

车装全液压钻机桅杆模态分析及拓扑优化

杜垚森¹, 和国磊¹, 冯起赠¹, 赵远^{*1}, 师敏², 宋志彬¹, 朱芝同¹, 刘晓林¹,
许本冲¹, 秦如雷¹, 马汉臣¹, 伍晓龙¹, 高鹏举^{1,3}, 汤小仁¹, 王晓赛¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 廊坊职业技术学院, 河北廊坊 065000;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:车装全液压钻机具有自动化程度高、工艺适用范围广、机动性好及施工效率高等优点,因此被广泛应用于煤层气抽采井、水井等钻井施工。桅杆作为钻机的重要构件,支撑着动力头的回转钻进工作,桅杆工作振动的稳定性对钻机工作的可靠性具有十分重要的影响。通过对桅杆进行模态分析,明确了桅杆的固有频率和模态振型,结果表明桅杆可能发生共振现象;通过对桅杆进行拓扑优化分析,并且根据桅杆的实际功能,得到优化模型,静力分析和模态分析结果均表明优化效果显著,满足结构强度要求且避免了共振的发生。桅杆的有限元分析,为桅杆的结构设计提供了理论支撑,同时提供了一种现代机械结构设计方法,具有一定的参考意义。

关键词:车装全液压钻机;桅杆;模态分析;拓扑分析;固有频率;共振

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)03-0070-06

Modal analysis and topology optimization of the mast of truck-mounted all-hydraulic rig

DU Yaosen¹, HE Guolei¹, FENG Qizeng¹, ZHAO Yuan^{*1}, SHI Min²,
SONG Zhibin¹, ZHU Zhitong¹, LIU Xiaolin¹, XU Benchong¹, QIN Rulei¹,
MA Hanchen¹, WU Xiaolong¹, GAO Pengju^{1,3}, TANG Xiaoren¹, WANG Xiaosai¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Langfang Polytechnic Institute, Langfang Hebei 065000, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: With the advantages of high automation, wide drilling adaptability, good mobility and high drilling efficiency, truck-mounted hydraulic drilling rig is widely used in coal bed methane extraction wells, water wells and so on. As an important component of the drilling rig, the mast supports the power head for rotary drilling. The vibrational stability of the mast has very important influence on the reliability of the drilling rig. Through modal analysis, the natural frequency and the modal amplitude of the mast are determined, and the results show that the resonant phenomenon may occur. Through the topological optimization analysis of the mast and according to the actual functions of the mast, the optimal model is obtained. The static structural analysis and the modal analysis results show that the optimization effect is remarkable, which meets the structural strength requirements and avoids the occurrence of resonance. The finite element analysis of the mast provides theoretical support for the structure design of the mast, and provides a modern mechanical structure design method.

Key words: truck-mounted hydraulic rig; mast; modal analysis; topology analysis; natural frequency; resonance

收稿日期:2022-02-23; 修回日期:2022-04-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.03.009

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号:20211421)

第一作者:杜垚森,男,汉族,1986年生,工程师,机械工程专业,长期从事地质机械设计研发和钻井技术研究工作,河北省廊坊市金光道77号, yaosendu@126.com。

通信作者:赵远,男,汉族,1989年生,工程师,电气工程及其自动化专业,长期从事项目管理工作,河北省廊坊市金光道77号,3064597416@qq.com。

引用格式:杜垚森,和国磊,冯起赠,等.车装全液压钻机桅杆模态分析及拓扑优化[J].钻探工程,2022,49(3):70-75.

DU Yaosen, HE Guolei, FENG Qizeng, et al. Modal analysis and topology optimization of the mast of truck-mounted all-hydraulic rig [J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):70-75.

0 引言

车装全液压钻机应用广泛,可用于水井、煤层气抽采井、浅层油气井、抢险救援井、勘探井、物探井及地热井等钻井施工^[1-3],可采用空气潜孔锤、空气泡沫、液动潜孔锤、气动潜孔锤反井施工、牙轮正循环、气举反循环及跟管钻进等钻进工艺,提高钻进效率。此外,该种类型钻机可由底盘车的发动机提供动力,能够满足野外施工中缺电且经常性搬迁的特殊要求,提高施工的效率^[4-6]。桅杆是钻机的重要组成部分,是动力头的重要支撑构件,桅杆的动态稳定性对钻机工作的可靠性具有重要的影响,因此需要对桅杆进行动态分析。为了避免发生共振,需要计算出桅杆的固有频率。综合考虑桅杆的强度、刚度和稳定性等因素,对桅杆进行拓扑优化分析,改善桅杆的结构,减轻桅杆的质量,使其具有较好的经济性。

1 桅杆的结构

以SDC-2500型车装全液压钻机为例,其桅杆的结构简图如图1所示。桅杆通过举升油缸带动4个滚轮沿桅杆支架滑轨上下移动,进而顶部滑轮组带动动力头实现钻进功能。桅杆的主体结构立梁为箱型截面成型钢。桅杆的高度为12286 mm,主体结构矩形钢规格为500 mm×360 mm×8 mm。

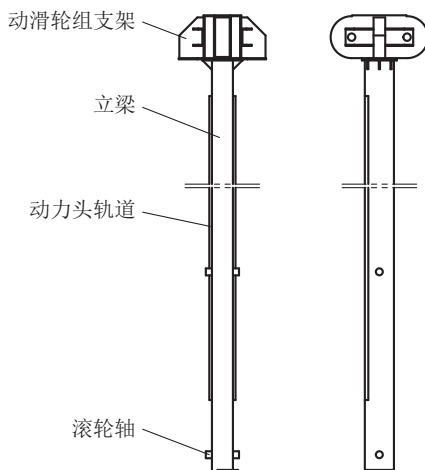


图1 桅杆的结构简图

Fig.1 Simplified structure of the mast

2 桅杆模态分析

本文对SDC-2500型车装全液压钻机桅杆进行自由振动和预应力模态分析,桅杆预应力下的动态

平衡方程^[7-8]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t) \quad (1)$$

式中: M ——质量矩阵; \ddot{x} ——加速度矢量; C ——阻尼矩阵; \dot{x} ——速度矢量; K ——刚度矩阵; x ——位移矢量; $P(t)$ ——外激振力函数矢量。

当忽略阻尼及外部载荷时,自由振动系统的平衡方程可简化为:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2)$$

基于ANSYS Workbench软件对桅杆进行模态分析。

桅杆整体采用Q345低合金钢,其材料性能参数如表1所示。

表1 材料性能参数

Table 1 Performance parameters of the material

参数项	数值
弹性模量	206 GPa
泊松比	0.3
密度	7850 kg/m ³
屈服极限	345 MPa

2.1 自由振动模态分析

桅杆的有限元模型如图2所示。采用四面体单元进行自由网格划分,网格单元数为19485,网格节点数为36876。根据模态分析理论和桅杆的工作原理对下部滑轮施加X、Y方向的位移约束,如图3所示。

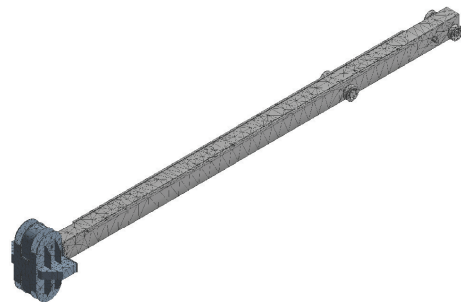


图2 桅杆有限元模型

Fig.2 Finite element model of the mast

过程分析结束后,在结果后处理中添加前6阶总变形结果,提取桅杆前6阶模态进行分析,得到其固有频率及振幅如表2所示。

桅杆前6阶模态振型如图4所示。

由表2和图4可知,桅杆的最小固有频率为1阶

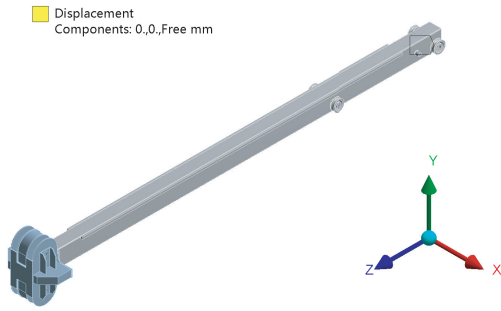


图3 位移约束示意

Fig.3 Displacement constraint

表2 自由振动前6阶固有频率及振幅

Table 2 The first six natural frequencies and amplitudes at free vibration

阶数	固有频率/Hz	振幅/mm
1	0.0008	0.5572
2	2.6878	0.8497
3	3.0449	0.8489
4	20.6450	1.5553
5	26.0320	1.2592
6	29.4600	1.2245

固有频率0.0008 Hz,最大固有频率为6阶固有频率29.46 Hz,并随着模态阶数增加而增大。1阶振型表现为沿Z轴方向前后整体移动,整体振幅均为0.5572 mm;2阶振型表现为桅杆上半部分沿X轴方向摆动,最大振幅位置出现在顶部,为0.8497 mm;3阶振型表现为桅杆上半部分沿Y轴方向摆动,最大振幅位置出现在顶部,为0.8489 mm;4阶振型表现为桅杆绕Z轴扭摆,最大振幅位置出现在顶部边缘,为1.5553 mm,各阶模态中振幅最大;5阶振型表现为桅杆上半部分沿X轴方向蠕摆,最大振幅位置出现在桅杆偏上1/3处(图中红色区域位置),为1.2592 mm;6阶模态振型表现为桅杆上半部分沿Y轴方向蠕摆,且最大振幅位置出现在桅杆偏上1/3处(图中红色区域位置),最大振幅为1.2245 mm。各阶振型位移差距很小,且位移值很小,表明桅杆振动相对稳定。

2.2 预应力模态分析

当结构受到外载荷作用时,由于应力刚化效应,需要进行预应力模态分析^[9-10]。桅杆有多种工况,本文将按照钻机设计参数最大值进行桅杆的分析,即极限工况,桅杆承受动力头最大扭矩29 kN·m,不考虑风载荷的作用^[11-12]。首先对桅杆进行结构静力分析,进而进行模态分析,桅杆施加载荷和位移约束如图5所示,将扭矩转换为力偶施加在动力头运动轨道(图中A、B所示),位移约束施加在下部滑轮处(图中C所示),限制X和Y方向的位移。

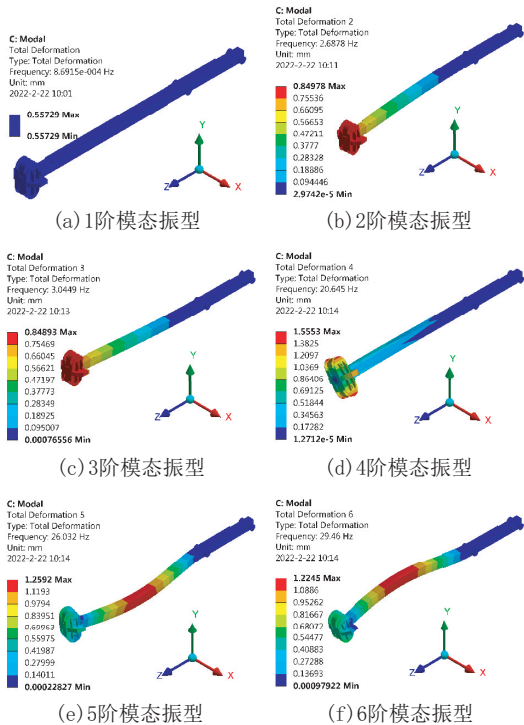


图4 自由振动前6阶模态振型

Fig.4 Modal vibration of the first six natural frequencies at free vibration

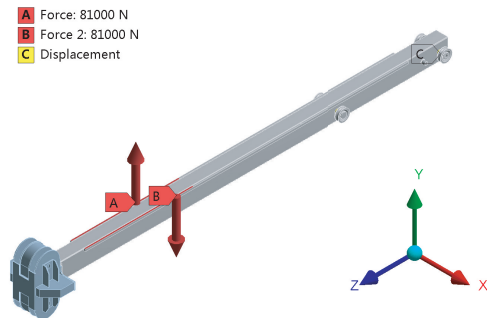


图5 载荷和位移约束示意

Fig.5 Diagram of load and displacement constraint

过程分析结束后,在结果后处理中添加前6阶总变形结果,提取桅杆前6阶模态固有频率和振幅如表3所示。桅杆前6阶模态振型如图6所示。

由表3和图6可知,桅杆的最小固有频率为1阶

表 3 预应力前 6 阶固有频率及振幅

Table 3 The first six natural frequencies and amplitudes at prestress

阶数	固有频率/Hz	振幅/mm
1	0.0266	0.5572
2	2.6880	0.8497
3	3.0451	0.8489
4	20.6450	1.5553
5	26.0320	1.2592
6	29.4600	1.2245

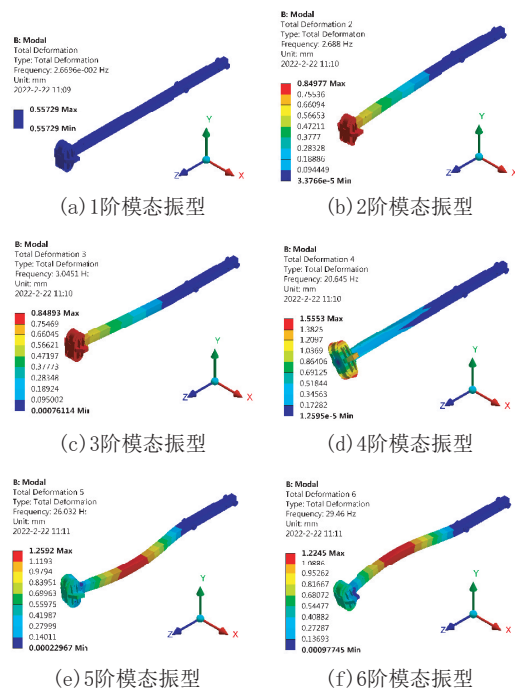


图 6 预应力前 6 阶模态振型

Fig.6 The first six modal vibration at prestress

固有频率 0.0266 Hz,最大固有频率为 6 阶固有频率 29.46 Hz,并随着模态阶数增加而增大。1 阶振型表现为沿 Z 轴方向前后整体移动,整体振幅均为 0.5572 mm;2 阶振型表现为桅杆上半部分沿 X 轴方向摆动,最大振幅位置出现在顶部,为 0.8497 mm;3 阶振型表现为桅杆上半部分沿 Y 轴方向摆动,最大振幅位置出现在顶部,为 0.8489 mm;4 阶振型表现为桅杆绕 Z 轴扭摆,最大振幅位置出现在顶部边缘,为 1.5553 mm,各阶模态中振幅最大;5 阶振型表现为桅杆上半部分沿 X 轴方向蠕摆,最大振幅位置出现在桅杆偏上 1/3 处(图中红色区域位置),为 1.2592 mm;6 阶模态振型表现为桅杆上半部分沿 Y

轴方向蠕摆,且最大振幅位置出现在桅杆偏上 1/3 处(图中红色区域位置),最大振幅为 1.2245 mm。

综上所述,桅杆自由振动和预应力下的模态分析结果几乎一致,仅 1 阶固有频率有细微的差异,表明预应力对桅杆的模态影响可忽略不计。桅杆的激振源主要为动力头的转动,而动力头的振动决定了其激振力的激振频率,SDC-2500 型车装全液压钻机的动力头最高转速为 210 r/min,因此最大激振频率为 3.5 Hz,与 3 阶固有频率 3.0451 Hz 较为接近,存在发生共振的可能,需要进一步的优化改进。

3 桅杆拓扑优化分析

拓扑优化是一种根据给定的负载情况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法,是结构优化的一种。本文进行的拓扑优化属于离散结构拓扑优化领域,在设计空间建立一个由有限个梁单元组成的基本结构,根据算法确定设计空间内的单元的去留,保留下来的单元即为最终的拓扑优化方案^[13-15]。调用 ANSYS Workbench 的形状优化模块对桅杆进行拓扑优化,设置建议的减重比例依次为 20%、10%、5% 和 1%^[16-17],最终确定减重比例为 1% 时,既能保证桅杆的结构功能,也可适当减重,拓扑优化结果如图 7 所示。

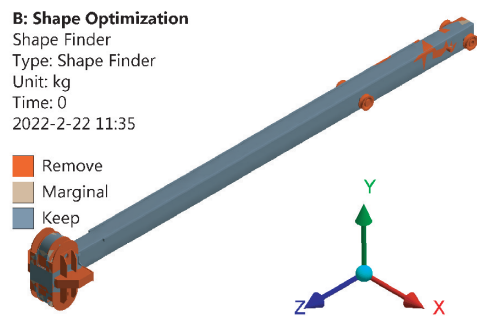


图 7 拓扑优化结果

Fig.7 Result of topology optimization

图 7 中的 Remove 区域是可以去除的材料, Marginal 区域为自处理区域,根据实际情况决定去除或者保留,而 Keep 区域为要保留材料的区域。拓扑优化计算的模型只是提供了优化参考,不能直接作为最终的设计方案,根据桅杆的实际结构功能可知图 7 中 Remove 区域不能完全去除。拓扑优化后改进模型如图 8 所示,整体结构保持不变,适当降低了

Remove 区域部分的厚度。

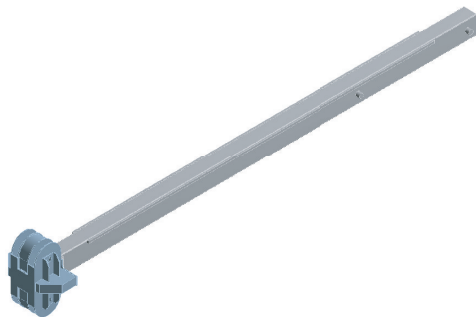


图8 桅杆优化模型

Fig.8 Three-dimensional optimized model of the mast

将优化后的桅杆模型再次进行静力学分析,验证其是否满足静力学条件,静力学分析结果如等效应力云图9和等效位移云图10所示。最大等效应力为181.1 MPa,远远小于材料的屈服强度345 MPa,安全系数达到1.9,满足强度要求;最大等效位移为3.7354 mm,变形较小,满足刚度要求。

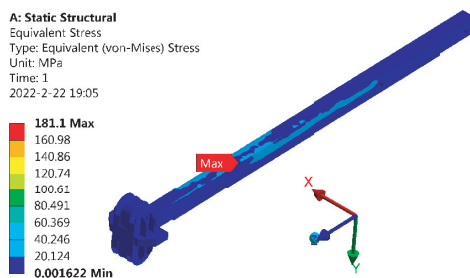


图9 等效应力云图

Fig.9 Equivalent stress

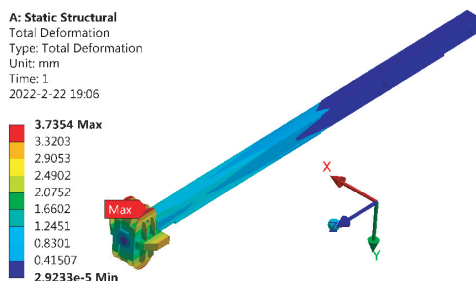


图10 等效位移云图

Fig.10 Total deformation

将优化后的模型桅杆再次进行模态分析,由于自由振动状态和预应力状态模态分析结果几乎一致,因此只进行自由振动状态下的模态分析。提取

前6阶模态固有频率和最大振幅如表4所示,桅杆优化前后固有频率对比如表5所示。

表4 前6阶固有频率和振幅值

Table 4 The first six natural frequencies and amplitudes

阶数	固有频率/Hz	振幅/mm
1	6.6436	0.9790
2	7.5221	0.9530
3	22.211	1.5958
4	62.406	1.4822
5	68.722	1.3653
6	79.649	3.2573

表5 桅杆前6阶固有频率对比

Table 5 Comparison of the first six natural frequencies

阶数	优化后固有频率/ Hz	原模型固有频率/ Hz	提高率/ %
1	6.6436	0.0266	99.60
2	7.5221	2.6880	64.27
3	22.2110	3.0451	86.29
4	62.4060	20.6450	66.92
5	68.7220	26.0320	62.12
6	79.6490	29.4600	63.01

从表5可以看出,优化后的桅杆模型较原模型固有频率得到显著提高,1阶固有频率提高将近1倍,且最小固有频率6.6436 Hz大于外界最大激振频率3.5 Hz,表明桅杆不会发生共振现象。通过计算优化前桅杆的质量为3219.8 kg,优化后桅杆的质量为3199.7 kg,减轻了0.62%。总之,优化后的桅杆取得了较好的振动稳定性和一定的经济性。

4 结语

(1)本文以SDC-2500型车装全液压钻机桅杆为研究对象,开展了自由振动状态和预应力状态下的有限元模态分析,提取了前6阶的固有频率和模态振型结果,明确了桅杆固有频率和模态振型,结果表明桅杆有可能发生共振。

(2)通过对桅杆进行拓扑优化分析,得出优化模型;通过对优化模型进行静力分析和模态分析,结果表明拓扑优化效果显著,避免了桅杆发生共振的可能性,且取得了一定的经济性。

(3)通过对桅杆进行模态分析和拓扑优化分析,

为桅杆的结构设计提供了理论支撑,同时也提供了一种现代机械设计方法,具有一定的参考意义。

参考文献(References):

- [1] 黄印国. 车载煤层气钻机设计及专用动力水龙头研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
HUANG Yinguo. Design of vehicle CBM drilling rigs and research on special power swivel[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [2] 冯起赠, 宋志彬, 和国磊. SDC-1000车装全液压钻机在煤层气施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1): 65-67.
FENG Qizeng, SONG Zhibin, HE Guolei. Application of SDC-1000 mobile hydraulic drilling rig in coalbed gas exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(S1): 65-67.
- [3] 冯起赠, 秦如雷, 许本冲, 等. 全液压车装钻机在集束式潜孔锤反井施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(6): 23-26.
FENG Qizeng, QIN Rulei, XU Benchong, et al. Application of all hydraulic truck-mounted drilling rig in cluster DTH inverse well construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(6): 23-26.
- [4] 曹东风. 宝峨RB50型车载钻机施工工艺探讨[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(7): 69-85.
CAO Dongfeng. Probe into Bauer RB50 truck-mounted drilling rig operational techniques [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(7): 69-85.
- [5] 王俊杰. 浅析宝峨RB50车载钻机在水井开发中的应用[J]. 华北国土资源, 2016(2): 117-118.
WANG Junjie. Brief analysis on the application of Bauer RB50 truck-mounted rig in water well development [J]. Huabei Land and Resources, 2016(2): 117-118.
- [6] 高宏亮. 车载钻机在地质勘探工程中的应用[J]. 地质装备, 2009(4): 37-40.
GAO Hongliang. Application of truck-mounted rig in geological exploration engineering [J]. Equipemnt for Geotechnical Engineering, 2009(4): 37-40.
- [7] 王思坦, 杨义勇, 李建华, 等. 基于ANSYS Workbench的岩心钻机桅杆模态分析方法[J]. 地质装备, 2012, 13(6): 14-16.
WANG Sitan, YANG Yiyong, LI Jianhua, et al. Modal analysis method of mast for core rig based on ANSYS workbench [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2012, 13(6): 14-16.
- [8] 杜垚森, 师敏, 赵远, 等. SDC-2500型煤层气车载钻机桅杆支架的模态分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 51-57.
DU Yaosen, SHI Min, ZHAO Yuan, et al. Modal analysis of the mast support frame of SDC-2500 coal bed methane truck-mounted rig [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 51-57.
- [9] 贺明辉. 基于ANSYS的旋挖钻机桅杆疲劳分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
HE Minghui. Fatigue analysis for the mast of rotary drilling rig based on ANSYS [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [10] 王林军, 王钺, 杜义贤, 等. 基于ANSYS-Workbench的液压机架模态分析及拓扑优化[J]. 煤矿机械, 2019, 40(3): 79-83.
WANG Linjun, WANG Tan, DU Yixian, et al. Modal analysis and topology optimization of hydraulic press rack based on ANSYS-Workbench [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(3): 79-83.
- [11] 杜垚森, 周琴, 师敏, 等. 车装全液压钻机伸缩桅杆的结构强度分析[J]. 煤矿机械, 2021, 42(11): 95-98.
DU Yaosen, ZHOU Qin, SHI Min, et al. Structure strength analysis on telescopic mast of truck-mounted hydraulic rig [J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(11): 95-98.
- [12] 伍晓龙, 刘凡柏. 4000 m岩心钻机桅杆结构设计及与有限元分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 88-94.
WU Xiaolong, LIU Fanbai. Structural design and finite element analysis of mast of 4000 meter core drilling rig [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 88-94.
- [13] Allaire G, Jouve F, Toader A M. A level-set method for shape optimization [J]. Comptes Rendus Mathematique, 2002, 334(12): 1125-1130.
- [14] Su R Y, Gui L G, Fan Z J. Topology and sizing optimization of truss structures using adaptive genetic algorithm with node matrix encoding [C] // Tianjin: 2009.
- [15] 李家春, 胡捷, 李宏涛, 等. 大型矿井提升机卷筒结构拓扑优化研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(3): 231-234.
LI Jiachun, HU Jie, LI Hongtao, et al. Research on topology optimization of large mine hoist drum structure [J]. Coal Technology, 2017, 36(3): 231-234.
- [16] 陈忠山, 乔红兵, 张浩, 等. CMM2-20型液压钻车钻架静力学分析[J]. 煤炭技术, 2021, 40(2): 176-179.
CHEN Zhongshan, QIAO Hongbing, ZHANG Hao, et al. Static analysis of CMM2-20 type full hydraulic drilling rig [J]. Coal Technology, 2021, 40(2): 176-179.
- [17] 许翠华. 煤层气车载钻机桅杆设计及分析[J]. 能源与环保, 2017, 30(12): 84-87.
XU Cuihua. Analysis and design on CBM mobile drilling rig's mast [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 30(12): 84-87.

(编辑 荐华)