

# 基于柔性光纤传感器的足弓矫正鞋垫

田若涵，孙磊，金美辰

天津工业大学，天津 300387

DOI:10.61369/ME.2025100031

**摘要：**本研究围绕柔性光纤传感器在足弓矫正鞋垫中的应用，通过构建气囊—光纤耦合传感结构、三维打印矫形框架与柔性电路信号链路，实现足底压力的高灵敏度检测、足弓力学支撑的精准调控与矫正效能的实时评估。在儿童足弓发育规律与柔韧性扁平足病理基础分析的前提下，提出可嵌入式柔性光纤压力传感模型、跨介质传导响应机制以及足底压力云图可视化算法，并结合动态步态测试构建矫形效果评价体系。

**关键词：**柔性光纤传感器；足弓矫正鞋垫；鞋垫设计

## Arch Correction Insole Based on Flexible Optical Fiber Sensor

Tian Ruohan, Sun Lei, Jin Meichen

Tiangong University, Tianjin 300387

**Abstract :** This study focuses on the application of flexible fiber optic sensors in arch correction insoles. By constructing an airbag fiber optic coupling sensing structure, a 3D printed correction frame, and a flexible circuit signal link, high-sensitivity detection of plantar pressure, precise control of arch mechanical support, and real-time evaluation of correction effectiveness are achieved. Based on the analysis of the developmental patterns of children's arches and the pathological basis of flexible flat feet, an embedded flexible fiber optic pressure sensing model, a cross medium conduction response mechanism, and a plantar pressure cloud visualization algorithm are proposed. Combined with dynamic gait testing, an orthopedic effect evaluation system is constructed.

**Keywords :** flexible fiber optic sensor; arch correction insole; insole design

## 引言

随着儿童柔韧性扁平足发病率上升与足弓发育异常引发的下肢运动力学问题增多，传统矫形鞋垫在压力感知、动态响应与个性化调控方面的不足日益凸显，因此需构建具有实时检测、精准支撑与可视化评估功能的智能化矫形系统。柔性光纤传感技术因其抗干扰性强、柔顺性高与嵌入适配性优良，为足底动态压力监测与足弓矫正提供新的技术路径。

## 一、儿童足弓发育规律与柔韧性扁平足病理基础

儿童足弓发育呈现由生理性平足向结构性稳定足弓逐渐过渡的规律性过程，其形成依赖于跖骨排列、韧带张力、足底肌群力量及下肢力线协调等多重生物力学机制的共同作用<sup>[1]</sup>。柔韧性扁平足作为该阶段常见的足弓发育异常，其病理基础主要体现为跖骨排列紊乱、跟骨外翻角度增大、足底肌群力量不足、足底筋膜牵张能力下降以及内侧纵弓承载能力削弱等结构性特征，导致在非负重状态足弓可见，而在负重状态足弓塌陷并出现力线偏移。随着儿童行走、跑跳等负重活动增加，异常压力分布将进一步削弱足弓稳定器的生物力学功能，使胫骨后肌及腓骨肌产生代偿性过度牵拉，形成肌群疲劳、关节异常旋前等不良循环<sup>[2]</sup>。因此，

在足弓发育规律研究基础上，需结合足底压力时空参数分析儿童步态特征，建立柔性光纤传感器压力监测体系，为识别足弓塌陷程度、跟骨外翻幅度及足部负重模式提供精细化数据支撑，从而为后续矫正结构设计、足弓支撑参数优化与矫形鞋垫压力响应模型构建奠定科学基础。

## 二、足压检测技术发展现状

足压检测技术的发展历程主要经历了机械式测力装置、压敏电阻阵列系统、压电薄膜传感系统、光纤传感系统等多类型传感模式的演进，其核心目标在于实现足底压力分布、压力峰值迁移轨迹及步态周期负重特征的高精度量化。早期足压检测主要依赖

基金项目：2025年国家级大学生创新创业训练计划项目“弓步凌云”——基于柔性光纤传感器的足弓矫正鞋垫（项目编号：202510058034）

机械式测力板，通过整体压力响应测量足底受力，但无法实现对局部区域的时空分辨。随着压敏电阻阵列技术的成熟，基于矩阵电极结构的足底压力监测能够对足底关键区域进行点状测量，然而该类传感系统在重复加载过程中存在漂移性大、稳定性不足及柔韧性适配性弱等局限<sup>[3]</sup>。足压检测技术正从单点压力监测向多通道三维压力成像方向发展，从静态接触测量向动态步态周期解析方向深化，并与三维扫描、可穿戴生物力学分析与压力云图可视化技术深度融合，推动足底压力检测由定量化测量走向智能化建模，为柔性光纤传感器在矫形鞋垫设计中的应用提供强有力的技术支撑。

### 三、基于柔性光纤传感器的足弓矫正鞋垫总体设计方案

#### (一) 气囊——光纤传感耦合结构总体构型

气囊 - 光纤传感耦合结构总体构型以软性气囊结构作为压力传导介质，以柔性光纤作为压力响应核心单元，通过构建气压变化与光信号变化之间的耦合路径，实现足底压力的高灵敏度检测<sup>[4]</sup>。该结构在矫形鞋垫内部形成由多区分布式气囊组成的压力映射系统，通过足底负重引起气囊内部微小体积变化，从而产生气压变化，并将该气压变化以可控方式传递至光纤敏感段，实现力—气—光的多物理耦合。为保证传感准确性，气囊采用具有高弹性、低压缩滞后和良好回弹性能的柔性材料，通过优化壁厚与腔体结构提升其压力响应线性度；光纤敏感段采用可弯曲、可嵌入的柔性光纤，通过弯曲损耗或微弯效应实现压力信号的高稳定度转化。耦合结构整体采用模块化排列，使其能够分别对应足底内侧纵弓、外侧纵弓及跖骨头区域等关键受力部位，实现区域化压力检测。在结构构型中，通过调整气囊腔体尺寸、光纤嵌入深度与耦合接口紧密度，使系统在动态步态条件下保持响应快速、滞后最小与检测精度稳定，从而为足弓状态监测与矫正力调节提供可靠的传感基础<sup>[5]</sup>。

#### (二) 3D打印矫形鞋垫结构框架

3D打印矫形鞋垫结构框架以个体化足底三维建模数据为基础，通过分区力学优化设计与逐层堆叠制造技术构建具有可调支撑性能的结构体系。结构框架整体采用基于足弓生物力学特征的区域分层设计，将鞋垫划分为内侧纵弓支撑区、外侧稳定区、跟骨承托区以及前足缓冲区等独立模块，通过对不同区域赋予不同的结构密度、孔隙比例与弹性参数，实现差异化受力响应。3D打印技术能够精确控制材料堆叠形态，使鞋垫内部形成类蜂窝状、类格构状或连续渐变结构，以增强足弓支撑能力、提高变形可控性并降低局部压力峰值。结合足底压力分布检测数据，可对鞋垫关键区域进行局部加固或柔化设计，使结构框架在满足生物力学稳定性的同时兼具良好舒适性<sup>[6]</sup>。此外，3D打印框架预留传感器布置通道，确保气囊 - 光纤传感耦合结构可无缝嵌入，不影响整体变形特性与力学传递路径。

#### (三) 柔性PCB电路系统总体架构

柔性PCB电路系统总体架构以高柔性导电材料为基底，通过

多层电路布局与模块化电子单元集成实现足底压力信号的采集、传输与处理，以满足可穿戴矫正设备的轻量化、弯曲适应性与长期稳定性需求。电路系统主要由光纤光源驱动模块、光信号采集模块、信号调理模块、数据处理模块及无线传输模块构成，通过柔性多层走线实现各功能单元之间的高可靠连接<sup>[7]</sup>。为适应鞋垫复杂弯折形变，柔性PCB采用蛇形走线、应力缓冲节点与局部加固设计，确保电路在反复受力下保持导电连续性与信号稳定性。光信号采集模块与光纤敏感段连接，通过光功率变化转换为电信号输入至调理模块，再经过滤波、放大与校准处理进入数据处理单元。数据处理模块可实现足底压力信号解码、步态时序解析与压力云图初步建模，并通过无线通信单元将数据实时传输至外部终端，实现压力监测可视化。整个电路系统在结构布局中采用超薄封装与局部固定方式，使其能够贴合鞋垫内部曲面，不影响鞋垫变形行为，从而形成稳定、高精度、低功耗的柔性电子支撑体系。

### 四、基于柔性光纤传感器的足弓矫正鞋垫核心模块设计

#### (一) 光纤压力传感模型

光纤压力传感模型以光信号在柔性光纤敏感段中的传播特性变化为核心，通过压力加载引起的微弯效应、弯曲损耗效应或光程扰动效应实现压力与光功率变化之间的映射关系<sup>[8]</sup>。模型构建过程中需对光纤敏感段的弯曲半径、包层折射率、光损耗系数及入射光功率稳定性进行参数化描述，进而建立压力—弯曲—损耗的耦合数学模型，使足底压力在光强变化中获得高灵敏度表达。通过对光纤敏感段受压后的弯曲曲率变化进行定量分析，可构建压力梯度对应的光功率变化曲线，实现非线性响应向准线性区调整。此外，光纤压力传感模型需同时考虑动态步态条件下频率响应特性、长期加载条件下漂移校准机制与足部区域化受力下多点光纤节点的响应差异，确保模型在复杂受力环境中保持稳定性与高精度，为后续解码算法与信号链路设计提供理论基础。

#### (二) 气囊传导—光纤响应耦合机制

气囊传导—光纤响应耦合机制基于气压变化向光损耗变化的跨介质传递过程，通过气囊腔体变形、内部压力变化与光纤敏感段弯曲特性的联动实现压力信号转换。足底负重使气囊产生可控压缩，使内部气压呈现与外界压力成比例的变化，并通过耦合界面将气压作用传递至光纤敏感段，引起光纤局部曲率增大，从而导致光功率输出下降。为了确保耦合传递的可靠性，需对气囊壁厚、腔体容积、耦合区域形状与光纤嵌入深度进行优化，使压力—气压—弯曲之间形成稳定函数关系。耦合机制的构建还需考虑动态步态下的响应延迟、气囊弹性回复特性与光纤结构疲劳特性，以确保系统在连续加载条件下保持快速响应和低滞后特性，从而实现高精度足底压力检测<sup>[9]</sup>。

#### (三) 矫形鞋垫三维结构参数优化

矫形鞋垫三维结构参数优化以足弓生物力学需求、压力分布调控需求与传感器嵌入需求为基础，通过区域分层设计、材料梯度调控与结构力学模拟实现支撑性能、舒适性能与信号传递性能

的协同优化。优化过程中需对内侧纵弓区、外侧稳定区、跟骨承托区与前足缓冲区的几何形态、厚度分布和弹性模量进行精确建模，使鞋垫能够在承重过程中提供足弓支撑、减少压力峰值并实现合理力线分布。同时应利用三维仿真技术模拟鞋垫在动态步态下的变形场、应力场与传感路径变化，从而确定最佳结构曲率、孔隙比例与局部加固参数<sup>[10]</sup>。此外，鞋垫结构需为气囊—光纤传感器预留合理位置与稳定夹持结构，以确保传感路径不受形变干扰，实现机械支撑与信号传递双重性能提升。

#### (四) 柔性PCB电路信号链路设计

柔性PCB电路信号链路设计以高稳定性、低噪声与高可靠性为原则，通过光源驱动、光信号采集、信号调理、数据处理与无线传输等模块的协同构建实现足底压力信号的完整转换链路。信号链路需优化光源稳定性，降低驱动波动对光功率的干扰，并在光电转换阶段采用高灵敏度采集单元提升弱信号识别能力。调理模块通过滤波、放大、温漂补偿与标定算法保证压力信号的准确解码，而数据处理模块则承担压力映射、步态参数提取与实时数据打包功能。柔性PCB通过多层布局、弯曲补偿走线和局部固定节点实现弯折适应性，避免在动态压缩中出现断路或信号失真，从而形成稳定、连续、低功耗的信号通道<sup>[11]</sup>。

#### (五) 足底压力云图建模与可视化算法

足底压力云图建模与可视化算法通过对多通道光纤压力信号进行空间重构、时间序列解码与区域化插值，实现足底压力分布的可视化呈现。算法首先对传感节点进行空间坐标标定，利用插值方法将离散压力信号转化为连续压力场，再通过色阶映射生成压力云图，以表现压力大小、峰值区位置与压力变化趋势。对动态步态数据，算法需结合时间序列分析提取步态周期、负重相变化与压力迁移轨迹，实现足底压力云图的时序动画化展示<sup>[12]</sup>。同时，云图建模需引入噪声抑制、漂移校准与动态平滑技术，确保可视化结果在不同步态条件下保持稳定性与准确性，为足弓状态分析与矫正效果评价提供高精度数据支持。

### 五、应用验证与性能评价

#### (一) 压力测量准确性验证

压力测量准确性验证主要通过标准加载试验、动态步态模拟

试验与多装置对比试验的综合方式完成，以确保柔性光纤传感器在不同受力条件下保持高灵敏度、高稳定性与低漂移特性。验证过程中首先采用标准砝码加载平台对光纤敏感段进行逐级加载，通过记录不同压力区间内光功率变化与理论压力值之间的对应关系，建立线性拟合曲线并计算误差分布，以评估传感器在静态条件下的测量准确性。其次，在动态步态模拟系统中，通过模拟足底不同步态阶段的力学变化，分析传感器在快速加载、周期性加载与不均匀加载条件下的响应速度、信号滞后特性与重复性表现，以检验传感器在真实步态中的稳定性。最后，通过与商业化足压板的同步测量结果进行对比，评估传感系统在压力峰值识别、中心压力迁移轨迹和区域压力比例上的一致性，从而验证整体测量链路的可靠性与工程应用价值。

#### (二) 足弓支撑与矫正效果评价

足弓支撑与矫正效果评价通过足底压力重分布分析、足弓形态变化测量与步态参数改善情况评估等多维指标综合完成，以验证矫形鞋垫在力学支撑、姿态调控与步态改善方面的有效性。首先，通过对佩戴前后足底压力云图的对比分析，观察压力峰值是否由内侧纵弓区域向前足与外侧区域重新分配，从而判断鞋垫是否有效降低足弓塌陷区域的异常压力负荷。其次，通过足弓高度测量、跟骨倾斜角度测量与足底接触面积变化分析，评估鞋垫对内侧纵弓稳定性、跟骨力线校正及足底受力均衡性的影响。最后，通过步态参数对比，如步态对称性、前足离地时序、负重相持续时间变化等，判断矫形鞋垫是否改善步态代偿行为与足部动力链条。综合评价结果用于验证矫形结构的有效性，并为后续调整光纤传感布设位置、气囊参数与3D打印结构提供数据依据。

### 六、结语

基于柔性光纤传感器的足弓矫正鞋垫通过集成气囊—光纤耦合结构、三维力学优化框架与柔性电路信号系统，实现足底压力的精准监测、足弓支撑的动态调控与矫正效果的可视化呈现。研究验证了该系统在压力测量准确性、足弓结构稳定性改善与步态动力链修复方面的显著作用，证明柔性光纤传感技术能够有效弥补传统矫形鞋垫在实时性、适配性与评估能力上的不足。

### 参考文献

- [1] 大源. 郑州疲劳感9款鞋垫匹配全天站姿 [J]. 健与美, 2025, (10): 14–15.
- [2] 刘晓影, 王昌荣. 儿童柔韧性扁平足成因分析与矫正方法研究 [J]. 西部皮革, 2024, 46(22): 18–20+37.
- [3] 李宁, 足脊矫形鞋垫开发及产业化技术. 河南省, 河南邦尼生物工程有限公司, 2024–02–28.
- [4] 王婧, 刘昶荣. 鞋垫矫正腿型, 真有用还是智商税 [N]. 中国青年报, 2023–10–31(012).
- [5] 谢仁古丽·麦提图尔荪. 基于3D打印的个性化矫正鞋垫的设计与制备研究 [D]. 新疆大学, 2023.
- [6] 韩艳坤. 基于足型—步态特征的扁平足矫正鞋垫研究 [D]. 河北师范大学, 2021.
- [7] 刘梦媛. 基于足弓基点数据的扁平足儿童矫正鞋垫设计研发 [D]. 四川大学, 2021.
- [8] 章浩伟, 杨俊彦, 刘颖, 等. 伴有足中关节炎的扁平足患者矫正鞋垫的生物力学研究 [J]. 中国生物医学工程学报, 2020, 39(03): 327–334.
- [9] 王占星, 宋雅伟, 刘鸣峻, 等. 本体感受鞋垫对于儿童功能性平足的矫正效果 [J]. 皮革科学与工程, 2021, 31(02): 68–73.
- [10] 刘梦媛, 刘浩, 娄诗阳, 等. 扁平足矫形鞋垫的研究进展 [J]. 皮革科学与工程, 2021, 31(02): 54–61.
- [11] 李鹏. 基于3D打印扁平足个性化矫正鞋垫的设计及其对平衡能力的影响 [D]. 苏州大学, 2017.
- [12] 张新语, 邢新阳, 霍洪峰. 矫正鞋垫的设计原理与生物力学功能 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(23): 3744–3750.