

K 型石油钻机井架瞬态研究

李万昊¹, 段国林¹, 许红静¹, 马红月², 张西坤²

(1. 河北工业大学机械工程学院, 天津 300130; 2. 河北建勘钻探设备有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘要:根据钻机井架实际工作情况建立井架振动模型,通过测试实验得到动态载荷,应用 ANSYS 软件对 K 型钻机井架进行瞬态响应分析。研究表明:在动载荷作用下,钻机井架各部分变化具有同时性,而达到最大值的时刻不同,说明井架响应具有滞后性;井架以上下振动为主,同时具有一定程度的扭振;位移变化主要发生在井架顶部,而扭转振幅从顶端向下逐渐减弱;最大振动位移、最大弯矩、最大应力分别为 108.33 mm, 80990.8 N·m、-0.16354E+09 Pa,均满足设计要求。在瞬态振动过程中,振动衰减最快的是扭转,而 X 向、Y 向、Z 向振动位移中 X 向衰减最快,这与实际情况一致。因此,运用实际动载荷对井架进行瞬态分析为井架结构设计以及安全评估提供了参考依据。

关键词:石油井架;振动模型;载荷工况;瞬态响应;ANSYS

中图分类号:P634.3⁺4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)08-0048-05

Study on Transient Response of K-type Oil Drilling Rig Derrick/Li Wan-hao¹, DUAN Guo-lin¹, XU Hong-jing¹, MA Hong-yue², ZHANG Xi-kun² (1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Hebei Jiankan Drilling Equipment Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050031, China)

Abstract: According to the actual working conditions, the rig derrick vibration model is established and the dynamic load is obtained by testing experiments. Transient response analysis is made on K-type drilling rig derrick with ANSYS software, the results indicate that the variation of each part of the rig derrick has the character of simultaneity under the effect of dynamic load, yet the moments to achieve maximum value is different, which shows the lag of derrick response. The derrick is mainly on up-down vibration with a certain degree of torsion vibration. Displacement occurs mainly on the top of the derrick, while the torsion amplitude decreases gradually from top to bottom. The largest vibration displacement 108.33mm, the maximum bending moment 80990.8N·m and the maximum stress -0.16354E+09Pa satisfy the design requirements respectively. In the process of the transient vibration, torsion vibration attenuation is rapid; while X direction decay is the fastest among X, Y and Z directions, which is consistent with the actual situation. Therefore, the transient analysis on derrick by using the actual dynamic load provides reference basis for the derrick structure design and safety assessment.

Key words: oil derrick; vibration model; load cases; transient response; ANSYS

0 引言

该 K 型石油钻机井架是河北建勘钻探设备有限公司最新研制成功的新型产品,其具有承载能力强、性能好、单位承载负荷质量小等优点,近几年来在国内得到广泛投入应用。钻机井架是石油钻机系统中最重要的组成部位,井架结构所承受的载荷只有自身重量为静载荷,其它载荷都是动载荷^[1-3],而该公司在对石油井架结构设计时对动载荷的处理是最大钩载乘以安全系数来代替动载荷做静力分析,

为了结构安全可靠总是尽量加大安全系数,这种传统的结构设计方法往往导致设计成本增加,结构重量增大以及结构设计不合理等。同时在整个钻机井架结构设计过程中,该公司采用经验与静力分析相结合的方法而对动态研究甚少。随着市场对该钻机井架的需求量增大,如何提高该钻机井架承载能力,达到使用可靠、设计合理、成本经济等成为本公司的关注焦点。因此,运用实际动载荷对石油钻机井架结构进行瞬态研究,能使井架结构设计以及安全评

收稿日期:2016-02-19; 修回日期:2016-05-19

基金项目:河北省自然科学基金项目“基于 EXPRESS 的企业核心能力建模方法研究”(编号:F2014202241);石家庄市科学技术局项目“石油钻机关键零部件有限元分析及优化设计”(编号:151080381A)

作者简介:李万昊,男,汉族,1987 年生,硕士研究生,研究方向为制造业信息化,天津市红桥区丁字沽一号路 8 号河北工业大学北院,412753127@qq.com。

通讯作者:段国林,男,1963 年生,教授,博士生导师,glduan@hebut.edu.cn。

估更合理、更准确。

1 振动模型

对钻机井架进行瞬态响应研究必须建立描述系统动态特性的振动模型。钻机井架的游动系统主要包括天车、游车、钢丝绳和大钩等,在保证钻机井架受载最小和符合起升机组配给功率的情况下顺利完成起下钻、下套管等作业,运用弹性体理论^[3-4]研究钻机井架在工作中的瞬态特性,将钻机井架的天车轮与钢丝绳的接触视为固定接触,且将钢丝绳视为含有等效刚度及粘性阻尼的弹簧,钩载视为集中质量块,建立“井架-钢丝绳-大钩”的振动模型系统,即图 1 所示的 $K-M-C$ 振动模型系统^[3]。

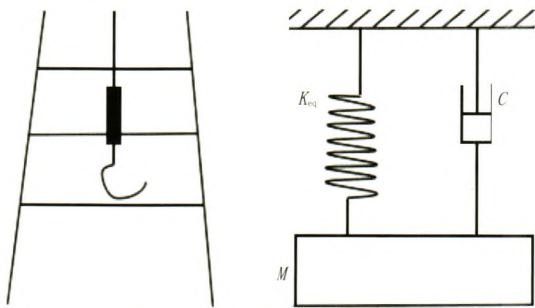


图 1 井架 $K-M-C$ 动力模型

2 井架有限元模型

实际钻机井架的结构非常复杂,迄今不能按实际钻机井架结构建立有限元模型^[5-7]。该文将天车、工作梯等设备在建模时全部忽略,但天车比较重,在建模时将其重力集中平均加到井架顶端相应的节点上,各段及其它杆件之间视为刚性连接,销轴连接部分上下距离平均分配到相邻各节点上,井架与底座接触为全约束。本文中的钻机井架结构采用 Q345 钢(由美国 API_4F 标准可知钻机井架安全系数是 1.67,井架结构许用应力: $[d] = 345/1.67 = 206.6 \text{ MPa}$),材料弹性模量是 $2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比是 0.3,材料密度是 7850 kg/m^3 ,采用 Beam188 单元。该钻机井架整体结构总共五段,各段主要由杆件组成,因此,为了提高计算速度以及保证计算准确性,网格划分根据其结构特性选择适当的参数将其划分为 144 个节点,273 个单元。根据该钻机井架 CAD 图纸运用 ANSYS 建立 1:1 的有限元模型及井架节点号如图 2、图 3 所示。

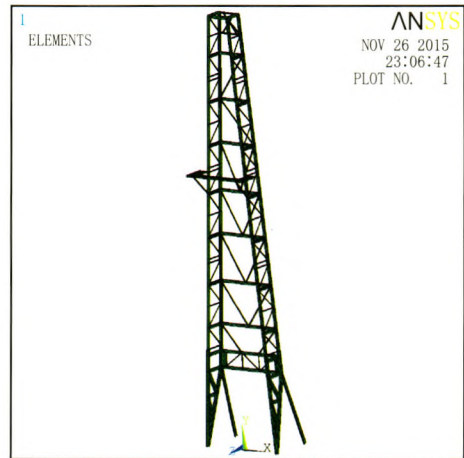


图 2 有限元模型

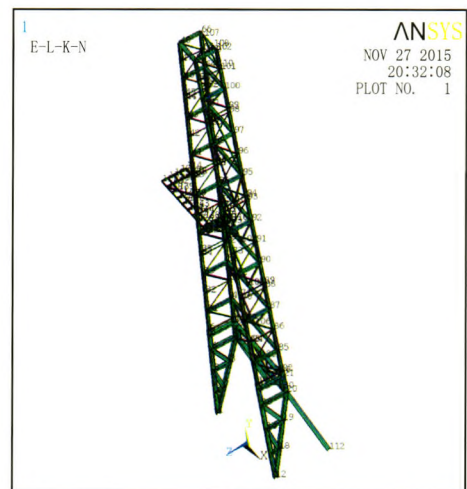


图 3 井架节点号

3 瞬态动力学分析

3.1 理论基础

钻机井架结构动态响应的基本运动方程^[8]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——分别为井架的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ ——节点的加速度向量; $\{\dot{u}\}$ ——节点的速度向量; $\{u\}$ ——节点的位移向量; $\{P(t)\}$ ——节点的外加载荷向量。

其中,阻尼矩阵 $[C]$ 可用瑞利阻尼系数 α 和 β 乘以质量矩阵和刚度矩阵来计算,即:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{4\pi f_1 f_2 \zeta}{f_1 + f_2} \\ \beta = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} = \frac{\zeta}{\pi(f_1 + f_2)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: α ——质量阻尼系数; ζ ——阻尼系数^[9],取

0.02;(由模态分析结果可知) f_1 ——1阶固有频率(0.94637 Hz); f_2 ——2阶固有频率(1.2515 Hz); β ——刚度阻尼系数。

则: $\alpha=0.13543, \beta=0.00290$ 。

3.2 计算精度与时间步长

通过计算精度来选取时间步长,就是在满足计算精度的条件下,采用最大的时间步长 Δt ,其目的为节省计算时间。由配套钻机转速可知,对井架结构的振动问题,通常只激发低阶振型。使用 Newmark^[10]方法进行井架结构动态分析^[11-13]时,其时间步长 Δt 与结构的最高固有频率 $f_{\max}$ 满足下式^[4]:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{\max}} \quad (4)$$

由K型钻机井架的模态分析可知最高固有频率为8.4946 Hz。该钻机井架的时间步长:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{\max}} = \frac{1}{20 \times 8.4946} = 0.00589 \text{ s} \quad (5)$$

3.3 载荷加载

研究井架瞬态响应是通过施加集中力的方式,即将载荷均匀施加到井架顶部的四个节点上,施加过程如图4^[4]。该过程表明了大钩起升时的试验加载时间历程在ANSYS中的程序解算,将该时间历程施加于井架顶端节点以计算井架瞬时冲击下的响应。

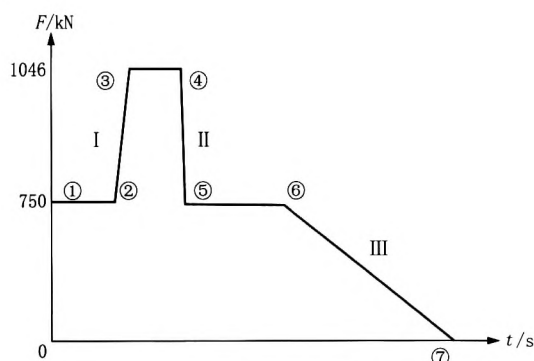


图4 载荷-时间关系曲线

①~②阶段:0~0.31 s 石油钻机井架承受750 kN的恒定载荷;②~③阶段:0.31~0.32 s 载荷以坡的方式加载至1046 kN;③~④阶段:0.32~0.328 s 为井架的恒定激励载荷;④~⑤阶段:0.328~0.33 s 载荷以阶跃的方式降至750 kN;⑤~⑥阶段:0.33~2 s 井架承受750 kN 恒定载荷;⑥~⑦阶段:2~5 s 载荷以坡的方式递减直至卸载为零。

3.4 结果分析

动态响应分析的结果数据均为时间函数,通过选取普通后处理器(post1)或时间历程后处理器(post26)中适当的输出选项观察其结果。图5是 $t=0.31805 \text{ s}$ 和 $t=32394 \text{ s}$ 的位移图,根据石油井架实际情况可知石油井架受冲击载荷最严重的部位是井架顶端,因此该文只提取了顶端节点的时间响应曲线,图6是节点48(井架顶点)时间响应曲线,表1是井架瞬态振动位移响应,表2是最大弯矩与最大应力。

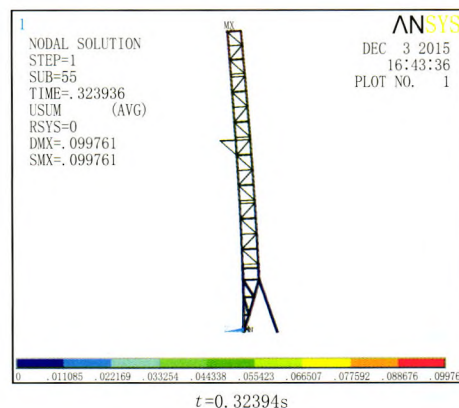
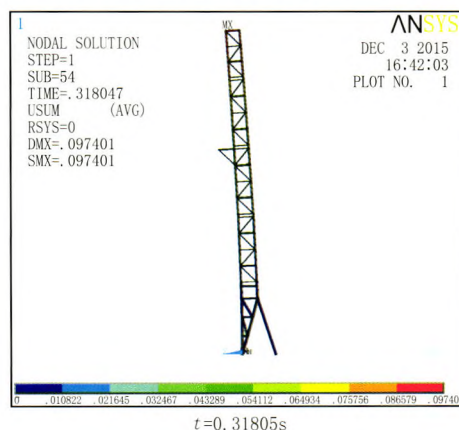


图5 位移图

通过分析可知,在动态响应过程中,石油钻机井架主要是上下振动,同时具有一定程度的扭振。钻机井架最大振动位移(108.33 mm/0.40050 s)发生在石油井架顶端节点84处,最大弯矩(80990.8 N·m/0.33571 s)发生在石油井架一段与人字架相接触(单元10)处,最大应力($-0.16354E+09 \text{ Pa}/0.33571 \text{ s}$)发生在石油钻机井架一段的主干(单元1)处,这与实际情况一致。

钻机井架的多数位移响应的峰值出现在恒定载荷段,而出现峰值的时刻不同,说明井架瞬态响应具有滞后性。X向(井架侧向)在0.32983 s达到最大值2.6182 mm滞后0.00183 s,Y向(立柱轴向)在0.32983 s达到最大值27.762 mm滞后0.00183 s,Z向(前开口

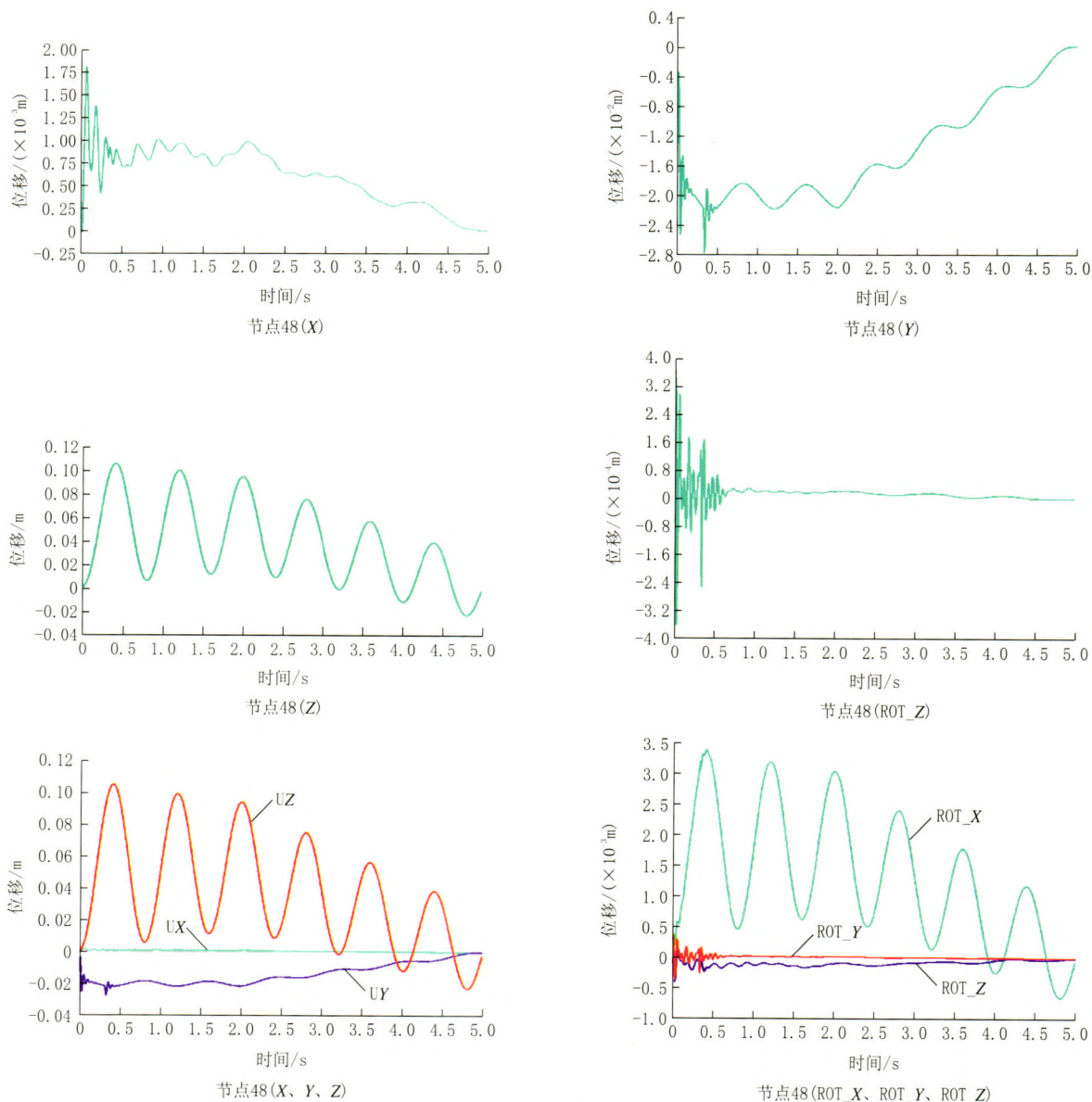


图 6 节点 48 时间响应曲线

方向)在 0.40639 s 达到最大值 106.21 mm,滞后 0.07839 s,ROT_X 在 0.40639 s 达到最大值 3.4902 mm,滞后 0.07839 s,ROT_Y 在 0.34749 s 达到最大值 2.9948 mm 滞后 0.01949 s,ROT_Z 在 0.38283 s 达到最大值 2.0546 mm 滞后 0.05483 s。

在瞬态响应过程中,井架在 x 、 y 向主要为受压,在 z 向主要为二阶弯曲;振动衰减最快的是扭振,而 x 向、 y 向、 z 向振动位移中 x 向衰减最快,这与实际情况一致。通过观察位移表及响应曲线可知钻机井架所受的载荷从 0.328 s 开始卸载,开始时不同方向衰减程度不同,而 2 s 后响应曲线急剧衰减,3.9993 s 时 x 位移衰减至最小值,4.4999 s 时 y 位移衰减至最小值,4.7120 s 时 z 位移衰减至最小值。

4 结论

通过石油钻机井架的动态响应研究可知:(1)井架所承受的最大位移、最大弯矩、最大应力都在合理的范围之内,满足井架结构设计要求。(2)井架上部变化较大,下部变化较小,在一定的时间间隔内振动位移具有一定的波动性,不同时间间隔,具有不同的波动幅值;钻机井架各部分变化具有同时性,而达到最大值的时刻不同,说明井架响应具有滞后性,与实际情况一致。(3)在动态响应过程中,响应最为强烈是井架顶部 Z 方向,其最大位移是 108.33 mm,因此对井架在 Z 向应加强抗弯刚度,同时减少正常工作时井架的冲击荷载以及保持平稳操作提升钻具,减少危险冲击的人为因素。(4)在动态振动

表 1 井架瞬态振动位移响应

T/ s	振动位移/mm							
	UX	UY	UZ	USUM	ROT_X	ROT_Y	ROT_Z	RSUM
0.10012	-1.9191	-17.909	15.814	23.832	1.2065	-2.6740	-2.4383	2.7195
0.30038	-2.0623	-21.413	89.186	91.674	2.9906	0.60144	0.83739	3.1059
0.30627	-2.0569	-21.471	90.853	93.307	3.0398	0.63144	0.83725	3.1532
0.31216	-2.0713	-21.807	92.464	94.955	3.0908	0.63249	0.92064	3.2253
0.31805	-2.2004	-23.294	94.088	96.891	3.1754	0.59880	1.1912	3.3918
0.32394	-2.4753	-26.086	95.775	99.224	3.3198	0.70857	1.2953	3.5559
0.32983	-2.6182	-27.762	97.331	101.18	3.4023	-1.0199	1.2547	3.4627
0.33571	-2.4053	-26.700	98.574	102.11	3.3233	1.0032	1.2879	3.5306
0.34160	-2.1022	-24.250	99.608	102.51	3.3115	-1.7078	1.3846	3.4406
0.34749	-1.9677	-23.360	100.57	102.85	3.3739	-2.9948	-1.4237	4.3129
0.35338	-1.8532	-22.346	101.48	103.34	3.3537	-2.4831	-1.7482	3.9467
0.35927	-1.7309	-20.140	102.35	104.08	3.3659	1.7622	1.7410	3.5294
0.36516	-1.6937	-19.870	103.18	105.05	3.3756	1.1384	1.1471	3.5218
0.37105	-1.7813	-21.421	103.94	106.10	3.4007	2.1451	1.2572	3.5034
0.37694	-1.8912	-22.803	104.61	107.05	3.4410	2.1595	2.0429	3.4991
0.38283	-1.9559	-23.445	105.18	107.75	3.7701	1.4156	-2.0546	3.7704
0.38872	-1.9619	-23.251	105.62	108.14	3.6898	0.95881	-1.3099	3.6900
0.39461	-1.9196	-22.523	105.94	108.30	3.4780	0.99712	-0.80352	3.5513
0.40050	-1.8544	-22.835	106.14	108.33	3.4866	-1.6272	-1.2100	3.5763
0.40639	-1.7983	-23.416	106.21	108.30	3.4902	-1.8366	-1.6724	3.6247
0.41228	-1.7745	-22.778	106.15	108.23	3.4884	-1.4740	1.4819	3.5930
0.41816	-1.7861	-21.528	105.96	108.11	3.4801	1.1721	0.86992	3.5799
4.49990	-0.30714	-4.6277	30.529	30.807	0.96675	0.18844	0.13960	0.97529

表 2 最大弯矩与最大应力

T/s	最大弯矩/(N·m)	单元号	最大应力/MPa	单元号
0.10012	38298.8	10	-0.93573E+08	76
0.30627	61287.0	22	-0.12224E+09	1
0.31216	61829.9	22	-0.12329E+09	1
0.31805	63466.9	10	-0.12696E+09	1
0.32394	68013.5	10	-0.13752E+09	1
0.32983	75594.1	10	-0.15411E+09	1
0.33571	80990.8	10	-0.16354E+09	1
0.34160	77728.8	10	-0.15300E+09	17
0.34749	66941.1	10	-0.12871E+09	17
4.49990	14286.4	22	-0.26905E+08	17

过程中,振动衰减的主要因素是系统阻尼,它对井架立柱轴向的振动响应影响最大。在井架载荷卸载过程中,系统阻尼会使井架振动幅值发生一定的波动。因此为确保井架结构设计和安全预测更符合实际情况对其进行动态响应研究是十分必要的。

参考文献:

[1] 周国强,郭奕珊. 动力法取代静力法进行井架结构试验探讨[J]. 石油矿场机械,1999,28(1):22-24.
[2] 李斌,崔鹤田,马红月,等. K45 米钻机井架额载工况下的受力与模态分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):51-55,70.

[3] 刘晓芬. 基于谱元法的石油钻机井架动态响应分析[D]. 甘肃兰州:兰州理工大学,2014.
[4] 邹龙庆. 石油钻机井架动态响应分析[D]. 黑龙江哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
[5] 张西坤,靳益民. 关于钻塔的几个问题的探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7):37-42.
[6] 杨林,徐丹丹. 基于有限元法的井架结构分析[J]. 机械工程与自动化,2009,(2):15-18.
[7] 韩玉强,李飞舟. 基于 ANSYS10.0 的 JJ170/30-K 型井架结构研究[J]. 新技术新工艺,2011,(9):40-42.
[8] 何明辉,刘得成,聂景旭. 圆锥薄壳体瞬态动力响应分析[J]. 振动与冲击,2006,25(6):157-159.
[9] 吴昌,艾志久,陈海林,等. JJ250/42-K 型井架动态特性分析[J]. 2009,38(11):19-23.
[10] 张洪才,等. ANSYS14.0 理论解析与工程应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
[11] 邹龙庆,付海龙,王玥. ZJ15D 型石油钻机井架的瞬态响应研究[J]. 天然气工业,2007,27(6):81-84.
[12] Zhang Lina, Li Fengchen, Yang Zepin, et al. The research of structural modal parameter identification for oil derrick[C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering,2010:4443-4445.
[13] Pei-Ming Shi, Na Zhang, Dong-Ying Han. Transient response analysis of derrick steel structures[C]// Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), 2013 International Conference on,2013:346-350.