

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.02.005

穿戴式颈椎康复设备研究现状与趋势

杜妍辰^{1,2,3}, 胡时辉^{1,2,3}, 石萍^{1,2,3}, 李素姣^{1,2,3}, 喻洪流^{1,2,3}

(1. 上海理工大学康复工程与技术研究所 上海 200093; 2. 上海康复器械工程技术研究中心 上海 200093;
3. 民政部神经功能信息与康复工程重点实验室 上海 200093)

【摘要】 颈椎康复设备广泛应用于康复科、推拿科等科室,用于各类颈椎病的治疗,有效减轻了医护人员的体力负担,极大地丰富了医生的治疗手段。该文首先简述了颈椎病的分型、治疗方法及其机理;其次,概述了颈椎康复设备的作用机制,并根据驱动方式、作用机理等对市面上现有的颈椎康复设备进行了分类,将其分为六大种类;再次,针对穿戴式颈椎康复设备的国内外研究及发展现状进行了详细介绍与总结;最后,对穿戴式颈椎康复设备未来 6 个方面(增加牵引维度及模式、提升柔顺性、提升人机耦合性、提升穿戴便携性、加深与传统医学的融合、加快产业化落地)的发展趋势进行了展望。

【关键词】 穿戴式技术;颈椎病;颈椎康复设备;柔顺性;人机耦合性

【中图分类号】 TP242.6

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242(2023)02-0149-09

Research Status and Trend of Wearable Cervical Spine Rehabilitation Equipment

DU Yanchen^{1,2,3}, HU Shihui^{1,2,3}, SHI Ping^{1,2,3}, LI Sujiao^{1,2,3}, YU Hongliu^{1,2,3}

(1. Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Rehabilitation Equipment Engineering Technology Research Center, Shanghai 200093, China; 3. Key Laboratory of Neurological Information and Rehabilitation Engineering, Ministry of Civil Affairs, Shanghai 200093, China)

【Abstract】 The utilization of cervical spine rehabilitation devices has become prevalent in rehabilitation departments and massage centers for the management of diverse cervical spine conditions, contributing to the reduction of the physical demands on healthcare professionals and enhancing the treatment options available to medical practitioners. This article initially presents a concise overview of the typology and therapeutic approaches for cervical spondylosis and their underlying mechanisms. Subsequently, the mechanism of operation of cervical spine rehabilitation devices is discussed and the current market offerings are classified into six categories based on their mode of propulsion and mechanism of action. A comprehensive evaluation of the state-of-the-art of domestic and international research and development of wearable cervical spine rehabilitation devices is then presented. The article concludes with a forward-looking outlook on the future growth trajectory of wearable cervical spine rehabilitation devices,

收稿日期: 2022-09-29。

基金项目: 上海科技行动创新计划(20531901500)。

作者简介: 杜妍辰,女,教授,博士生导师, E-mail: duyanchen@hotmail.com。

通信作者: 喻洪流,男,教授,博士生导师, E-mail: yhl98@hotmail.com。

specifically in regards to expanding the traction dimension and mode, enhancing the flexibility, human-machine compatibility, and wearability, reinforcing the integration with traditional medicine, and hastening the commercialization of wearable cervical spine rehabilitation devices.

【Key words】Wearable Technology; Cervical Spondylosis; Cervical Spine Rehabilitation Devices; Flexibility; Human-machine Coupling

0 引言

颈椎病在临床中是较为常见且易多发的疾病。随着科技的发展, 人们的生活方式发生了巨大的变化, 颈椎病的发病年龄也日趋年轻化。根据世界卫生组织公布的数据, 全球颈椎病患者数量已经达到了 9 亿名, 位列全球十大慢性顽固疾病排行榜第二^[1]。颈椎病不仅表现为颈背疼痛、上肢无力、手指发麻、下肢乏力、行走困难、头晕、恶心、呕吐等症状, 还可引起颈心综合征、颈胃综合征、高血压等并发症。

颈椎病根据受累的组织和结构不同, 可分为颈型、神经根型、脊髓型、交感型、椎动脉型和混合型等^[2]。针对颈椎病的治疗手段可分为手术治疗和保守治疗两大类, 而牵引与康复训练在临床中是颈椎病保守治疗中最常见的治疗手段之一^[3], 其对颈型颈椎病、神经根型颈椎病均有较好的治疗效果, 其主要作用机理为: ①通过限制颈椎活动, 促进肌肉修复; ②牵拉以增加椎间盘间隙, 减少椎间盘压力; ③缓解神经根压迫, 促进水肿吸收; ④延长椎管纵径, 改善血液与脑脊液循环; ⑤恢复颈椎曲度, 改善小关节功能^[4]。

在颈椎牵引与康复训练的过程中, 颈椎康复设备是必不可少的辅助工具。在颈椎牵引与康复训练的治疗历史上, 最早出现的悬挂式牵引设备通过患者自身的重量提供必要的牵引力。而后随着机械、电子、计算机技术的发展, 逐渐出现了可调节牵引力、牵引维度、训练模式的设备。发展至今, 部分设备甚至已具有内置的智能处方。颈椎康复设备的发展为医生、患者带来了极大的便利, 使治疗过程更精确, 改善了治疗效果, 因此针对颈椎康复设备的研究具有非常积极的意义。本文通过分析国内外相关研究成果, 对颈椎康复设备, 特别是穿戴式颈椎康复设备进行了系统性的介绍与总结, 并对今后的研究重点进行了预测与展望。

1 颈椎康复设备分类及介绍

通过收集、整理相关资料与文献, 可将现有的颈椎康复设备大体分为以下 6 种。

1.1 颈椎机械式牵引装置

颈椎机械式牵引装置主要有头戴式悬吊和枕后位

牵引两种。颈椎机械式牵引装置根据驱动方式可分为有源式和无源式; 根据牵引体位可分为坐立式和卧式。这类装置的特点是牵引方向单一、牵引要素不能长时间保持恒定和精确、长期使用会引发颞下颌关节综合症等并发症^[5], 且体积大, 部分装置价格昂贵, 不适合家用。

1.2 气囊加压牵引器

气囊加压牵引器体积小、方便携带, 适用于家庭康复牵引。但气囊加压时, 内圈膨胀, 导致颈椎受压, 易产生窒息感^[6]。同时, 此类牵引器使锁骨的负担很重, 部分患者牵引时锁骨会有严重的疼痛感。

1.3 颈椎按摩器

颈椎按摩器小巧实用, 方便携带。多种治疗方法的联合应用使按摩器能够有效缓解颈部肌肉的疼痛问题, 舒筋活血, 改善颈部的血液循环。颈椎按摩器的缺点是缺乏柔顺性, 不能改善颈部神经压迫症状, 并且有可能会损伤颈部神经及软组织。

1.4 颈椎治疗枕

颈椎治疗枕以麦肯基疗法为基础, 通过头部重量自行牵引来达到恢复生理曲度的效果, 但牵引位置精确度不高, 牵引效果一般, 不能保证康复训练方向的持续一致性。

1.5 头颈椎矫形器

头颈椎矫形器可通过推伸机构来支撑头部, 有效减轻头部对颈椎的压力, 实现穿戴尺寸的可调节及牵引角度的可调节。但其牵引力度、模式相对固定, 有一定的局限性。关于此类设备较有代表性的研究成果有美国加州大学伯克利分校 Yee 等^[6]设计的一款助力的被动头颈椎矫形器, 可减轻由颈椎病引起的疼痛, 如图 1 所示。其作为较为先进的头颈椎矫形器, 目的是进行力的再分配, 当颈椎屈伸时可减少脖子肌肉的活动量, 矫正人们的错误姿势与不良习惯, 减少颈椎的曲度扭曲变形, 降低颈椎疼痛发生的频率。该设备结构简单, 携带方便。



图 1 被动头颈椎矫形器

Fig. 1 Passive head and neck orthotic mechanism

1.6 智能颈椎康复设备

智能颈椎康复设备包含穿戴式与非穿戴式两类，其通过融合机械、电子、自动化、人工智能等多领域技术，可以灵活切换牵引时间、牵引力度、牵引角度 3 个关键要素，以达到适配患者病症的目的。此外，有些智能颈椎康复设备具备智能评估功能，甚至可以在设备中内置智能处方，根据患者自适应调节牵引时间、牵引力度、牵引角度。其中非穿戴式智能颈椎康复设备中较有代表性的如下所示。

哈尔滨工业大学的王广欢^[7]设计了一种精准定量颈椎康复设备，如图 2 (a) 所示。其使用了 3 个电机，可对位姿与牵引力参数进行精确的调整，同时基于力/位混合控制策略及自适应模糊 PID 控制来提升牵引的柔性，但系统的稳定性与精准度还有待进一步完善。

Pei 等^[8]在使用 BTE 技术开发的 MCU 颈椎评估康复系统的基础上设计了一种颈椎评估康复系统，如图 2 (b) 所示。其不仅能够实现评估康复一体化，还能降低成本、简化检测步骤、定制康复训练方案。其可实现颈椎的三自由度转动，不过体积庞大，结构相对复杂。

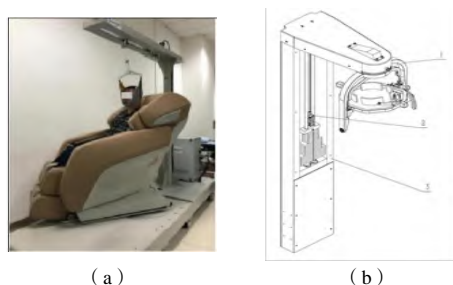


图 2 非穿戴式颈椎智能康复设备

Fig. 2 Non-wearable intelligent cervical spine rehabilitation device

(a) 一种精准定量颈椎康复设备；(b) 一种颈椎评估康复系统

(a) A precise and quantitative cervical spine rehabilitation device;

(b) A cervical spine evaluation and rehabilitation system

2 国内外穿戴式颈椎康复设备研究现状

可穿戴技术是信息技术和生物医学工程领域的研究热点，其最早是由美国麻省理工学院媒体实验室所提出的一种创新技术^[9]。应用可穿戴技术的设备一般具有可穿戴性和数据信息采集处理功能^[10]。如今，随着物联网技术的高速发展，可穿戴技术越来越多地被应用于医疗领域。近年来，国内外在颈椎康复领域逐渐出现了一些运用可穿戴技术的颈椎康复设备，以下针对此类颈椎康复设备进行详细介绍。

2.1 国外穿戴式颈椎康复设备研究现状

美国 Linares Medical Devices 公司^[11]设计了一种高度和直径多位置可调节的康复设备，如图 3 (a) 所示。其通过两侧的剪式千斤顶调节高度和直径，具备初步的牵引效果，但不具备多维度牵引效果，活动范围较小。

美国哥伦比亚大学 RoAR (The Robotics And Rehabilitation) 实验室的 Zhang Haohan 等^[12-15]研发了一款名为 Neck Brace 的 3-RRS 头颈部外骨骼，如图 3 (b) 所示。其可实现三自由度转动。患者可使用两种方式控制该设备，一种是使用操纵杆控制头部外骨骼的活动，另一种是借助眼动仪实现眼部跟随控制。但其活动范围相对有限，如进行侧屈运动时，其活动范围只能达到人体活动范围的 53.1%；进行旋转运动时，其运动范围可达到 70%。该外骨骼控制系统基于角位移与电流量反馈构造了力控制器，其外环输入为角位移，通过 PD 反馈控制输出理想的电机力矩。内环为 PID 电流环，输出电流量控制外骨骼运动。其通过调整施加于头顶颅骨处的力来达到颈椎康复训练的目的。但跟踪所需的循环运动精度较低，相位延迟较长。

印度韦洛尔理工大学的 Lingampally 等^[16-19]提出了一种基于 3-RPS 型并联机构的颈椎康复设备，如图 3 (c) 所示。该设备适用于辅助头颈部运动，解决头颈部姿势问题。经过实验验证，其可实现三自由度运动，能够模仿 65% 的人类头/颈部运动，如前曲、后伸、侧弯等动作，而且颈部表面肌肉产生的应变很小，应变范围为 $40 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 。其针对 15 名 49 ~ 65

岁的中老年人进行了实验。实验结果表明,该设备在进行前屈、后伸动作时,股骨头/颈部的俯仰轴角度在 $\pm 12^\circ$ 之间;进行左右侧弯动作时,其活动范围在 $\pm 21^\circ$ 之间,从不同的运动中获得的最小误差为 0.5° ,可帮助患有脊柱退休性病变及颈部损伤的患者康复。但该实验缺少左右旋转动作的相关实验数据,有待进一步的实验论证。

韩国首尔国立大学的 Kim 等^[20]设计了一种主动矫正头颈部姿势的康复机器人,如图 3(d) 所示。其采用波纹管式气动执行器和气动人工肌肉,能够在主要方向上提供足够的力,并基于可检测颈部期望矫正角度的柔性传感器和气动人工肌肉,利用径向膨胀方式将机械压力施加到颈部,构建了一个用于监测和治疗头部前移姿态的闭环反馈控制回路。其治疗效果还有待进一步验证。

澳大利亚皇家墨尔本理工大学的 Shoaib 等^[21]设计了一款名为 CarNeck 的颈椎外骨骼,如图 3(e) 所示。其在颈椎康复机器人领域首次使用了混合式绳驱动。其由一个混合式和两个连接式拮抗驱动关节组成,其中混合式驱动关节由一根绳缆与两侧的滑轮连接,由另一根绳缆直接拉动驱动关节上侧的连杆旋转,继而带动驱动关节运动。每个自由度都由一个最小张力为 2N 的绳驱单元控制。经过仿真分析验证,其能够实现三自由度的活动,能够覆盖完整的自然头部旋转空间。其临床治疗效果有待验证。

墨西哥国立理工学院的 Guzman-Victoria 等^[22]针对由于外力或屈曲过度引起的颈部鞭打综合征设计了一种用于颈椎康复的主动型颈椎矫形器,如图 3(f) 所示。其固定支撑部分由一个名为 EVS-r4 的颈部矫形器构成,材料为碳纤维,该部分质量为 0.635kg,比较轻便。其移动部分通过 3D 打印制成,材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯,整体比较轻便。其底座与旋转机构各有一个电机用于驱动整个设备。控制部分采用了自适应滑模阻抗控制,可以使患者在人机交互过程中获得

主导权,也可以进一步根据患者的情况调整阻抗参数,为患者在治疗过程中提供更好的治疗体验。经过假人实验验证,其可实现侧屈抗阻运动,可用于颈部鞭打综合征的治疗。

斯坦福大学及墨西哥国立理工学院的 Lozano 等^[23,24]提出了一种具有四自由度的主动式颈部矫形器,如图 3(g) 所示。该主动式颈部矫形器采用了类似四腿 Stewart 平台的结构,通过 4 个推杆电机推动头颈部辅助运动。控制层面通过具有状态限制的鲁棒控制策略来调节设备的动态特性。鲁棒控制策略基于具有状态相关增益的一阶滑模控制器,该一阶滑模控制器在接近状态限制时使其趋于发散。相较于经典的 PD 控制策略,该控制策略的鲁棒性可高出 8 倍(考虑两种情况下的鲁棒和精确观测器)。经过人体实验验证,该主动式颈部矫形器可实现前屈、后伸、左右侧屈的动作,其实现的活动范围分别为前屈 51.79%、后伸 50.00%、左侧屈 37.69%、右侧屈 32.26%,可实现对颈椎病患者的辅助治疗。

埃及埃尔绍鲁克学院及赫勒万大学的 Ibrahim 等^[25]设计了一种 3-RPS 的并联动力颈椎外骨骼,如图 3(h) 所示。该外骨骼由固定基座和动平台组成。固定基座由 3 个相同的支撑臂连接。每个支撑臂由 3 个关节(球关节、旋转关节和移动关节)组成。肢体通过球关节与动平台连接,通过旋转关节与固定基座连接,移动关节由直线电机驱动。控制层面采用 PD 位置控制,通过对由弹簧与假人组成的人体模型进行实验,可实现前屈、后伸、左右侧屈的动作,能够在 $-8.10 \pm 0.02^\circ \sim 8.12 \pm 0.01^\circ$ 范围内应用屈曲/伸展,准确度分别为 99.57% 和 99.42%,将运动限制在正常范围的 12% ($-65^\circ \sim 67^\circ$)。右左侧屈运动范围为 $-6.97 \pm 0.01^\circ \sim 7.02 \pm 0.01^\circ$,准确度分别为 99.89% 和 99.48%,侧屈运动限制在正常范围 ($-42^\circ \sim 41^\circ$) 的 17%,可实现一定的颈椎牵引治疗功能,但对作用于人体时的治疗效果有待进一步验证。

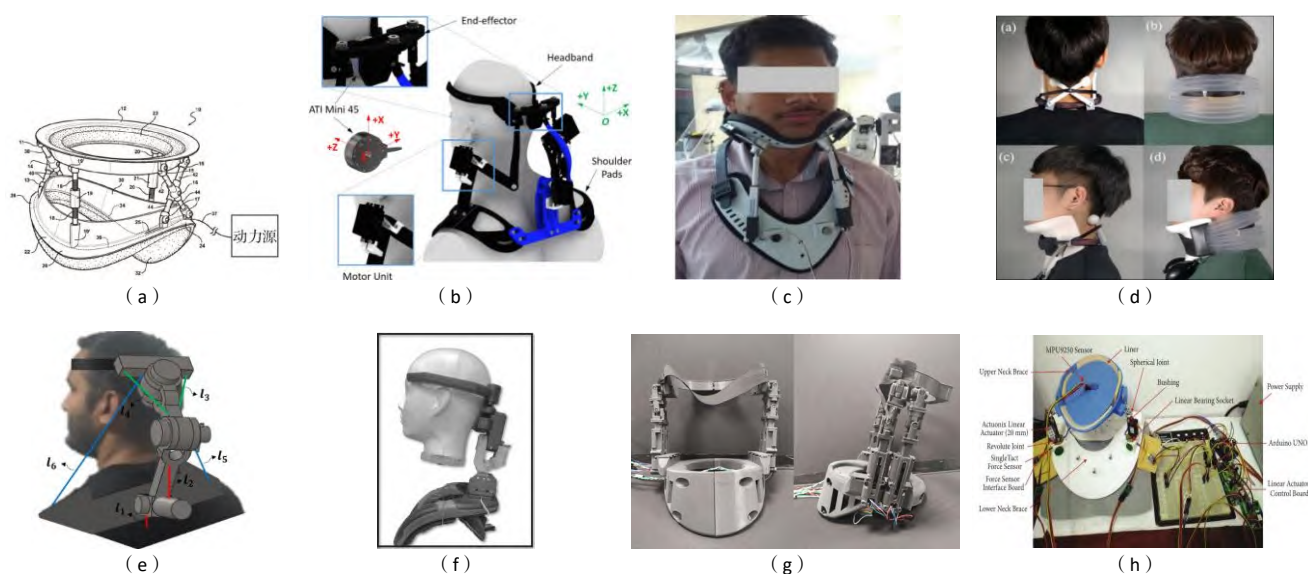


图 3 国外穿戴式智能颈椎康复设备

Fig. 3 Foreign wearable intelligent cervical spine rehabilitation equipment

- (a) 一种高度和直径多位置可调节的康复设备; (b) Neck Brace; (c) 一种基于 3-RPS 型并联机构的颈椎康复设备;
 (d) 一种主动矫正头颈部姿势的康复机器人; (e) CarNeck; (f) 一种颈部鞭打综合征康复设备;
 (g) 一种四自由度主动式颈部矫形器; (h) 一种 3-RPS 的并联动力颈椎外骨骼
- (a) A neck cast with multi-position adjustability of height and diameter; (b) Neck Brace; (c) Cervical spine rehabilitation device based on a 3-RPS type parallel mechanism; (d) A rehabilitation robot for active correction of head and neck posture; (e) CarNeck;
 (f) A neck whiplash syndrome rehabilitation device; (g) A 4-DOF active neck orthosis; (h) A 3-RPS parallel dynamic neck brace

2.2 国内穿戴式颈椎康复设备研究现状

南通大学^[26]设计了一种可穿戴型颈部助力机器人,如图 4(a)所示。其包含多个传感器与芯片,既能提供颈部支撑,也能实现对颈椎的智能助力。智能体现为控制系统可以在不同的条件下有针对性地选择主动式运动和预先设定的被动式运动,帮助患者恢复颈部运动功能。

南京航空航天大学的李鹏等^[27-29]设计了一套 6URHS 头颈部外骨骼系统,如图 4(b)所示。其可作为飞行模拟机动感模拟平台,也可用于头颈部的辅助运动。该构型类似 Stewart 平台,采用了适用于该系统的主动柔顺控制策略。该策略包含两部分内容:头部运动预测和基于惯性项与非线性项补偿的自适应控制器。前者根据系统的力反馈信息和驱动支链的运动状态,基于动力学模型和并联机构的正向运动学来预测头部在下一时刻的运动状态,为自适应控制器提供运动平台的期望运动轨迹;后者由补偿控制器和系统辨识组成,通过在控制器中对惯性项和非线性项进行补偿

来减小系统的惯性,降低系统的刚度,减少摩擦力等非线性因素对头部运动的干扰。经过实验验证,其可辅助佩戴者精确地进行头部和颈部运动,实现前屈、后伸、左右侧屈、左右旋转的动作,有助于减轻佩戴者头部负担,在外部干扰下仍具有良好的柔顺性,并实现了多功能虚拟现实交互。但该系统体积过于庞大,作为颈椎康复设备仍有较大的优化空间。

哈尔滨天愈康复医疗机器人有限公司^[30]设计了一种可穿戴式三自由度颈椎康复治疗机器人。如图 4(c)所示。其可以承担佩戴者头部的大部分重量,释放颈椎压力,还可以实现颈椎的三自由度转动。

哈尔滨工业大学的陈朝峰^[31]提出了一种基于 3-RRS 球面并联机构的 ALS 颈椎外骨骼,可适用于肌萎缩侧索硬化症(Amyotrophic Lateral Sclerosis, ALS)患者,如图 4(d)所示。该外骨骼系统运用球面解析理论进行位置分析,采用了 PID 控制器。经过联合仿真验证,该设计能够实现三自由度的头部运动,其实际康复效果仍有待进一步验证。

中北大学的李亚丽^[5]设计了一种基于 2-UPR+RPS 并联机构的颈椎康复牵引装置,如图 4(e)所示。其包含升降椅、调心装置、主体旋转机构及牵引机构。经过螺旋理论及 G-K 公式论证,其可以实现前屈、后伸、左右侧屈的牵引动作。但作为穿戴式颈椎外骨骼,其装置略显笨重,且实际康复效果有待进一步论证。

北京交通大学的戚世家^[32]针对头部运动障碍或头部下垂综合征患者,设计了一种基于 3-RRS 并联机构的颈椎康复机器人,如图 4(f)所示。该设计使用 PID 位置控制,经仿真验证,能实现侧弯、前屈、后伸和旋转动作并达到其所设计的工作性能。但该颈椎

康复机器人仍处于理论研究设计阶段,实际康复效果有待进一步验证。

上海理工大学康复工程与技术研究所的戴珩^[33]设计了一种基于 6SPS/CS 并联机构的生物融合式颈椎康复动力外骨骼,如图 4(g)所示。该外骨骼系统以 Stewart 平台为基础,针对人体结构做出了相应的优化与改进。控制层面采用了基于阻抗控制的主动柔顺控制策略。经过联合仿真及实验验证,其可实现颈椎纵向牵引及前屈、后伸、左右侧屈、水平旋转、轴向拉伸的多维运动康复训练功能,实现了牵引疗法与运动疗法相结合的多功能康复训练模式的设计理念。

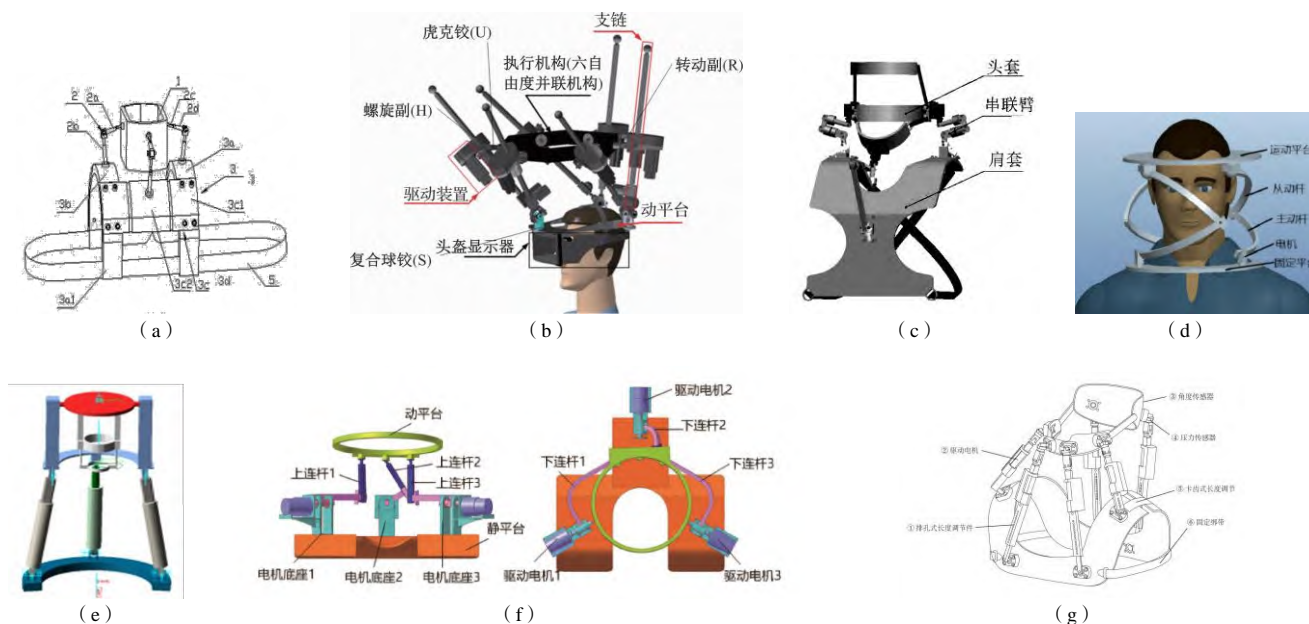


图 4 国内穿戴式智能颈椎康复设备

Fig. 4 Domestic wearable intelligent cervical spine rehabilitation equipment

- (a) 一种可穿戴型颈部助力机器人; (b) 一套 6URHS 头颈部外骨骼系统; (c) 一种可穿戴式三自由度颈椎康复治疗机器人;
(d) 一种基于 3-RRS 球面并联机构的 ALS 颈椎外骨骼; (e) 一种基于 2-UPR+RPS 并联机构的颈椎康复牵引装置;
(f) 一种基于 3-RRS 并联机构的颈椎康复机器人; (g) 一种基于 6SPS/CS 并联机构的生物融合式颈椎康复动力外骨骼

(a) A wearable neck-assisted robot; (b) A 6URHS head and neck exoskeleton system; (c) A wearable three-degree-of-freedom cervical spine rehabilitation therapy robot; (d) A cervical exoskeleton based on a 3-RRS spherical parallel mechanism for ALS; (e) A rehabilitation traction device based on a 2-UPR+RPS parallel mechanism; (f) A cervical spine rehabilitation robot based on a 3-RRS parallel mechanism; (g) A bio-fusion cervical rehabilitation power exoskeleton based on a 6SPS/CS type parallel mechanism

2.3 国内外穿戴式颈椎康复设备研究现状小结

近 10 年来,国内外出现了一些针对颈椎相关疾病的穿戴式颈椎康复设备,特别是近 5 年来,针对穿戴式颈椎康复设备的研究热度日益上升。分析本文所述研究可以发现,在机构构型方面,采用并联机构的设备占比极高,采用串联机构的设备占比相对较低;在

驱动方式方面,主要可分为电机驱动和气压驱动两种,其中绝大多数采用了电机驱动的方式,且较多地采用了推杆电机;在活动自由度方面,绝大多数设备可完成前屈、后伸、左右侧屈的动作,较少设备能够完成左右旋转或更复杂的动作;在活动范围方面,由于并联机构的特性,几乎所有设备都有工作空间方面的限

制, 无法完全实现健康人体颈椎运动的范围; 在控制策略方面, 半数以上的设备采用的是 PD 控制策略, 较少一部分设备采用的是现代控制策略, 如鲁棒控制、滑模控制等, 此外绝大多数设备采用了位置控制, 只有极少数设备采用了力控或力位混合控制, 造成设备的柔顺性与人机耦合性不足; 在临床效果方面, 国际上穿戴式颈椎康复设备样机实验的相关研究成果较多, 且具有一定的临床效果, 国内穿戴式颈椎康复设备样机实验的相关研究成果相对较少, 临床方面的效果有待进一步论证。

3 穿戴式颈椎康复设备发展趋势

3.1 多维度牵引及康复训练模式的丰富

如今的穿戴式颈椎康复设备受制于机械结构与控制系统, 大多无法制定康复训练方案。而针对不同类型的颈椎疾病, 需要运用不同的牵引策略, 如神经根型颈椎病与脊髓型颈椎病的训练方案就有很大的不同。训练方案的制定需要考量牵引维度、训练模式、牵引力度等因素。牵引维度包括拉伸、侧屈、旋转等, 训练模式包括等速训练、变速训练等。未来的穿戴式颈椎康复设备通过机械与控制的优化, 将提升牵引维度, 丰富训练模式, 使针对患者病症制定个性化康复训练方案变为可能, 这将大幅提升运用穿戴式颈椎康复设备治疗颈椎病的效果。

3.2 柔顺性和控制精度的提升

过去受制于传感技术与嵌入式端控制器算力不足, 许多现代控制算法无法应用于穿戴式颈椎康复设备, 使大多数设备在柔顺性和控制精度上有所欠缺, 无法很好地描述与环境力的关系。如今, 随着传感技术和嵌入式终端芯片算力的大幅提升, 各种高性能传感器、智能算法得以部署在穿戴式颈椎康复设备上, 在线计算也成为可能。例如, 过去将基于动力学模型的阻抗控制应用于康复机器人领域时, 由于嵌入式终端控制器算力不足, 只能通过建立精确的机器人动力学模型来实现理想阻抗的计算, 而多自由度机器人的精确动力学模型的计算、解耦都是十分复杂的, 最佳阻抗参数难以在动态下确定, 因此实现较为理想的柔顺控制有一定的困难。如今, 随着嵌入式终端芯片算力的大幅提升, 在不需系统动力学模型的情况下, 通过迭代策略、迭代算法, 在高性能嵌入式终端使用非策略整体强化学习算法对最佳阻抗模型进行学习^[34],

在人与机器人之间进行短暂协作之后, 面向任务的控制器通过一定时间的学习即可确定最佳阻抗参数, 满足不同状态下的柔顺性。因此, 未来可以预见的是, 随着高性能嵌入式芯片和传感器的出现, 穿戴式颈椎康复设备在柔顺性和控制精度上会有明显的提升。

3.3 人机耦合性的提升

市场上大多数穿戴式颈椎康复设备未考虑到不同体型、不同年龄段等人群的穿戴适配性, 缺少对生物力学的考量, 导致患者穿戴体验较差, 影响后续治疗效果。与此同时, 在治疗过程中, 患者与康复设备之间缺乏交互, 无法了解自身疾病状况及治疗效果, 从而缺乏对穿戴式颈椎康复设备的信任, 进而影响患者的治疗积极性。因此, 提升穿戴式颈椎康复设备的人机耦合性在未来是非常有必要的。

3.4 穿戴便携度的提升

随着颈椎病发病人数的增多, 医院的医疗资源已经无法满足日益庞大的患病人群, 因此家庭颈椎牵引成为很多患者的选择。但医院中治疗效果较好的穿戴式颈椎康复设备往往体积较为庞大。因此, 在保证治疗效果的前提下, 提升穿戴式颈椎康复设备的穿戴便携度, 是扩大颈椎牵引受益者规模、推广家庭颈椎牵引的有效手段。

3.5 与传统医学相结合

临床上, 针对颈椎病, 针灸、推拿等传统医学的治疗方式取得了很好的效果, 如果能将中医理论融入颈椎康复设备的研发过程中, 可以在一定程度上提升治疗效果, 减轻中医医师的负担, 同时也为中医现代化做出了贡献。

3.6 产业化落地速度的提升

如今, 大多数穿戴式颈椎康复设备尚未实现产业化落地的应用, 其中牵引维度可选、牵引力度可调、牵引模式可根据患者情况自适应调节的智能穿戴式颈椎康复设备更是在市场上难觅踪影, 更多地存在于科研院所的实验室中, 这对患者而言无疑是一种巨大的遗憾。与此同时, 临床端大量的需求难以及时地反馈至科研端, 也导致穿戴式颈椎康复设备的产品化落地道阻且长。因此, 加大学校、医院与企业之间的产学研合作力度, 建立统一的合作平台, 跨越三者之间沟通的藩篱是加速穿戴式颈椎康复设备产品化应用落地的关键。近年来, 不少高校和医院、企业合作开发了

医工交叉的创新与转化平台,国家药品监督管理局也针对技术上处于国际领先水平且具有显著临床应用价值的器械出台了创新医疗器械特别审查程序的相关条例。相信在不久的将来,能看到越来越多的穿戴式颈椎康复设备实现产品落地,为颈椎病患者提供更多的选择。

4 小结

由于颈椎病患病人数的增加,颈椎康复设备的市场日益庞大,对颈椎康复设备的研究已呈星火燎原之势。基于各种机械结构与控制策略的穿戴式颈椎康复设备层出不穷,但是或多或少都存在牵引维度、训练模式单一化,穿戴柔顺性和人机耦合性不足,穿戴便携性不高,研究成果缺少产品化,价格过高等问题,使颈椎牵引与康复训练无法得到很好的普及与应用。不过可以肯定的是,在嵌入式终端芯片算力大幅提升、高性能传感器功能日趋完善、多传感融合技术日新月异的背景下,在日渐陡增与日益多元化的患者需求的驱动下,这些问题将被一一解决,从而大大减轻医护人员的体力负担,提升患者的治疗体验与效果。相信在不远的将来,大量优秀的穿戴式颈椎康复设备将“飞入寻常百姓家”。

参考文献

- [1] 储浩然,胡进,孙奎,等. 针灸治疗神经根型颈椎病临床实践指南[J]. *世界针灸杂志(英文版)*, 2017, 27(1): 3-11.
CHU Haoran, HU Jin, SUN Kui, *et al.* Clinical practice guidelines for acupuncture treatment of neurogenic cervical spondylosis[J]. *World Journal of Acupuncture-Moxibustion (English Version)*, 2017, 27(1): 3-11.
- [2] 中华外科杂志编辑部. 颈椎病的分型、诊断及非手术治疗专家共识(2018)[J]. *中华外科杂志*, 2018, 56(6): 401-402.
Editorial Board of Chinese Journal of Surgery. Expert consensus on the staging, diagnosis and non-surgical treatment of cervical spondylosis (2018)[J]. *Chinese Journal of Surgery*, 2018, 56(6): 401-402.
- [3] GRAHAM N, GROSS A, GOLDSMITH CH, *et al.* Mechanical traction for neck pain with or without radiculopathy[J]. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2008, 16(3): Cd006408.
- [4] 贺石生,方凡夫. 颈椎病牵引治疗专家共识[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2020, 30(12): 1136-1143.
HE Shisheng, FANG Fanfu. Expert consensus on traction therapy for cervical spondylosis[J]. *Chinese Journal of Spinal Cord*, 2020, 30(12): 1136-1143.
- [5] 李亚丽. 颈椎牵引康复机构的设计与运动性能分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
LI Yali. Design and motion performance analysis of cervical traction rehabilitation mechanism[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [6] YEE CA, KAZEROONI H. Reducing occupational neck pain with a passive neck orthosis[J]. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2016, 13(1): 403-406.
- [7] 王广欢. 精准定量颈椎康复机器人设计与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
WANG Guanghuan. Design and experimental research of a precise quantitative cervical spine rehabilitation robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [8] PEI Z, LI T, YU H, *et al.* The cervical spine evaluation and rehabilitation system [C]. 2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR). IEEE, 2021: 70-73.
- [9] 颜延,邹浩,周林,等. 可穿戴技术的发展[J]. *中国生物医学工程学报*, 2015, 34(6): 644-653.
YAN Yan, ZOU Hao, ZHOU Lin, *et al.* Development of wearable technology[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2015, 34(6): 644-653.
- [10] 谢凌钦,石萍,蔡文杰. 可穿戴式智能设备关键技术及发展趋势[J]. *生物医学工程与临床*, 2015, 19(6): 635-640.
XIE Lingqin, SHI Ping, CAI Wenjie. Key technologies and development trends of wearable smart devices[J]. *Biomedical Engineering and Clinical Medicine*, 2015, 19(6): 635-640.
- [11] LINARES MIGUEL A. Neck cast with multi-position adjustability of height and diameter and including downwardly configured shoulder supports for immobilizing a patient's head: USA, US2010087764[P]. 2013-11-29.
- [12] ZHANG H, AGRAWAL SK. An active neck brace controlled by a joystick to assist head motion [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(1): 37-43.
- [13] ZHANG H, ALBEE K, AGRAWAL SK. A spring-loaded compliant neck brace with adjustable supports [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 125: 34-44.
- [14] ZHANG H, CHANG B, AGRAWAL SK. Using a robotic neck brace for movement training of the head-neck [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(2): 846-53.
- [15] ZHANG H, CHANG BC, RUE YJ, *et al.* Using the motion of the head-neck as a joystick for orientation control [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2019, 27(2):

- 236-43.
- [16] LINGAMPALLY PK, SELVAKUMAR AA. A humanoid neck using parallel manipulators [C]. 2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA). Amritapuri, India. IEEE, 2016: 1-6.
- [17] LINGAMPALLY PK, SELVAKUMAR AA. Kinematic and workspace analysis of a parallel rehabilitation device for headneck injured patients[J]. *FME Transactions*, 2019, 47(3): 405-411.
- [18] LINGAMPALLY PK, AROCKIA DOSS AS. Design, Implementation, and Experimental Study on 3-RPS Parallel Manipulator-Based Cervical Collar Therapy Device for Elderly Patients Suffering from Cervical Spine Injuries. In: Hussain, C. M., Di Sia, P. (eds) Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices[M]. Cham: Springer, 2022.
- [19] LINGAMPALLY PK, DOSS ASA, KADIYAM VR. Wearable neck assistive device strain evaluation study on surface neck muscles for head/neck movements[J]. *Technol Health Care*, 2022, 30(6): 1503-1513.
- [20] KIM H, PARK H, LEE W, *et al.* Design of wearable orthopedic devices for treating forward head postures using pneumatic artificial muscles and flex sensors[C]. 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Maison Glad Jeju, Jeju, Korea. IEEE, 2017: 70-73.
- [21] SHOAIB M, LAI CY, BAB-HADIASHAR A. A novel design of cable-driven neck rehabilitation robot (CarNeck) [C]. Proceedings of the 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Hong Kong, China. IEEE, 2019: 8-12.
- [22] GUZMAN-VICTORIA I, SALGADO-RAMOS I, MERA-HERNANDEZ M, *et al.* Impedance Adaptive Controller for a Prototype of a Whiplash Syndrome Rehabilitation Device[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(3): 1-21.
- [23] LOZANO A, BALLESTEROS M, CRUE-ORTIZ D. Active neck orthosis for musculoskeletal cervical disorders rehabilitation using a parallel mini-robotic device[J]. *Control Engineering Practice*, 2022, 128: 105312.
- [24] MIRELES C, LOZANO A, BALLESTEROS M, *et al.* Asymmetric constrained control of a cervical orthotic device based on barrier sliding modes[J]. *Applied Sciences*. 2022, 12(20): 10286.
- [25] MOSTAFA EL-HUSSEIN IBRAHEM M, EL-W M, *et al.* Implementation and evaluation of a dynamic neck brace rehabilitation device prototype[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 12: 6887839.
- [26] 南通大学. 一种可穿戴型颈部助力机器人: 中国, CN201110106233. 6[P]. 2011-08-17.
- Nantong University. A wearable neck-assist robot: China, CN201110106233. 6 [P]. 2011-08-17.
- [27] 施政, 李鹏, 羊玢, 等. 一种 6URHS 头颈部外骨骼系统动力学影响因素的分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18 (23): 55-63.
- SHI Zheng, LI Peng, YANG Fen, *et al.* Analysis of factors influencing the dynamics of a 6URHS head and neck exoskeleton system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(23): 55-63.
- [28] WU D, WANG L, LI P. A 6-DOF exoskeleton for head and neck motion assist with parallel manipulator and sEMG based control[C]. Proceedings of the 2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Saint Julian's, Malta. IEEE, 2016: 6-8.
- [29] 李鹏. 头盔伺服系统的关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- LI Peng. Research on the key technology of helmet servo system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [30] 哈尔滨天愈康复医疗机器人有限公司. 一种可穿戴式三自由度颈椎康复治疗机器人: 中国, CN201510404982. 5[P]. 2015-10-21.
- Harbin Teinyo Rehabilitation Medical Robot Co. A wearable three-degree-of-freedom cervical spine rehabilitation therapy robot: China, CN201510404982. 5 [P]. 2015-10-21.
- [31] 陈朝峰. 基于球面并联机构的 ALS 颈椎外骨骼理论分析与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- CHEN Chaofeng. Theoretical analysis and design of ALS cervical exoskeleton based on spherical parallel mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [32] 戚世家. 基于并联机构的颈椎康复机器人设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- QI Shijia. Design of cervical spine rehabilitation robot based on parallel mechanism [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [33] 戴玥. 新型可穿戴式多自由度颈椎康复动力外骨骼系统研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2022.
- DAI Yue. A novel wearable multi-degree-of-freedom cervical rehabilitation power exoskeleton system[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2022.
- [34] LI Z, LIU J, HUANG Z, *et al.* Adaptive impedance control of human-robot cooperation using reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017: 1-10.