

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2026.04.016

医学生物物理

基于白噪声的多感官刺激干预对健康成年人姿势控制能力的影响

谢金坤¹, 邱宝贵², 吴志宇¹, 胡冰山^{1,3}, 贺晨^{1,3}

1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海云铸三维科技有限公司, 上海 201306; 3. 上海康复器械工程技术研究中心, 上海 200093

【摘要】基于随机共振的白噪声刺激已被证实可以提高人体的平衡能力,但目前缺乏多感官刺激对人体平衡能力的研究,因此本研究旨在探究不同强度足底振动刺激及触觉-前庭觉多感官联合刺激对健康成年人平衡能力的影响。实验采用自研足底微振动刺激鞋垫,将白噪声转换为电信号以驱动振动电机刺激足底触觉,并通过测力平台测量受试者95%足底压力中心(CoP)置信椭圆面积以评估平衡能力。试验分为两部分:(1)研究不同强度足底振动刺激(空白、强振动、阈值振动)的影响,结果显示阈值振动可使CoP包络面积降低201.500 mm²,但差异无统计学意义($P>0.05$)。(2)研究多感官刺激效果,比较空白组(无刺激)、声音刺激(前庭觉)、振动刺激(足底触觉)及声音振动刺激这4种条件下的平衡参数。结果表明,声音刺激和振动刺激的单感官刺激均能显著提升平衡能力,相较于空白组CoP包络面积分别降低44.840 mm²和44.147 mm²;声音刺激和振动刺激的多感官联合刺激效果更优,CoP包络面积降低77.574 mm²,证明多感官协同可显著增强平衡改善效果。本研究证实足底阈值振动与前庭白噪声刺激均可有效改善平衡,且多感官联合刺激具有协同增强作用。

【关键词】平衡能力;白噪声;多感官刺激;随机共振;压力中心

【中图分类号】R318.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2026)04-0525-06

Effects of multisensory stimulation intervention based on white noise on postural control in healthy adults

XIE Jinkun¹, QIU Baogui², WU Zhiyu¹, HU Bingshan^{1,3}, HE Chen^{1,3}

1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Yunzhu 3D Technology Co., Ltd., Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai 200093, China

Abstract: White noise stimulation based on stochastic resonance has been proven to improve human balance. However, research on the effects of multisensory stimulation on balance remains limited. Therefore, this study aims to investigate the impacts of plantar vibration stimuli at varying intensities and combined tactile-vestibular multisensory stimulation on balance in healthy adults. The experiment utilizes self-developed plantar micro-vibration stimulation insoles, which convert white noise into electrical signals to drive miniature vibration motors for tactile stimulation to the plantar surface. Balance is assessed by measuring the 95% confidence ellipse area of the center of pressure (CoP) using a force platform. The experiment is divided into two parts. (1) Examining the effects of plantar vibration stimulation at varying intensities (no vibration, strong vibration, and threshold vibration). The results show that threshold vibration reduces the CoP envelope area by 201.500 mm², but the difference is not statistically significant ($P>0.05$). (2) Investigating the effects of multisensory stimulation by comparing balance parameters under 4 conditions: a control condition (no stimulation), auditory stimulation (vestibular), vibration stimulation (plantar tactile), and combined vibration-auditory stimulation. The results show that both auditory and vibration single-mode stimulation significantly improve balance, reducing the CoP envelope area by 44.840 mm² and 44.147 mm², respectively, compared with the control condition. Furthermore, combined vibration-auditory multisensory stimulation achieves even better results, with a 77.574 mm² reduction in CoP envelope area, demonstrating that multisensory integration significantly enhances balance improvement. This study confirms that both plantar threshold vibration and vestibular white noise stimulation effectively improve balance, with multisensory stimulation providing synergistic benefits.

Keywords: balance; white noise; multisensory stimulation; stochastic resonance; the center of pressure

【收稿日期】2025-11-23

【作者简介】谢金坤, 硕士研究生, 研究方向: 足底刺激和步态分析, E-mail: 2727577619@qq.com

【通信作者】贺晨, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 人体平衡和脊柱矫正, E-mail: hechen@usst.edu.cn

前言

姿势控制能力是人体通过神经系统、肌骨和感觉系统的协同作用抵抗外界干扰,从而完成日常活动的核心能力^[1-2],该能力的损伤与多种因素相关,包括病理性损伤^[3]、年龄增长引起的生理功能减退^[4]、运动的缺乏^[5]等,常表现为平衡能力下降甚至平衡障碍。在参与姿势控制的3大系统中,感觉系统通过视觉^[6]、前庭觉^[3]、躯体感觉^[7]等多感官信息发挥核心作用。

人体感受器对刺激的响应存在明确的激活阈值^[8],并且对不同频率和强度的刺激响应曲线呈现明显的非线性特征^[9-10],这是典型的非线性动态系统特征,这种特性使得感受器能通过随机共振调控对阈下刺激的检测能力^[11]。随机共振作为一种非线性系统中通过噪声放大弱信号的干预手段,在视觉^[12]、前庭觉^[13]和触觉^[14-16]等系统中都表现出积极作用,并且由于感受器的频率选择性,宽频带且功率谱恒定的白噪声是随机共振对感受器的影响研究中最常用的噪声源。

足部作为人体站立姿势时的主要支撑点,来自足底感受器的感觉信息在感受系统中是最重要的一部分^[17-18],当身体倾斜或地面不平时,足底感受器将信号经神经传递至小脑和大脑皮层,触发肌肉调节,从而维持平衡。若足底敏感性减弱,就会影响对足底信号的采集能力,从而导致平衡能力下降。Wang等^[19]证明功率谱密度恒定的白噪声信号可有效降低人类触觉感知阈值。Gerber等^[20]通过实验证实,足底亚阈值白噪声可以降低老年人群的足底压力中心(the Center of Pressure, CoP)的摇摆范围,验证了通过对足底进行振动刺激可以有效提升人体的平衡能力。Xie等^[21]通过实验发现不同强度的足底振动对平衡控制的影响不同。

前庭系统负责检测相对于重力与惯性的线性和角向头部运动,反馈信号通过听神经传递到大脑,进而影响与姿势平衡调节直接相关的颞叶。已有研究证实噪声前庭电刺激可以改善前庭病患者的姿势控制能力^[22]。Piccolo等^[23]针对健康成年人进行前庭刺激后发现健康受试者减少了步宽变异性并略微增加了步态速度,而Assländer等^[24]却表明没有发现前庭刺激对年轻健康成人的站立平衡有影响,这可能是由于不同实验所选取的平衡评估参数不同所导致。在声音刺激方式上,Zhou等^[25]发现使用75~85 dB的高斯白噪声对前庭进行刺激后对平衡能力的改善程度最好。

综合现有文献表明,目前基于随机共振对人体感官的刺激方式大多使用振动刺激、电刺激和声音刺激,但目前已有的实验研究都只采用一种刺激手段,缺乏不同刺激方式、多感官刺激和单感官刺激之间的效果对比。因此本研究自行研发一款足底微振动刺激鞋垫,

该装置能将白噪声转换为精确控制的微振动信号,从而实现对足底触觉的定量、可重复刺激,并通过不同强度刺激确定足底最佳刺激参数。在此基础上,通过足底振动和白噪声对足底触觉和前庭进行单一感官及多感官联合刺激,研究不同感官刺激对健康成年人平衡能力的影响效果。

1 材料与方法

1.1 足底微振动刺激鞋垫制作

足底微振动刺激鞋垫采用TPU材料,通过3D打印的方式进行制作。鞋垫表面开有微型振动电机的放置槽口以保证微型振动电机的位置可以对准足底刺激部位。足底微振动刺激鞋垫电路流程图如图1所示。

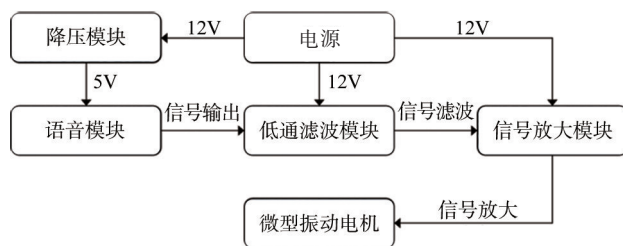


图1 足底微振动刺激鞋垫电路流程图

Figure 1 Circuit flowchart of plantar microvibration stimulation insoles

微型振动电机的控制电路主要包括降压模块、语音模块、低通滤波模块、功率放大模块这4个主要部分,通过12V电池供电。由于语音模块(BY8001-16P,深圳百为电子)工作电压(3.6~5.0V)低于低通滤波模块和信号放大模块的工作电压(12.0V),所以需要设计降压模块将12.0V电压降到3.6~5.0V的工作电压驱动语音模块。在功率放大电路中添加旋钮电位器代替常规电阻达到可手动调节振动强度的功能。语音模块内置TF卡座,可直接将白噪声音频文件通过导入TF卡的方式储存在语音模块中,使用过程中将语音模块设定为循环播放音频模式。白噪声通过语音模块转换为电信号后,通过低通滤波模块对频率进行筛选(120 Hz),随后通过功率放大模块将信号输入给微型振动电机。为使微型振动电机能按照白噪声信号的频率进行振动,采用支持交流电驱动的Z轴线性马达作为振动元件并嵌入到鞋身的上层,该马达可以根据输入电压的变化表现不同振动幅度,便于调控对受试者足底的刺激强度。线性马达分别嵌入于解剖学定义的足底关键区域:第一跖骨(M1)区、第五跖骨(M5)区及跟骨(C)区,这些位置也是足底的承压峰值区^[26],如图2所示。



图2 足底第一跖骨、第五跖骨及跟骨

Figure 2 The first metatarsal, fifth metatarsal, and calcaneus of the sole

足底的峰值区承受较大的地面反作用力,这些区域是足底与地面接触的主要着力点,足底峰值区不仅承受压力大,而且神经末梢和血管也较为密集,这意味着这些区域对刺激的感知更敏感。振动刺激能激活足底的神经末梢和肌肉组织,促进神经传导和肌肉收缩,所以选择足底压力峰值区能改善足底感觉和运动功能,提高平衡能力和稳定性。

为缓解鞋垫在穿戴时连接线对使用者的足部造成的摩擦和不适感,在线缆末端添加柔性印刷线路软排线作为航插线缆与微型振动电机的过渡,并使用电连接器作为线路转接板。柔性印刷线路软排线厚度通常为0.3 mm,是能在一定程度内弯曲的连接线组,能降低鞋内线路对足部造成的影响。微型振动电机嵌入鞋垫覆膜下方,并将出线口设立在足弓侧面,确保线路能顺利从鞋子中伸出不受弯折,最后在上层加装黑色覆膜作为鞋垫顶层。整体设计如图3所示。



图3 足底微振动刺激鞋垫整体设计

Figure 3 Design of plantar microvibration stimulation insoles

1.2 实验方法

本实验分为两个部分,研究足底不同强度的振动刺激对平衡能力的影响以及多感官联合刺激对平衡能力的影响,并通过测力平台(FDM-T, Zebris Medical

GmbH)测得受试者的95%的CoP置信椭圆面积作为平衡能力评估参数。一般来讲,静态站立状态下,CoP的径向移动距离越大,CoP包络面积也会增大,所以CoP包络面积不仅是稳定性的体现,也是姿态控制能力的体现。实验进行前,要求受试者进行3 min环境适应,以达到生理平静状态,所有实验均在安静密闭环境中进行。

1.2.1 足底不同强度的振动刺激对姿势控制能力的影响

该试验纳入6名健康成年受试者,均为男性,年龄(25.17±1.34)岁,身高(174.17±4.22) cm,体质量(71.83±6.82) kg。排除标准包括自述有中风、糖尿病或其他可能影响足底感觉的周围神经病变病史的个体。试验开展前,所有受试者都被告知试验流程和目的,并均已获取受试者书面知情同意书。

试验设立两种不同刺激强度:阈值振动、强振动。试验前将通过旋转设备上的旋钮不断调节振动强度,测量每名受试者的个体化足底感觉阈值,并将受试者能刚好感受到振动的刺激强度定义为阈值振动,将振子允许的最大振动强度定义为强振动。每名受试者进行空白和两种不同刺激强度共3次的单足站立测量。试验过程中,将内置微型振动致动器的定制鞋垫固定于测力平台。要求受试者以优势侧下肢(通过空白条件下3次基线CoP包络面积测量确定,取平均值较小侧为优势肢)单足站立13 s。确保全足与鞋垫充分接触,以保证白噪声振动可有效传导至目标区域,刺激强度根据实时测量的受试者足底振动感觉阈值进行个性化校准。同时,通过测力平台(FDM-T, Zebris Medical GmbH)记录受试者95%的CoP置信椭圆面积,阈值振动组和强振动组之间间隔3 min休息以消除前次刺激的遗留效果。试验流程如图4所示。

1.2.2 多感官联合刺激对平衡能力的影响 该试验纳入5名健康成年受试者,均为女性,年龄(21.80±0.40)岁,身高(170.00±43.16) cm,体质量(57.80±3.12) kg。排除标准包括自述有听力障碍、平衡功能障碍或其他可能影响试验结果的疾病。试验开展前,所有受试者都被告知试验流程和目的,并均已获取受试者书面知情同意书。

试验共设立空白组、声音刺激组、振动刺激组和声音振动混合刺激组共4组试验并依次进行,这种分组设计可以系统地评估不同刺激模式对平衡能力的影响,通过对比空白试验和单一刺激试验可以明确振动和声音刺激的单独效果,通过对比混合刺激试验与单一刺激试验可以探索两种刺激的协同效应。

试验过程中,每名受试者在进行完上一组试验后,休息3 min以消除上一组刺激的遗留效应,并在

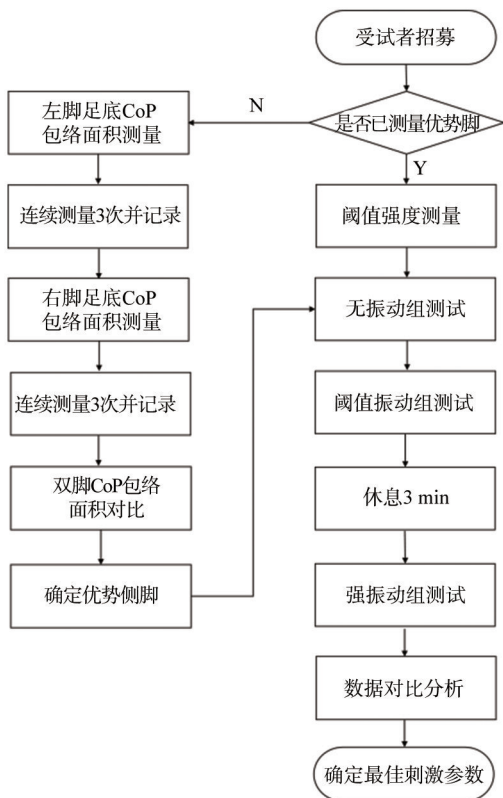


图4 不同强度振动刺激的影响试验流程图
Figure 4 Experimental flowchart of vibration stimulation effects at different intensities

休息 3 min 后再进行 3 min 的刺激, 随后通过测力平台进行 30 s 的双足底压力信息采集, 采集过程中不停止刺激。试验组中, 声音刺激组是通过蓝牙耳机对受试者播放提前制作好的白噪声音频, 白噪声强度定位 75 dB^[25]。振动刺激组试验开始前, 根据试验确认的最佳刺激参数个性化调控每名受试者的足底振动强度, 在该试验组测试完成后, 对受试者进行白噪声声音和足底振动的混合刺激进行声音振动混合刺激组试验。试验每周进行 3 次, 持续 5 周共进行 15 次。试验流程图如图 5 所示。

1.3 统计学分析

所有测得平衡数据使用 SPSS 软件进行统计学分析。通过 Q-Q 图验证压力中心包络面积分布的正态性。采用配对 *t* 检验分析不同强度刺激条件和不同刺激组合下 CoP 包络面积的变化, 显著性阈值设为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 足底不同强度的振动刺激对姿势控制能力的影响

在 3 组试验中, 阈值振动组的 CoP 包络面积最小, 为 $(302.667 \pm 161.317) \text{ mm}^2$, 阈值振动组相较于空白组 $[(504.167 \pm 397.956) \text{ mm}^2]$ 的 CoP 包络面积降低

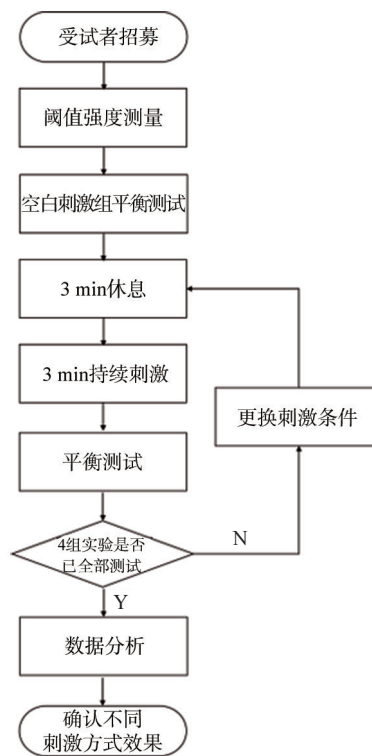


图5 多感官刺激实验流程图
Figure 5 Experimental flowchart of multisensory stimulation

约 201.500 mm^2 , 差异无统计学意义 ($P=0.201$)。强振动组 $[(413.833 \pm 206.209) \text{ mm}^2]$ 相较于空白组降低 90.334 mm^2 , 表明平衡能力出现下降, 差异无统计学意义 ($P=0.530$); 相较于阈值振动组, 包络面积提高了 111.166 mm^2 , 差异无统计学意义 ($P=0.106$)。详见表 1。

表 1 6 名受试者在不同强度刺激条件下的 CoP 包络面积 (mm^2)
Table 1 CoP envelope area in 6 subjects under different intensity stimulation conditions (mm^2)

受试者	空白组	阈值振动组	强振动组
1	218	108	134
2	545	487	700
3	403	443	364
4	286	168	469
5	291	204	255
6	1282	406	561
总体	504.167 ± 397.956	302.667 ± 161.317	413.833 ± 206.209

2.2 多感官联合刺激对平衡能力的影响

基于不同强度的振动刺激对姿势控制能力的影响试验, 将阈值刺激确定为每名受试者的足底刺激强度进行振动刺激。试验过程中, 每名受试者的空白组 CoP 包络面积变化如图 6 所示。

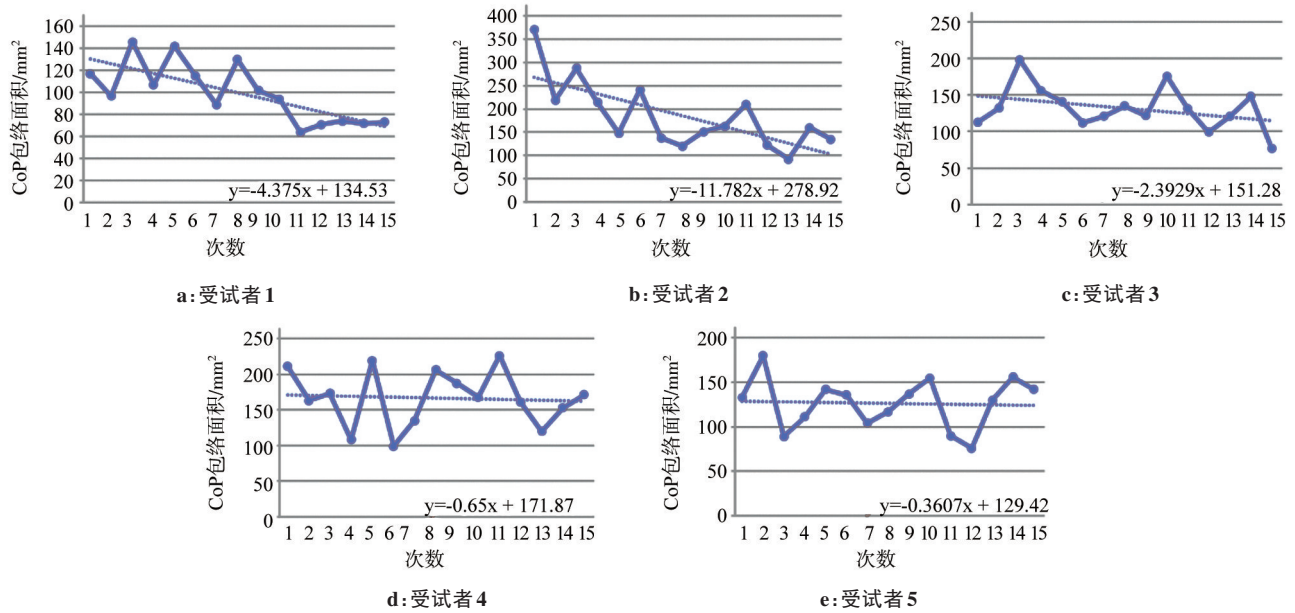


图6 空白组的CoP包络面积变化图

Figure 6 Changes of CoP envelope area in the control group

5名受试者的空白组CoP包络面积均呈现下降趋势,斜率依次为:-4.375 0、-11.782 0、-2.392 9、-0.650 0、-0.3607。每名受试者及总体数据在不同刺激条件下的CoP包络面积及每两组数据之间的显著性差异分析结果(P值)如表2所示。结果显示,声音组与空白组相比降低44.840 mm²,差异具有统计学意义(P=0.001);

振动组与空白组相比降低44.147 mm²,差异具有统计学意义(P=0.001);声音振动刺激组的CoP包络面积最低,与空白组相比降低77.574 mm²,且相比于声音组和振动组分别降低32.734 mm²和33.427 mm²,差异具有统计学意义(P=0.001)。声音组和振动组之间相差0.693 mm²,差异未见统计学意义(P=0.856)。

表2 5名受试者刺激前后CoP包络面积变化

Table 2 Changes in CoP envelope area before and after stimulation in 5 subjects

受试者	刺激方式				P值					
	空白组/mm ²	声音组/mm ²	振动组/mm ²	声音振动/mm ²	空白 vs 声音	空白 vs 振动	空白 vs 声振	声音 vs 振动	声音 vs 声振	振动 vs 声振
1	99.533±26.506	65.800±29.285	63.133±23.739	41.000±16.120	0.001	0.001	0.001	0.729	0.001	0.001
2	184.667±73.471	143.600±77.485	126.667±73.158	89.400±46.908	0.001	0.001	0.001	0.094	0.001	0.001
3	132.133±29.799	83.800±27.014	81.267±20.910	54.400±22.363	0.001	0.001	0.001	0.732	0.001	0.001
4	166.667±39.351	114.000±41.155	126.667±30.900	81.467±24.712	0.001	0.001	0.001	0.217	0.001	0.001
5	126.533±28.543	78.133±21.751	91.067±23.602	55.400±15.647	0.001	0.001	0.001	0.064	0.001	0.001
均值	141.907±51.917	97.067±51.475	97.760±46.195	64.333±32.486	0.001	0.001	0.001	0.856	0.001	0.001

3 讨论

针对阈值刺激,在多感官刺激试验中,在每名受试者15次试验数据的支撑下发现采用阈值振动的振动刺激组与空白刺激组的差异具有统计学意义(P=0.001)。在不同强度的振动刺激试验中,虽然阈值振动条件下的下CoP包络面积虽然最小,低于空白组和强振动组,但差异并不具有统计学意义。总和

两试验结果,推测可能是由于在不同强度的振动刺激试验中试验样本量(n=5)过少导致该部分在统计学上未能形成良好的差异显著性。

针对强振动,受试者在经受强振动刺激后,平衡能力在经过阈值振动组已经提升的基础上出现降低,更严重的受试者2和受试者4在经受强振动后的CoP包络面积还超过空白组的数据,说明足底强振动对于健康

成年人的平衡能力呈干扰效果。另一方面,随着振动强度的提升,受试者的平衡能力出现先下降后上升的波动变化,说明人体足底感受器对不同强度刺激具备非线性系统特征,也验证随机共振系统中适当强度的噪声(随机干扰)反而能增强系统对信号的响应能力这一描述。

在多感官刺激试验中,声音刺激组的CoP包络面积数据相较于空白刺激组,差异有显著性意义($P=0.001$),验证了基于随机共振的白噪声可以通过对前庭觉的刺激提高健康成年人的平衡能力,这与Ross等^[27]的研究结果相符。多感官刺激无论是相较于空白组或者单一刺激都体现出显著性差异($P=0.001$),说明多感官刺激对平衡能力的影响要显著优于单一刺激。在5周的试验中,每名受试者的在经受感官刺激前的CoP包络面积均呈下降趋势,显示出良好的训练效果和持久性,说明健康成年人在长期经受感官刺激后,在脱离刺激的前提下平衡能力在一定时间内依旧提升,但由于试验间隔时间较短,无法判断刺激效果的留存时间。

声音组和振动组两组的CoP包络面积相似,说明单感官刺激对于人体的平衡提升能力相近,并证明健康受试者在间隔6 min的站立测试中,受试者的平衡能力不会因多次站立而变好,进一步验证试验结果的可靠性。

本研究在单感官刺激能提升平衡能力的研究基础上,进一步提供多感官联合刺激可有效提升平衡能力的证据,为存在平衡障碍的人群或运动人群提供一种新型、非侵入性的平衡功能增强方案。结合设备使用过程中发现的问题,未来发展中的核心应在于开发能依据使用者自动调节最佳刺激参数的自适应算法,从而实现个体化精准干预。

4 结论

本试验通过不同刺激条件下的平衡测试,系统地评估不同振动强度对平衡能力的影响以及声音与振动联合刺激对平衡能力的影响。试验结果表明,足底强振动刺激会对人体的平衡能力造成干扰,而足底白噪声阈值振动和前庭觉白噪声刺激都可以对健康受试者的平衡产生增强效果,并且多感官刺激对平衡能力的提升效果要优于单感官刺激。该结论也首次从多感官联合刺激角度证明基于随机共振的白噪声阈值刺激可以提高感觉系统对外界信息的接受能力,长期感官刺激训练可有效提升健康成年人的平衡能力。未来研究可进一步拓展至步态,优化多感官刺激参数组合并评估其提升动态平衡能力的效果。

【参考文献】

[1] Ballardini G, Florio V, Canessa A, et al. Vibrotactile feedback for improving standing balance[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2020, 8: 94.
 [2] Borkowski R, Błażkiewicz M. Postural reactions to external mediolateral perturbations: a review[J]. *Appl Sci*, 2023, 13(3): 1696.
 [3] Mahmud MR, Cordova A, Quarles J. Auditory, vibrotactile, or visual? Investigating the effective feedback modalities to improve standing balance in immersive virtual reality for people with balance impairments due to type 2 diabetes [C]//2023 IEEE International

Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 573-582.
 [4] Bernard JA, Seidler RD. Moving forward: age effects on the cerebellum underlie cognitive and motor declines[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, 42: 193-207.
 [5] Zhou J, Liu B, Xu JF, et al. Home-based strength and balance exercises for fall prevention among older individuals of advanced age: a randomized controlled single-blind study[J]. *Ann Med*, 2025, 57(1): 2459818.
 [6] Luo W, Huang ZR, Li H, et al. Regulation of static and dynamic balance in healthy young adults: interactions between stance width and visual conditions[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2025, 13: 1538286.
 [7] Karaca O, Kılınc M. Sensory training combined with motor training improves trunk proprioception in stroke patients: a single-blinded randomized controlled trial[J]. *Neurol Res*, 2024, 46(6): 553-560.
 [8] Simoneau M, Nooristani M, Blouin JS. Balance control threshold to vestibular stimuli[J]. *J Physiol*, 2025, 603(9): 2783-2799.
 [9] Collins JJ, Imhoff TT, Grigg P. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation[J]. *Phys Rev E*, 1997, 56(1): 923-926.
 [10] Suzuki T, Assoc Computing M. Enhancing the human tactile sensitivity through an individually optimized imperceptible vibration stimulation [C]//Extended Abstracts of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery, 2024: 1-6.
 [11] Thimabut W, Thimabut N, Peng L, et al. Novel tactile stimulation using a vibratory foot orthosis: a preliminary study [C]//46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society(EMBC). Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2024: 1-6.
 [12] Ditzinger T, Stadler M, Strüber D, et al. Noise improves three-dimensional perception: stochastic resonance and other impacts of noise to the perception of autostereograms[J]. *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, 2000, 62(2 Pt B): 2566-2575.
 [13] Mitsutake T, Nakazono H, Shiozaki T, et al. Neural interference effects on lateral vestibulospinal tract excitability by noisy galvanic vestibular stimulation[J]. *Clin Neurophysiol*, 2024, 168: 153-160.
 [14] Tanaka T, Maeda Y, Miura T. Effects of tactile sensory stimulation training of the trunk and sole on standing balance ability in older adults: a randomized controlled trial[J]. *J Funct Morphol Kinesiol*, 2025, 10(1): 96.
 [15] Önal B, Sertel M, Karaca G. Effect of plantar vibration on static and dynamic balance in stroke patients: a randomised controlled study[J]. *Physiotherapy*, 2022, 116: 1-8.
 [16] Hatton AL, Chatfield MD, Cattagni T, et al. The effects of vibrating shoe insoles on standing balance, walking, and ankle-foot muscle activity in adults with diabetic peripheral neuropathy[J]. *Gait Posture*, 2024, 111: 8-13.
 [17] Hennig EM, Sterzing T. Sensitivity mapping of the human foot: thresholds at 30 skin locations[J]. *Foot Ankle Int*, 2009, 30(10): 986-991.
 [18] 李高峰,梅剑峰,张蒙,等.足底振动刺激诱发人体特定方向姿势调整的测试系统研究[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(9): 1110-1116.
 Li GF, Mei JF, Zhang M, et al. Testing system for analyzing directionally-specific postural adjustments induced by plantar vibratory stimulation[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2021, 27(9): 1110-1116.
 [19] Wang YY, Hua ZJ, Hu SN, et al. Comment on Orlando et al. Acute effects of vibrating insoles on dynamic balance and gait quality in individuals with diabetic peripheral neuropathy: a randomized crossover study. *diabetes care* 2024;47:1004-1011[J]. *Diabetes Care*, 2024, 47(10): e80-e81.
 [20] Gerber ED, Giraldo C, Whorley B, et al. Subthreshold white noise vibration alters trembling sway in older adults[J]. *Hum Mov Sci*, 2023, 90: 103119.
 [21] Xie HY, Liang HL, Chien JH. Different types of plantar vibration affect gait characteristics differently while walking on different inclines[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e14619.
 [22] Wuehr M, Eder J, Kellerer S, et al. Mechanisms underlying treatment effects of vestibular noise stimulation on postural instability in patients with bilateral vestibulopathy[J]. *J Neurol*, 2024, 271(3): 1408-1415.
 [23] Piccolo C, Bakkum A, Marigold DS. Subthreshold stochastic vestibular stimulation affects balance-challenged standing and walking[J]. *PLoS One*, 2020, 15(4): e0231334.
 [24] Assländer L, Giboin LS, Gruber M, et al. No evidence for stochastic resonance effects on standing balance when applying noisy galvanic vestibular stimulation in young healthy adults[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 12327.
 [25] Zhou ZY, Wu C, Hu Z, et al. Effects of white Gaussian noise on dynamic balance in healthy young adults[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 5455.
 [26] Jiang YZ, Wang DJ, Ying JM, et al. Design and preliminary validation of individual customized insole for adults with flexible flatfeet based on the plantar pressure redistribution[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(5): 1780.
 [27] Ross JM, Will OJ, McGann Z, et al. Auditory white noise reduces age-related fluctuations in balance[J]. *Neurosci Lett*, 2016, 630: 216-221.

(编辑:谭斯允)