

## 球面四杆式肩关节康复训练机构的运动学设计

吴振宏<sup>1</sup>, 车林仙<sup>2</sup>

1. 重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067

2. 重庆工程职业技术学院 智能制造与交通学院, 重庆 402260

**摘要:**目的 针对脑卒中导致患者肩关节半脱位以及运动功能障碍问题, 提出将球面四杆机构应用于肩关节康复训练中, 设计了一款单自由度肩关节康复训练机构, 实现了肩关节康复训练时的预期运动规律。方法 建立球面四杆机构的运动学模型, 通过 MATLAB 运动学分析程序, 验证运动学模型的正确性; 融合近似刚体导引综合法与最小二乘法, 建立机构主支链和回路目标函数模型; 采用罚函数法对机构各约束条件进行分类处理, 确立球面四杆机构优化综合的差分进化(DE)算法。结果 运用球面四杆机构近似刚体导引综合数值算例进行验证, 迭代曲线收敛性强, 结果表明上述目标函数模型正确可行且该算法高效可靠; 在此基础上, 求解出满足肩关节康复训练运动功能需求的最优尺寸参数。结论 应用 SolidWorks 和 ADAMS 软件生成了机构连杆点运动轨迹和机构运动学仿真曲线, 仿真结果表明: 此机构设计满足预期运动轨迹需求, 具有良好的运动学性能, 为研发结构简单、功能可靠的肩关节康复训练装置提供了理论基础。

**关键词:** 脑卒中; 球面四杆机构; 肩关节康复训练; 运动学分析; DE 算法; 运动学仿真

**中图分类号:** TH77; TP242 **文献标识码:** A **doi:** 10. 16055/j. issn. 1672-058X. 2026. 0002. 020

### Kinematic Design of a Spherical Four-bar Shoulder Joint Rehabilitation Training Mechanism

WU Zhenhong<sup>1</sup>, CHE Linxian<sup>2</sup>

1. School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

2. School of Intelligent Manufacturing & Transportation, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China

**Abstract: Objective** Aiming at the problem of shoulder joint subluxation and motor dysfunction caused by stroke in patients, a spherical four-bar mechanism is applied to shoulder joint rehabilitation training and a single degree of freedom shoulder joint rehabilitation training mechanism is designed to achieve the expected motion rules during shoulder joint rehabilitation training. **Methods** A kinematic model of the spherical four-bar mechanism was established and the correctness of the kinematic model was verified through the MATLAB kinematic analysis program. By integrating the approximate rigid body guidance synthesis method and the least squares method, an objective function model for the main branch chain and loop of the mechanism was established. The penalty function method was used to classify and process the constraints of the mechanism, and a differential evolution (DE) algorithm for optimizing and synthesizing spherical four-bar mechanisms was established. **Results** The comprehensive numerical example of approximate rigid body guidance using the spherical four-bar mechanism was used for verification, and the convergence of the iterative curve was strong. The results showed that the above objective function model was correct and feasible, and the algorithm was efficient and reliable. On this basis, the optimal size parameters that meet the functional requirements of shoulder rehabilitation training were solved. **Conclusion** SolidWorks and ADAMS software are applied to generate the linkage point motion trajectory and

收稿日期: 2024-03-21 修回日期: 2024-06-15 文章编号: 1672-058X(2026)02-0156-09

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目资助(CSTC2020JCYJ-MSXMX0276)。

作者简介: 吴振宏(1992—), 男, 湖北监利人, 硕士, 实验师, 从事机械设计和高等机构学研究。

引用格式: 吴振宏, 车林仙. 球面四杆式肩关节康复训练机构的运动学设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(2): 156-164.

WU Zhenhong, CHE Linxian. Kinematic design of a spherical four-bar shoulder joint rehabilitation training mechanism[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(2): 156-164.

kinematic simulation curve of the mechanism. The simulation results show that the designed mechanism meets the expected motion trajectory requirements and has good kinematic performance. This provides a theoretical basis for the development of shoulder joint rehabilitation training devices with simple structures and reliable functions.

**Keywords:** stroke; spherical four-bar mechanism; shoulder joint rehabilitation training; kinematic analysis; DE algorithm; kinematic simulation

肩关节是人体上肢完成各项基本活动的基础,具有高度的灵活性但同时也较易损伤,其运动功能是其上肢关节执行基本运动功能的先决条件<sup>[1-2]</sup>。近几年,针对人体上肢康复训练装置的研究不少,但是单独针对肩关节康复训练的医疗装置较少,且存在康复训练动作单一、结构复杂、费用昂贵等问题<sup>[3-6]</sup>。

尺度综合是机构运动学设计的重要环节<sup>[7-9]</sup>。尺度综合方法主要包括函数生成机构综合法、轨迹发生综合法和运动生成机构综合法 3 种<sup>[10]</sup>。与平面连杆机构运动学尺度综合类似,球面四杆机构运动学尺度综合模型的建立及其综合方法的研究,需以平面连杆机构综合方法为依据,并结合球面机构相关理论知识,根据待求解模型及所确定的约束条件,采用有效的现代数值解法或智能算法,最终得到优化解<sup>[11]</sup>。

文献[11]提出一种差分进化算法,其改进约束条件的可行性规则,并融入修复策略,得出更为优秀的球面 4R 函数发生机构综合解。文献[12]采用 GA-PSO 混合算法,对由铲斗、斗杆、动臂及其油缸构成的平面连杆机构进行优化设计,改善了机构的力学性能。文献[13]基于遗传算法编写了空间四连杆飞机 RAT 舱门收放机构的优化设计程序,实现了机构的快速分析及优化。文献[14]利用闭环矢量法,对一种基于平面连杆可折叠收放机构分析优化,大幅降低了浮筒最大角位移,收放更加平稳。文献[15]提出一种基于运动学分析软件与优化算法的求解方法,对符合连杆机构运动生成综合与函数生成综合相结合的尺寸综合求解,解决了尺寸综合任务中机构的可动性问题。文献[16]通过嵌套粒子群算法,对平面 4、6 和 8 杆机构进行轨迹导引综合,并进行构型优选。文献[17]通过对标准差分算法的某些参数进行改进,求解出平面 4R 机构的优化模型,不仅解决了早熟收敛等问题,而且验证了其运算的高效性。文献[18]首先运用一种自适应混沌 DE 算法对机构进行位置分析,然后运用一种双种群约束 DE 算法对机构优化模型进行求解,接着采用一种混合离散 DE 算法对齿轮机构尺寸进行优化,最后将一种约束多目标 DE 算法同时应用到 3 个工程实例中。文献[19]采用差分进化算法对一种平面连杆下肢康复

机构进行尺度综合优化,得到一组机构最优解。

随着不断发展的计算智能技术,现代智能优化技术在机构尺度综合中运用得越来越广泛,取得了十分丰硕的成果<sup>[11-19]</sup>。其中主要以平面连杆机构的优化设计为主,在球面连杆机构尺度优化综合方面的应用却很少。此外,尺寸综合方法采用函数生成机构综合法和轨迹发生综合法的比较多。

因此,本文提出将球面四杆机构应用于肩关节康复训练,将近似刚体导引综合方法应用于球面四杆机构的尺度优化设计中,利用高效可靠的差分进化算法,求出最优解,设计一款满足预期康复运动需求的球面四杆机构。该设计不仅丰富了球面连杆机构在工程领域的实际应用,而且为球面四杆机构的尺度综合法提供了更多理论参考。

## 1 肩关节生理结构特性与球面四杆机构结构特性分析

肩关节能实现较大范围内三维复合运动,其健康与否,不仅决定人体上肢完成所需动作的完整度,而且还能决定人体上肢能否实现某些常规运动。通过对肩关节的生理结构特性、球面四杆机构结构特性以及两者的契合性进行分析,选择更能满足肩关节康复训练需要的球面四杆机构构型。

### 1.1 肩关节生理活动特性分析

肩关节是人体上肢运动范围最大且最为灵活的关节,它在人体大脑神经系统的支配下,能够执行前屈与后伸、内收与外展、内旋与外旋以及环转等基本运动。

肩关节之所以能够完成 3 个自由度的转动,正是由于其属球窝关节。正常成年人肩关节的活动范围<sup>[20]</sup>:矢状面内,前屈  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ,后伸  $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ;冠状面内,内收  $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,外展  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ;水平面内,左转  $0^{\circ} \sim 140^{\circ}$ ,右转  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ;垂直于上臂轴线的平面内,向内旋转  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ,向外旋转  $0^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。

肩关节康复训练分为被动模式、助力模式、主动模式、阻尼模式,分别对应肩关节康复训练初期、中期、后期、最后环节。本文设计的一种球面四杆式肩关节康复训练机构,主要针对肩关节康复训练初期患者,牵引患肢完成一种特定范围内的三维复合康复运动。

### 1.2 球面四杆机构结构特性分析

球面四杆机构为含有 4 个转动副(R 副)的空间四连杆机构,并且其 4 个 R 副的轴线交于其所在球面的球心点,分别具有 2 个固定铰链点和 2 个动铰链点,连接 4 个铰链点的每一连杆都位于球面上,属球面连杆面。图 1 为球面四杆机构示意图,  $A$  和  $B$  为动铰链点,  $O_A$  和  $O_B$  为定铰链点,  $P$  为连杆面上一点,  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$  分别表示各杆杆长<sup>[21]</sup>。

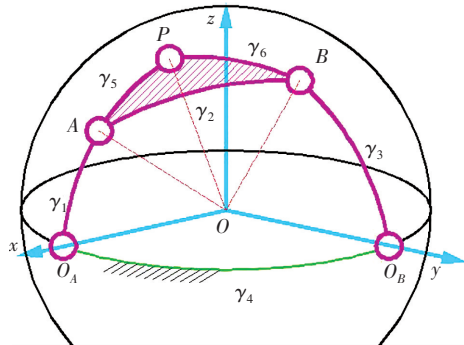


图 1 球面四杆机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spherical four-bar mechanism

对球面四杆机构的研究是联系平面连杆机构和空间连杆机构不可或缺的环节<sup>[11]</sup>。图 2 为采用 D-H 表示法描绘的球面四杆机构,亦称为球面等值机构<sup>[22]</sup>。由于该机构具有结构紧凑,灵活性较好且不易发生干涉,属单自由度机构,运动副简单等优点,所以在射电望远镜、太阳跟踪装置、卫星定向装置、腹腔外科手术机器人等方面得到了较广泛的实际应用。

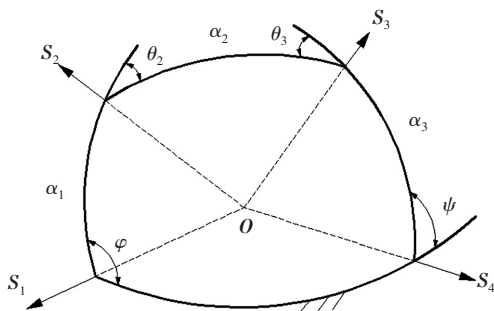


图 2 球面四杆机构 D-H 表示法

Fig. 2 D-H representation of spherical four-bar mechanism

与平面四杆机构类似,按照球面四杆机构两连架杆的运动状态,可将其分为如下 3 种基本形式:球面曲柄摇杆、球面双曲柄以及球面双摇杆机构。肩关节康复训练需要能够实现最基本的循环往复闭合轨迹运动,球面双摇杆机构的两连架杆只能完成一定范围的摇摆运动,使得球面连杆点不能形成闭合轨迹;球面双曲柄机构的两个连架杆能做整周转动,但是该机构中从动杆的周转运动易使整个机构在运动过程中发生干涉;而球面曲柄摇杆机构的结构特性、运动学特性基本满足设计要求,最终选择球面曲柄摇杆机构作为肩关

节康复训练的执行机构。

肩关节球窝的球心可与球面曲柄摇杆机构的轴线所交球心基本重合,上臂不同部位与球窝球心之间的距离对应着不同半径的同心球体。在球面曲柄摇杆机构的构件中,两连架杆只能实现球面平移运动,即空间三维运动;然而,其连杆既具有球面上的平移运动,又伴随着球面上的旋转运动。一方面,球面上的平移运动与肩关节屈伸、环转和收展三者的复合运动相匹配;另一方面,球面上的旋转运动与肩关节的内外旋相吻合。

因此,从结构和运动方式上,球面曲柄摇杆机构与肩关节皆具有良好的契合性,为该机构的运动学设计奠定了基础。

## 2 球面曲柄摇杆机构的运动学设计

### 2.1 运动学分析

首先建立该机构的球面坐标系,如图 3 所示,机构处于单位球面上。  $A, B, C$  和  $D$  为机构的 4 个转动副,其转动轴线交于  $O$  点,  $A$  和  $D$  为固定铰链点,  $B$  和  $C$  为动铰链点,  $P$  为连杆面  $BC$  上一点。  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  和  $\alpha_5$  分别表示杆  $AB$ 、杆  $BC$ 、杆  $CD$ 、杆  $DA$  和标线  $BP$  的杆长,  $\beta$  为杆  $BC$  与其标线  $BP$  之间的球面夹角,  $\varphi$  和  $\psi$  分别为球面四杆机构  $ABCD$  的输入角与输出角。

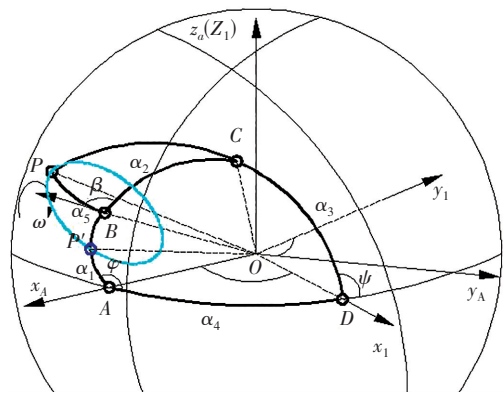


图 3 机构球面坐标系(单位球面)

Fig. 3 Spherical coordinate system (unit sphere) of the mechanism

运用罗德里格斯公式表示球面连杆点  $P$  的位置,经推导可得,其坐标矢量可表示为

$$P = \text{Rot Rod}(B, \beta + \angle CBP') \times P' \quad (1)$$

球面曲柄摇杆机构输入角  $\varphi$ 、输出角  $\psi$  之间的函数关系式经推导,可表示为

$$\psi = 2 \arctan \left( \frac{E \pm (E^2 + F^2 - G^2)^{\frac{1}{2}}}{F - G} \right) \quad (2)$$

其中,  $E = \sin \alpha_1 \sin \alpha_3 \sin \varphi$ ,  $F = \sin \alpha_1 \sin \alpha_3 \cos \alpha_4 \cos \varphi - \cos \alpha_1 \sin \alpha_3 \sin \alpha_4$ ,  $G = \cos \alpha_1 \cos \alpha_3 \cos \alpha_4 + \sin \alpha_1 \cos \alpha_3 \times \sin \alpha_4 \cos \varphi - \cos \alpha_2$ 。

由式(2)可知:式中“ $\pm$ ”号表示当机构输入角  $\varphi$  不

变时,机构的输出角  $\psi$  有两个解,即对应着球面四杆机构所存在的反装和正装两种情形。在机构正装的前提下,运用数值算例对机构进行运动学分析,由球面三角的角余弦定理可表示出该机构两极限位置时的输入角  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  值,如下:

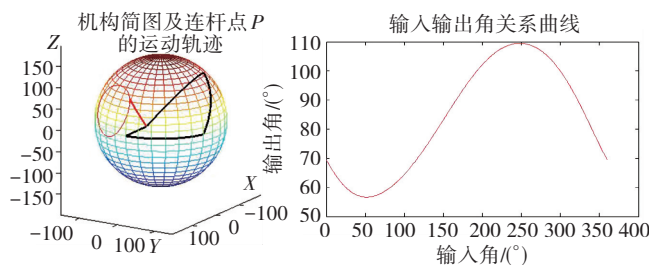
$$\begin{cases} \varphi_1 = \arccos\left(\frac{\cos \alpha_3 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos \alpha_4}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin \alpha_4}\right) \\ \varphi_2 = \arccos\left(\frac{\cos \alpha_3 - \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos \alpha_4}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin \alpha_4}\right) + \pi \end{cases} \quad (3)$$

根据所得机构运动学模型,选取 3 组机构运动初始角  $\varphi_0$  和机构所在球面半径  $r$  (单位:mm) 为机构数字化运动分析中的控制变量,同时以球面曲柄摇杆机构中相应的运动学尺寸约束条件为限定,分别选取驱动连架杆杆长  $\alpha_1$ 、连杆杆长  $\alpha_2$ 、从动连架杆杆长  $\alpha_3$ 、机架杆长  $\alpha_4$ 、连杆标线杆杆长  $\alpha_5$  和机构连杆刚体中两杆夹角  $\beta$  的经验值,依次代表不同尺寸下的球面曲柄摇杆机构,如表 1 所示。

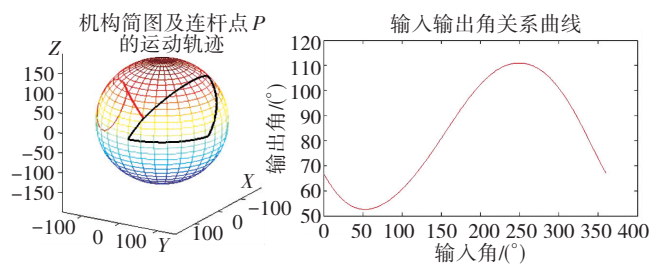
表 1 球面曲柄摇杆机构数值算例  
Table 1 Numerical example of spherical curved rocker mechanism

序号	$r$ /mm	$\alpha_1$ /mm	$\alpha_2$ /mm	$\alpha_3$ /mm	$\alpha_4$ /mm	$\alpha_5$ /mm	$\beta$ /(°)	$\varphi_0$ /(°)
1	150	20	85	60	70	15	75	30
2		22	87	63	72	30	78	
3		25	90	65	75	45	80	60
4		20	85	60	70	26	79	
5		22	87	63	72	28	105	90
6		25	90	65	75	30	130	

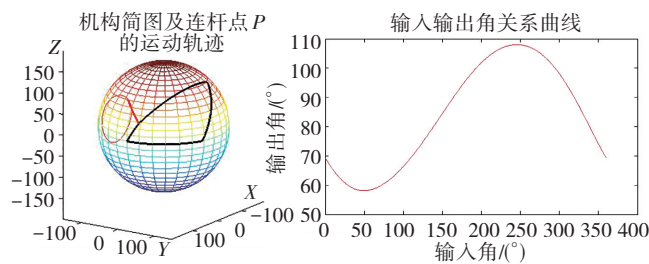
运用 MATLAB 生成每组数字化机构模型和输入输出角的关系曲线,如图 4 所示。可看出,机构每一运动学尺寸参数的变化都会影响连杆点  $P$  运动轨迹所处的空间位置,亦可生成不同的机构运动简图。通过比较图 4(a)与 4(d)、图 4(b)与 4(e)、图 4(c)与 4(f)中右图可知, $\alpha_5$  和  $\beta$  的变化不影响输入输出角的函数关系曲线,但比较图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)或图 4(d)、图 4(e)、图 4(f)中右图可知, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  和  $\alpha_4$  的微小变化也会引起曲线的变化。



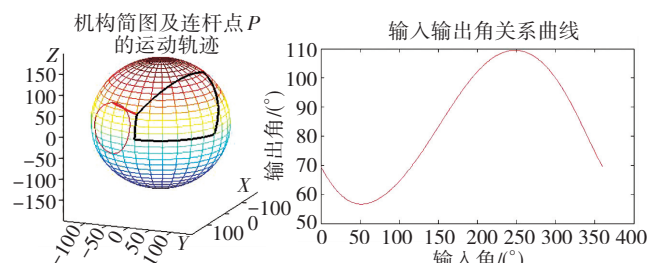
(b) 第 2 组数据运行结果



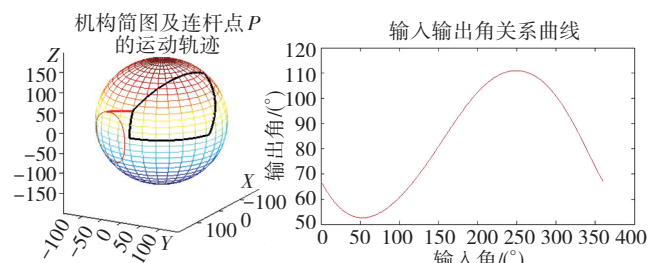
(c) 第 3 组数据运行结果



(d) 第 4 组数据运行结果



(e) 第 5 组数据运行结果

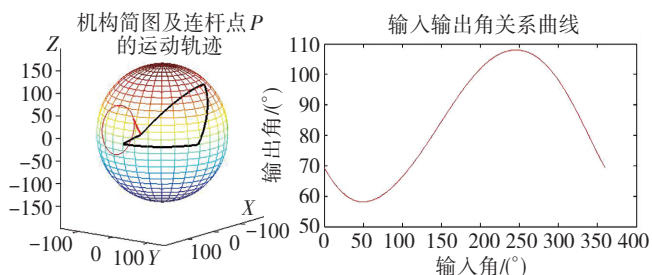


(f) 第 6 组数据运行结果

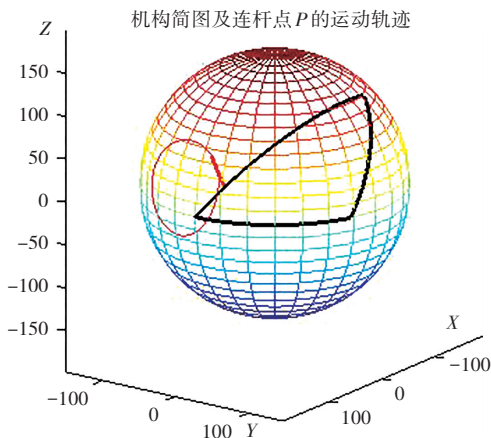
图 4 数字化机构和输入输出角关系

Fig. 4 Digital mechanisms and input-output angle relationships

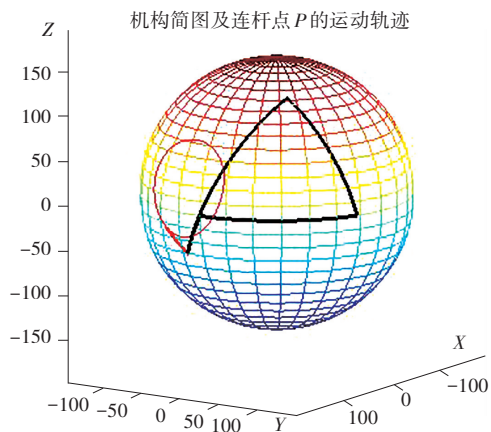
将表 1 中第 1 组数据代入式(3)中得  $\varphi_1 = 49.58^\circ$  和  $\varphi_2 = 245.33^\circ$ 。把初始角  $\varphi_0$  分别变为  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,其他条件不变,将第 1 组参数应用于上述 MATLAB 机构运动学分析程序中,绘制出该机构两极限位置时的运动简图,完全吻合,如图 5 所示。



(a) 第 1 组数据运行结果



(a) 曲柄第一极限位置



(b) 曲柄第二极限位置

图 5 机构两极限位置运动简图

Fig. 5 Schematic diagram of the movement of the two extreme positions of the mechanism

综上所述,该机构运动学模型的可行性及其精确性得到了充分验证,与此同时,也反映出该 MATLAB 机构运动学分析程序对于球面曲柄摇杆机构的适用性。

### 2.2 近似刚体导引综合模型建立

因为肩关节康复训练要求球面曲柄摇杆机构执行构件能够有序实现尽可能多的空间位姿,所以采用近似刚体导引综合方法,来建立该机构尺度综合模型,以尽可能小的误差近似满足机构运动学性能要求。

如图 6 所示,固定铰链点 A 的球面坐标  $(\theta_A, \varphi_A, 1)$ , 动铰链第 1 位置点 B 的球面坐标  $(\theta_{B_1}, \varphi_{B_1}, 1)$ , 连杆刚体上点  $P_1$  的球面坐标  $(\theta_{P_1}, \varphi_{P_1}, 1)$ , 杆  $B_1P_1$  杆长  $\lambda(\alpha_5)$  以及第 1 位置曲柄杆长  $\alpha_{AB_1}$  皆是主支链尺寸参数; 设连杆  $B_1C_1$  杆长  $\alpha_2$ 、从动连架杆  $C_1D$  杆长  $\alpha_3$ 、机架杆  $AD$  杆长  $\alpha_4$ 、杆  $B_1P_1$  与杆  $B_1C_1$  之间所夹的球面角  $\beta$ 、杆  $AD$  与  $\{A\}$  系中  $Oy^{(A)}z^{(A)}$  平面之间所夹的球面角  $\theta_4$  以及杆  $AB_1$  与  $\{A\}$  系中  $Oy^{(A)}z^{(A)}$  平面之间所夹的球面角  $\theta_1$  皆为未知参数,即机构回路近似刚体导引综合模型欲求解的参数。

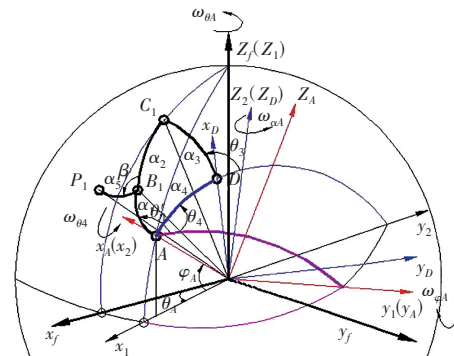


图 6 机构回路近似刚体导引运动简图

Fig. 6 Schematic diagram of approximate rigid body guided motion in mechanism loop

采用最小二乘思想和球面坐标变换方法,将 P 点与实际期望 P 点位姿参数  $(\theta_{P_i}, \varphi_{P_i}, \delta_{P_i})$  之间的误差平方和函数作为目标函数,经推导可表示如下:

$$f_m(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N [(\theta_{P_i'} - \theta_{P_i})^2 + (\varphi_{P_i'} - \varphi_{P_i})^2 + (\delta_{P_i'} - \delta_{P_i})^2] \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

对该机构的刚体位姿有序性与曲柄杆长等约束条件进行分类处理,包括机构构型约束条件、机构协调性约束条件、机构力传递特性约束条件,分别表示如下:

$$g_4(\mathbf{x}) = 2(\alpha_1 + \max\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}) - \sum_{i=1}^4 \alpha_i < 0 \quad (5)$$

$$g_5(\mathbf{x}) = \frac{\max\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}}{\min\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}} - [R_\alpha] \leq 0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} g_6(\mathbf{x}) = |\cos \delta_{\min} - \cos[\gamma]| \leq 0 \\ g_7(\mathbf{x}) = |\cos \delta_{\max} - \cos[\gamma]| \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

### 2.3 机构尺度综合

因 DE 算法运行的高效性和结果的可靠性等优越性能,故而运用此类算法对球面曲柄摇杆机构的运动学尺寸进行约束优化综合。

机构尺度综合模型的求解问题可转化为目标函数的最小化问题,若违反该曲柄取值范围约束条件,则采用罚函数法,将自适应罚函数引入 DE 算法中,故目标函数表示为

$$F_m(\mathbf{x}) = f_m(\mathbf{x}) + \sqrt{t} \sigma \sum_{i=1}^l \{ [g_i'(\mathbf{x})]^{\zeta_i(\mathbf{x})} [1 + 2 \log_2(1 + 1000 g_i'(\mathbf{x}))] \} \quad (8)$$

其中,  $g_i'(\mathbf{x})$  为候选解  $\mathbf{x}$  的约束违反度,  $g_i'(\mathbf{x}) = \max\{0, g_i(\mathbf{x})\}$  ( $i = 2, 3$ );  $\zeta_i(\mathbf{x})$  为违反约束强度指数,  $\zeta_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & g_i'(\mathbf{x}) \leq 1 \\ 2, & g_i'(\mathbf{x}) > 1 \end{cases}$ ,  $s$  为惩罚系数;  $t$  为进化代数;  $f_m(\mathbf{x})$  为目标函数;  $F_m(\mathbf{x})$  为自适应惩罚函数,亦称为自适应增广目标函数。

若违反机构协调性和力传递特性的约束要求,则利用自适应罚函数法进行处理,只需将式(8)中的  $i =$

2、3 变为  $i=6、7$  即可。从而机构约束优化综合问题转化为无约束优化综合问题。

将 8 组球面刚体姿态角与离散点位置参数数值算例(表 2)与 DE 算法尺度优化综合所得刚体位姿参数(表 3)对比,几乎完全吻合。优化机构回路的差分进化算法迭代曲线如图 7 所示,其目标函数值  $f=8.241 6 \times 10^{-12}$ 。故其不仅能够验证机构 4R 回路近似刚体导引综合模型的可行性和准确性,而且可进一步证明机构约束优化综合 DE 算法程序的有效性与可靠性,即球面 4R 机构近似刚体导引综合模型正确,优化综合的差分进化算法高效可靠。

表 2 球面刚体位姿数值算例  
Table 2 Numerical examples of spherical rigid body postures

序 号	球面位姿参数/(°)		
	相对姿态角 $\delta_p$	球面坐标 $\theta_p$	球面坐标 $\varphi_p$
1	0	44.958 5	41.923 5
2	-20.605 7	49.873 8	52.368 9
3	-22.707 5	35.328 9	58.322 9
4	-12.328 6	12.867 3	52.657 7
5	-0.339 7	2.628 6	39.766 2
6	14.919 9	3.785 7	28.821 7
7	26.982 3	13.047 9	24.948 6
8	23.620 5	28.265 3	30.893 3

表 3 尺度综合所得 P 点的球面位姿参数

Table 3 Spherical pose parameters of the point P obtained from scale synthesis

序 号	球面位姿参数/(°)		
	相对姿态角 $\delta_p$	球面经度角 $\theta_p$	球面纬度角 $\varphi_p$
1	0	44.958 5	41.923 5
2	-20.605 8	49.873 8	52.368 9
3	-22.707 5	35.328 9	58.322 9
4	-12.328 6	12.867 3	52.657 7
5	-0.339 7	2.628 6	39.766 2
6	14.919 9	3.785 7	28.821 7
7	26.982 4	13.047 8	24.948 6
8	23.620 5	28.265 3	30.893 3

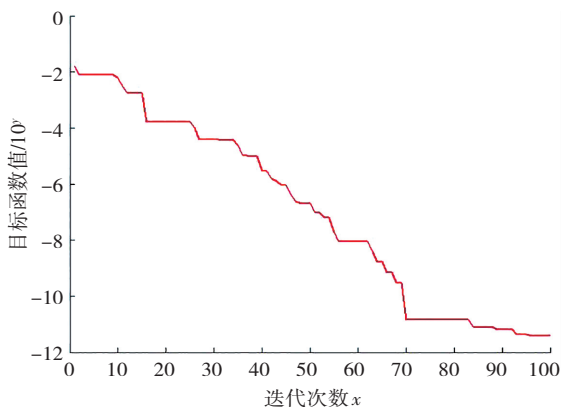


图 7 尺度优化的 DE 算法迭代曲线

Fig. 7 DE algorithm iteration curve of scale optimization

通过实际模拟肩关节康复训练运动,采用快速拍照的方式,从三视图记录了人体肩关节做康复运动一圈过程中右上臂某处位姿,运用 MATLAB 图形处理方法将位姿数据进行提取,再根据肩关节康复训练基本运动方式的允许范围,从最新数据库中尽量均匀分散选取 10 组肩关节位姿参数,进而采用球坐标与直角坐标的转换关系,由经纬度角( $\theta_p, \varphi_p$ )与肩关节康复训练的屈伸、收展、环转等运动范围之间的几何关系,可得与之对应的肩关节运动参数,同时姿态角  $\delta_p$  对应其内旋和外旋运动范围,将这 10 组参数转换为球面坐标(表 4)。

表 4 期望上臂套杆点 P 的球面位姿参数  
Table 4 Spherical pose parameters of the expected upper arm sleeve point P

序 号	球面位姿参数/(°)		
	相对姿态角 $\delta_p$	球面经度角 $\theta_p$	球面纬度角 $\varphi_p$
1	0	75	44
2	-3	71	54
3	3	56	61
4	12	38	59
5	15	32	52
6	16	33	43
7	17	40	32
8	19	50	25
9	18	60	23
10	9	70	30

将上述参数作为球面 4R 机构近似刚体导引综合的期望连杆点位置和姿态参数。在此基础上,利用 MATLAB 主支优化程序进行运算,可得主支链运动学尺寸最优解: $\alpha_1 = 15.329 6, \theta_A = 80.283, \varphi_A = 41.209, \alpha_5 = 19.373, \eta = -5.411 5$ ,目标函数标准差  $\sigma_f = 0$ 。相应 DE 算法迭代曲线如图 8 所示。将得到的尺度优化参数,应用于 2.1 节生成的数字化机构 MATLAB 程序中可得机构主支链刚体导引运动简图,如图 9 所示。

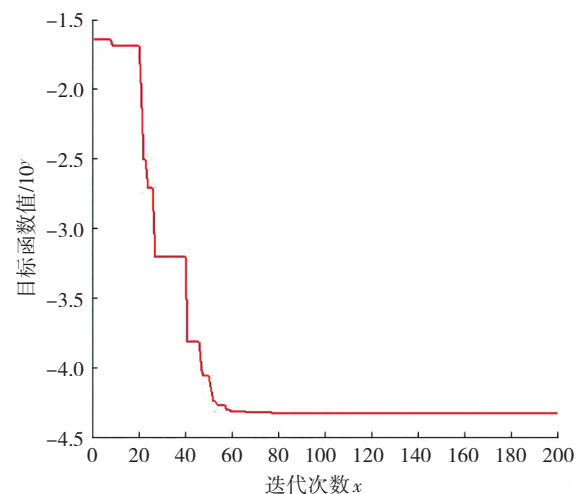


图 8 主支链优化 DE 算法迭代曲线

Fig. 8 Iterative curve of main-branch chain optimization DE algorithm

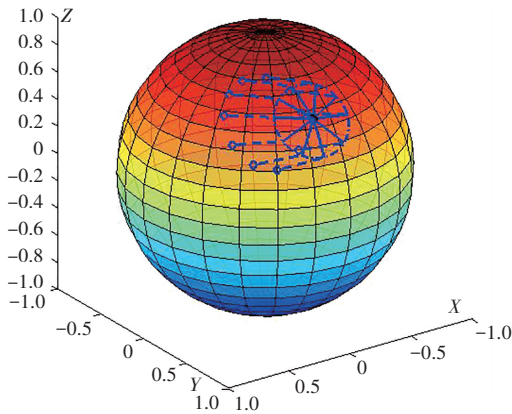


图 9 主支链刚体导引运动简图

Fig. 9 Schematic diagram of rigid body guidance motion for main-branch chain

利用 MATLAB 机构回路优化程序进行运算, 可得机构回路运动学尺寸最优解:  $\alpha_2 = 44.463$ ,  $\alpha_3 = 90.00$ ,  $\alpha_4 = 88.068$ ,  $\theta_4 = -72.643$ , 目标函数标准差  $\sigma_f = 0$ 。相应 DE 算法迭代曲线如图 10 所示。将得到的尺度优化参数, 应用于 2.1 节生成的数字化机构 MATLAB 程序中, 可得球面曲柄摇杆机构近似刚体导引机构运动学设计优化模型, 如图 11 所示。

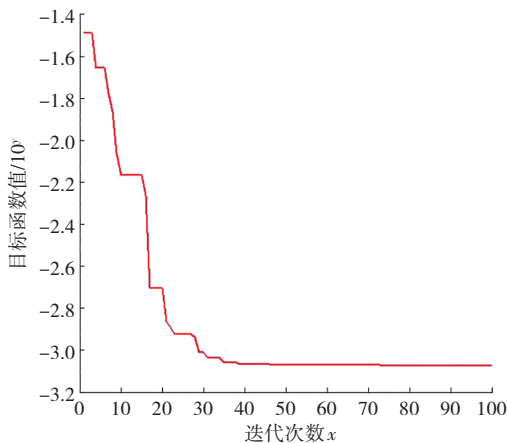


图 10 机构回路优化 DE 算法迭代曲线

Fig. 10 Iterative curve of DE algorithm for mechanism loop optimization

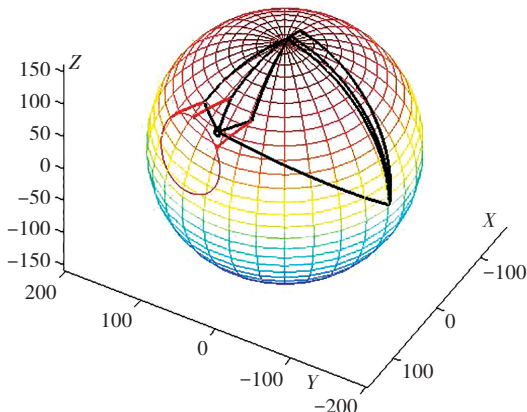


图 11 机构运动学设计优化模型

Fig. 11 Optimization model for mechanism kinematic design

### 3 机构三维设计及运动学仿真分析

为了保证预期的康复运动规律与设计所得机构执行构件运动轨迹的一致性, 根据优化得到的运动学尺寸, 利用 SolidWorks 软件对曲柄 AB、摇杆 CD、连杆 BC、手臂套杆 BP 进行三维设计、装配, 进而借助 SolidWorks 软件运动算例功能生成连杆点 P 的运动轨迹, 如图 12 所示。由图 11、图 12 可知, 两近似球面运动轨迹曲线基本一致, 表明求解出的机构最优解参数准确且可靠, 能满足预期肩关节康复训练需求。

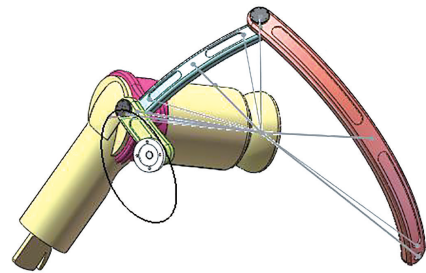


图 12 肩关节康复机构连杆点运动轨迹

Fig. 12 The motion trajectory of the linkage point in the shoulder joint rehabilitation mechanism

为保证康复训练的效果和舒适性, 将机构三维设计模型导入 ADAMS 软件中, 借助运动仿真分析与后处理工具, 对连杆 BC 以及其上套杆 BP 进行运动学仿真分析, 生成两杆的角位移曲线、角速度曲线、角加速度曲线, 仿真结果如图 13—图 15 所示。图中红色曲线代表连杆仿真曲线, 蓝色代表右手臂套杆仿真曲线, 以上 6 条曲线均较光滑。图 14 中角速度变化范围在  $8 \sim 12 (\text{°} \cdot \text{s}^{-1})$ , 两条曲线完全重合, 其速度较低且变化较缓慢。仿真结果表明: 该机构运动性能良好且稳定, 执行低速缓慢运动, 非常适用于患肢进行肩关节康复训练。

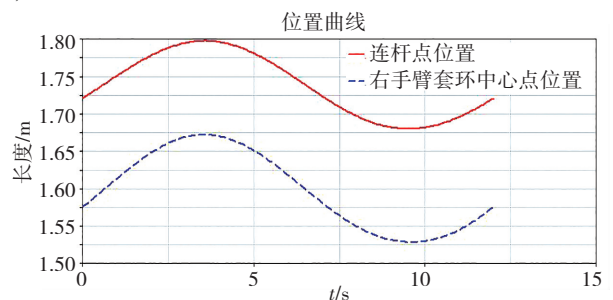


图 13 两杆角位移曲线

Fig. 13 Two-bar angular displacement curve

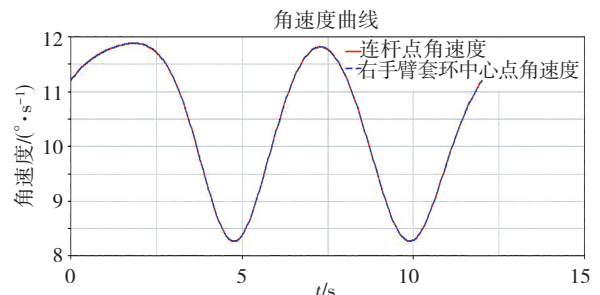


图 14 两杆角速度曲线

Fig. 14 Two-bar angular velocity curve

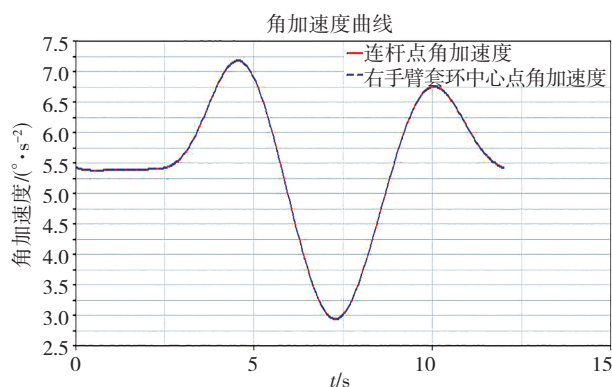


图 15 两杆角加速度曲线

Fig. 14 Two-bar angular acceleration curve

#### 4 结论与展望

本文在了解肩关节生理结构与肩关节康复训练机理的基础上,以肩关节与球面四杆机构为研究对象,通过对其结构特点和运动特性进行分析对比,判定出两者具有良好的契合性。利用球面三角运算与坐标系旋转变换,建立了球面曲柄摇杆机构的运动学模型。采用自适应罚函数对运动学模型进行分类处理,确立了此机构优化综合的差分进化算法。选择出较适宜的位姿参数作为该康复机构尺度综合的运动算例,在 MATLAB 软件中求解出了满足肩关节康复训练机构设计要求的较优机构尺寸参数。以人机工程原理为设计准则,在 SolidWorks 软件中建立三维模型,验证出所设计的机构能实现预期运动规律;在 ADAMS 软件中对所设计的机构仿真分析,验证出此机构设计较适用于肩关节康复训练初期的牵引运动,且舒适性有一定的保障。至此,完成了球面四杆式肩关节康复训练机构的运动学设计。

由于该球面曲柄机构具有结构紧凑、简单和单自由度等特性,能实现单输入多输出运动,因此将其应用于肩关节康复训练中,弥补了目前肩关节康复训练机构结构较复杂、不易控制等不足。为研发结构简单,功能可靠,易于控制的肩关节康复装置提供了理论基础。

本文尚未完成肩关节康复训练装置的整体设计,下一步将利用机械原理、机械设计以及机械制造方面的理论知识和实践技能,完成肩关节康复训练装置的样机研制。

#### 参考文献(References):

[1] 苏鹏,李冬静,程露露,等. 上肢康复机器人对脑卒中后肩痛患者的疗效观察[J]. 神经损伤与功能重建, 2023, 18(3): 181-183.

SU Peng, LI Dong-jing, CHENG Lu-lu, et al. Observation on the curative effect of upper limb rehabilitation robot on shoulder pain after stroke[J]. *Neural Injury and Functional Reconstruction*, 2023, 18(3): 181-183.

[2] 沈惠平,杨梁杰,邓嘉鸣,等. 用于肩关节康复训练的单一输入三转动输出并联机构及其运动学设计[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(22): 2983-2988.

SHEN Hui-ping, YANG Liang-jie, DENG Jia-ming, et al. A one-input three-rotation output parallel mechanism and its kinematics design used for shoulder rehabilitation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(22): 2983-2988.

[3] 梁辉,王辉,高云涛,等. 一种 5R+异形 3RPS 的混联上肢康复机构研究[J]. *机械设计与制造*, 2024(2): 286-290.

LIANG Hui, WANG Hui, GAO Yun-tao, et al. Research on a 5R+special-shaped 3RPS hybrid upper limb rehabilitation mechanism[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(2): 286-290.

[4] 国秀丽,吴静松,吴贵军. 基于 TRIZ 理论的娱乐康复训练器设计[J]. *河南科技*, 2023, 42(2): 15-18.

GUO Xiu-li, WU Jing-song, WU Gui-jun. Design of recreational rehabilitation trainer based on TRIZ theory[J]. *Henan Science and Technology*, 2023, 42(2): 15-18.

[5] 赵峰,赵锋,董媛媛,等. 面向社区的脑卒中患者上肢康复产品设计研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(18): 152-159, 183.

ZHAO Feng, ZHAO Feng, DONG Yuan-yuan, et al. Community oriented upper limb rehabilitation product design for stroke patients[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(18): 152-159, 183.

[6] 石文韬,孟青云,喻洪流,等. 一种模块化的腕关节康复训练器设计与仿真[J]. *软件导刊*, 2021, 20(2): 135-141.

SHI Wen-tao, MENG Qing-yun, YU Hong-liu, et al. Design and simulation of a modular wrist rehabilitation trainer[J]. *Software Guide*, 2021, 20(2): 135-141.

[7] 李海虹,董晋安,郭山国,等. 动/静平台非一致型并联机构构型分析及设计方法[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(17): 116-125.

LI Hai-hong, DONG Jin-an, GUO Shan-guo, et al. Analysis and design method for non-uniform parallel mechanism structure of dynamic/static platform[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(17): 116-125.

[8] 曲志洋,杭鲁滨,钟传磊. 以过约束空间机构构造的汽车侧门锁变模式电动开启支链[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(8): 1221-1228.

QU Zhi-yang, HANG Lu-bin, ZHONG Chuan-lei. Variable mode power release branch chain of vehicle side door latch constructed with over-constrained spatial mechanism[J].

- Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(8): 1221-1228.
- [9] 田文杰, 吕东坡, 张相鹏. 基于性能驱动的船载稳定平台尺度参数优化设计[J]. 机器人, 2023, 45(1): 78-88.  
TIAN Wen-jie, LYU Dong-po, ZHANG Xiang-peng. Performance driven optimal design of dimensional parameters for a shipborne stable platform[J]. Robot, 2023, 45(1): 78-88.
- [10] 黄茂林. 机械原理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2010: 49-126.  
HUANG Mao-lin. Mechanical principle[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2010: 49-126.
- [11] 车林仙, 杜力, 黄勇刚. 球面四杆机构函数综合的带修复策略可行性规则差分进化算法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(11): 31-40.  
CHE Lin-xian, DU Li, HUANG Yong-gang. Feasibility-rule-based differential evolution algorithm with repair strategies for function synthesis of spherical four-bar linkages[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(11): 31-40.
- [12] 张小珍. GA-PSO 混合算法的工作臂铰点优化设计[J]. 机械设计与制造, 2024(1): 128-132.  
ZHANG Xiao-zhen. Optimal design of working arm's joint point based on GA-PSO hybrid algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 128-132.
- [13] 王宝峰, 高飞. 某型飞机 RAT 舱门空间四连杆机构设计与优化[J]. 机械设计与制造, 2023(2): 136-139.  
WANG Bao-feng, GAO Fei. The design and optimization of a RAT door spatial four-bar mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(2): 136-139.
- [14] 李井辛, 赵杰, 宋思远, 等. 双体船收放机构优化设计与运动学分析[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(4): 48-54.  
LI Jing-xin, ZHAO Jie, SONG Si-yuan, et al. Optimal design and kinematics analysis of catamaran retraction mechanism[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(4): 48-54.
- [15] 都显琛, 刘学翱, 董洋, 等. 可变后掠翼联动驱动机构设计与尺寸综合[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2502-2509.  
DU Xian-chen, LIU Xue'ao, DONG Yang, et al. Design and dimensional synthesis of a variable wing sweep mechanism[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(12): 2502-2509.
- [16] 段旭洋, 王皓, 赵勇, 等. 基于嵌套粒子群算法的平面机构尺度综合与构型优选[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13): 32-39.  
DUAN Xu-yang, WANG Hao, ZHAO Yong, et al. Dimensional synthesis and optimal type selection of planar mechanisms based on nested particle swarm optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13): 32-39.
- [17] 何兵, 车林仙, 程志红. 函数发生机构优化综合的改进差分进化算法[J]. 机械设计, 2010, 27(3): 5-9.  
HE Bing, CHE Lin-xian, CHENG Zhi-hong. Improved differential evolution algorithm for optimal synthesis of function generating linkages[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(3): 5-9.
- [18] 车林仙. 面向机构分析与设计的差分进化算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012: 71-111.  
CHE Lin-xian. Study on differential evolution algorithms orientating analysis and design of mechanisms[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2012: 71-111.
- [19] 朱立红, 张金龙, 仲佳俊, 等. 基于差分进化算法下肢康复机构的优化设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(9): 1153-1159.  
ZHU Li-hong, ZHANG Jin-long, ZHONG Jia-jun, et al. Optimal design of lower extremity rehabilitation mechanism based on differential evolution algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(9): 1153-1159.
- [20] 赵元浩, 崔冰艳, 黄金凤, 等. 基于神经修复方法的肩关节康复机器人设计与仿真[J]. 机械传动, 2016, 40(5): 88-91, 109.  
ZHAO Yuan-hao, CUI Bing-yan, HUANG Jin-feng, et al. Design and simulation of shoulder joint rehabilitation robot based on the method of nerve repairment[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(5): 88-91, 109.
- [21] 韩建友, 杨通, 于靖军. 高等机构学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015: 133-134.  
HAN Jian-you, YANG Tong, YU Jing-jun. Advanced mechanisms[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015: 133-134.
- [22] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 98-99.  
HUANG Zhen, ZHAO Yong-sheng, ZHAO Tie-shi. Advanced spatial mechanism[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 98-99.

责任编辑:李翠薇