

凿岩机-岩石模型的延拓分析和实验

马 威^{1,2}, 张 健³, 姜 鑫⁴, 吴文章²

(1.北京科技大学资源与安全工程学院, 北京 100083; 2.南京宝地梅山产城发展有限公司矿业分公司, 江苏 南京 210041;
3.北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 4.徐州徐工基础工程机械有限公司, 江苏 徐州 221004)

摘要: 介绍了液压凿岩机的原理, 将凿岩机钻进岩石的过程建立成三自由度干摩擦力岩石物理模型, 引入了钻进速率的概念, 研究了粘滞和非粘滞模式, 解释了这两种运动类型之间的差异。将非线性分段光滑动力系统数学模型的周期轨迹进行分段。利用拟弧长延拓法和 Floquet 理论, 将液压作用力的角频率和振幅作为控制参数, 得到稳定周期轨迹和最大钻进速率点。发现了倍周期分岔、鞍结分岔和环面分岔。介绍了液压凿岩机钻凿岩石的数据采集系统, 比较了模型和实验测得的活塞的位移和速度。结果表明, 为了使凿岩机工作在周期-1 轨迹, 应该选择的角频率范围为 $\omega < 6.814$, 振幅范围为 $0.03 < a < 3.051$ 。实验和模型之间存在很强的相关性, 相比于实验, 模型中活塞与钎尾在碰撞之前经历了减速, 多了一个冲击减速行程。

关键词: 液压凿岩机; 岩石模型; 延拓; Floquet 乘子

中图分类号: TH113.1; O322; TU63⁺¹ **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202403044

Continuation analysis and experiment in a drifter-rock model

MA Wei^{1,2}, ZHANG Jian³, JIANG Xin⁴, WU Wenzhang²

(1.School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2.Nanjing Baodi Meishan Industrial City Development Co., Ltd. Mining Branch, Nanjing 210041, China;
3.School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
4.XCMG Construction Machinery Co., Ltd., Xuzhou 221004, China)

Abstract: The principle of the hydraulic drifter is introduced, and the process of drilling into rocks by the drifter is established as a physical model of rock with three-degree-of-freedom dry friction. The concept of rate of penetration (ROP) is introduced. The stick and non-stick modes are studied, explaining the differences between these two types of motion. The periodic trajectories of the non-linear piecewise smooth dynamical system mathematical model are segmented. By using the pseudo-arclength continuation method and Floquet theory, the angular frequency and amplitude of the hydraulic force are taken as control parameters to obtain stable periodic trajectories and the point of maximum ROP. Bifurcations such as period-doubling bifurcation, saddle-node bifurcation, and torus bifurcation are discovered. The data acquisition system for drilling rocks with a hydraulic drifter is introduced, and the displacement and velocity of the piston obtained from the model and experiments are compared. The results indicate that to make the drifter work on the period-1 trajectory, the range of angular frequency should be $\omega < 6.814$, and the range of amplitude should be $0.03 < a < 3.051$. There is a strong correlation between the experiments and the model, and compared with the experiment, the piston in the model undergoes deceleration before colliding with the drill tool, adding an impact deceleration stroke.

Keywords: hydraulic drifter; rock model; continuation; Floquet multiplier

液压凿岩机是钻机的关键部件, 学者们已进行了多项研究以分析和改进其性能。CAVANOUGH 等^[1]引入了一个用于硬岩冲击钻进的自优化控制系统, 此系统可以实时最大化钻进速率, 最小化孔偏角, 并测量岩石特性而不受钻进条件的影响。OH 等^[2-3]评估了凿岩机的液压回路, 并开发了分析工具来评估其冲击能力。从钻进速率和动能的角度研究

了凿岩机的性能, 这些性能都受到岩石刚度的影响。还分析了影响冲击性能的设计参数, 并得出了改进性能的设计数值。HU 等^[4]研究了液压冲击机构的性能及其对凿岩机整体性能的影响。SONG 等^[5-7]开发了一种钻头模型, 运用 Taguchi 法分析和优化了影响凿岩机冲击性能的设计参数, 对比传统模型在钻进性能上有显著改进。SEO 等^[8]解释了凿岩机

收稿日期: 2024-03-19; 修订日期: 2024-07-16

基金项目: 江苏省工业和信息产业转型升级专项资金资助项目(2022C22)

的工作原理,验证了模型的可靠性,并研究了影响冲击频率和冲击性能的主要因素。GUO等^[9]提出了高频液压凿岩机带套分配器的冲击系统液压机械耦合模型,使用键合图开发了一个数学模型,并模拟分析了系统的性能。YANG等^[10]研究了凿岩机活塞腔的压力变化特性曲线,并探讨了流量、充压压力和溢流阀设置对冲击性能和效率的影响。耿晓光等^[11-12]建立了液压凿岩机双缓冲系统耦合模型分析汽蚀现象的机制,确定了关键影响因素,并提出了减轻汽蚀现象的解决方案。YANG等^[13-14]针对液压凿岩机冲击过程中活塞振动失稳问题,建立了非线性碰撞动力学模型,通过点映射法结合雅可比矩阵特征值分析,界定了稳定工作域;采用了参数灵敏度控制法预测凿岩效率,揭示了蓄能器容积比和阻尼间隙是影响效率的关键参数。LI等^[15-17]分析了缓冲机构对冲击能量、频率和功率的影响,并提出了优化冲击性能的方法。基于波动理论建立了应力波模型,提出了无量纲碰撞系数。SHAH^[18]提出在凿岩机中采用电动阀可显著提升可控性,通过建立液压凿岩机冲击系统流-固耦合模型,结合数值模拟与岩石钻探测试,揭示了分动阀阻尼间隙对冲击性能及系统气穴风险的影响机制。LI等^[19]利用正交实验和回归分析研究了冲击功率、推进力、转速和钻头类型等工作参数对钻进效率的影响。JAKOBSSON等^[20-21]针对液压凿岩机压力波动不可控难题,提出了一种在线状态监测方法。通过精准识别内部驻波与操作频率耦合效应,有效解决了因频谱叠加导致的压力振荡失稳问题。构建了首个公开的液压凿岩机故障数据集,引入了阀芯磨损、密封失效等典型故障模式。其核心目标在于开发基于深度学习的时序分类技术,实现凿岩机运行状态的智能诊断与早期预警。SHEN等^[22]在岩石上进行了钻进测试,建立了一个专用能量模型,引入速率能量比作为评估钻进效率的指标,并探讨了各种钻进参数对这一比率的影响规律。LING等^[23]提出了一种利用深度学习和X-Vectors对液压凿岩机进行故障分类的方法,准确率达到99.92%,展示了该方法在液压凿岩机故障分类方面的潜力。

以上参考文献涵盖了对液压凿岩机分析、建模和优化方面的研究。然而,研究中忽略了将液压凿岩机与岩石整合在一起。

在冲击钻进领域中,HASHIBA等^[24]专注于通过实验测试和数值模拟对钻头在冲击进入岩石过程中的力-穿透曲线进行建模。LUNDBERG等^[25-26]研究了使用整体钻杆和可拆卸钻头的冲击钻进波形优化,发现通过优化波形可以实现更高的效率,特别是

对于更长的波形。KRIVTSOV等^[27-28]基于干摩擦模型,建立了切削区域材料去除速率(MRR)的理论预测方法,并揭示较高静载荷下MRR的降低规律。该模型虽基于简化假设,但能有效解释实验中观察到的MRR随静载荷增大而减小的现象,与实验结果吻合良好。PAVLOVSKAIA等^[29-31]对冲击振动器动力学进行了系统性研究,通过建立渐进运动动力学模型,成功解析了系统的粘滞阶段动态。该模型揭示了从周期性到混沌运动的连续演变行为,通过量化分析系统的非线性动力学特性,实现了钻进速度在各种工况下的精准预测。研究进一步对比了两种建模方法,基于系统响应特性确立了最优参数组合:当动态激励频率与系统固有频率匹配时,周期性响应状态下的钻进速度达到最优。AJIBOSE等^[32-34]研究了不同接触力模型对凿岩机的全局和局部动态的影响。分析了Kelvin-Voigt、赫兹刚度和非线性接触刚度-阻尼三种模型,揭示了接触力模型的选择对短期和长期动态都会产生影响。PÁEZ CHÁVEZ等^[35-36]对凿岩机的分段线性冲击振动动力学响应进行了深入研究,这一振荡模型是对冲击钻进系统中观察到的行为的定性表示。研究揭示了各种分岔现象,展示了一维和二维现象,突出了系统中存在的滞后效应和混沌行为,有助于更深入地了解与冲击振动相关的复杂动态和非线性行为,揭示了钻进过程中观察到的振荡系统的性质。LIAO等^[37-40]为提高钻进效率,对钻头-岩石振动冲击系统开展了系统性研究,建立了非线性动力学模型,并基于数值模拟确定了最佳振动参数组合。

岩石钻进是一个复杂的过程,需要液压凿岩机性能高效稳定。先前的研究虽已探索凿岩机的冲击性能、破岩机理和能量传递效率等,但在凿岩机钻进岩石的稳定性层面亟待深入探索。

本文首先介绍了液压凿岩机的原理,将凿岩机钻进岩石的过程建立成物理模型,利用无量纲化方法,将模型简化成紧凑形式,将非线性分段光滑动力系统数学模型的周期轨迹进行分段;然后,利用拟弧长延拓法和Floquet理论,将液压作用力的角频率和振幅作为控制参数,得到稳定周期轨迹、分岔点和最大钻进速率点;最后,介绍了液压凿岩机钻凿岩石的数据采集系统,比较了模型和实验测得的活塞位移和速度,验证模型的正确性。

1 物理模型

图1为液压凿岩机的工作原理。图中从左往右的部件依次是冲击活塞(以下简称活塞)、钎尾、连接

套、钻杆和钻头,液压力作用于活塞,活塞因此获得加速度,在与钎尾碰撞前速度达到峰值,与钎尾碰撞后将能量以波的形式传递到钻具中,在此过程中钻头在岩石上打孔,完成破岩过程。

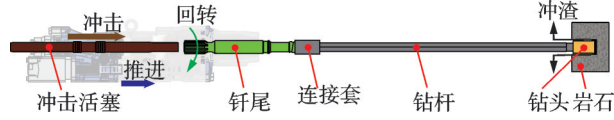


图 1 液压凿岩机的工作原理

Fig. 1 The working principle of the hydraulic drifter

如图 2 所示,将凿岩机冲击系统的作业过程简化为活塞撞击钎尾,能量通过钻具传递到岩石。 $F(t)$ 表示液压油作用在活塞上的力, t 表示时间; X_1 表示活塞的位移; X_2 表示钻具的位移; X_3 表示钻进位移。钻头与岩石之间由虚拟的质量忽略不计的弹簧阻尼滑块表示。滑块在冲击力的作用下向前移动, F_f 表示岩石的干摩擦力阈值,即岩石发生变形的力,当作用在岩石上的力超过阈值 F_f 时,系统发生钻进。为了便于分析,本文假设 F_f 为定值。表 1 为凿岩机-岩石模型的量纲参数。

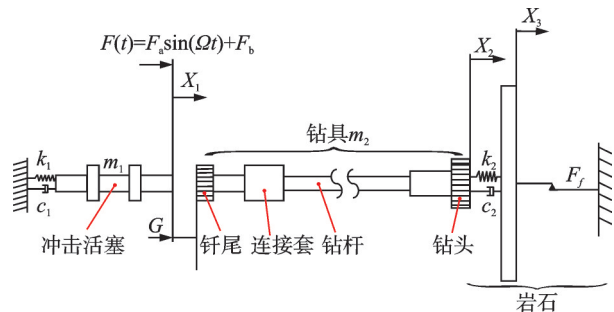


图 2 凿岩机-岩石的物理模型

Fig. 2 Physical model of the drifter-rock model

表 1 凿岩机-岩石模型的量纲参数

符号	含义	单位	数值
f	凿岩机的冲击频率	Hz	38.2
Ω	液压作用力的角频率	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	240
c_1	液压油的阻尼	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1000
c_2	岩石的阻尼	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	58571
F_a	液压作用力的振幅	N	11417
F_b	液压作用力的垂直偏移量	N	6715.4
G	活塞和钎尾的距离	m	0.025
k_1	液压油的刚度	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	2×10^5
k_2	岩石的刚度	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	7.8×10^4
m_1	活塞的质量	kg	11.5
m_2	钻具的质量	kg	33.6

综合考虑理论和实际的凿岩机作业过程,将凿岩机的作业过程分为“非粘滞-非钻进”“非粘滞-钻

进”“粘滞-非钻进”和“粘滞-钻进”四种。

1.1 非粘滞-非钻进

在 $t=0$ 时,假设活塞和钎尾之间的初始距离为 G 。当 $X_1 - X_2 < G$ 时,活塞和钎尾没有碰撞。活塞和钻具的运动控制方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 = F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - k_1 X_1 \\ m_2 \ddot{X}_2 = -c_2(\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - k_2(X_2 - X_3) \end{cases} \quad (1)$$

当 $X_1 - X_2 = G$ 时,活塞会撞击到钎尾。如果碰撞前的瞬间,活塞和钎尾的速度差值比较大,那么碰撞后两者就会分离,称为“非粘滞”模式。在这种情况下,运动方程是通过动量守恒原理推导出来的。活塞和钻具之间的撞击关系表达为:

$$\begin{cases} X_{1+} = X_{2-} + G \\ X_{2+} = X_{2-} \\ \dot{X}_{1+} = \frac{m_1 - m_2 e}{m_1 + m_2} \dot{X}_{1-} + \frac{(1+e)m_2}{m_1 + m_2} \dot{X}_{2-} \\ \dot{X}_{2+} = \frac{(1+e)m_1}{m_1 + m_2} \dot{X}_{1-} + \frac{m_2 - m_1 e}{m_1 + m_2} \dot{X}_{2-} \end{cases} \quad (2)$$

式中,下角标“-”和“+”分别表示碰撞前和碰撞后; e 为碰撞恢复系数。

当作用于岩石表面的力小于岩石干摩擦力阈值时,系统处于“非钻进”模式,可以写成:

$$c_2(\dot{X}_2 - \dot{X}_3) + k_2(X_2 - X_3) < F_f \quad (3)$$

当没有钻进时,岩石表面保持静止,其速度为零:

$$\dot{X}_3 = 0 \quad (4)$$

结合式(1)和(4),得到“非粘滞-非钻进”模式的方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 = F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - k_1 X_1 \\ m_2 \ddot{X}_2 = -c_2(\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - k_2(X_2 - X_3) \\ \dot{X}_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 非粘滞-钻进

当作用于岩石表面的力大于等于岩石干摩擦力阈值时,称为“钻进”模式:

$$c_2(\dot{X}_2 - \dot{X}_3) + k_2(X_2 - X_3) \geq F_f \quad (6)$$

结合式(1)和(6),得到“非粘滞-钻进”模式的方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 = F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - k_1 X_1 \\ m_2 \ddot{X}_2 = -c_2(\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - k_2(X_2 - X_3) \\ c_2(\dot{X}_2 - \dot{X}_3) + k_2(X_2 - X_3) - F_f = 0 \end{cases} \quad (7)$$

1.3 粘滞-非钻进

图3为粘滞模式的凿岩机-岩石的物理模型。当活塞和钎尾碰撞前的瞬间,两者速度接近时,碰撞后会一起移动,称为“粘滞”现象。值得注意的是,凿岩机的粘滞现象仅存在于理论模型,因为实际工况中,碰撞前的瞬间,活塞和钎尾的速度差值很难达到粘滞条件。

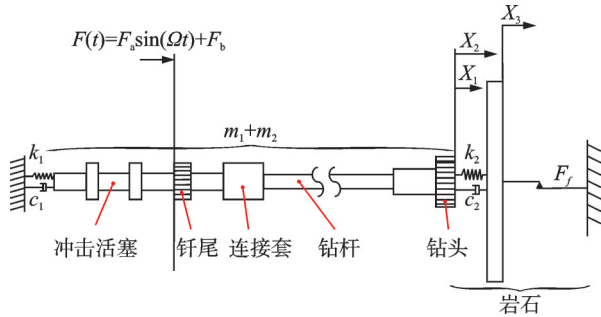


图3 粘滞模式的凿岩机-岩石的物理模型

Fig. 3 Physical model of the drifter-rock model for stick mode

发生粘滞的条件为 $\Phi_1 \geq \Phi_2$, $X_1 = X_2 + G$, $\dot{X}_1 = \dot{X}_2$ 。其中, Φ_1 为粘滞模式中 m_1 的加速度:

$$\Phi_1 = \frac{1}{m_1} [F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - k_1 X_1] \quad (8)$$

Φ_2 为粘滞模式中 $(m_1 + m_2)$ 的加速度:

$$\Phi_2 = \frac{1}{m_1 + m_2} [F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - c_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - k_1 X_1 - k_2 (X_2 - X_3)] \quad (9)$$

发生粘滞时,活塞和钻具一起运动, $(m_1 + m_2)$ 的动力学方程为:

$$(m_1 + m_2) \ddot{X}_1 = F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - c_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - k_1 X_1 - k_2 (X_2 - X_3) \quad (10)$$

结合式(4)和(10),得到“粘滞-非钻进”模式的方程为:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{X}_1 = F_a \sin(\Omega t) + F_b - c_1 \dot{X}_1 - c_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_3) - k_1 X_1 - k_2 (X_2 - X_3) \\ \dot{X}_3 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

1.4 粘滞-钻进

当作用在岩石表面上的力超过干摩擦力的阈值,并且活塞和钻具一起运动时,系统为“粘滞-钻进”模式。结合式(6)和(10),得到“粘滞-钻进”模式的方程为:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{X}_1 = F_a \sin(\Omega t) + F_b - F_f - c_1 \dot{X}_1 - k_1 X_1 \\ c_2 (\dot{X}_2 - \dot{X}_3) + k_2 (X_2 - X_3) - F_f = 0 \end{cases} \quad (12)$$

2 无量纲化

凿岩机-岩石模型的无量纲参数用 $\eta = (\omega, a, b, \alpha, \beta, \gamma, \zeta, g, e) \in (\mathbb{R}^+)^9$ 表示。状态变量用 $\mathbf{u} = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)^T \in (\mathbb{R})^5 \times [0, 2\pi)$ 表示。利用无量纲化方法,非粘滞模式以无量纲形式表示如下:

$$\mathbf{u}' = \mathbf{f}_{NS}(\tau, \mathbf{u}, \eta) = \begin{pmatrix} y_2 \\ \frac{1}{\alpha} (a \sin y_6 + b - 2\zeta \gamma y_2 - \beta y_1) \\ y_4 \\ -(1-h)(2\zeta y_4 + y_3 - y_5) - h \\ h \left[y_4 + \frac{1}{2\zeta} (y_3 - y_5 - 1) \right] \\ \omega \end{pmatrix} \quad (13)$$

粘滞模式的无量纲形式表示如下:

$$\mathbf{u}' = \mathbf{f}_S(\tau, \mathbf{u}, \eta) = \begin{pmatrix} y_2 \\ \frac{1}{\alpha + 1} [a \sin y_6 + b - 2\zeta \gamma y_2 - \beta y_1 - (1-h)(2\zeta y_2 + y_1 - y_5) - h] \\ y_2 \\ \frac{1}{\alpha + 1} [a \sin y_6 + b - 2\zeta \gamma y_2 - \beta y_1 - (1-h)(2\zeta y_2 + y_1 - y_5) - h] \\ h \left[y_4 + \frac{1}{2\zeta} (y_3 - y_5 - 1) \right] \\ \omega \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中, \mathbf{f}_{NS} 为非粘滞模式的动力学方程; \mathbf{f}_S 为粘滞模式的动力学方程。

式(13)和(14)中的 h 为单位阶跃函数:

$$h = \begin{cases} 1, & 2\zeta y_4 + y_3 - y_5 - 1 \geq 0 \\ 0, & 2\zeta y_4 + y_3 - y_5 - 1 < 0 \end{cases} \quad (15)$$

在无量纲化的常微分方程组中, $y_1' \sim y_6'$ 为变量 $y_1 \sim y_6$ 关于无量纲时间 τ 的微分。变量和参数如下所示:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{X_1}{x_s}, y_2 = y_1', y_3 = \frac{X_2}{x_s}, y_4 = y_3', y_5 = \frac{X_3}{x_s}, y_6 = \omega \tau, \\ \tau &= \frac{t}{t_s}, \Omega_n = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \omega = \frac{\Omega}{\Omega_n}, a = \frac{F_a}{F_f}, b = \frac{F_b}{F_f}, \\ \alpha &= \frac{m_1}{m_2}, \beta = \frac{k_1}{k_2}, \gamma = \frac{c_1}{c_2}, \zeta = \frac{c_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}, g = \frac{G}{x_s}, \end{aligned}$$

其中, x_s 为参考位移 ($x_s = F_f/k_2$), t_s 为参考时间

($t_s = \sqrt{m_2/k_2}$)。凿岩机-岩石模型的无量纲参数如表 2 所示。

表 2 凿岩机-岩石模型的无量纲参数

Tab. 2 Dimensionless parameters in the drifter-rock model

序号	符号	含义	数值
1	ω	液压作用力的角频率	0.5~7.3
2	a	液压作用力的振幅	0~3.2
3	b	液压作用力的垂直偏移量	0.0861
4	α	质量比	0.3423
5	β	刚度比	2.5641
6	γ	阻尼系数比	0.0171
7	ζ	阻尼比	18.0899
8	g	活塞和钎尾的间隙	0.025
9	e	碰撞恢复系数	0.3

图 4 为钻进位移的时间历程。计算参数为 $\omega = 4.981$, $a = 0.1464$, 以及在表 2 中序号为 3~9 的参数。横坐标为无量纲时间 τ 和带量纲时间 t , 纵坐标为无量纲钻进位移 y_5 和带量纲钻进位移 X_3 。根据式(3), 当作用于岩石表面的力小于岩石干摩擦力阈值时, 位移保持不变, 为“非钻进”模式; 根据式(6), 当作用于岩石表面的力大于等于岩石干摩擦力阈值时, 位移会增大, 为“钻进”模式。

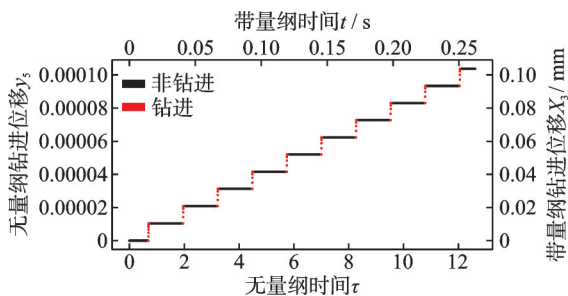


图 4 钻进位移的时间历程

Fig. 4 Time-history of penetration displacement

3 数学模型

凿岩机-岩石数学模型是一个非线性分段光滑动力系统, 其行为在连续时间中被离散事件打断^[41-42]。假设非线性分段光滑动力系统存在一个维度为 n 的状态空间 X 和一个相关的矢量值函数 f_j : $X \rightarrow X$, 称为“向量场”, 由某个有限集合 \mathbb{F} 中的索引向量 I 参数化。对于索引向量 I 的每个值, 都有一个“事件函数” $h_I: X \rightarrow \mathbb{R}$ 和一个“跳跃函数” $g_I: X \rightarrow X$ 。对应系统的解是序列 $\{x_j: (t_{j-1}, t_j] \rightarrow X\}_{j=1}^m$, 包括 m 条光滑曲线和一个相关序列 $\{I_j\}_{j=1}^m$, 使得:

$$I(t) = I_j, t \in (t_{j-1}, t_j] \quad (16)$$

称索引向量值的序列 $\Sigma = \{I_j\}_{j=1}^m$ 为解的标识。

系统的解被划分为“段”, 每个段包含定义该区域的一个向量场, 一个事件函数(其零点描述了该段的终止点)以及一个跳跃函数(将当前段的终止点映射到下一个段的起始点)。将凿岩机-岩石数学模型的周期轨迹分段, 具体描述如下。

3.1 非粘滞碰撞

分段 1(标识为 I_1): “非粘滞碰撞”的向量场为式(13)所示的 f_{NS} 。当活塞与钎尾碰撞时, 该模式结束, 事件函数 h_{NS1} 为:

$$h_{NS1}(u, \eta) = y_1 - y_3 - g = 0 \quad (17)$$

接下来的分段的起始点由跳跃函数 g_{NS1} 确定。活塞与钎尾碰撞后的瞬间, 活塞位移 y_1 、钻具位移 y_3 、钻进位移 y_5 和相位 y_6 没有发生变化, 但是活塞速度 y_2 和钻具速度 y_4 发生了突变。将物理模型中的碰撞关系式(2)进行无量纲化, 得到跳跃函数 g_{NS1} :

$$g_{NS1}(u, \eta) = \begin{pmatrix} y_1 \\ \frac{(\alpha - e)y_2 + (1 + e)y_4}{\alpha + 1} \\ y_3 \\ \frac{(1 + e)\alpha y_2 + (1 - \alpha e)y_4}{\alpha + 1} \\ y_5 \\ y_6 \end{pmatrix} \quad (18)$$

f_{NS} 的雅可比矩阵为:

$$J_{NS} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{NS}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_{NS}}{\partial y_6} \\ \frac{\partial f_{NS1}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_{NS1}}{\partial y_6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{NS6}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_{NS6}}{\partial y_6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{NS21} & J_{NS22} & 0 & 0 & 0 & J_{NS26} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{NS43} & J_{NS44} & J_{NS45} & 0 \\ 0 & 0 & J_{NS53} & J_{NS54} & J_{NS55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

矩阵式(19)的分量如下:

$$\begin{aligned} J_{NS21} &= -\frac{\beta}{\alpha}; J_{NS22} = -\frac{2\gamma\zeta}{\alpha}; J_{NS26} = \frac{a \cos y_6}{\alpha}; \\ J_{NS43} &= h - \delta + \delta(2\zeta y_4 + y_3 - y_5) - 1; \\ J_{NS44} &= 2\zeta(h - 1) - 2\zeta\delta + 2\zeta\delta(2\zeta y_4 + y_3 - y_5); \\ J_{NS45} &= \delta - h - \delta(2\zeta y_4 + y_3 - y_5) + 1; \end{aligned}$$

$$J_{NS53} = \delta \left(y_4 - \frac{y_5 - y_3 + 1}{2\xi} \right) + \frac{h}{2\xi};$$

$$J_{NS54} = h + 2\xi \delta \left(y_4 - \frac{y_5 - y_3 + 1}{2\xi} \right);$$

$$J_{NS55} = -\delta \left(y_4 - \frac{y_5 - y_3 + 1}{2\xi} \right) - \frac{h}{2\xi}.$$

其中, δ 为单位脉冲函数, 定义如下:

$$\delta = \begin{cases} 0, & 2\xi y_4 + y_3 - y_5 - 1 \neq 0 \\ \infty, & 2\xi y_4 + y_3 - y_5 - 1 = 0 \end{cases} \quad (20)$$

3.2 非粘滞 2π

分段2(标识为 I_2): “非粘滞 2π ”的向量场同样为式(13)所示的 f_{NS} 。为确保 y_6 在非粘滞模式下保持在区间 $[0, 2\pi)$ 内, 当满足以下事件函数 $h_{2\pi}$ 时, 该分段结束:

$$h_{2\pi}(\mathbf{u}, \boldsymbol{\eta}) = y_6 - 2\pi = 0 \quad (21)$$

接下来的分段的起始点由跳跃函数 $g_{2\pi}$ 确定。为了使轨迹在一个完整的周期后实现闭合, 将钻进位移 y_5 和相位 y_6 归零, $y_1 \sim y_4$ 保持不变, $g_{2\pi}$ 定义如下:

$$g_{2\pi}(\mathbf{u}, \boldsymbol{\eta}) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

3.3 粘滞 2π

分段3(标识为 I_3): “粘滞 2π ”的向量场为式(14)所示的 f_s 。当由式(21)定义的事件函数 $h_{2\pi} = 0$ 时, 此模式终止, 跳跃函数 $g_{2\pi}$ 由式(22)定义。和 I_2 相比, I_3 除了向量场不同外, 事件函数和跳跃函数是一致的。

f_s 的雅可比矩阵为:

$$J_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_s}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_s}{\partial y_6} \\ \frac{\partial f_{S1}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_{S1}}{\partial y_6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{S6}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_{S6}}{\partial y_6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{S21} & J_{S22} & J_{S23} & J_{S24} & J_{S25} & J_{S26} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{S41} & J_{S42} & J_{S43} & J_{S44} & J_{S45} & J_{S46} \\ 0 & 0 & J_{S53} & J_{S54} & J_{S55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

矩阵式(23)的分量如下:

$$J_{S21} = J_{S41} = -\frac{\beta - h + 1}{\alpha + 1};$$

$$J_{S22} = J_{S42} = -\frac{2\xi(\gamma - h + 1)}{\alpha + 1};$$

$$J_{S23} = J_{S43} = \frac{\delta(y_1 - y_5 + 2y_2\xi - 1)}{\alpha + 1};$$

$$J_{S24} = J_{S44} = \frac{2\xi\delta(y_1 - y_5 + 2y_2\xi - 1)}{\alpha + 1};$$

$$J_{S25} = J_{S45} = \frac{\delta - h - \delta(y_1 - y_5 + 2y_2\xi) + 1}{\alpha + 1};$$

$$J_{S26} = J_{S46} = \frac{\alpha \cos y_6}{\alpha + 1};$$

$$J_{S53} = \delta \left(y_4 - \frac{y_5 - y_3 + 1}{2\xi} \right) + \frac{h}{2\xi};$$

$$J_{S54} = h + 2\xi \delta \left(y_4 - \frac{y_5 - y_3 + 1}{2\xi} \right);$$

$$J_{S55} = \delta \left(y_4 - \frac{y_5 - y_3 + 1}{2\xi} \right) - \frac{h}{2\xi}.$$

3.4 紧凑形式

结合非粘滞向量场式(13)和粘滞向量场式(14), 凿岩机-岩石模型的向量场方程以紧凑形式表达为:

$$\mathbf{u}' = \begin{cases} f_{NS}(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\eta}), & \phi_1 < \phi_2 \\ f_s(\boldsymbol{\tau}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\eta}), & \phi_1 \geq \phi_2 \end{cases} \quad (24)$$

其中, ϕ_1 为非粘滞模式下 m_1 的加速度:

$$\phi_1 = (a \sin y_6 + b - 2\xi\gamma y_2 - \beta y_1) / \alpha \quad (25)$$

ϕ_2 为非粘滞模式下 $(m_1 + m_2)$ 的加速度:

$$\phi_2 = [a \sin y_6 + b - 2\xi\gamma y_2 - \beta y_1 - (1 - h)(2\xi y_2 + y_1 - y_5) - h] / (\alpha + 1) \quad (26)$$

定义:

$$\mathbb{Z}_f = \{f_{NS}, f_s\} \quad (27)$$

$$\mathbb{Z}_h = \{h_{NSI}, h_{2\pi}\} \quad (28)$$

$$\mathbb{Z}_g = \{g_{NSI}, g_{2\pi}\} \quad (29)$$

分别为向量场、事件函数和跳跃函数的集合。集合 \mathbb{F} 为 $\mathbb{Z}_f \times \mathbb{Z}_h \times \mathbb{Z}_g$ 的子集, 它表示了图5所示的连接图, 展示了这些元素之间的交互作用。 \mathbb{F} 中的每个元组, 如 $I = (f_{NS}, h_{NSI}, g_{NSI})$, 表示由向量场 f_{NS} 规定

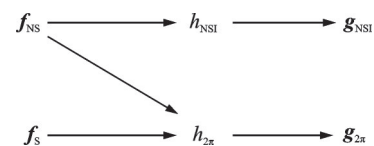


图5 向量场、事件函数和跳跃函数的连接图

Fig. 5 The connectivity graph of the vector fields, event functions and jump functions

的分段,终止于事件函数 h_{NSI} ,并通过跳跃函数 g_{NSI} 进行到下一分段。

表3总结了模型的周期轨迹分段,以及相应的向量场、事件函数和跳跃函数。

表3 模型的周期轨迹分段

标识	分段	向量场	事件函数	跳跃函数
I_1	非粘滞碰撞	f_{NS}	h_{NSI}	g_{NSI}
I_2	非粘滞 2π	f_{NS}	$h_{2\pi}$	$g_{2\pi}$
I_3	粘滞 2π	f_S	$h_{2\pi}$	$g_{2\pi}$

4 延拓分析

本节使用MATLAB软件,利用拟弧长延拓法和基于Floquet理论的分岔判定条件,对凿岩机-岩石模型进行数值分析,控制参数为活塞上的液压力作用力的角频率 ω 和振幅 a 。

4.1 延拓分岔判定条件

给定一个边界值问题,延拓是用于在参数变化下定位和跟踪系统的解。本文采用拟弧长延拓法^[43-45]。

考虑以下非自治系统周期解的稳定性:

$$\dot{x} = F(x, t; M) \quad (30)$$

式中, F 为一个周期函数; $x \in \mathcal{R}^n, t \in \mathcal{R}^1, M \in \mathcal{R}^m, \mathcal{R}$ 为实数集。式(30)在 $M = M_0$ 处的周期解为 $X_0(t)$,并且具有周期 T 。这个周期与 F 的周期相关。在 $X_0(t)$ 上叠加一个扰动 $z(t)$,得到:

$$x(t) = X_0(t) + z(t) \quad (31)$$

将式(31)代入式(30),假设 F 足够光滑(即至少函数具有二阶连续偏导数),在 X_0 周围展开 F 的泰勒级数,并仅保留扰动中的线性项,得到:

$$\dot{z} = D_x F(X_0, t; M_0)z + O(\|z\|^2) \quad (32)$$

或者:

$$\dot{z} = A(t; M_0)z \quad (33)$$

式中, D_x 表示函数 F 对变量 x 的偏导数(雅可比矩阵); O 为渐进符号,用于描述高阶小量;矩阵 A 为 F 的一阶偏微分,这个矩阵具有周期 T 。使用Floquet理论来处理式(33)并确定与式(30)的周期解相关的单值矩阵。单值矩阵的特征值提供了关于周期解稳定性的信息。如果所有的Floquet乘子都在单位圆内,那么相应的解是渐近稳定的,称为稳定极限环或周期吸引子。如果至少有一个Floquet乘子在单位圆外,其解是不稳定的。如果所有Floquet乘子都在单位圆外,周期解被称为排斥子。式(33)中的矩阵

A 是参数向量 M 的函数。因此,单值矩阵和相应的Floquet乘子取决于 M 。

根据Floquet理论,图6为Floquet乘子离开单位圆的三种情形,作为分岔发生的判定条件。如图6(a)所示,当Floquet乘子从实轴负半轴(-1)超出单位圆时,系统解将出现倍周期分岔,这时系统解的周期将变为原来的2倍。如图6(b)所示,当系统的Floquet乘子从实轴正半轴(+1)超出单位圆时,系统解将出现鞍结分岔。如图6(c)所示,当系统有一对共轭Floquet乘子超出单位圆时,将出现环面分岔,系统将出现准周期轨迹。

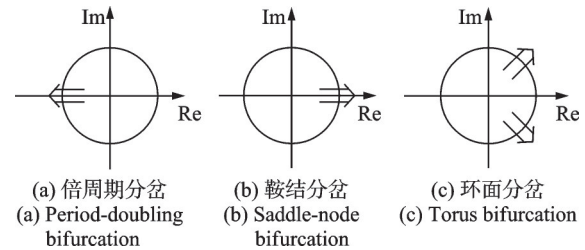


图6 Floquet乘子离开单位圆的三种情形

Fig. 6 Three scenarios depicting the Floquet multipliers leave the unit circle

4.2 角频率的影响

钻进速率(rate of penetration, ROP)是用来衡量液压凿岩机性能的指标之一,表达式如下:

$$ROP = \frac{1}{T} \int_0^T y_5'(\tau) d\tau \quad (34)$$

冲击频率是液压凿岩机的性能参数之一。本文研究的凿岩机具有可调冲击频率的功能。根据上文中无量纲化过程的描述,液压力作用力的无量纲角频率 ω 与频率 Ω 相关。图7~9为关于角频率 ω 的单参数延拓。计算参数为 $a = 0.1464$,以及在表2中序号为3~9的参数。

图7为从 $\omega = 4.981$ 开始(标记为P1)的关于角频率的单参数延拓。图7(a)中,红色实曲线为非粘滞周期-1解,分段标识为 $\{I_1, I_2\}$ 。随着角频率 ω 的增加,在 $\omega = 6.814$ 处检测到系统的一个Floquet乘子在复平面上实轴(-1)处穿越单位圆,根据图6(a)的描述,此时发生了倍周期分岔,标记为PD1。倍周期分岔会导致周期的加倍,在这个位置出现了一条红色虚线分支,表示不稳定解。随着 ω 的减小,在 $\omega = 0.543$ 处检测到一个稳定周期解的端点,标记为EP1。黑色实曲线和黑色虚曲线分别表示为ROP相对于 ω 的稳定和不稳定解。从点P1开始,随着 ω 的减小,ROP先增大后减小至0。可以观察到当 $\omega = 2.895$ 时,最大ROP为0.00032。随着 ω 的增加,ROP逐渐减小至0,在PD1点之后,变为不稳定解。从P1开始,稳定周期解的范围为

$\omega \in (0.543, 6.814)$ 。图7(b)为P1点的相平面图。从单条垂直虚线(碰撞线)可以看到,在一个完整的周期内,活塞和钎尾发生了一次碰撞。庞加莱映射只有一个点(0.0069, -0.0882),表明点P1对应于

周期-1解。图7(c)为活塞位移 y_1 和钻进位移 y_5 关于时间 τ 的时域图。根据跳跃函数式(22)的设定,当 $y_6 = 2\pi$ 时,钻进位移 y_5 归零。可见,P1点的参数可以使系统发生钻进。

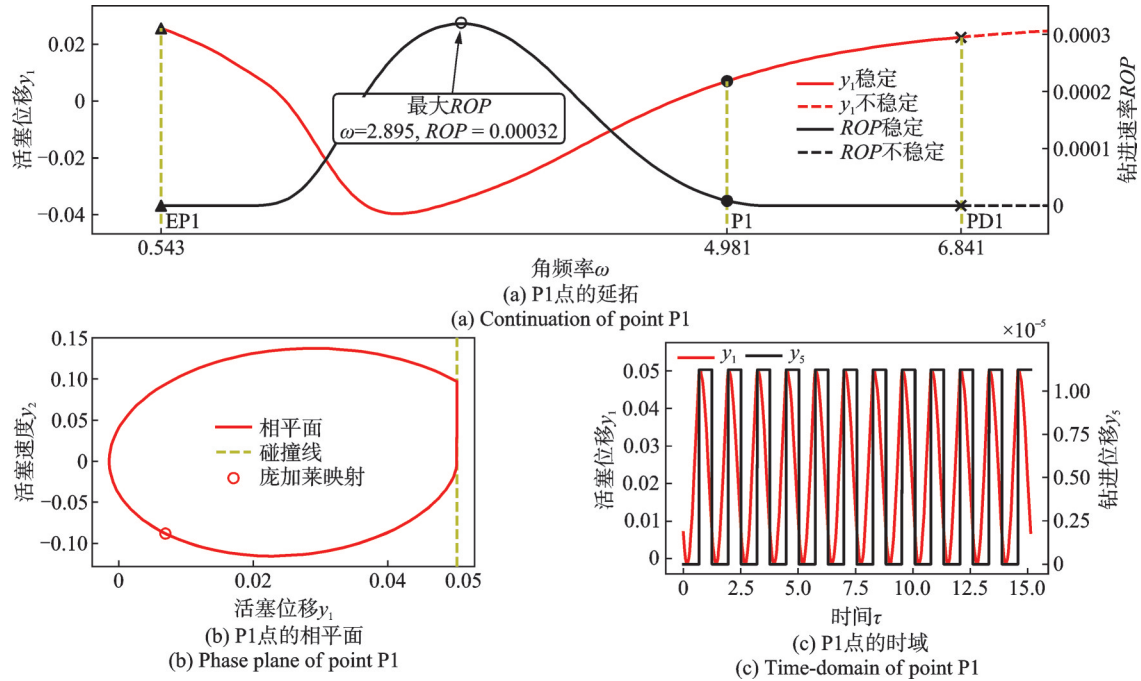


图7 以P1作为起始点的关于角频率的单参数延拓

Fig. 7 Single-parameter continuation with regard to angular frequency starting from point P1

图8为倍周期分岔PD1前/后周期轨迹的相平面。从图7(a)可知, $\omega_{PD1} = 6.814$ 为倍周期分岔点。当 $\omega = 6.8 < \omega_{PD1}$ 时,庞加莱映射点为1个点,此时系统为周期-1轨迹,从放大视图可以看出,在一个完整的周期内,活塞和钎尾碰撞1次;当 $\omega = 6.82 > \omega_{PD1}$ 时,庞加莱映射点为2个点,此时系统为周期-2轨迹,在一个完整的周期内,活塞和钎尾碰撞2次。为了使凿岩机工作在周期-1轨迹,应该选择的角频

率范围为 $\omega < \omega_{PD1}$ 。

图9为从 $\omega = 7$ 开始(标记为P2)的关于角频率的单参数延拓。图9(a)中,绿色实曲线为非粘滞周期-2解,具有 $\{I_1, I_2, I_1, I_2\}$ 的标识。随着角频率 ω 的增加,在 $\omega = 7.274$ 处检测到系统的一个Floquet乘子在复平面上实轴(-1)处穿越单位圆,根据图6(a)的描述,此时发生了倍周期分岔,标记为PD2。随着 ω 的减小,在 $\omega = 6.821$ 处检测到一个稳定周期解的端点,标记为EP2。从图9(a)中的黑色曲线可以看出,ROP在整个过程中保持为零,表明没有发生钻进。从点P2开始,稳定周期解的范围为 $\omega \in (6.821, 7.274)$ 。从图9(b)中的单个垂直虚线可以看出,在一个完整的周期内活塞和钎尾碰撞了一次,有两个庞加莱映射点,(0.0175, -0.0746)和(0.0291, -0.0574),表明点P2对应于周期-2解。图9(c)为 y_1 和 y_5 关于时间 τ 的时域图。 $y_5(\tau) = 0$,可见,P2点的参数不会使系统发生钻进。

表4为关于角频率的单参数延拓汇总,总结了起始点P1、P2的周期和段标识,以及稳定周期解的范围。

4.3 振幅的影响

另一个影响系统行为的关键参数是液压作用力的振幅 a 。无量纲参数振幅 a 与凿岩机的冲击压力

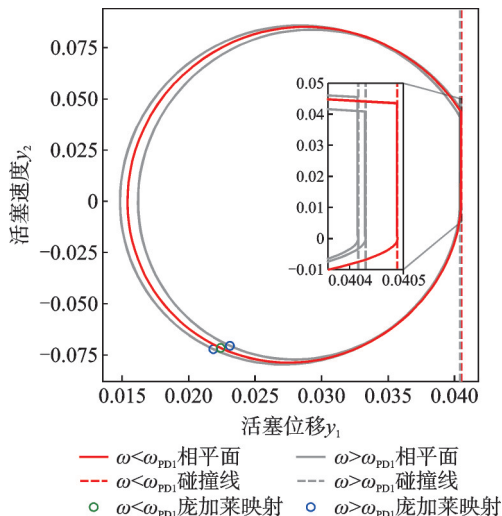


图8 倍周期分岔PD1前/后周期轨迹的相平面

Fig. 8 Phase portraits for the periodic orbits of before and after the period-doubling bifurcation PD1

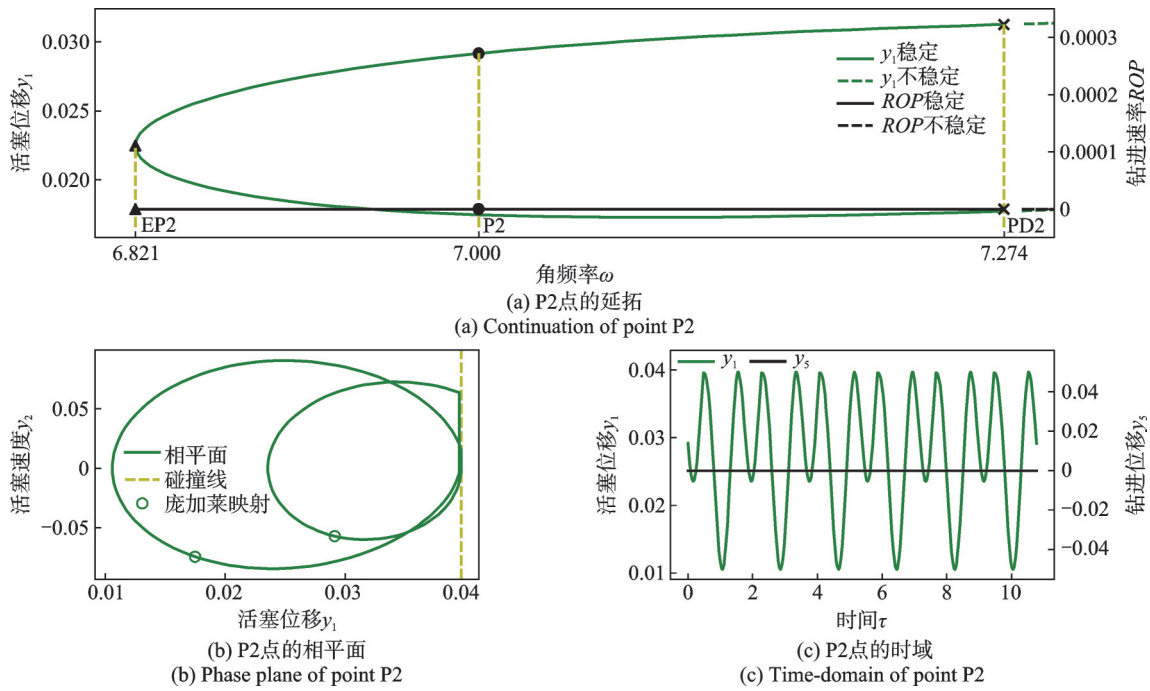


图 9 以 P2 作为起始点的关于角频率的单参数延拓

Fig. 9 Single-parameter continuation with regard to angular frequency starting from point P2

表 4 关于角频率的单参数延拓汇总

Tab. 4 Summary of single-parameter continuation with regard to angular frequency

起始点	角频率	周期	段标识	稳定周期解的范围
P1	4.981	1	$\{I_1, I_2\}$	(0.543, 6.814)
P2	7	2	$\{I_1, I_2, I_1, I_2\}$	(6.821, 7.274)

有关,这个参数是可调的,也是液压凿岩机的性能参数之一。图 10 为振幅 a 的单参数延拓,计算参数为 $\omega = 4.981$,以及在表 2 中序号为 3~9 的参数。

从 $a = 0.146$ (标记为 P) 开始,红色实曲线代表具有 $\{I_1, I_2\}$ 标识的非粘滞周期-1 解。当振幅减小时,在 $a = 0.03$ 处检测到系统的一个 Floquet 乘子在复平面上实轴 (+1) 处穿越单位圆,根据图 6(b) 的描述,此时发生了鞍结分岔,标记为 SN。随着 a 的增加,在 $a = 3.051$ 处检测到系统的一对共轭 Flo-

quet 乘子在复平面上穿越单位圆,根据图 6(c) 的描述,此时发生了环面分岔,标记为 TR。黑色实曲线和黑色虚曲线分别代表 ROP 相对于 a 的稳定和不稳定解。从点 P 开始,随着 a 的减小,ROP 逐渐减小至 0。当 a 从点 P 增加时,ROP 逐渐增加直至达到 TR 点。最大的 ROP 点是 TR 点。稳定周期解的范围为 $a \in (0.03, 3.051)$ 。点 P 的相平面图和时域图如图 7(b) 和 (c) 所示。

图 11 为鞍结分岔 SN 前/后周期轨迹的相平面。从图 10 可知, $a_{SN} = 0.03$ 为鞍结分岔点。当 $0.025 < a_{SN}$ 时,系统为准周期轨迹;当 $a = 0.035 > a_{SN}$ 时,庞加莱映射点为 1 个点,此时系统为周期-1 轨迹。为了使凿岩机工作在周期-1 轨迹,应该选择的振幅范围为 $a > a_{SN}$ 。

图 12 为环面分岔 TR 前/后周期轨迹的相平面。

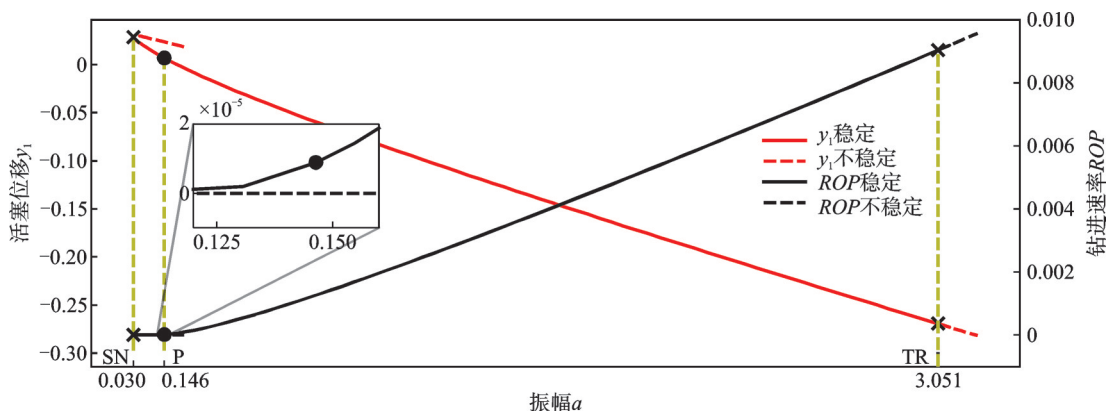


图 10 振幅的单参数延拓

Fig. 10 Single-parameter continuation with regard to amplitude

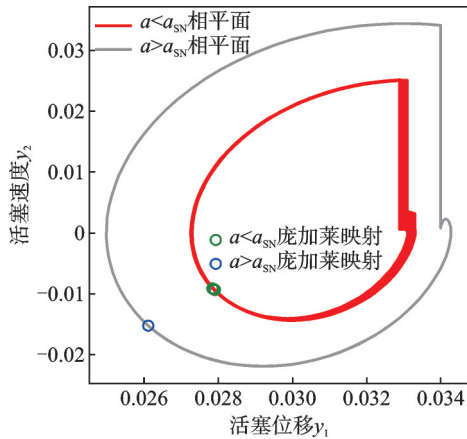


图 11 鞍结分岔 SN 前/后周期轨迹的相平面

Fig. 11 Phase portraits for the periodic orbits of before and after the saddle-node bifurcation SN

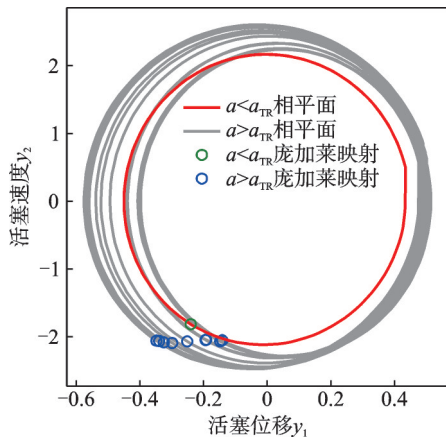


图 12 环面分岔 TR 前/后周期轨迹的相平面

Fig. 12 Phase portraits for the periodic orbits of before and after the torus bifurcation TR

从图 10 可知, $a_{TR} = 3.051$ 为环面分岔点。当 $a = 2.7 < a_{TR}$ 时, 系统为周期-1 轨迹; 当 $a = 3.1 > a_{TR}$ 时, 系统为准周期轨迹。为了使凿岩机工作在周期-1 轨迹, 应该选择的振幅范围为 $a < a_{TR}$ 。

表 5 为关于振幅的单参数延拓汇总, 总结了起始点 P 的周期和段标识, 以及稳定周期解的范围。

表 5 关于振幅的单参数延拓汇总

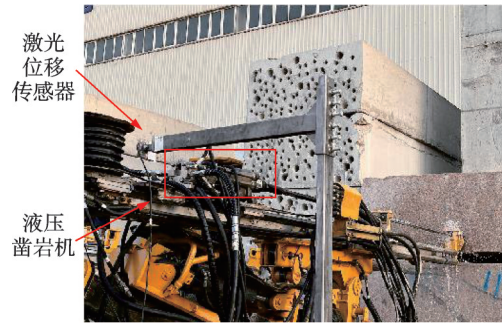
Tab. 5 Summary of single-parameter continuation with regard to amplitude

起始点	振幅	周期	段标识	稳定周期解的范围
P	0.146	1	$\{I_1, I_2\}$	(0.03, 3.051)

5 实验和模型比较

图 13 为液压凿岩机钻凿岩石的数据采集现场。激光位移传感器安装在活塞后面, 测量其位移和速度。测量结果进入电脑和数据采集系统。采样频率

为 200 kHz, 并使用了适当的抗混叠滤波器处理信号。每个运行条件下的测量时间为 2~4 s, 仅在凿岩机运行平稳状态下收集数据。



(a) 实验现场
(a) Experimental site



(b) 数据采集
(b) Data acquisition

图 13 液压凿岩机钻凿岩石的数据采集现场

Fig. 13 Data acquisition site for drilling rock with hydraulic drifter

图 14 为典型的实验和模型的活塞运动曲线, 描述了一个完整的工作循环。实验的位移和速度分别由红色和蓝色实线表示。模型的位移和速度分别由红色和蓝色虚线表示。

实验工作循环包括三个行程: 实验冲程加速 (experimental impact acceleration, EIA)、实验回程加速 (experimental return acceleration, ERA) 和实验回程减速 (experimental return deceleration, ERD)。工作循环从时间 $t = 0$ s 开始, 此时活塞位于钎尾的远端, 导致活塞后腔的压力水平较高。活塞前/后腔体之间的压差, 以及活塞控制面积的变化, 产生了一个向前的合力, 使活塞运动并启动 EIA 行程。在 $t = 0.0145$ s 时, 活塞与钎尾碰撞, 通过产生应力波将其动能转移给钻具, 从而破碎岩石。碰撞前活塞的实验速度 (标记为 B) 为 7.4 m/s, 而碰撞后活塞的实验速度 (标记为 E) 为 -0.33 m/s。活塞与钻具之间的碰撞关系由式 (2) 描述。碰撞后, 高压油施加液压作用力到活塞的前腔, 活塞进入 ERA 行程。在 $t = 0.0239$ s 时, 活塞在返回行程期间达到最大绝对速度 (标记为 G) -6.64 m/s。随后, 高压油进入活

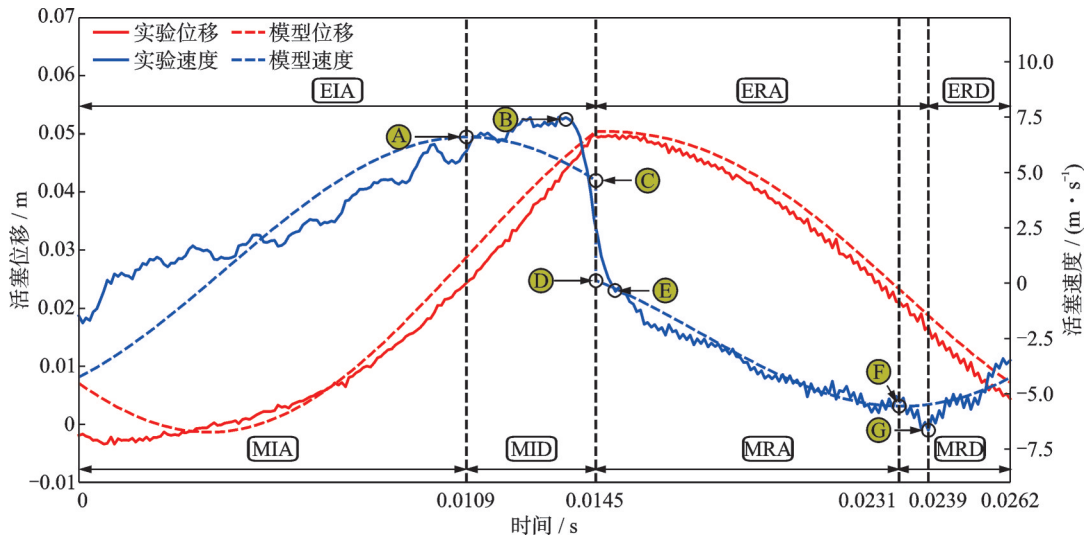


图14 实验和模型的活塞运动的比较

Fig. 14 Comparison of piston motion between experiment and model

塞的后腔,导致活塞的合力和速度方向相反,活塞进入ERD冲程。

模型工作循环包括四个行程:模型冲程加速(model impact acceleration, MIA)、模型冲程减速(model impact deceleration, MID)、模型回程加速(model return acceleration, MRA)和模型回程减速(model return deceleration, MRD)。可以看到,与实验工作循环不同的是,模型工作循环多了一个额外的行程,为MID行程。可以在 $t=0.0109$ s时观察到模型的最大速度(标记为A)为6.6 m/s。在活塞与钎尾碰撞之前,活塞经历了减速。这是因为液压作用力与活塞运动方向相反。在 $t=0.0145$ s时,活塞与钎尾碰撞。碰撞前活塞的速度(标记为C)为4.64 m/s,碰撞后活塞的速度(标记为D)为0.11 m/s。在 $t=0.0231$ s时,活塞在返回行程期间达到最大绝对速度(标记为F)−5.55 m/s。

6 结论

(1) 介绍了液压凿岩机的原理,将凿岩机钻进岩石的过程建立成三自由度干摩擦力岩石模型。将凿岩机的作业过程分为“非粘滞-非钻进”“非粘滞-钻进”“粘滞-非钻进”和“粘滞-钻进”。利用无量纲化方法,将模型简化成紧凑形式。

(2) 将非线性分段光滑动力系统数学模型的周期轨迹分段成“非粘滞碰撞”“非粘滞 2π ”和“粘滞 2π ”。为了评估液压凿岩机的性能,引入了ROP的概念。

(3) 利用拟弧长延拓法和Floquet理论,将液压作用力的角频率作为控制参数,发现了倍周期分岔PD1和PD2,为了使凿岩机工作在周期-1轨迹,应该

选择的角频率范围为 $\omega < 6.814$,当 $\omega = 2.895$ 时,模型得到最大钻进速率;将液压作用力的振幅作为控制参数,发现了鞍结分岔SN和环面分岔TR,为了使凿岩机工作在稳定周期轨迹,应该选择的振幅范围为 $0.03 < a < 3.051$ 。

(4) 介绍了液压凿岩机钻凿岩石的数据采集系统,比较了模型和实验测得的活塞的位移和速度。实验和模型数据基本吻合,但是与实验相比,模型多了一个冲击减速行程。

参考文献:

- [1] CAVANOUGH G L, KOCHANEK M, CUNNINGHAM J B, et al. A self-optimizing control system for hard rock percussive drilling[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(2): 153-157.
- [2] OH J Y, LEE G H, KANG H S, et al. Modeling and performance analysis of rock drill drifters for rock stiffness[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(12): 2187-2193.
- [3] OH J Y, SONG C H, KIM D J, et al. Numerical investigation of performance of hydraulic percussion drifter[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(7): 879-885.
- [4] HU Q, YANG C H, ZHENG H, et al. Dynamic simulation and test research of impact performance of hydraulic rock drill with no constant-pressurized chamber[J]. Automation in Construction, 2014, 37: 211-216.
- [5] SONG C H, KWON K B, PARK J Y, et al. Optimum design of the internal flushing channel of a drill bit using RSM and CFD simulation[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(6): 1041-1050.

- [6] SONG C H, KWON K B, CHO M G, et al. Development of lab-scale rock drill apparatus for testing performance of a drill bit[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(7): 1405-1414.
- [7] SONG C, CHUNG J, KIM J H, et al. Design optimization of a drifter using the Taguchi method for efficient percussion drilling[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(4): 1797-1803.
- [8] SEO J, NOH D K, LEE G H, et al. A percussion performance analysis for rock-drill drifter through simulation modeling and experimental validation[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, 17(2): 163-170.
- [9] GUO Y, LIU D S, YANG S Y, et al. Hydraulic-mechanical coupling modeling by bond graph for impact system of a high frequency rock drill drifter with sleeve distributor[J]. *Automation in Construction*, 2016, 63: 88-99.
- [10] YANG S Y, OU Y B, GUO Y, et al. Analysis and optimization of the working parameters of the impact mechanism of hydraulic rock drill based on a numerical simulation[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(7): 971-977.
- [11] 耿晓光, 马飞, 马威, 等. 重型双缓冲液液压凿岩机冲击无力问题试验[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(5): 1051-1056.
- GENG Xiaoguang, MA Fei, MA Wei, et al. Experimental on impact powerless of heavy hydraulic rock drill with double damper system[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(5): 1051-1056.
- [12] 耿晓光, 马威, 马飞, 等. 重型液液压凿岩机双缓冲系统特性分析与实验[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(12): 227-234.
- GENG Xiaoguang, MA Wei, MA Fei, et al. Characteristic analysis and experiments of double-damper systems for heavy hydraulic rock drills[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(12): 227-234.
- [13] YANG Z Y, JI H, LI Y G. Existence scope of only primary vibration within one impact period of a hydraulic drifter piston via point transformation[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2018, 12(7): JAMDSM0123.
- [14] YANG Z Y, JI H, LI Y G. Analysis on the main design parameters influencing the impact efficiency of dual-chamber-controlled hydraulic drifter[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(12): 1781-1791.
- [15] LI Y L, LUO Y X, WU X. Fault diagnosis research on impact system of hydraulic rock drill based on internal mechanism testing method[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018(1): 4928438.
- [16] LI Y L, BIN Z, TU Y. Research on impact performance of hydraulic rock drill with floating characteristics of double damping system[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019(1): 2942890.
- [17] LI Y L, TU Y, ZENG B, et al. Research on correction method of inertia factor of starting section of gap flow opening in hydraulic rock drill[J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 22(2): 326-341.
- [18] SHAH K H. Electrically controlled hydraulic rock drill [D]. Tampere: University of Tampere, 2019.
- [19] LI H S, LIU S Y, CHANG H H. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 95: 103174.
- [20] JAKOBSSON E, FRISK E, PETERSSON R, et al. A dataset for fault classification in rock drills, a fast oscillating hydraulic system[J]. *Annual Conference of the PHM Society*, 2022, 14(1): 1-6.
- [21] JAKOBSSON E, FRISK E, KRYSANDER M, et al. Time series fault classification for wave propagation systems with sparse fault data[EB/OL]. (2022-03-30) [2024-03-19]. <https://arXiv.org/abs/2203.16121v1>.
- [22] SHEN Q, WANG Y J, CAO R L, et al. Efficiency evaluation of a percussive drill rig using rate-energy ratio based on rock drilling tests[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 217: 110873.
- [23] LING H X, GAO T, GONG T, et al. Hydraulic rock drill fault classification using X-Vectors[J]. *Mathematics*, 2023, 11(7): 1724.
- [24] HASHIBA K, FUKUI K, LIANG Y Z, et al. Force-penetration curves of a button bit generated during impact penetration into rock[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 85: 45-56.
- [25] LUNDBERG B, COLLET P. Optimal wave with respect to efficiency in percussive drilling with integral drill steel[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 901-906.
- [26] LUNDBERG B, COLLET P. Optimal wave shape with respect to efficiency in percussive drilling with detachable drill bit[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 179-187.
- [27] KRIVTSOV A M, WIERCIGROCH M. Dry friction model of percussive drilling[J]. *Meccanica*, 1999, 34(6): 425-434.
- [28] KRIVTSOV A M, WIERCIGROCH M. Penetration rate prediction for percussive drilling via dry friction model[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2000, 11(15): 2479-2485.
- [29] PAVLOVSKAIA E, WIERCIGROCH M, GREBOGI C. Modeling of an impact system with a drift[J].

- Physical Review E, 2001, 64(5): 056224.
- [30] PAVLOVSKAIA E, WIERCIGROCH M, WOO K C, et al. Modelling of ground moling dynamics by an impact oscillator with a frictional slider[J]. *Meccanica*, 2003, 38(1): 85-97.
- [31] PAVLOVSKAIA E, HENDRY D C, WIERCIGROCH M. Modelling of high frequency vibro-impact drilling[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 91: 110-119.
- [32] AJIBOSE O K, WIERCIGROCH M, PAVLOVSKAIA E, et al. Global and local dynamics of drifting oscillator for different contact force models[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2010, 45(9): 850-858.
- [33] AJIBOSE O K, WIERCIGROCH M, PAVLOVSKAIA E, et al. Drifting impact oscillator with a new model of the progression phase[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2012, 79(6): 061007.
- [34] AJIBOSE O K, WIERCIGROCH M, AKISANYA A R. Experimental studies of the resultant contact forces in drillbit-rock interaction[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 91: 3-11.
- [35] PÁEZ CHÁVEZ J, PAVLOVSKAIA E, WIERCIGROCH M. Bifurcation analysis of a piecewise-linear impact oscillator with drift[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 77(1): 213-227.
- [36] PÁEZ CHÁVEZ J, VAZIRI HAMANEH V, WIERCIGROCH M. Modelling and experimental verification of an asymmetric Jeffcott rotor with radial clearance[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 334: 86-97.
- [37] LIAO M L, ING J, SAYAH M, et al. Dynamic method of stiffness identification in impacting systems for percussive drilling applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 80: 224-244.
- [38] LIAO M L, SU Y N, ZHOU Y C. Oscillation reconstruction and bifurcation analysis of a drillbit-rock vibro-impact system[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2017, 27(1): 1750013.
- [39] LIAO M L, LIU Y, PÁEZ CHÁVEZ J, et al. Dynamics of vibro-impact drilling with linear and nonlinear rock models[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 146: 200-210.
- [40] LIAO M L, WIERCIGROCH M, SAYAH M, et al. Experimental verification of the percussive drilling model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 107067.
- [41] THOTA P. Analytical and computational tools for the study of grazing bifurcations of periodic orbits and invariant tori[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [42] KANG W, THOTA P, WILCOX B, et al. Bifurcation analysis of a microactuator using a new toolbox for continuation of hybrid system trajectories[J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2009, 4(1): 011009.
- [43] NAYFEH A H, BALACHANDRAN B. *Applied Nonlinear Dynamics: Analytical, Computational, and Experimental Methods*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [44] 吕小红, 罗冠炜. 含间隙振动系统周期振动的多样性和转迁特征[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(4): 688-697.
- LYU Xiaohong, LUO Guanwei. Diversity and transition characteristics of periodic vibration of a vibro-impact system with a clearance[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(4): 688-697.
- [45] 吕小红, 张开成, 朱喜锋, 等. 两自由度碰撞振动系统的两参数非光滑分岔[J]. *振动工程学报*, 2023, 36(1): 107-115.
- LYU Xiaohong, ZHANG Kaicheng, ZHU Xifeng, et al. Two-parameter non-smooth bifurcations of a 2-DOF impact oscillator[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2023, 36(1): 107-115.

通信作者: 马威(1987—),男,博士,讲师。

E-mail:maweiustb@163.com