

大幅面高速重载模切机动平台传动肘杆分析及设计

韦树远¹, 关景果^{1*}, 陈光¹, 首云飞¹, 李鹏¹, 王太勇², 吕伟³

(1.天津长荣科技集团股份有限公司, 天津 300400; 2.天津大学, 天津 300072;

3.深圳劲嘉集团股份有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要: **目的** 利用 Ansys 有限元软件, 对模切机肘杆进行分析及优化设计, 实现高速重载模切机动平台高精度、高可靠性、高速平稳运行。**方法** 采用 Adams 动力学分析方法, 对传动肘杆运动的位移、速度和加速度进行分析, 得到其曲线, 分析其是否满足重载高速运动工况下模切机的运动规律; 利用牛顿-欧拉方法求解复杂多刚体运动系统动力学问题, 求出下肘杆受力的数值解, 利用有限元分析软件对动平台传动肘杆进行有限元分析, 得到在加载一定压力下的应力、应变的云图, 并与数值解进行对比分析, 判断下肘杆机构是否满足重载的需求。**结果** 得到了肘杆部件的应力云图和变形云图, 及其各个零件的最大应力, 应力最大值为 469.1 MPa。**结论** 利用有限元分析的手段, 从理论上指导模切压力试验平台的结构优化设计, 提高了设计的准确性, 缩短了产品的试制周期。

关键词: 传动系统; 动平台; 模切机; 有限元分析; 优化设计

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)17-0206-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.025

Analysis and Design of Transmission Elbow Bar for Large Format High-speed and Heavy-duty Die-cutting Mobile Platform

WEI Shu-yuan¹, GUAN Jing-guo^{1*}, CHEN Guang¹, SHOU Yun-fei¹, LI Peng¹,
WANG Tai-yong², LYU Wei³

(1. Masterwork Group Co., Ltd., Tianjin 300400, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Shenzhen Jinjia Group Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518055, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze and optimize the design of the elbow bar of the die-cutting machine with ANSYS finite element software, to realize the high-precision, high-reliability, and high-speed smooth operation of the high-speed and heavy-duty die-cutting mobile platform. The Adams dynamic analysis method was used to analyze the motion displacement, speed, and acceleration of the transmission elbow bar, to obtain its curves, and analyze whether it met the motion laws of the die-cutting machine under heavy-duty and high-speed motion conditions. The Newton Euler method was adopted to solve the dynamic problems of complex multi rigid body motion systems and the numerical solution of the force on the lower elbow bar was obtained. The finite element analysis software was used to perform finite element analysis on the transmission elbow bar of the mobile platform, and the cloud map of stress and strain under a certain pressure was obtained. Comparative analysis was conducted with the numerical solution to determine whether the lower elbow mechanism met the requirements of heavy duty. The stress cloud map and deformation cloud map of the elbow bar component were obtained and the maximum stress of each component was determined to be 469.1 MPa. The use of finite element analysis to guide the structural optimization design of the die-cutting pressure test platform from a theoretical perspective has improved the accuracy of the design and shortened the trial production cycle of the product.

KEY WORDS: transmission system; mobile platform; die-cutting machine; finite element analysis; optimized design

随着人们环保意识的加强, 纸包装越来越受到重视, 精准纸制品加工离不开模切机, 而模切机的动平台是保证模切质量的关键, 为此, 许多学者对模切机动平台的运动学和动力学分析进行了研究。郭宁宁等^[1]对模切机构动平台传动系统进行了介绍, 并对传动系统的发展与研究现状进行了综述。动平台的传动系统, 基本上由凸轮机构和多杆机构两大类组成。陈凯^[2]提出了几何封闭共轭凸轮机构驱动动平台的新型传动机构, 该机构可以克服在高速重载情况下凸轮与从动件脱离接触产生的振动与噪声, 还可以减小机构负载产生的影响, 并且在运动特性上, 对共轭驱动机构和曲柄肘杆机构进行了对比分析, 但没有从强度上对机构进行验证。韦树远等^[3]对模切机动平台的结构进行了优化, 但对动平台的驱动部件没有进一步分析。

鲁楠等^[4]通过对高速模切机凸轮机构的结构设计、材料的选择以及凸轮滚子间接接触应力的分析, 验证了该凸轮机构可以满足模切机的工作需要, 并且还有进一步优化的空间。他提出了一种凸轮机构驱动的新型模切机动平台的运动方案, 可以提高模切机整体运动的稳定性。耿武帅等^[5]结合气液增压系统和机械二次增力机构, 设计出了一套新型模切机驱动机构设计方案。设计方案中气液增压系统使用纯气压作为动力源, 液压油被密封在系统之中, 不需要独立的液压站, 设备运行过程中产生的噪声较少, 还对设计方案进行了理论分析。上述研究主要针对采用凸轮机构驱动模切机动平台的结构形式, 该类机构可以承载较大驱动力, 但随着速度的增加, 动平台产生的冲击较严重, 噪声加大, 凸轮磨损加剧。

对于多杆驱动机构, 何亚银等^[6]针对连杆机构的运动特点, 设计了串联四杆机构作为压力机的工作机构, 利用系统动力学软件 Adams 建立了串联四杆机构的多体动力学模型并作了运动仿真。研究了曲柄长度和滑块偏心距的变化对滑块位移、速度、加速度的曲线形态的影响。徐立峰等^[7]利用 MSC. Adams 对模切机双肘杆机构进行了参数化建模, 通过建立双肘杆机构优化目标函数, 实现了双肘杆机构的结构尺寸参数化优化分析, 并进行了相关的运动学、动力学仿真。优化结果表明, 减小动平台与水平方向的震动偏角和在水平方向的位移, 将大大提高模切速度、精度和整机的稳定性。Fukuzawa 等^[8]发现模切机越来越高的生产效率会使极高转速下产生的惯性力变得越来越大, 且单侧模切随着模切速度的提高也会产生巨大的惯性力, 这会导致模切精度下降, 并产生大量的噪声。张成田等^[9]、Kim 等^[10]、Park 等^[11]分别以高速卧式平压平模切机对称双输出肘杆机构为研究背景, 建立了相应工作机构各个零件运动学的数学模型, 推导出了主、副滑块的位移、速度和加速度的理论计算公式, 使用商用软件 Matlab 绘制出主滑块的位移、速度、加速度随时间变化的曲线, 表明该新型模切机具有低速锻冲、高速回程的特点, 有利于提高模切精度和模切效率。韩应敏^[12]对模切机动平台运动系统进行了运

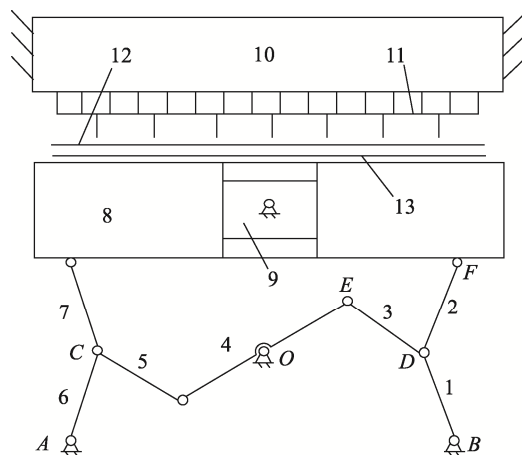
动力学分析求解, 得出在 4 000 r/h 下各个构件的位移、速度、加速度等运动参数。在动力学分析的基础上借助 Ansys 软件对动平台运动系统的关键机构进行有限元分析, 得出应力应变云图。高丽丽^[13]基于 Adams 动力学仿真软件, 对模切机双肘杆机构的运动学进行了仿真分析, 得到了动平台倾斜转角曲线和动平台滑动位移曲线、下肘杆的角速度和角加速度曲线以及其变化规律, 提高了模切速度、精度和整机的稳定性。王中等^[14]为提高肘杆式压力机构动力学建模与分析的效率及可靠性, 提出了相应的向量键合图法。由系统向量键合图模型基本场及结型结构的输入、输出向量间的代数关系, 推导出便于计算机自动建立的系统驱动力矩及运动副约束反力方程的统一公式; 根据运动约束关系, 将平面运动构件、旋转铰及移动副的向量键合图模型组合起来, 建立了三角形肘杆压力机机构的向量键合图模型。李发展等^[15]通过 ADAMS 中建立肘杆的虚拟样机, 进行相关的运动学、动力学仿真, 得到了肘杆机构的受力曲线, 为肘杆的具体尺寸设计、材质以及电机选型提供依据。

综上, 模切机动平台常用的双肘杆驱动机构, 在高速及重载情况下, 存在冲击噪声、运行不稳定的情况。因此, 急需进行大幅面高速重载模切机的双肘杆驱动机构的运动学及动力学分析, 为此工况下的设备产业化提供技术支撑。

1 模切机下动平台双肘杆传动系统的运动学分析

1.1 模切下动平台双肘杆驱动机构的工作原理

以天津长荣科技集团股份有限公司生产的 PM1450CSB 清废模切机为例, 曲柄双肘杆驱动机构简图见图 1。



1、6.下肘杆; 2、7.上肘杆; 3、5.连杆; 4.曲轴; 8.动平台; 9.滑块; 10.上平台; 11.模切版; 12.模切材料; 13.模切底板

图 1 双肘杆驱动机构简图

Fig.1 Diagram of dual-elbow-bar mechanism

1.2 模切机运动机构运动学分析

为得到模压活动平台以及各个传动杆的速度、加速度数据,在此应用 SolidWorks 建立双肘杆机构的虚拟样机模型,进行运动仿真。在 Adams 虚拟仿真环境中根据系统导入的模型自动建立拉格朗日运动方程,对每个刚体列出 6 个广义坐标带乘子的拉格朗日方程及相关的约束方程,见式(1)。

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial U}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial U}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi_i}{\partial q_j} \lambda_i = F_j \quad \varphi_i = 0 (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: U 为动能; q_j 为描述系统的广义坐标; F_j 为在广义坐标上的广义力; λ_i 为 $m \times 1$ 的拉格朗日乘子列阵; $\varphi_i=0$ 为系统约束方程。

将在 SolidWorks 中建立的双肘杆机构模型导入 Adams 中进行仿真,观察选取适当的坐标系与单位,调整视图的位置,应用工具箱添加各个约束和驱动,其中曲柄为主动件,在其上通过添加运动,设定速度;模压活动平台与滑块间采用滑移副约束,其余杆件采用旋转副约束。在曲柄与地连接的转动副上添加驱动,设定旋转速度为曲柄转速 8 000 r/h。创建完成后的双肘杆机构仿真模型见图 2。曲柄顺时针旋转,再点击仿真分析命令(simulation),设定动画仿真的时间和步数,最后进行运动仿真。

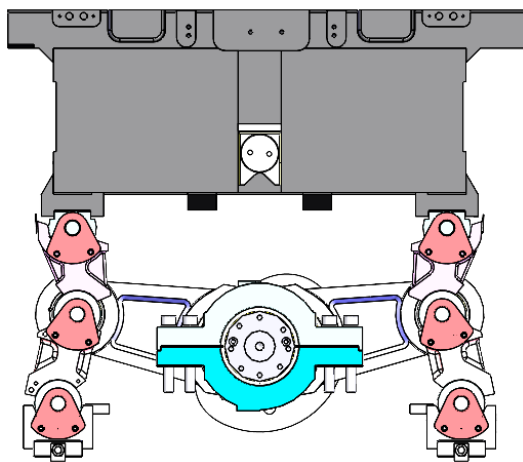


图2 双肘杆机构仿真模型
Fig.2 Simulation model of dual-elbow-bar mechanism

通过运动学仿真,可以求出各部件的角位移、角速度和角加速度随时间变化的曲线,机构中 2 个下肘杆的运动学图形见图 3。

机构的两下肘杆在一个运动周期内的角速度和角加速度曲线呈反对称,即当杆 1 的位移、速度和加速度增大时,杆 6 的位移、速度和加速度就减小,反之亦然。另外,从变化幅值上看,整个运动周期内两下肘杆的位移、速度和加速度变化较为平缓,符合模切机的运动规律。

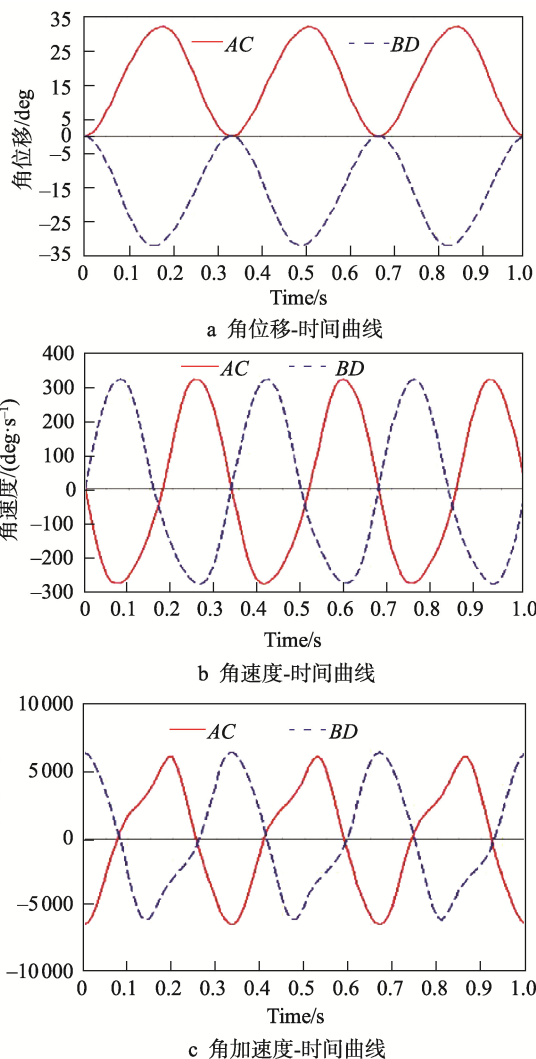


图3 下肘杆 1 和 6 的角位移、角速度、角加速度随时间变化曲线

Fig.3 Curve of angular displacement, angular velocity and angular acceleration of lower elbow bars 1 and 6 with time

2 模切机下平台传动系统的动力学分析

2.1 刚体动力学分析

模切机下平台运动系统是由 10 个杆件组成的复杂平面连杆机构,属于多刚体组成的系统动力学问题。用牛顿-欧拉方法求解复杂多刚体运动系统动力学问题,在建立系统数学模型时,需要拆开每一个构件逐一进行分析,一般无解析解,须求其数值解。由牛顿第二定律得到系统振动方程,见式(2)。

$$\begin{cases} F_R = \sum_{i=1}^N m_i a_{Bi} \\ M_D = \sum_{i=1}^N \frac{dL_{Bi}}{dt} + \sum_{i=1}^N r_{Bi/D} \times m_i a_{Bi} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_R 为系统所受外力的主矢; M_D 为系统所受外力对点 D 的主矩; a_{Bi} 为第 i 个刚体质心的加速度; L_{Bi} 为第 i 个刚体关于质心的动量矩; $r_{Ci/D}$ 为第 i 个刚体质心相对于点 D 的相对矢径。

在本例中, 只把杆 BD 分离出来进行受力分析, 见图 4, 在 D 点, 杆 1 与杆 2、杆 3 相连, 受到复合铰链约束力 X_D 、 Y_D , 杆 1 在 B 点与底台相连, 受到底台对它的约束力 X_B 、 Y_B , 杆 BD 的自身重力为 G_{BD} , 没有受到外加力矩。其欧拉-牛顿方程见式 (3)。

$$\begin{cases} X_D - X_B = m_{BD} a_x \\ Y_D - Y_B - G_{BD} = m_{BD} a_y \\ \frac{l_{BD}}{2} (-X_D \sin \theta_4 + Y_D \cos \theta_4 - X_B \sin \theta_4 + Y_B \cos \theta_4) = J_{BD} \alpha \end{cases} \quad (3)$$

将 10 个杆件的受力分析均列出来, 则除导向滑块忽略重力外, 该系统受到的系统外力有 8 个重力、1 个外加力矩、8 个约束力、1 个模切压力; 系统内力共有 21 个。在这里分析模切工作压力为 30 MN 时各构件的受力情况。由于模切机下平台运动系统各构件形状不规则, 转动惯量计算较为困难, 现借助 SolidWorks 软件中的三维建模模块可以直接求解出转动惯量, 具体数值为 $l_{BD}=232\text{ mm}$ 、 $G_{BD}=16.027\text{ kg}$ 、 $J=0.172\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 转速为 8 000 r/h 时解得各构件受力数值解。

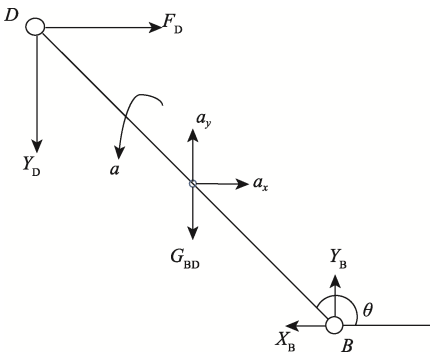


图 4 杆 BD 的受力分析
Fig.4 Force analysis of bar BD

2.2 有限元模型处理

由于本机型幅面较大, 需要进行有限元分析的构件较多, 动力学分析的结果显示了在工作模切压力下各构件的受力。本节的有限元分析对象只选择下肘杆, 上下肘杆结构相同, 尺寸相差不大。由于上下肘杆角度关系加上各构件的重力, 使得下肘杆比上肘杆受力大一些, 因此选择下肘杆作为分析对象。三维模型的精确建立是进行有限元分析的基础, 模型越接近实际零件则有限元分析的精度越高。文中的三维图是通过三维建模软件 SolidWorks 建立的。

2.2.1 模型处理

分析的目的是得出肘杆的应力和变形分布情况。装配体中一些小附件和一些大部件上的微小结构对受力影响微小, 去掉这些小附件和大部件上的微小结构可以减少网格和节点数量, 降低计算机系统资源占用量, 缩短计算所用时间。处理后的模型见图 5。

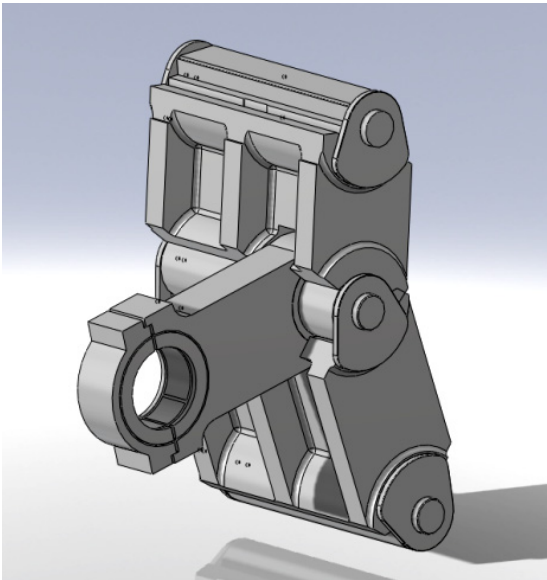


图 5 处理后的模型
Fig.5 Processed model

2.2.2 材料设置

建立的有限元模型材料属性参数见表 1。

表 1 材料的力学参数
Tab.1 Mechanical parameters of materials

材料	牌号	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
球墨铸铁	QT500-7	173	0.3	7.3	320	500
碳钢	Q235-A	206	0.3	7.85	235	370
高碳铬轴承钢	GCr15	206	0.3	7.9	518.42	861.3
锡青铜	ZQSn6-6-3	103	0.3	8.9	140	300
尼龙	66	2.8	0.29	1.79	75.46	54.88

2.2.3 网格划分

有限元网格划分见图 6, 网格类型为实体网格, 整体网格尺寸为 5 mm, 共生成节点数为 343 983, 共生成单元数为 194 971。

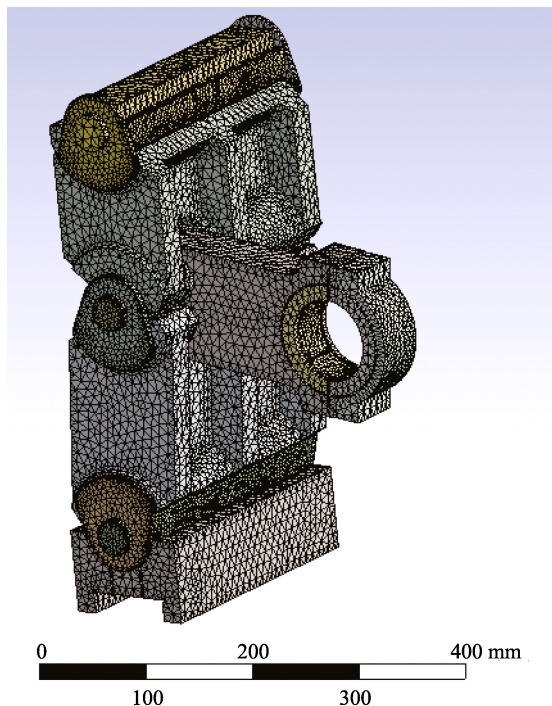


图 6 网格划分
Fig.6 Meshing

2.2.4 接触设置

将所有用螺栓连接的接触面设置为 Bonded 形式。将所有滑动摩擦接触面设置为 No separation 形式, 见图 7, 该摩擦类型可以允许接触面之间相对滑动, 但又属于线性计算范围内。使用此种接触形式可以得到较准确的计算结果, 同时节约了计算时间。

2.2.5 约束和加载边界条件设置

根据实际固定方式, 固定了肘杆底部以及与曲轴连接的圆柱面, 如图 8 所示。在上端面加载 3 MN 力的 1/4 以及动平台的重力 (13 kN) 载荷的 1/4, 即施加 753.25 kN 的力, 见图 9。

2.3 有限元计算及分析

进行计算后, 得到应力云图见图 10, 变形云图见图 11。根据应力和变形云图可以得出如下结果: 肘杆部件的球墨铸铁零件最大应力为 297.9 MPa; 高碳铬轴承钢材料零件最大应力为 469.1 MPa; 锡青铜材料最大应力为 80.279 MPa; 尼龙材料最高应力为 249.07 MPa, 实际上部分发生屈服; 在计算中此零件被设置为固定约束 (此零件计算结果会有一定误差), 接触面可能会滑移, 从而使得应力降低。

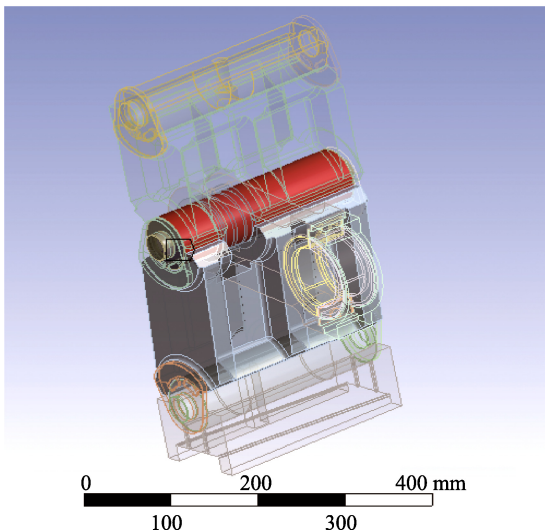
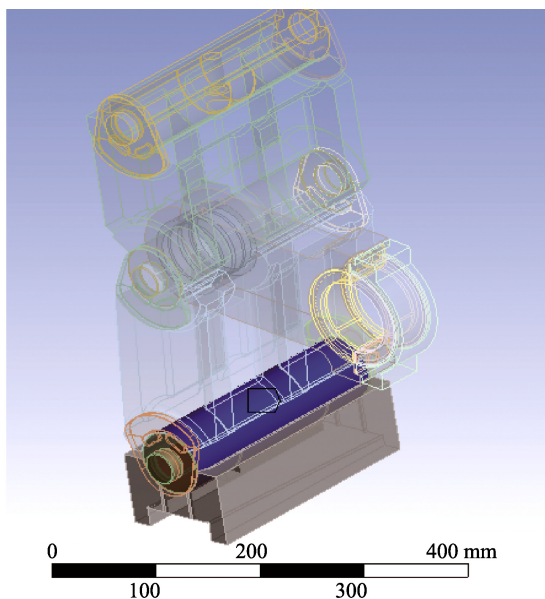


图 7 No separation 接触
Fig.7 No separation contact

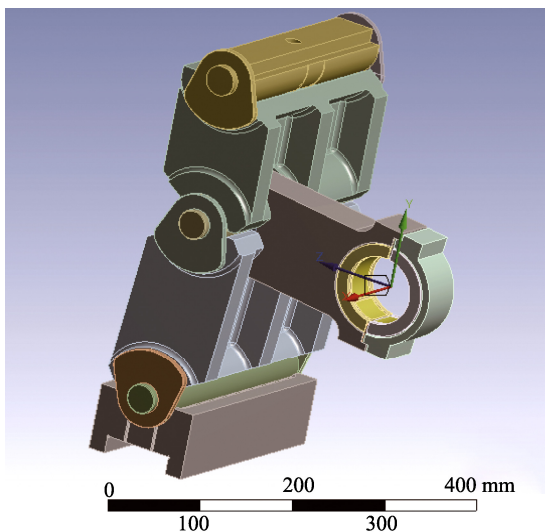


图 8 约束设置
Fig.8 Constraint setting

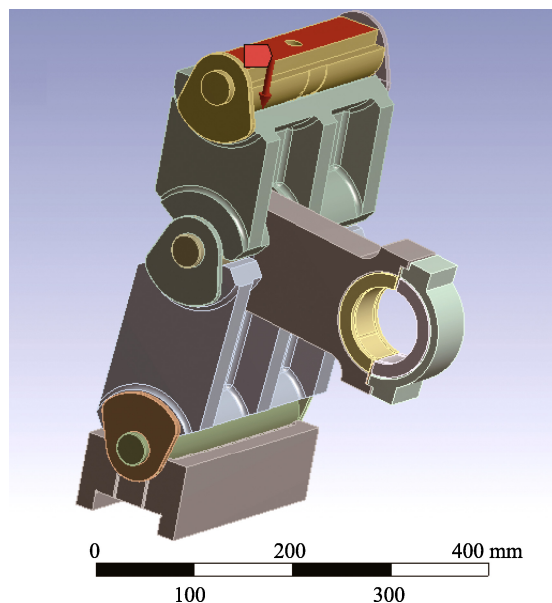


图 9 重力加载
Fig.9 Gravity loading

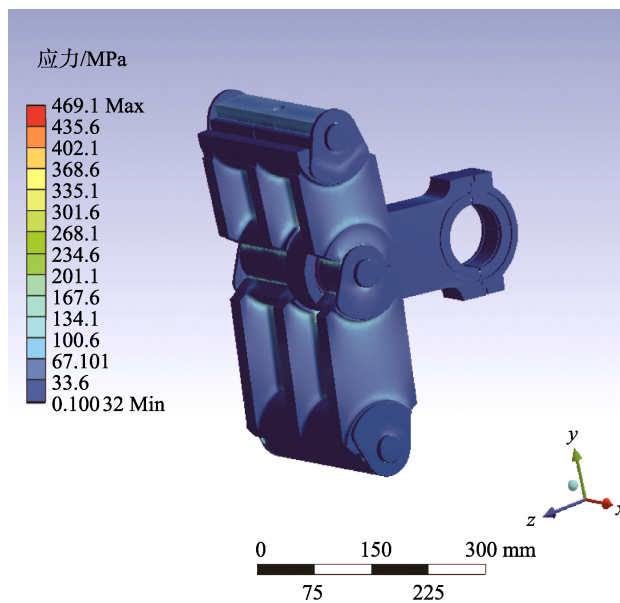


图 10 应力云图
Fig.10 Stress cloud map

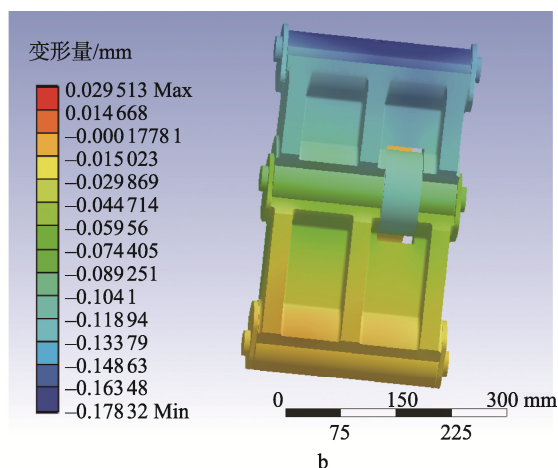
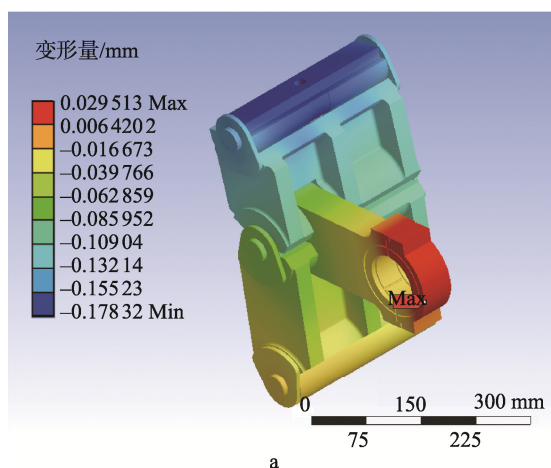


图 11 y 方向变形云图
Fig.11 y-direction deformation cloud map

3 结语

根据模切机下平台传动系统的动力学分析, 利用有限元分析的手段, 从理论层面来指导模切压力试验平台的结构优化设计。提高了设计的准确性, 缩短了产品的试制周期, 对此类设备的开发具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 郭宁宁, 位士博. 综述平压平模切机动平台传动系统[J]. 绿色包装, 2016(11): 43-46.
GUO Ning-ning, WEI Shi-bo. Summary about the Drive System of the Moving Platform on Die-Cutting Machine[J]. Green Packaging, 2016(11): 43-46.
- [2] 陈凯. 平压平模切机动平台共轭凸轮驱动机构的分析

研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.

CHEN Kai. Analysis and Research on Conjugate Cam Driving Mechanism of Moving Platform of Flat Die Cutting Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.

- [3] 韦树远, 陈光, 李鹏, 等. 高速重载模切机动平台运动分析及结构优化设计[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 264-269.
WEI Shu-yuan, CHEN Guang, LI Peng, et al. Motion Analysis and Structural Optimization Design of High-Speed Heavy-Duty Die-cutting Maneuvering Platform[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 264-269.
- [4] 鲁楠, 韩雪, 王佳琪, 等. 模切机传动系统凸轮的分析研究[J]. 绿色包装, 2018(6): 49-52.

- LU Nan, HAN Xue, WANG Jia-qi, et al. Analysis and Study of the Cam in the Transmission System of the Die Cutting Machine[J]. Green Packaging, 2018(6): 49-52.
- [5] 耿武帅, 齐元胜, 王晓华, 等. 平压平模切机驱动机构创新设计及理论分析[J]. 包装工程, 2011, 32(11): 61-64.
- GENG Wu-shuai, QI Yuan-sheng, WANG Xiao-hua, et al. Creative Design and Theoretical Analysis of Drive Mechanism of Plane Die-Cutting Machine[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(11): 61-64.
- [6] 何亚银, 李志峰, 陈纯. 由串联四杆机构组成的多连杆压力机运动特性研究[J]. 机械设计, 2015, 32(5): 87-90.
- HE Ya-yin, LI Zhi-feng, CHEN Chun. Study on Motion Characteristics of Multi-Link Press Made up of Series Four-Bar Linkage[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(5): 87-90.
- [7] 徐立峰, 张雷. 基于 ADAMS 的模切机双肘杆机构优化设计研究[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 75-78.
- XU Li-feng, ZHANG Lei. Optimal Design of Dual-Elbow-Bar Mechanism of Die-Cutting Machine Based on ADAMS[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 75-78.
- [8] FUKUZAWA Y, NAGASAWA S, SUZUKI S, et al. Analysis Acoustic Emission and Sound during the Paperboard of Cutting Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 134-138.
- [9] 张成田, 赵升吨, 王文文, 等. 新型模切机滑块运动特性及其惯性力特性研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(2): 7-12.
- ZHANG Cheng-tian, ZHAO Sheng-dun, WANG Wen-wen, et al. Kinematics and Dynamics Analysis of Working Mechanism of Symmetric Dual-Output Die-Cutting Machine[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56(2): 7-12.
- [10] KIM J W, SEO T, KIM J. A New Design Methodology for Four-Bar Linkage Mechanisms Based on Derivations of Coupler Curve[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 100(3): 138-154.
- [11] PARK S, BAE J, JEON Y, et al. Optimal Design of Toggle-Linkage Mechanism for Clamping Applications[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 120: 203-212.
- [12] 韩应敏. 大幅面平压平模切机下平台运动系统动态特性分析[D]. 北京: 北京印刷学院, 2016.
- HAN Ying-min. Dynamic Characteristics Analysis of Lower Platform Motion System of Large-Format Flat Die-Cutting Machine[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2016.
- [13] 高丽丽. 基于 ADAMS 的模切机双肘杆机构的运动学仿真分析[J]. 精密制造与自动化, 2012(3): 25-27.
- GAO Li-li. Kinematics Simulation Analysis of Double Elbow Mechanism of Die-Cutting Machine Based on ADAMS[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2012(3): 25-27.
- [14] 王中双, 韦静. 肘杆式压力机构动力学建模与分析向量键合图法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 140-145.
- WANG Zhong-shuang, WEI Jing. Vector Bond Graph Method for Dynamic Modeling and Analysis of a Toggle Press Mechanism[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 140-145.
- [15] 李发展, 卢章平. 基于 ADAMS 模切机肘杆机构特性分析. 包装工程, 2010, 1(8): 24-26.
- LI Fa-zhan, LU Zhang-ping. Analysis of Characteristics of Toggle Mechanism Based on ADAMS Die-cutting Machine. Packaging Engineering, 2010, 1(8): 24-26.

责任编辑: 曾钰婵