

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310001



生物力学约束下的多孔结构鞋中底设计

朱粉英¹, 程华钦², 刘斌²

(1. 华侨大学 华侨大学医院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种由足底压力映射的三维维诺(Voronoi)支杆鞋中底结构设计方法。将足底压力信息作为鞋中底结构设计的数据驱动基础,采用加权随机采样策略构建 Voronoi 站点;通过裁剪算法,使三维 Voronoi 图适应鞋中底边界;以裁剪后的三维 Voronoi 边为骨架线,采用隐式曲面建模技术和隐式函数融合生成光滑连续的三维 Voronoi 支柱鞋中底。测试结果表明:三维 Voronoi 支柱鞋中底可以使足底压力分布更加均匀,并可有效地减轻跖骨和足跟区域的负荷,降低足底压力异常集中导致关节损伤的概率。

关键词: 鞋中底; 足底压力; 多孔结构; 维诺图; 隐式曲面

中图分类号: TH 122; TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)03-0314-10

Design of Porous Structure Midsole Under Biomechanical Constraints

ZHU Fenyong¹, CHENG Huaqin², LIU Bin²

(1. Huaqiao University Hospital, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A 3D Voronoi strut midsole structure design method based on plantar pressure mapping is proposed. Using plantar pressure information as the data-driven basis for midsole structure design, a Voronoi site is constructed using a weighted random sampling strategy. The 3D Voronoi diagram is adapted to the midsole boundary through cropping algorithms. Using the trimmed 3D Voronoi edge as the skeleton line, implicit surface modeling technology and implicit function fusion are used to generate a smooth and continuous 3D Voronoi strut midsole. The test results show that the 3D Voronoi strut midsole can make the pressure distribution on the sole of the foot more uniform, effectively reduce the load on the metatarsal and heel areas, as a consequence, significantly reduce the probability of joint damage caused by abnormal concentration of plantar pressure.

Keywords: midsole; plantar pressure; porous structure; Voronoi diagram; implicit surface

随着生活水平的显著提高,人们越来越关注鞋子穿着的健康问题。研究表明,足底压力峰值是前脚疼痛综合征的主要原因之一^[1-2]。足底压力高也会导致距骨痛、足跟损伤、软骨损伤和足底溃疡等疾病^[3-6]。此外,一些患者可能会无意识地改变缓解疼痛的姿势,这会抑制正常的行为活动,导致腿部、膝盖和背部的健康问题。运动鞋鞋中底具有吸能、减震、平衡支撑的作用,对分配脚底压力分布起着决定性作用,因此,设计与足底压力分布相适配的鞋中底对于鞋子穿着的健康性具有重要意义。

3D 打印技术的快速进步颠覆了传统的制鞋技术,使鞋业朝着快速、高效、定制化、可持续的方向发

收稿日期: 2023-10-05

通信作者: 朱粉英(1978-),女,医师,主要从事运动医学的研究。E-mail:9988753@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175230)

展^[7]。利用维诺(Voronoi)多孔结构的优异性能进行面向 3D 打印的鞋中底设计方案,得到了相关领域专家和工程界的广泛关注^[8]。因此,本文利用足底压力数据对三维 Voronoi 图进行控制,提出一种在足底压力映射的三维 Voronoi 支杆鞋中底设计方法。

1 足底压力驱动的多孔结构鞋中底设计

1.1 设计思路与流程

为了设计与足底压力分布特征匹配的定制化多孔鞋中底,将足底压力数据作为输入,利用应力分布与相对密度分布的映射模型,实现对三维 Voronoi 胞元密度的调控。三维 Voronoi 支杆结构在形状尺寸上更易精确控制,从而更易调控其局部性能,实现定制化设计目标。

三维 Voronoi 支杆鞋中底的结构设计流程图,如图 1 所示。首先,使用足底压力测量系统采集足底压力分布数据;然后,根据有限元软件模拟获得鞋中底的应力分布,并将其作为鞋中底结构设计的驱动条件;再次,构建鞋中底的应力分布向 Voronoi 站点分布的映射,根据 Voronoi 站点加权随机采样策略,生成自适应的 Voronoi 图;通过 Voronoi 裁剪算法适配鞋中底模型,以 Voronoi 图的边为骨架线,结合隐式曲面造型技术生成光滑连续的 Voronoi 支杆结构;最后,以 Voronoi 支杆结构为鞋底模型的内部填充,生成集保护性、舒适性、功能性为一体的定制化鞋中底。

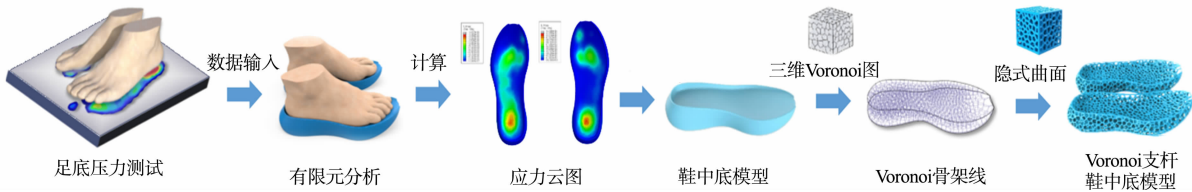


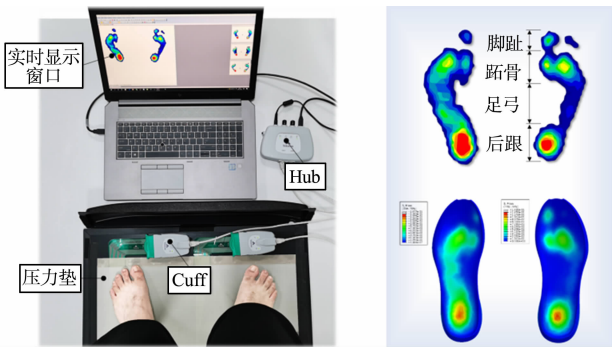
图 1 三维 Voronoi 支杆鞋中底的结构设计流程图

Fig. 1 Flow chart of 3D Voronoi strut midsole structure design

1.2 足底压力测量

使用 F-Scan 测量系统对足底压力进行测量,如图 2 所示。足底压力传感垫的实际有效测量面积约为 48.77 cm×44.70 cm,采样频率为 185 Hz。待测人员裸足站立在压力传感垫上,所采集压力数据实时显示在计算机屏幕上(图 2(a))。由于压力传感器获得的足底压力云图是实时变化的,考虑到测量的准确性,被测人员身姿需要保持挺直,放松稳定 10 s 后开始测量。在同一测量条件下进行 4 次重复实验,然后从 300 张压力图中筛选出峰值压力云图,导出足底压力分布数据作为后续鞋中底结构设计的依据。

将获得的足底压力数据作为输入信息,使用 ABAQUS 有限元分析软件进行数值仿真模拟。综合考虑鞋中底需具备的弹性和缓冲减震等性能,根据实验室的现有条件,选择具备较好弹性的聚氨酯作为打印材料,在 ABAQUS 中设置材料参数和初始条件、边界条件,计算得到静态站立时鞋中底的压力云图(图 2(b))。结合生物力学特性,将足底模型划分成脚趾、跖骨、足弓和后跟 4 个区域,以便更加准确地评估足底压力分布情况。由图 2(b)可以看出,两只鞋中底的应力分布并不完全一致,这与个体重心分布、脚型特征差异等因素有关。跖骨和后跟这两个区域应力较大,为了减轻这两个区域的受力负担,需要调整鞋中底的密度分布,重新分布足底压力,以减少足底压力过大给身体带来的伤害。



(a) 足底压力测量系统 (b) 足底压力云图

图 2 足底压力测量

Fig. 2 Plantar pressure measurement

1.3 基于加权随机采样策略的 3D Voronoi 图构建

通过调整鞋中底的密度分布来控制其强度(弹性)分布。密度分布可以从材料和结构两个方面进行调整。采用多孔结构作为填充物来调整结构密度更具灵活性和可实现性。Voronoi 图具有连续性好的

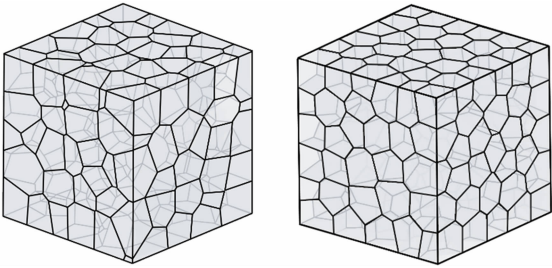
特点,通过控制 Voronoi 站点的分布可以改变结构密度分布。因此,引入三维 Voronoi 图作为鞋中底结构设计的骨架。

二维 Voronoi 图是由连接两邻近站点线段的垂直平分线组成的连续多边形,它的构造顺序一般为先构建 Delaunay 三角形,再根据对偶生成 Voronoi 图。拓展到三维空间,表现为一系列平面垂直平分相邻站点所连接的线段,由这些平分面组成的多面体构成 Voronoi 胞元,相应地可以根据四面体对偶生成三维 Voronoi 图,这是划分三维 Voronoi 图的基本方法之一。依据 Voro++ 开源库^[9]实现对三维 Voronoi 图的构建。给定一个有界开集 $\Omega \in \mathbf{R}^3$ 和一组点 $\{P_i\}_{i=1}^n$,Voronoi 图定义为

$$V_i = \{x \in \Omega | d(x, P_i) < d(x, P_j), j = \{1, 2, \cdots, n\}, j \neq i\}, \quad i = 1, 2, \cdots, n. \tag{1}$$

式(1)中: V_i 表示第 i 个 Voronoi 胞元,集合 $\{V_i\}_{i=1}^n$ 构成 Voronoi 图。

根据初始随机站点生成的 Voronoi 胞元分布不均匀,在局部区域易出现胞元密集或稀疏的情况,对整体的性能有较大的影响,如图 3(a)所示。为了更好地调节空间中站点的分布,防止出现局部性能差异过大的情况,有必要对三维 Voronoi 图做重心迭代处理,使胞元的分布更均匀,胞元尺寸趋于一致。采用 Lloyd 重心迭代算法^[10],使每个 Voronoi 站点向各自 Voronoi 胞元重心位置移动,从而实现胞元均匀分布的效果,重心迭代后的 Voronoi 图,如图 3(b)所示。



(a) 初始随机站点生成 (b) 重心迭代后

图 3 三维 Voronoi 图

Fig. 3 Diagrams of 3D Voronoi

局部足底压力高是使穿着者感到不舒服的主要原因之一。实验设计的目标是减小足底压力的峰值压力和区域之间的压力差,将足底压力重新分布到尽可能多的区域。因此,对于高应力区,应增加 Voronoi 胞元的数量以提高局部密度;对于低应力区,应减少 Voronoi 胞元的数量以降低低应力区域的局部密度。提出基于应力的加权随机采样策略来控制 Voronoi 站点的分布,以提供适当的鞋中底弹性和刚度,满足定制化设计要求。加权随机采样策略的具体步骤如下。

1) 对鞋中底模型的包围盒进行均匀栅格化,并将这些栅格顶点视为候选站点。候选站点与有限元分析获得的应力节点之间不是一一对应的。只有与候选站点相邻的有限元节点对站点有显著影响。采用 k 近邻算法,通过选择 n 个近邻有限元节点来计算候选站点的应力值。候选站点的应力值 σ^j 通过反向距离加权方法计算,即

$$\sigma^j = \sum_{i=1}^n u_{i,j} \sigma^i. \tag{2}$$

式(2)中: σ^i 为第 i 个邻近节点的应力; $u_{i,j}$ 为权因子,定义为

$$u_{i,j} = \frac{1/d_{i,j}^2}{\sum_{i=1}^n 1/d_{i,j}^2}. \tag{3}$$

式(3)中: $d_{i,j}$ 为候选站点到其邻近节点的欧式距离。

2) 从所有候选站点中提取 m 个采样点作为 Voronoi 站点。这里, m 要远小于候选站点总数。随机采样方法参考文献[11]中的蓄水池采样策略,即

$$S_i = R^{\frac{1}{\omega_i}}. \tag{4}$$

式(4)中: R 为采样产生的随机数,位于 $0 \sim 1$ 之间; ω_i 为第 i 个候选站点处的相对密度; S_i 为第 i 个候选站点处的采样分数,对每个候选点计算出采样分数后,从大到小对采样分数进行排序,选取前 m 个样本点作为 Voronoi 站点。

根据前期工作,应力分布与相对密度之间的映射关系^[12]可以表示为

$$\omega_i = \sqrt[1.981]{\frac{\sigma_e^i}{1.006\sigma_p}}. \tag{5}$$

式(5)中: σ_e^i 表示等效应力,即第 i 节点的 von Mises; σ_p 表示基材的比例极限。

3) 根据加权 Voronoi 站点构建三维 Voronoi 图。鞋中底模型边界框内的三维 Voronoi 图,如图 4 所示。由图 4 可知:通过加权随机采样计算的三维 Voronoi 图可以精确地匹配足底压力,并可以根据力学条件调节密度分布。Voronoi 胞元在高应力区域(图 2(b)中的跖骨和后跟区域)变得更密集;相反,Voronoi 胞元在低应力区域(图 2(b)中脚趾和足弓的区域)变得更稀疏。

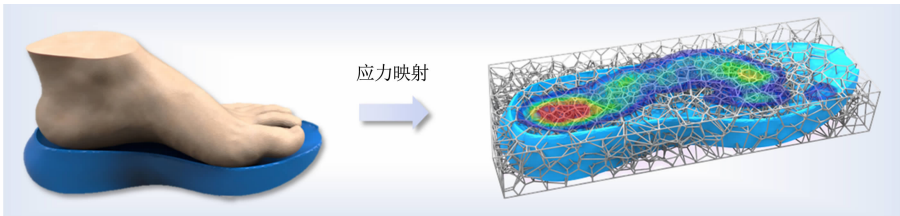


图 4 鞋中底模型边界框内的三维 Voronoi 图

Fig. 4 3D Voronoi diagram within bounding box of midsole model

三维 Voronoi 图在鞋中底的最小边界框内生成。为了使三维 Voronoi 图适配鞋中底外形,求长方体包围盒中生成的三维 Voronoi 图与鞋中底模型的交集。为简化三维 Voronoi 图和鞋中底模型间交叉点的计算,应先确定 Voronoi 单元和鞋中底模型的相对位置,只允许与模型有交叉点的 Voronois 单元参与剪切操作。Voronoi 胞元裁剪与重构算法,如图 5 所示。

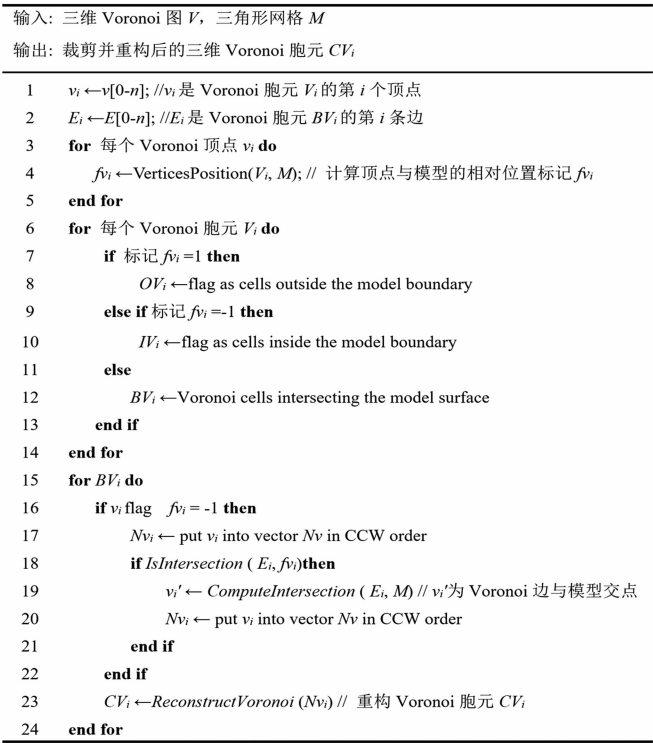


图 5 Voronoi 胞元裁剪与重构算法

Fig. 5 Voronoi cell clipping and reconstruction algorithm

适配边界约束的三维 Voronoi 图,如图 6 所示。

1.4 随机采样对多孔结构力学性能的影响

为了为探究 Voronoi 站点随机分布对模型压缩力学性能的影响,在站点数量一致的前提下,生成相对密度(ω)分别为 0.3, 0.4, 0.5, 尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 36 mm \times 36 mm \times 36 mm 的 3 组 Voronoi 支杆立方体模型,每组有 5 个模型,其相对密度保持一致。将设计好的支杆模型通过 CREALITY CR-3040 Pro 型熔融沉积成型(FDM)打印机进行打印,打印材料选择聚乳酸(PLA)丝材,通过拉伸实验测得材料的杨氏模量为 2 400 MPa,泊松比为 0.35。3 组 Voronoi 支杆立方

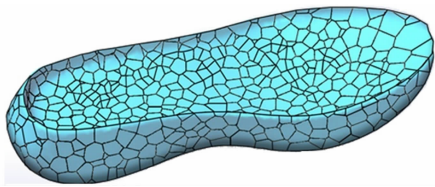


图 6 适配边界约束的三维 Voronoi 图
Fig. 6 3D Voronoi diagram with adaptive boundary constraints

体模型的打印结果,如图 7 所示。图 7 中:每排模型的质量均保持一致。

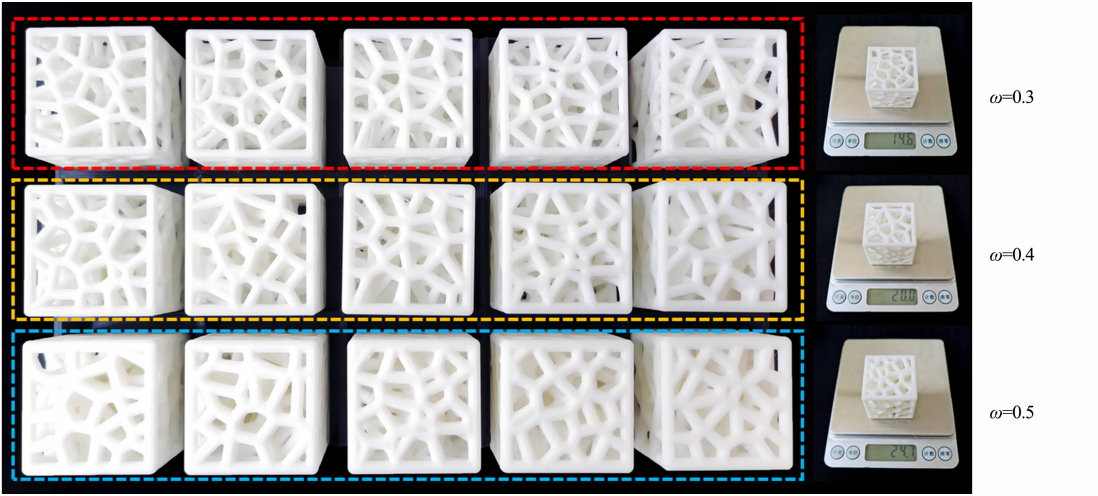


图 7 3 组 Voronoi 支杆立方体模型
Fig. 7 Three sets of Voronoi strut cube models

根据国家标准 GB/T 1041—1992《塑料拉伸性能试验法》,在 TSE504D 型万能机械试验机上进行压缩实验,压缩速度为 $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。3 组 Voronoi 支杆结构随机性实验结果,如图 8 所示。图 8 中: F 为压力; D 为位移。实验结果表明,相对密度相同的支杆模型在弹性阶段的力学性能基本一致,说明在弹性阶段随机性对模型力学性能的影响较小;当进入塑性变形阶段时,曲线的变化趋势仍相似,但数值的波动较大,相对密度为 0.3,0.4,0.5 的 3 组实验的最大相对误差分别为 10.07%,9.61%,8.72%。这是因为在站点随机分布的情况下,有些地方支杆相对密集而有些位置较为稀疏,在变形乃至压溃过程中支杆提供的支持不一致,在塑性变形阶段支杆模型的力学性能受随机性影响较大。对于鞋中底来说,其变形都保持在弹性范围内,因而可以忽略随机采样的影响。

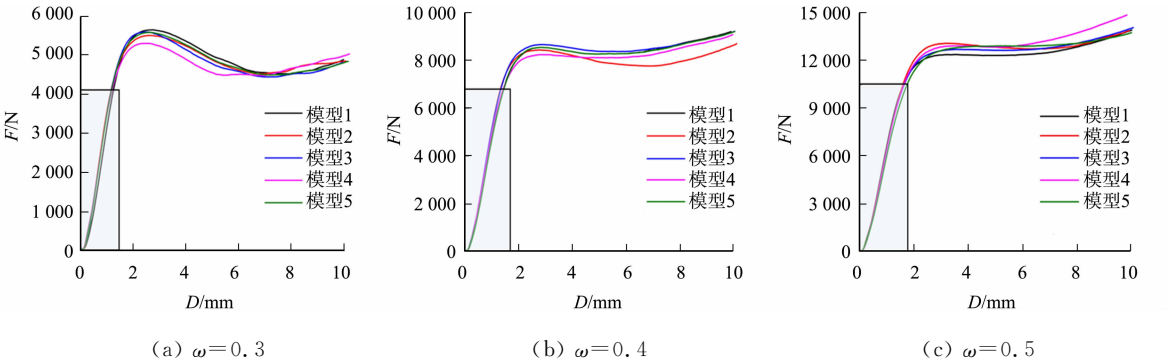


图 8 3 组 Voronoi 支杆结构随机性实验结果

Fig. 8 Randomness experimental results of three sets of Voronoi strut structures

1.5 基于 Voronoi 边的隐式曲面建模

1.5.1 隐式曲面 在获得适配鞋中底模型边界的 Voronoi 图后,相当于获得了多孔结构的布局,接下来的工作是将其实体化,形成可 3D 打印的多孔结构鞋中底模型。为此,以 Voronoi 图的边作为骨架线,结合隐式曲面建模技术构建 Voronoi 支杆结构。在三维空间中隐式曲面的定义为

$$S_{\alpha}=\{q\in\mathbf{R}^3\mid F(q)=\alpha\}.$$

(6)

式(6)中: q 为三维空间点; $F(q)$ 为势函数; α 为等势值。

与参数曲面相比,隐式曲面虽然可控性差,但易于判断与空间点的相对位置。当 $F(q)>\alpha$ 时, q 在闭合曲面外部;当 $F(q)<\alpha$ 时, q 在闭合曲面内部;当 $F(q)=\alpha$ 时, q 在曲面上。此外,隐式曲面具有很高的光滑性。隐式曲面造型的关键问题是构造势函数 $F(q)$,通过设计势函数能够得到复杂的曲面^[13]。

以 Voronoi 胞元的边为骨架线,根据空间点与骨架线的距离建立势函数。即

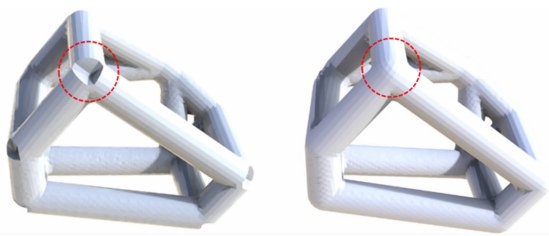
$$F_e(q)=(q-v_i)\cdot n_i.$$

(7)

式(7)中: v_i 为 Voronoi 顶点; n_i 为空间点 q 指向 Voronoi 边 V_e 垂直方向的单位法矢。

根据势函数的定义,等势值 α 相当于以 Voronoi 胞元的边(骨架线)为中心轴线构造半径为 α 的 Voronoi 圆柱支杆。当 $\alpha = 0$ 时,点与骨架线的距离为 0,所获得的支杆为骨架线本身。

1.5.2 隐式函数的调和 基于隐式曲面的 3D Voronoi 支杆结构,如图 9 所示。直接以 Voronoi 边为骨架结合隐式函数计算得到的 Voronoi 支杆在其顶点位置会产生干涉现象,即多个支杆间相互交叉(图 9(a))。交叉位置容易出现应力集中现象,为了保证模型的力学性能及整体结构的连续性和美观性,需要对其做进一步的处理。传统的处理方法是在顶点处放置一球体,让球体分别与相连的支杆模型做布尔并运算。这种方法计算量巨大且依赖于网格质量,鲁棒性差。为此,采用势函数调和策略,将对三角网格模型的布尔操作问题转化为对数学函数的运算问题,克服因大量布尔运算带来的数值计算不稳定、计算量大、鲁棒性差等问题。



(a) 无调和情况 (b) 有调和情况

图 9 基于隐式曲面的 3D Voronoi 支杆结构

Fig. 9 3D Voronoi strut structure based on implicit surface

相邻 Voronoi 支杆间融合的具体实现如下。首先,构造空间点到 Voronoi 边的势函数 $F_e(q)$,根据式(7)实现。其次,构造空间点到 Voronoi 顶点(Voronoi 边的端点)的势函数 $F_v(q)$,根据空间点 q 与 Voronoi 顶点 v_i 的距离建立势函数。即

$$F_v(q) = \sqrt{(q_x - v_{i,x})^2 + (q_y - v_{i,y})^2 + (q_z - v_{i,z})^2} \tag{8}$$

式(8)中: (q_x, q_y, q_z) 表示空间点 q 的三维坐标值; $(v_{i,x}, v_{i,y}, v_{i,z})$ 表示顶点 v_i 的三维坐标值。

最后,将同一 Voronoi 胞元的顶点和其对应的 Voronoi 边相接处的势函数调和叠加进行势值融合操作。使用 Ricci 超椭圆融合算子实现相交处的平滑过渡^[14],广义融合操作为

$$F(q) = ((F_v(q))^\beta + (F_e(q))^\beta)^{\frac{1}{\beta}} \tag{9}$$

式(9)中: β 表示调节因子,当 $\beta = 1$ 时,为狭义融合操作;当 $\beta \rightarrow \infty$ 时,融合效果与布尔并操作相似;当 $\beta \rightarrow -\infty$ 时,融合效果接近布尔交操作,文中 β 取值为 2。经调和处理后的接头效果,如图 9(b)所示。

由上述方法生成的与足底压力相适配的多孔结构鞋中底模型,如图 10 所示。由图 10 可知:鞋中底在密度上具有渐变和连续过渡。从局部放大图中可以看出,Voronoi 胞元在跖骨和足跟区域更密集,而在脚趾和足弓区域,Voronoi 胞元更稀疏。

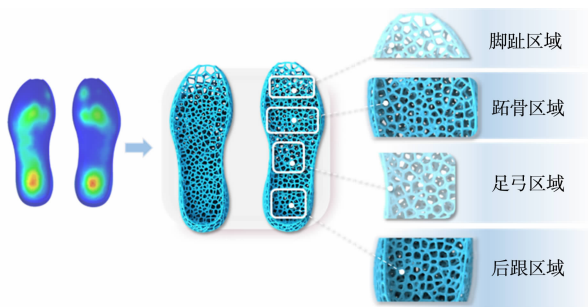


图 10 基于 Voronoi 边的隐式曲面鞋中底模型

Fig. 10 Implicit surface midsole model based on the Voronoi edges

2 鞋中底性能测试

多孔结构虽然具备非常好的性能,但其结构复杂,传统加工或成型方法都无法制造。3D 打印技术的快速进步使多孔结构的快速制造成为可能。在众多的 3D 打印技术中,FDM 工艺简单,设备便宜,因此选用 FDM 打印鞋中底。打印材料选用聚氨酯(TPU),该材料具有良好的弹性、柔韧性、耐磨性、耐用性,成本低廉。TPU 的杨氏模量为 26 MPa,泊松比为 0.46。打印设置层厚为 0.1 mm,打印速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3D 打印 Voronoi 支杆鞋中底模型,如图 11 所示。



图 11 3D 打印 Voronoi 支杆鞋中底模型

Fig. 11 3D printed Voronoi strut midsole model

由图 11 可知:选择 TPU 打印材料的鞋中底具有较好的变形能力。

2.1 静态足底压力测试

静态足底压力实验是一种有效评估站立时足底表面压力分布的方法,该实验能够直观地提供用户足部生物力学有价值的信息,特别是矫形设计相关信息。检验所设计的 Voronoi 鞋中底性能最直接、有效的方式是对足底压力进行采集。使用 F-Scan 测量系统对静态的足底压力进行测量,将足底压力传感器贴在鞋中底的上表面,被测人员双脚绑上固定绷带,将 Cuff 贴在绷带上以保证压力传感器稳定不受外界噪声干扰。体质量为 75 kg 的被测人员挺直站立于贴有鞋垫式压力传感器的鞋中底上,采集静态站立时的足底峰值压力,如图 12 所示。

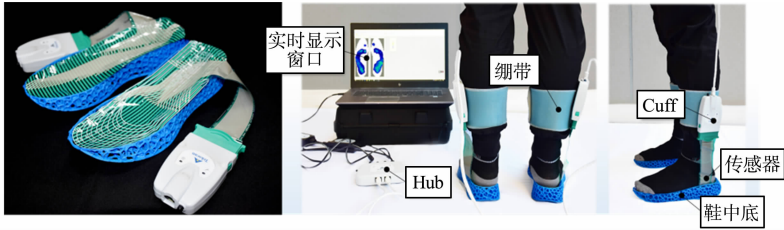


图 12 静态站立的足底峰值压力测量

Fig. 12 Measurement of peak plantar pressure during static standing

在足部健康研究中,足底峰值压力是一个重要的评价指标。峰值压力越大或足底压力分布越集中,地面回弹力越大,足部舒适度越低,越容易出现疲劳或局部损伤,严重时可能导致关节损伤^[15]。当峰值压力较小且分布较均匀时,不仅可以提高穿着的舒适性,而且在一定程度上能够纠正特殊足型局部压力异常集中的问题。为了更准确地获取足底压力数据,分别对足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底和重心 Voronoi 支杆鞋中底进行 5 次重复性实验,记录后跟和跖骨的峰值压力,如表 1 所示。

表 1 静态站立时鞋中底不同区域的峰值压力

Tab. 1 Peak pressure in different regions of midsoles during static standing

鞋中底类型	实验组	左脚峰值压力/MPa		右脚峰值压力/MPa	
		后跟	跖骨	后跟	跖骨
足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底	第 1 组	0.083	0.073	0.085	0.058
	第 2 组	0.088	0.071	0.082	0.062
	第 3 组	0.087	0.069	0.079	0.054
	第 4 组	0.082	0.072	0.086	0.060
	第 5 组	0.085	0.070	0.083	0.056
重心 Voronoi 支杆鞋中底	第 1 组	0.127	0.098	0.129	0.084
	第 2 组	0.121	0.103	0.128	0.082
	第 3 组	0.132	0.092	0.122	0.084
	第 4 组	0.134	0.089	0.120	0.086
	第 5 组	0.131	0.093	0.126	0.081

静态站立时的足底峰值压力云图,如图 13 所示。由表 1 和图 13 可知:在静态站立时,左、右足的峰值压力略有偏差,但总体的趋势保持一致。

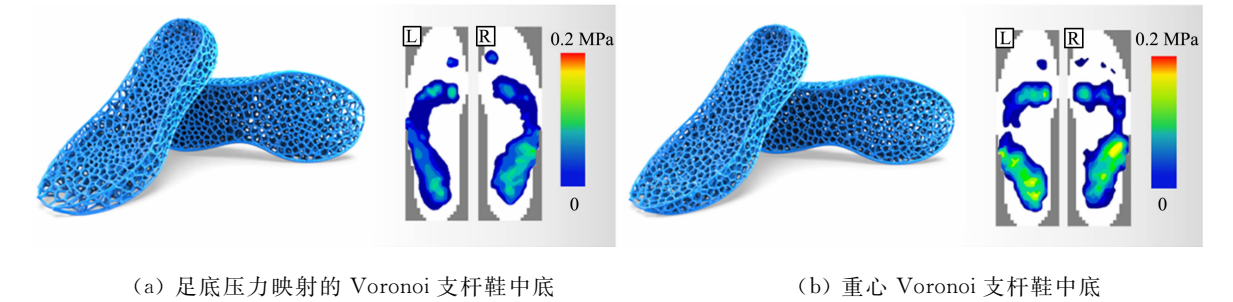


图 13 静态站立时的足底峰值应力云图

Fig. 13 Peak plantar stress cloud map during static standing

对 5 组实验数据取平均值,拟合得到沿脚长方向的足底压力曲线,如图 14 所示。图 14 中: P 为足底压力; L 为脚长;蓝色区域为跖骨区域;红色区域为后跟区域。由图 14 可知:足底受力区域主要集中在跖骨及后跟区域,双足足底压力曲线均呈现典型的双峰特征;跖骨区域,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的最大峰值压力为 0.071 MPa,相比重心 Voronoi 支杆鞋中底的最大峰值压力(0.095 MPa)下降了 25.3%;后跟区域,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的最大峰值压力为 0.085 MPa,相比重心 Voronoi 支杆鞋中底的最大峰值压力(0.129 MPa)下降了 34.1%。

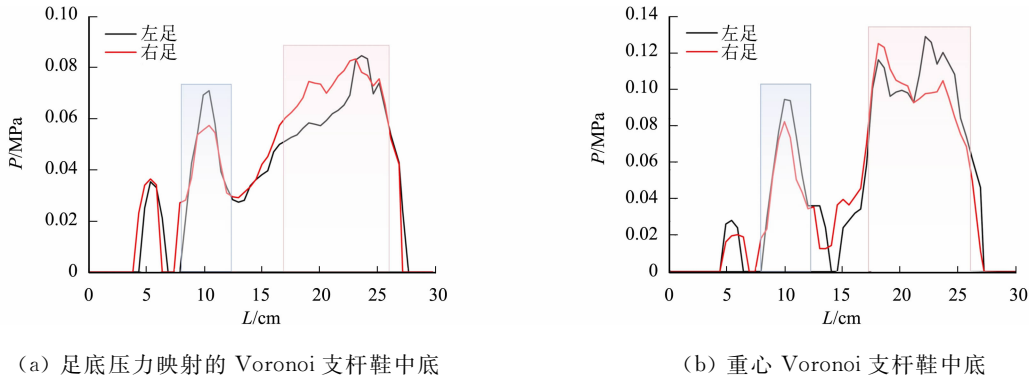


图 14 脚长方向的足底压力曲线

Fig. 14 Plantar pressure curves in direction of foot length

实验结果证明,文中设计的鞋中底能够显著降低静态站立时跖骨和后跟区域的压力,同时使鞋中底的压力分布更加均匀,表明足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底可以有效调整足底压力分布,提供更舒适的穿着体验,减少足部支撑负担,降低足部及关节损伤的风险。

2.2 步态分析对比

步态是步行的行为特征,分析评估步行时的足底压力变化,对临床诊断、疗效评估和术后疗效评价均具有重要意义。看似简单的步行实际上是由一系列复杂的动作组成,一般来说,步行被定义为一系列连续的步态,一个步态周期是指同一脚跟 2 次触地之间的时间间隔。步态由支撑阶段和摆动阶段组成,其中,支撑阶段为足部接触地面的时间,约占步态周期的 60%,主要为单足支撑。

研究穿着不同鞋中底的鞋在行走过程中足底的压力变化。动态足底压力测量,如图 15 所示。步态采集过程中,测试人员穿着文中设计的鞋中底以平常的步态自然行走,实时采集步行过程中的足部压力,获得整个行走过程中足底各处的压力、峰值压力等数据。行走过程中步态周期由两个单步组成,受试者在步行的支撑阶段单侧脚经历了后跟触地、整足触地、跖骨触地和脚趾触地 4 个阶段。

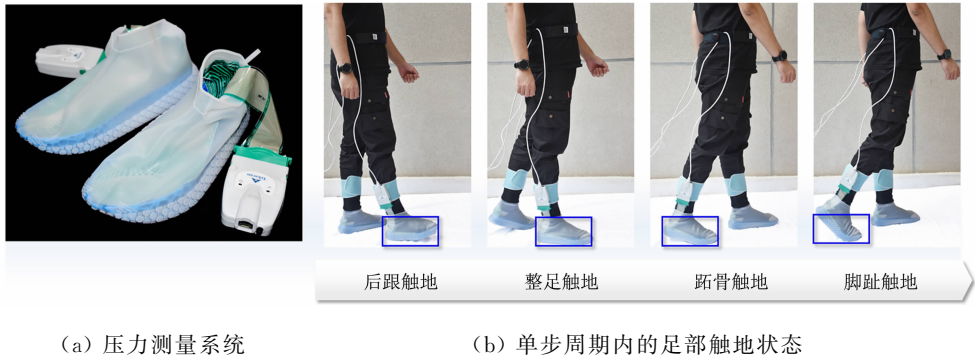


图 15 动态足底压力测量

Fig. 15 Dynamic plantar pressure measurement

分别对足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底和重心 Voronoi 支杆鞋中底进行步态测试,相应的步态压力云图和足底压力-时间(t)曲线,如图 16 所示。由图 16 可知:在行走过程中,相较于重心 Voronoi 支杆鞋中底,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的压力值更低。

行走过程中鞋底不同区域的峰值压力,如表 2 所示。表 2 中: P_1 为足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力; P_2 为重心 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力。

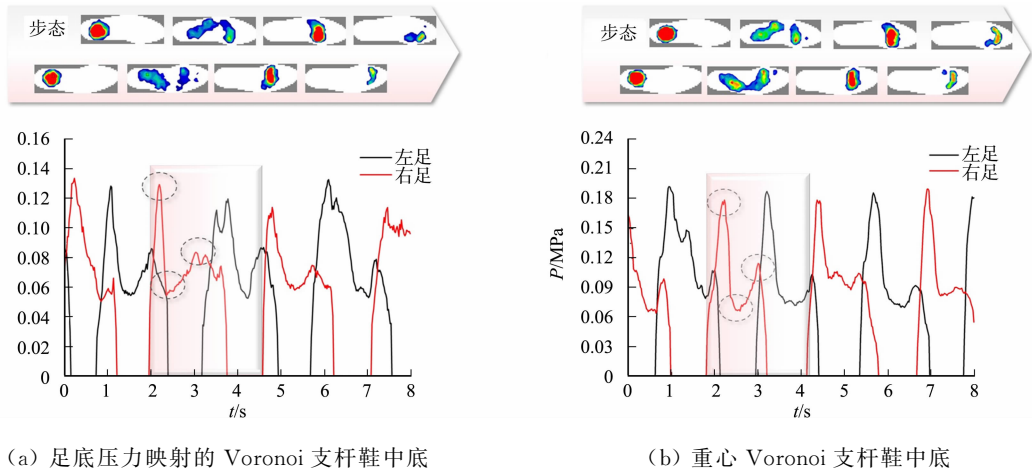


图 16 步态压力云图和足底压力-时间曲线

Fig. 16 Gait pressure cloud maps and plantar pressure-time curves

表 2 行走过程中鞋中底不同区域的峰值压力

Tab. 2 Peak pressure in different regions of midsoles during walking

单步周期	P_1/MPa			P_2/MPa		
	后跟	足弓	跖骨	后跟	足弓	跖骨
1	0.128	0.056	0.086	0.192	0.081	0.108
2	0.129	0.058	0.084	0.179	0.067	0.115
3	0.120	0.053	0.087	0.187	0.076	0.104
4	0.114	0.058	0.075	0.179	0.088	0.105
5	0.132	0.053	0.080	0.186	0.070	0.092

对比一个步态周期(足底压力-时间曲线图中框出来的区域),支撑阶段的前期,即一侧足跟第 1 次接触地面到整个足底刚刚接触地面时,该时间约占整个步态周期的 10%,足底触底时出现最大峰值压力;支撑阶段的中期,此时左足足底部完全接触地面支撑着身体全部质量,这个时间约占步态周期的 30%,由于整只脚参与受力,足底压力降低;支撑阶段的后期,即支撑腿足跟离地到足尖离地时,该时间约占步态周期的 20%,该阶段力从足跟传递到脚趾,在跖骨和地面接触时,出现次峰值。行走过程中,足跟与前掌跖骨是主要着地部位,承受着人体质量和行走负荷的绝大部分,从足跟着地到脚尖离地的过程中,足底所受的力也随之传递。

在足跟触地时,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力比重心 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力降低了 27.9%;在跖骨触地时,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力比重心 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力降低了 27.0%;足弓区域压力值大小基本一致。由此可以看出,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的足弓部分提供了更大支撑,能够显著减轻足跟和跖骨部位的负重,减少行走过程中的负荷,缓解行走过程中的疲劳。

3 结论

通过加权随机采样策略,构建应力分布向密度分布的映射关系,提出足底压力映射的多孔结构鞋中底设计方法。对所设计的鞋中底进行 3D 打印成型,并进行静态脚底压力测评和步态分析,得出以下 3 个结论。

- 1) 根据扫描的实际足部模型和测量的实际足底压力分布,计算鞋中底的压力分布,从而驱动生成相应的变密度三维 Voronoi 图,可以实现应力场与密度分布的精确映射。
- 2) 测试证明,所设计的鞋中底可以降低足底峰值压力,使足底压力分布更加均匀,有利于改善足部健康。在足跟触地时,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底峰值压力比重心 Voronoi 支杆鞋中底峰值压力降低了 27.9%;在跖骨触地时,足底压力映射的 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力比重心 Voronoi 支杆鞋中底的峰值压力降低了 27.0%;足弓区域压力值大小基本一致。足底压力映射的 Voronoi 支杆

鞋中底的足弓部分提供了更大支撑,能够显著减轻足跟和跖骨部位的负重,减少行走过程中的负荷,缓解行走过程中的疲劳。

3) 所提设计方法将多孔结构分布与多孔实体生成分开处理,有利于解决鞋底级放过程中多孔结构支杆半径与模型整体缩放比例不一致的矛盾,可以实现在鞋底级放过程中保持多孔结构支杆半径不变,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 刘浪. 不同中底硬度和厚度的跑鞋对运动时下肢生物力学特征的影响[D]. 北京:首都体育学院,2022.
- [2] ACTIS R L, VENTURA L B, LOTT D J, *et al.* Multi-plug insole design to reduce peak plantar pressure on the diabetic foot during walking[J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2008, 46: 363-371. DOI: 10. 1007/s11517-008-0311-5.
- [3] BUS S A. The role of pressure offloading on diabetic foot ulcer healing and prevention of recurrence[J]. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 2016, 138(3S): 179S-187S. DOI: 10. 1097/PRS. 0000000000002686.
- [4] LAM W K, NG W X, KONG P W. Influence of shoe midsole hardness on plantar pressure distribution in four basketball-related movements[J]. *Research in Sports Medicine*, 2017, 25(1): 37-47. DOI: 10. 1080/15438627. 2016. 1258643.
- [5] CHEVALIER T L, HODGINS H, CHOCKALINGAM N. Plantar pressure measurements using an in-shoe system and a pressure platform: A comparison[J]. *Gait and Posture*, 2010, 31(3): 397-399. DOI: 10. 1016/j. gaitpost. 2009. 11. 016.
- [6] BULDT A K, ALLAN J J, LANDORF K B, *et al.* The relationship between foot posture and plantar pressure during walking in adults: A systematic review[J]. *Gait and Posture*, 2018, 62: 56-67. DOI: 10. 1016/j. gaitpost. 2018. 02. 026.
- [7] FRECKLINGTON M, DALBETH N, MCNAIR P, *et al.* Footwear interventions for foot pain, function, impairment and disability for people with foot and ankle arthritis: A literature review[J]. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, 2018, 47(6): 814-824. DOI: 10. 1016/j. semarthrit. 2017. 10. 017.
- [8] CHENG Huaqin, LIU Bin, LIU Meiying, *et al.* Design of 3D Voronoi strut midsoles driven by plantar pressure distribution[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2022, 9(4): 1410-1429. DOI: 10. 1093/jcde/qwac060.
- [9] RYCROFT C H. VORO++: A three-dimensional Voronoi cell library in C++[J]. *Chaos*, 2009, 19(4): 041111. DOI: 10. 1063/1. 3215722.
- [10] LLOYD S. Least squares quantization in PCM[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28(2): 129-137.
- [11] EFRAIMIDIS P S, SPIRAKIS P G. Weighted random sampling with a reservoir[J]. *Information Processing Letters*, 2006, 97(5): 181-185. DOI: 10. 1016/j. ipl. 2005. 11. 003.
- [12] LIU Bin, CHENG Huaqin, LIU Meiying, *et al.* Adaptive anisotropic porous structure design and modeling for 2. 5D mechanical parts[J]. *Materials and Design*, 2021, 206: 109786. DOI: 10. 1016/j. matdes. 2021. 109786.
- [13] SAHBAEI P, MOULD D, WYVILL B. Implicit representation of inscribed volumes[C]// *Proceedings of the Joint Symposium on Computational Aesthetics and Sketch-Based Interfaces and Modeling and Non-Photorealistic Animation and Rendering*. Victoria: Association for Computing Machinery, 2018: 1-7. DOI: 10. 1145/3229147. 3229164.
- [14] SUGIHARA M, GROOT E D, WYVILL B, *et al.* A sketch-based method to control deformation in a skeletal implicit surface modeler[C]// *Proceedings of the Fifth Eurographics Conference on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. Annecy: Eurographics Association, 2008: 65-72. DOI: 10. 2312/SBM/SBM08/065-072.
- [15] 程华钦. 应力场驱动的 Voronoi 多孔结构设计[D]. 厦门: 华侨大学, 2022.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴跃勤)