

基于双四连杆机构的缝合装置设计与研究

陈海松,周燕飞

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为解决立体织物穿刺成型时采用人工缝合方式存在的问题,设计一种基于双四连杆机构的缝合装置。根据缝合的工艺流程,确定装置上两个勾针的运动轨迹和极限位置,利用解析法求出连杆和勾针的长度。通过建立四连杆机构的运动学模型,推导出两个勾针的位移、速度和加速度公式。在给定运动参数的条件下,应用 MATLAB 软件仿真得到两个勾针的运动状态和运行轨迹。研究结果验证了该设计的可行性。

关键词:立体织物;缝合装置;平面四连杆;运动学分析

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0149-05

Design and Analysis of Stitching Device Based on Double Four-bar Linkage Mechanism

CHEN Haisong, ZHOU Yanfei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of manual stitching during the puncturing and molding of three-dimensional fabrics, a stitching device based on double four-bar linkage mechanism is designed. The motion track and limit position of the two crochet hooks on the device are determined, and the lengths of the connecting rods and crochet hooks are calculated by the analytical method. By building a mathematical model of the four-bar linkage mechanism, the displacement, velocity, and acceleration formulas for the two crochet hooks are derived. Given the motion parameters, the motion state and orbit of the two hooks are simulated by using MATLAB software. And the feasibility of the design is verified by the research results.

Keywords: three-dimensional pierced fabrics; stitching device; four-bar linkage; kinematic analysis

0 引言

在碳纤维立体织物的穿刺成型工艺中,当碳纤维纱线替换完织物上原有钢针后,需要进行纤维锁扣。其目的在于将织物上正交叠放的各层碳布缝合在一起,并在织物厚度方向引入纤维。这样既可以保证织物结构的整体性,又能提高立体织物的体积密度^[1]。在目前的生产工艺中,缝合时所采用的线迹为单线链式线迹,即用单根连续的碳纤维纱线按指定方向进行相互嵌套锁扣,工作原理与缝绉机缝合织布类似^[2]。

传统缝绉机在缝绉过程中,当机针穿过织布并回退形成线环时,依靠织布底部的直勾针或者旋梭来形成链式线迹。但由于碳纤维纱线是脆性材料,耐磨性和抗弯折能力较差,并且织物上穿刺钢针排布密集,间距较小,无论是采用旋梭还是直勾针摆动的缝合方式都难以实现较好的缝

合效果^[3-4]。由于发达国家的技术封锁,再加上我国对高性能复合材料的研究起步较晚,目前市面上还没有成熟的自动化缝合设备。国内企业在生产立体穿刺织物时,依旧采用人工操作的方式实现链式线迹。因为织物上钢针数量较多,且每替换一根钢针就需要进行一次缝合,工作量过于庞大,导致人工置换周期长,成本高,同时也难以保证缝合的质量。

为了实现自动化生产立体织物,提高缝合的效率和质量,本文在传统缝绉机缝合方式的基础上,提出了一种基于四连杆机构的缝合装置方案,运用两个勾针之间的运动配合实现纤维锁扣。

1 缝合装置结构设计

传统缝合方式难以适用立体织物中的纤维锁扣,本文采用双勾针的方式实现链式线迹,具体工作流程如图1所示。

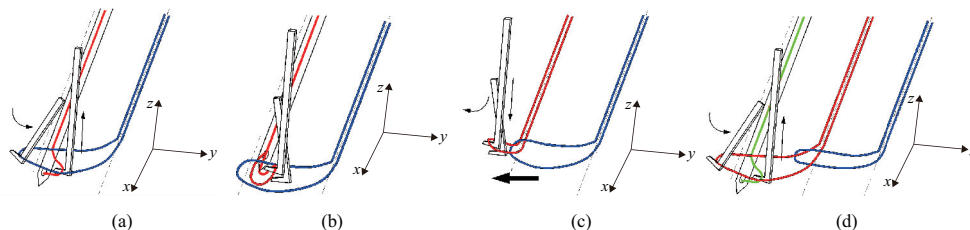


图1 双勾针实现链式线迹示意图

图 1(a) 为初始状态,此时勾针 2 处于极限位置,其上勾有上一个锁扣周期内形成的旧线环,勾针一穿过旧线环,处于置换钢针下方;图 1(b) 表示置换针回退形成新线环后,勾针 1 勾起新线环,此时新线环被勾针 1 从旧线环中带出,完成了线环的嵌套。同时,勾针 2 开始摆脱旧线环;图 1(c) 表示缝合装置移动到下一个缝合位置后,勾针 1 向下移动到初始位置,勾针 2 反方向摆动并勾住勾针 1 上的线环,然后也摆动到初始位置;图 1(d) 表示当两个勾针都摆动到初始位置后,进入下一个缝合周期,此时置换针开始形成新的线环,缝合装置重复上述动作。

从图 1 可知,勾针 1 是直线往复运动,勾针 2 是在平面内摆动。因此,可以用曲柄滑块机构驱动勾针 1,用曲柄摇杆机构驱动勾针 2。同时,要实现链式缝合,两个勾针在运动中需要满足一定的位置关系。如果采用两个驱动源分别驱动,难以保证两勾针的相对位置,本文将采用一个曲柄同时驱动两个四连杆机构的方式,并且为了简化结构,设定两个四连杆共用一个机架。其结构简图如图 2 所示。

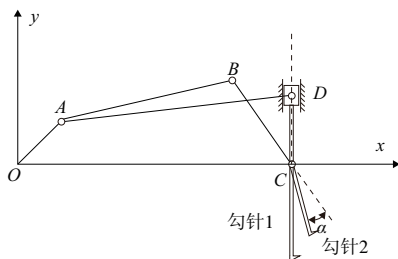


图 2 缝合装置结构简图

根据缝合工艺要求,设定滑块的上极限位置为 70 mm,行程为 15 mm,勾针 2 摆动时的左右偏角均 $>5^\circ$ 。考虑安装空间,取装置安装高度为 60 mm。

为便于计算各杆长度,分别建立了曲柄滑块机构和曲柄摇杆机构的数学模型^[5],如图 3、图 4 所示。

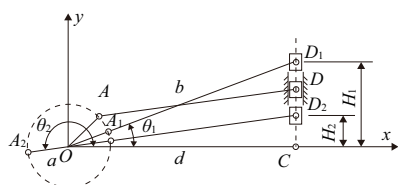


图 3 曲柄滑块机构数学模型

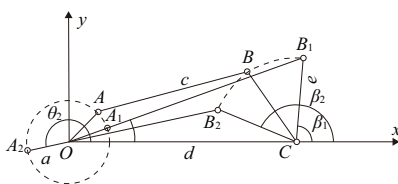


图 4 曲柄摇杆机构数学模型

根据数学模型可建立以下方程式:

$$\begin{cases} H_1 = d \tan \theta_1 & H_2 = d \tan \theta_2 \\ H_1 - H_2 = 15 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{d}{\sin(\beta_2 - \theta_2)} = \frac{e}{\sin(\theta_2)} = \frac{c - a}{\sin(-\beta_2)} \quad (2)$$

利用上述方程,结合勾针的极限位置,利用解析法计算出各杆长度,如表 1 所示。

表 1 缝合装置参数 单位:mm

曲柄 OA	连杆 AD	连杆 AB	摇杆 BC	机架 OC
5.4	86.8	68	44.5	60

此时,当勾针 2 与摇杆的安装角为 10° 时,其左右偏角约为 8° ,满足设计要求。同时,根据缝合装置的安装高度和勾针的极限位置计算出勾针 1 的长度为 117 mm,勾针 2 长度为 51 mm。

2 缝合装置运动学分析

由于碳纤维纱线未加捻,抵抗冲击的能力较小^[6],因此需要对勾针的运动状态进行分析和仿真,以此来验证装置能否在满足工艺要求的情况下,对纱线的冲击和损伤较小。由于勾针 1 和勾针 2 分别固定在滑块和摇杆上,滑块和摇杆的运动参数直接反映了两个勾针的运动状态。因此,可通过研究滑块和摇杆的运动参数来分析两勾针的运动状态。

2.1 曲柄滑块机构

将曲柄滑块机构置于图 5 所示的坐标系中,以机架为 x 轴,滑块导路为 y 轴。令曲柄 OA 的长度矢量为 a ,连杆 AD 的长度矢量为 b ,机架 CO 的长度矢量为 d ,滑块距机架高度 CD 的长度矢量为 h 。其中 φ_1 为曲柄与水平方向的夹角, φ_2 为连杆与水平方向的夹角。

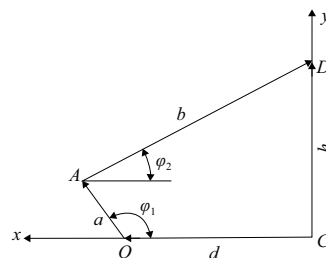


图 5 曲柄滑块机构运动模型简图

由图 5 可知,该机构形成的封闭矢量多边形方程式为^[7]

$$a + b + d = h \quad (3)$$

其复数形式为

$$ae^{i\varphi_1} + be^{i\varphi_2} = ih + d \quad (4)$$

将其展开后得到位移关系式:

$$\begin{cases} \varphi_2 = \arccos \frac{d - a \cos \varphi_1}{b} \\ h = a \sin \varphi_1 + b \sin \left(\arccos \frac{d - a \cos \varphi_1}{b} \right) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)求导后并展开可得到其速度方程:

$$\dot{h} = a \dot{\varphi}_1 \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sin \varphi_2} \quad (6)$$

同理,对式(4)求导后得到其加速度方程:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_2 = -\frac{a\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + a\dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1 + b\dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2}{b \sin \varphi_2} \\ \ddot{\varphi}_2 = a\ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + b\ddot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 - a\dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1 - b\dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 曲柄摇杆机构

同理,将曲柄摇杆机构置于直角坐标系中,以曲柄转动中心为原点,机架为 x 轴,竖直方向为 y 轴,如图 6 所示。图中 θ_1 表示曲柄与机架的夹角,由于两个四连杆机构采用同一个曲柄驱动,因此 θ_1 与曲柄滑块中的 φ_1 等同。 θ_2 为连杆 AB 与水平面的夹角, θ_3 为摇杆 BC 与机架的夹角。

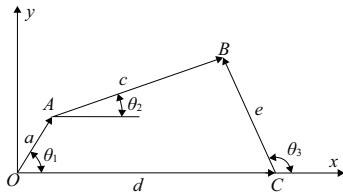


图 6 曲柄摇杆机构运动模型简图

该机构的矢量方程为

$$a+c=d+e \quad (8)$$

同理可得,该机构中摇杆的角位移关系式:

$$\theta_3 = \arccos \frac{-FG+E\sqrt{E^2+F^2-G^2}}{E^2+F^2} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{cases} E=2aesin\theta_1 \\ F=2e(acos\theta_1-d) \\ G=-a^2+c^2-d^2-e^2+2adcos\theta_1 \end{cases} \quad (10)$$

角速度关系式:

$$\dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_1 \frac{a \sin(\theta_1 - \theta_2)}{e \sin(\theta_3 - \theta_2)} \quad (11)$$

角加速度关系式:

$$\ddot{\theta}_3 = \frac{a\ddot{\theta}_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) - a\dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_2 - \theta_1)}{e \sin(\theta_2 - \theta_3)} + \frac{e\dot{\theta}_3^2 \cos(\theta_2 - \theta_3) - c\dot{\theta}_2^2}{e \sin(\theta_2 - \theta_3)} \quad (12)$$

从上式中可以看出,在杆长一定时,滑块与摇杆的运动状态与曲柄的运动状态有直接关系^[8]。因此驱动电机的控制算法会对锁扣装置运动的平稳性产生很大影响。

2.3 缝合装置运动状态仿真

由于在立体织物成型过程中,链式缝合不是持续进行,而是在碳纤维纱线替换完钢针并形成锁扣线环时缝合装置才开始运行,且在完成一次缝合后停止,等待下一次缝合。因此电机需要频繁的启动和停止。根据工艺要求,一次缝合周期为 1 s,曲柄在一个周期内需要旋转的角度为 2π 。

在控制系统中,为了简化控制算法,一般采用梯形速

度曲线驱动电机,其主要包括匀加速、匀速和匀减速三个阶段^[9]。虽然梯形速度曲线控制简单,但从速度曲线图可知,电机的角加速度会存在突变,而由式(7)和式(12)可知滑块和摇杆的加速度与电机的角加速度 $\ddot{\theta}_1$ 有关,当电机角加速度存在突变时,也会引起滑块和摇杆的加速度突变,造成一定的柔性冲击,会引起锁扣装置的振动,不仅会对碳纤维纱线造成一定损伤^[10],同时也可能使勾针无法稳定地勾住纱线而导致跳针现象。

为了削弱柔性冲击对缝合装置影响,提高缝合的成功率,改用 S 型速度曲线算法控制电机转速。在工业控制中,S 型速度曲线一般分为 7 段,虽然避免了加速度突变的现象,但由于本身的算法太过复杂,不利于程序编写。因此,本文采用的是 5 段 S 型速度曲线,相对于常规的 7 段曲线进行了简化,减小了匀加速和匀减速阶段。这样既保留了加速度平稳变化的优势,又在一定程度上减轻了算法编写的工作量^[11]。

根据 5 段 S 型速度曲线的算法公式,计算出曲柄在各个时间段的角加速度曲线,如图 7 所示。

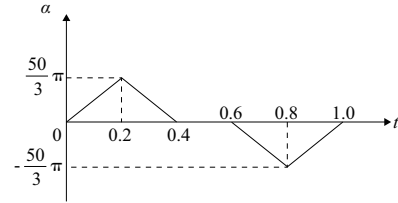


图 7 曲柄角加速度曲线示意图

则曲柄的角加速度公式为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{250}{3}\pi t & 0 \leq t < 0.2 \\ \frac{100}{3}\pi - \frac{250}{3}\pi & 0.2 \leq t < 0.4 \\ 0 & 0.4 \leq t \leq 0.6 \\ 50\pi - \frac{250}{3}\pi t & 0.6 \leq t \leq 0.8 \\ \frac{250}{3}\pi t - \frac{250}{3}\pi & 0.8 \leq t \leq 1.0 \end{cases} \quad (13)$$

将曲柄角速度 α (即 $\ddot{\theta}_1$) 公式代入上述四连杆运动方程中,设置相应的仿真参数并利用 MATLAB 软件进行运动学仿真^[12],得到了滑块和摇杆的速度和加速度曲线如图 8-图 11 所示。

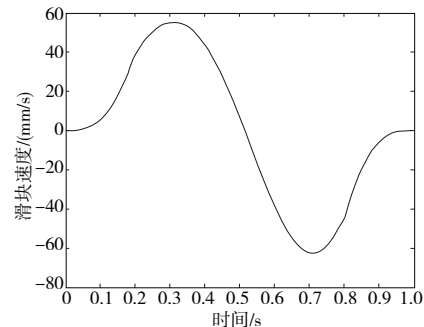


图 8 滑块速度曲线示意图

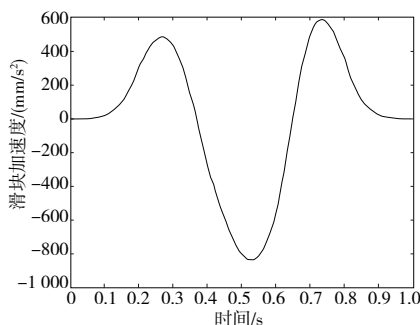


图9 滑块加速度曲线示意图

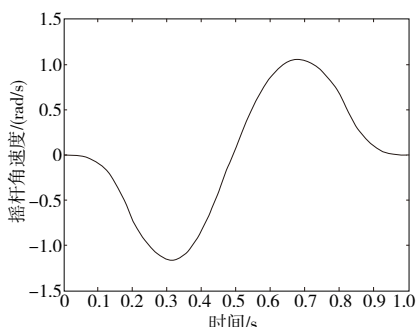


图10 摇杆角速度曲线示意图

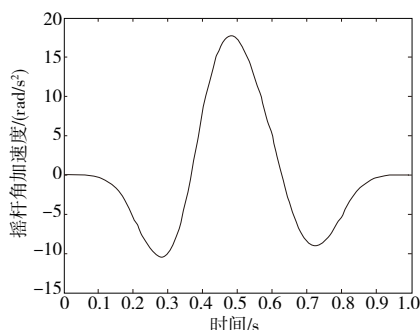


图11 摇杆角加速度曲线示意图

从图中可以看出,滑块与摇杆的速度和加速度曲线变化平稳,没有出现突变的现象,不会对缝合装置产生刚性冲击和柔性冲击。滑块的最大加速度为 0.8 m/s^2 ,摇杆的最大角加速度为 1.2 rad/s^2 ,数值相对较大。为了减小加速度引起的惯性力对勾针运动稳定性的影响,可以通过减轻滑块和摇杆的质量或增大一次缝合的周期来作进一步优化。

3 勾针运行轨迹仿真

3.1 两勾针相对位置分析

在纤维锁扣的过程中,勾针1和勾针2的运动轨迹存在一个交汇点,并且在一个周期内,勾针2的针尖会先后两次处于交汇点位置,如图12(a)中所示。

当第一次到达时,勾针2摆脱了原有线环;在第二次到达时,勾针2需要勾住勾针1上的线环。当勾针2第一

次到达交汇点时,为了防止勾针2撞到勾针1上已经勾起的线环,勾针2的针尖应处于勾针1针尖之上,以便提前摆过交汇点。同时,当勾针2向右摆动,第二次到达交汇点时,勾针2的针尖应低于勾针1针尖,以便能够勾住勾针1上的线环。

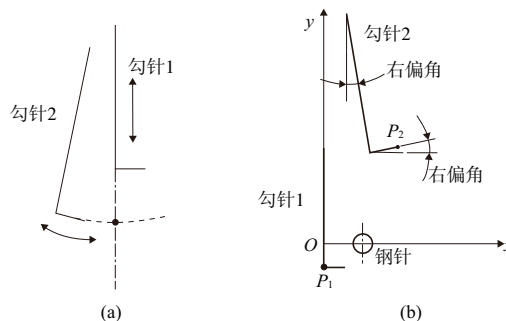


图12 两勾针轨迹示意图

因此,两勾针需要满足以下位置关系:1)初始状态时,勾针1处于下极限位置,勾针2处于右极限位置;2)当勾针2向左摆动,针尖第一次到达交汇点时,勾针2针尖应高于勾针1针尖;3)当勾针2向右摆动,针尖第二次到达交汇点时,勾针2的针尖应低于勾针1针尖。

3.2 模型的建立及仿真

图13表示两勾针的初始状态,此时勾针1在下极限位置,勾针2在右极限位置,以此建立仿真坐标系。以勾针1的运行轨迹为y轴,钢针水平面为x轴,建立平面坐标系。在勾针1和勾针2上分别取特征点 P_1 和 P_2 分析,此时 P_1 点的运动轨迹就是勾针1针尖的轨迹,而 P_2 的运动轨迹就是勾针2针尖的轨迹。则 P_1 与 P_2 的坐标可以表示为:

$$\begin{cases} P_{1x} = 0 \\ P_{1y} = H + s - l_1 = H - 57 \\ P_{2x} = l_2 \cos(\beta - \alpha) + 4 \times \sin(\beta - \alpha) = -5l \cos(\beta - 10^\circ) + 4 \sin(\beta - 10^\circ) \\ P_{2y} = s - l_2 \sin(\beta - \alpha) - 4 \times \cos(\beta - \alpha) = 60 - 4 \cos(\beta - 10^\circ) - 5l \sin(\beta - 10^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

式中:数值4为勾针2针尖的长度; s 表示装置的安装高度,为60mm; H 表示滑块当前所在高度; β 表示摇杆当前与机架的夹角(即 θ_3); α 表示勾针2与摇杆的安装角,为 10° 。

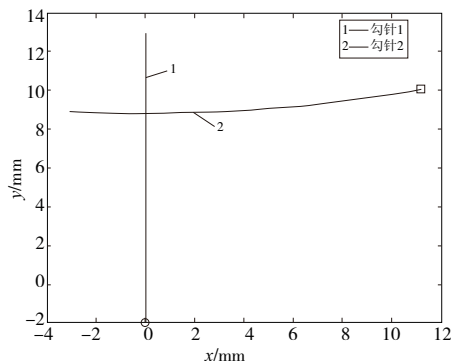


图13 初始状态

将四连杆运动学方程代入 P_1 与 P_2 的坐标表达式中,并利用 MATLAB 求解出两个点的运动轨迹^[13],如图 14、图 15 所示。

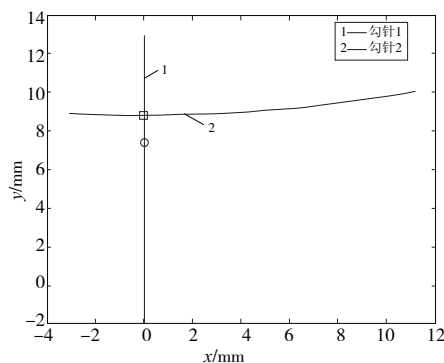


图 14 勾针 2 第一次到达交汇处

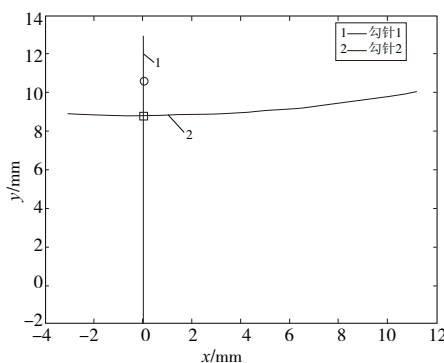


图 15 勾针 2 第二次到达交汇处

图中线 1 表示勾针 1 的运行轨迹,线 2 表示勾针 2 的运行轨迹。圆圈和方框分别表示 P_1 和 P_2 点当前所在位置。

从轨迹图中可以看出,当勾针 2 向左摆动,针尖第一次到达交汇处时,勾针 1 针尖位于勾针 2 针尖下方约 1.8 mm;当勾针 2 越过左极限位置,向右摆动,第二次到达右极限位置时,勾针 2 针尖位于勾针 1 针尖下方约 2 mm 处。可知,两个勾针的相对位置关系满足设计要求,利用双勾针实现链式线迹的方案具有可行性。

4 结语

针对立体织物穿刺工艺中采用人工实现纤维锁扣的不足,本文根据传统缝纫机缝合方式,设计了一种基于双四连杆机构的缝合装置,通过两个勾针之间的运动配合实

现链式线迹。本文主要的工作和结论为:

1) 根据纤维锁扣工艺,确定了勾针的运行轨迹和极限位置,利用解析法求出各杆长度。

2) 建立了曲柄滑块机构和曲柄连杆机构的运动学模型,推导出两个勾针的位移、速度和加速度方程。

3) 采用 5 段 S 型速度曲线模型确定曲柄的运动参数,并利用 MATLAB 对勾针运动状态进行了仿真,验证了缝合装置能够平稳高效运行。

4) 对两勾针的空间位置进行了数学建模和仿真,分析了在 3 个关键位置时勾针 1 和勾针 2 的相对位置关系,验证了两勾针的运动轨迹满足设计要求,证明了该缝合装置具有一定可行性。

参考文献:

- [1] 梅宝龙. 立体织物 Z 向钢针置换及纤维锁扣装置研究[D]. 天津:天津工业大学,2019.
- [2] 范晓健,李晶,刘红卫,等. 碳纤维层叠布用缝纫机的改进设计与三维仿真[J]. 纺织学报,2016,37(10):141-144.
- [3] 宋宗建. 70 mm 厚炭/炭复合材料预制体缝合装置研究[D]. 天津:天津工业大学,2019.
- [4] 李提建,靳丰田. 支架四连杆机构解析法设计与优化[J]. 矿山机械,2015,43(11):25-27.
- [5] 陈晨,刘站,高维升,等. 碳纤维织物的织造与发展[J]. 纺织报告,2018(12):9-11,14.
- [6] 任泽凯. 基于 MATLAB 和 ADAMS 的四连杆机构运动仿真[J]. 装备机械,2016(3):55-58,65.
- [7] DELYOVÁ I, HRONCOVÁ D, FRANKOVSKÝ P, et al. Kinematic analysis of crank rocker mechanism using MSC Adams/view[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,611:90-97.
- [8] 胡文奇,辛舟,张伟程. 铝锭伺服堆垛机 z 轴速度分析及仿真[J]. 机械制造与自动化,2017,46(3):116-118.
- [9] LIU H B, LIU J, KABOGLU C, et al. The behaviour of fibre-reinforced composites subjected to a soft impact-loading: an experimental and numerical study[J]. Engineering Failure Analysis,2020,111:104448.
- [10] 徐禹翔,徐晓光,朱雪燕. 基于五段 S 型曲线的机械手速度规划策略[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2017,30(2):37-41.
- [11] 唐宁东. 挤出橡胶高精度自动称重与分剪系统的研究与开发[D]. 福州:福州大学,2018.
- [12] 杨磊,王新亚,许日成,等. 反四连杆机构液压支架顶梁运动轨迹分析[J]. 矿山机械,2013,41(8):28-30.

收稿日期:2020-11-26