

健身车式下肢康复仪结构设计及运动学分析

连迅,李文慧

(文华学院 机械与电气工程学部,湖北 武汉 430070)

摘要:提出一种健身车式下肢康复装置的结构设计,通过踏板式康复执行机构与外骨骼辅助固定机构的有机结合,安全、有效地保持或恢复老年人、脑卒中及 SCI 患者的下肢运动能力,并提供足够的安全保证。采用 SolidWorks 进行三维软件模拟,完成零件建模、装置总装图和运动仿真。仿真结果证明:该结构安全,具有广阔的发展前景和实用价值。

关键词:康复训练;健身车;运动学分析;仿真;SolidWorks

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0146-03

Structure Design and Kinematics Analysis of Exercise Bike Type Lower Limb Rehabilitation Instrument

LIAN Xun, LI Wenhui

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wenhua College, Wuhan 430070, China)

Abstract: A structural design of an exercise bike-type lower limb rehabilitation device is proposed, in which a pedal-type rehabilitation actuator is combined with an exoskeleton auxiliary fixation mechanism to maintain or restore effectively the lower limb exercise ability of the elderly, stroke and SCI patients with adequate security guarantees. SolidWorks for 3D software simulation is conducted to, complete part modeling, device assembly drawing and motion simulation, which has broad development prospects and practical value.

Keywords: rehabilitation training; exercise bike; kinematic analysis; simulation; SolidWorks

0 引言

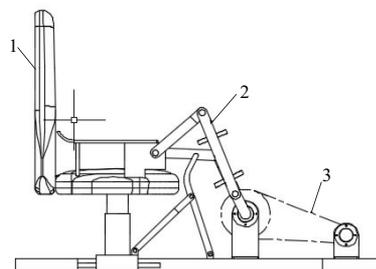
随着人口老龄化问题越来越严重,年龄增大造成的老年疾病和身体机能退化导致严重的运动障碍,需要大量的康复护理人员负责照顾和护理,这对社会 and 患者家庭都是极大的负担^[1]。另一方面,由于脑卒中引起下肢障碍的人群近年来也逐步增加。此外,由于交通事故以及其他致伤因素造成的脊髓损伤(SCI)患者也呈逐年递增趋势。

针对上述状况,在康复治疗医师资源缺乏的情况下,研究开发出一种可以为脑卒中与 SCI 导致的偏瘫、截瘫等下肢障碍人员及身体机能退化导致运动障碍的老年人提供康复训练治疗的自动化装置,对提高年迈老人独立自主生活的能力、帮助脑卒中与 SCI 导致的偏瘫患者树立重新行走的信心、减轻缺乏康复治疗医师的社会负担等是非常有必要的^[2]。

1 健身车式下肢康复仪的整体方案设计

目前下肢康复装置采取的方案可分为三种:外骨骼减重步行康复训练机器人、活动踏板式减重步行康复训练机器人、穿戴式外骨骼辅助步行助力机器人系统^[3]。这三种方案各有利弊,通过对其优缺点进行分析,本设计在以上方案的基础上进行了改进。健身车式下肢康复仪主要

的机构组成包括减重装置、康复训练执行机构、康复训练辅助固定机构和动力源,如图 1 所示。



1—减重装置;2—辅助固定机构;3—执行机构。

图 1 健身车式下肢康复仪的机构组成

减重装置:传统的悬挂式或腰胯固定式减重机构在使用者的舒适性方面有所欠缺。本设计采用坐式减重机构,可以提高使用者的舒适性,同时免除训练时所需的下肢支撑力,给患者下肢减轻压力。

康复训练执行机构:采用自行车踏板运动的形式,由动力元件带动踏板运动,患者足部随踏板的运动自适应地完成被动形式的康复训练。

康复训练辅助固定机构:采用外骨骼辅助方式固定,帮助患者在康复训练过程中步态轨迹稳定,同时避免康复

第一作者简介:连迅(1976—),男,湖北武汉人,副教授,硕士,研究方向为机械结构设计及运动分析。

通信作者简介:李文慧(1984—),女,湖北武汉人,副教授,硕士,主要从事机械设计及理论相关教学和科研工作。

运动时下肢朝外侧摆动所造成的二次伤害。

动力源:采用单个电机给康复训练执行机构提供动力。通过对电机的选型,选择适合减速机构对电机输出转速进行降速,传递给康复训练执行机构适合的转速。

2 健身车式下肢康复仪各组成部分的方案设计

2.1 减重装置的方案选择

传统的悬挂式减重装置在减重效果上虽有不错的表现,但会对患者腰背部造成不适,在舒适性上稍显不足。而采用坐式的减重机构,使用者患肢不需要支付任何的支撑力,在舒适性上有较大提升。本次设计直接采用座椅作为减重装置^[4]。

针对不同使用者身高差异和腿部骨骼长度不同的问题,将座椅式的减重机构设计成前后可移动的。常见的纯机械往复移动机构有:凸轮推杆机构、抽水唧筒(手压式水泵)机构(移动导杆机构)、曲柄滑块机构。

1) 凸轮推杆机构

使用凸轮推杆机构让减重座椅前后移动。由于座椅自身的质量和机构所安装位置需在座椅底部的特殊性,使凸轮的转动必须要有很大的转矩。如果使用电机控制凸轮转动来使座椅位置移动,会使成本大幅增加,且需要空间来设计电机的安装位置,产生不必要的麻烦。

2) 抽水唧筒机构(移动导杆机构)

抽水唧筒机构在省力上有不错的作用,但如果用来移动座椅位置,就必须要有较大的安装空间,以便于操作。

3) 曲柄滑块机构

曲柄滑块机构结构简单,可以节省空间,曲柄设计合理也可以有较为不错的省力功能^[5]。

综合上述分析,最后确定使用曲柄滑块机构来调节减重座椅的前后位置。

2.2 康复训练执行机构方案选择

采用单个电机给予动力,利用健身车形式的踏板运动完成康复训练。该健身车式下肢康复训练装置整体采用健身车的结构框架,主动施加动力源,而避免让使用者自身施力。使用减速电机带动齿形带轮转动,从而带动踏板曲柄转动,使用者足部在曲柄踏板上固定,由曲柄的规律性运动带动整个受伤下肢跟随踏板的转动而运动,以达到辅助康复治疗的作用。设计的康复训练执行机构如图2所示。

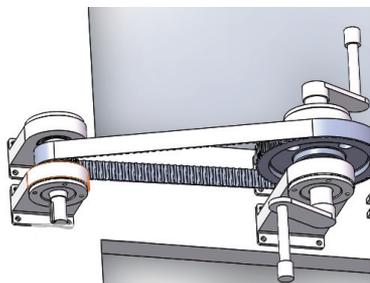


图2 康复训练执行机构

通过健身车或脚踏车的骑行运动与其独特的特点,使用者可借助曲柄的动作完成锻炼与康复活动。对任意的单一曲柄,其运动轨迹均为有迹可循的闭链曲线,对使用者的下肢在相同轨迹内运动有所保证,能确保康复训练的安全有效性;同时,在单个的运动周期中,其有章可循的运动特点在令使用者感到舒适的同时,控制方面相对简单容易,且系统的平稳运行也有所保障。因此,使用健身车骑行运动的康复方式,对康复训练的安全性和可靠性是有保障的。

2.3 康复训练辅助固定机构的方案设计

采用现有装置的康复训练装置执行机构类型,在训练过程中可能会有患肢的摆动而造成二次伤害的可能。因此,需要在此基础上增加一个辅助机构,来保证在康复训练过程中避免二次伤害的出现。设计结构如图3所示。

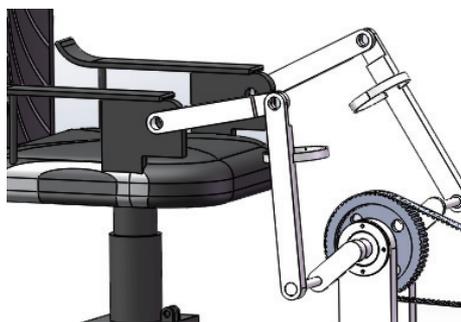
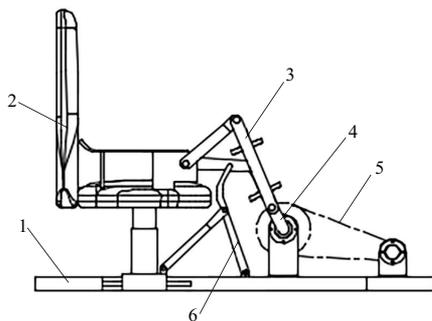


图3 康复训练辅助固定机构

已有的外骨骼执行机构方案中,在保证患肢的固定上有很可靠的能力,因此将其作为踏板式执行机构的辅助机构联合使用。在踏板式康复执行机构运转时,踏板曲柄转动,两块外骨骼固定板依次连接在踏板曲柄上,大腿外骨骼板连接在座椅上,形成一个曲柄摇杆机构。使用者的患肢随曲柄摇杆机构一同运动,在踏板式执行机构的训练基础上,附加一个保险固定装置,令使用者的康复运动稳定、往复循环,避免了患肢摆动导致二次伤害的可能。

根据各功能结构方案的确定,本设计整体将在健身车的结构框架上进行改装。整体组成有以下几部分:底座、卧式齿轮减速电机、齿形同步带、踏板曲柄、外骨骼辅助固定机构、座椅减重装置和座椅平移装置,如图4所示。其工作过程是以卧式齿轮减速电机为原动件,通过弹性柱销联轴器与齿形同步带轮轴进行连接,带动齿形同步带轮转动,将动力传输给与大齿形同步带轮轴连接的踏板曲柄,利用骑行运动的特点,令使用者患肢自适应地进行康复锻炼,同时在外骨骼辅助固定机构的帮助下避免意外伤害的发生。使用者在使用前可通过座椅平移装置的曲柄滑块机构,调整座椅前后位置,来保证在康复训练过程中坐姿的舒适性。

此装置采用的是被动锻炼的形式,患者可以坐在座椅上,减轻了对腿部的负荷,同时添加辅助装置保证肢体在一个平面运动,有效防止肢体摆动,避免在进行康复锻炼时造成二次伤害,且整个装置的传动平稳,无刚性冲击,只需由一个电机驱动,操作简单,占据位置也较小。



1—底座;2—座椅减重装置;3—外骨骼辅助固定机构;
4—踏板曲柄;5—齿形同步带;6—座椅平移装置。

图4 健身车式下肢康复装置

3 关键结构的设计计算

3.1 曲柄踏板与辅助外骨骼的设计计算

曲柄踏板与辅助外骨骼组成了曲柄摇杆机构,按常规算法计算曲柄摇杆机构,根据小腿外骨骼辅助固定板长度、踏板曲柄长度和大腿外骨骼辅助板长度,计算出机架长度^[6]。但是计算出曲柄摇杆机构的摇杆摆角会出现过大的情况,而摇杆的运动轨迹关乎大腿的运动轨迹,摇杆摆角必须是一个适宜的角度。因此在设计曲柄摇杆机构时,必须先设定好大腿外骨骼辅助板的长度和其作为摆杆时的摆角、机架的长度,通过这两个已知条件计算出其他杆件的长度。

身高 160~180 cm 的正常人小腿骨骼和大腿骨骼长度为 45 cm 左右。图 5 中 AB 为踏板曲柄,BC 为小腿外骨骼辅助固定板,CD 为大腿外骨骼辅助板,A、D 为机架,OC 为使用者大腿。

其中已知条件为大腿外骨骼辅助板 $CD = 30$ cm,其摆角为 45° ,随 CD 摆动的大腿长 $OC = 45$ cm,绘图后可知大腿与座椅平面的摆动角度为 41° ,在人体髋关节正常活动范围之内。设定机架 A 与 D 的相对位置如图 5(a) 所示,直线长度约为 45 cm,与水平面的角度为 45° 。通过以上已知条件可以列方程计算出踏板曲柄 AB 与小腿外骨骼辅助固定板 BC 的长度。

通过已知条件可以测量出大腿外骨骼辅助板处于两个极限位置时 AC_1 和 AC_2 的长度为 $AC_1 \approx 54$ cm, $AC_2 \approx 32$ cm,由此可根据几何关系列出方程组

$$\begin{cases} AB_1 + B_1C_1 = AC_1 \\ B_2C_2 - AB_2 = AC_2 \end{cases}$$

其中 $AB_1 = AB_2 = AB, B_1C_1 = B_2C_2 = BC$,即

$$\begin{cases} AB + BC = 54 \\ BC - AB = 32 \end{cases}$$

解得: $AB = 11$ cm; $BC = 43$ cm。

小腿外骨骼辅助固定板 BC 长度为 43 cm,长度范围(45 cm 左右)合适;踏板曲柄 AB 长度为 11 cm。

将 D 点在水平方向上向左平移 20 cm(椅子的位移行程),D 点位置不变,依照上述计算出的曲柄踏板 AB 和小腿外骨骼辅助固定板 BC 长度以及已知的大腿外骨骼辅

助板 CD 长度,可以得出图 5(b)。验算可知,设计的曲柄摆杆机构满足座椅前后平移 20 cm 的条件,而不会破坏其作为曲柄摆杆机构的本质。此时,大腿与座椅平面的摆动角度为 -9° ,在人体髋关节正常活动角度范围内。

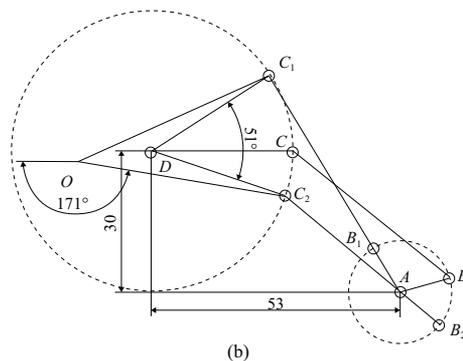
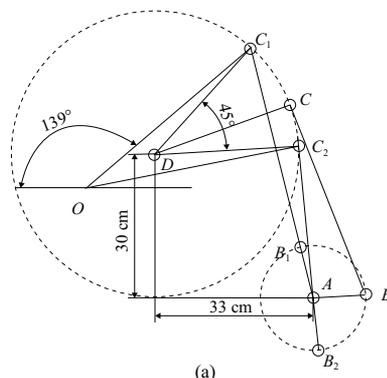


图5 曲柄连杆机构结构简图

3.2 减重装置平移机构的设计计算

减重装置平移机构的位移行程设计为 20 cm,与康复训练装置执行机构辅助机构所设计的曲柄连杆机构计算结果吻合。设计行程为 20 cm,主要是为了适应不同身高或腿长的人能保持舒适的坐姿,而不会在进行康复锻炼时坐姿感到别扭,属于人性化设计。平移机构采用曲柄滑块机构^[7]。

设计的曲柄滑块机构简图如图 6 所示。此时的座椅处于最前初始位置,向左下压曲柄把手可使座椅滑块向后移动。当达到行程终点时,由于滑块被限位,曲柄把手无法继续向下压,由最后初始位置向前移动也是如此。滑动座椅到任意位置后,患者坐上椅子,由患者的体重产生压力,使座椅不会在进行康复运动时前后晃动。此滑块机构有曲柄存在的条件为 $a + e \leq b$,其中 $a = 30$ cm; $e = 2$ cm; $b = 38.1$ cm,满足此曲柄滑块机构存在曲柄的条件,设计成立。曲柄 a 段与连杆 b 连接的节点上部分设计长度使其大于 a 的长度,可使其达到杠杆的效果,在平移座椅位置使可以达到省力的效果。

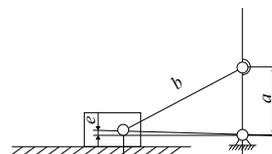


图6 曲柄滑块机构结构简图

(下转第 160 页)