DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202625352

· 综述 ·

前庭物理治疗的研究与应用进展

卢思彤[1],李煦昀[2],阳歆妮[1],李丹[1],莫泳棋[1],黎燕容[1]

(1. 广西中医药大学 研究生院,广西 南宁 530000; 2. 广西中医药大学联合培养基地 桂林市中医医院 神经内科,广西 桂林 541000)

摘 要:前庭物理治疗是一种基于前庭代偿与中枢神经可塑性原理的康复方法,是目前临床干预前庭功能障碍的重要非药物治疗手段。随着生活节奏的加快,人们的生活与工作压力增加,出现眩晕等不适症状的患者逐渐增多。临床上发现,这些患者的眩晕症状大多由前庭系统功能异常导致,因为前庭系统在维持人体平衡和空间定向中起着关键作用,一旦其功能出现异常,便会引起眩晕等症状。近年来,随着对前庭系统机制的深入研究,前庭物理治疗在临床康复、航空航天、体育训练等领域得到广泛应用。本文详细阐述了与眩晕相关的前庭系统的生理功能及病理机制,综述了前庭物理治疗的研究进展及其在不同领域的应用,旨在为相关研究和临床实践提供参考。

关 键 词:前庭物理治疗;前庭系统;前庭代偿;半规管

中图分类号:R764.3;R493

Research and application progress of vestibular physical therapy

LU Sitong[1], LI Xuyun[2], YANG Xinni[1], LI Dan[1], MO Yongqi[1], LI Yanrong[1]

(1. *Graduate School of Guangxi University of Chinese Medicine*, *Nanning* 530000, *China*; 2. *Department of Neurology*, *Guangxi University of Chinese Medicine Joint Training Base Guilin Municipal Hospital of Traditional Chinese Medicine*, *Guilin* 541000, *China*)

Abstract: Vestibular physical therapy is a rehabilitation approach based on the principles of vestibular compensation and central nervous system plasticity. It is currently an important non-pharmacological treatment approach for clinical intervention of vestibular dysfunction. With the acceleration of life pace and the increasing pressure from daily life and work, the number of patients with vertigo and other uncomfortable symptoms is gradually increasing. Clinical observations indicate that that most of the vertigo symptoms of these patients are caused by dysfunction of the vestibular system. The vestibular system plays a pivotal role in maintaining human balance and spatial orientation. And once its function is abnormal, it will cause symptoms such as vertigo. In recent years, with the in-depth understanding of the mechanism of the vestibular system, vestibular physiotherapy has been widely applied in clinical rehabilitation, aerospace, sports training and other fields. This paper elaborates on the physiological functions and pathological mechanisms of the vestibular system associated with vertigo. This review summarizes the research advancements in vestibular physical therapy and its applications in different fields. It aims to provide references for relevant research and clinical practice.

Keywords: Vestibular physical therapy; Vestibular system; Vestibular compensation; Semicircular canals

前庭系统作为人体平衡与空间定向的关键感觉系统,主要由内耳中的 3 个半规管、2 个耳石器以及与之相连的前庭神经、前庭中枢等部分构成,当其中任一环节出现问题,便会导致前庭系统功能障碍。因此,与前庭系统相关的疾病发病率高且病因复杂,采用前庭物理治疗对前庭疾病的康复不可或缺。前庭物理治疗是一种通过特定刺激激活前庭系统(前庭-眼反射和前庭-脊髓反射),使机体产生耐受并促进神经可塑性,从而改善前庭功能的康复方法。近年来,随着神经科学和康复医学的快速发展,以

基金项目:桂林市科学研究与技术计划项目(20220139-11-3);广西中医药管理局科研课题(GXZYC20230581);广西中医脑病临床医学研究中心项目(桂科 AD20238028)。

第一作者简介:卢思彤,女,在读硕士研究生。

通信作者简介:李煦昀,男,在读博士研究生,副主任医师。

及虚拟现实技术和机器人辅助训练等新方法不断涌现,前庭物理疗法在眩晕疾病、平衡功能障碍和运动康复等领域得到广泛应用,未来将朝着个性化、智能化方向发展,为前庭功能康复提供更有效的干预手段。

1 前庭系统的生理功能与病理改变机制

前庭系统是人体维持平衡和空间定位的重要功能系统,其主要功能包括感知空间位置、重力加速度和角加速度刺激,并通过反射性调整姿势来维持平衡。前庭系统主要由内耳中的 3 个半规管、椭圆囊、球囊和脑干中的前庭神经核等结构组成,其中半规管发挥着关键作用。半规管共有 3 个,分别为相互垂直的后、上、水平半规管,是感受人体空间位置转动的器官,也是内耳中负责感知头部运动的结构。当人体进行头部运动时可刺激半规管,从而产生前庭-眼反射和前庭-脊髓反射。头部运动时,前庭系统将机械刺激转化为电信号,再通过大脑的整合与信息传送,最后驱动眼球、颈部、躯干及四肢肌肉协同运动,确保人体在运动过程中的稳定与协调[1-3]。所以当前庭功能受损时,一定程度上影响着前庭神经可塑性与前庭代偿。前庭代偿是指当前庭功能出现障碍或损伤后,机体通过其他途径或方式进行补偿或修复,以维持正常的平衡功能和姿势控制的过程。前庭系统中的内侧前庭核起到接收前庭神经的传入和介导前庭代偿的关键作用。研究发现,实则是内侧前庭核中的突触后 H1 受体介导前庭代偿,对单侧前庭病变后静态和动态症状的恢复起到重要作用[4],为神经元的可塑性提供了新见解。还有研究发现,在大鼠单侧迷路切除术后,在静态和动态前庭代偿的过程中,同侧病变的内侧前庭核神经元的静息活性可逐渐恢复,从而恢复大鼠动态前庭眼反射和前庭脊髓反射,说明前庭系统内的神经元具有可塑性,可通过自身神经重塑使受损前庭器官进行前庭代偿[5]。以上通过对前庭系统生理功能与病理机制的了解,为前庭系统的物理康复治疗奠定了一定的基础。

2 前庭物理治疗

前庭物理治疗是通过特定的运动方式重复刺激前庭结构,不断激活前庭系统,使机体产生耐受的一种习服训练。它能够增强前庭神经元的可塑性,有助于补偿受损的前庭功能,提高平衡控制和空间定向能力,从而减轻因前庭功能障碍等导致的不适症状。这种传统的物理疗法最早于 20 世纪 40 年代由 Cawthorne 和 Cooksey 提出[6-7],随后在 20 世纪 50 年代至 21 世纪初,又提出了多种半规管传统复位手法[8]。近年来,随着新兴科技的发展,科研人员又将传统习服训练融入现代先进技术。所以,以下将前庭物理治疗方法简单概括为传统物理疗法,如 Cawthorne-Cooksey 练习、传统复位手法等,以及现代物理疗法,如基础训练、斯睿美眩晕诊疗系统(以下简称 SRM-IV)辅助训练、虚拟现实技术辅助训练、视动刺激和振动触觉反馈、前庭电刺激等。

2.1 Cawthorne-Cooksey 练习和基础训练

传统的 Cawthorne-Cooksey 练习仅在一些简单的坐姿下头部-眼与头部-躯干的协调运动及站立练习来达到锻炼前庭功能的目的[9];新兴的基础训练,如眼动、平衡-步态训练等,则是在 Cawthorne-Cooksey 练习的基础上创新而成,训练方式更为动态,以此增强患者动态平衡能力,减少跌倒风险。通过全面且针对性的基础训练可以有效增强患者注视稳定性、机体协调性,能够整合视觉、本体感觉和前庭输入,使大脑对神经元网络的重塑得以更好地协调,从而更大程度地增强前庭神经元的可塑性和促进前庭代偿[10]。

2.2 传统复位手法

传统复位手法主要用于治疗良性阵发性位置性眩晕(俗称耳石症)。当椭圆囊中耳石脱落后进入半规管,耳石会因头部运动在管内移动,刺激感受器及内淋巴液,破坏内淋巴液正常流动状态,从而引发眩晕、呕吐、眼震等症状[11]。复位手法通过特定的头位变换,利用重力作用,使脱落的耳石在半规管内随着内淋巴液流动而移动,最终回到椭圆囊等正确位置,从而恢复内耳半规管功能。当出现水平半规管耳石症时,一般采用 Barbecue 法和 Gufoni 法;后半规管耳石症一般采用 Epley 法和 Semont 法;前半规管耳石症一般采用 Yacovino 法等[8, 12-13]。传统复位手法作为治疗耳石症的基石,操作简便、安全性和性价比较高,但是过于依赖操作者经验及技术,多发性耳石或症状较重的患者却难以耐受,难以达到理想的复位效果。所以在传统复位手法的基础上,近年来还提出了通过新的训练设备与技术进行前庭刺激训练的方法。

2.3 SRM-IV

SRM-IV是一种多技术整合的综合性诊疗设备。它是通过刺激患者半规管而产生兴奋性前庭刺激，以此诱发眼震，与此同时，医生通过观察其眼震的方向及时长来诊断疾病，再根据诊断结果制定方案，通过高强度且反复的前庭功能锻炼，使机体对运动刺激的敏感性降低，达到习服训练的目的[14]。治疗后还可以用虚拟现实技术辅助平衡康复训练。SRM-IV可通过调节具体参数达到治疗目的，能够精准定位耳石的位置，并通过特定的旋转程序使耳石复位。与传统复位手法相比，其具有一定的客观性，还可减少因操作者手法不当或患者体位调整困难产生的不利因素，提高疗效[14]。临床上，SRM-IV可用于耳石症、前庭神经炎、晕动病、梅尼埃病、突发性聋伴眩晕等疾病的治疗[14-18]，但有部分患者在使用SRM-IV后，仍会出现眩晕、恶心、步态不稳等残余症状[19]。有研究发现，当SRM-IV联合天麻素注射液、倍他司汀或醋酸泼尼松等药物治疗时，可以更有效地减轻残余症状，并且减少复发，增强患者的平衡功能[20-22]。但由于设备成本较高，目前的研究样本量相对较小，研究时间较短，对于该设备的长期疗效和安全性还需要进一步的观察和研究。如果能降低设备成本、扩大研究样本量等，SRM-IV将有望在眩晕疾病的诊疗中发挥更大的作用。临床医生可以根据患者的具体情况，合理选择治疗方法，充分发挥该系统的优势，提高眩晕疾病的治疗水平。

2.4 虚拟现实技术

虚拟现实技术是一种通过多学科融合来创建高度逼真的三维虚拟环境的技术。患者佩戴好相关设备后，在虚拟环境中进行一系列动作，从而有效地刺激前庭内的感受器，提升对复杂环境的适应能力[23]。此外有研究表明，虚拟现实还能通过诱导神经可塑性变化，减少对代偿机制的依赖[24]。虚拟现实技术还具有两大优势：一是可通过先进的传感器技术和数据分析算法，实时监测患者的运动状态、生理指标和训练反应；二是可根据患者的个体差异和治疗进展，为其量身定制个性化的训练方案，更好地满足患者的特殊需求，提高训练的针对性和有效性，从而进一步改善平衡障碍、眩晕等症状，提高生活质量[25-27]。目前，虚拟现实已广泛应用于前庭康复训练中，不仅可以应用于前庭功能障碍患者，而且对健康老年人的前庭功能下降导致的平衡性和功能性症状也可以起到改善作用，另外还可以应用于突发性聋伴眩晕、中风后的运动康复、不完全性脊髓损伤和创伤性脑损伤后的平衡康复训练等[28-31]。

2.5 视动刺激和振动触觉反馈

视动刺激是通过动态视觉刺激诱发眼球震颤，可激活大脑中的多个区域，从而改善前庭功能障碍引起的平衡失调、空间定向障碍及单侧忽略等症状。振动触觉反馈是一种通过振动刺激皮肤来增强本体感觉与前庭整合的技术，使患者感知身体姿态和运动状态，从而改善平衡和协调能力[32]。二者均是有前景的新干预技术，可单独使用，也可以作为虚拟现实技术的补充手段。其中，视动刺激是虚拟现实中的核心组成部分，常在虚拟现实技术实验中被设计为提供视觉与身体运动的同步反馈，以研究身体感知控制[33-34]。振动触觉反馈虽然不是虚拟现实中的核心成分，但却是虚拟现实系统中广泛采用的关键增强技术，可以为单纯的视觉虚拟现实提供更为真实、丰富的沉浸体验[35]。实际上，虚拟现实、视动刺激和振动触觉反馈都属于前庭物理治疗的新技术手段，三者结合运用可增强疗效。

2.6 前庭电刺激

前庭电刺激（galvanic vestibular stimulation，GVS）是一种通过无创性的电流直接刺激中枢和周围前庭系统的方法。它是将电极放置在双侧耳后乳突上并施加低电流，电流经颅骨传至内耳以刺激半规管，影响毛细胞离子通道，改变膜电位，引发神经冲动，经神经通路调节眼球运动和身体肌肉张力，实现对姿势与平衡控制、眼动反应、空间定向等生理功能的调控。电极的放置位置、数量、大小以及人体颅骨的不对称性均会影响电刺激参数（波形、频率、强度等），从而影响半规管刺激的效果[36-37]。虽然目前没有一个完全明确的GVS参数使用指南，只能根据患者病情、个人耐受程度等个性化地设置参数[38]，但有研究建议，健康人最佳电流为（281±40）μA，双侧前庭病变患者电流需（456±82）μA，单次使用时长为15~20 min；长效方案为单次使用时长30 min，刺激后疗效可持续数小时，可通过重复刺激（每4小时1次）延长效应[39-40]。有研究表明，GVS可以增强前庭疾病患者的空间认知，还可以提高健康人的学习和空间记忆能力，对没有前庭疾病的人也有潜在的有益影响，因为GVS可以唤起前庭感觉反应，尤其是与虚拟现实技术结合使用时，可以增强空间认知[41-42]。在临床上，它常用于治疗梅尼埃病、单侧外周前庭疾病、帕金森病、晕动病、双侧前庭疾病、小脑疾病、中风等导致的老年人的眩晕、姿势控制受

限、共济失调等症状[41, 43-50]。

3 前庭物理治疗的临床应用

前庭物理治疗是一种通过特定的运动或技术设备来刺激前庭系统,从而改善平衡功能的康复训练方法。通过重复刺激促进小脑-前庭通路的突触重塑,改善时空信号处理能力,增强前庭功能适应与代偿[51];此外,高强度半规管刺激可加速内淋巴循环,减少病理性淤积。通过半规管刺激训练可治疗前庭系统相关疾病,如周围性前庭病变(耳石症、前庭神经炎、梅尼埃病、晕动病等)和中枢性病变(前庭性偏头痛、创伤性脑损伤/脑震荡、持续性姿势-知觉性头晕、多发性硬化、帕金森病等)[52]。

3.1 耳石症

耳石症是由于耳石脱落进入半规管,刺激壶腹嵴上的毛细胞,导致与体位变化有关的眩晕发作,甚至恶心、呕吐的疾病。传统复位疗法是治疗耳石症的基石,但部分患者接受复位治疗后,仍会复发且留有残余症状。在传统手法基础上可以采用 SRM-IV 设置参数模拟耳石在半规管内的移动路径,引导脱落后移位的耳石回到椭圆囊;采用虚拟现实技术增强前庭功能代偿,改善眩晕症状;采用 GVS 可经皮对前庭传入神经进行电刺激[53-54],可加速半规管内淋巴液的动态平衡重建,促进前庭功能恢复,显著缓解头晕、平衡障碍等残留症状,提高患者生活质量[55]。

3.2 前庭神经炎

前庭神经炎是一种由病毒感染引起的急性周围性前庭疾病,多为单侧发病,会导致严重眩晕和平衡障碍,或可伴有自发眼震,且发病前大多有感冒病史。发病时可以使用 SRM-IV,通过有针对性的头部运动、视觉-前庭协调训练等,刺激前庭感受器,激活前庭中枢的可塑性;采用虚拟现实技术增强前庭代偿,帮助患者尽快度过急性期,进入康复阶段[16, 56];采用 GVS 对前庭末梢进行电刺激,促进功能恢复。

3.3 梅尼埃病

梅尼埃病的病理特征表现为内淋巴积水,主要影响耳蜗和前庭,与半规管的空间位置变化也有一定关系[18]。常见临床表现有耳胀、听力下降、耳鸣和反复眩晕等,可伴有恶心、呕吐等自主神经症状。运用 SRM-IV 对半规管进行持续、规律的刺激,能够改善梅尼埃病患者的眩晕等症状,但没有相关资料明确表明 SRM-IV 能够减轻内淋巴积水等。有研究表明,采用虚拟现实技术进行康复也可改善眩晕症状,并且可在短期内改善患者的生活质量[57]。但是这两项技术仅能缓解症状,所以目前临床上大多仍然采用药物及手术治疗梅尼埃病,若能加强 SRM-IV 及虚拟现实技术的研究及临床运用,再结合药物治疗,或许能让更多患者在疾病早期缓解症状,减轻痛苦。

3.4 晕动病

晕动病(俗称晕车、晕船、晕机等)是指机体在乘坐交通工具时,身体运动刺激内耳半规管,产生的前庭信息与视觉、本体感觉等信息冲突,导致大脑无法处理而引发眩晕、恶心,甚至乏力、出冷汗等症状。在日常生活中可以采用 SRM-IV 和虚拟现实技术有规律地刺激前庭感受器,逐步提高前庭系统对各种运动刺激的耐受性,减轻不适症状;发病时采用 GVS 调节前庭系统的神经电活动,干扰晕动病发生时异常的前庭信号传导,使大脑接收到的前庭信息更加稳定和协调,从而减轻晕动病引起的头晕、恶心等不适症状[58]。

3.5 前庭性偏头痛

前庭性偏头痛是一种兼具偏头痛症状和前庭功能障碍的疾病,主要表现为眩晕、恶心、呕吐等前庭症状及头痛,还可能伴有畏光、畏声等症状。通过 SRM-IV 对半规管进行角加速度刺激,同时也对椭圆囊和球囊产生刺激,有助于恢复前庭系统的功能,从而改善眩晕症状;采用虚拟现实技术制订有针对性的个体化训练方案,通过视觉稳定性训练促进前庭-眼反射功能的恢复,从而减轻患者的前庭症状;采用 GVS 通过物理刺激增强前庭功能或促进神经适应性,从而改善前庭系统的功能[59-60]。

3.6 创伤性脑损伤/脑震荡

创伤性脑损伤/脑震荡是指头部受到外力打击后出现脑功能障碍和前庭症状,可表现为意识丧失、运动受限、逆行性遗忘、头痛、头晕、恶心、呕吐等症状。采用 SRM-IV 进行半规管刺激训练,利用旋转、加减速等动作反复刺激前庭系统,使患者对刺激的敏感性降低、耐受性增强,从而加速适应和代偿;虚拟现实技术则通过眼震稳定训练和平衡训练,帮助患者重新校准前庭系统,促进神经可塑性,解决头晕和平衡障碍等问题;GVS 则通过电刺激前庭神经,促进神经可塑性,修复神经功能。这些方法共同作用,有助于改善脑震荡后的前庭功能障碍,提高患者的平衡能力和生活质量[61]。

3.7 持续性姿势-知觉性头晕

持续性姿势-知觉性头晕是指持续3个月及以上的头晕、步态不稳、非旋转性眩晕的慢性前庭功能障碍性疾病,症状在直立位、复杂视觉刺激或头部运动时会加重。通过前庭康复训练,如SRM-IV、虚拟现实技术辅助训练,可改善前庭代偿功能、减少焦虑和增强适应性;GVS可以通过刺激前庭系统改善自我运动感知、垂直度感知异常和姿势不平衡,从而有效缓解头晕等症状[61-62]。

3.8 多发性硬化

多发性硬化是一种中枢神经系统免疫介导的炎性脱髓鞘疾病,可表现为肢体无力、步态不稳、头晕、认知障碍等症状。相比常规疗法,加入虚拟现实技术干预后,对患者进行认知训练和运动康复,在改善多发性硬化患者平衡和姿势控制方面更加有效,此外还可以减轻患者的疲劳,提高患者的生活质量[63-64];GVS可通过调节大脑皮层的电活动,影响神经可塑性和中枢神经系统的功能,从而改善患者的运动功能、认知功能和情绪状态[65]。

3.9 帕金森病

帕金森病患者常伴有平衡障碍等症状,这与前庭功能异常有关。通过前庭刺激训练增强神经系统的可塑性,可以帮助帕金森病患者重新建立更有效的运动控制模式,改善运动迟缓、平衡障碍等症状,同时还能在一定程度上缓解患者的认知功能障碍。GVS可以直接调节与运动控制相关的神经环路的功能,改善帕金森病患者基底节-丘脑-皮质通路的异常活动,增强运动的启动和执行能力;除此之外,GVS能激活前庭中枢与其他脑区的神经连接,促进神经递质(如多巴胺等)的释放和调节,从而在一定程度上缓解帕金森病的症状,提高患者的运动功能和生活质量;个性化的GVS还能够改善帕金森病患者的视觉运动能力[44, 66-67]。

3.10 其他

前庭物理治疗是通过重复刺激前庭系统,增强前庭功能的适应与代偿,从而达到改善症状的目的。除上述疾病外,还可应用于老年性前庭疾病、突发性聋伴眩晕、中风后康复、飞行员训练等[15, 51, 68-69]。

4 小结

前庭物理治疗作为一种基于前庭生理机制的康复治疗方法,在耳石症、梅尼埃病、前庭神经炎等多种前庭系统疾病的治疗与康复中展现出显著效果。通过多样化的训练方法以及新技术(虚拟现实技术、视动刺激、振动触觉反馈和GVS)和设备(SRM-IV)等,再联合相关药物治疗,能够有效改善患者的前庭功能,缓解不适症状,提高生活质量。然而,目前前庭物理治疗在训练方案的标准化、个性化定制以及长期效果的维持等方面仍有待进一步研究和完善。未来,随着相关技术的不断发展和临床研究的深入开展,前庭物理治疗有望在临床应用中发挥更大的作用。

作者贡献声明:卢思彤负责论文初稿撰写、文献检索;阳歆妮、李丹、莫泳棋和黎燕容负责文献检索;李煦昀负责课题整体指导、稿件修改及学术内容审核。

利益冲突声明:所有作者均声明无任何利益冲突。

参考文献:

[1] Zhang S L, Tian E, Xu W C, et al. Light cupula: to be or not to be? [J]. Curr Med Sci, 2020, 40(3): 455-462.

[2] Robinson D A. Basic framework of the vestibulo-ocular reflex[J]. Prog Brain Res, 2022, 267(1): 131-153.

[3] Curthoys I S. Concepts and physiological aspects of the otolith organ in relation to electrical stimulation[J]. Audiol Neurootol, 2020, 25(1/2): 25-34.

[4] Chen Z P, Zhang X Y, Peng S Y, et al. Histamine H1 receptor contributes to vestibular compensation[J]. J Neurosci, 2019, 39(3): 420-433.

[5] Takeda N, Matsuda K, Fukuda J, et al. Vestibular compensation: neural mechanisms and clinical implications for the treatment of vertigo[J]. Auris Nasus Larynx, 2024, 51(2): 328-336.

[6] Cawthorne T. The physiological basis for head exercises[J]. J Chart Soc Physiother, 1944, 30: 106-107.

[7] Cooksey F S. Rehabilitation in vestibular injuries[J]. Proc R Soc Med, 1946, 39(5): 273-278.

[8] Bhattacharyya N, Gubbels S P, Schwartz S R, et al. Clinical practice guideline: benign paroxysmal positional vertigo (update)[J]. Otolaryngol Head Neck Surg, 2017, 156(3_suppl): S1-S47.

[9] Seyedahmadi M, Taherzadeh J, Akbari H. The effect of 12 weeks of Cawthorne-Cooksey exercises on balance and quality of life in patients with Parkinson's disease[J]. Med J Islam Repub Iran, 2023, 37: 125.

[10] Nairn B, Koohi N, Kaski D, et al. Impact of vestibular rehabilitation and dual-task training on balance and gait in survivors of stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. J Am Heart Assoc, 2025, 14(11): e040663.

[11] Na S, Jeon E J, Kim M B, et al. Clinical features of secondary BPPV: a nation-wide multicenter study[J]. J Vestib Res, 2025, 35(4): 193-204.

[12] 严森, 吴文, 高培. 良性阵发性位置性眩晕患者最佳复位时机选择及急性期复位方案探讨[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2024, 30(6): 40-46.
[13] 赵颖, 李伟, 王利军, 等. 180°翻滚法与 Barbecue 法治疗水平半规管良性阵发性位置性眩晕疗效比较[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2023, 29(4): 40-44.
[14] 王志平, 张义, 叶美晶, 等. SRM-IV 前庭功能诊疗系统治疗 BPPV 患者的临床研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2019, 38(9): 4324-4328.
[15] 赵颖, 孙怡君. 半规管冲突刺激训练在突发性耳聋伴眩晕治疗中的价值[J]. 河北医科大学学报, 2024, 45(7): 750-755.
[16] 赵颖, 王利军, 李伟, 等. SRM-Ⅳ眩晕诊疗系统半规管高强刺激训练在前庭神经炎康复治疗中的价值[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2022, 36(12): 925-929.
[17] 宋宁, 邢玥, 李康之, 等. 运动不耐受诊断标准: Bárány 协会分类委员会共识文件[J]. 神经损伤与功能重建, 2022, 17(12): 687-695.
[18] Huang Y, Liu K, Tang R W, et al. Spatial position changes in the semicircular canals may be the anatomical basis of Meniere's disease: a preliminary study based on ultra-high-resolution computed tomography (CT) and intelligent segmentation[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(8): 6060-6071.
[19] 杨秋云, 蒙楠, 韦福依. SRM-IV 诊疗系统在上半规管良性阵发性位置性眩晕诊治中的应用价值[J]. 河北医学, 2021, 27(7): 1178-1182.
[20] 李斌, 纪茹英, 陆艳卉, 等. 药物治疗联合前庭功能训练对前庭神经炎患者平衡功能、炎症因子及氧化应激水平的影响[J]. 临床和实验医学杂志, 2024, 23(12): 1245-1249.
[21] 赵福平. SRM-Ⅳ前庭功能诊疗系统联合倍他司汀治疗良性阵发性位置性眩晕的效果及对血清学指标水平的影响[J]. 反射疗法与康复医学, 2024, 5(6): 165-168.
[22] 赵颖, 王利军, 李伟, 等. SRM-IV 眩晕诊疗系统联合倍他司汀治疗半规管耳石症致前庭周围性眩晕的效果分析[J]. 河北医科大学学报, 2022, 43(9): 1062-1067.
[23] Lubetzky A V, Kelly J, Wang Z, et al. Contextual sensory integration training via head mounted display for individuals with vestibular disorders: a feasibility study[J]. Disabil Rehabil Assist Technol, 2022, 17(1): 74-84.
[24] Atilla M H, Kesici G G. Dynamic visual acuity test findings of migraine patients: observational case-control study[J]. Am J Otolaryngol, 2022, 43(5): 103559.
[25] Fidan O, Kiloatar H, Colak E, et al. Effects of group-based virtual reality training on activities of daily living and functional outcomes in older adults: a randomised control trial[J]. Disabil Rehabil Assist Technol, 2025, 20(4): 1044-1055.
[26] Liu M, Zhou K X, Chen Y, et al. Is virtual reality training more effective than traditional physical training on balance and functional mobility in healthy older adults? A systematic review and meta-analysis[J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16: 843481.
[27] Choi S Y, Choi J H, Oh E H, et al. Effect of vestibular exercise and optokinetic stimulation using virtual reality in persistent postural-perceptual dizziness[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 14437.
[28] Alashram A R, Padua E, Annino G. Virtual reality for balance and mobility rehabilitation following traumatic brain injury: a systematic review of randomized controlled trials[J]. J Clin Neurosci, 2022, 105: 115-121.
[29] Alashram A R, Padua E, Hammash A K, et al. Effectiveness of virtual reality on balance ability in individuals with incomplete spinal cord injury: a systematic review[J]. J Clin Neurosci, 2020, 72: 322-327.
[30] Cha K, Wang J Y, Li Y, et al. A novel upper-limb tracking system in a virtual environment for stroke rehabilitation[J]. J Neuroeng Rehabil, 2021, 18(1): 166.
[31] 严森, 张红茹, 高培, 等. 全聋型突发性聋伴眩晕患者虚拟现实前庭康复治疗前后前庭功能变化及其疗效的影响因素分析[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2025, 31(2): 37-44.
[32] Raveh E, Portnoy S, Friedman J. Adding vibrotactile feedback to a myoelectric-controlled hand improves performance when online visual feedback is disturbed[J]. Hum Mov Sci, 2018, 58: 32-40.
[33] Penaud S, Yeh D, Gaston-Bellegarde A, et al. The role of bodily self-consciousness in episodic memory of naturalistic events: an immersive virtual reality study[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 17013.
[34] Reynders M, Bos J, Mert A, et al. Feasibility of virtual reality to induce and measure optokinetic after-nystagmus (OKAN): a pilot study[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 13471.
[35] Mielke T, Heinrich F, Hansen C. SensARy substitution: augmented reality techniques to enhance force perception in touchless robot control[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2025, 31(5): 3235-3244.
[36] Truong D Q, Thomas C, Ira S, et al. Unpacking galvanic vestibular stimulation using simulations and relating current flow to reported motions: comparison across common and specialized electrode placements[J]. PLoS One, 2024, 19(8): e0309007.
[37] Truong D Q, Guillen A, Nooristani M, et al. Impact of galvanic vestibular stimulation electrode current density on brain current flow patterns: does electrode size matter? [J]. PLoS One, 2023, 18(2): e0273883.
[38] Valter Y, Vataksi L, Allred A R, et al. A review of parameter settings for galvanic vestibular stimulation in clinical applications[J]. Front Hum Neurosci, 2025, 19: 1518727.
[39] Iwasaki S, Yamamoto Y, Togo F, et al. Noisy vestibular stimulation improves body balance in bilateral vestibulopathy[J]. Neurology, 2014, 82(11): 969-975.
[40] Fujimoto C, Yamamoto Y, Kamogashira T, et al. Noisy galvanic vestibular stimulation induces a sustained improvement in body balance in elderly adults[J]. Sci Rep, 2016, 6: 37575.
[41] Nooristani M, Bigras C, Lafontaine L, et al. Vestibular function modulates the impact of nGVS on postural control in older adults[J]. J Neurophysiol, 2021, 125(2): 489-495.
[42] Bhardwaj P, Sra M. Effects of noisy galvanic vestibular stimulation on spatial memory in virtual reality[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 21542.
[43] Ceylan D Ş, Ataş A, Kaya M. The effect of galvanic vestibular

stimulation in the rehabilitation of patients with vestibular disorders [J]. ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec, 2021, 83(1): 25-34.
[44] Kataoka H, Okada Y, Kiriyama T, et al. Effect of galvanic vestibular stimulation on axial symptoms in Parkinson's disease[J]. J Cent Nerv Syst Dis, 2022, 14: 1-5.
[45] Weech S, Wall T, Barnett-Cowan M. Reduction of cybersickness during and immediately following noisy galvanic vestibular stimulation[J]. Exp Brain Res, 2020, 238(2): 427-437.
[46] 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.
[47] Tomioka Y, Tohyama T, Honaga K, et al. Effects of galvanic vestibular stimulation on subjective visual vertical and sitting balance in patients with stroke[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2022, 31(5): 106430.
[48] Cheng Y, Zhang Y Z, Chen Z C, et al. Effectiveness of galvanic vestibular evoked myogenic potential for evaluation of Meniere's disease[J]. Braz J Otorhinolaryngol, 2022, 88(S3): S66-S72.
[49] Nguyen T T, Lee S B, Kang J J, et al. Optimal design of galvanic vestibular stimulation for patients with vestibulopathy and cerebellar disorders[J]. Brain Sci, 2023, 13(9): 1333.
[50] Vila-Pueyo M, Goadsby P J, Johnson K W, et al. Galcanezumab reduces trigeminal nociception and is effective in preclinical models of migraine and trigeminal autonomic cephalalgias[J]. Headache, 2025, 65(10): 1693-1703.
[51] Meng L J, Liang Q, Yuan J R, et al. Vestibular rehabilitation therapy on balance and gait in patients after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Med, 2023, 21(1): 322.
[52] Pokhrel P K, Hall R, Pendergrass M, et al. Vestibular disorders [J]. Prim Care, 2025, 52(1): 15-25.
[53] Holstein G R, Friedrich V L Jr, Martinelli G P, et al. Fos expression in neurons of the rat vestibulo-autonomic pathway activated by sinusoidal galvanic vestibular stimulation[J]. Front Neurol, 2012, 3: 4.
[54] Cornforth E, Tiwari D, Jacobson Kimberley T. Transcranial magnetic stimulation use with chronic vestibular disorders: a scoping review[J]. J Vestib Res, 2025, 35(4): 155-171.
[55] Cole S R, Honaker J A. Benign paroxysmal positional vertigo: effective diagnosis and treatment[J]. Cleve Clin J Med, 2022, 89(11): 653-662.
[56] Strupp M, Bisdorff A, Furman J, et al. Acute unilateral vestibulopathy/vestibular neuritis: diagnostic criteria[J]. J Vestib Res, 2022, 32(5): 389-406.
[57] Rezaeian A, Abtahi H, Moradi M, et al. The effect of vestibular rehabilitation in Meniere's disease: a systematic review and meta-analysis of clinical trials[J]. Eur Arch Otorhinolaryngol, 2023, 280(9): 3967-3975.
[58] Cossio S, Chiappinotto S, Dentice S, et al. Cybersickness and discomfort from head-mounted displays delivering fully immersive virtual reality: a systematic review[J]. Nurse Educ Pract, 2025, 85: 104376.
[59] Balci B, Akdal G. Outcome of vestibular rehabilitation in vestibular migraine[J]. J Neurol, 2022, 269(12): 6246-6253.
[60] Hac N E F, Gold D R. Advances in diagnosis and treatment of vestibular migraine and the vestibular disorders it mimics[J]. Neurotherapeutics, 2024, 21(4): e00381.
[61] 中国老年医学学会眩晕/前庭医学分会, 国家卫生健康委员会能力建设和继续教育中心耳鼻喉科专家委员会. 前庭疾病前庭康复专家共识[J]. 中华医学杂志, 2024, 104(14): 1097-1107.
[62] Storm R, Wrobel V, Frings A, et al. Functional brain activity in persistent postural-perceptual dizziness (PPPD) during galvanic vestibular stimulation reveals sensitization in the multisensory vestibular cortical network[J]. Sci Rep, 2025, 15(1): 27355.
[63] Cortés-Pérez I, Osuna-Pérez M C, Montoro-Cárdenas D, et al. Virtual reality-based therapy improves balance and reduces fear of falling in patients with multiple sclerosis. A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. J Neuroeng Rehabil, 2023, 20(1): 42.
[64] Amatya B, Khan F, Galea M. Effectiveness of rehabilitation interventions for people with multiple sclerosis—a Cochrane review summary with commentary[J]. NeuroRehabilitation, 2019, 45(3): 429-431.
[65] Sarasso E, Filippi M, Agosta F. Clinical and MRI features of gait and balance disorders in neurodegenerative diseases[J]. J Neurol, 2023, 270(3): 1798-1807.
[66] Yu J R T, Kundrick A, Panganiban E C, et al. Therapeutic innovations for the symptomatic treatment of Parkinson's disease: focus on technology-based therapies[J/OL]. J Neural Transm (Vienna), 2025. DOI: 10.1007/s00702-025-02915-1.
[67] Menon A, Vigneswaran M, Zhang T, et al. Individualising galvanic vestibular stimulation further improves visuomotor performance in Parkinson's disease[J]. Bioengineering (Basel), 2025, 12(5): 523.
[68] Laver K E, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2025, 6(6): CD008349.
[69] Wochynski Z, Krawczyk P, Cur K. The assessment of the impact of a training process on the habituation of the vestibular-vegetative system, using a special rotational test as a condition of maintaining flight safety[J]. Int J Occup Med Environ Health, 2020, 33(4): 497-506.

(收稿日期:2025-08-30)

本文引用格式:卢思彤,李煦昀,阳歆妮,等. 前庭物理治疗的研究与应用进展[J]. 中国耳鼻咽喉颅底外科杂志, 2026,32(4):122-128. DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202625352

Cite this article as: LU Sitong, LI Xuyun, YANG Xinni, et al. Research and application progress of vestibular physical therapy[J]. Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg, 2026, 32(4): 122-128. DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202625352