

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202411003



# 装载机工作装置运动仿真 及其关键零件校核方法

吕永翔<sup>1</sup>, 林博<sup>2</sup>, 姜峰<sup>1,3</sup>, 谭援强<sup>1,3</sup>, 王福增<sup>1,3</sup>,  
马蓉<sup>2</sup>, 周麟木<sup>2</sup>, 刘家文<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021;

2. 广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545007;

3. 南安华大石材产业研究院, 福建 泉州 362261)

**摘要:** 针对 LG950-1 型装载机的工作装置进行了运动学仿真, 并研究工作装置摇臂的强度校核方法。使用 ADAMS 软件建立装载机工作装置的虚拟样机模型, 对装载机工作装置的一个工作循环进行运动仿真, 获得工作装置的运动情况数据, 并提取工作装置摇臂的受力情况数据。使用 ANSYS 软件对工作装置摇臂进行结构强度分析, 验证摇臂的结构强度满足设计要求。研究结果表明: LG950-1 型装载机的摇臂结构强度满足设计要求。

**关键词:** 装载机; 工作装置; 运动仿真; 动力仿真; 有限元分析

中图分类号: TH 243

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)03-0248-07

## Kinematic Simulation of Loader Working Device and Verification Method for Its Key Component

LÜ Yongxiang<sup>1</sup>, LIN Bo<sup>2</sup>, JIANG Feng<sup>1,3</sup>, TAN Yuanqiang<sup>1,3</sup>,  
WANG Fuzeng<sup>1,3</sup>, MA Rong<sup>2</sup>, ZHOU Linmu<sup>2</sup>, LIU Jiawen<sup>2</sup>

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Guangxi Liugong Machinery Limited Company, Liuzhou 545007, China;

3. Nan'an-HQU Institute of Stone Industry, Quanzhou 362261, China)

**Abstract:** Kinematic simulation was conducted on the working device of LG950-1 type loader, and strength verification method for its rocker arm was studied. A virtual prototype model of the loader's working device was established using ADAMS software. Kinematic simulation was carried out for one working cycle to obtain the kinematic situation data. Additionally, the force data acting on the working device's rocker arm was extracted. Structural strength analysis of the rocker arm was conducted using ANSYS software, confirming that its structural strength meets the design requirements. The findings demonstrate that the rocker arm of LG950-1 loader possesses sufficient structure strength meeting the design requirements.

**Keywords:** loader; working device; kinematic simulation; dynamic simulation; finite element analysis

收稿日期: 2024-11-06

通信作者: 姜峰(1981-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事精密超精密加工技术方面的研究。E-mail: jiangfeng@hqu.edu.cn。

基金项目: 广西科技计划项目“带土移植”人才引进计划项目(桂科 AA23026003)

装载机是一种用途广泛的工程机械,可用于装卸、搬运、平整物料及轻度的铲掘,具有作业效率高、速度快等优点,因此,装载机已成为工程机械中的重要机种之一<sup>[1-2]</sup>。装载机的主要部分包括车架、工作装置、液压系统、动力传动系统等<sup>[3]</sup>,工作装置是实现装载机铲掘及转运物料的核心结构,其工作性能是装载机整机性能、作业效率及质量的重要体现<sup>[4-5]</sup>。

传统的装载机工作装置设计方法主要有类比法、经验公式法等<sup>[6]</sup>,传统的设计方法都基于科研人员的经验进行手工绘图。这些方法比较受限,容易出现设计错误或误差,并且效率不高<sup>[7]</sup>。因此,许多学者在装载机工作装置的设计优化方面开展了较为详细的研究,通过解析法和数值仿真法等对装载机工作装置进行优化设计。

解析法是通过数学模型对机构进行运动受力分析的方法。温超等<sup>[8]</sup>等结合软件的算法,根据经验公式及深度公式的混合计算,完成了装载机工作装置的作业轨迹规划。张志忠<sup>[9]</sup>通过推导装载机工作装置的反转六杆机构重要参数之间关系的数学表达式,从而建立了装载机工作装置运动过程的数学表达式。臧红彬等<sup>[10]</sup>分析了装载机工作装置的结构和作业过程,采用齐次坐标变换的方法建立装载机工作装置运动学方程。黄鹏等<sup>[11]</sup>采用复矢量法对新型工作装置进行运动学分析,建立了铲斗末端的位姿空间和各构件的角加速度与驱动空间的映射关系,为装载机工作装置的动力学分析提供可靠的运算参数。黄鹏<sup>[12]</sup>等基于机构运动环路理论,建立了装载机工作装置的运动学数学模型,验证了工作装置运动的准确性。

计算机数值模拟方法在工程机械设计领域快速发展,显著提高机械产品设计的效率和质量。胡英华等<sup>[13]</sup>采用 Ansys Workbench 对 DL300 型装载机工作装置进行有限元仿真分析,得到了两个典型姿态下的应力云图,并确定了大应力区域对应的疲劳评估位置,为工作装置的载荷测试与疲劳分析提供依据。王国栋等<sup>[14]</sup>对 5 t 轮式装载机摇臂进行结构强度分析,得到了摇臂在两种典型工况条件下的应力分布云图,找出了摇臂应力较大的部位。王士华等<sup>[15]</sup>通过对装载机工作装置进行动力学模拟仿真,采用拓扑优化设计和响应面优化设计,解决了摇臂强度不足的问题,并实现了轻量化设计。段鹏昌等<sup>[16]</sup>以一种高效隧道施工装载机的工作装置作为研究对象,对工作装置的摇杆进行了有限元分析,验证了工作装置的摇杆满足设计要求。段文婧<sup>[17]</sup>把某小型轮式装载机作为研究对象,对其工作装置进行运动学分析,并对工作装置进行了优化设计。

综上,现有文献主要是通过解析法对装载机工作机构的尺寸进行设计优化,或者通过数值仿真技术对工作装置的关键零部件进行结构强度分析,而对使用动力学分析获得的载荷数据进行关键零部件校核方法的研究较少。基于此,本文对装载机工作装置运动仿真及其关键零件校核方法进行研究。

## 1 装载机工作装置分析

### 1.1 工作装置作业结构分析与建模

装载机工作装置结构示意图,如图 1 所示。图 1 中:1 为铲斗;2 为连杆;3 为动臂;4 为举升油缸;5 为转斗油缸;6 为摇臂。连杆的两端分别与铲斗和摇臂铰接;动臂的两端分别与铲斗和车架铰接;动臂与车架间设置有举升油缸;摇臂的中间部分和动臂的下部横梁铰接;摇臂与车架间设置有转斗油缸。装载机工作装置三维模型图,如图 2 所示。

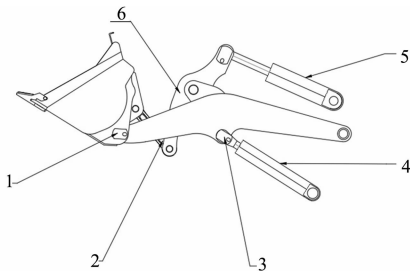


图 1 装载机工作装置结构示意图

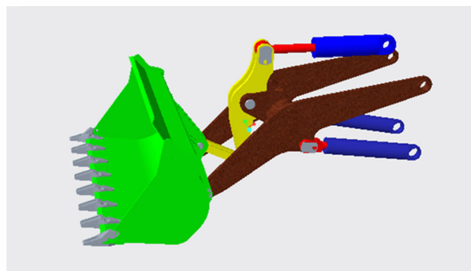


图 2 装载机工作装置三维模型图

Fig. 1 Schematic structural diagram of loader working device Fig. 2 3D model map of loader working device

1.2 工作装置作业工况

装载机的工作工况包括插入、转斗、运输、举升、卸载和放平工况。

- 1) 插入工况:将铲斗插入到物料中,这时通常需要克服插入阻力。
- 2) 转斗工况:将铲斗翻转到合适的角度掘取物料,实现收斗作业,此时,需要克服掘起阻力。
- 3) 运输工况:工作装置后退、转向、前进,将装载的物料运输到指定的位置。
- 4) 举升工况:锁定转斗油缸,将动臂提升到极限高度位置,以方便物料卸载,此时,动臂主要受到物料的重力。
- 5) 卸载工况:动臂举升到极限位置,翻转铲斗将物料卸载出来。
- 6) 放平工况:将铲斗下放,并将动臂下放至初始位置,以方便装载机进行下一次作业。

装载机工作装置 4 种典型工况,如图 3 所示。

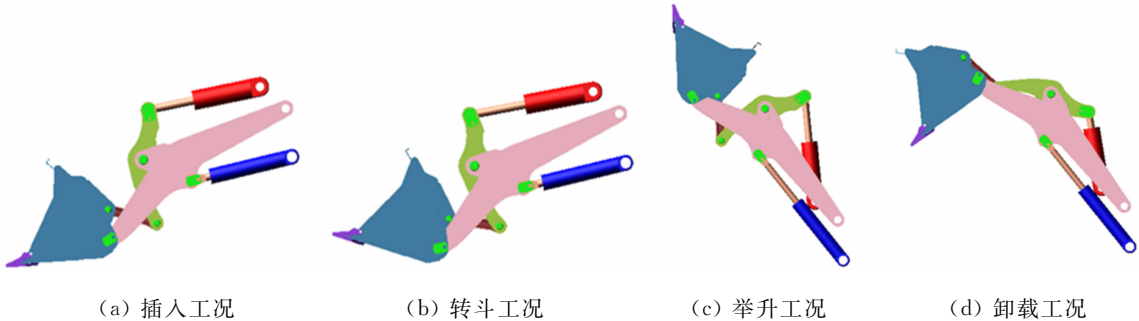


图 3 装载机工作装置 4 种典型工况

Fig. 3 Four typical operating conditions of loader working device

2 工作装置虚拟样机建立

2.1 工作装置模型的导入和属性

将三维模型导入到 ADAMS 软件中,导入的各个部件维持原来的位置关系<sup>[18]</sup>,都是独立的个体。因此,需要重新对部件属性如位置进行定义<sup>[19]</sup>。以插入工况时各部件的位置作为初始状态,将各个部件调整到初始位置。将所有部件的材料属性定义为“steel”,因为工作装置部件的材料均为 Q345,故再将材料的密度统一改为  $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;重力设置为  $9\,806.65\text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ 。利用布尔操作,将对称的动臂液压杆和动臂液压缸合并为一个部件,方便后续的运算。

以插入工况作为初始状态,ADAMS 软件中工作装置模型图,如图 4 所示。

以前轮动力圆圆心为坐标原点,得到初始状态下各铰接点的坐标:铲斗与动臂接点的坐标为 $(-1\,482,-357)$ ;连杆与摇臂铰接点的坐标为 $(-838,-138)$ ;摇臂与动臂铰接点的坐标为 $(-383,377)$ ;摇臂与液压缸铰接点的坐标为 $(-948,1\,256)$ ;摇臂液压缸与前车架铰接点的坐标为 $(511,1\,641)$ ;动臂与液压缸铰接点的坐标为 $(-383,377)$ ;动臂与前车架铰接点的坐标为 $(847,1273)$ ;动臂液压缸与前车架铰接点的坐标为 $(929,677)$ 。

2.2 约束的添加

将对称的动臂液压杆和动臂液压缸合并为一个部件,对动臂与铲斗的铰接点、动臂与动臂液压杆的铰接点,以及动臂与大地的铰接点添加一个约束。

布尔操作之后,模型一共有 8 个构件,添加完约束之后,模型共有 9 个转动副和 2 个移动副。各运动副的类型,如表 1 所示。

通过计算,可得模型的自由度为 2,以举升油缸和转斗油缸做为主动件,工作装置能实现确定的相对运动。

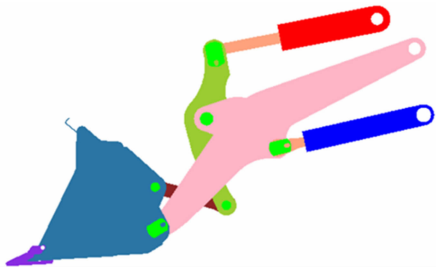


图 4 ADAMS 软件中工作装置模型图

Fig. 4 Working device model map in ADAMS software

表 1 各运动副类型  
Tab. 1 Types of kinematic pairs

构件	构件	运动副类型	构件	构件	运动副类型
铲斗	连杆	转动副	铲斗	动臂	转动副
连杆	摇臂	转动副	摇臂	摇臂液压杆	转动副
摇臂液压杆	摇臂液压缸	移动副	摇臂	动臂	转动副
动臂	动臂液压杆	转动副	动臂液压杆	动臂液压缸	移动副
动臂	大地	转动副	摇臂液压杆	大地	转动副
动臂液压杆	大地	转动副			

3 ADAMS 软件运动学仿真

3.1 添加驱动函数

装载机工作装置的运动是通过转斗油缸和举升油缸的联合作用实现的。根据油缸行程建立 STEP 驱动函数,并将其添加到油缸的移动副上<sup>[20]</sup>,虚拟样机就可以模拟铲斗转斗、举升、卸料、下降的整个作业过程。STEP 驱动函数为  $STEP(x, x_0, h_0, x_1, h_1)$ , 其中:  $x_0$  为每个典型工况的开始时间;  $x_1$  为每个典型工况的结束时间;  $h_0$  为 STEP 函数的初始值, 代表  $x_0$  时刻油缸移动副的位移量;  $h_1$  为 STEP 函数的最终值, 代表  $x_1$  时刻油缸移动副的位移量。

仿真时间设定为 18 s, 对虚拟样机施加驱动函数, 其中,  $t$  为时间。

1) 举升油缸的驱动 STEP 函数为

$$STEP(t, 0, 0, 3, 0) + STEP(t, 3, 0, 6, 0) + STEP(t, 6, 0, 12, -660) + STEP(t, 12, 0, 15, 0) + STEP(t, 15, 0, 18, 660)。$$

2) 转斗油缸的驱动 STEP 函数为

$$STEP(t, 0, 0, 3, 0) + STEP(t, 3, 0, 6, -120) + STEP(t, 6, 0, 12, 0) + STEP(t, 12, 0, 15, 480) + STEP(t, 15, 0, 18, -360)。$$

3.2 运动学仿真结果

通过运动学仿真可以观察到任意时刻的工作装置的运动行为,也可以通过测量获得需要的参数。铲斗对地角度( $\alpha$ )变化曲线,如图 5 所示。铲斗卸载距离( $s$ )变化曲线,如图 6 所示。铲斗卸载高度( $H$ )变化曲线,如图 7 所示。

工作装置的运动学仿真可以证明工作装置的运动行为是否满足设计要求,并为工作装置的动力学仿真奠定了重要的基础。

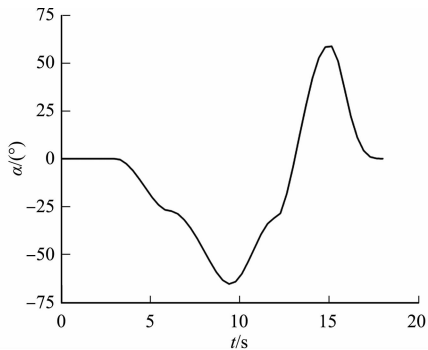


图 5 铲斗对地角度变化曲线  
Fig. 5 Curve of bucket-to-ground angle variation

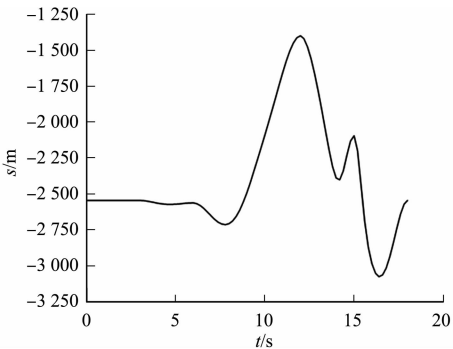


图 6 铲斗卸载距离变化曲线  
Fig. 6 Curve of bucket unloading distance variation

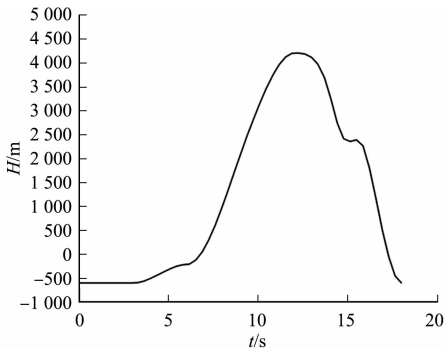


图 7 铲斗卸载高度变化曲线  
Fig. 7 Curve of bucket unloading height variation

4 ADAMS 动力学仿真

4.1 添加外载荷函数

外载荷( $F$ )变化曲线,如图 8 所示。装载机工作装置在完成插入、转斗、运输、举升、卸载和放平 6 个工况的同时,还要承受外载荷的影响,分别是插入物料时的插入阻力、翻转铲斗时的掘起阻力、物料重力,以及零部件自身重力,使用 STEP 函数定义外载荷并将外载荷施加到铲斗上。

物料重力的 STEP 函数为  $\text{STEP}(t,0,0,3.2,0)+\text{STEP}(t,3.2,0,6,50\ 000)+\text{STEP}(t,6,0,12,0)+\text{STEP}(t,12,0,15,-50\ 000)+\text{STEP}(t,15,0,18,0)$ 。插入阻力的 STEP 函数为  $\text{STEP}(t,0,0,2.8,112\ 250)+\text{STEP}(t,2.8,0,3,-112\ 250)+\text{STEP}(t,3,0,18,0)$ ,掘起阻力的 STEP 函为  $\text{STEP}(t,0,0,3,0)+\text{STEP}(t,3,0,3.2,160\ 000)+\text{STEP}(t,3.2,0,6,-160\ 000)+\text{STEP}(t,6,0,18,0)$ 。

4.2 动力学仿真结果

选择工作装置的摇臂作为动力学仿真的研究对象,工作装置摇臂示意图,如图 9 所示。

通过对装载机工作装置进行一个工作循环的仿真,可以得到装载机一个工作循环内任意时刻摇臂销孔 1、2 的受力情况据,摇臂销孔 1、2 的受力变化曲线,如图 10、11 所示。图 10、11 中: $F_x$  为  $x$  方向的受力; $F_y$  为  $y$  方向的受力。

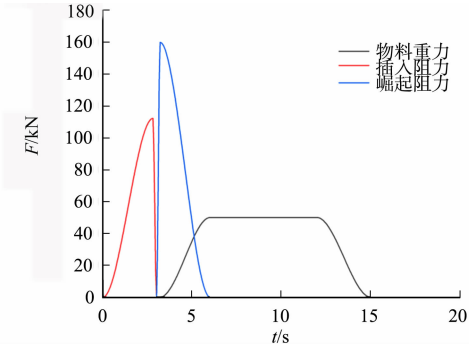


图 8 外载荷变化曲线

Fig. 8 Curves of external load variation

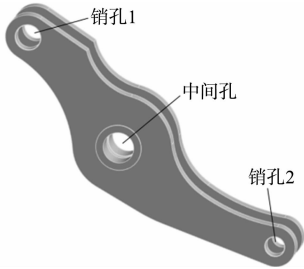


图 9 工作装置摇臂示意图

Fig. 9 Schematic diagram of working device rocker arm

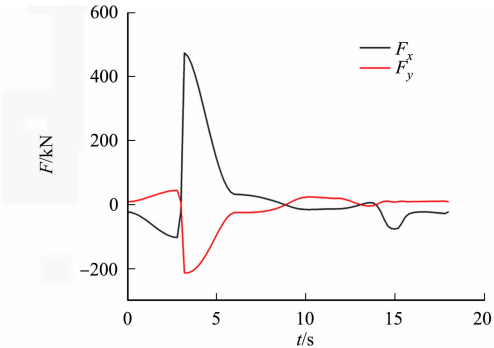


图 10 摇臂销孔 1 受力变化曲线

Fig. 10 Curves of force variation on rocker arm pin hole 1

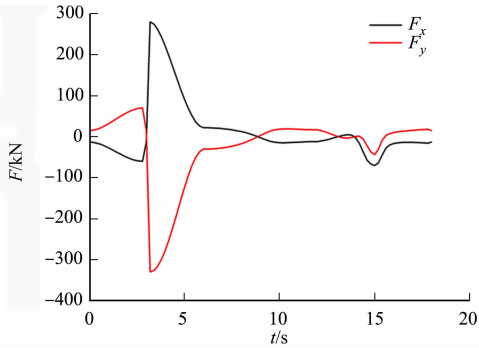


图 11 摇臂销孔 2 受力变化曲线

Fig. 11 Curves of force variation on rocker arm pin hole 2

摇臂销孔受力数据,如表 2 所示。受力数据拟合表为摇臂的有限元分析提供数据基础。

表 2 摇臂销孔受力数据

Tab. 2 Force data of the rocker arm pin hole

$t/s$	$F_x$ (销孔 1)/N	$F_y$ (销孔 1)/N	$F_x$ (销孔 2)/N	$F_y$ (销孔 2)/N
0	-23 036.52	9 258.14	-13 186.29	15 088.84
1	-46 210.58	19 549.00	-26 849.45	31 101.65
2	-86 765.18	37 558.01	-50 759.99	59 124.07
3	-23 693.63	9 548.30	-13 566.33	15 532.51
4	366 726.10	-190 056.20	221 492.90	-277 684.40
5	144 685.10	-95 549.62	92 356.70	-125 440.10
6	32 315.24	-24 745.64	21 707.81	-30 395.54
7	27 730.61	-23 971.80	19 566.97	-27 538.96

续表  
Continue table

$t/s$	$F_x$ (销孔 1)/N	$F_y$ (销孔 1)/N	$F_x$ (销孔 2)/N	$F_y$ (销孔 2)/N
8	15 268.40	-17 485.24	12 427.05	-17 090.08
9	-3 421.85	3 404.68	-2 653.07	2 946.25
10	-15 062.42	23 513.29	-14 785.01	18 388.12
11	-13 934.98	21 928.74	-13 373.37	18 176.68
12	-12 956.20	19 328.76	-12 005.92	16 596.05
13	-1 409.72	1 316.87	-1 152.16	1 380.96
14	-3 301.47	1 246.62	-2 614.99	745.80
15	-75 777.99	8 241.65	-70 113.47	-43 906.12
16	-25 182.90	9 400.15	-16 942.03	9 985.26
17	-23 421.66	10 403.12	-13 997.36	15 429.59
18	-23 036.52	9 258.14	-13 186.29	15 088.84

5 装载机工作装置摇臂有限元分析

5.1 模型导入与前处理

将 CREO 软件的工作装置的三维模型导入到 ANSYS 软件,摇臂的材料为低碳优质合金钢 Q345,在前处理阶段定义摇臂的材料属性,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 850 kg · m<sup>-3</sup>,屈服强度为 345 MPa。

网格划分的精度选择过低会导致计算结果不准确,精度过高又会降低优化设计的效率。选择四面体网格划分,单元尺寸设置为 2 mm。摇臂网格划分局部示意图,如图 12 所示。

摇臂与其他部件都是通过销轴连接。为了减少研究量,对模型约束和加载进行简化处理,对中间孔进行固定处理;根据动力学分析获得的外载荷数据,使用余弦分布加载的方式将外载荷施加在销孔 1 和销孔 2 上。摇臂的约束及载荷分布,如图 13 所示。

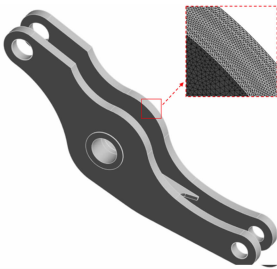


图 12 摇臂网格划分局部示意图  
Fig. 12 Schematic local diagram of rocker arm mesh division

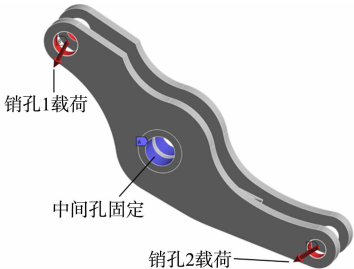


图 13 摇臂的约束及载荷分布  
Fig. 13 Constraints and load distribution of rocker arm

5.2 求解与结果

在装载机零件强度校核中,由于装载机作业繁重,动载荷较大,安全系数取 1.5,因此摇臂的许用应力为 230 MPa。基于动力学分析获得的载荷数据进行加载求解,摇臂等效应力云图,如图 14 所示。图 14 中:σ 为应力。由图 14 可知:摇臂的最大应力为 225.21 MPa,满足设计要求。

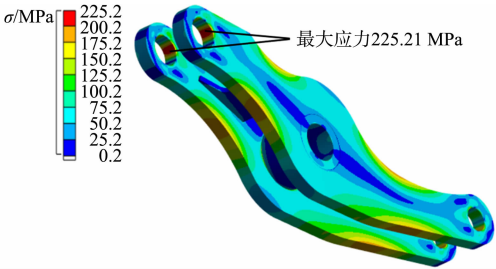


图 14 摇臂等效应力云图  
Fig. 14 Equivalent stress contour map of rocker arm

6 结论

1) 将 LG950-1 型装载机的工作装置作为研究对象,使用 ADAMS 软件建立虚拟样机,为运动学和动力学仿真提供基础。

- 2) 使用 STEP 函数定义驱动,将驱动添加在油缸的移动副上,对工作装置进行运动学仿真。工作装置的运动学仿真可用于证明工作装置的运动行为是否满足设计要求。
- 3) 使用 STEP 函数模拟装载机工作装置受到的外载荷,对工作装置进行动力学分析,获得装载机工作装置一个工作循环的任意时刻摇臂的受力情况数据。
- 4) 基于 ADAMS 软件,获得摇臂受力情况数据,使用 ANSYS 软件对摇臂进行有限元分析。获得摇臂的等效应力云图,以此对零件进行结构强度校核。

参考文献:

[1] 王虎奇,陈树勋. 基于 ADAMS 的装载机前车架有限元分析载荷求解[J]. 机械设计与制造,2007(3):64-66.

[2] 祝海林,邹旻,包振义,等. 装载机产业的发展趋势[J]. 筑路机械与施工机械化,2008(4):75-77.

[3] 何挺继,朱文天,邓世新. 筑路机械手册[M]. 北京:人民交通出版社,1998.

[4] 王晓明,张佳佳,宋红兵. 基于 ADAMS 的装载机工作装置仿真及优化设计[J]. 工程机械,2014,45(6):55-58,9.

[5] 张雪华. 基于 ADAMS 的 ZL-50 型装载机工作装置的优化[J]. 矿山机械,2011,39(6):44-48. DOI:10.16816/j.cnki.ksjx.2011.06.012.

[6] 扈艳萍. 装载机工作装置和液压系统的优化分析与研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2016. DOI:10.7666/d.D845817.

[7] 彭丹. 装载机工作装置动力学仿真与有限元分析[D]. 西安:长安大学,2015.

[8] 温超,李冰,席亚丽. 装载机铲装运动作业轨迹规划研究[J]. 机械设计与制造,2024(1):150-153. DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20230718.033.

[9] 张志忠. 装载机工作装置运动学分析与优化设计研究[D]. 天津:天津大学,2017.

[10] 臧红彬,陶俊杰,张辉. 基于齐次坐标变换的装载机工作装置运动学分析[J]. 机械传动,2015,39(11):46-49,71. DOI:10.16578/j.issn.1004.2539.2015.11.010.

[11] 黄鹏,张金程,丁华锋,等. 一种新型装载机工作装置的运动学与动力学分析[EB/OL]. (2024-04-03)[2024-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240401.1059.024.html>.

[12] 黄鹏,李长硕,丁华锋,等. 一种新型液压装载机工作装置的运动学分析[J]. 机械工程学报,2024,60(23):76-87.

[13] 胡英华,万一品,俞虎升,等. 基于实测载荷的 DL300 型推装机工作装置有限元分析[J]. 机械研究与应用,2024,37(4):43-45. DOI:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.04.012.

[14] 王国栋,晁晓洁. 装载机摇臂结构强度有限元分析[J]. 机械工程与自动化,2023(4):75-77.

[15] 王士华,魏伟,袁勇超,等. 装载机摇臂机构动力学仿真及优化设计研究[J]. 机械设计,2022,39(增刊1):102-108. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2022.s1.031.

[16] 段鹏昌,黄静,凌涛,等. 高效隧道施工装载机静力学有限元分析研究[J]. 机械管理开发,2022,37(1):51-54. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2022.01.021.

[17] 段文婧. 某小型轮式装载机工作装置优化设计[J]. 内燃机与配件,2022(12):13-15. DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2022.12.026.

[18] 秦贞沛,朱俊平,郑东京,等. 挖掘机工作装置的虚拟样机建立及运动学仿真:以农用液压挖掘机为例[J]. 农机化研究,2011,33(4):46-48. DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2011.04.011.

[19] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2014.

[20] 李凯. 装载机工作装置的动力学仿真与有限元分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 吴跃勤)