

# 基于人体生物力学的颈椎动力外骨骼的设计与运动学分析

戴 玥<sup>1,2</sup>, 石 萍<sup>1,2</sup>, 郑宏宇<sup>1,2</sup>, 李素姣<sup>1,2</sup>, 方凡夫<sup>3</sup>, 喻洪流<sup>1,2</sup>

(1. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 上海康复器械工程技术研究中心, 上海 200093;  
3. 上海长海医院 康复医学科, 上海 200433)

**摘要:** 针对神经根型与交感神经型颈椎病, 基于颈椎牵引、前屈/后伸、左/右侧屈及旋转运动康复治疗方式, 设计了一种基于 6-SPS/CS 型并联机构的可穿戴式颈椎动力外骨骼。首先, 基于人体生物力学进行外骨骼机构设计与颈椎运动分析, 采用空间坐标变换方程和闭环矢量法对外骨骼等效并联机构进行运动学逆解分析; 其次, 利用 ADAMS 软件对外骨骼等效机构模型进行运动仿真分析, 求解出位移、速度和加速度随时间的变化曲线, 并与逆运动学理论模型进行对比分析, 进一步验证了康复运动范围的可行性; 最后, 对颈椎动力外骨骼样机的康复功能进行了实验评估分析, 外骨骼样机能够实现的运动范围为冠状轴 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、矢状轴 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 及垂直轴 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ , 符合人体颈椎活动需求。结果表明, 6-SPS/CS 型颈椎动力外骨骼能够辅助人体颈椎进行牵引、前屈/后伸、左/右侧屈及水平旋转运动康复训练, 该研究为后续的机构优化与临床应用提供了基础。

**关键词:** 外骨骼; 并联机构; 颈椎病; 生物力学; 运动学

**中图分类号:** TH 112 **文献标志码:** A

## Design and kinematics analysis of powered cervical exoskeleton based on human biomechanics

DAI Yue<sup>1,2</sup>, SHI Ping<sup>1,2</sup>, ZHENG Hongyu<sup>1,2</sup>, LI Sujiao<sup>1,2</sup>, FANG Fanfu<sup>3</sup>, YU Hongliu<sup>1,2</sup>

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai 200093, China; 3. Department of Rehabilitation Medicine, Changhai Hospital of Shanghai, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** For radiculopathy and sympathetic type of cervical spondylosis, a wearable powered cervical exoskeleton based on 6-SPS/CS parallel manipulator was designed based on the rehabilitation therapy of cervical traction, flexion/extension, left/right lateral flexion and rotation. Firstly, the exoskeleton manipulator design and cervical motion analysis were designed based on human biomechanics, and the inverse kinematics analysis of the exoskeleton equivalent parallel manipulator was carried out by using the space coordinate transformation equation and the close-loop vector method. Secondly, the ADAMS software was used to perform motion simulation analysis on the exoskeleton equivalent manipulator

收稿日期: 2022-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1711801); 上海市“科技创新行动计划”生物医药领域科技支撑项目 (20S31901500)

第一作者: 戴 玥(1994-), 女, 硕士研究生。研究方向: 并联机构学与机械设计。E-mail: daiyue\_1994@126.com

通信作者: 喻洪流(1966-), 男, 教授。研究方向: 康复机器人动力学与控制。E-mail: yh198@hotmail.com

model, and the time-varying curve of displacement, velocity and acceleration was solved. The simulation curves and theoretical models were compared and analyzed, and the feasibility of rehabilitation range of motion was further verified. Finally, the rehabilitation function of the powered cervical exoskeleton prototype was evaluated and analyzed experimentally. The prototype can achieve the range of motion of  $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$  on the coronal axis,  $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$  on the sagittal axis and  $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$  on the vertical axis, which meet the needs of the human cervical vertebra motion. The results show that the 6-SPS/CS powered cervical exoskeleton can assist the human cervical vertebra in traction, flexion/extension, left/right lateral flexion and left/right axial rotation rehabilitation training, which provides a basis for the subsequent manipulator optimization and clinical application.

**Keywords:** *exoskeleton; parallel manipulator; cervical spondylosis; biomechanics; kinematics*

颈椎病是现代生活中较为常见的一种疾病, 临床针对神经肌肉疼痛症状, 常采用牵引疗法联合运动疗法, 有助于快速缓解颈椎的疼痛, 促进运动功能的恢复, 具有显著的康复疗效<sup>[1-2]</sup>。神经根型与交感神经型颈椎病属于神经肌肉受损, 相较于其他症状的颈椎病更适用于牵引与运动康复训练。相关研究表明, 肌肉位于前屈/后伸、左/右侧屈或旋转位置时, 才能被充分拉长, 远大于垂直牵引拉伸的效果, 当缩短的肌肉被拉长后, 颈椎的运动功能有明显好转<sup>[3]</sup>。在康复机器人的研究中, 并联机器人的相关特性与颈椎的生理特性较为符合。

近年来, 国内外少数学者对适用于头颈部康复的几种不同构型的并联机构进行了初步的理论分析研究, 探索了这类机构用于研制头颈部康复装置的可能性。Lingampally 等<sup>[4]</sup>将 3-RPS 型并联机构应用于颈椎康复, 适用于治疗头颈部的姿势问题, 通过仿真分析验证其可实现 3 自由度运动; Zhang 等<sup>[5]</sup>提出一种 3-RRS 型主动颈托支具, 通过控制操纵杆来实现 3 自由度的头部运动, 适用于治疗低头综合症; 李亚丽<sup>[6]</sup>研究一种基于 2-UPR+RPS 并联机构的颈椎牵引康复机构, 通过理论模型分析验证其可实现可变角度的颈椎牵引; 陈朝峰<sup>[7]</sup>提出一种基于 3-RRS 球面并联机构的颈椎外骨骼, 适用于肌萎缩侧索硬化症患者, 并通过模型分析验证其可实现 3 自由度的头部运动; Wu 等<sup>[8]</sup>开发基于 6-3UPS 斯图尔特平台并联机构的头部外骨骼, 分析验证其可辅助佩戴者进行头部和颈部的运动。

上述分析可见, 在基于并联机构的颈椎外骨骼的探索研究中, 针对交感神经型与椎动脉型颈椎病治疗的相关并联机构研究极少, 大多处于理论模型的研究中。目前国内外还没有相关研究人

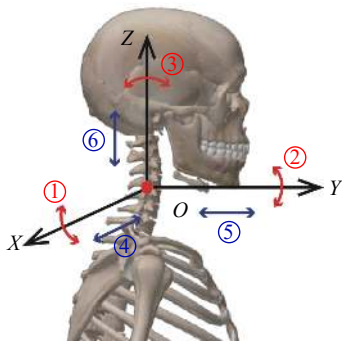
员研发基于牵引疗法与前屈/后伸、左/右侧屈及旋转运动康复训练相结合的 4 自由度颈椎动力外骨骼。其中, 颈椎旋转疗法是中医治疗颈椎病的重要手段, 相关研究证明其对颈椎病的治疗有较好的康复疗效<sup>[9-11]</sup>, 所以具备该类运动模式的康复机器人具有一定的研究意义。临床上, 大多依靠康复治疗师或牵引床等大型设备进行颈椎牵引与运动康复训练治疗, 且治疗成本较高。因此, 随着颈椎病的发病率呈现逐年增长与年轻化的趋势, 研发一种基于人体颈椎生物力学, 具备预防与治疗功效, 且牵引治疗与康复训练功能一体化的多自由度预防与治疗型颈椎康复机器人具有重要的临床价值。

本文旨在针对神经根型与交感神经型颈椎病, 设计一种可穿戴式的颈椎康复动力外骨骼, 实现颈椎多自由度牵引治疗与运动康复训练。为实现 4 自由度的颈椎运动康复训练的功能, 提出一种 6-SPS/CS 型并联机构构型, 并基于上述设计进行运动学分析。首先利用 SOLIDWORKS 软件建立基于人体生物力学的颈椎动力外骨骼三维模型, 然后采用空间坐标变换方程和闭环矢量法计算出外骨骼等效并联机构的逆运动学算例, 再采用 ADAMS 软件对外骨骼等效三维模型的虚拟样机进行运动仿真, 将仿真结果与理论模型进行对比分析, 最后基于外骨骼样机实验进行功能评估与验证。

### 1 颈椎运动及机构学分析

颈椎是最小且最灵活的椎骨, 颈部的前、中、后斜角肌和相对的肩胛提肌、斜方肌分别位于颈部的前、后、左、右侧, 构成一个具有轴向的四

维动力结构的颈椎运动模式，四维肌力的收缩、舒张和扭转，使颈椎具备伸缩、屈伸、侧屈和旋转的运动功能<sup>[12]</sup>，运动模式如图 1 所示。参照颈椎运动康复机理<sup>[13-14]</sup>，设置颈椎的运动特性及舒适范围，如表 1 所示。



①前屈/后伸 ②左/右侧屈 ③左/右旋转 ④⑤⑥牵引  
图 1 颈椎运动模式

Fig.1 Motion distributions of cervical vertebra

表 1 颈椎运动特性及舒适范围

Tab.1 Motion characteristics and comfort range of cervical vertebra

| 旋转方向 | 关节运动  | 舒适活动/牵引重量范围                 |
|------|-------|-----------------------------|
| X轴   | 前屈/后伸 | $-30^{\circ}\sim15^{\circ}$ |
|      | 轴向牵引  | 2~12 kg                     |
| Y轴   | 左/右侧屈 | $-20^{\circ}\sim20^{\circ}$ |
|      | 轴向牵引  | 2~12 kg                     |
| Z轴   | 左/右旋转 | $-15^{\circ}\sim15^{\circ}$ |
|      | 轴向牵引  | 2~12 kg                     |

本文从人体生物力学角度，对人体颈椎进行机构学等效建模。将人体颈椎等效为圆柱副(C)与球面副(S)相结合的机构，融合人体颈椎生物力学进行颈椎康复动力外骨骼的机构设计，如图 2 所示。将颈椎的生物力学性能融合到外骨骼机构的设计中，能够协助用户在安全范围内进行颈椎牵引及运动康复训练，以达到恢复颈椎运动功能的疗效。

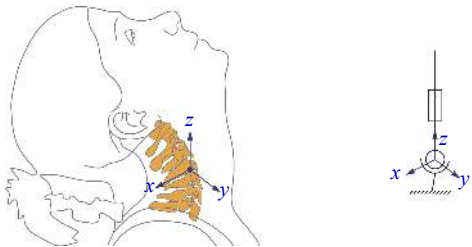


图 2 颈椎机构学等效模型

Fig. 2 Mechanical equivalent model of cervical vertebra

## 2 结构与运动学分析

### 2.1 结构设计

6-SPS/CS 型颈椎动力外骨骼等效机构(S 表示球面副, P 表示移动副, C 表示圆柱副), 包括定平台、动平台以及连接上下平台的 6 个结构相同但长度不同的 SPS 支链, 如图 3 所示。支链上端与动平台连接的 6 个球铰位置为  $B_i$  ( $i=1,2,\cdots,6$ ), 支链下端与定平台连接的 6 个球铰位置为  $A_i$  ( $i=1,2,\cdots,6$ ), 并建立动平台坐标系  $O_2-X_2Y_2Z_2$ 、定平台 1 坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$  与定平台 2 坐标系  $O-XYZ$ 。根据修正的 Kutzbach-Grübler 公式, 可知该并联机构具有 6 个自由度, 通过控制 SPS 分支的 6 个移动副的伸缩运动来改变上侧动平台的位姿和姿态, 实现颈椎三维方向的力牵引、前屈/后伸、左/右侧屈以及水平旋转 4 种模式的运动康复训练。本文参考中国成年人人体尺寸的国家标准<sup>[15-16]</sup>, 设置了 6-SPS/CS 型颈椎动力外骨骼机构的结构参数, 如图 3 与表 2 所示。

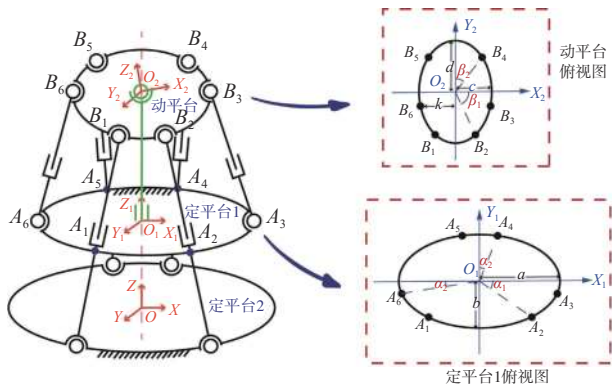


图 3 6-SPS/CS 型颈椎动力外骨骼机构简图

Fig.3 Geometrical description of 6-SPS/CS powered cervical exoskeleton

颈椎动力外骨骼三维结构模型如图 4 所示, 结构中的动平台位置固定于人体头部, 定平台位置固定于人体肩部及胸部。结合人体生理解剖特性可知, 动平台与定平台位置存在倾斜角, 且将定平台上的 6 个铰点均投影至相同平面, 按图中顺序(1~6)对并联机构中的 6 个支链进行研究分析。

### 2.2 运动学建模

并联机构运动学分析是动力学分析、控制策略研究以及系统优化设计的基础, 因此, 建立准确的运动学模型对颈椎动力外骨骼的研究至关重

表 2 颈椎动力外骨骼结构设计参数

Tab.2 Structure design parameters of powered cervical exoskeleton

| 参数         | 描述                 | 值          |
|------------|--------------------|------------|
| $a$        | 定平台椭圆长轴            | 415 mm     |
| $b$        | 定平台椭圆短轴            | 261 mm     |
| $c$        | 动平台椭圆长轴            | 208 mm     |
| $d$        | 动平台椭圆短轴            | 143 mm     |
| $O_1O_2$   | 上下平台高度             | 150 mm     |
| $k$        | $B_6$ 与 $Y_2$ 轴的距离 | 58 mm      |
| $\alpha_1$ | $A_2$ 与 $X_1$ 轴的夹角 | $40^\circ$ |
| $\alpha_2$ | $A_6$ 与 $X_1$ 轴的夹角 | $20^\circ$ |
| $\alpha_3$ | $A_4$ 与 $Y_1$ 轴的夹角 | $15^\circ$ |
| $\beta_1$  | $B_2$ 与 $X_2$ 轴的夹角 | $75^\circ$ |
| $\beta_2$  | $B_4$ 与 $Y_2$ 轴的夹角 | $40^\circ$ |

要。本文采用空间坐标变换方程和闭环矢量法对颈椎动力外骨骼的等效机构模型进行逆向运动学分析,即已知末端执行器的位姿,求各驱动关节的输入量<sup>[17]</sup>,最终能够求解各运动姿态下杆长的

$$\mathbf{R}=\mathbf{R}_{Z_1}(q_3)\mathbf{R}_{Y_1}(q_2)\mathbf{R}_{X_1}(q_1)=$$
$$\begin{bmatrix} \cos q_2 \cos q_3 & \sin q_1 \sin q_2 \cos q_3 - \cos q_1 \sin q_3 & \cos q_1 \sin q_2 \cos q_3 + \sin q_1 \sin q_3 \\ \cos q_2 \sin q_3 & \sin q_1 \sin q_2 \sin q_3 + \cos q_1 \cos q_3 & \cos q_1 \sin q_2 \sin q_3 - \sin q_1 \cos q_3 \\ -\sin q_2 & \sin q_1 \cos q_2 & \cos q_1 \cos q_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{R}$  表示外骨骼等效机构运动时的旋转矩阵;  $q_1, q_2, q_3$  分别表示动平台绕定系  $X_1, Y_1, Z_1$  轴的角度转动变量。

在定坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$  中,下球铰位置点的坐标矢量为

$$\mathbf{A}_1=\left(\frac{ab}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_1}},\frac{ab\tan\alpha_1}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_1}},0\right)^T$$
$$\mathbf{A}_2=\left(-\frac{ab}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_1}},\frac{ab\tan\alpha_1}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_1}},0\right)^T$$
$$\mathbf{A}_3=\left(-\frac{ab}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_2}},\frac{ab\tan\alpha_2}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_2}},0\right)^T$$
$$\mathbf{A}_4=\left(-\frac{ab}{\sqrt{b^2+a^2\cot^2\alpha_3}},-\frac{ab\cot\alpha_3}{\sqrt{b^2+a^2\cot^2\alpha_3}},0\right)^T$$
$$\mathbf{A}_5=\left(\frac{ab}{\sqrt{b^2+a^2\cot^2\alpha_3}},-\frac{ab\cot\alpha_3}{\sqrt{b^2+a^2\cot^2\alpha_3}},0\right)^T$$
$$\mathbf{A}_6=\left(\frac{ab}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_2}},\frac{ab\tan\alpha_2}{\sqrt{b^2+a^2\tan^2\alpha_2}},0\right)^T$$

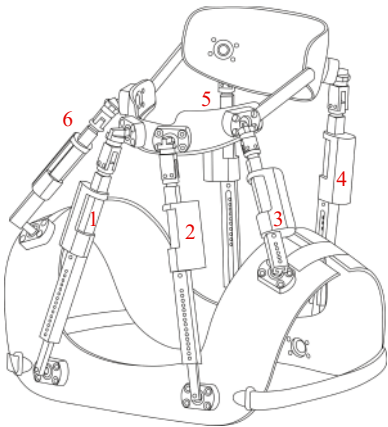


图 4 颈椎动力外骨骼的结构模型

Fig. 4 Powered cervical exoskeleton manipulator model

变化量。

将颈椎动力外骨骼动平台初始位置的中心点设为  $O_2=(x_B, y_B, z_B)$ , 其中,  $x_B, y_B, z_B$  分别为动平台质心  $O_2$  沿定系  $X_1, Y_1, Z_1$  轴的位置移动变量。颈椎动力外骨骼的六维位姿由 3 个平移分量与 3 个转动分量描述。基于欧拉角描述定系与动系的关系,该机构的旋转矩阵可由绕坐标轴的 3 次旋转变化相乘得到。

在动坐标系  $O_2-X_2Y_2Z_2$  中,上球铰位置点的坐标矢量为

$$\mathbf{b}_1=\left(\frac{cd}{\sqrt{d^2+c^2\tan^2\beta_1}},\frac{cd\tan\beta_1}{\sqrt{d^2+c^2\tan^2\beta_1}},0\right)^T$$
$$\mathbf{b}_2=\left(-\frac{cd}{\sqrt{d^2+c^2\tan^2\beta_1}},\frac{cd\tan\beta_1}{\sqrt{d^2+c^2\tan^2\beta_1}},0\right)^T$$
$$\mathbf{b}_3=\left(-0.058,d\sqrt{1-\frac{(-0.058)^2}{c^2}},0\right)^T$$
$$\mathbf{b}_4=\left(-\frac{cd}{\sqrt{d^2+c^2\cot^2\beta_3}},\frac{cd\cot\beta_3}{\sqrt{d^2+c^2\cot^2\beta_3}},0\right)^T$$
$$\mathbf{b}_5=\left(\frac{cd}{\sqrt{d^2+c^2\cot^2\beta_3}},-\frac{cd\cot\beta_3}{\sqrt{d^2+c^2\cot^2\beta_3}},0\right)^T$$
$$\mathbf{b}_6=\left(0.058,d\sqrt{1-\frac{(0.058)^2}{c^2}},0\right)^T$$

动平台通过作动器驱动到达设定的康复训练位置,根据位置矢量关系与旋转矩阵,可得支链

$i$  从点  $B_i$  到  $A_i$  的轴向距离  $L_i$ ，即等效机构的位置反解。第  $i$  个支链的矢量分析图如图 5 所示。

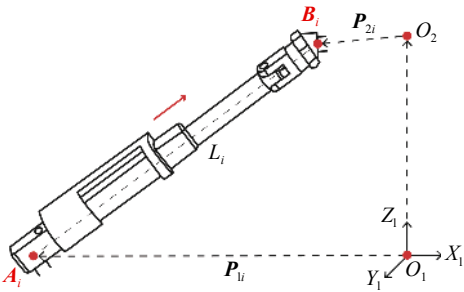


图 5 第  $i$  个支链的矢量分析图

Fig.5 Vector analysis diagram of the  $i$ -th branch

$$\begin{aligned} L_i &= \sqrt{(P_{2i} + P - P_{1i})^T (P_{2i} + P - P_{1i})} = \\ &= \sqrt{(Rb_i + P - A_i)^T (Rb_i + P - A_i)} = \\ &= \sqrt{(x_{B_i} - x_{A_i})^2 + (y_{B_i} - y_{A_i})^2 + (z_{B_i} - z_{A_i})^2} \quad (2) \end{aligned}$$

式中： $P_{2i}$  表示  $O_2B_i$  定系中的位置矢量； $P_{1i}$  表示  $O_1A_i$  定系中的位置矢量； $P$  表示动平台控制点  $O_2$  在定系中的位置矢量； $A_i$  表示下铰点在定系中的坐标； $B_i$  表示上铰点在定系中的坐标； $b_i$  表示上铰点在动坐标系中的位置矢量； $x_{A_i}$ ， $y_{A_i}$ ， $z_{A_i}$  分别表示下球铰位置点  $A_i$  在定系中的坐标值； $x_{B_i}$ ， $y_{B_i}$ ， $z_{B_i}$  分别表示上球铰位置点  $B_i$  在定系中的坐标值。

根据式(2)，可知 6-SPS/CS 型外骨骼并联机构位置反解算例，因此，在牵引及运动康复训练参数已知的条件下，可以分析 4 种康复运动模式下外骨骼的运动参数。

### 3 运动学仿真与结果分析

#### 3.1 数值仿真分析

在仿真软件中绘制颈椎动力外骨骼等效并联机构模型，得到机构中 6 个支链的初始长度，如图 6 所示。在颈椎牵引与运动康复训练参数已知的条件下，进行颈椎牵引、前屈/后伸、左/右侧屈和水平旋转 4 种康复运动模式，可以求解出各驱动杆件的变化量和机构的位姿算例。本文采用颈椎运动舒适范围进行仿真分析，如表 3 与图 7 所示。

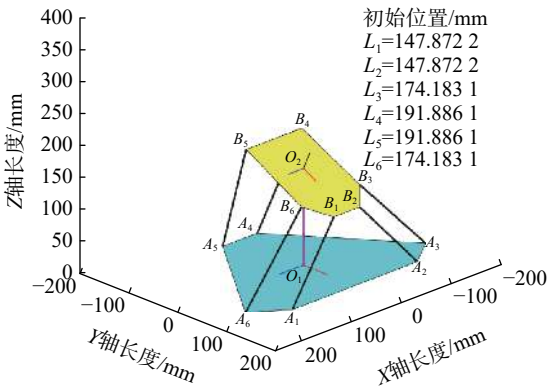


图 6 颈椎动力外骨骼等效机构的初始位姿

Fig.6 Physical dimension of fixed and moving platforms

#### 3.2 虚拟样机仿真分析

利用 ADAMS 软件进行稳态运动学仿真，导入基于 SOLIDWORKS 构建的颈椎动力外骨骼三维等效模型，如图 8 所示，并添加相应的运动副约束。设定机构的初始状态为定、动平台夹角为  $25^\circ$ ，二者相距 150 mm，且中心点在同一竖直线上，参照颈椎牵引及运动康复训练参数，给机构

表 3 颈椎动力外骨骼等效机构位置反解数值算例

Tab.3 Inverse kinematics solution of the equivalent manipulator of powered cervical exoskeleton

| 颈椎位姿 | 姿态参数 |                |                |                | 反解结果 / mm |        |        |        |        |        |
|------|------|----------------|----------------|----------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | Z/mm | $q_1/(^\circ)$ | $q_2/(^\circ)$ | $q_3/(^\circ)$ | $L_1$     | $L_2$  | $L_3$  | $L_4$  | $L_5$  | $L_6$  |
| 初始位置 | 150  | 0              | 0              | 0              | 147.87    | 147.87 | 174.18 | 191.89 | 191.89 | 174.18 |
| 牵引   | 190  | 0              | 0              | 0              | 163.18    | 163.18 | 188.98 | 210.56 | 210.56 | 188.98 |
| 前屈   | 170  | -15            | 0              | 0              | 145.47    | 145.47 | 176.04 | 222.60 | 222.60 | 176.04 |
| 后伸   | 170  | 30             | 0              | 0              | 199.61    | 199.61 | 209.31 | 172.53 | 172.53 | 209.31 |
| 左侧屈  | 170  | 0              | -20            | 0              | 166.21    | 154.53 | 175.25 | 186.80 | 224.33 | 200.97 |
| 右侧屈  | 170  | 0              | 20             | 0              | 154.53    | 166.21 | 200.97 | 224.33 | 186.80 | 175.25 |
| 左旋   | 165  | 0              | 0              | 15             | 175.22    | 150.45 | 183.73 | 206.29 | 207.09 | 193.18 |
| 右旋   | 165  | 0              | 0              | -15            | 150.45    | 175.22 | 193.18 | 207.09 | 206.29 | 183.73 |

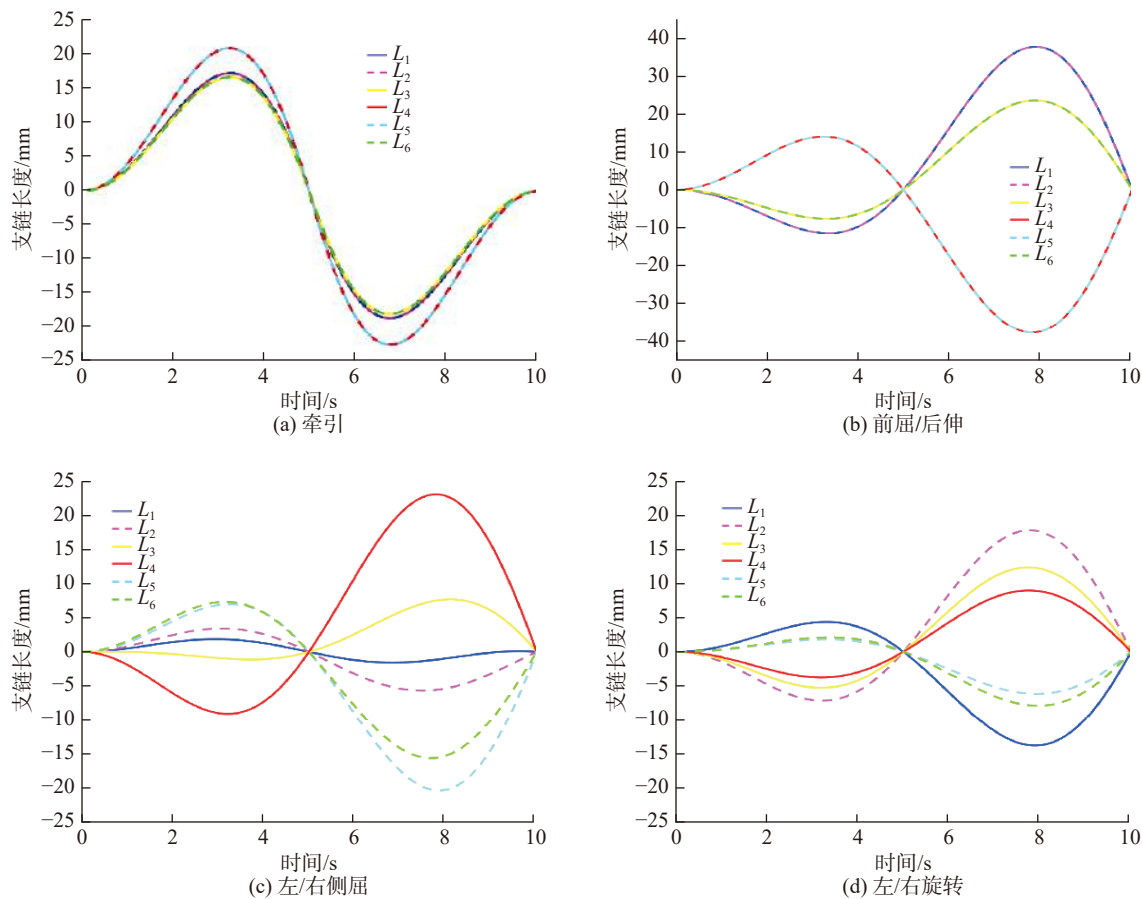


图 7 颈椎动力外骨骼 4 种康复训练模式下的杆长变化

Fig.7 Rod length changes of powered cervical exoskeleton under four rehabilitation training modes

驱动副添加相应的 Step 函数来进行仿真分析, 最终得到了颈椎动力外骨骼虚拟样机等效机构动平台位移、速度和加速度随时间的变化曲线图, 如图 9~11 所示。

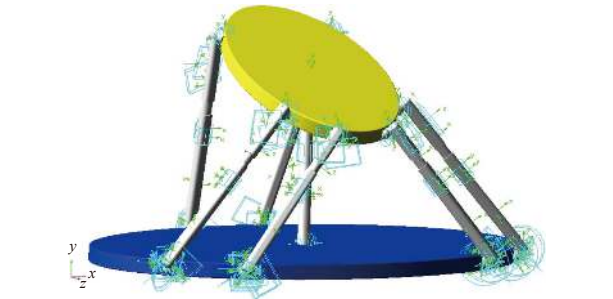


图 8 颈椎动力外骨骼等效机构的虚拟样机模型  
Fig.8 Virtual prototype model of the equivalent manipulator of powered cervical exoskeleton

结合表 3 中颈椎的姿态参数, 在 ADAMS 软件中设置动平台质心的位移与转动角度, 来实现颈椎的 4 种运动康复模式, 具体的 Step 函数如下:

牵引康复训练 Step 驱动函数为  $\text{disp}(\text{time})=\text{STEP}(\text{time},0,0,5,-40)+\text{STEP}(\text{time},5,0,10,40)$ ;

前屈/后伸康复训练 Step 驱动函数为  $\text{disp}(\text{time})=\text{STEP}(\text{time},0,0,3,-15\text{d})+\text{STEP}(\text{time},3,0,7,30\text{d})+\text{STEP}(\text{time},7,0,10,-15\text{d})$ ;

左/右侧屈康复训练 Step 驱动函数为  $\text{disp}(\text{time})=\text{STEP}(\text{time},0,0,3,20\text{d})+\text{STEP}(\text{time},5,0,9,-40\text{d})+\text{STEP}(\text{time},7,0,10,20\text{d})$ ;

左/右旋转康复训练 Step 驱动函数为  $\text{disp}(\text{time})=\text{STEP}(\text{time},0,0,3,-15\text{d})+\text{STEP}(\text{time},3,0,7,30\text{d})+\text{STEP}(\text{time},7,0,10,-15\text{d})$ 。

结合数值仿真和虚拟样机仿真对比分析可以看出, 数值仿真分析杆件变化值基于并联机构定坐标系分析, 虚拟样机仿真所得值是基于并联动坐标系分析。对比两者仿真结果得到的曲线可以发现, 在不考虑机构运动间隙的情况下, 每个支链的运动行程符合颈椎康复运动要求, 且仿真曲线的运动趋势与变化范围几乎完全一致。从图 8~11 可以看出, 该等效机构动平台的变化曲线均呈现周期性变化, 结果验证了颈椎动力外骨骼机器人具备良好的运动学特性, 进一步验证了该设备具有颈椎运动康复训练性能与应用价值。

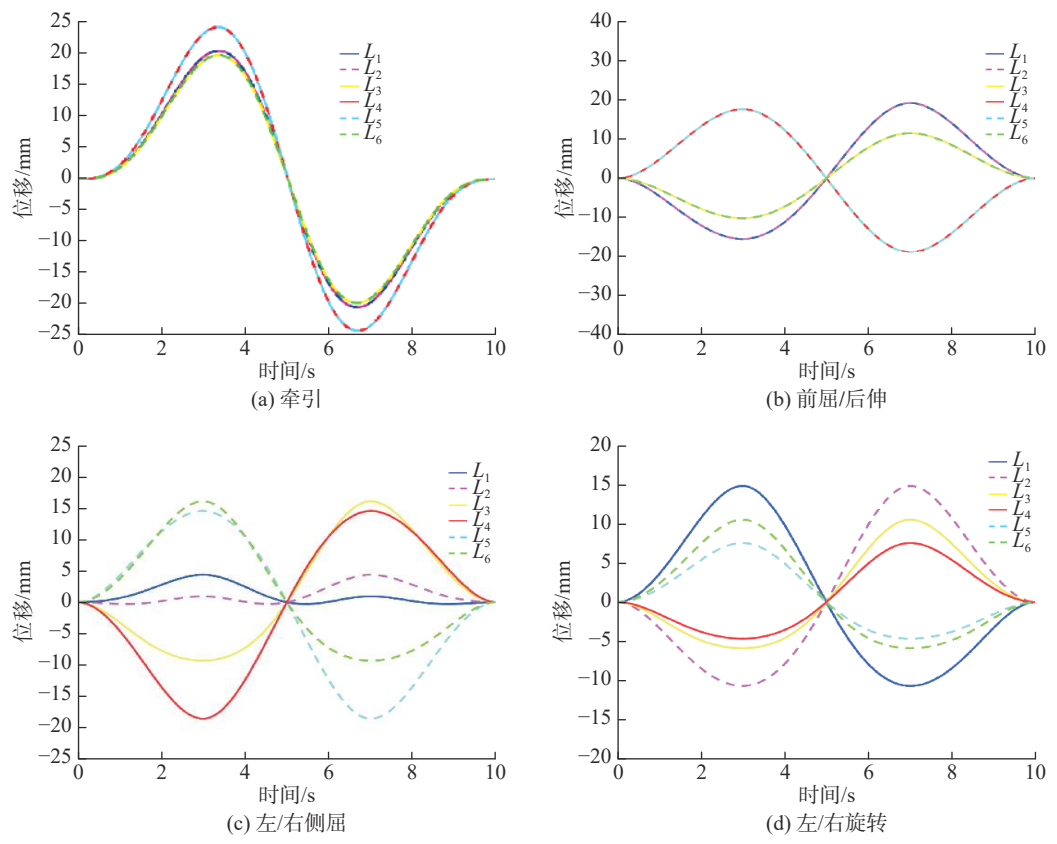


图 9 位移随时间的变化曲线  
Fig.9 Time-displacement curve

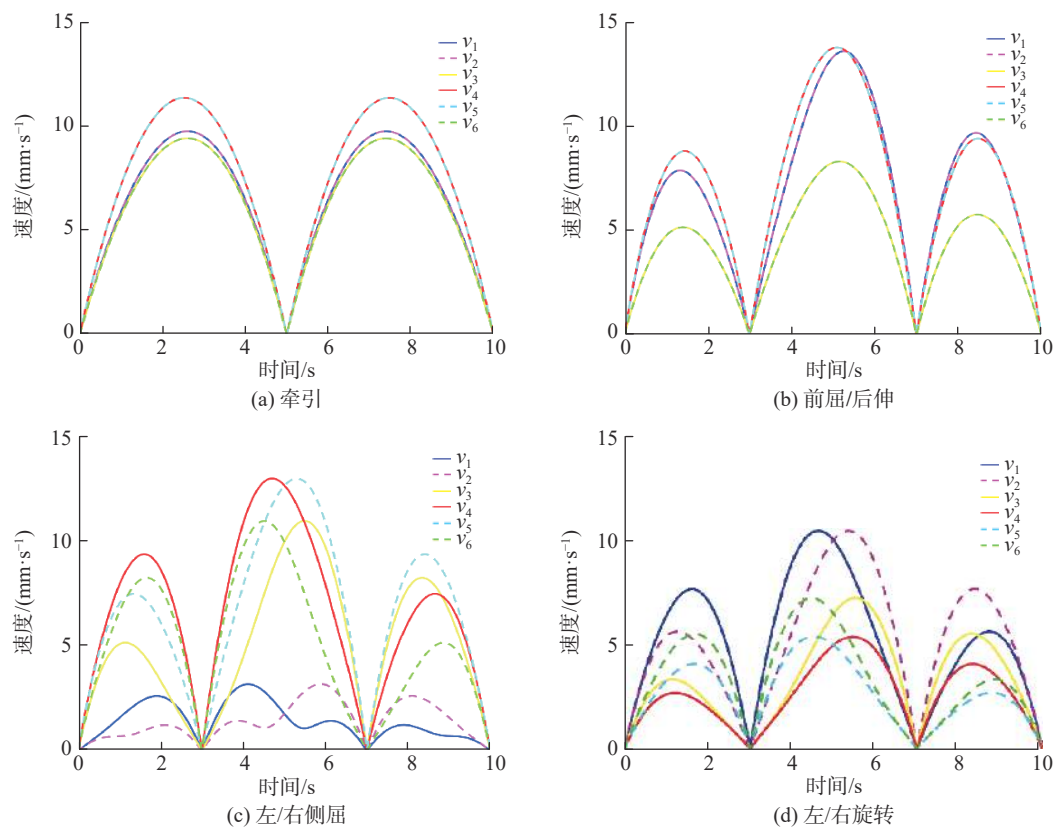


图 10 速度随时间的变化曲线  
Fig.10 Time-velocity curve

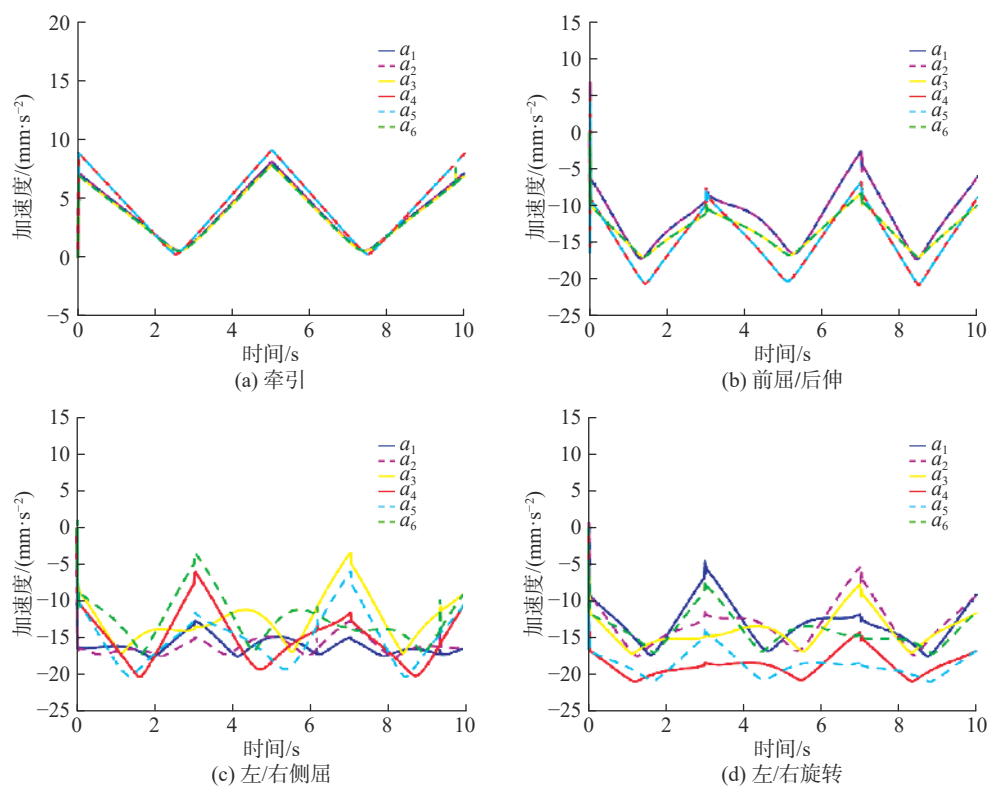


图 11 加速度随时间的变化曲线  
Fig.11 Time-acceleration curve

4 外骨骼样机实验

为进一步验证上述颈椎动力外骨骼理论模型

的正确性, 并为后续康复临床应用做铺垫, 对外骨骼模型的零件进行样机试制与运动范围验证, 如图 12 所示。同时, 考虑到颈椎的生物力学特性

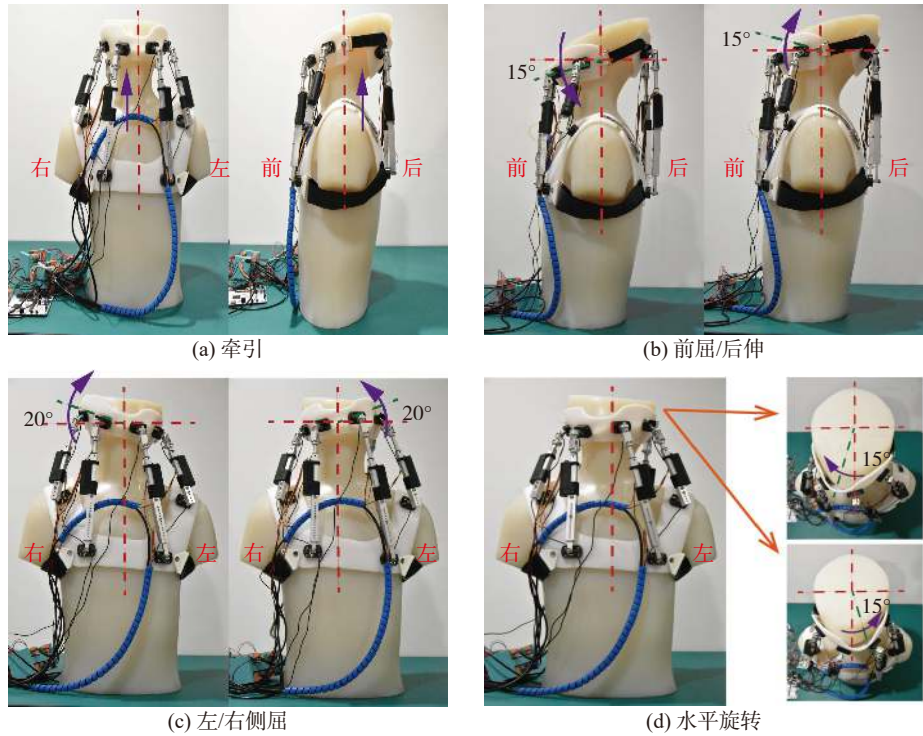


图 12 颈椎动力外骨骼样机康复运动实验

Fig.12 Rehabilitation training experiment of powered cervical exoskeleton prototype

与实验的安全性,设计了人体模型实验平台。外骨骼样机放置于人体硅胶模型上进行康复训练实验,颈部模型实验平台的灵活性低于人体颈椎。基于表1所设定的颈椎牵引及运动康复训练范围,颈椎动力外骨骼样机能够实现的运动范围分别为冠状轴 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 、矢状轴 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 及垂直轴 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,符合人体颈椎活动需求。因此,外骨骼样机能够满足人体颈椎三维方向的力牵引、前屈/后伸、左/右侧屈以及水平旋转4种模式的康复运动模式。实验过程中,角度范围的精确控制还存在不足之处,在以后的研究中会进一步优化完善,以实现最佳的颈椎运动康复疗效。

## 5 结 论

本文提出并设计了一种基于人体生物力学的6-SPS/CS型颈椎康复动力外骨骼,能够实现颈椎的牵引与多方位运动康复训练治疗的功能。分析结果表明:

a. 基于理论与实验的综合分析,研究的新型颈椎动力外骨骼设计能完成颈椎三维方向的力牵引、前屈/后伸、左/右侧屈以及水平旋转4种模式的运动康复训练。实现了颈椎牵引疗法与运动疗法相融合,满足多自由度牵引及运动康复训练的参数要求,有利于维持颈椎的正常生理角度。

b. 基于空间坐标变换和闭环矢量法,建立机构的运动学反解模型。通过ADAMS软件对颈椎动力外骨骼等效机构模型进行运动仿真,得到特定康复模式轨迹下杆长、速度、加速度的变化曲线,与运动学数学模型结果相吻合,验证了运动学分析的正确性。仿真结果表明,6-SPS/CS型颈椎动力外骨骼机器人能够较好地满足颈椎康复所需的运动范围。

c. 搭建颈椎动力外骨骼样机验证了机构选型、方案设计及虚拟仿真结果的正确性和可行性,为颈椎动力外骨骼机器人的结构优化设计、性能分析与人机交互控制系统设计等提供了研究基础。

### 参考文献:

[1] CHILDS J D, CLELAND J A, ELLIOTT J M, et al. Neck pain: clinical practice guidelines linked to the international classification of functioning, disability, and health from the Orthopaedic section of the American physical therapy association[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical*

*Therapy*, 2008, 38(9): A1–A34.

- [2] CLELAND J A, WHITMAN J M, FRITZ J M, et al. Manual physical therapy, cervical traction, and strengthening exercises in patients with cervical radiculopathy: a case series[J]. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 2005, 35(12): 802–811.
- [3] 陈香仙, 蔡湘, 吕品. 颈椎病的 Thera-Band 抗阻力运动疗法[J]. *中国组织工程研究*, 2012, 16(39): 7405–7410.
- [4] LINGAMPALLY P K, SELVAKUMAR A A. Kinematic and workspace analysis of a parallel rehabilitation device for headneck injured patients[J]. *FME Transactions*, 2019, 47(3): 405–411.
- [5] ZHANG H H, AGRAWAL S K. An active neck brace controlled by a joystick to assist head motion[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(1): 37–43.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] WU D S, WANG L, LI P. A 6-DOF exoskeleton for head and neck motion assist with parallel manipulator and sEMG based control[C]//2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Saint Julian's: IEEE, 2016: 341–344.
- [9] 李亚洲, 顾非. 不同间隔时间推拿配合颈椎定位旋转扳法治疗颈型颈椎病临床研究[J]. *新中医*, 2021, 53(5): 150–154.
- [10] 韩芳苗, 徐兆辉, 张万标, 等. 定点旋转复位手法对神经根型颈椎病椎间孔面积的影响[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2021, 29(8): 54–57.
- [11] 陈国华, 余培佳, 许秀玫, 等. 提拉旋转手法治疗椎动脉型颈椎病的颈椎 X 线成角变化和临床疗效[J]. *中国民间疗法*, 2021, 29(15): 37–40.
- [12] 宋少军, 陶绍南, 戴春玲, 等. 颈椎整脊学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [13] 顾友谅. 机器人与数字人: 基于 MATLAB 的建模与控制[M]. 张永德, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [14] 中国康复医学会颈椎病专业委员会, 上海市社区卫生协会脊柱专业委员会. 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.
- [15] 中国标准化与信息分类编码研究所. GB 10000–1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989: 2–13.
- [16] 中国标准化与信息分类编码研究所. GB/T 2428–1998 成年人头面部尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 2–11.
- [17] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.