

# SDC-2500型煤层气车载钻机桅杆支架的模态分析

杜焱森<sup>1</sup>, 师敏<sup>2</sup>, 赵远<sup>1</sup>, 伍晓龙<sup>1</sup>, 高鹏举<sup>1,3</sup>, 汤小仁<sup>1</sup>, 王晓赛<sup>1</sup>  
(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:**煤层气车载钻机桅杆是重要的执行机构, 桅杆支架是桅杆的重要支撑, 其工作振动的稳定性直接决定着桅杆工作的可靠性。采用有限元模态分析方法, 对桅杆支架自由振动状态和预应力状态进行模态模拟分析, 得到此两种状态下固有频率和模态振型数值结果及变化规律, 通过对比分析, 说明二者的结果很相近, 但也存在细微差别, 结果表明预应力对桅杆支架的振动影响很小, 同时验证了桅杆支架不会产生共振, 为支架结构设计提供了支撑, 为拓扑优化设计和更深入的动力学分析提供了理论基础, 具有十分重要的意义。

**关键词:**煤层气车载钻机; 桅杆支架; 模态分析; 固有频率; 模态振型

中图分类号: P634.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2022)02-0051-07

## Modal analysis of the mast support frame of SDC-2500 coal bed methane truck-mounted rig

DU Yaosen<sup>1</sup>, SHI Min<sup>2</sup>, ZHAO Yuan<sup>1</sup>, WU Xiaolong<sup>1</sup>, GAO Pengju<sup>1,3</sup>, TANG Xiaoren<sup>1</sup>, WANG Xiaosai<sup>1</sup>  
(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:** The mast of coal bed methane truck-mounted rig is an important executive device, while the mast support frame is significant for supporting the mast, and its vibration stability determines the reliability of the mast. The finite element modal method is used to analyze the support frame under both the free vibration state and the prestressed state, and the numerical results and the change rule of the natural frequency and the modal shape are attained for the two states. Comparative analysis shows that the results for the two state are close but with slight difference, indicating that prestress is of little impact on vibration. At the same time, it is verified that the mast support frame will not generate resonance. Moreover, the modal results provide a theoretical support for the structural design of the frame, and a theoretical basis for topology design and in-depth dynamic analysis with crucial significance.

**Key words:** coalbed methane truck-mounted rig; mast support frame; modal analysis; natural frequency; modal vibration

## 0 引言

煤层气车载钻机具有机动性好、施工效率高的特点, 在煤层气抽采井中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。桅杆是煤层气车载钻机的主要执行机构, 桅杆支架是桅杆的重要支撑, 对桅杆工作的稳定性和可靠性具有重要的影响<sup>[4-5]</sup>。由于外界激励形式复杂, 桅杆支

架同时受到自身重力、支撑油缸作用力及动力头反作用力等激励作用, 当激励频率与桅杆支架固有频率接近时, 就会产生共振, 造成桅杆支架结构破坏<sup>[6-10]</sup>。由于桅杆支架结构复杂, 因此采用有限元法进行模态分析, 确定其固有频率和模态振型, 为支架的结构设计提供理论支撑, 具有十分重要的指

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2022-03-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.02.007

第一作者: 杜焱森, 男, 汉族, 1986年生, 工程师, 地质机械、仪器专业, 长期从事地质机械设计研发和钻井技术研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, yaosendu@126.com。

引用格式: 杜焱森, 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.

导意义。

## 1 桅杆支架结构

SDC-2500型煤层气车载钻机如图1所示。



图1 SDC-2500型煤层气车载钻机

Fig.1 SDC-2500 coal bed methane truck-mounted rig

该钻机的主要技术参数如表1所示。该钻机的主要特点为:一是具有双重动力,即底盘车发动机和车装发动机,可根据钻井需要切换不同的动力;二是采用PLC控制系统,实现全液压钻进,自动化装卸钻具,降低工人劳动强度;三是具有大行程的给进系统,单次能够起下多根钻杆,提高工作效率,动力头加压回转功能能够有效解卡钻具,提高处理事故的能力。

表1 主要技术参数

Table 1 Main technical parameters

技术指标	参数	
钻进能力	2500 m	
动力头	转速	0~210 r/min
	最大扭矩	29000 N·m@80 r/min
	行程	15.3 m
给进系统	最大提升力	1140 kN
	最大给进力	226 kN
卷扬	主卷单绳拉力	40 kN
	副卷单绳拉力	20 kN
	提升速度	0~60 m/min
桅杆高度	16 m	

桅杆系统是钻机给进系统的重要部件组合。如图2所示,桅杆系统主要由两部分组成,即桅杆支架和移动桅杆。桅杆支架的结构如图3所示。桅杆支架的主体结构即立梁和横梁均采用箱型截面形状,

钻机正常工作时,桅杆支架与地面保持垂直状态,移动桅杆在桅杆支架内上下移动实现给进功能,支架滑轨通过滑移架与车底盘尾部铰支连接,支架底部通过支腿油缸作用于地面,承担整体重力。

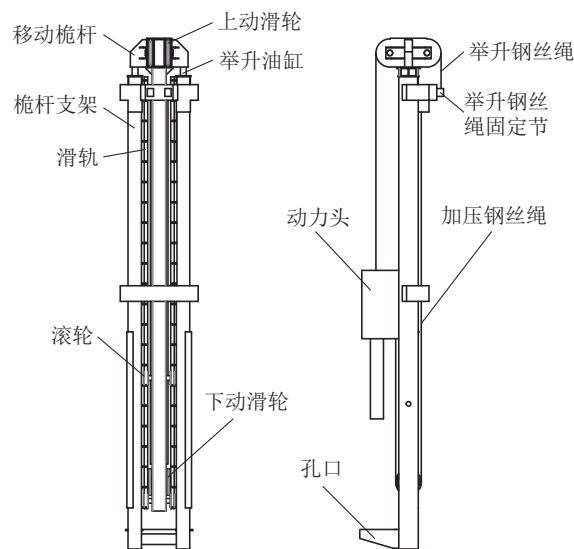


图2 桅杆系统结构

Fig.2 Mast structure

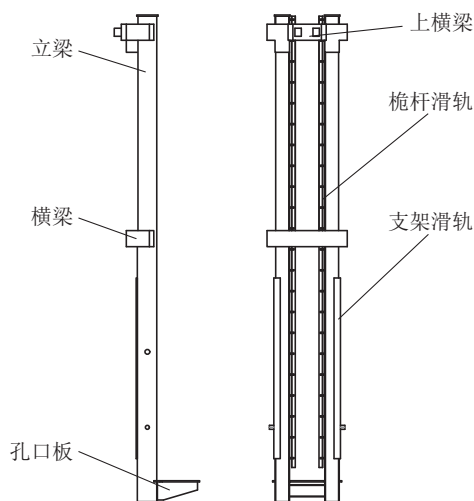


图3 桅杆支架结构

Fig.3 Mast support frame

## 2 模态理论

模态是机械结构振动的固有特性,每一阶模态都有其特定的固有频率、阻尼和模态振型。桅杆支架结构可以简化为质量、刚度和阻尼离散分布的多自由度线性系统,通过将惯性力引入到所研究的运动系统中,建立桅杆支架的平衡方程<sup>[11-13]</sup>:

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

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； $P(t)$ ——外力函数矢量； $N$ ——非线性外力项矢量； $Q$ ——边界约束反作用力矢量。

当忽略阻尼及外部载荷时，即自由振动系统的平衡方程可简化为：

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

### 3 桅杆支架自由振动模态分析

桅杆支架整体采用 Q345 低合金钢，其材料性能参数如表 2 所示。

表 2 材料性能参数

Table 2 Properties of the material

参 数	数值
弹性模量/GPa	206
泊松比	0.3
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7850
屈服极限/MPa	345

桅杆支架的有限元模型如图 4 所示。采用四面体单元进行自由网格划分，网格单元数为 47902，网格节点数为 91494。根据模态分析理论和桅杆支架的工作原理对支架底部施加 Z 方向的位移约束，对支架滑轨施加 X 和 Y 方向的位移约束。

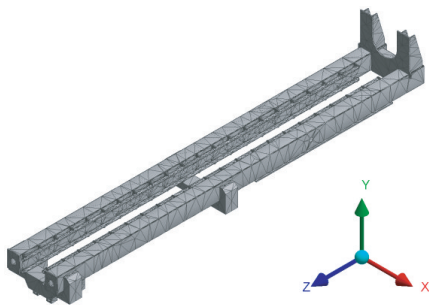


图 4 桅杆支架有限元模型

Fig.4 Finite element model of the mast support frame

根据模态理论可知，低阶频率振幅大，对结构的刚度影响较大；一般载荷频率很低，分析与载荷接近的低阶模态更具有实际意义，通常前 6 阶固有频率即可满足要求。提取桅杆支架前 6 阶模态进行分析，得到其固有频率及振幅如表 3 所示，桅杆支架前

6 阶模态振型如图 5 所示。

表 3 自由振动前 6 阶固有频率及振幅  
Table 3 The first six natural frequencies and amplitudes of free vibration

阶数	固有频率/Hz	振幅/mm
1	8.8401	0.9602
2	12.002	0.9173
3	31.703	1.2636
4	57.141	0.9771
5	62.662	1.1091
6	67.216	1.0647

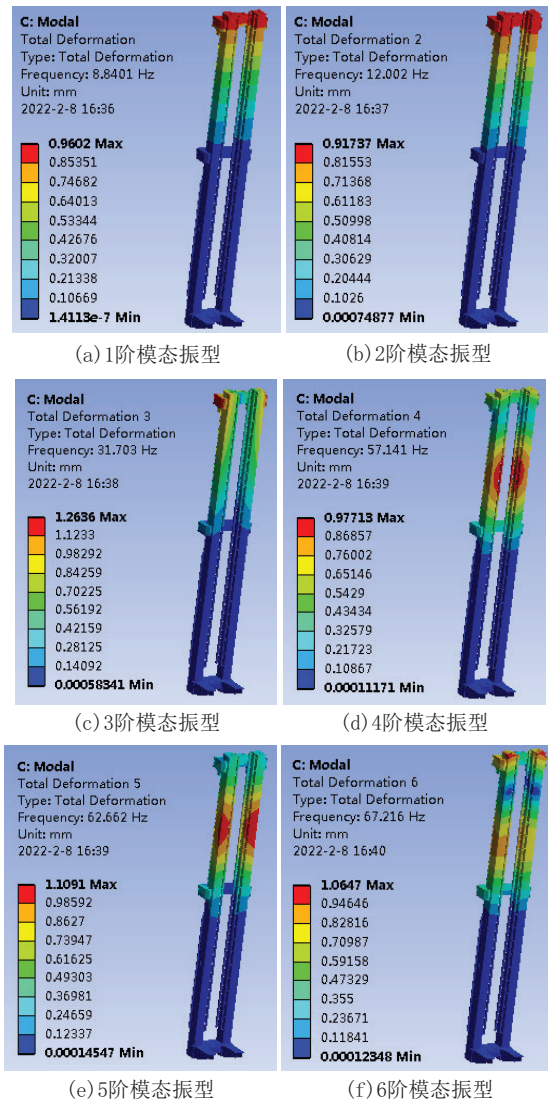


图 5 自由振动前 6 阶模态振型

Fig.5 Modal shapes of the first six natural frequencies

由表2和图5可知,桅杆支架的最小固有频率为8.8401 Hz,最大固有频率为67.216 Hz,并随着模态阶数增加而增大。1阶和2阶振型表现为支架前后摆动(图示方向为前),最大振幅位置出现在支架顶部,分别为0.9602 mm和0.91737 mm;3阶振型表现为支架上半部分左右扭摆,各阶模态中振幅最大,为1.2636 mm,出现在支架顶部横梁;4阶振型表现为支架立梁上部向前和后对称摆动,最大振幅位置出现在图中红色区域部分,为0.97713 mm;5阶振型表现为左右2立梁上半部分左右对称摆动,最大振幅位置出现在图中红色区域位置,为1.1092 mm;6阶模态振型表现为左右2立梁上半部分同时左右摆动,且最大振幅位置出现在左立梁红色区域位置,最大振幅为1.0647 mm。各阶振型位移差距不大,且位移值很小,桅杆支架相对稳定。

#### 4 桅杆支架预应力模态分析

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<sup>[14]</sup>。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支架的分析,即极限工况。由于结构和受力的对称性,桅杆支架的受力分析可简化为平面问题。图6为桅杆支架的载荷示意图,支架所受垂直方向的载荷有提升反力 $T$ 、重力 $G_1$ 、水平方向主要为风载荷 $P$ 以及动力头的反扭矩 $M$ 。其中提升反力 $T$ 包括动力头、钻杆、钻具等的重力以及井壁的摩阻力和真空负压力等产生的提升阻力。 $F_1$ 为支撑油缸对支架的作用力; $\alpha$ 为拉伸钢丝绳与垂直方向的夹角; $\beta$ 为支撑油缸与垂直方向的夹角<sup>[15-16]</sup>。

以桅杆支架为研究对象,其受力平衡方程为:

$$T_1 \sin \alpha - PS - F_1 \sin \beta = 0 \quad (3)$$

$$F_1 \cos \beta - T_1 \cos \alpha + T + F_N - G_1 = 0 \quad (4)$$

$$F_N a - M - Te - G_1 a - PSd + T_1 \sin \alpha d + T_1 \cos \alpha b = 0 \quad (5)$$

式中: $S$ ——风载荷作用的面积; $F_N$ ——支腿对支架的支反力; $a$ ——支架的重心到支撑油缸铰支点的水平距离; $b$ ——风载荷作用点和拉伸钢丝绳拉伸点到支撑油缸铰支点的水平距离; $e$ ——举升钢丝绳固定端与支撑油缸铰支点的水平距离; $d$ ——风载荷作用点和拉伸钢丝绳拉伸点到支撑油缸铰支点的竖直距离。

动力头最大扭矩为29 kN·m,风载荷取风压

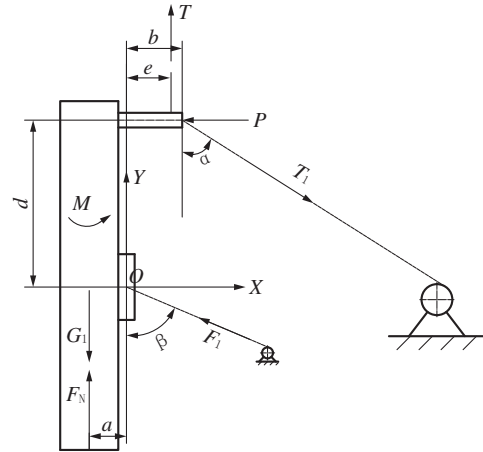


图6 桅杆支架受力分析模型

Fig.6 Mechanical model of the mast support frame

250 Pa,支架顶部承受的拉力载荷为1140 kN。首先对桅杆支架进行静力分析,进而开展预应力下的模态分析。提取支架前6阶模态的固有频率及振幅如表4所示,提取支架的前6阶模态振型如图7所示。

表4 预应力前6阶固有频率及振幅

Table 4 The first six natural frequencies and amplitudes for the prestressed state

阶数	固有频率/Hz	振幅/mm
1	9.069	0.9591
2	12.149	0.9191
3	31.738	1.2656
4	57.334	0.9801
5	62.773	1.1086
6	67.398	1.0633

由表4和图7可知,桅杆支架的最小固有频率为9.069 Hz,最大固有频率为67.398 Hz,并随着模态阶数增加而增大。1阶和2阶振型表现为支架前后摆动(图示方向为前),最大振幅位置出现在支架顶部,分别为0.95914 mm和0.91911 mm;3阶振型表现为支架上半部分左右扭摆,各阶模态中振幅最大,为1.2656 mm,出现在支架顶部横梁;4阶振型表现为支架立梁上部向前和后对称摆动,最大振幅位置出现在图中红色区域部分,为0.98013 mm;5阶振型表现为左右2立梁上半部分左右对称摆动,最大振幅位置出现在图中红色区域位置,为1.1086 mm;6阶模态振型表现为左右2立梁上半部分同时左右摆动,且最大振幅位置出现在左立梁红色区域位置,最

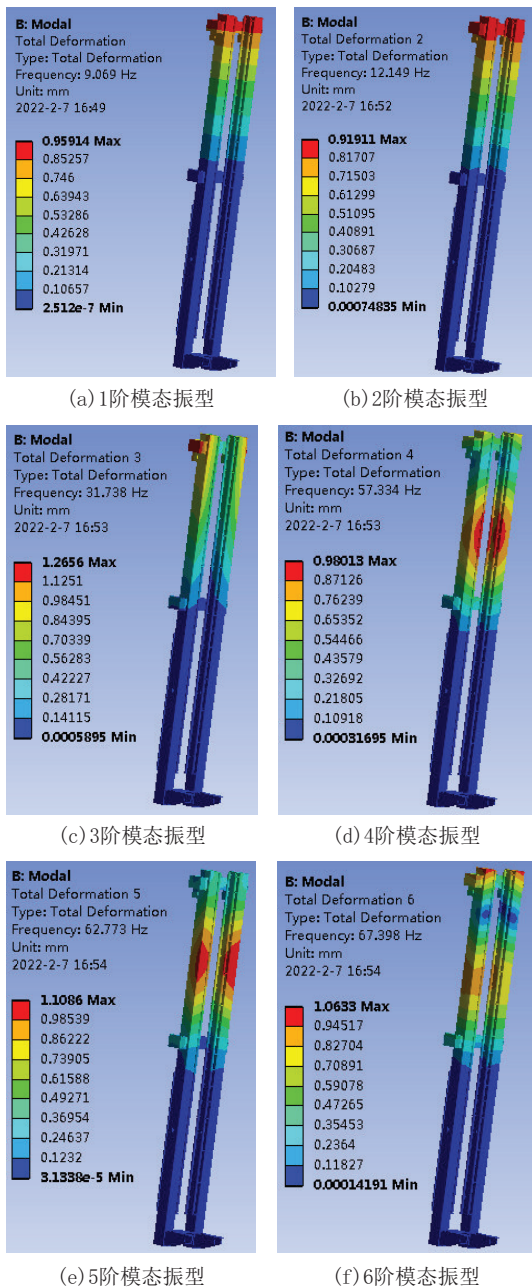


图 7 预应力前 6 阶模态振型

Fig.7 Modal shapes of the first six modal shapes for the prestressed state

大振幅为 1.0633 mm。各阶振型位移差距不大,且位移值很小,桅杆支架相对稳定。桅杆支架预应力状态下的前 6 阶固有频率和振型位移很接近,且自由振动和预应力状态下的模态振型变化一致。

### 5 模态对比分析

由图 8 可知桅杆支架自由振动和预应力下的

1~6 阶固有频率变化一致,且均随阶数的增加而增大,两条变化曲线接近重合,表明 2 种状态下的各阶固有频率值接近相等;由图 9 可知桅杆支架自由振动和预应力下的 1~6 阶振型变化一致,各阶振幅值较为接近,2 阶振幅值最小,3 阶振幅值最大。2 种状态下桅杆支架的模态分析结果差别不大,说明桅杆支架受到应力刚化影响较小。

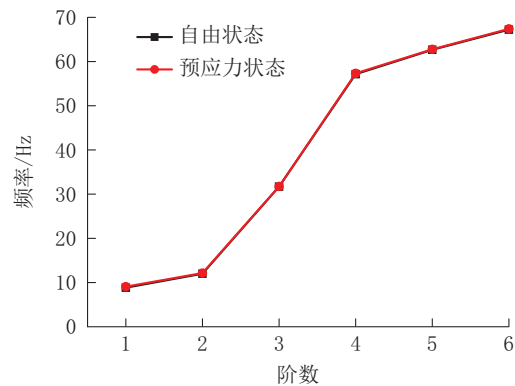


图 8 固有频率变化趋势对比

Fig.8 Comparison of natural frequency trends between the two states

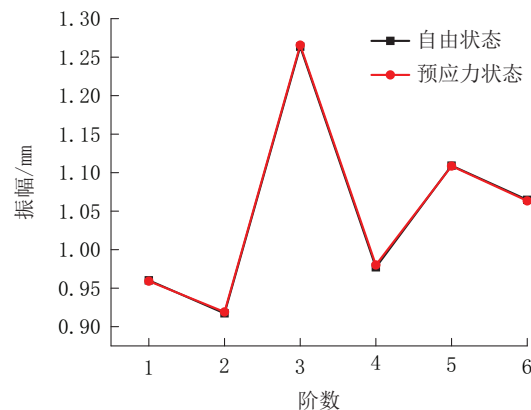


图 9 振幅变化趋势对比

Fig.9 Comparison of the amplitude trends for the two states

桅杆支架自由振动和预应力 2 种状态下模态分析结果差别较小,但是也存在细微的差别。如图 10、图 11 所示,预应力状态下 1~6 阶固有频率稍大于自由状态下的固有频率,预应力状态下 2、3 和 4 阶振幅稍大于自由状态下的振幅,1、5 和 6 阶振幅偏小。这是由于在预应力作用下,支架结构受到应力刚化轻微影响,频率会有所升高,振幅也会产生细微变化。

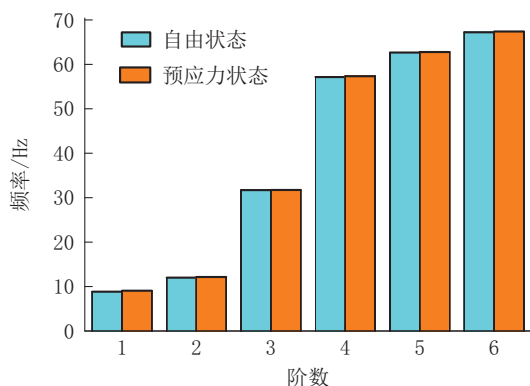


图 10 固有频率大小对比

Fig.10 Comparison of the natural frequency values between the two states

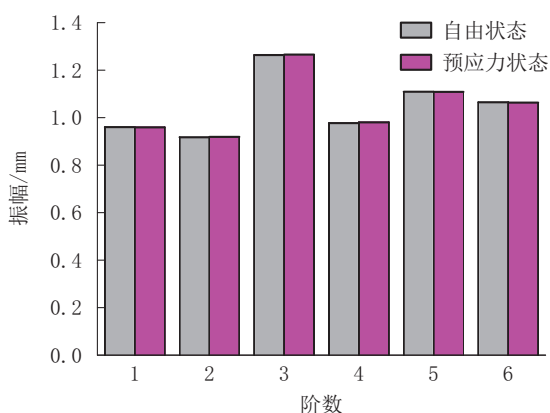


图 11 振幅大小对比

Fig.11 Comparison of the amplitude values between the two states

桅杆支架的激振源主要为动力头的起动和停转时的摆动、怠速运转时的抖动以及高速运转时的振动,而动力头的振动决定了其激振力的激振频率,SDC-2500型煤层气车载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,小于桅杆支架的最小固有频率8.8401 Hz,表明桅杆支架不会发生共振现象,结构设计较为合理。此外,SDC-2500型车载钻机已完成多口井的钻井施工,在实际应用中桅杆系统工作稳定可靠,实践证明了桅杆支架结构设计的合理性。

## 6 结语

(1)本文以SDC-2500型煤层气车载钻机桅杆支架为研究对象,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,明确了固有频率的变化趋势和模态振型变形趋势。

(2)通过对比分析2种状态下模态分析结果,得出自由振动状态和预应力状态下的固有频率和模态振型十分接近,表明预应力对桅杆支架的振动影响很小,由于应力刚化效应的影响,2种模态分析结果也存在细微的差别。

(3)通过对桅杆支架的模态分析,既验证了其结构的合理性,为支架的结构设计提供了理论支撑,同时也为支架的拓扑优化设计和更深入的动力学分析提供了理论基础,具有十分重要的意义。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘祺.煤层气车载钻机给进装置强度分析[J].中州煤炭,2016(7):106-109.  
LIU Qi. Strength analysis on feeding device for CBM truck-mounted rig[J]. Zhongzhou Coal, 2016(7):106-109.
- [5] Dong Fan. Design of feeding device for coal bed methane truck-mounted drilling rig[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019,384:012103.
- [6] 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.
- [7] 朱桂英,李浩伟,孙振军,等.反循环钻机伸缩桅杆结构模态分析[J].煤矿机械,2021,42(4):84-87.  
ZHU Guiying, LI Haowei, SUN Zhenjun, et al. Modal analysis

- of telescopic mast structure of reverse circulation drilling rig[J]. Coal Mine Machinery, 2021,42(4):84-87.
- [8] 王林军,王钺,杜义贤,等.基于ANSYS-Workbench的液压机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.
- [9] 陈忠山,乔红兵,林尚.基于ANSYS的钻架模态分析及拓扑优化[J].煤矿机械,2022,43(1):170-172.  
CHEN Zhongshan, QIAO Hongbing, LIN Shang. Modal analysis and topology optimization of drilling frame based on ANSYS [J]. Coal Mine Machinery, 2022,43(1):170-172.
- [10] 马鑫,周云耀,吕永清,等.基于ANSYS Workbench的煤层气车载钻架分析与优化[J].煤炭技术,2017,36(10):195-198.  
MA Xin, ZHOU Yunyao, LÜ Yongqing, et al. Analysis and optimization of drilling frame in coal bed methane truck-mounted rig based on ANSYS Workbench [J]. Coal Technology, 2017,36(10):195-198.
- [11] 夏元杰,段红建,陈立学,等.车载升降桅杆模态分析及试验测试[J].机械与电子,2010(10):73-76.  
XIA Yuanjie, DUAN Hongjian, CHEN Lixue, et al. Modal analysis and testing of a vehicle-mounted lifting mast[J]. Machinery & Electronics, 2010(10):73-76.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 杜焱森,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.
- [15] 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.
- [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.

(编辑 荐华)