

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.002

# 考虑柔性和间隙的螺旋引纬机构仿真分析

孔佳元, 张 雷

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:**为了提高引纬机构的稳定性和精度,将柔性构件和间隙的影响考虑在内,联合 ANSYS 和 ADAMS 建立螺旋引纬机构的刚柔耦合模型,通过 ADAMS 进行动力学仿真,在刚性系统和刚柔耦合系统中分别分析了旋转铰间隙对剑杆输出特性曲线的影响。在对仿真数据的观察中发现了相当比例的噪声信号,为了消除噪声信号的影响,利用统计学中上下四分位数和中位数来识别替换异常值;在综合考虑间隙和柔性构件的影响时,利用减噪后的加速度曲线与理想刚体系统下的数据的偏差值得到一个新的曲线,该曲线在固定区间内做高频波动,呈现出类似周期性声波信号的特点。结果表明旋转铰间隙是影响剑杆稳定性和精度的主要因素,柔性构件和间隙的综合作用产生了趋向于周期性的碰撞影响。依据研究结果可以进一步对原刚体模型下设计的引纬机构进行优化设计。

**关 键 词:**螺旋引纬机构;刚柔耦合模型;剑杆运动特性曲线;噪声信号;ADAMS 软件

中图分类号:TS103.134

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2017)01-0005-05

## Simulation of Lead Screw Weft Insertion Mechanism Considering Flexibility and Clearance

KONG Jiayuan, ZHANG Lei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and accuracy of weft insertion mechanism, the influence of flexible component and clearance should be taken into consideration. The rigid-flexible model of lead screw weft insertion mechanism was built through ADAMS combining with ANSYS. Dynamics simulation was carried out by ADAMS. Considering the hinge clearance, the influence on the output characteristic curve of rapier was respectively analyzed for the rigid system and rigid-flexible system. A considerable proportion of noise signal was discovered in the simulation data, in order to eliminate the influence of the noise signal, the abnormal value was identified by upper and lower quartiles and replaced by median. A new curve was obtained by the deviation value between the de-noised acceleration curve and the one in rigid system. This curve does a high frequency wave in a fixed interval, presenting a similar characteristic of periodic acoustic signal. The result shows that: the hinge clearance is the major factor to the stability and accuracy of rapier movement; the collision impact tends to be cyclical by the comprehensive effect of clearance and flexible component. The weft insertion mechanism designed by rigid system can be further optimized based on those research results.

**Keywords:** lead screw weft insertion mechanism; rigid-flexible model; rapier kinematics curve; noise signal; ADAMS

螺旋传动机构被广泛应用于航天船舶、纺织设备、资源开采设备、医疗器械等装备中,随着自动化设备向高速化、精密化发展,给螺旋传动机构提出了更高的要求。系统构件由于弹性或塑性变形、加工制造和装配误差、不规则摩擦磨损等不可避免的因素,设计初期得

到的机器工作性能往往与实际运行结果有很大差距。在传统机构弹性动力学研究的基础上,进一步提出了考虑运动副间隙的间隙机构动力学研究。国内外学者对间隙或者弹性机构已经有了相当多的研究<sup>[1-3]</sup>,时兵<sup>[4]</sup>基于间隙矢量模型和非线性碰撞接触模型建立

收稿日期:2016-08-17;修回日期:2016-11-21

基金项目:国家自然科学基金(51175475);浙江省自然科学基金(LY14E050027)。

第一作者简介:孔佳元(1990),男,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事纺织机械和机构学的研究。E-mail: 838319833@qq.com

了针对大型重载机构的旋转铰间隙模型,提高了虚拟样机仿真的可靠性和真实性。白争锋<sup>[5]</sup>针对非规则的磨损间隙,引入了考虑接触表面曲率变化的非线性动态变刚度系数,建立了含间隙机构动力学特性与磨损特性的集成分析方法。文献[6]以汽车转向梯形机构为研究对象,应用四阶龙格-库塔法对转向轮摆振系统进行仿真分析,发现运动副间隙是诱发转向轮摆振系统混沌运动的重要因素,并指出随着运动副间隙增大,转向轮摆振运动加剧。然而对运动副间隙及构件弹性的综合影响的研究相对较少,针对螺旋传动机构的研究就更少了;另一方面现有的公开文献对仿真数据并没有进一步进行处理,忽略了可能的噪声信号对仿真结果的影响。

本文以某型号的螺旋引纬机构为研究对象,通过 ADAMS 和 ANSYS 的联合仿真<sup>[7]</sup>,分别进行了刚体模型、刚柔耦合模型、含间隙刚体模型及含间隙刚柔耦合模型的动力学仿真分析。通过对仿真数据的进一步减噪处理,分析了构件弹性和旋转铰处间隙对剑杆运动特性曲线的影响。

## 1 螺旋引纬机构简介

某型号的螺旋引纬机构简图如图 1 所示。该机构由曲柄滑块机构 ABC 和螺旋副机构 CD 组成。曲柄轮旋转时,由曲柄 AB 通过连杆 BC 传动螺母套壳 C,螺母内有 2 对滚子与螺杆的螺旋面相啮合形成螺旋副,套壳 C 沿螺杆的轴心线做平滑移动,因此与之相啮合的螺杆产生旋转运动。螺母套壳做往复移动,螺杆即正反转。螺杆末端装有剑带轮 D,剑带轮 D 的正反转使挠性剑杆产生引纬动作。调节曲柄 AB 的长度可以获得所需剑杆动程大小。连杆 BC 因结构尺寸的原因相比曲柄轮、螺旋杆更易发生弹性变形,笔者选取连杆作为柔性构件来研究。另一方面忽略由轴承连接的旋转副间隙影响,仅考虑旋转铰链的间隙影响。曲柄 AB 取 100 mm,连杆 BC 取 357 mm,螺杆螺距取平均螺距 157 mm/r。

## 2 ADAMS 接触碰撞模型

本文通过 ADAMS 进行间隙动力学仿真,ADAMS 中有 2 种内置的方法计算法向接触力:恢复系数算法和基于碰撞函数的接触算法。恢复系数法相对比较简单,没有考虑接触碰撞的过程,仅仅通过恢复系数来表示能量损失。为了更加真实地模拟螺旋引纬机构运动时的碰撞过程,以下仿真全部基于 IMPACT 碰撞函数的接触算法。IMPACT 函数是以牛顿力学为基础结合二状态间隙接触模型所得。两状态间隙模型将整个碰

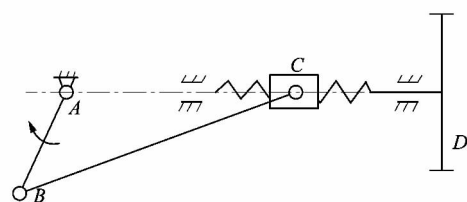


图 1 螺旋引纬机构简图

Figure 1 Sketch of lead screw weft insertion mechanism

撞运动过程分解成接触和分离 2 种状态,该模型认为旋转铰的轴套与轴销发生碰撞时才会产生碰撞力,分离状态下不存在接触力,该模型将构件之间的碰撞看成是一个等效的非线性阻尼弹簧。法向接触力由刚性接触力和黏滞阻尼力 2 部分组成,具体表达式为:

$$\begin{cases} F_N = k\delta^n + \text{STEP}(\delta, 0, 0, d_{\max}, c_{\max})\delta, & \delta < 0; \\ 0 & \delta \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k$  为刚度系数,取决于接触处材料的性质和接触半径;  $n$  为力的非线性系数,取值 1.5;  $c_{\max}$  为最大阻尼系数,其值取刚度系数的 0.1%;  $\delta$  为碰撞深度;  $d_{\max}$  为最大接触深度,通常取合适值为 0.01 mm<sup>[8]</sup>。STEP 函数是 ADAMS 内置的关于自变量  $\delta$  的标准数学阶跃函数,用来描述一个值或表达式值需要从一个常数变成另一个常数的情况。

## 3 动力学仿真分析

### 3.1 刚体模型和刚柔耦合模型仿真对比分析

将在 SolidWorks 中装配好的螺旋引纬机构以 X\_T 格式导入至 ADAMS 中,根据各构件在实际运行过程中的传动联接关系为各构件创建约束。忽略构件之间的摩擦力,设置曲柄处的转动副的转速为 600 r/min,在仿真模块中设置仿真时间为 0.1 s,步长为 500,运行得到刚体系统下的剑杆的位移、速度和加速度曲线。通过后处理模块将曲线数据以 EXECL 形式导出,再利用 MATLAB 对结果进行归一化处理,如图 2 所示。将 ANSYS 中生成的连杆 MNF 中性文件导入到 ADAMS 中将原装配体中的刚性连杆替换成柔性连杆。删除刚性情况下与连杆相关的运动副,重新为柔性连杆添加运动副建立刚柔耦合模型。仿真条件不变,将仿真得到的一个周期的运动数据导入到 MATLAB 中进行归一化处理,得到的剑杆运动特性曲线如图 3 所示。

比较图 2 和图 3 可知,将连杆作为柔性构件考虑时,剑杆的位移和速度曲线几乎没有变化,加速度曲线仅在开始运动的一段时间内发生了相对较大波动,考虑到仿真软件在仿真起始阶段给机构突然施加了驱动

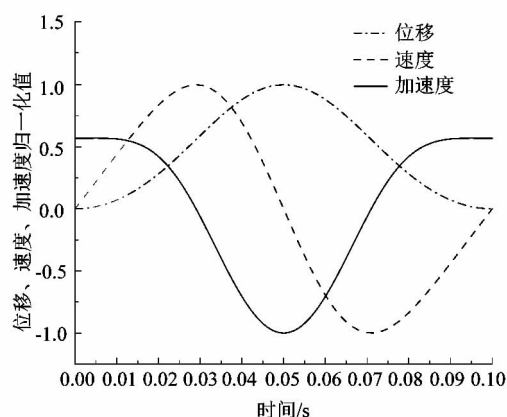


图2 刚体模型剑杆运动曲线

Figure 2 Kinematics curve of rapier in rigid model

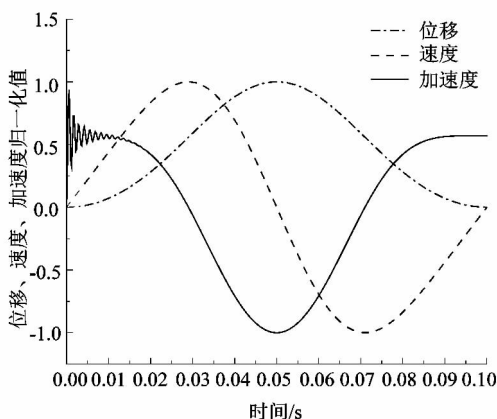


图3 刚柔耦合模型剑杆运动曲线

Figure 3 Kinematics curve of rapier in rigid-flexible model

载荷,突然施加的驱动载荷使柔性连杆瞬间发生较大弹性变形从而使得加速度曲线发生偏差。为了消除这种影响,下面涉及到柔性构件影响的仿真数据应选取机构运行平稳后的一个周期数据。在考虑柔性连杆影响的刚柔耦合模型中,连杆弹性对剑杆运动特性的影响不是十分明显。

### 3.2 间隙模型仿真分析

引纬机构有2处旋转铰,铰接1代表图1中的连杆与螺母套壳间的铰接副,铰接2代表连杆与曲柄间的铰接副。仿真条件不变,先单独研究铰接1处间隙的影响,在ADAMS中将原先的铰接副删除,以SOLID TO SOLID CONTACT/IMPACT接触力来代替。采用碰撞模式,最大压深深度取0.1 mm,忽略摩擦力的影响,其他参数沿用默认值。将仿真得到的数据归一化处理后曲线如图4所示。机构运行过程中不同部件处

受到的载荷一般情况下不同,导致所在构件上的间隙对剑杆运动特性的影响也存在差异。比较2处铰接副间隙对剑杆运动特性影响的差异。由图4可知间隙对位移和速度曲线影响很小,所以接下来仅对比不同铰接副处间隙对加速度曲线的影响。为了方便比较,将不同铰接副处间隙影响时的加速度仿真数据分别与理想刚体系统的加速度做差值,对比结果见图5。

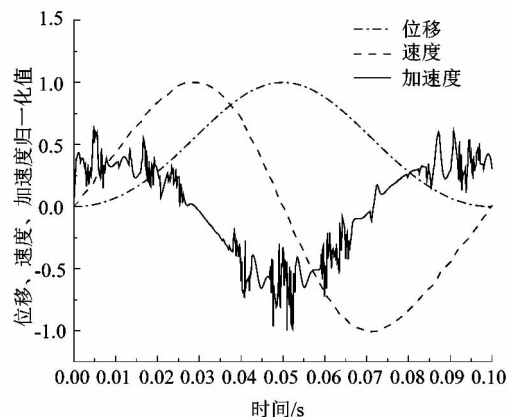


图4 铰接1间隙影响的剑杆运动曲线

Figure 4 Kinematics curve of rapier considering clearance in revolute joint 1

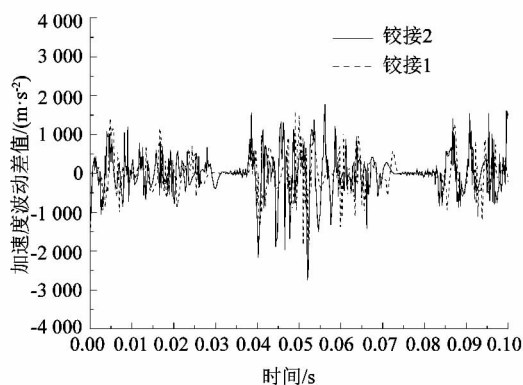


图5 不同旋转铰的加速度差值曲线

Figure 5 Acceleration difference curves of different revolute joints

结合图4和图5可知,考虑旋转铰间隙时,剑杆的位移和速度曲线变化不明显,加速度曲线在一个周期的起始、结束和最大位移阶段出现了明显波动,旋转铰间隙对加速度曲线的影响不能忽略;在间隙模型中,连杆两端的不同旋转铰间隙对剑杆加速度曲线的影响并未表现出明显差异。

### 3.3 含间隙刚柔耦合模型仿真分析

实际工作中,构件与构件之间的连接是一种碰撞

关系,综合考虑间隙与构件弹性更加接近于实际工况。根据图 3 和图 4 可知,单独考虑间隙或者连杆弹性对剑杆位移曲线和速度曲线的影响都不明显,因此下面仅研究间隙和弹性综合作用对剑杆加速度的影响。间隙设置与刚体系统下考虑间隙的仿真条件一致。同时考虑连杆 2 处的间隙影响,会导致仿真过程中连杆脱离,分别对 2 处铰接副进行仿真运算,将得到二者加速度曲线与理想刚体系统的数据做对比,结果分别如图 6 和图 7 所示。

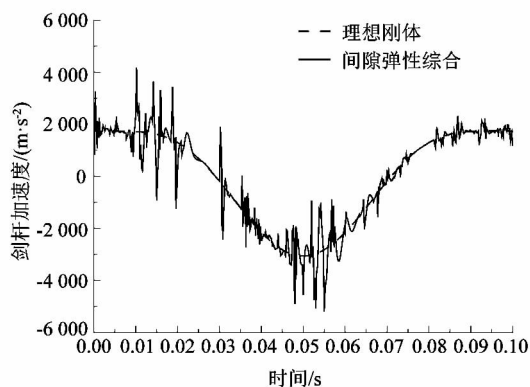


图 6 铰接 1 含间隙刚柔耦合加速度曲线  
Figure 6 Acceleration curve of rigid-flexible model with clearance in revolute joint 1

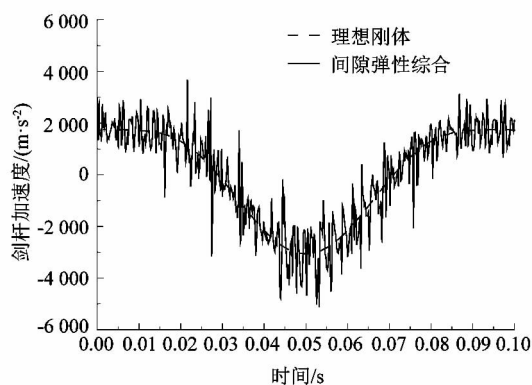


图 7 铰接 2 含间隙刚柔耦合加速度曲线  
Figure 7 Acceleration curve of rigid-flexible model with clearance in revolute joint 2

从图 6 和图 7 中,可以看出在综合考虑间隙和连杆弹性的情况下,加速度曲线都出现了明显波动,铰接 2 含间隙刚柔耦合模型下的加速度曲线波动比铰接 1 含间隙刚柔耦合模型下的波动要更加频繁和剧烈;考虑铰接 2 间隙和柔性连杆的综合影响时,加速度曲线在一个周期内全程维持一定幅度的波动,波动的幅值大于考虑铰接 1 处间隙时的情况,柔性连杆加剧了铰接 2 处的间隙碰撞冲击影响。

### 3.4 间隙和柔性综合影响下的加速度曲线减噪

另一方面注意到:仿真步长为 500,理论采集样点的数量为 501 时,对仿真数据进行观察,发现采集到的样点数量大于理论样点数。无间隙刚柔耦合模型的采样点与理论样点数相同;铰接 1 间隙模型下的样点数为 550;铰接 2 间隙模型下样点数为 599;综合考虑间隙与柔性构件影响时,样点数分别增加至 611 和 671。含间隙影响的模型中都含有相当比例的噪声信号,尤其在综合考虑间隙与柔性影响时噪声信号的占比已经不能忽略。

为了消除信号中的异常值对数据分析的干扰,利用统计学中的上下四分位数对异常值进行识别,异常值通常被定义为小于  $Q_L - 1.5Q_{IQR}$  或大于  $Q_U + 1.5Q_{IQR}$  的值。 $Q_L$  称为下四分位数,表示全部数据中有四分之一的数据取值比它小; $Q_U$  称为上四分位数,表示全部数据中有四分之一的数据值比它大; $Q_{IQR}$  是四分位间距,是上四分位数  $Q_U$  与下四分位数  $Q_L$  之差<sup>[9]</sup>。四分位数具有一定的鲁棒性:多达 25% 的数据可以变得任意远而不会很大大地干扰四分位数,所以异常值不能对这个标准施加影响。将图 6 和图 7 中的加速度曲线分别对刚体理想加速度做差值,在 MATLAB 中找出差值曲线中所有的异常值并用原始数据的中位数代替。进行减噪处理,结果如图 8 和图 9 所示。

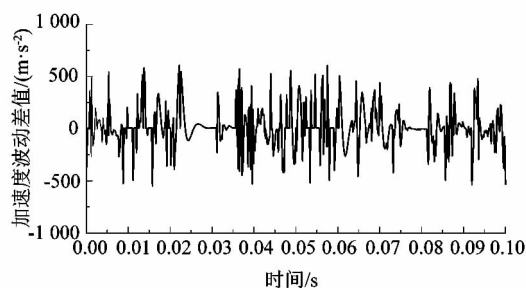


图 8 铰接 1 含间隙刚柔耦合加速度差值曲线  
Figure 8 Acceleration difference curve of rigid-flexible model with clearance in revolute joint 1

结合图 8 和图 5,可以进一步看出柔性连杆大幅减小了铰接 1 的碰撞冲击影响,波动更加平稳,对加速度曲线的影响相对较小;从图 8 和图 9 可知,在含间隙刚柔耦合模型中,考虑铰接 2 处间隙时的加速度波动幅值大约是考虑铰接 1 间隙时幅度的 2 倍,同时波动幅值大约是整个运动周期中的理论最大加速度值的 35%,所以铰接 2 处间隙是含间隙刚柔模型中影响剑杆加速度曲线的主要因素;综合考虑铰接 2 的间隙与柔性连杆影响时,加速度波动曲线呈现出一种类似周

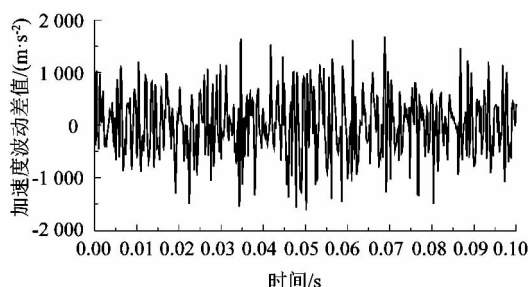


图9 铰接2含间隙刚柔耦合加速度差值曲线

Figure 9 Acceleration difference curve of rigid-flexible model with clearance in revolute joint 2

周期性声波信号在固定区域内进行高频波动的特点,该波动特点不以任一时刻剑杆加速度值具体大小而变化,在螺距和其他结构尺寸一定时可以说是一种固有特性。

为进一步研究仿真数据中的主要成分是否具有周期性的信号源,对图9中的波动信号进行快速傅里叶变换,取采样频率 $f_s = 500$  Hz,整理得到对应的频谱图,结果如图10所示。

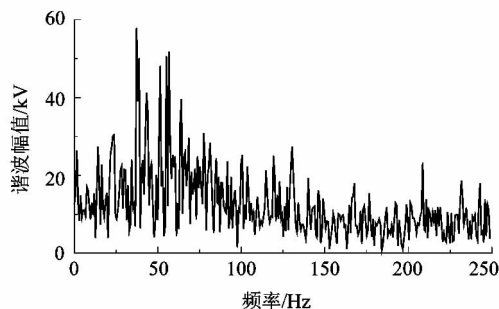


图10 加速度差值信号频谱图

Figure 10 Spectrogram of acceleration difference

从图10中可以看出,在50 Hz附近有几个明显的尖脉冲,这些频率对应加速度差值信号中的主要信号源频率,原始信号中主信号源部分具有周期性信号的可信度非常高;旋转铰的间隙碰撞接触力是造成剑杆加速度曲线的偏差波动的主要因素,从统计学的角度,原本随机性的间隙碰撞接触力在柔性连杆的综合作用下最终给滑块施加了一个综合载荷,该载荷由几个趋向于周期性的主载荷叠加而成。

#### 4 结语

通过对螺旋引纬机构分别进行刚柔耦合模型、间隙模型和含间隙刚柔模型下的仿真分析,发现:

1) 只考虑连杆弹性时,剑杆运动特性的变化不明显;只考虑间隙时,旋转铰间隙碰撞对剑杆的位移和速度曲线影响不大,但加速度曲线出现了大幅波动,旋转

铰的间隙碰撞对剑杆运动特性具有较大影响。

2) 在含间隙刚柔耦合模型中,考虑曲柄旋转铰处间隙时的加速度曲线波动要比考虑滑块旋转铰处间隙时的情况更加频繁和剧烈,柔性连杆加剧了曲柄端间隙铰链的碰撞冲击影响,使得加速度曲线全程围绕理论曲线高频波动。对加速度曲线进行减噪处理后,进一步发现滑块端旋转铰链的间隙影响被柔性连杆减弱,对剑杆加速度的影响很小;曲柄端旋转铰间隙是影响剑杆加速度曲线的主要因素,加速度波动曲线呈现出一种类似周期性声波信号在固定区域内进行高频波动的特点,实际生产装配过程中,应提高曲柄与连杆处旋转铰的装配加工精度。

3) 对减噪后的加速度差值数据进行快速傅里叶变换,由其频谱图发现加速度差值信号中的主成分大概率含有周期性信号。柔性连杆和曲柄端旋转铰的随机间隙碰撞最终给滑块施加了一个综合载荷,该载荷由几个趋向于周期性的主载荷叠加而成。

4) 后续研究中,在不同螺距时,发现柔性连杆和曲柄端旋转铰间隙的综合影响,进一步证实本文得出的加速度波动规律。以求解决 ADAMS 中无法直接实现变螺距螺旋传动仿真的限制,间接得到同真实加速度曲线高度近似的变螺距传动机构的加速度曲线,为各种类型的螺旋传动机构的精密优化提供了技术支持。

#### 参考文献:

- [1] MOHAN A, SINGH S P, SAHA, S K. A cohesive modeling technique for theoretical and experimental estimation of damping in serial robots with rigid and flexible links[J]. Multibody system dynamics, 2010, 23(4): 333 - 360.
- [2] 董霞, 王恪典. 一种间隙副连杆模型及其在复杂机构精度分析中的应用[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(4): 479 - 483.
- [3] 李鹏飞, 刘宏昭, 原大宁. 弹性连杆机构振动的模型预测主动控制研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(3): 266 - 271.
- [4] 时兵, 金焯. 面向虚拟样机的机构间隙旋转铰建模与动力学仿真[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 299 - 303.
- [5] 白争锋. 考虑铰间间隙的机构动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 122 - 137.
- [6] 卢剑伟, 顾映, 王其东. 运动副间隙对汽车摆振系统非线性动力学行为的影响分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 169 - 173.
- [7] 张雷, 余克龙, 陈少钟, 等. 基于 ANSYS 和 ADMAS 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.
- [8] KHEMILI I, ROMDHANE L. Dynamic analysis of a flexible slider-crank mechanism with clearance[J]. European journal of mechanics: A solids, 2008, 27(5): 882 - 898.
- [9] 张良均, 杨坦, 肖刚, 等. MATLAB 数据分析与挖掘实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.