

基于 ADAMS 的瓦楞辊动力学仿真分析

伦新凯, 张广文, 侯智慧

(华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: **目的** 根据瓦楞辊的啮合特性和工作环境, 分析有无瓦楞纸及不同转速对瓦楞辊工作时中心距变化的影响, 为提高瓦楞辊机构转动的平稳性提供理论依据。**方法** 首先运用三维建模软件 CREO 建立上、下瓦楞辊和瓦楞纸的三维模型, 然后运用动力学分析软件 ADAMS 对瓦楞辊的运动过程进行仿真分析。**结果** 从仿真结果中得出了无瓦楞纸、有瓦楞纸和转速不同的情况下瓦楞辊中心距变化曲线, 并将得出的曲线进行了对比和分析。无瓦楞纸时上、下瓦楞辊的中心距变化量在 0.45 mm 之内, 有瓦楞纸时上下瓦楞辊的中心距变化量在 0.045 mm 之内。**结论** 瓦楞纸的存在能够减小瓦楞辊中心距的变化量, 使瓦楞辊机构的转动相对于空转时的转动更平稳, 瓦楞纸的存在有利于减小瓦楞辊的振动及磨损; 转速对瓦楞辊中心距的变化影响较小, 可以通过适当提高转速来提高瓦楞纸的生产效率。

关键词: 瓦楞辊; 运动过程; 动力学仿真

中图分类号: TH132.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)17-0233-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.17.031

Dynamic Simulation Analysis of Corrugated Roller Based on ADAMS

LUN Xin-kai, ZHANG Guang-wen, HOU Zhi-hui

(School of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

ABSTRACT: According to the meshing characteristics and working environment of corrugated roller, the influence of corrugated paper and different rotation speeds on the change of center distance of corrugated roller are analyzed to provide a theoretical basis for improving the rotation stability of corrugated roller mechanism. Firstly, the 3D modeling software CREO is used to establish the 3D model of the upper and lower corrugated rollers and corrugated paper, and then the dynamic analysis software ADAMS is used to simulate the motion process of the corrugated roller. From the simulation results, the curves of the center distance of the corrugated roller under the conditions of no corrugated paper, with corrugated paper and different rotation speeds are obtained, and the curves are compared and analyzed. When there is no corrugated paper, the change of the center distance between the upper and lower corrugated rollers is within 0.45 mm. When there is corrugated paper, the change of the center distance between the upper and lower corrugated rollers is within 0.045 mm. The existence of corrugated paper can reduce the variation of the center distance of the corrugated roller and make the rotation of the corrugated roller mechanism more stable than that at idle. The existence of corrugated paper is conducive to reducing the vibration and wear of the corrugated roller; The rotation speed has little effect on the change of the center distance of the corrugated roller. The production efficiency of corrugated paper can be improved by appropriately increasing the rotation speed.

KEY WORDS: corrugated roller; movement process; dynamics simulation

收稿日期: 2021-01-18

作者简介: 伦新凯 (1996—), 男, 华北理工大学硕士生, 主攻数字化设计与制造。

通信作者: 张广文 (1963—), 男, 硕士, 华北理工大学教授, 主要研究方向为数字化设计与制造。

瓦楞原纸从上瓦楞辊齿与下瓦楞辊齿啮合的区域通过,从而将瓦楞原纸压制成为波纹状的瓦楞芯纸,然后在瓦楞芯纸的楞峰处涂胶,最后将其与面纸粘贴通过压力辊压成单面瓦楞纸板。瓦楞芯纸的成型质量影响着瓦楞纸板的抗压强度和承载力,在瓦楞纸板生产线上,单面瓦楞机是生产瓦楞纸板的的核心机器,瓦楞辊机构是单面瓦楞机的重要机构之一,瓦楞辊能否平稳啮合运行对瓦楞芯纸的成型质量影响较大^[1]。在实际生产中,将卡闸式瓦楞辊机构中的主动辊安装在机架上,只有转动没有移动,而从动辊通过轴承座来安装,其轴承座安装在与气缸相连的摆杆上,随着气缸活塞的上下运动使得从动辊在两辊轴线的连线方向上做往复运动或绕某一固定轴线在一定角度范围内摆动^[2]。上、下瓦楞辊啮合过程中两辊中心距是不断变化的^[3],此中心距变化是变加速运动,会产生冲击与振动^[4],这样的冲击和振动不仅加剧了瓦楞辊的磨损,而且影响了瓦楞纸的成型质量^[5],因此研究上、下瓦楞辊工作时中心距的变化对减小瓦楞辊的振动与磨损,提高瓦楞纸成型质量具有重大意义。

瓦楞辊的振动特性一直以来都有很多学者研究,但是大部分学者只研究了瓦楞辊的自身振动,基本上没有学者研究由于导致中心距变化的因素不同而引起瓦楞辊工作时产生的振动不同。HE 等^[6]对瓦楞辊系统的振动特性进行了研究,考虑瓦楞辊机构的非线性阻尼和非线性刚度,建立了该机构参数激励的非线性垂直振动模型。采用多尺度法得到了瓦楞辊机构的主共振和次共振的近似解析解和幅频特性方程,分析结果对瓦楞辊系统的振动抑制提供了一定的理论指导。熊桂超等^[7]对瓦楞辊中心距变化情况进行了研究,对瓦楞辊建立了数学建模,但模型基于上、下瓦楞辊完全啮合的状态,没有考虑瓦楞纸对瓦楞辊工作时中心距变化的影响。笔者通过建立瓦楞辊的虚拟样机模型,分析有无瓦楞纸及不同转速对瓦楞辊中心距变化情况的影响,拟对以后减小瓦楞辊的磨损和提高瓦楞纸的成型质量提供数据帮助。

1 瓦楞辊模型的建立

对研究的高速宽幅瓦楞辊进行建模,参数设置如下:齿顶圆弧圆心所在圆的半径为 248.91 mm;齿沟圆弧圆心所在圆的半径为 246.96 mm;齿顶圆弧半径为 1.35 mm;齿沟圆弧半径为 1.60 mm;上瓦楞辊齿数为 185;下瓦楞辊齿数为 133;楞高为 4.9 mm;齿距为 8.3 mm;瓦楞辊长度为 2930 mm;辊齿长度为 2800 mm。

运用 CREO 软件的三维建模及装配功能,对上瓦楞辊、下瓦楞辊、杠杆及垫板进行建模,根据瓦楞辊机构中各构件的位置情况,对瓦楞辊机构进行装配,

得到瓦楞辊机构装配图(见图 1)。然后保存为 x_t 格式,其目的是便于仿真时导入 ADAMS 软件中。

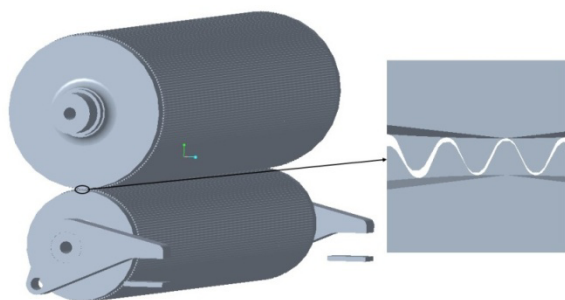


图 1 瓦楞辊机构装配

Fig.1 Assembly drawing of corrugated roller mechanism

为了模拟上、下瓦楞辊啮合过程中气缸的施压作用,模型中增添了一个气缸支撑板的结构,该结构用于模拟实际模型中固定气缸的机架^[8]。使用带有阻尼的弹簧系统来模拟气缸对杠杆结构的加压作用。

2 无瓦楞纸时中心距变化情况分析

2.1 运动副及作用力的设置

根据单面瓦楞机中瓦楞辊的工作原理为虚拟样机模型设置相应的约束:在气缸支撑板与大地之间添加固定约束;气缸支撑板与杠杆结构两者之间用弹簧代替气缸,等效弹簧的刚度设为 $K_1=64.76 \text{ kN/mm}$;杠杆结构与大地之间施加转动副约束;杠杆结构和下瓦楞辊之间设置为转动副;上瓦楞辊与大地之间施加转动副约束,并在其转动副上添加一个驱动;在上、下瓦楞辊之间添加接触力来模拟两辊工作过程中的作用力。

在 ADAMS View 中,接触力的设置方式有冲击函数法(Impact)和补偿法(Restitution)等 2 种^[9],文中上、下瓦楞辊之间的接触力使用了冲击函数法。在 ADAMS View 中采用冲击函数法时有以下几个参数需要确定:接触刚度(Augmented Lagrangian) K 、指数(Force Exponent) e 、阻尼(Damping) $C_{\max}$ 和切入深度(Penetration Depth) $d_{\max}$ 。

2.2 冲击函数中各参数的确定

接触刚度主要与两接触物体的材料属性及其表面的曲率半径有关,接触刚度^[10]根据广义的 HERTZ 接触理论来计算,其计算式为:

$$K = \frac{4}{3\pi(\sigma_1 + \sigma_2)} R^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_i = \frac{1-\mu_i}{\pi E_i}$, $i=1,2$; $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$; μ_1 和 μ_2 分别为 2 个物体的泊松比; E_1 和 E_2 分别为 2 个物体的弹性模量; R_1 和 R_2 分别是 2 个物体接触表面的

曲率半径。笔者研究的瓦楞辊选用 48CrMo 钢材料, 因此泊松比 $\mu_1=\mu_2=0.3$, 弹性模量 $E_1=E_2=213 \text{ kN/mm}^2$, 并且齿顶圆弧半径 $r_1=1.35 \text{ mm}$, 齿沟圆弧半径 $r_2=1.60 \text{ mm}$, 将数据代入式 (1) 中可得: $K=5.49 \text{ MN/mm}$ 。

指数 e 表示相互接触的物体碰撞时的恢复系数, 描述相互接触物体的能量损失, 通常取 $e=0.5$; 由于准确确定最大阻尼系数 $C_{\max}$ 的值非常困难, 一般将其设为接触刚度 K 的 0.01% ^[11]。

在冲击函数中, 切入深度 $d_{\max}$ 的计算见式 (2)^[12]。

$$d_{\max} = \left(\frac{5v^2 m}{4k} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

式中: $v = (\omega_1 r_1 + \omega_2 r_2) \cos \alpha$; k 为两接触物体的接触刚度; m 为两接触物体表面的曲率半径相对应圆柱体的整体质量。由前文可知, 瓦楞辊的材料为 48CrMo 钢, 所以瓦楞辊的密度为 7.8 mg/mm^3 , 主动辊的转速设为 20 rad/s 。将数据代入式中得 $d_{\max}=0.0278$ 。

2.3 仿真驱动及时间设置

该模型中的主动辊为上瓦楞辊, 主动辊的转速 $\omega=20 \text{ rad/s}$, 运用 step 函数来添加驱动, 以改善由于速度突变而导致的振动, 其表达式为 $\text{step}(\text{time}, 0, 0, 0.3, 20)$ 。此次模拟仿真时间为 1 s , 仿真步数为 500。求解器选用系统默认求解器, 各个参数设置完成以后进行仿真。

2.4 仿真结果分析

在实际工作过程中, 主动辊是安装在机架上的, 主动辊只能绕其轴线转动, 不会相对于机架上下移动, 因此, 上、下瓦楞辊之间中心距的变化幅值可以通过测量下瓦楞辊轴线在竖直方向上的运动情况来体现。当主动辊转速稳定后, 测量下瓦楞辊轴线在竖直方向上的位移, 画出上、下瓦楞辊中心距随时间变化的曲线见图 2。

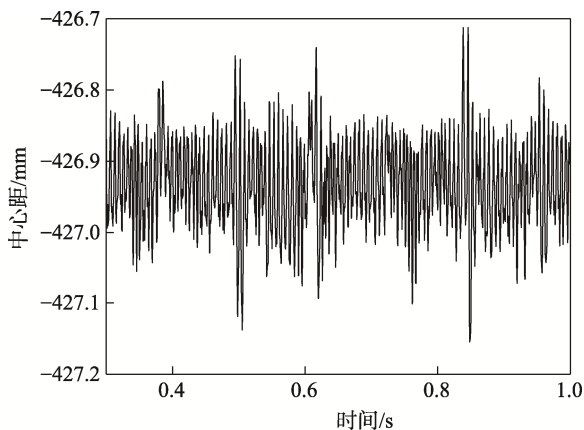


图 2 无纸时瓦楞辊中心距仿真曲线

Fig.2 Simulation curve of corrugated roller center distance without paper

从图 2 中可以看出, 在主动辊达到稳定转速后, 上、下瓦楞辊啮合时中心距一直在变化, 变化范围为 $-427.15 \sim -426.7 \text{ mm}$ 。相对于瓦楞纸的楞高, 中心距变化范围相对较大, 会引起较大的冲击与振动, 产生噪音加剧瓦楞辊的磨损。

3 有瓦楞纸时中心距变化情况分析

3.1 瓦楞纸模型建立及其装配体边界条件设置

在实际工作过程中, 瓦楞纸经过上、下瓦楞辊啮合区, 因此上瓦楞辊与下瓦楞辊并非直接接触, 瓦楞纸的存在可能使瓦楞辊中心距的变化情况发生改变, 从而可能使振动情况发生变化^[13]。根据单面瓦楞机实际工作情况, 在仿真过程中考虑瓦楞纸, 为了在仿真时便于设置边界条件, 笔者将瓦楞芯纸做成了已经成型的圆筒状瓦楞纸 (见图 3), 并将其与上瓦楞辊装配在一起, 得到了带有瓦楞纸的瓦楞辊装配体。

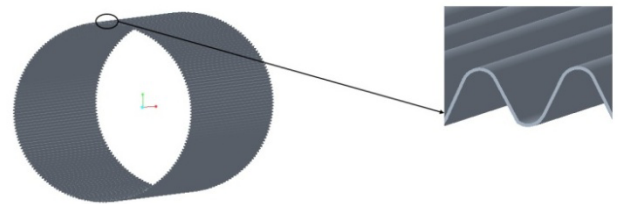


图 3 圆筒状瓦楞纸

Fig.3 Cylindrical corrugated paper

瓦楞原纸的弹性模量为 700 MPa ^[14], 泊松比为 0.119 ^[15], 厚度为 0.28 mm , 幅宽为 2800 mm 。改变与瓦楞芯纸相关联的边界条件, 上、下瓦楞辊的各个参数、其他边界条件以及驱动等均保持不变, 对带有瓦楞纸的模型进行仿真分析。

3.2 仿真结果分析

经过 ADAMS 仿真, 得到装配体中带有成型瓦楞纸时, 上、下瓦楞辊中心距变化曲线见图 4。从图 4 中可以看出, 在主动辊达到稳定转速后, 中心距的值不断变化, 变化范围为 $-427.155 \sim -427.11 \text{ mm}$, 变化幅值为 0.045 mm , 相对瓦楞纸的楞高其变化范围较小。在 $0.6 \sim 0.7 \text{ s}$ 时, 中心距变化出现最值, 出现此情况的原因可能是上瓦楞辊对下瓦楞辊的冲击较大, 弹簧被压缩所导致, 但此时中心距变化范围为 0.045 mm , 此中心距变化量对瓦楞辊的冲击与振动影响较小, 对瓦楞纸的成型质量影响也相对较小。

将图 2 与图 4 对比可知, 在上、下瓦楞辊啮合运动过程中, 瓦楞芯纸存在时, 中心距变动范围比上、下瓦楞辊直接接触时中心距变动范围减小, 中心距变化幅值由 0.45 mm 减小到 0.045 mm 。由此可见, 瓦楞

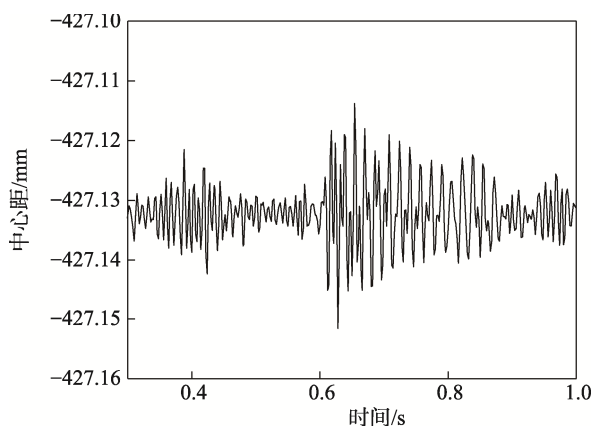


图4 有纸时瓦楞辊中心距仿真曲线
Fig.4 Simulation curve of corrugated roller center distance with paper

芯纸的存在对减小瓦楞辊机构中心距变化是有利的,从而说明瓦楞芯纸的存在可以减小瓦楞辊之间的冲击与振动,减小瓦楞辊的磨损,因此瓦楞辊机构在运转过程中要尽量避免空转。

4 转速对中心距变化情况的影响

瓦楞辊在实际工作过程中,影响中心距变化的情况有很多。下面只分析转速对上、下瓦楞辊中心距变化的影响,将带有瓦楞纸的装配体导入 ADAMS view 软件中,只改变与瓦楞辊转速相关的参数,其他参数及仿真设置条件不变。瓦楞辊的转速分别取 18, 20, 22, 24 rad/s, 对上、下瓦楞辊中心距变化情况进行动力学仿真分析,得到上、下瓦楞辊中心距变化曲线见图 5。

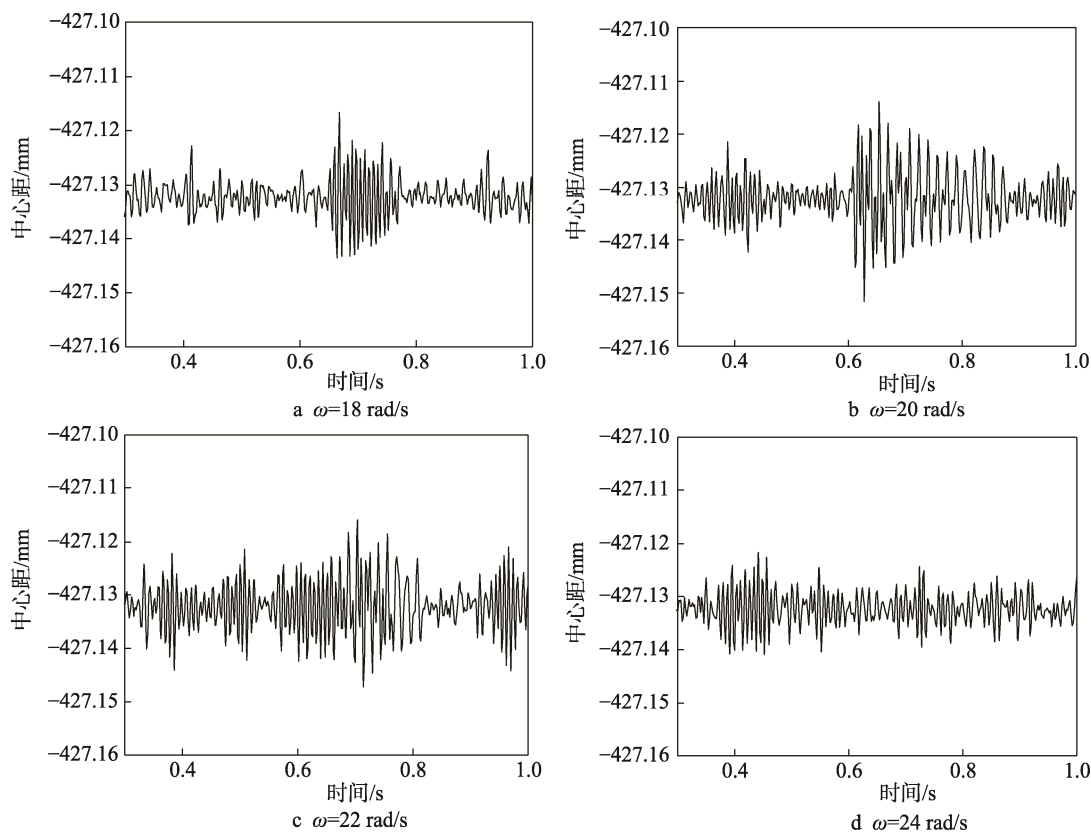


图5 不同转速时瓦楞辊中心距仿真曲线
Fig.5 Simulation curve of corrugated roller center distance at different speeds

从图 5 中可以看出,在一定范围内改变转速,随着速度的增大,瓦楞辊中心距的变化范围一直为 $-427.155 \sim -427.11$ mm,并且当转速达到 24 rad/s 时,瓦楞辊中心距的变化范围相对其他转速时的中心距变化范围减小,即运动更加平稳。由此可知,转速对瓦楞辊中心距的变化影响较小,在其他方面满足条件的前提下,应适当提高瓦楞辊机构的转速,这样不仅可以提高生产效率,而且有利于减小瓦楞辊之间的冲击与振动,使瓦楞芯纸成型质量更佳。

5 结语

从以上瓦楞辊运动过程的仿真曲线可以得出,上、下瓦楞辊直接接触时,中心距变化幅值范围为 0.45 mm,变化量较大使得瓦楞辊之间有较大的冲击与振动。在瓦楞辊运动过程中考虑瓦楞芯纸的存在时,中心距变化幅值为 0.045 mm,相对于上、下瓦楞辊直接接触时的中心距变化幅值减小了 0.405 mm,说明了瓦楞芯纸的存在能够减小瓦楞辊中心距的变

化幅度, 可以减小上、下瓦楞辊之间的冲击与振动, 从而使得瓦楞辊耐磨性能更好, 所以瓦楞辊机构在转动过程中应尽量避免上、下瓦楞辊直接接触。由此可知, 瓦楞芯纸对瓦楞辊的啮合运动过程有很大的影响, 所以在以后研究瓦楞辊啮合运动过程中的振动与磨损时, 应考虑瓦楞原纸的影响。

转速对瓦楞辊转动时中心距的变化影响较小, 适当提高转速不仅能够提高生产效率, 而且可以使上、下瓦楞辊工作过程中运动更加平稳, 有利于瓦楞纸成型。

参考文献:

- [1] 唐辉. 瓦楞辊对瓦楞纸板质量的影响[N]. 中国包装报, 2011-08-25(3).
TANG Hui. The Influence of Corrugating Roller on The Quality of Corrugated Board[N]. China Packaging News, 2011-08-25(3).
- [2] 龚发云, 张哲, 魏春梅. 高速单面瓦楞机瓦楞辊机构的中心距运动学方程[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 43—45.
GONG Fa-yun, ZHANG Zhe, WEI Chun-mei. Kinematics Equation of Center Distance of Corrugating Roller Mechanism of High-Speed Single Side Corrugating Machine[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 43—45.
- [3] 张艳. 瓦楞辊 CAD 系统的开发与研究[J]. 包装与食品机械, 2007, 25(2): 19—22.
ZHANG Yan. Development and Research of Corrugated Roller CAD System[J]. Packaging and Food Machinery, 2007, 25(2): 19—22.
- [4] ROBERTS S; A MARSCHKE C R. Single Facer with Resilient Small Diameter Corrugating Roll: US, 2001/0014644A1[P]. 2001-08-16.
- [5] 柯晖, 周锦琳, 周世棠. 瓦楞机系统的振动分析及控制[J]. 湖北工学院学报, 2003, 18(5): 41—43.
KE Hui, ZHOU Jin-lin, ZHOU Shi-tang. Vibration Analysis and Control of Corrugator System[J]. Journal of Hubei Institute of Technology, 2003, 18(5): 41—43.
- [6] HE D P, XU H D, WANG T. Nonlinear Time-Delay Feedback Controllability for Vertical Parametrically Excited Vibration of Roll System in Corrugated Rolling Mill[J]. Metallurgical Research & Technology, 2020, 117(2): 210.
- [7] 熊桂超, 杜群贵. 单面瓦楞机的瓦楞辊机构中心距变动方程[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(22): 5290—5294.
- XIONG Gui-chao, DU Qun-gui. Center Distance Variation Equation of Corrugating Roller Mechanism of Single Side Corrugating Machine[J]. Science, Technology and Engineering, 2011, 11(22): 5290—5294.
- [8] 李生辉. 瓦楞纸生产线关键部件的分析与研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020: 53—60.
LI Sheng-hui. Analysis and Research on Key Components of Corrugated Production Line[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020: 53—60.
- [9] 李增刚. ADAMS 入门详解与实[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 26—180.
LI Zeng-gang. Introduction to Adams[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 26—180.
- [10] 卢绪祥, 刘正强, 黄树红. 含间隙碰撞振动系统的非线性振动特性[J]. 动力工程学报, 2012, 32(5): 388—393.
LU Xu-xiang, LIU Zheng-qiang, HUANG Shu-hong. Nonlinear Vibration Characteristics of Impact Vibration System with Clearance[J]. Journal of Dynamic Engineering, 2012, 32(5): 388—393.
- [11] 陈志君. 高速瓦楞机关键机构动力学分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 65—73.
CHEN Zhi-jun. Dynamic Analysis of Key Mechanism of High Speed Corrugator[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 65—73.
- [12] 方子帆, 舒刚, 何孔德. 齿轮传动多体接触动力学模型[J]. 机械传动, 2009, 33(1): 15—18.
FANG Zi-fan, SHU Gang, HE Kong-de. Multi Body Contact Dynamic Model of Gear Transmission[J]. Mechanical Transmission, 2009, 33(1): 15—18.
- [13] 尚雯. 单面瓦楞机动力学研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 21—39.
SHANG Wen. Dynamics of Single Side Corrugator[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 21—39.
- [14] 熊维, 王家俊, 王冬梅. 温湿度对瓦楞原纸弹性模量影响的研究[J]. 包装工程, 2011, 21(5): 45—48.
XIONG Wei, WANG Jia-jun, WANG Dong-mei. Effect of Temperature and Humidity on Elastic Modulus of Corrugated Base Paper[J]. Packaging Engineering, 2011, 21(5): 45—48.
- [15] 曹小龙, 谢勇, 毕中臣. 应用数字影像相关法测定瓦楞原纸的泊松比[J]. 包装学报, 2011, 3(3): 31—35.
CAO Xiao-long, XIE Yong, BI Zhong-chen. Determination of Poisson's Ratio of Corrugated Base Paper by Digital Image Correlation Method[J]. Acta Packaging Sinica, 2011, 3(3): 31—35.