

4000 m 岩心钻机桅杆结构与有限元分析

伍晓龙, 刘凡柏

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:桅杆是钻机的重要组成部分,本文对勘探技术所自主研发的4000 m地质岩心钻机桅杆进行了结构设计分析,为确保桅杆满足强度、风载等使用工况要求,在SolidWorks中完成桅杆的建模,运用ANSYS Workbench对桅杆装配体进行有限元分析,完成对桅杆结构强度和刚度的校核,并对其进行模态分析,得到前10阶固有频率和振型。与激振源进行对比,分析发现第1阶、第2阶固有频率与钻机转盘和起升系统频率有重叠,可能会发生共振。通过调节钻机转盘和起升系统转速避免发生共振,振动时最大变形处变形量较小,说明桅杆结构设计合理,能够满足实际应用要求,具有一定的工程应用价值。

关键词:岩心钻机;桅杆;结构设计;静力学分析;模态分析;有限元分析

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)01-0088-07

Structural design and finite element analysis of the 4000m core drill mast

WU Xiaolong, LIU Fanbai

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The mast is an important part of the drill. This paper describes the structural design of the mast of the 4000m core drill independently developed by Institute of Exploration Technology. In order to ensure that the mast meets the requirements of working conditions such as strength, wind load, the mast model is created with SolidWorks, and ANSYS Workbench is used to carry out the finite element analysis for the mast assembly to verify the strength and rigidity of the mast structure, and perform the modal analysis to obtain the first 10 intrinsic vibration frequencies and modes. They are compared with the excitation sources, and the results show the first and second intrinsic frequencies overlap with the frequencies of the drilling turntable and hoisting system, which may cause resonance; thus, the rotating speed of the drilling rig turntable and hoisting system is adjusted to avoid resonance. As a result, the deformation amount is small at the maximum deformation position during vibration, indicating that the mast structural design is reasonable, and can meet the actual application requirements; therefor it has some value in engineering application.

Key words: core drill; mast; structural design; static analysis; modal analysis; finite element analysis

随着我国经济规模的不断扩大以及人口的持续增长,对石油、天然气、铁、铜、铬、钾盐等矿产资源的需求急剧增加,地表矿、浅部矿、易识别矿日益减少,重要资源的可采储量显著下降,难以满足现代化建设的需要,社会经济发展与资源环境供给不足的矛盾日益突出。国民经济发展对深部勘探技

术提出了迫切需求。我国的岩心钻探设备仍以20世纪70年代发展起来的立轴式钻机为主,除少数机型钻进能力可达3000 m外,多数机型在2000 m以内。“十一五”期间,国家“863”计划安排了重点项目“2000 m地质岩心钻探关键技术与装备”的研究工作,只能满足2000~2500 m隐伏矿床资源勘探的需

收稿日期:2020-08-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.01.012

基金项目:国家重点研发计划课题“大深度地质钻探技术装备集成及示范”(编号:2018YFC0603401)、“煤层瓦斯赋存参数的地面准确测定技术及装备”(编号:2018YFC0808001)

作者简介:伍晓龙,男,汉族,1987年生,工程师,机械设计制造及其自动化专业,主要从事钻探设备设计制造及国家地质勘探科研项目研发工作,河北省廊坊市金光道77号,wxl1987516@163.com。

引用格式:伍晓龙,刘凡柏.4000 m岩心钻机桅杆结构与有限元分析[J].钻探工程,2021,48(1):88-94.

WU Xiaolong, LIU Fanbai. Structural design and finite element analysis of the 4000m core drill mast[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1):88-94.

要。为给深部地质勘探及岩石圈科学钻探研究提供强有力的支撑,急需开展深孔用成套地质岩心钻探技术及其装备的攻关研究。因此,开展4000 m地质岩心成套技术装备研究,对提升我国的钻探技术水平,满足资源勘探的迫切需求是非常必要的,对于缓解目前资源短缺制约我国经济发展的“瓶颈”、发现新的矿产地、实现资源产业可持续发展具有重大的现实意义。4000 m地质岩心钻机研究内容主要包括:电驱动力头系统、电驱转盘系统、钻具升降系统、岩心打捞系统、钻机给进系统、液压系统、交流变频控制系统、钻进与仪表参数监测及操控系统、钻具机械化拧卸装置、钻柱移排管系统、钻具卡夹机构、钻机底座及桅杆等。本文就4000 m地质岩心钻机桅杆进行设计研究。众所周知,对于任何一款钻机而言,桅杆都是其重要的组成部分,是钻机的主要承重部位^[1-3]。主要用于摆放钻杆、安装天车、起升装置等零部件、承受反扭矩等。受力情况复杂,使用状况恶劣,桅杆的承载能力对井下施工作业有着重要的影响。因此在桅杆的设计过程中要重点对其强度和刚度进行计算,对其进行有限元结构分析,这些都为钻机桅杆的设计、优化及应用提供重要的依据;对其进行模态分析,能够掌握桅杆的固有振动特性与振型,并与桅杆中的振动源频率进行对比,减少共振的发生,提高桅杆的使用寿命^[4]。

1 总体方案设计

4000 m地质岩心钻机是勘探技术所研制的一款新型岩心钻探设备,能够满足多种工况使用,集机电液于一体化,其HQ($\varnothing 89$ mm)口径钻深能力为4000 m,采用顶驱回转系统,能够进行高转速取心钻进。桅杆底部设计有转盘回转系统,可进行大扭矩低转速全面钻进。桅杆设计如图1所示,总体结构为K形,主要由桅杆主体、二层台、梯子、天车以及桅杆附件等组成。其中桅杆主体总高为37425 mm,材质为Q345B工字钢,由七段桅杆短节通过销轴、耳板连接而成,方便拆卸,便于运输,节约场地。其背面采用斜拉梁和横梁布置提高桅杆整体强度,保证其稳定性。桅杆有效高度为33850 mm,使用液压油缸加钢丝绳的倍速机构进行井架的垂直升降,占地面积小,起升效率高,安全性增强。二层台位于距桅杆底部21153 mm处,主要用于摆放钻杆、

钻铤以及为工人提供站立平台进行起下钻作业,在其周围设置有护栏,防止意外情况的发生。桅杆外侧均安装爬梯,方便工作人员到达工作位置。

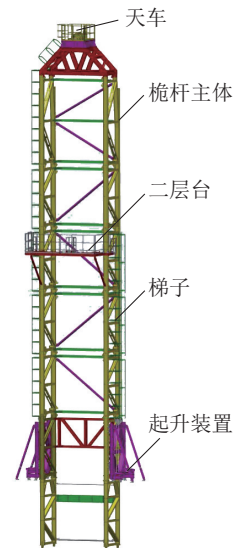


图1 桅杆设计

Fig.1 Mast design

2 工况与载荷分析

桅杆是钻机承载钻具反扭矩、承受钩载和所摆放钻具的重力并确保钻机保持稳定的关键部件,其强度和刚度都会影响整机的稳定性和可靠性^[5-7]。因此,对桅杆进行工况和载荷分析不仅可以检验方案的合理性,也为后续进行ANSYS分析打下基础^[8-10]。钻机桅杆主要有3种工作情况:无风载最大钩载、有风载额定钩载、最大风载。

工况一(无风载最大钩载):在无风载最大钩载工况下,桅杆主要受到最大钩载、桅杆自重、天车自重、二层台自重等载荷,具体载荷如表1所示。

表1 工况一载荷参数

Table 1 Load parameters for Case 1 working condition

项 目	参数/kN
最大钩载	1350
桅杆自重	290
天车自重	15
工作绳载荷	20
二层台自重	18
立根载荷	400

工况二(有风载额定钩载):在有风载额定钩载工况下,桅杆主要受到额定钩载、一定风载、桅杆自重、天车自重、二层台自重等载荷。风载主要是指空气流动时产生的动能作用于桅杆上,风载公式为:

$$F=Wf$$

式中: W ——受到的风压, $W=0.6115V^2K_0K_gK$;
 V ——风速, K_0 ——高度系数; K_g ——形状系数; K ——体型系数^[11]; f ——风载面积。

在额定钩载正常工作时,取风速最大为15.5 m/s。具体载荷如表2所示。

表2 工况二载荷参数

Table 2 Load parameters for Case 2 working condition

项 目	参数/kN
额定钩载	800
桅杆自重	290
天车自重	15
工作绳载荷	20
二层台自重	18
立根载荷	400
最大风载	6

工况三(最大风载):在最大风载工况下,桅杆主要受到最大风载、桅杆自重、天车自重、二层台自重等载荷。在最大风载工况下,风速最大为36 m/s,具体载荷如表3所示。

表3 工况三载荷参数

Table 3 Load parameters for Case 3 working condition

项 目	参数/kN
桅杆自重	290
天车自重	15
工作绳载荷	20
二层台自重	18
立根载荷	400
最大风载	40

3 静力学分析

当分析对象结构比较复杂时,首先要对其结构进行合理的简化,然后再导入ANSYS中进行分析^[12-13]。本文主要是对钻机桅杆进行分析,其零部件较多,因此必须对三维模型进行简化。

(1)销轴的简化处理。桅杆与桅杆连接处使用的是销轴,销轴的尺寸较小,无法划分出高质量网格,并且影响接触的设置。因此将销轴简化为两端封闭的圆柱体,这样能够得到高质量的网格,并且减少接触对的数量。

(2)桅杆附件接触对种类数目较杂,不是本次研究分析的主要对象,因此将其全部忽略,将其重力全部叠加到桅杆的总重力中。

(3)所有零件的工艺性圆角或装饰性圆角均忽略;忽略焊接对结构的影响;非主要受力部位的孔和槽结构忽略不计。

(4)本次分析中主要研究对象是桅杆,各杆件连接均为刚性连接。

简化后的桅杆三维模型如图2所示,导入ANSYS Workbench后,对零件进行了切分,对切分后的body运用Body Sizing和Face Sizing等局部网格控制方法。组中得到网格数46007个,节点数232744个,平均网格质量为0.869,能够满足静力学有限元分析对网格质量的要求^[14],网格划分结果如图3所示。



图2 简化后桅杆三维模型
Fig.2 Simplified 3D model
for the mast

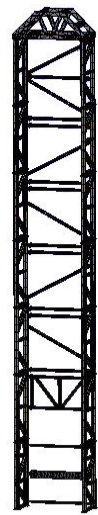


图3 网格划分结果
Fig.3 Meshing results

3.1 无风载最大钩载

在桅杆下端添加固定约束,在桅杆上添加工况一载荷对模型进行求解。

图4所示是桅杆的最大等效应力云图,最大等效应力出现在天车支架与桅杆顶端的连接处,最大

等效应力 ≥ 238.08 MPa;图5所示是桅杆的总变形云图,最大变形出现在天车支架处,最大变形 ≥ 10.8 mm。

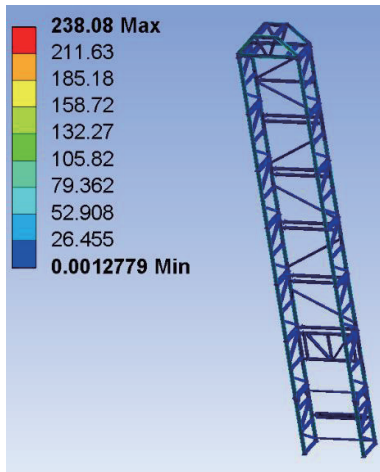


图4 工况一等效应力云图

Fig.4 Equivalent stress nephogram for Case 1 working condition

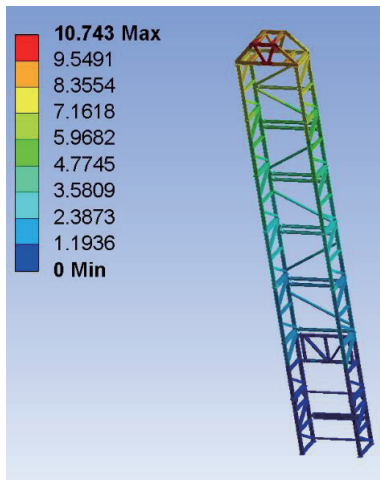


图5 工况一总变形云图

Fig.5 Total deformation nephogram for Case 1 working condition

桅杆材料选用的是Q345钢,其屈服强度为345 MPa,取安全系数1.3,则许用应力为:

$$[\sigma] = \sigma_s / 1.3 = 265 \text{ MPa}$$

静力学分析结果中最大等效应力为238.08 MPa,小于材料的屈服强度265 MPa;最大变形为10.743 mm,与桅杆零部件尺寸相比可忽略,因此可看出桅杆强度和刚度满足要求。

3.2 有风载额定钩载

在桅杆下端添加固定约束,在桅杆上添加工况二载荷对模型进行求解。

图6所示是桅杆的最大等效应力云图,最大等效应力出现在天车支架与桅杆顶端的连接处,最大等效应力 ≥ 179.31 MPa。图7所示是桅杆的总变形云图,最大变形 ≥ 14.1 mm。静力学分析结果中最大等效应力为179.31 MPa,远小于材料的屈服强度265 MPa;最大变形为14.029 mm,与桅杆零部件尺寸相比可忽略,因此可看出桅杆强度和刚度满足要求。

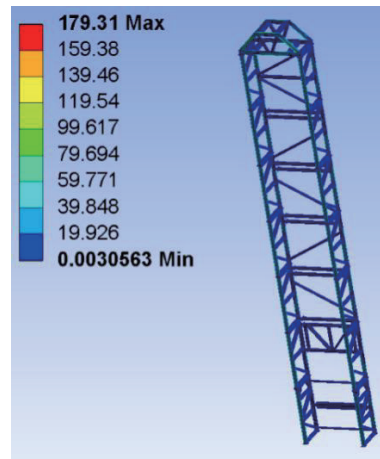


图6 工况二等效应力云图

Fig.6 Equivalent stress nephogram for Case 2 working condition

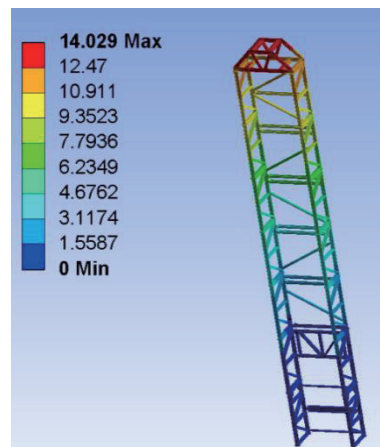


图7 工况二总变形云图

Fig.7 Total deformation nephogram for Case 2 working condition

3.3 最大风载

在桅杆下端添加固定约束,在桅杆上添加工况三载荷对模型进行求解。

图8所示是桅杆的最大等效应力云图,最大等效应力出现在天车支架与桅杆顶端的连接处,最大等效应力 ≥ 226.17 MPa。图9所示是桅杆的总变形云图,最大变形 ≥ 49.33 mm。静力学分析结果中最大等效应力为 226.17 MPa,小于材料的屈服强度 265 MPa;最大变形为 49.325 mm,与桅杆零部件尺寸相比可忽略,因此可看出桅杆强度和刚度满足要求。

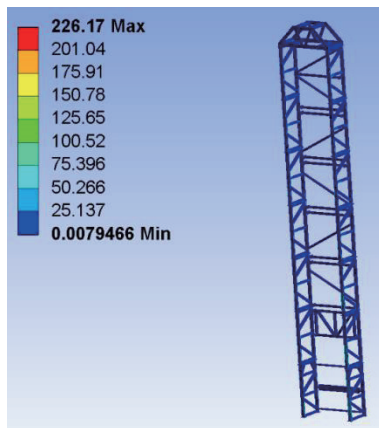


图8 工况三等效应力云图

Fig.8 Equivalent stress nephogram for Case 3 working condition

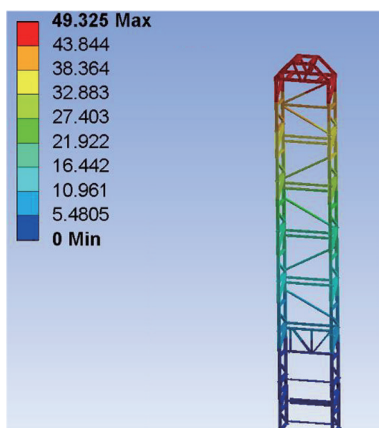


图9 工况三总变形云图

Fig.9 Total deformation nephogram for Case 3 working condition

从3种工况的结果来看,第一种工况在桅杆最大负载运行时,其等效应力最大;第三种工况在风

力最大、无负载不工作的情况下,变形最大,但是都能够符合桅杆的强度和刚度要求。

4 模态分析

模态分析^[15]主要用于进行桅杆的振动测量以及为结构动力学分析提供依据^[14,16],它能够比较精确地测得桅杆的固有频率和振型,从而帮助进行结构优化,使桅杆结构更趋完善和合理。它能够防止桅杆各零部件之间发生共振引起的破坏和噪声问题。

该钻机的动态构件主要为转盘和起升系统,转盘为电机直接驱动,转速在 0~200 r/min 之间,最大频率 ≥ 3.34 Hz;起升系统也为电机直接驱动,滚筒转速为 0~250 r/min,最大频率 ≥ 4.2 Hz。当桅杆在进行模态分析时,桅杆处于静止状态,其固有频率与施加的载荷无关,边界条件为底端固定全约束,得到桅杆前 10 阶固有频率,如表 4 所示。

表4 桅杆前 10 阶固有频率及变形参数

Table 4 The first 10 intrinsic frequencies and deformation parameters of the mast

阶数	频率/Hz
1	1.3768
2	2.6717
3	4.8142
4	6.0659
5	7.2145
6	7.7451
7	8.6539
8	9.6472
9	11.82
10	12.991

对比桅杆固有频率与钻机动态构件的频率,发现桅杆动态构件频率较低,最大频率 ≥ 4.2 Hz,因此具有实际意义的只有前 4 阶桅杆的固有频率与振型,如图 10~13 所示。

第一阶模态振型主要为桅杆进行前后摇摆振动,其主要变形发生在桅杆顶部沿 Y 轴方向,最大变形量为 0.282 mm,没有发生扭转振动;第二阶模态振型主要为桅杆进行左右摇摆振动,其主要变形发生在桅杆顶部沿 Z 轴方向,最大变形量为 0.256 mm,没有发生扭转振动;第三阶模态振型主要为桅

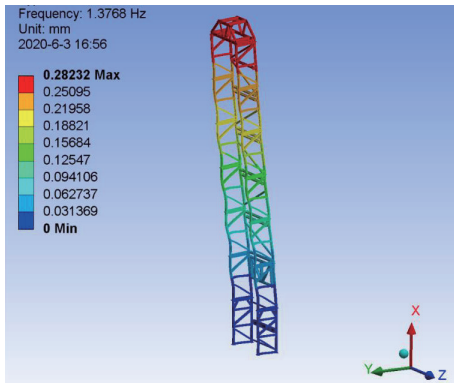


图 10 一阶频率

Fig.10 First-order frequencies

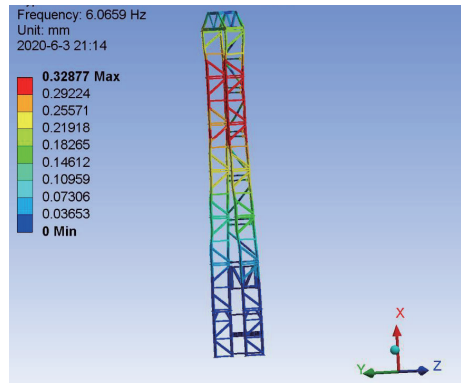


图 13 四阶频率

Fig.13 Fourth-order frequency

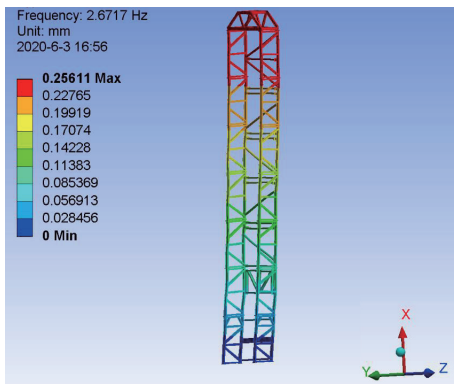


图 11 二阶频率

Fig.11 Second-order frequency

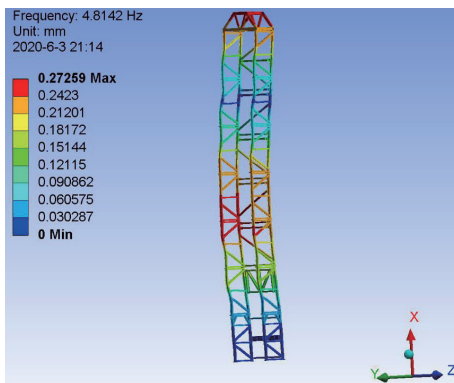


图 12 三阶频率

Fig.12 Third-order frequency

杆进行大幅度的左右摇摆振动以及绕 X 轴进行扭转,其主要变形发生在桅杆顶部沿 Z 轴方向和第三、第四桅杆段,最大变形量为 0.273 mm;第四阶模态振型主要为桅杆进行大幅度绕 X 轴进行扭转,其主要变形发生在第五、第六桅杆段,最大变形量为 0.329 mm。

桅杆转盘和滚筒的频率都在桅杆前三阶固有频率之中,如果它们的频率接近时就有可能发生扰动,出现共振现象,因此在进行驱动转盘和滚筒时要注意转速的调节。在模态振动中,桅杆最大变形量都较小,能够满足设计要求。

5 结语

本文讨论了 4000 m 地质岩心钻机桅杆的设计方案,建立了桅杆的三维模型,对桅杆装配体不同工况下受到的载荷进行了有限元分析,得到了桅杆在不同工况下的受力变形结果;还对其进行了模态分析,得到了桅杆的固有频率。通过与钻机激振源的频率进行对比发现共振主要可能发生在前三节固有频率中,但是其最大变形处变形量较小,能够满足设计要求。通过有限元分析表明该钻机桅杆的强度能够满足实际工作的需要,在工作过程中变形量较小,具有一定的工程应用价值。

参考文献 (References):

[1] 许翠华. 煤层气车载钻机桅杆设计及分析[J]. 能源与环保, 2017, 39(12): 84-87.
 XU Cuihua. Analysis and design on CBM mobile drilling rig's mast[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(12): 84-87.

[2] 满忠伟, 庞玉, 付衍法, 等. 旋挖钻机桅杆结构优化分析[J]. 建筑机械化, 2013(5): 51-53.
 MAN Zhongwei, PANG Yu, FU Yanfa, et al. Structure optimization analysis for mast of rotary drilling rig[J]. Construction Mechanization, 2013(5): 51-53.

[3] 吕晋军. 车载钻机伸缩桅杆的分析与研究[J]. 煤矿机械, 2017, 38(4): 78-80.
 LYU Jinjun. Analysis and research on telescopic mast of truck-

- mounted rig[J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(4):78-80.
- [4] 叶强波. 山地模块化钻机桅杆模态分析[J]. 矿山机械, 2019, 47(2):10-12.
YE Qiangbo. Modal analysis of mast of mountain-used modular drill rig [J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(2):10-12.
- [5] 章伊华, 段铁群, 董庆建. 基于ANSYS的HTQ800型门架式桅杆起重机有限元分析[J]. 煤矿机械, 2012, 33(3):107-109.
ZHANG Yihua, DUAN Tiequn, DONG Qingjian. Analysis of HTQ800 gantry mast crane based on ANSYS [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(3):107-109.
- [6] 秦四成, 姚宗敏. NR22型旋挖钻机桅杆的有限元分析[J]. 工程机械, 2007, 38(12):11-15.
QIN Sicheng, YAO Zongmin. Finite element analysis for mast of model NR22 rotary pile drill [J]. Construction Machinery and Equipment, 2007, 38(12):11-15.
- [7] 张晓丽, 常春影, 杨建强. 大吨位桅杆起重机有限元应用研究[J]. 起重运输机械, 2005(11):9-11.
ZHANG Xiaoli, CHANG Chunying, YANG Jianqiang. Finite element analysis of large tonnage derrick crane [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2005(11):9-11.
- [8] 李文东, 冉恒谦. 2000米全液压岩心钻机桅杆结构有限元分析[J]. 地质装备, 2009, 10(2):17-19.
LI Wendon, RAN Hengqian. Finite analysis for the mast structure of 2000m hydraulic core drilling machines [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2009, 10(2):17-19.
- [9] 孙振军, 刘佳棋. DZF350型履带式地铁隧道钻机桅杆有限元分析[J]. 工程机械, 2019, 50(7):27-32.
SUN Zhenjun, LIU Jiaqi. Finite element analysis of mast of DZF350 crawler subway tunnel drill [J]. Construction Machinery and Equipment, 2019, 50(7):27-32.
- [10] 华剑, 胡磊, 周思柱. 深井钻机K型井架的动力模型设计[J]. 机械设计与制造, 2016(4):149-152.
HUA Jian, HU Lei, ZHOU Sizhu. Dynamic model design of the K-shaped derrick of deep drilling rig [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(4):149-152.
- [11] 刘子厚, 崔鹤田, 马红月, 等. TSJ2000钻机井架风载的有限元分析[J]. 机械工程师, 2014(7):196-197.
LIU Zihou, CUI Hetian, MA Hongyue, et al. FEA of TSJ2000 drilling rig mast on wind load [J]. Mechanical Engineer, 2014(7):196-197.
- [12] 陈新龙, 周思柱, 华剑, 等. 深井钻机井架及底座系统的有限元静力分析[J]. 石油机械, 2013, 41(7):19-21.
CHEN Xinlong, ZHOU Sizhu, HUA Jian, et al. Finite element static analysis of deep-well rig derrick and substructure system [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(7):19-21.
- [13] 陈爱民, 刘锦盛. ZJ30/1700CZ钻机井架设计中有限元分析软件的应用[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(S2):150-151.
CHEN Aimin, LIU Jinsheng. Application of finite element analysis software in derrick design of ZJ30/1700CZ rig [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(S2):150-151.
- [14] 薛继军, 许爱荣, 赵志丽, 等. 钻机井架有限元模态分析[J]. 石油矿场机械, 2001, 30(6):44-46.
XUE Jijun, XU Airong, ZHAO Zhili, et al. The modal analysis of drilling machine derrick [J]. Oil Field Equipment, 2001, 30(6):44-46.
- [15] 张彤, 刘大仲, 张建超, 等. KZ31模块化垂直起升井架模态与谐响应分析[J]. 建筑机械, 2020(6):55-60.
ZHANG Tong, LIU Dazhong, ZHANG Jianchao, et al. Modal and harmonic response analysis of KZ31 modular vertical lifting derrick [J]. Construction Machinery, 2020(6):55-60.
- [16] 王庆群, 华剑, 周思柱, 等. 基于ANSYS的深井钻机底座模态分析[J]. 石油机械, 2013, 41(7):25-27, 37.
WANG Qingqun, HUA Jian, ZHOU Sizhu, et al. ANSYS-based modal analysis of deep-well rig substructure [J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(7):25-27, 37.

(编辑 荐 华)