

文章编号: 1671-7104(2024)01-0030-08

## 下肢康复机器人机构研究现状及临床应用初探

【作者】 高承一<sup>1</sup>, 刘芬<sup>2</sup>, 姜海波<sup>3</sup>

1 江苏师范大学 圣彼得堡彼得大帝理工大学联合工程学院, 徐州市, 221116

2 徐州市中心医院, 徐州市, 221008

3 江苏师范大学 机电工程学院, 徐州市, 221116

【摘要】 人体下肢康复机器人作为一种恢复下肢运动能力的辅助设备, 在康复领域和临床应用上的作用日益显著。随着科技的进步, 国内外在该领域均有较大的发展, 本研究对下肢康复机器人的发展脉络进行了较为细致地梳理, 对临床应用的现状进行了综述, 以机构研究为重点, 从自由度, 工作空间, 奇异性, 步态模拟, 运动学仿真及人机交互等角度对其进行分析辨识, 结果表明, 国内对下肢康复机器人的研究重点在机构构型的设计与优化, 国外的研究重点则是基于人机交互的控制系统与训练模式的提升与创新。最后结合研究现状对未来的发展趋势进行了展望。

【关键词】 人体下肢; 康复机器人; 步态; 人机交互; 机构

【中图分类号】 TP242; R496

【文献标志码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7104.230135

### Preliminary Study on Current Research Status and Clinical Application of Lower Limb Rehabilitation Robot Mechanisms

【 Authors 】 GAO Chengyi<sup>1</sup>, LIU Fen<sup>2</sup>, JIANG Haibo<sup>3</sup>

1 JSNU-SPbPU Institute of Engineering- Sino-Russian Institute, Xuzhou, 221116

2 Xuzhou Central Hospital, Xuzhou, 221008

3 School of Mechatronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, 221116

【 Abstract 】 As an assistive device to restore lower limb athletic ability, human lower limb rehabilitation robots are becoming increasingly important in the field of rehabilitation and clinical applications. With the advancement of science and technology, both domestic and foreign research in this field has been developed. This study provides a detailed overview of the development of lower limb rehabilitation robots and reviews the current status of clinical applications, with a focus on mechanism research, from the perspectives of degrees of freedom, workspace, singularity, gait simulation, kinematic simulation and human-robot interaction, etc. The results show that domestic research on lower limb rehabilitation robots focus on the design and optimization of the mechanism configuration, while foreign research focus on the improvement and innovation of the control system and training mode based on human-computer interaction. Finally, the current state of research is combined with an outlook on future trends.

【Key words】 human lower limb, rehabilitation robot, gait, human-robot interaction, mechanism

## 0 引言

下肢作为人体的主要承重载体, 由踝关节、膝关节和髋关节3大关节构成, 任一关节的损伤和病变都容易导致下肢运动功能的障碍。

社会老龄化程度不断加深, 据统计, 我国2021

年60岁以上老年人数就已占全国总人口数的18.9%<sup>[1]</sup>, 预计2050年达到34.9%<sup>[2]</sup>, 其中很大一部分老年人因退行性病变伴有下肢运动功能障碍; 同时因疾病和意外事故引起的肢体损伤的患者数量逐年增加。

此类人群对下肢康复和提高生活质量有迫切需求, 有效的康复训练是下肢运动功能障碍患者康复治疗中的关键环节, 对改善患者的行走功能和平衡功能有重要意义。传统康复训练主要以理疗师一对一的训练方式进行, 如针灸、推拿等, 存在康复效果不一致、缺乏定量评估和劳动强度大等问题<sup>[3]</sup>。于

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 2022年江苏师范大学大学生创新创业训练计划项目(XSJXC13066); 江苏师范大学“十三五”本科教育教学项目(JYKC201819)

作者简介: 高承一, E-mail: 1172214029@qq.com

通信作者: 姜海波, E-mail: jianghaibo@jsnu.edu.cn

是,将康复医学与运动学、机构学相结合的康复机器人技术成为研究热点。特别是能够近似模拟人体下肢运动轨迹的康复机构,对提高训练质量以及运动功能的恢复存在显著帮助,有利于缓解我国医疗资源不足的窘境,眼下已成为辅助运动功能障碍患者恢复下肢运动能力的有效手段。

### 1 下肢康复机器人国内外研究现状

正确科学的康复训练对于患者自身运动功能的恢复具有重要作用<sup>[4-5]</sup>。机器人能够高强度地重复冗杂的训练动作,确保康复治疗的有效性与一致性,有利于辅助患者最大程度恢复下肢运动功能,因此人体下肢康复机器人已成为帮助下肢功能障碍者重返社会最基本、最有效的手段。

机器人的执行机构作为机器人完成工作任务的主要装置,通常由各种关节与连杆机构组成。其中,机构只产生运动的转换,目的是传递或变换运动。机构的种类繁多,其设计决定了机器人的功能与工作形式,因此不同自由度和构件组成的机构往往会产生不一样的康复训练效果。

#### 1.1 国内研究现状

作为一款实用且发展前景广阔的下肢康复器械,人体下肢康复机器人的设计正逐渐朝轻量化、多元化与智能化发展,而执行机构是其完成工作任务的实体,因此对机构的设计与优化已成为研究重点。我国有关下肢康复机器人的研究起步较晚,但随着社会老龄化的加剧与医疗需求的增加,对其研究逐渐增多,并取得了一些科研成果。下面根据康复机器人执行机构的类型对其进行分类。

##### 1.1.1 连杆执行机构

赵萍等<sup>[6]</sup>以正常步态轨迹为目标轨迹,通过轨迹拟合计算执行机构的三维数据,再使用ANSYS进行建模与网格划分,优化机构的拓扑和响应面尺寸,设计出了一款轻量化的六杆机构式单自由度拟人步态下肢康复机器人(见图1)。该机器人主要由机架、传动装置、减重装置以及步态模拟机构等部分组成,如图2所示<sup>[6]</sup>。其中,机架主要用于支撑并连接机器人各组成部件;步态模拟机构是分置在左右两端的单自由度六杆机构,其末端始终固定在踏板上;减重装置是钢丝绳与减重块组成的滑轮系统,可依据患者自身需求减轻重量;传动装置选用链传动机构,从而实现稳定紧凑的远距离传动。

在康复过程中,患者的双脚会被两边呈水平相位差的步态模拟机构牵引,带动踝关节和膝关节按设定的理想步态轨迹运动,实现模拟行走训练。该下肢康复机构只需1个匀速驱动即可为下肢运动功

能障碍患者提供康复训练,具有普惠性。

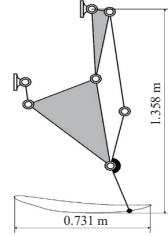


图1 单自由度六杆机构<sup>[6]</sup>  
Fig.1 Six bar mechanism with one degree of freedom<sup>[6]</sup>

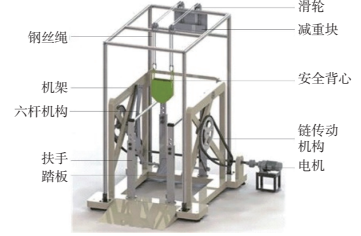
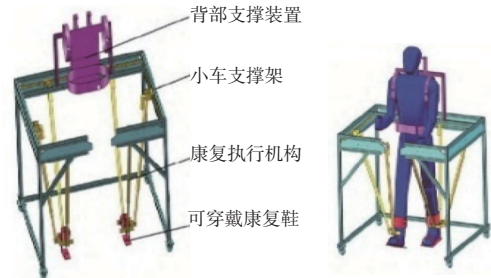


图2 拟人步态下肢康复机器人<sup>[6]</sup>  
Fig.2 Lower limb rehabilitation robot with humanoid gait<sup>[6]</sup>

李双等<sup>[7]</sup>针对偏瘫及脑卒中患者,提出一种基于并联机构的下肢康复机器人(见图3),通过机构运动带动踝关节运动从而实现下肢康复训练。整体的设计由背部支撑装置、小车支撑架、康复执行机构、可穿戴康复鞋4部分组成。其中采用两组3-PRPR并联机构作为康复执行机构,对应人体的左右下肢<sup>[7]</sup>。该类机构具有3平移的运动自由度,结构轻巧灵活,图4为单侧的康复执行机构。



(a) 结构组成 (a) Structural composition  
(b) 穿戴效果 (b) Wearing effect

图3 一种基于并联机构的下肢康复机器人<sup>[7]</sup>  
Fig.3 A lower limb rehabilitation robot based on parallel mechanism<sup>[7]</sup>

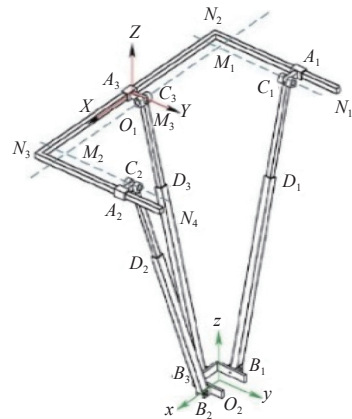


图4 单侧康复执行机构<sup>[7]</sup>  
Fig.4 Unilateral rehabilitation execution mechanism<sup>[7]</sup>

考虑到患者下肢在康复训练时会因难以保持平衡而带来不便,李双等<sup>[7]</sup>还设计了辅助康复小车,给予患者稳定的支撑。小车的背部装有支撑装置并且

具有升降功能，能够让患者自由选择站姿还是坐姿康复；同时小车的底部配备能够自由锁死的车轮，使整个装置不再受限于固定场地，大大提升了康复训练的灵活性与便利性。

### 1.1.2 踏板执行机构

许多学者都着手设计研究由连杆组成的执行机构，对其他类型执行机构的研究还有欠缺。邱波基于患者下肢与足部步态轨迹，设计了一款具有6自由度的踏板式下肢康复机器人（见图5）<sup>[8]</sup>。其主要包含减重机构、踏板机构和控制主机。其中，单侧踏板机构（见图6）两侧踏板间隔一足底距离对称，均采用独立电机控制驱动，分别控制康复机器人前进的步速、步频以及下肢关节的转动。3个电机互相独立又互相配合，一级电机的运转会带动二级电机下方滑块2在导轨上横向移动，进而再带动右侧连杆1与摇杆转动，从而驱动两侧踏板带动足跟运动；三级电机运转时，带动上方滑块3与连杆2移动，驱动踏板前端，进而使下肢关节转动，完成单侧步态周期运动。

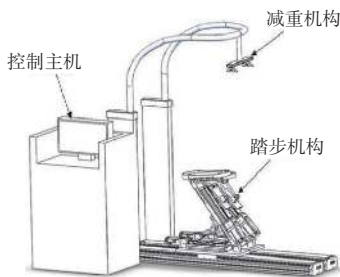
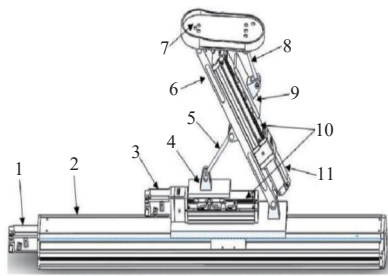


图5 踏板式下肢康复机器人<sup>[8]</sup>  
Fig.5 Foot mounted lower limb rehabilitation robot<sup>[8]</sup>



1—一级电机；2—导轨；3—二级电机；4—滑块2；5—连杆1；6—摇杆；7—踏板；8—连杆2；9—滑块3；10—导轨；11—三级电机。

图6 单侧踏板机构<sup>[8]</sup>  
Fig.6 One side pedal mechanism<sup>[8]</sup>

在进行康复训练时，控制主机会因人而异设置不同的训练模式，减重机构和踏板机构既可根据患者下肢功能障碍程度配合使用，也可以独立使用。当配合使用时，减重机构通过限制人体的重心变化，降低足底压力与前进阻力，防止患者摔倒；踏板机构通过控制驱动带动患者足底按正常轨迹反复运动，完成完整迈步动作，适用于运动功能性损伤患者的下肢康复。

### 1.1.3 柔索执行机构

邹宇鹏等<sup>[9]</sup>针对当前下肢康复机器人在结构设计、人机交互以及训练舒适性等方面的问题，通过对小腿姿态控制和人体负载力控制设计了一种可移动式柔索驱动下肢康复机器人（见图7），用于协助不同康复阶段的患者开展多模式康复训练。可移动式柔索驱动下肢康复机器人由两组1R2T平面并联柔索机构组成（见图8），每组包含4个驱动单元，可实现单侧下肢在矢状面内的3自由度运动。该下肢康复机器人配备的减重系统可依据患者实际情况自行减重，额外装配的人机交互设备可进一步提升康复训练的趣味性，延长使用时间，有助于下肢运动功能障碍患者更加轻松愉悦地进行康复训练。

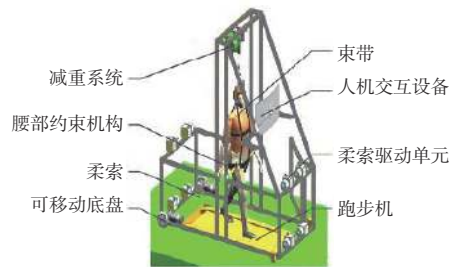


图7 一种可移动式柔索驱动下肢康复机器人<sup>[9]</sup>  
Fig.7 A kind of lower limb rehabilitation robot driven by mobile flexible cable<sup>[9]</sup>

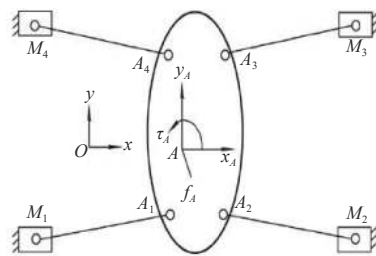


图8 1R2T平面并联柔索机构模型<sup>[9]</sup>  
Fig.8 Model of 1R2T planar parallel flexible cable mechanism<sup>[9]</sup>

## 1.2 国外研究现状

相较于国内，国外在下肢康复器材方面的研究发展得更早且技术更成熟，研究进程已从执行机构的设计与优化转变为引入驱动系统、控制系统以及人机交互技术的康复机器人的量产与临床应用。当今国外主流的下肢康复机器人可大致分为可穿戴下肢外骨骼式、足底踏板式以及其他形式。

### 1.2.1 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人

由日本山海嘉之教授研发，其名下创立的Cyberdyne公司实现产品化的可穿戴式下肢外骨骼康复机器人（hybrid assistive limb, HAL）在2013年成为全球首款获得安全认证的外骨骼机器人。图9所示的下肢骨骼康复机构由驱动装置、WLAN系统、传感系统（底面压力及外表面肌电）以及执行机构等组



成<sup>[10]</sup>。为改变突出的电机结构，在2017年申请的专利中，产品所有的主动运动关节均更改为电机驱动，通过人体踝、髌、膝关节与肌肉的组合驱动达到支撑效果（见图10）。此外，HAL还应用了生物电信号的传输，即将传感器装配于人体皮肤表面，捕获人体下肢在运动过程中实时发出的肌电信号作为指令信号，以此控制驱动机器人的运动。指令信号会源源不断地传入中枢神经系统，通过神经刺激再次构建与肌肉、关节的连接，完善患者的下肢运动功能<sup>[11]</sup>。大量训练数据反映，HAL机器人能够明显改善下肢功能障碍患者的步态幅度与频率。

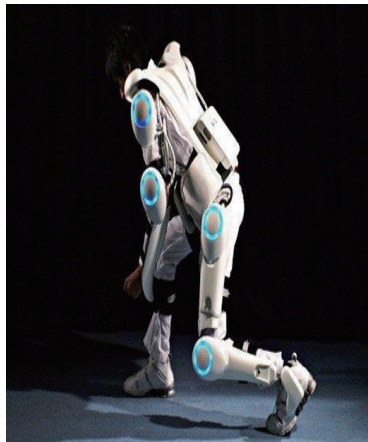


图9 HAL外骨骼  
康复机器人<sup>[10]</sup>  
Fig.9 HAL exoskeleton  
rehabilitation robot<sup>[10]</sup>

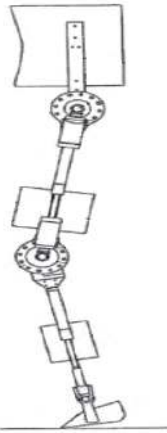


图10 HAL单侧外骨骼机构  
Fig.10 HAL unilateral exoskeleton  
mechanism

由以色列公司自主研发的可穿戴式ReWalk下肢外骨骼康复机器人（见图11）于2014年获得美国食品与药品管理局认证，成为美国首批医用外骨骼机器人<sup>[12]</sup>。ReWalk在膝关节和髌关节处均使用电机驱动，踝关节使用弹性辅助驱动。在实际使用中，机器人会通过传感系统实时感知下肢的运动方式，同步调整与优化步态。ReWalk还可依靠外骨骼提供驱动力辅助患者完成蹲起、步行以及上下台阶等动作。



图11 ReWalk下肢外骨骼康复机器人<sup>[12]</sup>  
Fig.11 ReWalk lower limb exoskeleton rehabilitation robot<sup>[12]</sup>

针对因脊髓损伤、中风偏瘫而失去行走能力的患者，美国Vanderbilt大学研制了轻量化下肢外骨骼机器人Indego<sup>[13]</sup>，该款康复机器人能够准确评估偏瘫患者的运动能力，根据康复周期进行个性化康复训练，使下肢逐步恢复运动功能。

2019年，西班牙Technaid公司研制的可穿戴式下肢外骨骼机器人Exo-H3首次亮相<sup>[14]</sup>。该款康复机器人结构轻巧，使用便捷、开放式的程序架构使得训练模式可以根据患者差异更改算法以及采用不同的控制策略<sup>[15]</sup>。

### 1.2.2 足底踏板式下肢康复机器人

相较于新兴的医用外骨骼式康复机器人，国外对足底踏板式下肢康复机器人的研究起步更早，发展也更迅速。早在2006年，德国柏林自由大学就设计了一款机械式步态康复训练器（MGT），它是世界上首个足底踏板驱动式下肢康复机器人样机<sup>[16]</sup>。在这之后，Benjamin Franklin自动化与机器人研究室又在MGT的研究成果之上，研发了基于站姿康复的6自由度HapticWalker步态康复机器人<sup>[17]</sup>。考虑到康复疗程的周期性与训练方式的单一性，为了增强康复过程的趣味性，该产品添加了虚拟现实技术，在患者康复训练的过程中提供虚拟情景，提升患者的训练时长与参与积极性。该机器人的活动踏板能够模拟不同的足底运动轨迹，为患者提供上下坡、弯道等特殊生活场景的模拟，实现了训练模式的创新。

为了使患者更直观地了解自身康复状况，及时调整优化康复方案，NICHOLSON-SMITH等<sup>[18]</sup>提出了一种新型主动移动末端执行器脚踏板式下肢康复机器人（见图12），其具有多种新颖功能，包括双重可用性、机械可调的最大力和扭矩、固有的安全性、便携性以及远程操作能力。踏板式的结构能够提供输入以轻便地帮助患者完成下肢治疗任务，同时机器人基于患者的自主运动，通过额外的肌肉驱动记录患者的康复状态，实现人机交互的训练模式。

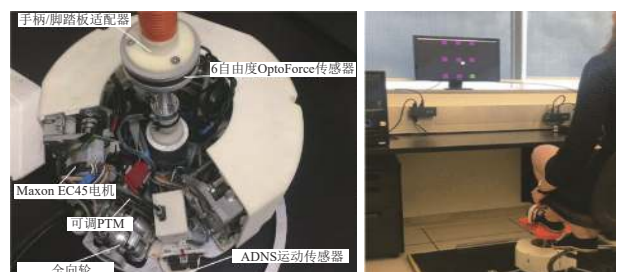


图12 一种主动移动末端脚踏板式下肢康复机器人<sup>[17]</sup>  
Fig.12 A kind of active moving end step plate  
lower limb rehabilitation robot<sup>[17]</sup>

## 2 机构特性分析

机构一般指为传递、转换运动或实现某种特

定的运动而由若干构件组成的机械装置。进行机构特性分析可以明晰机构的工作特性和实际应用效果,为构件的设计安装,如构件的强度、振动、系统的动力性能等提供相关的理论依据和计算基础。

### 2.1 机构自由度(F)分析

机构自由度是指机构具有确定运动时独立运动参数的数目,针对机构自由度的求解,从原理上可以分为如下几类:

(1) CHEBYCHEV、KUTZBACH等提出的方法,这类方法可根据机构中构件的数量、运动副数量与自由度、独立闭环数量等参数之间的关系来确定机构自由度,但忽略了对过约束的影响<sup>[19]</sup>。

(2) ANGELES等<sup>[20]</sup>提出的方法,即通过计算机机构的雅可比矩阵确定机构的自由度,但难以计算复杂机构。

(3) HUNT等<sup>[21]</sup>提出的方法,即通过分析机构的运动螺旋系,先对其秩进行求解,再得到机构自由度,但不适合并联机构的自由度求解。

(4) 黄真等<sup>[22]</sup>提出的方法,针对过约束机构的自由度求解,应用反螺旋理论,对公约束定义统一的修正G-K公式。

### 2.2 机构工作空间(W)分析

机构工作空间分析是机构分析的基础,也是机构实际应用前必不可少的重要步骤。机构的工作空间指的是机构末端输出装置的工作区域,是评判工作性能的主要指标,工作空间主要分为可达工作空间、灵活工作空间、可控工作空间<sup>[23]</sup>。一般来说串联机构工作空间分析相对容易,并联机构因为角度、位置上的局限性,工作空间的求解相对困难。目前通用的解决方法有数值法和解析法,具体如下:

数值法在研究过程中使用较多,其核心算法是根据工作空间边界必为约束起作用边界的性质,利用位置逆解和K-T条件搜索边界点集,具体可分为雅可比法、蒙特卡罗法、优化法等<sup>[24]</sup>。这些传统算法往往依赖于位置逆解,因而只适用于特定情况并且难以求得精确解。为了对数值法进一步优化,MASORY等<sup>[25]</sup>采用数值积分的方式计算机构工作空间的体积,结果贴合实际;BRISAN等<sup>[26]</sup>采用遗传学算法分析并联机器人机构的工作空间;CHENG等<sup>[27]</sup>则采用离散算法计算机器人平台的工作空间参量。

解析法则大多依赖于机构位置解,存在一定局限性。其核心思想是将并联机构拆分为大量单开链形式,基于曲面包络理论求解各单开链子空间边界,接着利用曲面求交技术得到完整工作空间边界<sup>[28]</sup>。在实际应用中,出于对机构工作空间位置求解复杂

性的考虑,通常会使用位置逆解分析。

### 2.3 机构奇异(S)分析

机构工作空间之间存在的特殊分布与关系都属于机构奇异分析。奇异位形作为机构特有的属性,是合理确定有效工作空间、制定各向同性、可操作性以及灵活性等性能指标的重要基础<sup>[29]</sup>,奇异也是所有机构都不可避免的现象。当机构达到临界状态时,其所处的相应位形将使自由度发生变化,即判断此刻机构处于奇异位形,并可能出现运动分岔现象。

由于串联机构的工作空间相对固定,近年来国内外对机构奇异的分析都基于并联机构,主流的分析有:GOSELIN等<sup>[30]</sup>通过比较机构传输系统线速度、角速度的分析方法;HEE-CHOI等<sup>[31]</sup>对并联髋关节试验机奇异分析时所使用的Grassman线几何方法;张鹏程等<sup>[32]</sup>对一个4自由度并联机构的奇异进行分析时采用的雅可比矩阵分析方法;韩先国等<sup>[33]</sup>对3UPS-S单支链的奇异进行分析时所依据的反螺旋理论。

### 2.4 机构步态模拟分析

下肢康复机器人的研发是为了辅助下肢功能障碍患者恢复行走能力,提高生活质量。通过执行机构带动下肢周期往复运动,从而模拟出人体下肢的运动形式,其中人体的行走步态是下肢康复训练的关键影响要素。因此,机构步态模拟分析也是机构分析中不可或缺的一环。

在人体行走运动的过程中,下肢步态轨迹近似于一个椭圆<sup>[34]</sup>。同时人类的行走过程还是周期性的,行走动作主要通过髌膝踝关节的屈伸与肌肉的牵引完成。因此,行走过程的稳定性、周期性以及协调性是评判步态是否正常的重要指标<sup>[35]</sup>。在实际临床应用中,步态模拟分析经常被视为关键步骤,可用于初步病例诊断、训练康复评价、术后恢复监测等。步态模拟分析的过程包含诸多参数,如运动过程时长、肌电活动数据、运动学和动力学参数等<sup>[36]</sup>。为了实时监测患者的步态数据,在部分康复机器人中还添加了传感器进行检测,如EMG<sup>[37]</sup>传感器、EEG传感器、地面压力板等。检测完毕后,将传感器捕获的数据导入MATLAB进一步处理,得到所设计机构轨迹点的形状与时序以及步态(步频、步幅)参数,复现步态轨迹。相关的技术有基于角速度检测步态相位的经典阈值算法<sup>[38]</sup>和基于肌电传导信号预测下肢运动意图的肌肉骨骼模型<sup>[39]</sup>。

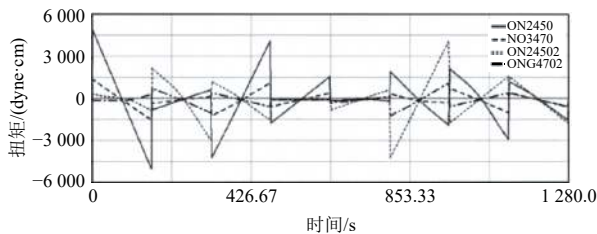
### 2.5 机构运动学仿真分析

为了检验下肢康复机器人实行步态训练的有效性与可行性,要进一步构建下肢康复训练仿真模型。

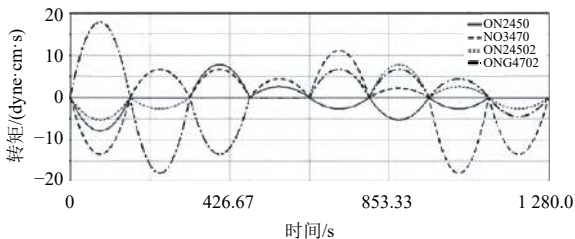


即将真实情况下的步态轨迹和仿真分析得到的步态轨迹进行对比,得到在水平与垂直方向上的误差,通过分析误差验证仿真结果是否合理。

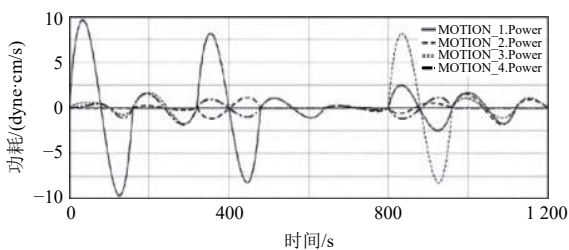
尚会超等<sup>[40]</sup>首先通过理论计算得出运动学与动力学参数,接着使用MATLAB进行数值计算,与CGA步态标准比较,从而验证所建模型的正确性;并且通过Adams模拟仿真,得到关节角速度、关节角动量、关节扭矩等变化曲线,各关节参数仿真曲线如图13所示。最后选取RLA八分法中各时间节点的数值和理论计算得到的数值进行比较<sup>[40]</sup>,分析了计算中的数值误差并检验结果的合理性,为后续下肢康复机器人驱动控制的实行提供参考。



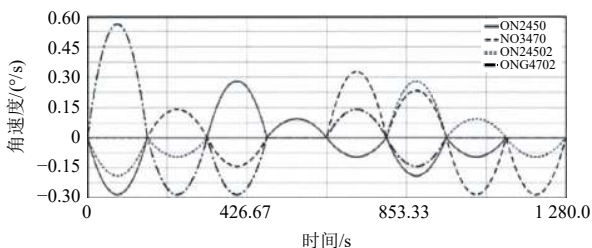
(a) 各关节扭矩图  
(a) Torque diagram of each joint



(b) 各关节角动量  
(b) Angular momentum of each joint



(c) 各关节功耗  
(c) Power consumption of each joint



(d) 各关节角速度  
(d) Angular velocity of each joint

图13 各关节参数仿真曲线<sup>[39]</sup>  
Fig.13 Simulation curves of each joint<sup>[39]</sup>

王逸铭等<sup>[41]</sup>首先将模型导入Adams建立人机模型,接着对各个关节设置位置信号,通过给定运动周期,得到髋关节、膝关节相对时间的角度变化规律。将所得到的数据进行时间取点采样导出,与CGA标准步态数据一同导入MATLAB进行曲线拟合,得到一个周期内髋关节与膝关节的运动范围(见图14)。经过验证符合人体正常行走规律,因此通过仿真得到的拟合曲线与CGA标准变化规律基本吻合。最后,大量测试结果显示与患者下肢高度配合,进一步验证了执行机构的合理性。

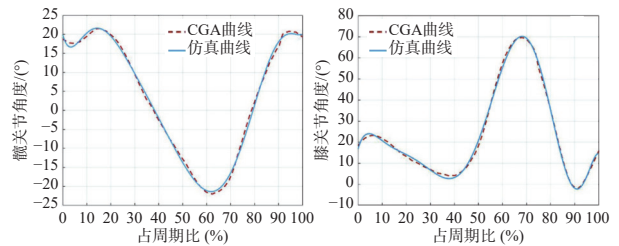


图14 髋关节与膝关节周期运动范围拟合曲线<sup>[40]</sup>  
Fig.14 Fitting curve of hip and knee periodic motion range<sup>[40]</sup>

## 2.6 机构人机交互分析

患者在使用下肢康复机器人的过程中,会与周围环境共同构建完整的人机交互关系,既要充分考虑人体的基本素质、生理特点等,又充分考虑机器的性能、参数等<sup>[42]</sup>。因此,人机交互分析对于机构的设计来说是必不可少的,良好的人机交互关系能有效提高康复安全性以及交互效率。随着当下人工智能的发展,交互的方式不再局限于简单的语言、手势,而是通过脑电、肌电信号完成。脑电信号和肌电信号作为与人体运动密切相关的生理信号,在人机交互过程中具有良好的准确性和鲁棒性。脑电信号由不同频率脑电波和大量神经元细胞组成,具有精细认知和生理状态识别功能;肌电信号携带丰富的人体信息,如肌力、刚度、疲劳、收缩速度等,采集简单,可以精准预测人体的运动意图。这些智能化的交互方式都是为了确保患者与康复机器人高度契合,实现理想的康复效果。

## 3 结论

人体下肢步态康复机器人作为新一代辅助运动功能障碍患者恢复下肢运动能力的重要手段,其在康复领域和临床应用上有着重要作用。随着科技的进步,我国在下肢康复机器人领域得到了较为全面的发展,但相较于国外还存在一定的差距。国内大部分学者对下肢康复机器人的研究重点是对机构构型的设计与优化,研究角度主要是机构学与运动学

的仿真模拟,从如何使人体行走步态模拟更加精确、执行机构更加简单、测试环境更加可靠的角度进行分析,对智能控制系统、训练模式以及康复评价等方面的研究尚存不足。

国外对于下肢康复机器人的研究更为成熟,已经有多家企业能够独立研发并拥有完善的生产链,其研究重点也更多放在了基于人机交互的控制系统与训练模式的升级上,这两方面将是未来康复机器人发展的主要方向。

鉴于当前的发展形势,为了提供更好的康复训练体验,针对下肢康复机器人的研究需从如下几个方面实现功能拓展与机构优化:

(1) 提炼、精确实验数据来源。设计产品时引用的样本数据要尽可能贴近使用者日常,需在使用者的真实生活状态下采集步态数据,并提炼、精确采集的样本实验数据,使设计内容更具可行性与代表性。

(2) 提高下肢康复机构柔性。通过完善下肢康复机器人执行机构的选材和构型,采用转矩控制的方式提高康复机构柔性,避免因机构刚度过高而再次伤害患者下肢。同时,可进一步调整电流控制器的电流指令来减少转矩限制,减轻转矩监测过程噪声<sup>[43]</sup>。

(3) 完善机构功能及进行轻量化设计。为了保证康复机器人运行的灵活性以及整体系统的稳定性,需要对所设计机构的功能进行完善。这里同样可在机器人执行机构的材料和构型方面进行改进设计,并进行轻量化研究,减轻固定带来的负担,增强机器人运动的灵活性。

(4) 建立康复效果评价系统。考虑到在康复训练过程中,患者的助力能力、助力效果、骨骼稳定性等指标不能够被实时监测,并且每一次康复训练结束后不能立即呈现训练的医疗效果,因此需要建立完善的评价系统。康复效果评价系统可以更好地得到患者的反馈,了解患者的恢复程度与满意度,以便及时进入下一康复流程。

#### 参考文献

- [1] 戴卫东. 中国长期护理制度建构的十大议题[J]. *中国软科学*, 2015(1): 28-34.
- [2] 黄明安, 陈钰. 中国人口老龄化的现状及建议[J]. *经济研究导刊*, 2018(10): 54-58,66.
- [3] 嵇建成. 基于人机耦合动力学建模的康复助行机器人研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.
- [4] MARTÍNEZ-VELILLA N, CADORE E L, CASAS-HERRERO A, et al. Physical activity and early rehabilitation in hospitalized elderly medical patients: systematic review of randomized clinical trials[J]. *J Nutr Health*, 2016, 20(7): 738-751.
- [5] CLARK D J. Automaticity of walking: functional significance, mechanisms, measurement and rehabilitation strategies[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 246-254.
- [6] 赵萍, 宋词, 鲍紫怡, 等. 基于单自由度Watt机构的拟人步态下肢康复机器人设计[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(9): 1153-1159.
- [7] 李双, 李艳文, 赵美欣, 等. 一种并联下肢康复机构的综合与分析[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(3): 55-64.
- [8] 邱波. 踏板式下肢康复机器人的设计与研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [9] 邹宇鹏, 王诺, 刘凯, 等. 可移动式柔索驱动下肢康复机器人设计及分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 22-26,38.
- [10] BECIRID. Cyberdyne HAL-5-exoskeleton robot[EB/OL]. (2009-10-04)[2023-03-05]. <https://www.robaid.com/bionics/cyberdyne-hal-5-exoskeleton-robot.htm>.
- [11] LEE S, SANKAI Y. Power assist control for walking aid with HAL-3 based on EMG and impedance adjustment around knee joint[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland, 2002: 1499-1504.
- [12] FARRIS R J, QUINTERO H A, GOLDFARB M. Preliminary evaluation of a powered lower limb orthosis to aid walking in paraplegic individuals[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2011, 19(6): 652-659.
- [13] MILIA P, SALVO F D, CASERIO M, et al. Neurorehabilitation in paraplegic patients with an active powered exoskeleton (Ekso)[J]. *Digital Medicine*, 2016, 2(4): 163-168.
- [14] Technaid. Technaid at Global Robot Expo 2019[EB/OL]. (2018-05-11)[2022-03-28]. <https://www.technaid.com/technaid-at-global-robot-expo-2019/>.
- [15] RODRIGUEZ-UGARTE M S, IÁÑEZ E, ORTIZ-GARCIA M, et al. Effects of tDCS on Real-Time BCI detection of pedaling motor imagery[J]. *Sensors(Basel)*, 2018, 18(4): 1136.
- [16] TONG R K, NG M F, LI L S. Effectiveness of gait training using an electromechanical gait trainer, with and without functional electric stimulation, in subacute stroke: a randomized controlled trial[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(10): 1298-1304.
- [17] SCHMIDT H, HESSE S, BERNHARDT R, et al. HapticWalker-a novel haptic foot device[J]. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2005, 2(2): 166-180.
- [18] NICHOLSON-SMITH C, MEHRABI V, ATASHZAR S F, et al. A multi-functional lower- and upper-limb stroke rehabilitation robot[J]. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2020, 2(4): 549-552.
- [19] TASI L W. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York: John Wiley&Sons, 1999: 9-16.
- [20] ANGELES J, GOSELIN C. On the determination of the degree of freedom of simple and complex kinematic chains[J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 1988, 12(4): 219-226.
- [21] HUNT K H. Kinematic geometry of mechanisms[M].

- Oxford: Oxford University Press, 1978: 375-382.
- [22] 黄真, 刘婧芳, 李艳文. 150年机构自由度的通用公式问题[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(1): 1-14, 39.
- [23] 周玉华. 并联机器人运动参数非接触测量模型研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [24] 赵剑波. 染色体切割装备宏动系统研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [25] MASORY O, WANG J. Workspace evaluation of Stewart platforms[J]. *Advanced Robotics*, 1994, 9(4): 443-461.
- [26] BRISAN C, CSISZAR A. Computation and analysis of the workspace of a reconfigurable parallel robotic system[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(11): 1647-1668.
- [27] CHENG G, QIU B, YANG D, et al. Workspace analysis of 3-CPS parallel micro-manipulator for mirror active adjusting platform[J]. *J Mech Sci Technol*, 2013, 27(12): 3805-3816.
- [28] 李鹭扬. 6-SPS型并联机床若干关键理论研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [29] 艾青林, 祖顺江, 胥芳. 并联机构运动学与奇异性研究进展[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(8): 1345-1359.
- [30] GOSSELIN C, ANGELES J. Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematics Chain[J]. *IEEE Trans Robot Autom*, 1990, 6(3): 281-290.
- [31] CHOI H B, RYU J. Singularity analysis of a four degree-of-freedom parallel manipulator based on an expanded  $6 \times 6$  Jacobian matrix[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 57(57): 51-61.
- [32] 张鹏程, 张铁. 基于矢量积法的六自由度工业机器人雅可比矩阵求解及奇异位形的分析[J]. 机械设计与制造, 2011(8): 152-154.
- [33] 韩先国, 刘岩龙. 3UPS-S 并联机构单支链驱动奇异分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 6-9.
- [34] 王永敏. 脚踏式下肢康复训练机器人的研究与实现[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
- [35] 丁逸苇, 涂利娟, 刘怡希, 等. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人研究进展[J]. 机器人, 2022, 44(5): 522-532.
- [36] PRAKASH C, KUMAR, MITTAL N. Recent developments in human gait research: parameters, approaches, applications, machine learning techniques, datasets and challenges[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2016, 49(1): 1-40.
- [37] XU J J, LI Y F, XU L S, et al. A multi-mode rehabilitation robot with magnetorheological actuators based on human motion intention estimation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(10): 2216-2228.
- [38] BEHBOODI A, ZAHRADKA N, WRIGHT H, et al. Real-Time detection of seven phases of gait in children with cerebral palsy using two gyroscopes[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(11): 2517.
- [39] HASSANI W, MOHAMMED S, RIFAÏ H, et al. EMG based approach for wearer-centered control of a knee joint actuated orthosis[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 990-995.
- [40] 尚会超, 冀涛, 付晓莉, 等. 下肢康复机器人的结构设计与动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2022(5): 253-256, 260.
- [41] 王逸铭, 韦依娜, 胡秀枋, 等. 绳索并联驱动下肢康复机器人的设计与分析[J]. 生物医学工程研究, 2021, 40(4): 401-406.
- [42] 王秋惠, 姚景一. 下肢外骨骼康复机器人人因工程研究进展[J]. 图学学报, 2021, 42(5): 712-718.
- [43] 薛强, 周金满, 杨硕. 应用于下肢功能障碍者的康复机器人: 综述[J]. 制造业自动化, 2022, 44(7): 50-55.

上接第29页

下一步工作是修正系统误差, 如传感器的工程化设计, 确保一致性, 并对采集的光电信号和个体差异进行修正; 提高系统测量的准确性, 并开展工程化设计和基于相关标准要求的受控低血氧试验验证; 校准测量结果, 并与在线的相关测量系统进行比较, 从而验证该测量系统, 以实现产业化输出。

#### 参考文献

- [1] JÖBSIS F F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters[J]. *Science*, 1977, 198(4323): 1264-1267.
- [2] 钱志余, 李赓韬. 功能近红外光谱技术(fNIRs)临床应用综述[J]. *生命科学仪器*, 2013, 11(3): 45-52.
- [3] NURJAYADI M, ROMUNDZA F, MOERSILAH M. Application of the Lambert-Beer legal concept in learning spectroscopy UV-Vis with simple spectrophotometers[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2021, 2331(1): 040009.
- [4] 苏海霞, 张朝晖, 赵小燕, 等. 太赫兹谱定量测试中朗伯比尔定律表征形式分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(12): 3180-3186.
- [5] 钟文韬. 基于近红外光谱的脑血氧监测方法研究及系统初步实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [6] 腾轶超. 近红外空间分辨光谱技术及其在脑氧无损检测中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [7] 孙长龙, 季忠, 钟文韬. 基于近红外光谱的脑血氧无创监测系统研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4): 136-144.
- [8] WANG F, DING H S, TIAN F H, et al. Influence of overlying tissue and probe geometry on the sensitivity of a near infrared tissue oximeter[J]. *Physiol Meas*, 2001, 22: 201-208.
- [9] 赵凯华. 新概念物理教程——光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.