

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.03.019

基于 ADAMS 和 ANSYS 的空间四杆 引纬机构优化研究^{*}

周凯红, 张学谦, 郭玉田

(桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西 桂林 541006)

摘要:针对空间四杆引纬机构剑带运动平稳性差和运动精度低等问题,从机构运动参数和结构刚度两方面对该机构进行了优化设计研究。首先,运用空间机构学理论分析了剑带的运动规律,并利用软件仿真验证了其正确性,为优化设计提供了理论基础;然后,以剑带最大加速度最小化为目标,以满足引纬工艺和性能要求为约束条件,利用 ADAMS 参数化建模对该机构进行了优化分析;考虑引纬机构高速运转下不可忽视的柔性问题,建立了刚柔耦合模型并进行了仿真,分析了各个构件柔性变形对剑带运动精度的影响;最后,以连杆为例,以减小剑带加速度误差为目标,提出了通过增加截面尺寸、提升结构刚度来降低构件柔性变形影响的方法。研究结果表明:对运动参数进行优化后的剑带最大加速度减小 35.7%,运动平稳性得到提升;对结构刚度进行优化后的剑带加速度误差明显减小,运动精度得到提高。

关键词:引纬机构;参数化建模;刚柔耦合;优化设计;ADAMS

中图分类号:TH112.1;TS103.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)03-0383-05

Optimization of spatial four-bar weft insertion mechanism based on ADAMS and ANSYS

ZHOU Kai-hong, ZHANG Xue-qian, GUO Yu-tian

(College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Aiming at the poor motion stability and low motion precision of the spatial four-bar weft insertion mechanism, the optimal design of the mechanism was studied from two aspects of mechanism motion parameters and structural stiffness. The motion law of the sword belt was analyzed by using the spatial mechanism theory, and its correctness was verified by software simulation, which provided a theoretical basis for optimal design. With the goal of minimizing the maximum acceleration of the rapier belt and meeting the weft insertion process and performance requirements as constraints, the mechanism was optimized and analyzed by using ADAMS parametric modeling. Considering the flexibility problem that could not be ignored in the high-speed operation of the weft insertion mechanism, a rigid-flexible coupling model was established and simulated, and the influence of flexible deformation of each component on the motion accuracy of the belt was analyzed. Taking the connecting rod as an example, in order to reduce the acceleration error of the sword belt, it was proposed that the influence of flexible deformation of the member could be reduced by increasing the section size to improve the structural stiffness. The results indicate that the maximum acceleration of the sword belt is reduced by 35.7%, and the motion stationarity is improved after the optimization of the motion parameters; the acceleration error of the sword belt is significantly reduced, and the motion accuracy is improved after the optimization of the structural stiffness.

Key words: weft insertion mechanism; parametric modeling; rigid-flexible coupling; optimization design; ADAMS

收稿日期:2020-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51265008);国家重点实验室开放基金资助项目(HPCM-2013-06);广西自然科学基金面上资助项目(2018JJA160072)

作者简介:周凯红(1968-),男,湖南岳阳人,教授,主要从事复杂齿轮的数字化设计和制造、复杂曲面的多轴联动数控制造技术方面的研究。E-mail:983362215@qq.com

0 引 言

剑杆织机作为常用的一种纺织机械,由于具有可靠性好、转速快、效能高和适应性强等特点被广泛应用到纺织工业中^[1]。引纬机构作为剑杆织机中的重要组成之一,其运动的平稳性和运动精度直接决定了织机性能的可靠性和织物的质量,故众多学者纷纷对引纬机构的优化设计进行了探究。

竺志超等^[2]针对空间六杆组合的引纬机构,首次提出采用遗传算法对其进行了优化设计,最终证明了利用该算法对引纬机构进行优化是可行的;陈建能等^[3]提出了一种改进的遗传算法,对一种新型引纬机构进行了复杂约束下的多目标优化,优化结果满足要求;唐朝飞等^[4]对空间连杆引纬机构建立了虚拟样机模型,针对质量和刚度进行了结构优化,提高了碳纤维引纬的质量;周香琴等^[5]考虑各构件主轴等效转动惯量的变化规律,提出减小其中占比较大的构件的质量和转动惯量,并采取了织机实物样机加以测试验证,最终结果表明,优化方案对减轻织机振动、提高织机车速有明显的效果。

本研究提出利用 ADAMS 参数化建模和 ADAMS-ANSYS 联合刚柔耦合分析的方法,从机构运动参数和提高结构刚度两方面对空间四杆引纬机构进行优化设计,为该机构的进一步分析和优化提供理论基础。

1 引纬机构运动学分析及仿真验证

空间四杆引纬机构简图如图 1 所示。

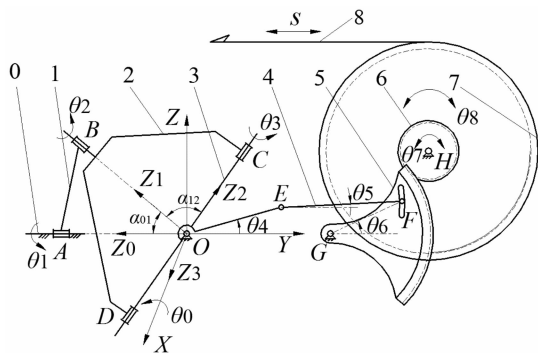


图 1 空间四杆引纬机构简图

0—箱体;1—曲柄;2—叉形连杆;3—十字摆轴;4—连杆;5—扇形齿轮;6—传动齿轮;7—剑轮;8—剑带

图 1 中,电机的输出运动在 A 处输入到引纬机构系统,带动曲柄 1 做整周转动,从而带动叉形连杆 2 做复杂空间运动,十字摆轴 3 在箱体 0 的约束和叉形连杆 2 的带动下往复摆动,即空间 4R 机构的输出运动;通过平面四杆机构 OEFG,带动扇形齿轮 5 做往复摆动;扇形齿轮 5 上设有一滑槽,连杆 4 的 F 端可以在滑槽中移动,从而间接地改变铰接点 F、G 之间的距离,达到调节剑带动程的目的;经过传动齿轮 6 和剑轮 7

的运动放大,运动传递到剑带 8 上,剑带 8 做往复直线运动,实现引纬。

1.1 运动学建模

首先分析空间 4R 机构部分,为建立输出转角 θ_0 和输入转角 θ_1 的关系。假想将杆件 2 拆离,结合空间机构学知识,采用方向余弦矩阵法^[6],可得到关系式如下:

$$(0,0,1)[C_{23}][C_{30}][C_{01}](0,0,1)^T = \cos\alpha_{12} \quad (1)$$

式中: C_{01}, C_{23}, C_{30} —坐标系变换矩阵; α_{12} — Z_1 与 Z_2 的夹角。

将其代入坐标系变换矩阵,经化简整理可得:

$$\theta_0 = 2\arctan \frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}}{B_1 - C_1} \quad (2)$$

其中: $A_1 = -\cos\theta_1$; $B_1 = \frac{\cos\alpha_{01}}{\sin\alpha_{01}}$; $C_1 = \frac{\cos\alpha_{12}}{\sin\alpha_{01}}$ 。

式中: α_{01} — Z_0 与 Z_1 的夹角。

分析图 1 中的几何关系可得:

$$\theta_4 = \theta_0 - \alpha_{COE} \quad (3)$$

式中: α_{COE} —十字摆轴中 CO 和 OE 的夹角; θ_4 —OE 与固定坐标系 Y 轴正方向的夹角。

在图 1 所示的固定坐标系 OXYZ 中,根据几何关系可得:

$$\begin{cases} L_{OE}\cos\theta_4 + L_{EF}\cos\theta_5 = L_{OG} + L_{FG}\cos\theta_6 \\ L_{OE}\sin\theta_4 + L_{EF}\sin\theta_5 = L_{FG}\sin\theta_6 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L_{OE}, L_{EF}, L_{FG}, L_{OG}$ —铰接点 O 与 E, E 与 F, F 与 G, O 与 G 间的距离,mm; θ_5 —EF 与固定坐标系 Y 轴正方向的夹角; θ_6 —扇形齿轮的转角。

将式(4)化简,可得到 θ_6 和 θ_4 的关系式为:

$$\theta_6 = 2\arctan \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 + B_2^2 - C_2^2}}{C_2 - B_2} \quad (5)$$

其中: $A_2 = -2L_{FG}L_{OE}\sin\theta_4$; $B_2 = 2L_{FG}(L_{OG} - L_{OE}\cos\theta_4)$; $C_2 = L_{OE}^2 + L_{FG}^2 + L_{OG}^2 - L_{EF}^2 - 2L_{OE}L_{OG}\cos\theta_4$ 。

根据实际装配方案和运动连续性,式(5)中取负号;根据扇形齿轮、传动齿轮、剑轮和剑带的装配关系,可得出剑带的位移方程为:

$$s = \frac{d_5 d_7 \theta_6}{2d_6} \quad (6)$$

式中: d_5 —扇形齿轮分度圆直径,mm; d_6 —传动齿轮分度圆直径,mm; d_7 —剑轮分度圆直径,mm。剑带位移对时间求导即可得到剑带的速度 v 和加速度 a 。

1.2 运动学仿真验证分析

笔者利用 UG 对引纬机构的各构件进行了三维建模,并根据图 1 中各构件的位置关系,对所建零件模型进行了虚拟装配,利用测量功能对装配体进行了参数测量。

各构件运动几何参数如表 1 所示。

表 1 各构件运动几何参数

参数名称	参数值
Z_0 与 Z_1 夹角 $\alpha_{01}/^\circ$	40
Z_1 与 Z_2 夹角 $\alpha_{12}/^\circ$	85
CO 与 OE 夹角 $\alpha_{COE}/^\circ$	39
铰接点 E, F 间距离 L_{EF}/mm	228.34
铰接点 F, G 间距离 L_{FG}/mm	146.04
铰接点 O, E 间距离 L_{OE}/mm	181.5
铰接点 O, G 间距离 L_{OG}/mm	265.53
扇形齿轮分度圆直径 d_5/mm	356.1
传动齿轮分度圆直径 d_6/mm	59.35
剑轮分度圆直径 d_7/mm	386

笔者应用 MATLAB 软件^[7]并结合理论分析,得出剑带运动函数关系式。假设曲柄转动速度为 400 r/min,曲柄旋转一周为一个周期;根据表 1 中测得运动几何参数,求得剑带一个运动周期内的运动规律曲线,并将结果与 ADAMS 仿真结果进行对比。

剑带运动规律理论与仿真对比曲线如图 2 所示。

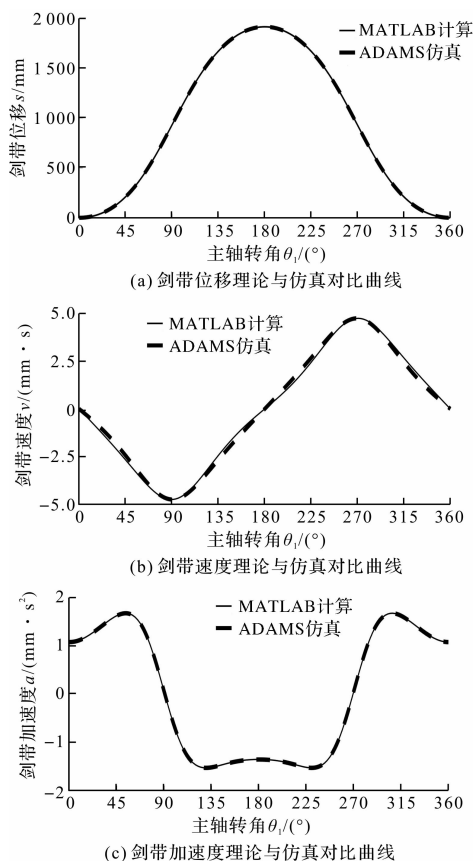


图 2 剑带运动规律理论与仿真对比曲线

分析图 2 可知:理论计算与软件仿真的结果基本一致,验证了理论分析的正确性。该结果为进一步优化分析提供了有效依据。

2 基于运动平稳性的刚体动力学优化

对于高速运转的引纬机构,剑带运动的平稳性是

衡量其动力学性能的重要指标,而动力学性能主要体现在其加速度的变化规律。加速度过大会使构件惯性力增大,从而使冲击力增大,给织机带来振动、磨损、断纬等负面影响。所以在满足引纬要求的前提下,应尽量减少剑带的最大加速度。

2.1 优化模型建立

根据引纬机构运动学分析并结合实际,选取设计变量为:

$$X = \{x_1, x_2, x_3\} = \{\alpha_{01}, \alpha_{12}, L_{FG}\} \quad (7)$$

将剑带加速度最大值最小化设为优化目标,用公式表示为:

$$F(x) = |a_{\max}| \rightarrow \min \quad (8)$$

同时,不可过于追求单方面性能的好坏,而忽视对其他条件的影响,对于引纬机构其他的一些运动学性能和尺寸要求也应该满足,故设置约束条件为:

(1) 剑带最大行程要求:

$$s_{\max} \geq 1500 \text{ mm} \quad (9)$$

(2) 空间 4R 机构曲柄存在条件:

$$\alpha_{01} \leq \alpha_{12} \quad (10)$$

(3) 双摇杆机构杆长条件:

$$L_{FG} + L_{OG} \geq L_{OE} + L_{EF} \quad (11)$$

2.2 ADAMS 优化实验及结果分析

在 ADAMS 中,笔者忽略各个构件的几何外形,通过建立可参数化的 point 点,将各构件用简单的连杆代替,建立引纬机构的参数化模型。

在进行优化设计之前,首先设置设计变量。其中, L_{FG} 的长度是由铰接点 F 的位置决定的,为方便分析,此处将其对应设计变量改为连杆 EF 与 Y 轴正方向的夹角。

设计变量与取值范围如表 2 所示。

表 2 设计变量与取值范围

设计变量	取值范围
$DV_{\alpha_{01}}/^\circ$	30 ~ 45
$DV_{\alpha_{12}}/^\circ$	70 ~ 90
$DV_{\alpha_{FEY}}/^\circ$	-5 ~ 5

将关键设计点 point_B、point_C、point_F 的坐标值参数化,用设计变量来表示;然后对剑带的加速度进行测量,将其仿真过程中的最大值设为优化分析的目标函数 OBJECTIVE_1;根据上文分析的约束条件,分别设置对应的约束方程 OPT_CONSTRAINT_1/2/3;运行 ADAMS 中的 Design Evaluation Tools 功能,设置目标为目标函数最小化,选择设计变量和约束条件,选择 OPTDES-GRG 优化算法,运行优化命令。

优化结果对比如表 3 所示。

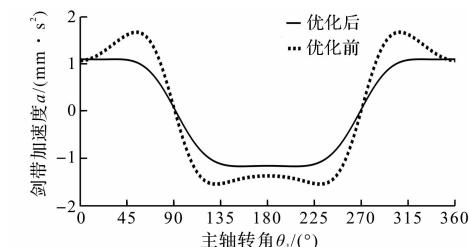
表 3 优化结果对比

设计变量	优化前	优化后
$DV_{\alpha_{01}}/^\circ$	40	30.920 7
$DV_{\alpha_{12}}/^\circ$	80	90
$DV_{\alpha_{FEY}}/^\circ$	0	-2.176 81

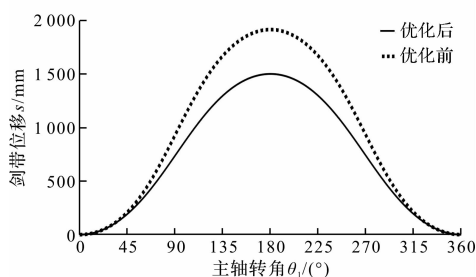
从表 3 中可以看出,对 3 个变量同时进行优化,经过迭代计算可以得到一组最佳运动参数。

优化目标剑带加速度的最大值,从优化前的 $1.71\text{e}+06\text{ mm/s}^2$ 降到了 $1.099\ 9\text{e}+06\text{ mm/s}^2$ 。与此同时,剑带位移的最大值由之前的 $1\ 914\text{ mm}$ 减小到了 $1\ 500\text{ mm}$ 。

优化前后对比曲线如图 3 所示。



(a) 优化前后剑带加速度对比曲线



(b) 优化前后剑带位移对比曲线

图 3 优化前后对比曲线

分析图 3 可知:在满足剑带动程大于或等于 $1\ 500\text{ mm}$ 的条件下,剑带加速度的最大值减小了约 35.7%,剑带的运动平稳性得到了显著提升;加速度运动曲线更加趋向于等腰梯形,在纱纬交接时加速度变化更加平缓,很好地实现了平稳接纬^[8]。

3 基于运动精度要求的结构优化

针对剑杆织机在高速运转条件下工作,部分构件柔性变形较大,严重影响了剑带的运动精度,对引纬机构进行全刚体动力学分析不足以反映机构的真实工况,故笔者提出运用 ADAMS 和 ANSYS 联合仿真的方法^[9,10],对剑杆织机引纬机构进行刚柔耦合仿真分析。

相较于剑带的位移和速度,构件的柔性变形对剑带加速度的影响最大^[11]。现笔者将各个构件柔性化,分别建立刚柔耦合模型,通过仿真得到各构件柔性化时剑带加速度的误差曲线,对误差最大的相应构件进行结构优化设计。

3.1 刚柔耦合模型的建立

笔者将要柔性化的构件从 UG 中导出为 x_t 格式文

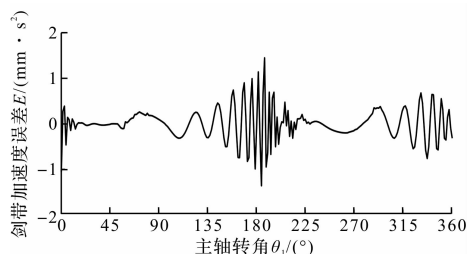
件,将生成的文件导入到 ANSYS 中,密度设为 $7\ 801\text{ kg/m}^3$,弹性模量设置为 207 GPa ,泊松比为 0.29,采用 SOLID185 和 MASS21 对其进行网格划分;在与其他构件连接处建立刚性区域,以便在 ADAMS 中添加运动副;抽取刚性区域的前 6 阶模态,最后导出 mnf 中性文件;在 ADAMS 中利用生成的柔性体替换掉相应刚性部件,重新定义运动副,最终得到刚柔耦合仿真模型。

3.2 刚柔耦合动力学仿真分析

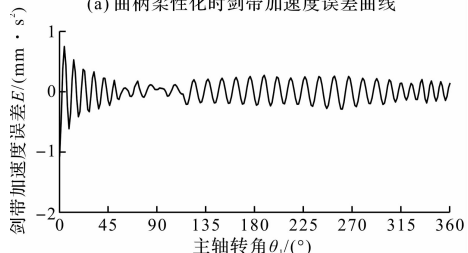
在 ADAMS 中,对刚柔耦合模型施加驱动,电机转速同样设为 400 r/min ,仿真时间为 0.15 s 。根据引纬机构实际工作情况,剑带是带动剑头做往复运动的,故在剑带端点处施加一个竖直向下的集中载荷,载荷大小根据剑头的质量而定,此处设为 4 N 。

笔者依次对各构件柔性化时的刚柔耦合模型进行仿真,其中扇形齿轮、传动齿轮、剑轮和剑带的柔性化带来的剑带加速度误差相对较小,此处不做讨论。

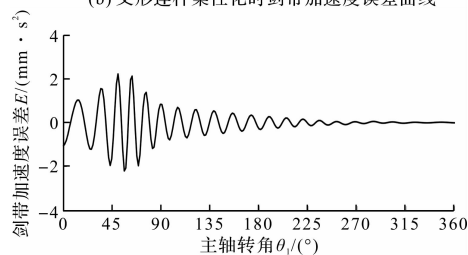
仿真得到各构件柔性化时剑带加速度误差曲线如图 4 所示。



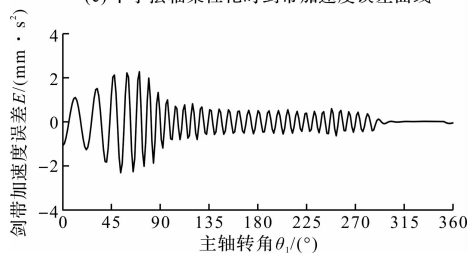
(a) 曲柄柔性化时剑带加速度误差曲线



(b) 叉形连杆柔性化时剑带加速度误差曲线



(c) 十字摆轴柔性化时剑带加速度误差曲线



(d) 连杆柔性化时剑带加速度误差曲线

图 4 各构件柔性化时剑带加速度误差曲线

分析图4可知:每个构件的柔性化都会对剑带的运动精度产生影响,从而影响纱纬交接的稳定性和准确性;其中,连杆的柔性化对剑带加速度的影响最为显著,故需要以连杆为例,对其进行结构优化。

3.3 结构优化实验及结果分析

针对连杆柔性化对剑带运动精度的影响,笔者提出通过增加连杆的截面尺寸以提高其结构刚度,减小其柔性变形对剑带加速度的影响;每次将连杆的宽度和厚度增加10 mm,分两次对连杆进行结构优化^[12-13]。

连杆优化前后参数对比如表4所示。

表4 连杆优化前后参数对比

优化对象	优化前	一次优化后	二次优化后
连杆宽度/mm	36	46	56
连杆厚度/mm	16	26	36

笔者将优化后的连杆重新导入 ANSYS 中作柔性化处理,然后在 ADAMS 中进行刚柔耦合仿真分析。分析图4(d)可知,主轴转角在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 之间时,误差相对较大。为更清晰地对比优化前后的误差,此处只展示主轴转角在区间 $[0^\circ, 90^\circ]$ 内的优化前后的剑带加速度误差的对比分析。

连杆优化前后剑带加速度误差对比曲线如图5所示。

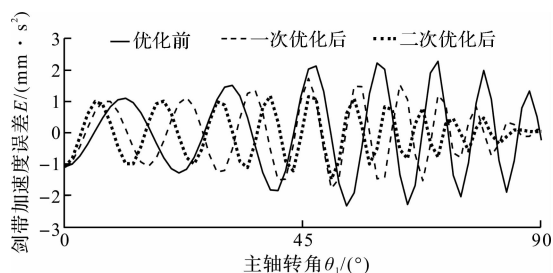


图5 连杆优化前后剑带加速度误差对比曲线

由图5可以看出:增加连杆的截面尺寸,剑带运动误差相应减小,截面尺寸越大,剑带加速度误差就越小;由此证明了优化方法的有效性和可行性。

4 结束语

剑杆织机引纬机构的动力学性能是保证织机整体性能可靠性和织物质量的关键,笔者针对空间四杆引纬机构的运动平稳性和运动精度,从两个方面对其进行了优化设计:

(1)以减小剑带最大加速度为目标,利用 ADAMS 参数化建模进行优化分析,最终得到了一组最佳运动参数,并且优化后的剑带最大加速度降低了35.7%,曲线

形状更趋向于等腰梯形,剑带运动平稳性得到了提升;

(2)考虑剑杆织机引纬机构构件的柔性变形,对引纬机构进行刚柔耦合仿真分析。通过对连杆进行结构优化,增加构件结构刚度以减小其柔性变形对剑带运动精度的影响,优化后的剑带加速度误差明显减小。

优化结果表明,剑带的运动平稳性得到提高,其由于构件柔性变形产生的运动误差明显降低,剑带运动精度得到提高,引纬机构的动力学性能得到了明显改善。该结果为该机构的进一步分析和优化提供了理论基础。

但是对于此方法与引入优化算法的优化效果对比还有待于将来做进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] 李文启. 剑杆织机空间四连杆引纬机构动力学分析与仿真[D]. 天津:天津工业大学机械工程学院,2018.
- [2] 竺志超,李志祥. 引纬机构的遗传算法优化设计[J]. 纺织学报,2002,23(3):34-35.
- [3] 陈建能,赵雄,张国凤,等. 基于改进 NSGA-II 算法的新型引纬机构的参数优化[J]. 纺织学报,2008,29(1):110-113.
- [4] 唐朝飞,李晶,张利锋,等. 基于虚拟样机的引纬机构的结构优化[J]. 西安工程大学学报,2016,30(4):416-420.
- [5] 周香琴,杨胜蛟,王琴龙,等. 剑杆织机惯性载荷变化规律及提速试验[J]. 纺织学报,2017,38(8):144-149.
- [6] 江浙,周香琴,王琴龙. 球面4R引纬机构运动及载荷特性研究[J]. 机电工程,2015,32(10):1325-1329.
- [7] 徐永康,张雷. 基于 MATLAB 空间四连杆引纬机构运动仿真[J]. 轻工机械,2012,30(3):17-21.
- [8] 赵雄,徐宾,陈建能,等. 几种典型的剑杆织机引纬机构及其机构创新[J]. 纺织机械,2008(2):48-51.
- [9] 金国光,李文启,魏展,等. 空间四连杆引纬机构刚柔耦合动力学分析与仿真[J]. 天津工业大学报,2018,37(4):72-77.
- [10] 张雷,余克龙,陈少钟,等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 空间四连杆引纬机构的柔性动力学仿真[J]. 纺织学报,2013,34(5):116-120.
- [11] 余克龙. 变形空间连杆式引纬机构运动弹性动力学分析[D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院,2014.
- [12] 邢坤,程武山. 多功能智能轮椅背部支起机构优化设计[J]. 轻工机械,2019,37(5):89-93.
- [13] 蒋祥,蔡健荣,孙力. 杀菌机的无轴螺旋加热输送机结构优化设计[J]. 包装与食品机械,2020(1):42-46.

[编辑:雷敏]

本文引用格式:

周凯红,张学谦,郭玉田. 基于 ADAMS 和 ANSYS 的空间四杆引纬机构优化研究[J]. 机电工程,2021,38(3):383-387.

ZHOU Kai-hong, ZHANG Xue-qian, GUO Yu-tian. Optimization of spatial four-bar weft insertion mechanism based on ADAMS and ANSYS[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(3):383-387.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>