

面向随钻检测的钻柱纵向振动特性分析

宁泽辉, 李妍, 迟德霞, 张浩, 马思远, 樊卿波, 刘星亮

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年7月31日; 发布日期: 2025年8月8日

摘要

激光拉曼检测装置在钻杆中不可避免地会受到钻柱纵向振动的影响, 因此本文对钻柱系统进行纵向振动特性分析。建立了钻柱有限元模型, 用ANSYS对钻柱的纵向振动进行了模态分析、谐响应分析和瞬态动力学分析, 分析结果表明: 钻柱纵向固有频率随钻柱长度的增加而减小; 当钻压增大或钻柱长度增加时, 钻柱纵向振动振幅都会增大; 有必要通过减振装置来减少钻柱纵向振动对激光拉曼检测装置的影响。

关键词

激光拉曼, 随钻检测, 纵向振动, 瞬态动力学分析, 减振装置, ANSYS

Design Analysis of Longitudinal Vibration Characteristics of Drill String for Laser Raman Drilling Detection

Zehui Ning, Yan Li, Dexia Chi, Hao Zhang, Siyuan Ma, Qingbo Fan, Xingliang Liu

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Jul. 7th, 2025; accepted: Jul. 31st, 2025; published: Aug. 8th, 2025

Abstract

In laser Raman detection systems deployed within drill pipes, the longitudinal vibration of the drill string inevitably affects the stability and accuracy of measurements. To address this issue, this study investigates the longitudinal vibration characteristics of the drill string system. A finite element model of the drill string was established, and modal analysis, harmonic response analysis, and transient dynamic analysis were carried out using ANSYS. The results indicate that the natural longitudinal frequency of the drill string decreases with increasing drill string length. Furthermore, both

increased bit pressure and longer drill string length lead to higher longitudinal vibration amplitudes. These findings suggest that it is necessary to implement vibration damping devices to mitigate the adverse effects of longitudinal vibrations on the laser Raman detection system.

Keywords

Laser Raman, Testing While Drilling, Longitudinal Vibration, Transient Dynamics Analysis, ANSYS

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随钻检测技术是在钻进过程中及时监测井下地层信息,便于钻井施工的管理和工作效率的提升[1]-[3]。在实际钻井过程中,因钻柱系统振动异常可能会引发跳钻、粘滑和涡动等,这将阻碍钻柱系统的正常工作[4]。井下钻柱的剧烈振动易导致随钻检测装置分析失误和失效,甚至会由此引发重大工程事故[5]。因此 Haiming X 等[6]基于钻柱结构特性的研究通过仿真分析,构建钻柱振动参数模型,分析了影响随钻声波传输的因素。吕俊[7]基于随钻核磁共振测井过程中,钻柱的横向振动产生的不利影响而提出了一种钻柱横向振动位移实时监测方法。Morales [8]等人建立具有横纵扭耦合的四自由度非光滑的钻柱耦合振动模型,分析钻柱耦合的影响因素,包括钻头与岩石和井筒的相互作用、偏心和钻柱侧向弯曲时流体产生的作用。Tian 等[9]提出一种井下振动工具,通过对水平井钻柱轴向振动的动力学模型分析,提高了机械钻速。Sunit K 等[10]通过研究旋转钻井时底部钻具组合的整体动力学,采用钻柱轴扭集总参数模型和线性切削力模型可以捕捉到轴向扭转钻井动力学中两种类型的自中断。Yang 等[11]提出并求解了纵、扭、径向耦合钻柱动力学模型来预测井眼轨迹。Chen 等[12]建立了集总质量模型来分析扭振和轴振的耦合振动,提出了一种将钻头轴向位移与钻头旋转角度相关联的运动学耦合方法,讨论了不同钻井参数下的钻柱响应。Liu 等[13]和刘为力[16]通过建立有限元动力模型,对钻柱轴向振动减摩阻影响因素分析。杨博等[17]分析了固有频率的各阶振型,并对影响固有频率的因素进行了分析。田家林[14][15]等通过建立钻柱纵-扭耦合振动数学模型,推导相关动力学方程,分析岩石与钻头相互作用的4种形式,得到不同参数下钻头角速度和相对角位移变化。基于动力学理论,建立了井下钻柱纵向和横向耦合振动的数学模型,并进行数值求解及分析提出了钻柱纵向和横向耦合振动的动力方程,并利用解析法和无量纲法分别求解出其动刚度和动阻尼的表达式,以及钻柱前两阶振动的固有频率。扬州大学朱晟[19]设计了一种磁流变减振器,利用振动时引起的活塞位移、磁流变液在腔体内流动产生的磁场来产生可控阻尼力。朱亮[20]等人利用矩形弹簧的正刚度特性以及碟形弹簧的负刚度区间设计了一种正负刚度并联隔振系统,并对隔振系统进行力传递率性能试验证明该减振器在重载工况下具有较好低频隔振能力。福州大学邹路明[21]等人设计了一种金属橡胶阻尼三向减振器,使用四根斜置弹簧作为三个方向的支撑元件,四个环形金属橡胶作为耗能元件,两个环形橡胶作为限位元件,实现三个方向的减振。吕一平[22]设计了一种筒式随钻测井仪减振器,利用多组并联的弹簧连接阻尼块的往复运动来进行横向缓冲、吸振。

激光拉曼检测装置在钻杆中不可避免地会受到钻柱纵向振动的影响,因此本文对钻柱系统进行纵向振动特性分析,为设计减少纵向振动的减振装置,使激光拉曼检测装置在井下正常工作具有重要的意义。

2. 钻柱纵向振动特性分析

2.1. 有限元模型的建立

在工程实践中, 钻柱工作环境复杂, 井下不确定因素较多, 所以有限元分析为解决上述问题提供了思路。本文为简化钻柱模型, 增加计算效率, 在建立钻柱系统的有限元模型之前, 提出几点假设:

- (1) 钻柱为线性、弹性的直杆, 不考虑摩擦力、钻井液和粘附力的影响, 忽略温度的影响;
- (2) 不考虑扶正器和减振器等其他次要元件的影响;
- (3) 地面以上的装置简化为一个弹簧质量系统。

考虑到所使用的带有激光拉曼检测设备预计在 4500~5000 米的深井工作, 因此建立钻柱组合如表 1 所示。钻杆钻铤等参数如表 2 所示, 使用 ANSYS 建立钻柱模型。

Table 1. Shows the combinations of drill rod lengths and drill collar lengths of different lengths

表 1. 为不同长度的钻杆长度和钻铤长度组合

钻柱长度(m)	钻杆总长度(m)	钻铤总长度(m)
500	410	90
1000	910	90
1500	1410	90
2000	1910	90
2500	2410	90
3000	2910	90
3500	3410	90
4000	3910	90
4500	4410	90
5000	4910	90

Table 2. Drilling rod and drill pipe parameters

表 2. 钻杆钻铤等参数

参数名称	参数名称	参数名称	参数名称
钻杆外径(mm)	127	钻杆内径(mm)	108
钻铤外径(mm)	159	钻铤内径(mm)	71.4
弹性模型 E (Pa)	2.1×10^{11}	泊松比 ν	0.3
质量密度 ρ (kg/m^3)	7850	井架和钢丝绳的综合刚度 K	9.8×10^6
钻头质量(kg)	100	地面系统质量(kg)	6000
钻井液密度(kg/m^3)	1200	重力加速度(m/s^2)	9.8

2.2. 钻柱纵向振动模态分析

由于主要研究钻柱的纵向振动特性, 将钻柱的顶部节点设置为固定边界条件, 并将钻柱顶部以下所有节点的 UX、UY、ROTX、ROTY 以及 ROTZ 均设为零, 只保留节点在 Z 轴方向上的自由度。使用 ANSYS 软件对 500~5000 m 的钻柱进行模态分析。通过求解得到钻柱的纵向振动前十阶固有频率如图 1 所示。

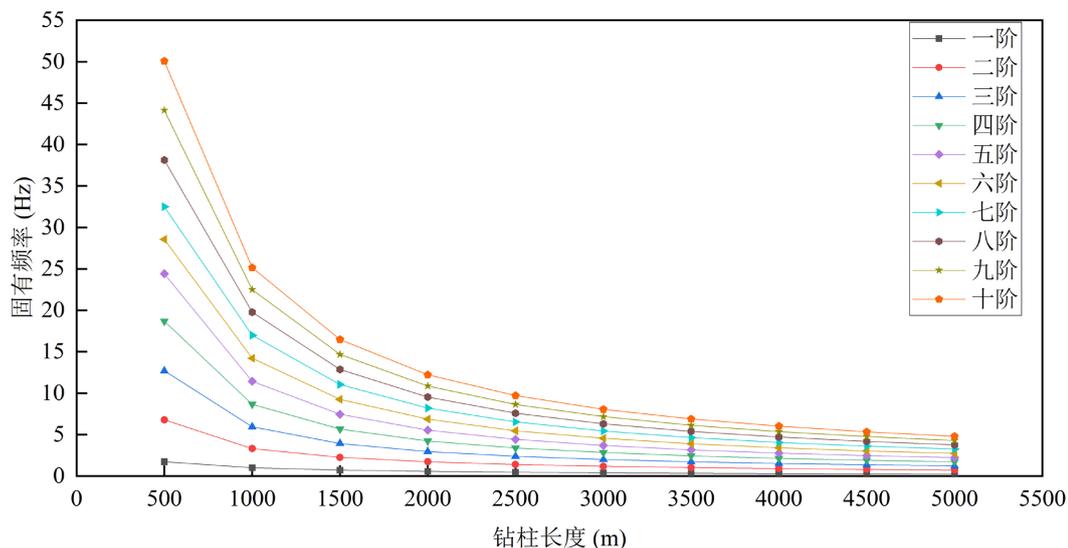


Figure 1. The longitudinal natural frequencies of drill pipes of different lengths

图 1. 不同长度的钻柱纵向固有频率

由图 1 可知, 随着钻柱长度增加, 钻柱纵向振动固有频率曲线呈下降趋势, 尤其当钻柱长度从 500 m 增加到 1000 m 时, 钻柱的固有频率变化幅值最大。在钻柱长度为 500 m 时, 1 阶固有频率为 1.7247 Hz, 10 阶固有频率为 50.076 Hz, 每阶固有频率相差约为 5 Hz, 各阶固有频率间隔较大; 而当钻柱长度为 5000 m 时, 1 阶固有频率为 0.2432 Hz, 10 阶固有频率为 4.8022 Hz, 每阶固有频率相差仅约为 0.5 Hz, 各阶振动固有频率间隔比较小, 则很容易发生共振。

长度为 5000 m 时纵向振动第 1 阶模态节点最大纵向位移为 3.673 mm, 在钻柱的最底部; 第 2 阶模态节点最大纵向位移为 3.712 mm, 位于第 178 节点处, 即钻柱长度为 1770 m 处; 第 3 阶模态节点最大纵向位移为 3.734 mm, 位于第 107 节点和 318 节点处, 即钻柱长度为 1060 m 和 3170 m 处; 第 4 阶模态节点最大纵向位移为 3.755 mm, 位于第 76 节点、226 节点和 376 节点处, 即钻柱长度为 750 m、2250 m、3750 m 处。

2.3. 钻柱纵向振动谐响应分析

钻柱振动谐响应分析是研究钻柱在特定频率下振动响应情况的技术手段。通过谐响应分析可以评估钻柱在不同工况下的稳定性[18]、找到钻柱发生共振最强烈的固有频率阶数。

选用 2000 m 和 5000 m 的钻柱有限元模型, 在钻头处分别施加 1 kN、5 kN 和 10 kN 的周期作用力来模拟钻压, 分别得到 2000 m 和 5000 m 钻柱模型在不同频率下的响应特性, 并绘制其纵向位移 - 频率响应图, 通过该曲线可以判断钻柱系统发生共振现象时的频率及振动幅值, 以更好地保护激光拉曼检测装置。绘制 2000 m 和 5000 m 的纵向位移 - 频率响应图如下图 2 和图 3 所示。

由图 2(a)可以得出, 当对 2000 m 钻柱施加 1 kN 周期作用力时, 在频率为 0.56 Hz 处的振动幅值最大, 幅值为 9.78 mm; 由图 2(b)、图 2(c)可知, 当对 2000 m 钻柱施加 5 kN 和 10 kN 周期作用力时, 发生共振的位置和图 3(a)相同, 但振动幅值约为其 5 倍和 10 倍, 分别为 48.9 mm 和 97.8 mm。由图 3 可以得出, 当对 5000 m 钻柱施加 1 kN、5 kN 和 10 kN 周期作用力时, 发生共振的位置相同, 只有振动幅值增加。由此可见钻柱纵向振动发生共振的频率为钻柱纵向振动的固有频率; 无论钻压大小, 发生共振的频率是一致的, 变化的只是共振的振幅; 随着频率的增大, 整体上各个点的振幅值降低。此外, 当钻压增大或钻柱长度增加时, 纵向振动位移均会增大。

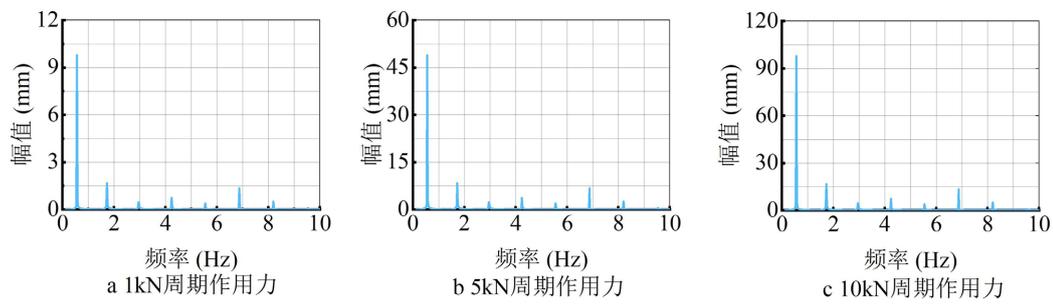


Figure 2. The vibration curves under different periodic forces at 2000 m
图 2. 2000 m 不同周期作用力下的振动曲线

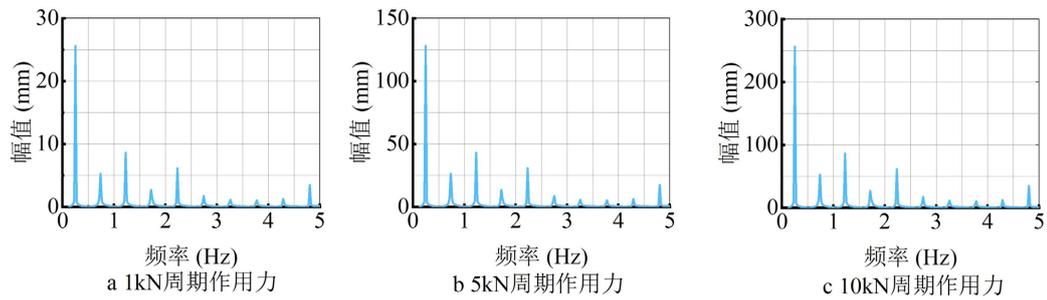
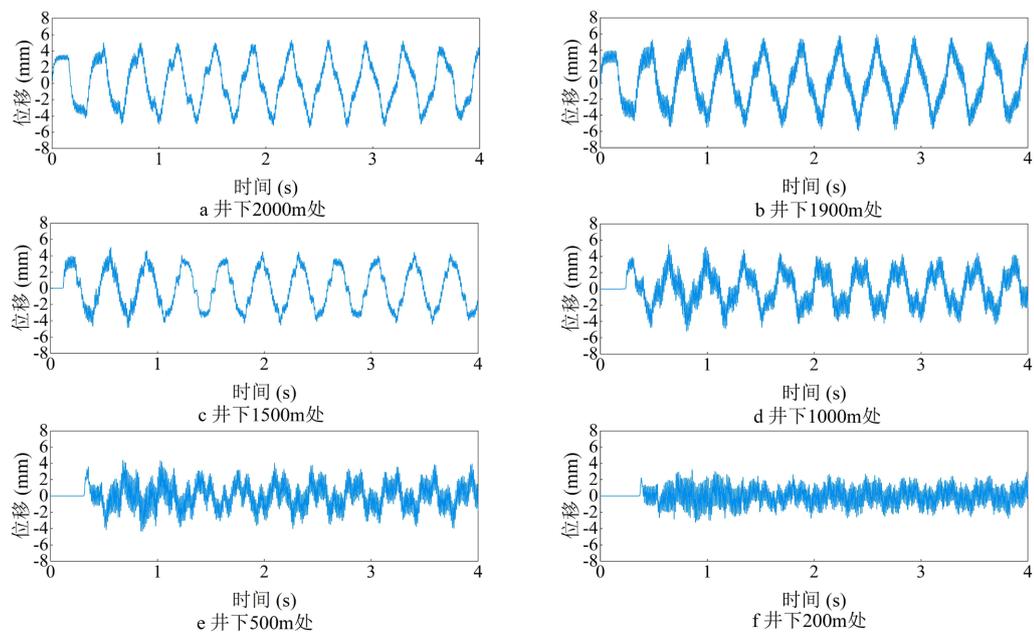


Figure 3. Vibration curves of the 5000 m drill string under external forces with different periods
图 3. 5000 m 不同周期作用力下的振动曲线

2.4. 钻柱纵向振动瞬态动力学分析

由于本节对钻柱系统的纵向振动特性进行分析，因此不考虑钻柱在其他方向上的作用力。假设钻柱为线性、弹性的直杆，不考虑摩擦力和钻井液浮力的影响。对长度 2000 m 和 5000 m 的钻柱模型钻头处施加 50 kN 和 80 kN 的周期作用力来模拟钻压。



(A) 2000 m 钻柱

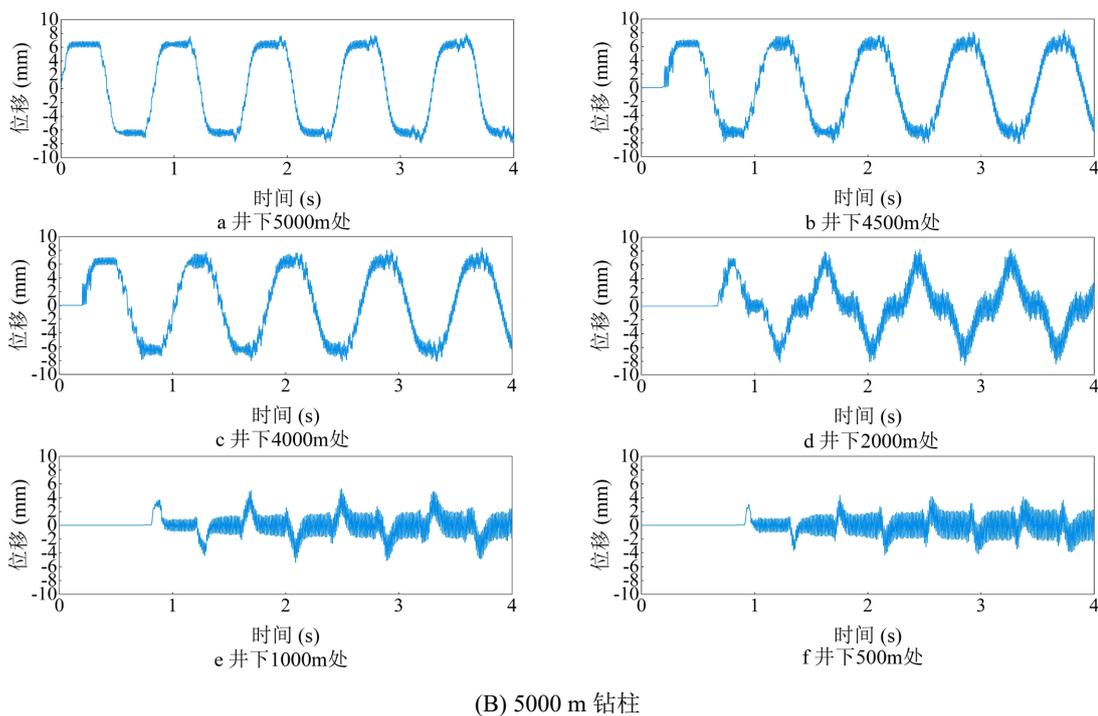
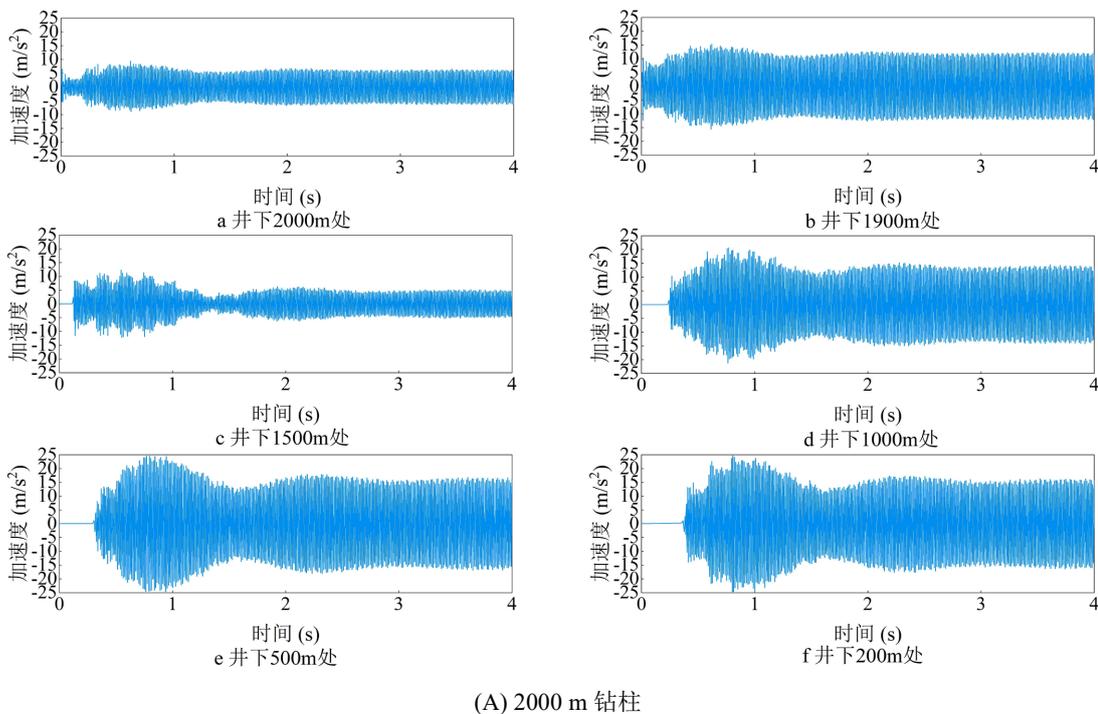


Figure 4. Displacement vs. time curve for different nodes of the 50 kN drilling column
图 4. 50 kN 下钻柱不同节点位移随时间变化曲线

当钻压为 50 kN 时，分别提取 2000 m 钻柱系统的井下 2000 m、1950 m、1500 m、1000 m、500 m 和 200 m 处的节点和 5000 m 钻柱系统的井下 5000 m、4500 m、4000 m、2000 m、1000 m 和 500 m 处节点纵向振动位移在不同时刻变化曲线，如图 4 所示。



(A) 2000 m 钻柱

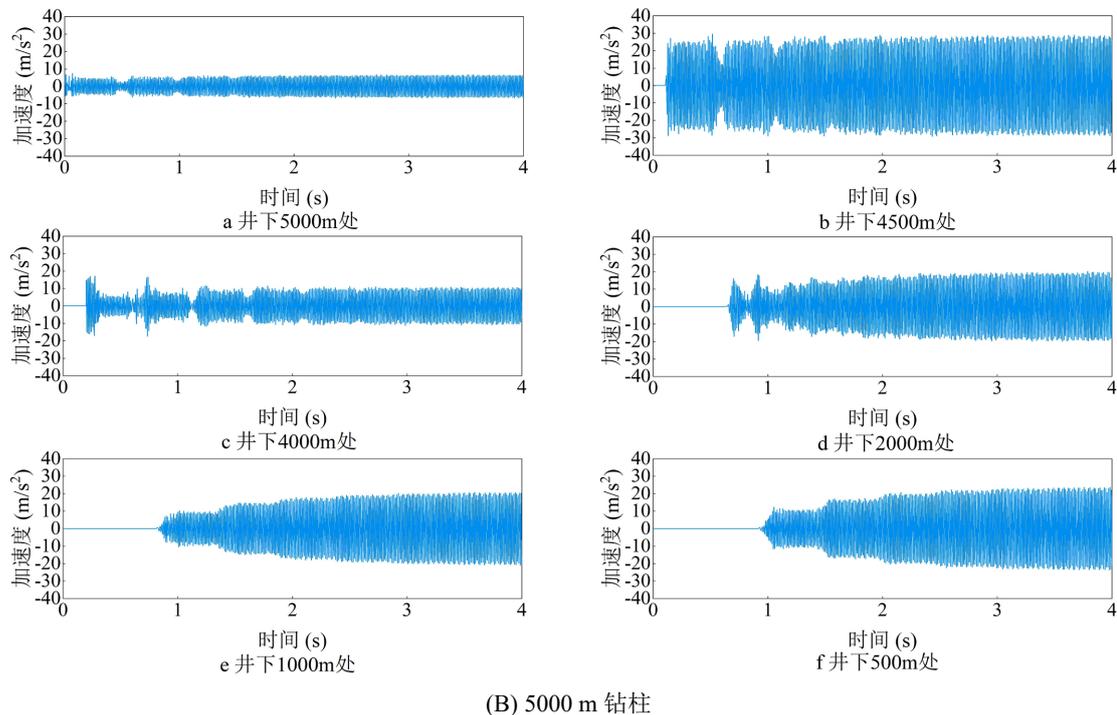


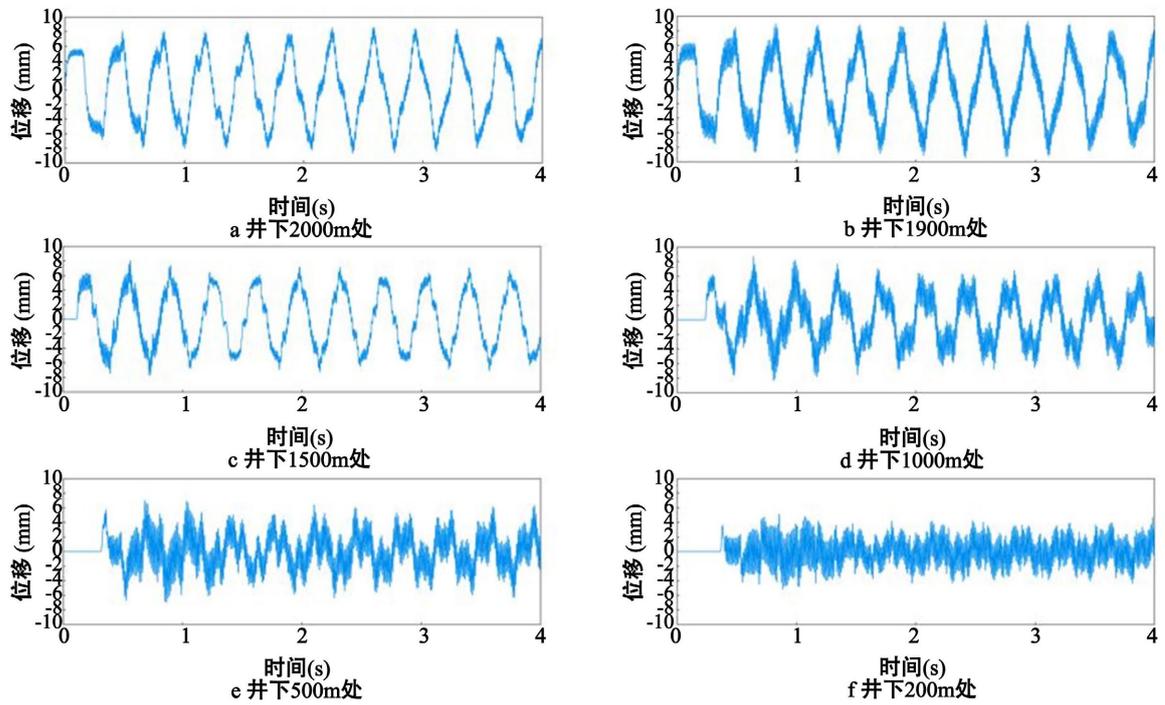
Figure 5. The acceleration change curve over time for different nodes of the 50kN drilling column
图 5. 50 kN 下钻柱不同节点加速度随时间变化曲线

由图 4 可知, 纵向振动位移在钻柱系统传播过程中整体呈现逐渐衰减的趋势, 距离井口越近, 振动越平缓。钻柱长度为 2000 m 时, 在井下 1900 m 处时纵向振动最剧烈, 纵向位移最大, 达到了 6 mm, 且在峰值持续振动, 在井下 200 m 时, 振动相对稳定, 振动幅值持续在 $-3\text{ mm}\sim 3\text{ mm}$ 附近波动。5000 m 钻柱纵向振动位移在钻柱系统传播过程中整体同样呈现逐渐衰减的趋势: 纵向振动位移最大为 8 mm, 且在峰值持续振动, 在井下 1000 m 和 500 m 时, 振动相对稳定, 振动位移较小。由此可知, 对 2000 m 钻柱和 5000 m 钻柱施加相同的激励力时, 5000 m 钻柱相对不稳定, 产生的纵向振动位移较大, 峰值较多。分别提取上述节点纵向振动加速度在不同时刻变化曲线如下图 5 所示。

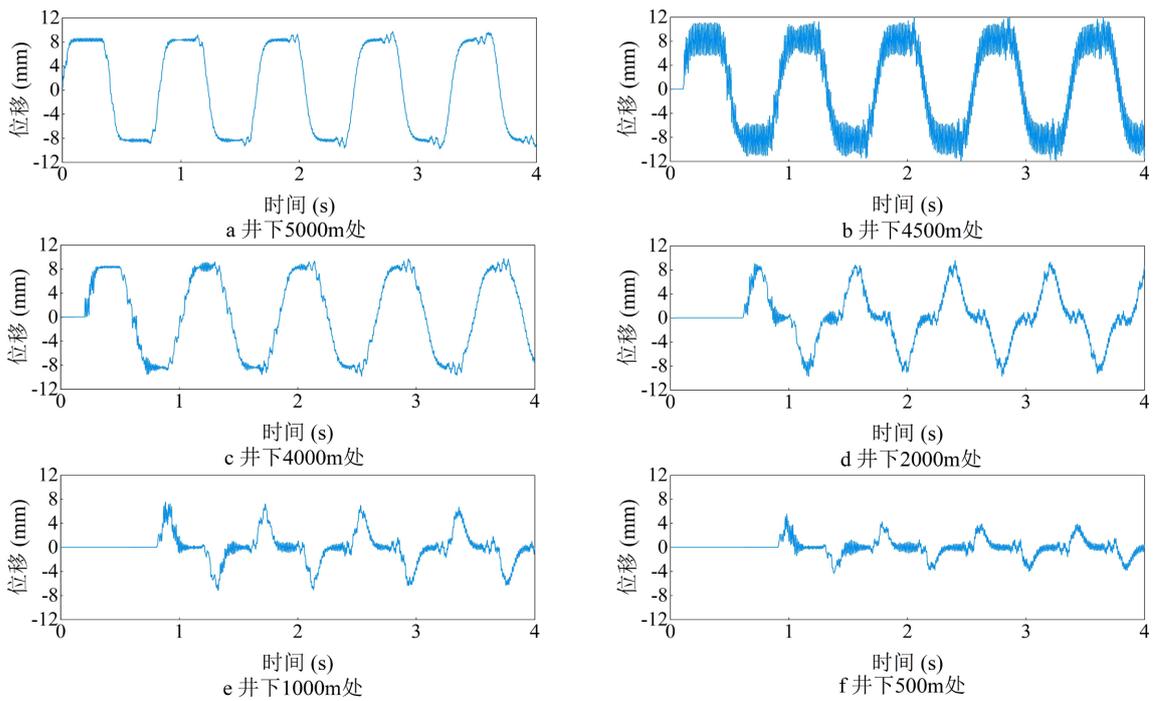
由图 5 可知, 钻柱各个节点纵向振动加速度在不同时刻呈现周期性变化。在 2 s 前, 各节点加速度均存在上下波动, 在 2 s 后各节点加速度幅值趋于不同的稳定值。将图 5(A)、图 5(B)对比可知, 5000 m 钻柱钻头处的加速度小于 2000 m 钻柱钻头处加速度, 但 5000 m 钻柱在井下 4500 m 处加速度突增到 30 m/s^2 , 在井下 4000 m 和 2000 m 处前 2 s 得加速度发生突变, 而当加速度发生突变时, 可能会发生严重跳钻现象。当钻柱纵向振动出现跳钻现象时, 会导致钻头损坏和钻杆内的激光拉曼检测装置的损坏。

当钻压为 80 kN 时, 分别提取 2000 m 钻柱系统的井下 2000 m、1950 m、1500 m、1000 m、500 m 和 200 m 处的节点和 5000 m 钻柱系统的井下 5000 m、4500 m、4000 m、2000 m、1000 m 和 500 m 处节点纵向振动位移和加速度在不同时刻变化曲线如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 当激励增大时, 钻柱的纵向位移也将增大, 在不考虑其他条件情况下, 激励力越大, 钻柱的纵向位移越大, 越容易发生跳钻现象。由图 7 可知, 当激励力为 80 kN 时, 最大加速度达到了 40 m/s^2 , 出现在井下 500 m 和 200 m 处, 说明纵向振动加速度随着钻柱长度的增加并没有减弱, 越接近井口, 钻柱处承受的轴向力越大。当 5000 m 钻柱受到的激励力增大时, 各个节点位移幅值增大, 加速度幅值发生突变现象, 说明已经发生跳钻, 当钻柱纵向振动出现跳钻现象时, 极易导致钻头的损坏和钻杆内的激光拉曼检测装置的损坏。



(A) 2000 m 钻柱



(B) 5000 m 钻柱

Figure 6. shows the displacement curves of the 80 kN drilling column at different nodes over time

图 6. 80 kN 下钻柱不同节点位移随时间变化曲线

由此可知，钻柱纵向振动时是钻柱沿轴向反复跳动，当钻柱长度一定时，轴向力的增加会导致纵向振幅及纵向加速度的增加，进而导致跳钻现象的发生；当轴向力一定时，钻柱长度越长，纵向振动振动

幅值越大，对激光拉曼检测装置的影响就越大。因此，需要通过减振装置来减少钻柱纵向振动对激光拉曼检测装置的影响，进而保护激光拉曼检测装置的正常工作。

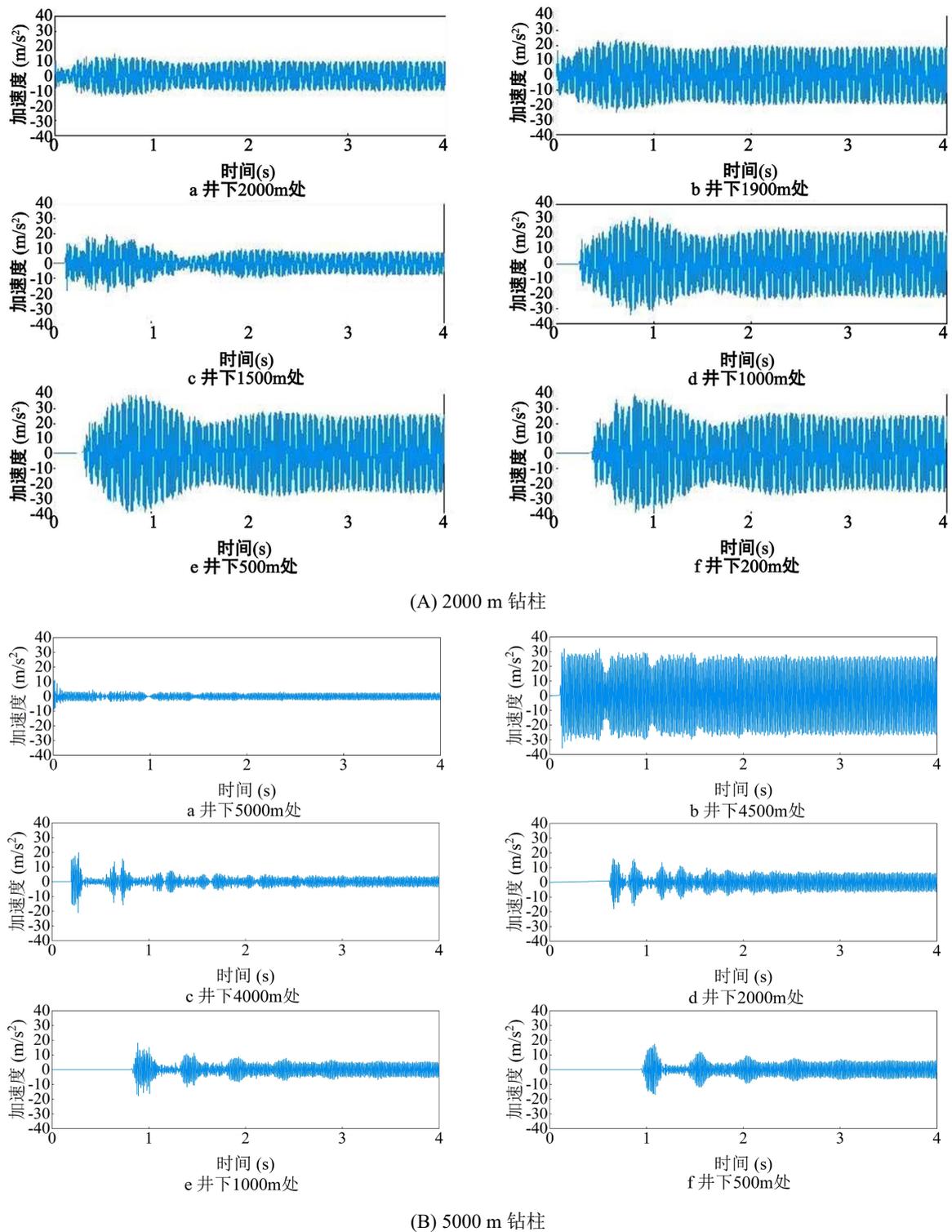


Figure 7. shows the acceleration at different nodes of the 80 KN drill column varying with time

图 7. 80 KN 下钻柱不同节点加速度随时间变化曲线

3. 结论

通过简化钻柱力学模型,建立了钻柱有限元模型,用 ANSYS 对钻柱的纵向振动进行了模态分析、谐响应分析和瞬态动力学分析,结果表明:钻柱纵向固有频率随钻柱长度的增加而减小;钻柱纵向共振的频率是钻柱的固有频率;当钻压增大或钻柱长度增加时,钻柱纵向振动振幅都会增大;钻柱长度一定时,轴向力的增加,会导致纵向振幅及纵向加速度的增加;当轴向力一定,钻柱长度越长时,纵向振动振幅值越大,振动越不稳定。因此,在实际钻井工程中,可以适当降低钻压来降低钻柱纵向振动幅值,减少对钻杆内随钻检测装置的影响。

基金项目

大学生创新创业训练计划立项项目,项目编号:S202410148022。

参考文献

- [1] 刘修善,苏义脑.地面信号下传系统的方案设计[J].石油学报,2000(6):88-92,131-132.
- [2] 姚爱国,张萌,吴来杰,等.电磁随钻信号传输技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):115-119.
- [3] 覃海明.井下动态成像瞬变电磁仪的设计[J].煤矿安全,2022,53(4):151-156+161.
- [4] 段聪聪,李欣业,张利娟,等.钻柱纵-扭耦合非线性振动的顶驱控制研究[J].振动工程学报,2024,37(9):1535-1545.
- [5] 刘伟,周英操,王瑛,等.井下振动测量、分析原理研究[J].石油钻采工艺,2012,34(1):14-18.
- [6] Xie, H., Zhou, J. and Zhang, P. (2022) Simulation Research on Vibration Parameters Model of Drill String. *Fuel*, **315**, Article ID: 122351. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122351>
- [7] 吕俊.随钻核磁共振测井仪器的钻柱横向振动位移估计方法与系统实现[D]:[硕士学位论文].武汉:华中科技大学,2022.
- [8] de Moraes, L.P.P. and Savi, M.A. (2019) Drill-String Vibration Analysis Considering an Axial-Torsional-Lateral Non-Smooth Model. *Journal of Sound and Vibration*, **438**, 220-237. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.054>
- [9] Tian, J., Wei, L., Dai, L., Emtiaz, S.R., Islam, A., Uddin, R., et al. (2020) Study on the Mechanism of Drilling Speed Increase Considering the Axial Vibration of Drill String. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **43**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02712-9>
- [10] Gupta, S.K. and Wahi, P. (2016) Global Axial-Torsional Dynamics during Rotary Drilling. *Journal of Sound and Vibration*, **375**, 332-352. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.04.021>
- [11] Yang, L., Tian, J., Liu, Q., Dai, L., Hu, Z. and Li, J. (2020) The Multidirectional Vibration and Coupling Dynamics of Drill String and Its Influence on the Wellbore Trajectory. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **34**, 2681-2692. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0601-x>
- [12] Chen, J., Liao, H., Zhang, Y., Liang, H., Liu, C. and Qi, D. (2021) A Torsional-Axial Vibration Analysis of Drill String Endowed with Kinematic Coupling and Stochastic Approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **198**, Article ID: 108157. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108157>
- [13] Liu, W., Ni, H., Wang, Y., Guo, Y., Gao, Y. and He, P. (2023) Dynamic Modeling and Load Transfer Prediction of Drill-String Axial Vibration in Horizontal Well Drilling. *Tribology International*, **177**, Article ID: 107986. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107986>
- [14] 田家林,刘亚迪,熊洁.纵-扭耦合下钻柱粘滑振动特性研究[J].机械科学与技术,2022,41(4):511-516.
- [15] 田家林,吴纯明,杨勇文,等.井下钻柱纵向横向耦合振动模型建立与数值分析[J].应用数学和力学,2017,38(6):685-695.
- [16] 刘为力.凹坑型非光滑钻柱轴向振动减摩擦机理研究[D]:[博士学位论文].青岛:中国石油大学(华东),2020.
- [17] 杨博.基于声频振动钻进技术对钻柱纵向振动模态的研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国地质大学(北京),2019.
- [18] 韩春杰,张海莉,井丹丹.基于 ANSYS 的钻柱纵向振动谐响应规律研究[J].化工自动化及仪表,2015,42(8):904-907.
- [19] 朱晟.磁流变减振器优化及半主动悬架系统控制研究[D]:[硕士学位论文].扬州:扬州大学,2021.

- [20] 朱亮, 周涛, 吴乙万, 等. 正负刚度并联隔振系统建模与性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(5): 268-273.
- [21] 邹路明, 郑超, 任子林, 等. 金属橡胶阻尼三向减振器力学特性与环境效应[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(8): 1323-1332.
- [22] 吕一平. 筒式随钻测井仪减振器优化设计与振动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.