Advances in Clinical Medicine 临床医学进展, 2025, 15(3), 811-815
Published Online March 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/acm
https://doi.org/10.12677/acm.2025.153682

Hans汉斯

数字化步态分析矫形鞋垫对儿童扁平足疗效的研究进展

陈奕宏[1,2]，郝增涛[1,2*]

[1]内蒙古医科大学研究生院，内蒙古 呼和浩特
[2]内蒙古医科大学第二附属医院手足显微外科，内蒙古 呼和浩特

收稿日期：2025年2月11日；录用日期：2025年3月4日；发布日期：2025年3月11日

摘　要

小儿扁平足是常见的儿童足部畸形，但对于儿童扁平足的治疗尚无统一的定论。大多数学者认为有症状的小儿扁平足的干预有积极意义。矫形鞋垫是目前主流的保守治疗选择。本文以矫形鞋垫治疗小儿扁平足为切入点，结合数字化步态分析，综述了儿童扁平足畸形的治疗及疗效评估。

关键词

扁平足，矫形鞋垫，步态分析，儿童

Research Progress of Digital Gait Analysis on the Effect of Orthopedic Insole on Flat Feet in Children

Yihong Chen[1,2], Zengtao Hao[1,2*]

[1]Graduate School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia
[2]Department of Hand and Foot Microsurgery, The Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Feb. 11th, 2025; accepted: Mar. 4th, 2025; published: Mar. 11th, 2025

Abstract

Children's flat foot is a common foot deformity in children, but there is no uniform conclusion on the treatment of children's flat foot. Most scholars believe that the intervention of symptomatic flat feet

*通讯作者。

文章引用: 陈奕宏, 郝增涛. 数字化步态分析矫形鞋垫对儿童扁平足疗效的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(3): 811-815. DOI: 10.12677/acm.2025.153682

in children has positive significance. Orthopedic insole is currently the mainstream conservative treatment option. Based on the treatment of children's flat feet with orthopedic insole and digital gait analysis, this paper reviews the treatment and efficacy evaluation of children's flat feet deformity.

Keywords

Flat Foot, Orthopedic Insole, Gait Analysis, Children

Copyright © 2025 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. 儿童扁平足的定义与分类

扁平足是一种以足内侧纵弓塌陷为主要表现的足部畸形，高发于儿童、青少年人群，而更为常见的是柔韧性扁平足。大多数儿童扁平足无明显临床症状，且随着生长发育，部分患儿足弓恢复正常，扁平足患病率随着年龄的增长而降低。少数患儿有临床症状，由于足弓的病变和生物力学异常，导致足底疼痛、足部畸形、膝关节疼痛、行走时步态异常，进而引发继发性病变。矫形鞋垫常被作为辅助工具来治疗扁平足，避免手术带来的创伤。早期佩戴矫形鞋垫会大大改善疼痛症状及下肢力线异常，防止进一步引起一系列疾病的发生。步态分析目前广泛应用于骨科生物力学、康复工程和医学工程等领域。有些学者应用步态分析来评估扁平足矫形的疗效。本文针对矫形鞋垫治疗儿童扁平足方面的进展进行综述，并对步态分析评估儿童扁平足进行总结分析。

2. 数字化步态分析的原理与应用

2.1. 数字化步态分析的原理

数字化步态分析是运用光电学原理来采集运动学、动力学及时空参数，同时结合人体解剖学和生理学知识，系统地测量、描述人体运动，对人体的行走功能进行对比、量化分析的一种生物力学研究方法。用以评估足部力学和步态运动轨迹的重要工具。步态分析系统是检测人肢体宏观运动常用的设备，利用光电学捕捉系统，检测人体行走中的运动状态、受力状态、肌电活动等生物力学有关的物理测量。能够获得行走过程中特定时相躯干和关节运动、肌肉活动对地面作用力、关节力矩和做功，以及足底压力分布和步行中氧气消耗等数据[1]。人类在行走过程中，从一侧足触地至同一侧足再次触地的过程称为一个步态周期。步态周期包括支撑时相和摆动时相，支撑时相由支撑前期(足跟着地期)、支撑初期(承重反应期)、支撑中期、支撑末期(足跟离地)、摆动前期(足趾离地)组成，摆动时相由摆动早期、摆动中期、摆动末期组成，支撑时相约占整个步态的 60%。当人在正常行走时，在摆动早－中期时髋关节屈曲，摆动中期时，膝关节屈曲，摆动中－后期时踝关节背屈。数字化步态分析设备可检测到异常步态，并量化参数，给予临床医师治疗及康复建议。不同的设备可获得的参数略有不同。

2.2. 数字化步态分析系统的种类

目前主流的有标记及无需标记捕捉系统，有标记是利用红外摄像头捕捉，在人体各关节体表位置贴带标记点，配合压力监测系统，得出生物力学参数，品牌包括英国的 Vicon、美国的 Motion Analysis、加拿大的 Noraxon、比利时的 RSccan 及意大利的 BTS 等[2] [3]。无标记的步态分析采集运动图像，主要利

用摄像头、图像分析软件，操作过程更加简洁，场地需求对比三维分析更低，设备价格更经济实惠。

有些学者也将步态分析与体表肌电图相结合，通过皮肤表面放置电极来记录肌电活动，量化肌肉收缩、舒张，是一种常用的、可动态分析肌肉功能的评估方法，具有无创、便携、可穿戴等特点，可以实时、动态地评估肌肉运动功能。可以记录神经肌肉系统进行各种随意和非随意活动时的生物电变化，可在局部乃至整体上反映神经肌肉系统活动的某些生物学特征。动态监测肌肉收缩时的电生理活动，定量分析肌肉功能状态。

3. 矫形鞋垫治疗儿童扁平足的现状与研究进展

儿童扁平足与成人不同，因其处于持续发育阶段，下肢力线异常可能会影响脊柱甚至器官发育，时间久了可能会出现膝关节、踝关节、背部及足底不适，在儿童发育尚未完成时及时干预会减少远期并发症。大多数儿童扁平足会选择保守治疗，而矫形鞋垫目前被广泛作为足型异常矫正的非手术治疗手段。矫形鞋垫作为一种用于恢复足部正常生物力学的矫形辅助器具，减轻足底压力和优化足底压力分布，帮助改善足部结构和功能。矫形鞋垫在医学和康复领域具有重要的应用价值。

3.1. 矫形鞋垫的种类与设计原则

矫形鞋垫的设计基于人体足弓的三点力学原理，旨在实现横弓、内侧足弓以及外侧足弓的三点受力均衡，以纠正受力不均的状况[4]。根据形态分类，矫形鞋垫可分为平板鞋垫、局部支撑鞋垫和全接触鞋垫。关于鞋垫形态设计的研究，主要集中在鞋垫厚度、足弓支撑高度、楔形角度等方面。矫形鞋垫的位置设计主要包括：后足内侧、前掌内侧和足内侧纵弓的位置。不同位置形状设计都对矫形鞋垫的功能产生不同的效果和影响，通过贴片将材料添加到矫形鞋垫后跟内侧区域、前掌内侧区域和足内侧纵弓区域，通过矫形材料的结构设计将足部结构调整到中立位，其主要功能是使足部减少外翻，并在步态的支撑期控制跟骨的运动。矫形鞋垫按照制作方式可以分为预制类和定制类以及新兴起的 3D 打印鞋垫。预制类矫形鞋垫主要根据足型大数据设计出不同矫正程度的方案、适用于大范围的扁平足患者；定制类矫形鞋垫主要根据扁平足患者个体的肌肉、骨骼、韧带情况制定的独立方案，根据每位患者的扁平足患病情况进行设计与制作，满足患者个性化的定制需求。3D 打印型是根据足底压力分布以及足底形态而制作出独一无二的矫形鞋垫。随着数字科学的发展，3D 打印鞋垫应用越来越广泛。Xu 等将 80 例双侧扁平足患者随机分为对照组和实验组，对照组患者采用预制矫形鞋垫进行治疗，实验组采用 3D 打印定制矫形鞋垫进行治疗，证实 3D 打印定制矫形鞋垫比预制矫形鞋垫更有效，能为扁平足患者提供更好的舒适度[5]。

3.2. 不同鞋垫参数对步态的影响

矫形鞋垫的制作材料包括氨酰胺(PA)、聚乳酸(PLA)、热塑性聚氨酯(TPU)等，矫形材料的选取对患者的矫正效果具有不同的影响，针对不同的受试者群体所需的矫正程度应选取适合患者的矫形鞋垫材料。Losa Iglesias 等[6]的研究发现，矫形鞋垫材质越硬，对足底的感觉输入越高，增加足底本体感觉。Chatzistergos 等[7]利用十种不同硬度的材料进行研究，研究发现优质的材料所制作的矫形鞋垫可缓解站立的足底压力 16%，缓解行走时足底压力 19%。苏宏伦等[8]研究了不同硬度的矫形鞋垫对儿童扁平足的影响，研究发现矫形鞋垫足弓高度相同的情况下，材料越硬，支撑效果越好，但硬度提高，足部活动度降低。目前鞋垫材料的使用已从单一材料发展为使用多层材料或复合材料。

根据形态分类，矫形鞋垫可分为平板鞋垫、局部支撑鞋垫和全接触鞋垫。关于鞋垫形态设计的研究，主要集中在鞋垫厚度、足弓支撑高度、楔形角度等方面。罗向东等[9]研究了鞋垫形态对不同脚型足底压力的影响，实验者将足部分为前足、中足和后足三个区域，对不同区域鞋垫的厚度进行控制变量，分别研究了高弓足和扁平足穿戴不同形态矫形鞋垫时三个区域足底压力的变化。其研究表明，扁平足矫形鞋

垫则应该避免前掌增高，需要增高足弓部位来降低足部压力。

在足弓支撑高度方面，耿灵秋等人的研究结果表明，干预后穿低、中、高三组不同支撑高度矫形鞋垫受试者的足弓指数均显著小于干预前。

Xu 等[5]对 3D 打印和预制矫形鞋垫的用户进行了足底压力测试，发现定制的 3D 打印鞋垫减轻了跖骨的负荷，并将负荷分配到足中部区域，能有效减少扁平足患者的足部病变，并且定制的 3D 打印矫形鞋垫比预制的性能更好，舒适性也有更好的改善。

王皓翔等的研究得出结论：1 年的矫形鞋垫穿戴虽然对于学龄前儿童的足部扁平程度无明显帮助，但可有效改善其跟骨外翻和膝外翻，纠正足部和膝关节力线，进而预防或解决可能的不适感和外观异常[10]。

综上所述，选择适配于患者的矫形鞋垫，可支撑足弓，使足部缓冲，改善足底压力分布，同时调节对关节、肌肉、韧带产生的负担。

4. 数字化步态分析与矫形鞋垫疗效评估的结合

Jafamezhadgero 等[11]研究了带有足内侧支撑定制矫形鞋垫对柔性扁平足儿童行走过程中运动学和动力学的长期影响。研究结果表明，相比于普通鞋垫，足弓支撑矫形器的长期使用可有效改善扁平足患者行走过程中的下肢运动学和动力学。

1) 运动学：对于柔性平足矫正后的运动学效果存在较大差异。有研究表明，使用矫形器矫正后最大踝关节外翻、最大踝关节内旋角、最大膝关节内旋角、最大髋部伸展角显著变小，最小膝关节外展角、最大膝关节外展角、最大髋关节外旋角显著变大。有研究结果表明，对扁平足的矫正主要影响踝关节，扁平足患者穿鞋与裸足相比，峰值踝关节背屈角度显著降低；穿带矫形鞋垫的鞋与裸足相比，峰值踝关节背屈角度显著降低，而对膝关节和髋关节的影响较小。与前人的研究结果相矛盾，穿有或没有鞋垫的踝关节、膝关节和髋关节角度之间没有显著差异。穿戴矫形鞋垫后儿童的双侧下肢的扁平程度、跟骨外翻角、膝外翻角、足姿指数、关节柔韧性均低于未穿戴矫形鞋垫时($P < 0.05$)。

2) 动力学：Jafamezhadgero 等[11]探讨了柔性平足儿童佩戴足部矫形器后可减少额状面髋关节力矩的不对称性，还可降低优势下肢踝关节外展力矩、膝关节及髋关节外展力矩和髋关节屈肌力矩。非优势下肢使用矫形器可减少踝关节外翻和内旋力矩、膝关节屈曲和内旋力矩、髋关节伸展力矩，增加踝关节背屈力矩；与前人的研究结果相比都显著降低了踝关节内翻力矩。

3) 时空参数：前人研究表明，使用矫形器或者矫形鞋垫对步态的时空参数都有一定的积极影响[12]。有学者探讨了足矫形器对 20 多岁扁平足大学生步态的影响，研究结果表明，受试者使用足部矫形器后，双足的支撑时间和步频显著减少，双足步幅和步速显著增加；有学者研究了医用矫形鞋和功能足矫形器对青少年柔性扁平足压力位移中心和步态参数的即时影响，结果表明，虽然医用鞋降低了压力偏移中心的位移，提高了行走速度，但步子的对称性降低。功能性足矫形器可以增加步长、步宽的对称性，以减少压力偏移中心位移。前人研究了裸足行走、穿普通鞋垫鞋行走和穿足部矫形器鞋子行走的步态模式，研究结果表明，穿普通鞋垫鞋或足部矫形器时的步长和步幅显著大于裸足，穿普通鞋垫鞋时的步行速度显著大于裸脚时的步行速度。研究表明，一种用于恢复扁平足患者内侧纵弓活动能力的鞋垫，在使用矫形鞋垫时，行走速度、步长和内侧纵弓的运动参数均有显著差异。穿矫形器干预后与开始时相比行走速度和步长显著增加，步频没有变化。

矫形鞋垫的干预对于柔性扁平足儿童足部三维形态学和下肢生物力学具有积极的改善作用，较低足弓支撑高度的矫形鞋垫对于柔性扁平足儿童受试者更为舒适。儿童柔性扁平足使用矫形鞋垫足弓高度为五分之四时，矫形干预有效且穿着舒适。Hsu 等利用 FDM 技术及 TPU 材料制作矫形鞋垫，利用运动分析系统，验证了 3 种矫形鞋垫能有效改善关节运动学和动力学及主观舒适度。结合三维步态分析可知水

动力矫形鞋垫对平足的内侧纵弓灵活度、步态速度和步长有有益影响[13]。

5. 儿童扁平足治疗的挑战与展望

根据前人的研究可以得出足部矫形器是治疗扁平足的一种普遍干预措施。但由于其定义，诊断标准和策略方面尚不明确，所以在扁平足的干预方法上存在很大的异质性，缺少一套系统的扁平足评定和治疗体系。目前临床上，矫形鞋垫的矫正多数靠经验进行判断，并在矫形器对扁平足的干预效果的评价标准上缺乏一致性和统一性，尽管使用足部矫形器可能会对一系列结果产生积极的影响，例如：足姿、步态、功能、结构、动力学测量，但关于足部矫形器所产生的生物力学效应的经验证据还是缺乏的，需要增加运动过程中对足部生物力学数据的评估。前人研究多数采用预制矫形鞋垫对扁平足儿童进行矫形效果的评价分析，但根据足弓支撑高度进行定制矫形鞋垫的设计用于评价儿童柔性扁平足矫正效果的经验证据不足。希望在日后的临床研究中，制定一套系统的评定流程，要与患者紧密联系，长期随访，关注患者佩戴矫形器的体验感及反馈。

参考文献

[1] 陈玥锦. 基于人体关节点数据的步态分析及应用系统研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2023.

[2] Benedetti, M., Catani, F., Leardini, A., Pignotti, E. and Giannini, S. (1998) Data Management in Gait Analysis for Clinical Applications. *Clinical Biomechanics*, **13**, 204-215. https://doi.org/10.1016/s0268-0033(97)00041-7

[3] 郭永亮, 冯重睿, 张新斐. BTS 三维运动捕捉系统在步态分析中的信度[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(23): 3665-3669.

[4] Su, S., Mo, Z., Guo, J. and Fan, Y. (2017) The Effect of Arch Height and Material Hardness of Personalized Insole on Correction and Tissues of Flatfoot. *Journal of Healthcare Engineering*, **2017**, Article ID: 8614341. https://doi.org/10.1155/2017/8614341

[5] Xu, R., Wang, Z., Ren, Z., Ma, T., Jia, Z., Fang, S., *et al*. (2019) Comparative Study of the Effects of Customized 3D Printed Insole and Prefabricated Insole on Plantar Pressure and Comfort in Patients with Symptomatic Flatfoot. *Medical Science Monitor*, **25**, 3510-3519. https://doi.org/10.12659/msm.916975

[6] Losa Iglesias, M.E., Becerro de Bengoa Vallejo, R. and Palacios Peña, D. (2012) Impact of Soft and Hard Insole Density on Postural Stability in Older Adults. *Geriatric Nursing*, **33**, 264-271. https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2012.01.007

[7] Chatzistergos, P.E., Naemi, R., Healy, A., Gerth, P. and Chockalingam, N. (2017) Subject Specific Optimisation of the Stiffness of Footwear Material for Maximum Plantar Pressure Reduction. *Annals of Biomedical Engineering*, **45**, 1929-1940. https://doi.org/10.1007/s10439-017-1826-4

[8] 苏宏伦, 郭俊超, 莫中军, 等. 个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究[J]. 医用生物力学, 2016, 31(6): 490-494.

[9] 罗向东, 杨洋, 岳宗敏, 等. 鞋垫形态对不同脚型足底压力的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(6): 27-31.

[10] 王皓翔, 卞瑞豪, 加国庆, 等. 学龄前儿童柔韧性扁平足的影响因素及矫形鞋垫疗效分析[J]. 华西医学, 2024, 39(6): 884-890.

[11] Jafarnezhadgero, A., Madadi Shad, M. and Ferber, R. (2018) The Effect of Foot Orthoses on Joint Moment Asymmetry in Male Children with Flexible Flat Feet. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, **22**, 83-89. https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.04.007

[12] 黄昱喆. 基于足底压力优化与检测的矫形鞋垫研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.

[13] Hsu, C., Wang, C., Lin, K., Chien, M., Wei, S. and Chen, C. (2022) Biomechanical Analysis of the Flatfoot with Different 3D-Printed Insoles on the Lower Extremities. *Bioengineering*, **9**, Article 563. https://doi.org/10.3390/bioengineering9100563