

含运动副间隙的舵机用空间 4R 执行机构动态特性研究

张华,宋梅利,杜英杰

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为探究运动副间隙对舵机用空间 4R 执行机构动态特性的影响,以一种舵机用空间 4R 执行机构为例,考虑运动副间隙的作用,利用 L-N 接触力碰撞模型和修正的 Coulomb 摩擦模型,研究间隙大小对机构运动精度和运动副受力的影响,确定当机构考虑单间隙和双间隙时的最佳间隙量范围。建立空间 4R 机构的刚柔耦合模型,分析了在空间 4R 机构中考虑一个或两个间隙、含或不含柔性体时间隙和柔性体对机构动态特性的影响,证明柔性体的存在会明显增强间隙碰撞对机构的影响。该研究成果可为舵机用空间 4R 机构的设计提供参考依据,有利于执行机构的实际应用。

关键词:运动副间隙;空间 4R 机构;舵机;动态特性;ADAMS

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0023-05

Research on Dynamic Characteristics of 4R Actuator in Space for Rudder Gear with Kinematic Pair Clearance

ZHANG Hua, SONG Meili, DU Yingjie

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To explore the influence of the movement pair clearance on the dynamic characteristics of the space 4R actuator for the steering gear, with a space 4R actuator for the steering gear as the example and in consideration of the effect of the movement pair clearance, the L-N contact force collision model and the modified Coulomb friction were applied to explore the effect of the gap size on the mechanism's motion accuracy to the force of the kinematic pair and determine the optimal gap amount range when the mechanism was concerned with single and double gaps. The rigid-flexible coupling model of the spatial 4R mechanism was established, and the influence of the gap and the flexible body on the dynamic characteristics of the mechanism was analyzed as one or two gaps were taken into account in the spatial 4R mechanism, with or without a flexible body. Existence of the flexible body is proven to have marked impact of clearance collisions on the mechanism. The research results can provide reference basis for the design of the space 4R mechanism for steering gear, which is conducive to practical engineering applications.

Keywords: movement pair clearance; space 4R agency; steering gear; dynamic characteristics; ADAMS

0 引言

弹道修正技术以其低成本、高精度等优点,逐渐成为制导弹药技术研究的热门领域^[1],其中以电动舵机操作鸭舵的修正技术来进行弹道二维修正,能够提供较强的修正能力,对提高弹药的打击精度有重要意义^[2]。在实际舵机系统中,间隙的存在会使舵翼的偏转产生偏差,降低系统的运动精度;当舵机系统含间隙时,运动副之间会产生碰撞和冲击,恶化机构的动态特性^[3]。

国内外研究人员对含间隙机构动力学问题进行了大量的分析和研究。DUBOWSKY S 等^[4]基于牛顿法的二状态模型,对含间隙机构的动力学特性进行了定量分析;FUNABASHI H 等^[5]基于牛顿法,对不同运动副存在间隙时进行了分类建模,并且通过与大量的实验结果进行对比,验证了所建模型的合理性。MIEDEMA B 等^[6]基于动力学定理,将运动副间隙的状态分为 3 种,即接触、分离和碰

撞。FURUHASHI T 等^[7]基于连续接触模型对存在多个转动副间隙的四杆机构建模,并使用拉格朗日方法建立了该机构的运动方程。目前针对含间隙的舵机用空间 4R 机构的研究较少且普遍未考虑因弹性体变形而引起的动态特性变化。对于多体系统,各个零件材料不尽相同,分析间隙和柔性体对机构动态特性的影响具有实际意义。

本文主要针对舵机用空间 4R 执行机构,利用 L-N 接触力模型和修正的 Coulomb 摩擦力模型,仿真分析不同间隙大小对机构动态特性的影响,探究机构间隙尺寸的最佳范围。建立机构的刚柔耦合模型,分析间隙作用下构件的弹性变形对空间 4R 执行机构动态特性的影响。

1 含间隙模型建立

本文以图 1 所示空间 4R 机构进行建模,其中构件 0 为机架,构件 1 为输入轴,构件 2 为连杆,构件 3 为输出轴,各个构件通过转动副连接。4 个转动副的轴线相交于

构件3的几何中心。

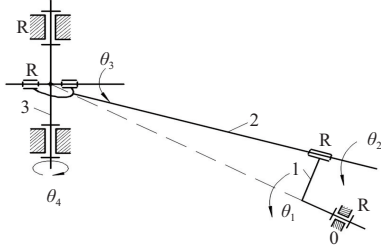


图1 空间4R机构简图

本文采用 Lankarani 和 Nikravesh 接触力模型(L-N 接触力模型),该模型的接触力公式为^[8]

$$F_N = K\delta^n + D\dot{\delta} \quad (1)$$

式中: $K\delta^n$ 为碰撞过程中的弹性变形力,其中 K 是等效的刚度系数, δ 是两碰撞物体法向侵入深度, n 是碰撞力的指数,对于金属材料取 1.5。 K 取决于接触面的材料和几何属性,当两个构件相接触时, K 可由下式计算:

$$K = \frac{4}{3(\sigma_1 + \sigma_2)} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}, \quad \sigma_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \quad (3)$$

其中 ν 和 E 分别表示构件的泊松比和弹性模量。

式(1)中 $D\dot{\delta}$ 为碰撞过程中的阻尼力,其中 $\dot{\delta}$ 为相对碰撞速度, D 为碰撞过程的阻尼系数, D 可通过式(4)求出。

$$D = \mu\delta^n \quad (4)$$

其中 μ 为滞后阻尼因子。在 L-N 接触力模型中,由于机构内部阻尼的存在,会导致接触碰撞过程中能量的耗散。

根据能量守恒定律,在接触碰撞前后两物体的动能损失可表示为

$$\Delta T = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\dot{\delta}_0)^2 (1-e^2) \quad (5)$$

其中: e 为恢复系数; $\dot{\delta}_0$ 为碰撞点的初始相对速度。

对碰撞力进行积分同样可求得碰撞过程中物体的动能损失:

$$\Delta T = \int D\dot{\delta}d\delta = \int \mu\delta^n \dot{\delta}d\delta \approx 2 \int_0^{\delta_{\max}} \mu\delta^n \dot{\delta}d\delta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\dot{\delta}_0)^3 \quad (6)$$

将式(5)和式(6)联立,可得

$$D = \frac{3K(1-e^2)\delta^n}{4\dot{\delta}_0} \quad (7)$$

因此式(1)进一步可表示为

$$F_N = K\delta^n \left[1 + \frac{3(1-e^2)\dot{\delta}}{4\dot{\delta}_0} \right] \quad (8)$$

L-N 接触力模型考虑了物体材料、变形、相对速度等因素的影响,能较为准确地表示碰撞过程中物体能量的损失情况,在含间隙机构动力学研究方面具有广泛的应用场景^[9]。

当机构运动副存在间隙时,除需建立接触力模型外,

还需考虑摩擦力的作用。本文采用修正的 Coulomb 摩擦力模型描述间隙摩擦力,其切向摩擦力 F_t 可以表示为

$$F_t = -\mu_t c_d F_N \frac{v_t}{|v_t|} \quad (9)$$

式中: μ_t 为动摩擦因数; c_d 为动态修正系数; v_t 为切向相对速度。

2 含间隙机构多刚体动力学仿真分析

基于上述碰撞接触力模型和摩擦模型,利用 ADAMS 软件内置的 IMPACT 函数对机构进行仿真分析。依照图 1 所示的运动简图建立如图 2 所示的含间隙空间 4R 机构仿真模型,其中构件 1 为输入轴、构件 2 为连杆、构件 3 为输出轴。设计要求输出轴可以绕其轴线正负转动 20° ,误差 $<0.1^\circ$ 。间隙 1 位于输入轴 1 与连杆 2 间的转动副处,间隙 2 位于连杆 2 和输出轴 3 之间的转动副处,两转动副的基本尺寸均为 16mm。设计加工精度为 IT7 级。

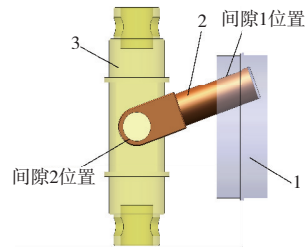


图2 含间隙空间4R机构示意图

为构件 1 添加一个旋转驱动,设置驱动转速为 20 r/s,其他仿真参数如表 1 所示。

表1 ADAMS 中接触力参数

接触力参数	值
刚度系数/(N/mm ^{3/2})	2.62×10 ⁵
静摩擦系数	0.70
动摩擦系数	0.57
恢复系数	0.95

利用 ADAMS 分析含间隙的多刚体空间 4R 机构不同间隙大小和间隙数目的动态特性的影响,并探究舵机用空间 4R 机构存在间隙时的最佳间隙量。

2.1 间隙对机构动态特性的影响

仅考虑间隙 1 的作用,根据机构的尺寸和设计加工精度计算间隙的极限间隙^[10],在极限间隙范围内取间隙尺寸分别为 0.04 mm、0.10 mm 和 0.50 mm,探究间隙对输出轴角位移和接触力的影响,仿真结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,当机构不含间隙时,曲线光滑且无偏差;当间隙为 0.04 mm 时,曲线光滑,最大误差为 0.0275° ,满足设计要求;当间隙为 0.10 mm 时,曲线变得不光滑,最大误差为 0.0887° ,同样满足设计要求;当间隙

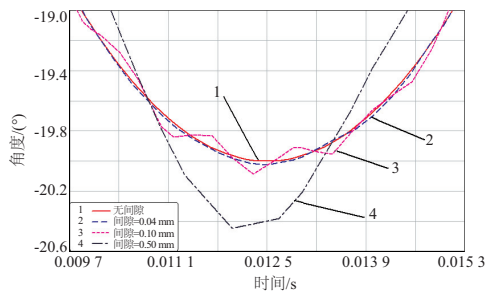


图3 不同间隙时输出轴角位移变化的局部放大图

为0.50 mm时,曲线不光滑,最大误差为0.446°,不满足设计要求。可见,随着间隙尺寸的增大,机构的运动精度逐渐下降。

图4为不同间隙时输出轴与连杆之间的接触力图(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。当间隙为0.04 mm时,接触力的均值为195 N;当间隙增加到0.10 mm时,接触力的均值为321 N;当间隙为0.50 mm时,接触力的均值为4 527 N。这是由于随着间隙增大,运动副元素之间的相对碰撞次数减少,相邻两次碰撞间隔增加,惯性力作用时间更久,碰撞前两构件相对速度更大,故接触力增大。

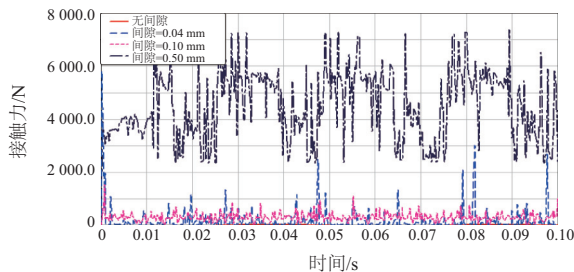


图4 不同间隙时输入轴与连杆之间的接触力图

由图4可知,随着间隙的减小,构成运动副的两物体碰撞次数增多,间隙接触力相应减小并趋向理想机构运动副反力。间隙越小,对机构动态特性的影响越小,机构的稳定性也越好。但由于间隙中存在摩擦,当间隙小到一定程度时,摩擦的影响反而导致间隙接触力增大。因此需要研究机构的最佳配合间隙量。

2.2 分析确定最佳配合间隙量范围

设输入轴与连杆之间的间隙大小分别为0.03 mm、0.04 mm、0.05 mm、0.10 mm和0.20 mm,对其进行动力学仿真分析,研究接触力和输出轴角位移在不同间隙情况下的变化,仿真结果如图5所示。

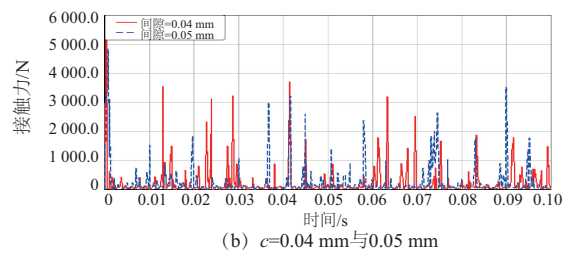
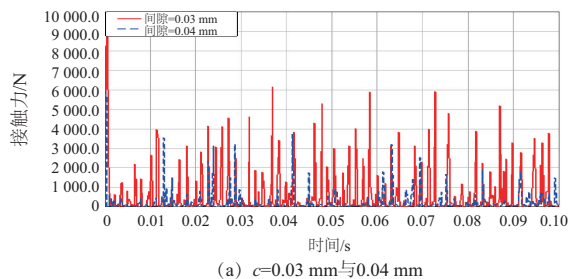
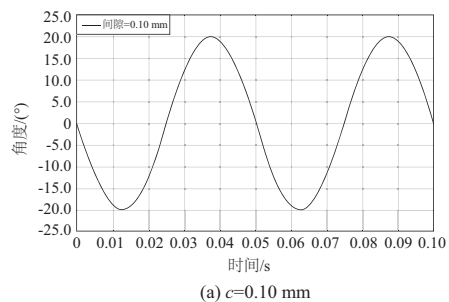


图5 不同间隙时输入轴与连杆之间接触力对比图

由图5(a)可知,间隙为0.04 mm时接触力曲线的波动相对于间隙为0.03 mm时接触力曲线较小,且接触力的幅值较小,约为6 000 N。由2.1小节的结论可知,由于间隙的碰撞模型中考虑了摩擦力,当间隙减小时,摩擦的影响增大,从而使机构间隙为0.03 mm时的接触力大于间隙为0.04 mm时的接触力。由图5(b)可知,间隙在0.04 mm和0.05 mm时接触力曲线变化不大,两个周期内接触力的大小几乎相同,此时摩擦力在碰撞过程中产生的影响不大。故可得出,此空间4R机构在间隙 $<0.04\text{ mm}$ 时,摩擦力对机构接触力的影响将增大。

由图6(a)可知,当间隙为0.10 mm时输出轴角位移相对于不含间隙情况的最大误差为 0.090° ,满足设计要求。由图6(b)可知,间隙为0.20 mm时输出轴角位移相对于不含间隙情况的最大误差为 0.142° ,不满足设计要求。结合此前分析结果可以得出结论,此空间4R机构实际工作时的合适间隙范围约为 $0.04\text{ mm}\sim 0.10\text{ mm}$ 。

x:	y:	Slope:	Min:	Max:	Avg:	RMS:	# of Points
0.064	-19.7793	356.627	-20.0887	20.0907	-0.0543	14.3423	429



x:	y:	Slope:	Min:	Max:	Avg:	RMS:	# of Points
0.06	-19.2433	-600.5541	-20.1369	20.1429	-0.2678	14.1941	386

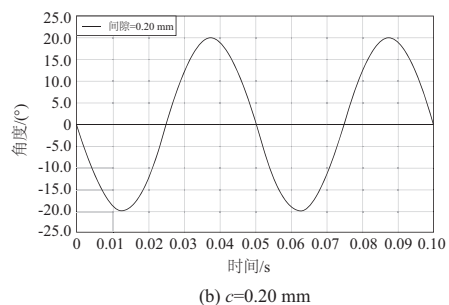


图6 不同间隙时输出轴角位移时间历程图

2.3 含两间隙时机构的动态特性研究

同时考虑图2中间隙1和间隙2对舵机执行机构动态特性的影响,对含两间隙机构进行动力学仿真,仿真结

果如图7所示。

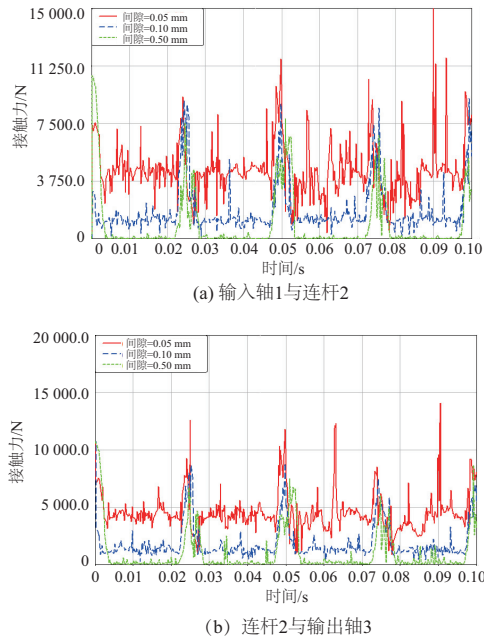


图7 含两间隙条件下输出轴接触力时间历程图

由图7可知,随着间隙的增大,两处间隙之间的碰撞均有所缓和,接触力都出现相对减小的趋势,幅值分别下降了39.3%和46.4%。其原因在于两间隙存在相互耦合的作用,两间隙之间的相互作用使得机构受力情况发生改变。间隙数量的增多,增加了机构整体的间隙碰撞次数,加快了构件动能的耗散,使单个间隙的接触力幅值减小。

为进一步探究含两间隙机构在实际工作时合适的间隙尺寸,取不同的间隙进行动力学仿真分析,输出轴角位移的仿真结果如图8所示。

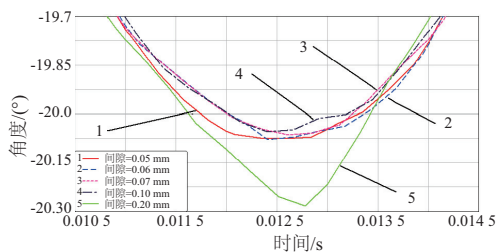


图8 含两间隙不同间隙时输出轴角位移时间历程图

由图8可知,当间隙为0.07 mm时输出轴角位移的最大误差为 0.086° ;间隙为0.06 mm时输出轴角位移最大误差为 0.092° ;间隙为0.05 mm时输出轴角位移的最大误差为 0.290° 。分析可知,随着间隙的减小,输出轴角位移的误差逐渐增加。其原因是间隙中存在摩擦,当间隙小到一定程度时,摩擦力的影响增大,影响输出轴的偏转,降低机构的运动精度。故可知,此舵机用空间4R机构间隙值的下限约为0.06 mm。

当间隙为0.10 mm时,输出轴角位移的极大值为

20.070° ,极小值为 -20.064° ,角位移的曲线光滑,满足精度要求;当间隙为0.20 mm时,输出轴角位移的极大值为 20.319° ,极小值为 -20.282° ,角位移的曲线变得不光滑,且不满足精度要求。结合前面的分析结果可以得出,该舵机用空间4R机构实际工作时合适的间隙范围约为0.06 mm~0.10 mm。

3 含间隙机构刚柔耦合仿真与分析

对于多体系统,各个零件材料不尽相同,不同材料的变形特性也不同,对系统进行刚柔耦合分析结果更接近工程实际应用。本节对含间隙舵机用空间4R机构进行刚柔耦合仿真研究。

3.1 关键部件柔性体的建立

对舵机用空间4R执行机构的关键部件进行柔性体建模,以分析其在受载变形时对输出轴运动精度的影响;分析在间隙作用下柔性体的存在对机构动态特性的影响。本节以连杆2作为柔性体,在ANSYS软件中进行柔性体网格划分,然后导入ADAMS软件中,导入后的刚柔耦合仿真模型如图9所示。

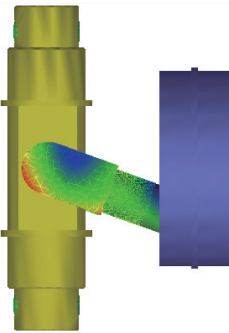


图9 4R空间机构刚柔耦合模型

3.2 仿真与分析

取间隙为0.08 mm,设置仿真时间为0.1 s,仿真步数为100步,进行动力学仿真分析,输出轴角位移曲线在不同条件下的仿真结果如图10所示。图10中曲线1~曲线5分别代表了无间隙无柔性体、单间隙无柔性体、单间隙有柔性体、两间隙无柔性体和两间隙有柔性体条件下的输出角位移的时间历程。

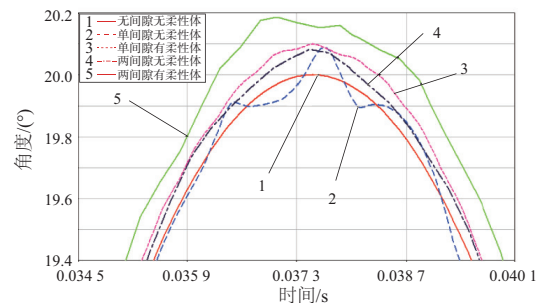


图10 不同条件下输出轴角位移时间历程的局部放大图

由图10可知,含间隙和柔性体对输出轴角位移的精度影响较大。通过和理想条件(多刚体无间隙)下输出轴角位移的对比,含间隙和含柔性体机构输出轴角位移的幅值均大于理想情况。由曲线2、曲线3和曲线4、曲线5对比可知,相较于刚柔耦合模型,多刚体模型的输出轴角位移曲线光滑且幅值更低,说明柔性体产生的弹性变形对机构输出轴角位移的不利影响较大。

输入轴与连杆的接触力仿真结果如图11所示。

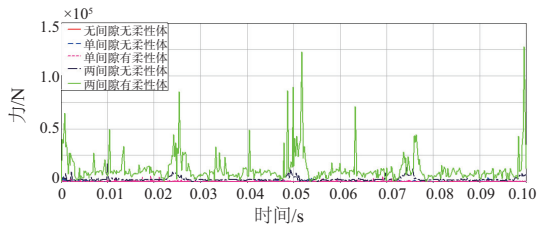


图11 输入轴与连杆间的接触力时间历程图

通过对比图中单间隙的刚性模型和刚柔耦合模型可知,在间隙大小和间隙数量相同的情况下,柔性体的存在使得机构间隙碰撞力峰值更大。当间隙数目增加到2时,柔性体的存在对机构间隙碰撞力的影响更强,间隙碰撞力峰值约为无柔性体情况下的7倍。故在实际生产加工的过程中,应尽可能保证零件的刚度要求。

4 结语

本文以舵机用空间4R机构作为研究对象,考虑运动副间隙的影响,通过仿真分析,探究了间隙大小对机构运动精度和运动副受力的影响,确定了当机构考虑单间隙和双间隙时的最佳间隙量范围。通过建立空间4R机构的刚柔耦合模型,分析了柔性体在受载变形时对输出轴运动精度的影响和在间隙作用下柔性体的存在对机构动态特性的影响。得到了以下结论:

1) 间隙越大,机构的运动误差越大,对机构的破坏和磨损越剧烈;当两间隙同时作用,间隙之间运动副间的碰撞随间隙增大有所缓和。考虑单间隙时,该机构最佳间隙

范围约为0.04 mm~0.10 mm;考虑两个间隙时,间隙量约在0.06 mm~0.10 mm范围内可以降低运动副间隙对机构的不良影响。

2) 多刚体模型的输出轴角位移曲线优于刚柔耦合模型的输出轴角位移曲线,说明柔性体产生的弹性变形对机构输出轴角位移的影响较大;刚柔耦合模型的接触力幅值比多刚体模型的接触力幅值更大,说明了柔性体的存在会明显增强间隙碰撞带来的不良影响,并且柔性体对机构的影响随间隙数量的增多而增强。

参考文献:

- [1] 席溯明. 4R空间机构电动舵机的设计与控制[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- [2] 柯知非,宋卫东. 二维弹道修正组件发展现状及关键技术[J]. 飞航导弹,2018(5):81-85.
- [3] 余涛. 多运动副间隙对机构动力学特性的影响[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [4] DUBOWSKY S, FREUDENSTEIN F. Dynamic analysis of mechanical systems with clearances part 1:formation of dynamic model[J]. Journal of Engineering for Industry, 1971,93(1):305-309.
- [5] FUNABASHI H, OGAWA K, HORIE M. A dynamic analysis of mechanisms with clearances [J]. Bulletin of JSME, 1978, 21(161):1652-1659.
- [6] MIEDEMA B, MANSOUR W M. Mechanical joints with clearance: a three-mode model [J]. Journal of Engineering for Industry, 1976,98(4):1319-1323.
- [7] FURUHASHI T, MORITA N, MATSUURA M. Research on dynamics of four-bar linkage with clearances at turning pairs:1st report, general theory using continuous contact model [J]. Bulletin of JSME,1978,21(153):518-523.
- [8] 黄剑锋,蔡应龙,陈江义. 考虑间隙和构件柔性的3-RRR机构运动精度分析[J]. 机床与液压,2019,47(3):5-8,36.
- [9] 陈天赐. 含多运动副间隙的颚式破碎机曲柄摇杆机构动力学研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2016.
- [10] 邢闽芳. 互换性与技术测量[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2011.

收稿日期:2020-08-20