

机械与过程控制

药品包装线开盒机刚柔耦合动力学仿真分析

安磊, 张锁怀, 黄旺兴
(上海应用技术大学, 上海 201418)

摘要: **目的** 研究柔性杆件从实际工况开始, 随着工作转速的提高对开盒机动态性能和开盒角度的影响。**方法** 利用 SolidWorks 建立了开盒机的三维实体模型, 通过导入 ADAMS 建立开盒机的纯刚体模型, 利用 Ansys 对杆件进行柔性化处理, 生成模态中性文件, 将其导入纯刚体模型中建立开盒机的刚柔耦合模型, 并进行动力学仿真分析, 仿真结束后将载荷文件导入 Ansys 进行关键部件的应力分析。**结果** 得到了开盒杆相对吸盒杆的最大转角和关键部件的受力, 得出工作转速 340 r/min 为此开盒机的极限转速, 且通过加强杆件的强度可以使开盒机提速运行, 但必须进行全面的动态性能研究和优化。**结论** 采用刚柔耦合分析方法可以更真实地仿真开盒机的实际运动状态, 尤其是在工作转速较高阶段, 且相对于纯刚体模型, 可以更全面地分析开盒机的动态性能。

关键词: 开盒机; 刚柔耦合; 应力分析; 动态性能

中图分类号: TB486; TH113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0123-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.019

Simulation of Rigid-flexible Coupling Dynamics of Box Opener for Pharmaceutical Packaging Line

AN Lei, ZHANG Suo-huai, HUANG Wang-xing
(Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of flexible rods on the dynamic performance of the box opener and the opening angle of the box with the increase of the working speed starting from the actual working conditions. SolidWorks was used to build the 3D solid model of the box opener. The pure rigid body model of the box opener was built by importing ADAMS, and the rod parts were flexibly processed by Ansys to generate the modal neutral file, which was then imported into the pure rigid body model to establish the rigid-flexible coupling model of the box opener for the dynamic simulation analysis. After the simulation, the load file was imported into Ansys for stress analysis of key components. The maximum corner of open box rod relative to suction box rod and the stress of the key components were obtained. It was concluded that the working speed 340 r/min was the limit speed of the box opening machine. By strengthening the strength of the rod parts, the box opener could run at a higher speed, but it was necessary to carry out comprehensive dynamic performance research and optimization. The rigid-flexible coupling analysis method can be used to more realistically simulate the actual motion state of the box opener, especially in the stage of a higher working speed; and compared with the pure rigid body model, it can analyze the dynamic performance of the box opener more comprehensively.

KEY WORDS: box opener; rigid-flexible coupling; stress analysis; dynamic performance

开盒是包装生产线上必不可少的环节, 它将扁平的纸盒打开到合适的角度, 以便后续工位进行药品、说明书等的装盒。随着制药行业的不断发展, 各种药

品种类不断出现, 各大制药厂商对包装机械的要求不断提高。高速化、轻量化、精密化已经成为开盒机主要的发展方向。由于速度增高, 惯性力增大, 构件的

收稿日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51475311)

作者简介: 安磊 (1992—), 男, 上海应用技术大学硕士生, 主攻机械系统动力学。

通信作者: 张锁怀 (1962—), 男, 博士, 上海应用技术大学教授, 主要研究方向为机械系统动力学和系统仿真等。

弹性变形会给机械的运动输出带来误差。同样整个机构的运动状态也会影响单个构件的受力和运动状态,从而影响构件内部的应力应变分布^[1]。另一方面,开盒机向轻量化发展,系统柔度加大,固有频率下降,而开盒机运转速度提高,激振力频率上升,2种频率的这种变化会引起开盒机振动^[2],影响开盒效果。从现有的开盒机使用情况来看,国产开盒机运行速度普遍较低,运行转速还有提高的空间,但是运行速度提高到什么程度合适、会导致什么后果,都需要在开盒机动力学性能分析的基础上,才能确定。

基于上述原因,文中利用CAD软件SolidWorks建立开盒机的三维模型,联合动力学仿真软件ADAMS和有限元分析软件Ansys建立开盒机的刚柔耦合模型,对其进行动力学仿真和关键部件的应力分析。

1 开盒机工作原理

开盒机见图1,工作时,吸盒杆吸住纸盒,开盒杆相对吸盒杆转动,在此过程中打开纸盒。在两者初始装配位置相对固定的情况下,开盒杆相对吸盒杆的最大转角决定了纸盒的最大开盒角。

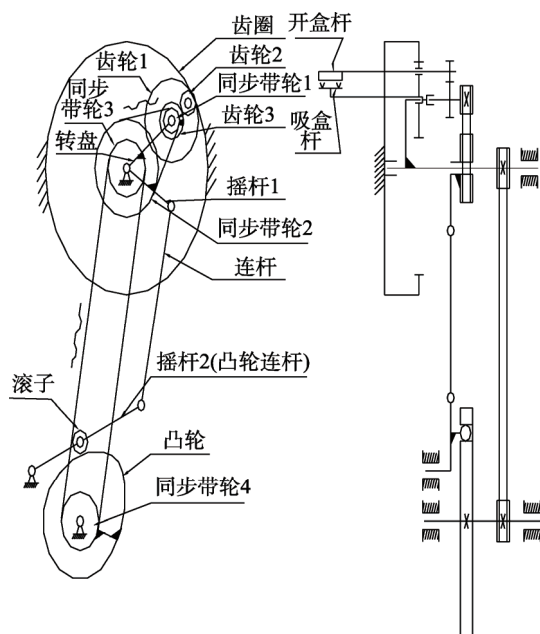


图1 开盒机结构

Fig.1 Structure of the box opener

由文献[3]知开盒杆相对吸盒杆的最大转角:

$$\theta_k = i_1 i_2 \theta_1 = 3 \times (-1.5) \theta_1 = -4.5 \theta_1 \quad (1)$$

式中: i_1 为带轮转动的传动比,此开盒机中为3; i_2 为齿轮传动的传动比,此开盒机中为-1.5; θ_1 为摇杆1的最大转角。

2 刚柔耦合模型的建立

首先采用SolidWorks生产相关零件的三维实体

模型,再导入到有限元软件Ansys,生成MNF文件,直接读取到ADAMS中建立柔性体。这种方法虽然耗时较多,但能模拟真实构件,是通用的做法,故文中采用之^[4]。

2.1 柔性体模态中性文件的建立

连杆的材料为20CrNi合金钢,其弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比 $\mu=0.26$,单元类型选取solid 185和mass 21,其中单元mass 21用于定义连接点。采用智能网格划分,选择连杆两端孔中心的节点为外联点,生成MNF模态中性文件,此文件包含了柔性体的质量、质心、转动惯量、频率、振型等信息^[5]。在输出MNF文件时要选“include stress and strain”,否则在后续联合仿真时ADAMS无法查看构件的热点。连杆的有限元模型见图2,其中两端为连接点与其周围节点形成的刚化区域。

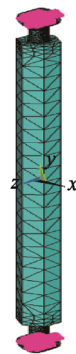


图2 连杆有限元模型

Fig.2 Finite element model of connecting rod

2.2 刚柔耦合模型的建立

依照上述方法对其他杆件进行模态中性文件的建立。在SolidWorks中建立开盒机的三维实体模型,将其另存为Parasolid(x_t)格式,导入ADAMS中对构件进行选材,重新定义约束,建立开盒机的纯刚体模型。将需要柔性化处理的构件的MNF文件通过ADAMS/FLEX命令导入ADAMS中,再将柔性体移动(旋转)到刚性体的位置^[7],然后添加约束^[8]。这样模型中既有刚性体又有柔性体,通过软件设置它们有效和无效,来实现纯刚体模型和刚柔耦合模型之间的切换,从而在任何仿真情况下进行对比,这是非常有用的。

在工作过程中,开盒机各个构件所受的载荷是变化的,可以在仿真结束后通过ADAMS中的热点查看,将所受载荷最大时刻的载荷以LOAD文件形式导入Ansys中进行该构件的应力分析等^[10],其流程图见图3。

2.3 接触力设置

开盒机中凸轮机构决定了摇杆1的最大转角,为了使仿真结果接近真实情况,凸轮和凸轮滚子之间的

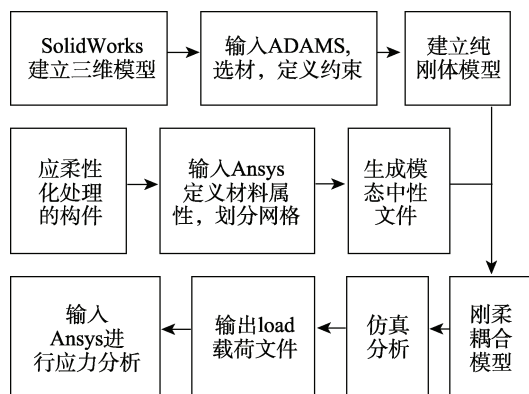


图 3 刚柔耦合分析流程

Fig.3 Rigid-flexible coupling analysis flow

约束没有使用凸轮副,而是采用接触碰撞力的约束关系^[11]。在机械系统中,当两构件的表面之间发生接触时,这两构件就会在接触面的法线方向产生接触力。文中采用 ADAMS 中基于赫兹理论的冲击函数法 (Impact) 计算接触力,接触力由 2 部分组成:两构件间的相互切入而产生的弹性力;相对速度产生的阻尼力^[12]。此凸轮机构接触力中,凸轮和凸轮滚子之间的接触类型为实体与实体。各个系数没有采用定义计算,而是根据工程经验^[13]。构件材料为 20CrNi 合金钢,取接触刚度 $K=1.0 \times 10^8$ N/m,接触指数 $e=1.5$,接触阻尼系数 $C=50$ kN·s/m,渗透深度 $d=0.1$ mm。注意,根据此理论,只有当两物体的实际距离小于初始距离时接触力才不为 0,否则接触力为 0,因此在仿真结果图 11 中,接触力为 0 处,表示两物体实际接触距离大于或等于初始距离。开盒机在 ADAMS 软件中的刚柔耦合模型见图 4。

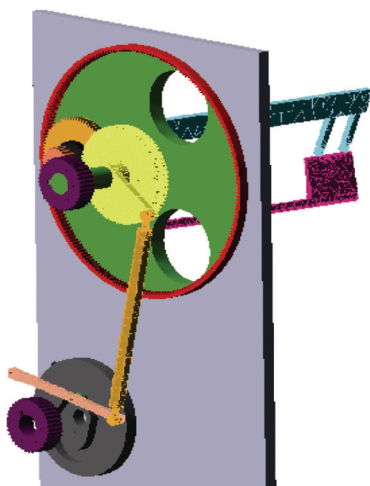


图 4 开盒机刚柔耦合模型

Fig.4 Rigid-flexible coupling model of the box opener

3 仿真分析

3.1 工作转速下的仿真分析

取实际工况转速为 100 r/min, 仿真时间为 1.2 s

(2 个周期) 进行动力学仿真。

刚柔 2 种情况下摇杆 1 的转角见图 5。刚体模型时, 绝对值最大为 35.9° , 刚柔耦合模型时为 36.1° , 则根据式 (1), 开盒杆相对于吸盒杆的最大转角分别为 161.6° 和 162.4° 。刚柔 2 种情况下开盒杆相对于吸盒杆的转角见图 6。刚体模型时, 最大为 161.5° , 刚柔耦合模型时为 162.1° , 可以发现仿真结果和理论相符, 且刚体模型和刚柔耦合模型差别不大。

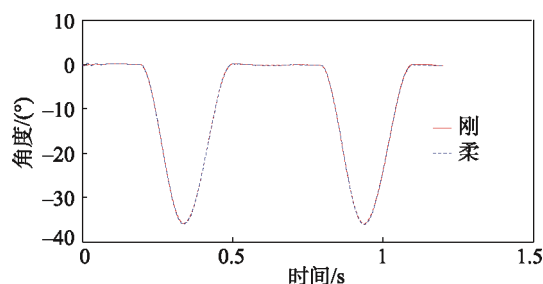


图 5 摇杆 1 转角

Fig.5 Corner of the rocker 1

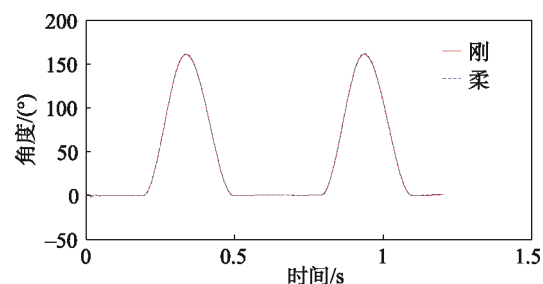


图 6 开盒杆相对于吸盒杆转角

Fig.6 Corner of open box rod relative to suction box rod

刚柔 2 种情况下开盒杆和吸盒杆的角速度见图 7—8, 由图 7—8 中可以看出, 开始阶段刚柔耦合

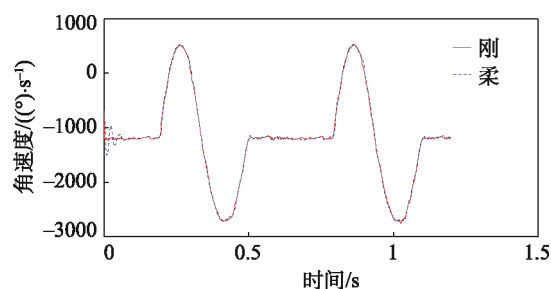


图 7 开盒杆角速度

Fig.7 Angular velocity of the open box rod

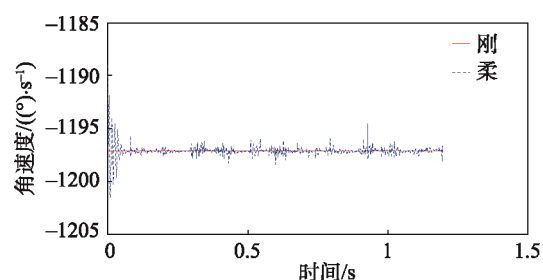


图 8 吸盒杆角速度

Fig.8 Angular velocity of the suction box rod

模型角速度有波动,且刚体模型曲线相比于刚柔耦合模型曲线光滑。这是由于刚体模型为理想状态,而刚柔耦合模型接近真实情况,其角速度曲线会有所波动。

2种不同模型情况下开盒杆的角加速度见图9,可以看出刚体模型严格按照周期性变化,而刚柔耦合模型在按照周期性变化的同时,在0.339 s和1.140 s时有明显的冲击。因为开盒杆的运动规律不但与主传动系统有关,也与凸轮机构有关,凸轮机构不属于定传动比机构,所以开盒杆的角加速度是周期性变化的,在周期性变化的基础上,存在冲击引起的角加速度波动。

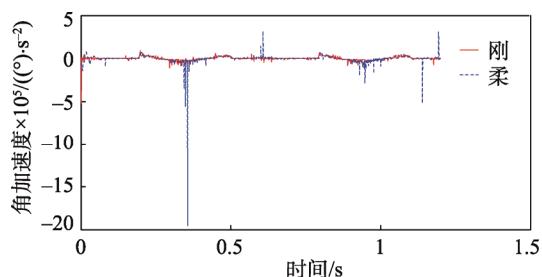


图9 开盒杆角加速度

Fig.9 Angular acceleration of the open box rod

2种不同模型情况下吸盒杆的角加速度见图10,可以看出刚体模型时角加速度为0,因为对于刚体动力学模型,输入转速保持恒定,根据传动比关系计算得到的吸盒杆转速也同样保持恒定;刚柔耦合模型时角加速度近似为0,且有明显的冲击。因为开盒杆在实际运行时,不可避免的存在弹性变形、存在冲击,所以刚柔耦合模型更符合实际情况。

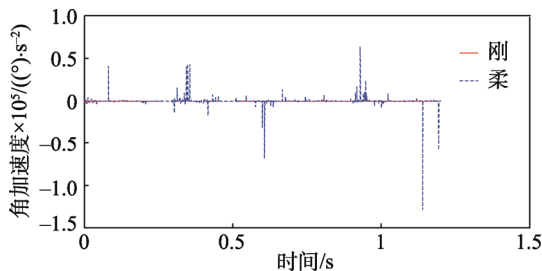


图10 吸盒杆角加速度

Fig.10 Angular acceleration of the suction box rod

3.2 提速可行性分析

将工作转速继续增大进行仿真,仿真时间均为2个周期。在不同工作转速下,2种不同模型情况时 θ_k 和 θ_l 的值见表1,可见在400 r/min之前, θ_k 的变化不是很大,能够满足开盒角度的要求。

将工作转速逐渐提高进行仿真时,发现340 r/min和600 r/min为2个重要临界点,后续对摇杆2的有限元分析和高工作转速仿真分析将做进一步说明。当工作转速为340 r/min时,2种不同模型情况下凸轮和滚子之间的接触力见图11,由图11可看出,刚柔耦合模型

接触力曲线比较平滑,且平稳运行后力的最大值比刚体模型时大。如果按照刚体模型进行载荷计算,理论计算值小于实际值,按照理论计算载荷,进行相关构件的结构和强度设计,将导致构件的破坏。说明刚柔耦合模型更接近工程实际,而刚体模型计算误差较大。

表1 不同工作转速下的 θ_k 和 θ_l
Tab.1 θ_k and θ_l at different working speeds

工作转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)		$\theta_k/(\circ)$	$\theta_l/(\circ)$
100	刚	161.5	35.9
	柔	162.1	36.1
200	刚	162.3	36.1
	柔	162.9	36.2
300	刚	162.0	36.0
	柔	164.0	36.4
400	刚	162.4	36.1
	柔	167.7	37.3
600	刚	162.6	36.2
	柔	183.0	39.6

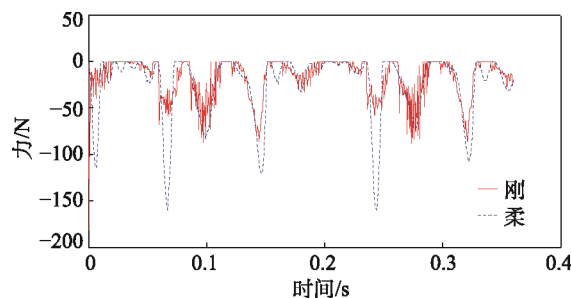


图11 凸轮和滚子接触力

Fig.11 Contact force of cam and roller

仿真结束后,利用ADAMS/Durability模块可以在ADAMS/Postprocessor中观察柔性体中应力最大节点的信息和柔性体任意节点的应力随时间变化的曲线^[14]。通过观察发现摇杆2柔性体为受力最大构件,提取摇杆2柔性体上应力最大的前10个节点,见表2,发现这些应力最大节点位于摇杆2中部与凸轮滚子铰接处及其附近,说明此处出现应力集中,是容易发生疲劳破坏的区域,对构件的疲劳寿命影响较大。

危险节点170的应力应变时间历程曲线见图12。由图12可知,两者近似同周期性变化且形状基本相似,在0.0648 s(凸轮推程阶段)时,应力应变出现最大值,分别为555.7 MPa和0.0023。通过危险区域应力应变时间历程曲线和后文获得的载荷文件,可为摇杆2的疲劳寿命分析奠定基础^[15]。

由表2可以看出应力峰值时间为0.0648 s,将此刻柔性体的受力情况在ADAMS中通过file→export→FEA.loads输出为载荷文件(文件名后缀为.load),作为后续有限分析的依据。

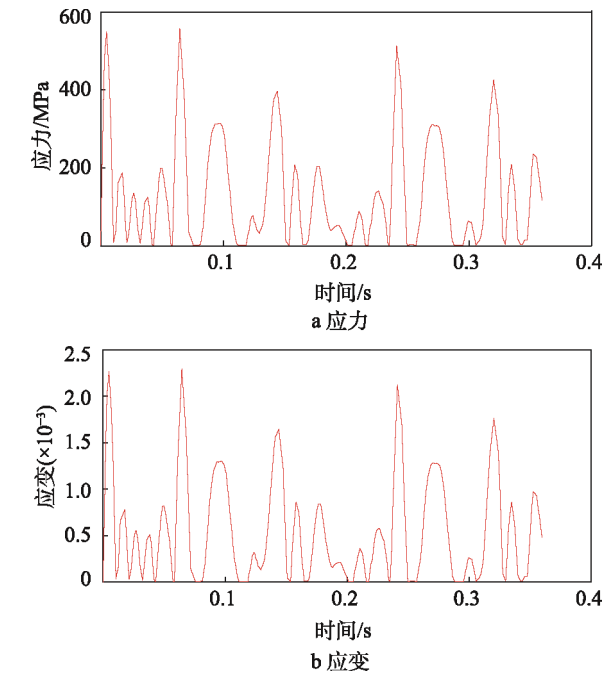


图 12 摇杆 2 危险节点 170 应力应变时间历程
Fig.12 Stress-strain time history of rocker 2 hazardous node 170

表 2 摇杆 2 柔性体应力最大的前 10 个节点
Tab.2 The first 10 nodes with maximum stress of the flexible body of the rocker 2

编号	应力/MPa	节点号	时间/ms
1	555.7	170	64.8
2	537.1	464	64.8
3	534.6	169	64.8
4	523.5	245	5.2
5	506.1	462	5.2
6	493.1	333	64.8
7	492.2	913	5.2
8	491.2	5	64.8
9	481	388	5.2
10	480.8	912	5.2

4 摇杆 2（凸轮连杆）有限元分析

4.1 加载与求解

在 Ansys 中，将摇杆 2 的有限元文件打开，通过 Ansys 和 ADAMS 的接口 Solution→ADAMS Connection→Import fr ADAMS 将载荷文件导入。此载荷文件记录了 0.0648 s 时摇杆 2 的运动情况和受力情况。在 Ansys 中进行分析时，要求摇杆 2 正常运动，因此绕 z 轴的转动未加限制，在有限元分析时，如果直接采用载荷文件在 3 个节点处施加载荷，则摇杆 2 缺少足够的约束，将会发生刚体位移而使计算无法正常进行，因此可对模型在导入载荷文件时施加弱弹簧（weak springs），弱弹簧可以稳定数值求解，且其刚度很小，不会对真实工程载荷产生影响^[16]。

4.2 结果分析

摇杆 2 在 0.0648 s 时的等效应力云图见图 13。由图 13 可看出，摇杆 2 中部与凸轮滚子铰接处为受力较大部位，正好验证前文此处为应力集中区域，容易发生疲劳破坏。此处凸轮滚子将凸轮传递的力传递给摇杆 2，应力最大为 576 MPa。摇杆 2 材料为 20CrNi 合金钢，其屈服强度为 590 MPa，故最大应力接近屈服强度极限。

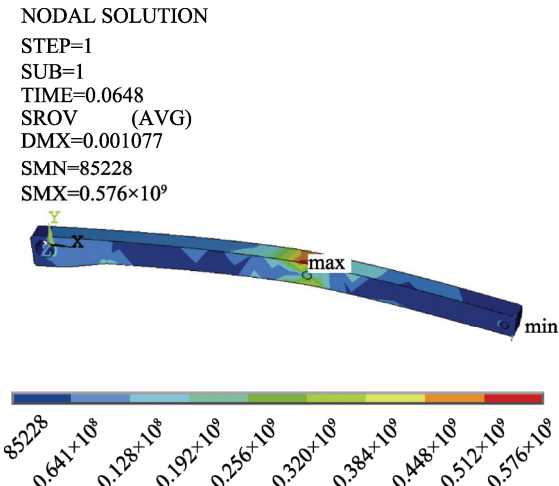


图 13 摇杆 2 等效应力云图（340 r/min）
Fig.13 Von mises stress contour of rocker 2 (340 r/min)

将工作转速提高到 350 r/min，使用上述方法得摇杆 2 的等效应力云图见图 14。此时最大应力为 617 MPa，已经超过材料极限应力。

在开盒机实际运行时，要想提高运行速度，首先必须加强摇杆 2 中部与凸轮滚子铰接处的强度，然后考虑此处构件的疲劳寿命。

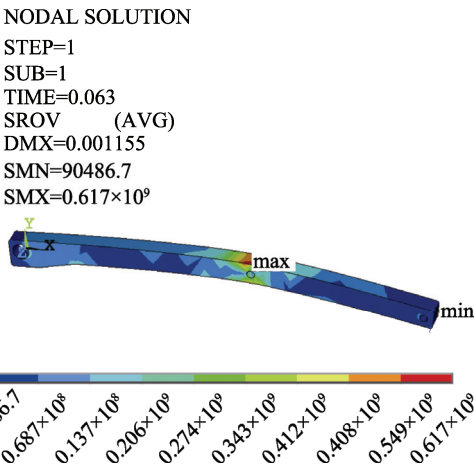


图 14 摇杆 2 等效应力云图（350 r/min）
Fig.14 Von mises stress contour of rocker 2 (350 r/min)

5 高工作转速仿真分析

当工作转速为 600 r/min 时，由表 1 和式（1）可知，刚体模型和刚柔耦合模型理论上 θ_k 分别为 162.7°

和 178.0° ，而对比表 1 仿真时 θ_k ，可见刚体模型理论计算和实际仿真相符，而刚柔耦合模型有 5.0° 的差值，这是由于各个杆件有变形，式 (1) 为刚体动力学模型推导出的，没有考虑杆件的变形，故存在差异。2 种不同模型情况下摇杆 2 (凸轮连杆) 的角位移见图 15。可以发现，刚柔耦合模型中摇杆 2 的角位移有大于初始位移 0° 的情况，即存在反方向的角位移，则凸轮和滚子的接触点在凸轮轮廓上下两侧变化，从而证明存在跨越冲击。

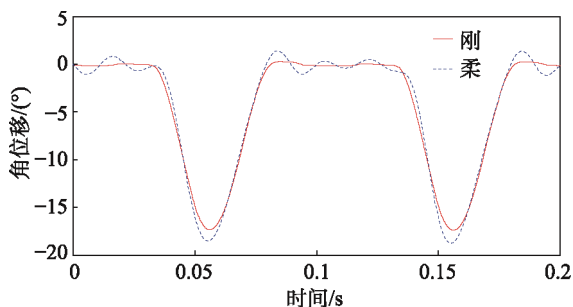


图 15 摇杆 2 角位移

Fig.15 Angular displacement of the rocker 2

2 种不同模型情况下摇杆 2 (凸轮连杆) 的角加速度见图 16。可以发现，采用刚柔耦合模型进行动力学分析，角加速度有明显的冲击且变号，则摇杆 2 上的作用力也将变号，会引起凸轮和滚子之间的接触点由凸轮轮廓的一侧突变到另一侧，从而发生严重的跨越冲击。

将工作转速提高到 700 r/min，发现开盒机运动失真，滚子脱离凸轮槽，这是由于接触力过大，限于篇幅，其接触力曲线不再列出。

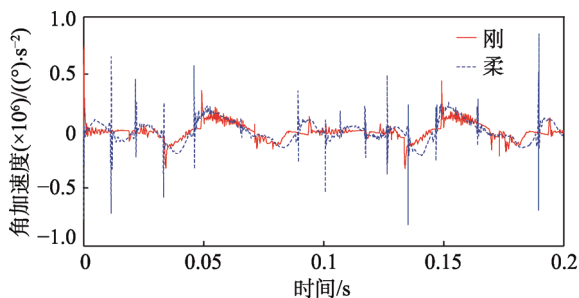


图 16 摇杆 2 角加速度

Fig.16 Angular acceleration of the rocker 2

6 结语

利用有限元分析软件 Ansys 和动力学分析软件 ADAMS 建立了开盒机的刚柔耦合模型，采用刚柔耦合分析方法可以更真实地仿真开盒机的实际运动状态，尤其是在工作转速较高阶段，且相对于纯刚体模型，可以更全面的分析开盒机的动态性能。

通过仿真分析，工作转速为 100 r/min 时，可以采用刚体模型分析开盒机的动力学问题，但是，刚体

模型无法查看构件的应力；当工作转速为 340 r/min 时，由于动力冲击引起的摇杆 2 的动态应力超过了材料的屈服强度，因此，该转速也是现有开盒机的最高理论转速；提高关键部件的强度，可以使开盒机提速运行，但必须考虑摇杆 2 的疲劳寿命、开盒角度和改善跨越冲击等，使开盒机可以正常平稳的运行。该研究为开盒机的提速和动态性能的优化提供了依据。

参考文献:

- [1] 张永德, 汪洋涛, 王沫楠, 等. 基于 ANSYS 与 ADAMS 的柔性体联合仿[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4501—4504.
ZHANG Yong-de, WANG Yang-tao, WANG Mo-nan, et al. Co-simulation of Flexible Body Based on ANSYS and ADAMS[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(17): 4501—4504.
- [2] 冯志华, 胡海岩. 高速机构动力学研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 196—204.
FENG Zhi-hua, HU Hai-yan. Research Progress on High-speed Mechanism Dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(2): 196—204.
- [3] 韩庆红. 药品包装线高速开盒机运动学研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016.
HAN Qing-hong. Kinematics Research on Pharmaceutical Packaging Line High Speed Open Box Machine[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016.
- [4] 崔涛, 刘佳, 张东兴, 等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 的玉米茎秆柔性体仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 112—115.
CUI Tao, LIU Jia, ZHANG Dong-xing, et al. Flexible Body Simulation for Corn Stem Based on ANSYS and ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(S1): 112—115.
- [5] 熊楚良, 黄松和, 朱鹏飞. 码垛机器人刚柔耦合动力学仿真分析[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 84—88.
XIONG Chu-liang, HUANG Song-he, ZHU Peng-fei. Rigid-flexible Coupling Dynamics Simulation Analysis of Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 84—88.
- [6] 冯志友, 徐志才. 基于 ADAMS 和 ANSYS 的 2UPS-RPU 并联机构的弹性动力学建模与仿真[J]. 机械设计, 2015, 32(3): 77—81.
FENG Zhi-you, XU Zhi-cai. Elastic Dynamics Modeling and Simulation for 2UPS-RPU Parallel Mechanism Based on ADAMS and ANSYS[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(3): 77—81.
- [7] 邢俊文. MSC.ADAMS_FLEX 及 Autoflex 培训教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
XING Jun-wen. MSC.ADAMS_FLEX and Autoflex Training Tutorials[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] LUO Hai-tao, CHEN Zheng-cang, LENG Yu-quan, et al. Rigid-Flexible Coupling Dynamics Simulation of 3-RPS Parallel Robot Based on ADAMS and

- ANSYS[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2278(290): 91—96.
- [9] 梅菊, 黄松和, 李超军. 基于 ADAMS 与 Ansys 的凸轮连杆长摆臂系统的刚柔耦合分析[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 103—106.
MEI Ju, HUANG Song-he, LI Chao-jun. Analysis of Rigid-flexible Coupling CAM System with Long Swing Rod Based on Ansys and ADAMS[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 103—106.
- [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.
ZHANG Lei, YU Ke-long, CHEN Shao-zhong, et al. Flexible Dynamics Simulation for Spatial Four Bar Linkage Weft Insertion Mechanism Based on ANSYS and ADAMS[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(5): 116—120.
- [11] 宁少慧, 武学锋. 刚柔耦合的齿轮传动系统动力学特性分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 64—66.
NING Shao-hui, WU Xue-feng. Rigid-flexible Coupling Dynamic Characteristics Analysis of Gear Transmission System[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(6): 64—66.
- [12] 赵三民, 韩振南. 基于虚拟样机技术的风电齿轮箱动力学分析[J]. 机械传动, 2013, 37(7): 58—61.
ZHAO San-min, HAN Zhen-nan. Dynamics Analysis of Gearbox of Wind Turbine Based on Virtual Prototype Technology[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(7): 58—61.
- [13] 袁安富, 相立峰. 基于 ADAMS 和 SolidWorks 的印刷机凸轮传动系统的建模与仿真[J]. 制造业自动化, 2010, 32(12): 125—128.
YUAN An-fu, XIANG Li-feng. Modeling and Simulation of Cam Drive System of Rotary Press Based on Adams and Solidworks[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(12): 125—128.
- [14] 高彤, 袁立鹏, 宫赤坤, 等. 基于刚柔耦合的四足机器人动力性能研究[J]. 现代制造工程, 2017(6): 52—55.
GAO Tong, YUAN Li-peng, GONG Chi-kun, et al. Study on Dynamic Performance of Quadruped Robot Based on Rigid Flexible Coupling[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(6): 52—55.
- [15] 符升平, 项昌乐, 姚寿文, 等. 基于刚柔耦合动力学的齿轮传动系统动态特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(2): 382—386.
FU Sheng-ping, XIANG Chang-le, YAO Shou-wen, et al. Dynamic Characteristic of Gear Transmission System Based on Rigid and Flexible Coupled Dynamics[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(2): 382—386.
- [16] 盛金良, 刘海滨, 宋世明. 基于 ADAMS 和 ANSYS 的环卫垃圾桶动力学仿真分析[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(6): 540—544.
SHENG Jin-liang, LIU Hai-bin, SONG Shi-ming. Dynamical Simulation and Analysis on Plastic Green Bins Based on ADAMS and ANSYS[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2014, 12(6): 540—544.