称重传感器增敏设计方法。该方法将凹入六边形负泊松比结构作为应变放大附件布置于板簧表面高应变区域, 在不改变板簧主体结构和不削弱其承载能力的前提下, 利用负泊松比结构的拉胀效应实现板簧弯曲变形向压电薄膜有效应变的转换与放大。主要结论如下:

(1) 建立了半板簧有限元模型, 并分析了板簧在动态载荷作用下的表面应变分布。结果表明, 板簧表面存在适合布置压电薄膜的高应变区域。直接贴片模型中, 压电薄膜的变形主要受板簧表面 x 方向弯曲应变控制, 能够实现载荷质量与输出电压之间的线性转换, 但其输出幅值受板簧局部自然应变限制, 仍存在进一步增敏空间。

(2) 设计了凹入六边形负泊松比结构, 并分析了单胞长度、内凹宽度和壁厚等几何参数对负泊松比效应的影响。结果表明, 单胞长度和壁厚对结构泊松比影响较为显著, 而内凹宽度的影响相对较小。随着单胞长度增加, 结构负泊松比效应增强, 横向拉胀变形更加明显, 有利于实现板簧表面变形的方向转换和局部放大。

(3) 将负泊松比结构与板簧和压电薄膜进行集成, 建立了板簧 - 负泊松比结构 - 压电薄膜耦合模型, 并对其电压输出和传感灵敏度进行了分析。结果表明, 在 0~10 t 载荷和 1~10 Hz 频率范围内, 集成负泊松比结构后的压电薄膜输出电压与载荷质量保持良好的线性关系。与传统直接贴片方式相比, 负泊松比结构能够显著提高压电薄膜的有效应变和输出电压。在 10 Hz 工况下, 传感器灵敏度由 5.72 mV/t 提高至 8.74 mV/t, 约为传统直接贴片方式的 1.53 倍。

综上, 负泊松比结构能够在不破坏板簧承载结构完整性的条件下, 有效提升板簧压电称重传感器的输出电压和称重灵敏度。该方法为高灵敏度车载板簧称重传感器设计提供了一种可行的结构增敏方案。需要说明的是, 本文主要从结构应变放大角度验证负泊松比结构的增敏作用, 电学负载采用统一等效电阻边界进行对比分析。后续实验研究中, 应结合高输入阻抗信号调理电路, 考察不同负载阻抗条件下传感器的输出幅值、低频稳定性和实际标定关系; 同时结合样机加工、实验标定和车辆实际工况测试, 进一步验证该结构的长期稳定性、安装可靠性和工程适用性。

基金项目

本文研究工作得到了台晶(宁波)电子有限公司和宁波大学研究生科研创新项目(IF2026042)的支持。

参考文献

- [1] Yu, Y., Cai, C.S. and Deng, L. (2016) State-of-the-Art Review on Bridge Weigh-in-Motion Technology. *Advances in Structural Engineering*, **19**, 1514-1530. <https://doi.org/10.1177/1369433216655922>
- [2] 李成, 钟继卫, 王亚飞, 等. 连续梁桥车辆动态称重系数解析与试验验证[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2060-2066.
- [3] 付宏勋, 张宇, 赵强, 等. 车载称重系统研究综述[J]. 中国测试, 2022, 48(5): 14-21.
- [4] Zhao, Y., Ren, C., Zhao, S., Yao, J., Li, X. and Wang, M. (2025) Study of Multi-Objective Tracking Method to Extract Multi-Vehicle Motion Tracking State in Dynamic Weighing Region. *Sensors*, **25**, Article No. 3105. <https://doi.org/10.3390/s25103105>
- [5] Yan, S., Ma, H.Y., Qi, B.H., Sun, H.P. and Liu, F.X. (2014) A Vehicle Dynamic Weighing System Based on Wireless Smart Aggregates. *Applied Mechanics and Materials*, **641**, 805-808. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.641-642.805>
- [6] Rocheti, E.O. and Bacurau, R.M. (2024) Weigh-in-Motion Systems Review: Methods for Axle and Gross Vehicle Weight Estimation. *IEEE Access*, **12**, 134822-134836. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3461653>
- [7] 陈广豪, 梁智洪, 张芝芳. 不同复合材料板簧的性能比较及结构优化[J]. 复合材料科学与工程, 2020(6): 35-45.
- [8] 许文兵, 周海安, 冯以盛, 等. 基于不同热处理工艺的弹簧钢性能及其板簧寿命预测[J]. 金属热处理, 2026, 51(2): 183-188.
- [9] 李正军. 一种汽车载体自动称重装置的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(4): 95-100.
- [10] 张春光, 孙凤, 赵川, 等. 变截面双联悬臂定位板簧的设计与优化[J/OL]. 西南交通大学学报, 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20251231.1715.003>, 2026-07-10.
- [11] 张宁, 赵纲领, 杨三序. 基于 Lagrange-Maxwell 方程的电容称重系统建模与分析[J]. 电测与仪表, 2011, 48(12): 62-64.
- [12] 巫晟逸, 梁佳辉, 刘秋实, 等. 石英压电晶体谐振式力学传感器[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 551-559.
- [13] Xiang, T., Huang, K., Zhang, H., Zhang, Y., Zhang, Y. and Zhou, Y. (2020) Detection of Moving Load on Pavement Using Piezoelectric Sensors. *Sensors*, **20**, Article No. 2366. <https://doi.org/10.3390/s20082366>
- [14] 李艳杰. 一种差动输出石英谐振式力传感器研制[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(2): 128-130.
- [15] Lee, Y.J., Lim, S.M., Yi, S.M., *et al.* (2019) Auxetic Elastomers: Mechanically Programmable Meta-Elastomers with an Unusual Poisson's Ratio Overcome the Gauge Limit of a Capacitive Type Strain Sensor. *Extreme Mechanics Letters*, **31**, Article ID: 100516. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100516>
- [16] Bertoldi, K., Vitelli, V., Christensen, J. and van Hecke, M. (2017) Flexible Mechanical Metamaterials. *Nature Reviews Materials*, **2**, 1-11. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.66>
- [17] Kang, M., Choi, H.G., Park, K. and Pyo, S. (2025) Additively Manufactured 3D Auxetic Metamaterials for Structurally Guided Capacitive and Resistive Tactile Sensing. *Advanced Functional Materials*, **35**, e09704. <https://doi.org/10.1002/adfm.202509704>
- [18] Jiang, Y., Liu, Z., Matsuhisa, N., Qi, D., Leow, W.R., Yang, H., *et al.* (2018) Auxetic Mechanical Metamaterials to Enhance Sensitivity of Stretchable Strain Sensors. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1706589. <https://doi.org/10.1002/adma.201706589>