◀钻井技术与装备▶

油气井钻柱轴-扭双向振动LQR控制研究*

李欣业[1] 张文博[1] 郭晓强[1] 张文学[1] Ye Chengyang[2]
（1. 河北工业大学机械工程学院 2. College of Mechanical, Aerospace and Automotive Engineering, Polytechnic University of Turin）

李欣业，张文博，郭晓强，等. 油气井钻柱轴-扭双向振动LQR控制研究［J］. 石油机械，2025，53（10）：86-95.

Li Xinye, Zhang Wenbo, Guo Xiaoqiang, et al. LQR control of axial-torsional bidirectional vibration of drill string in oil and gas wells［J］. China Petroleum Machinery, 2025, 53（10）: 86-95.

摘要：为有效解决钻柱轴-扭双向振动引发的失效问题，借助钻杆3自由度动力学模型，开展了线性二次型调节器LQR控制对钻柱轴向振动和扭转振动抑制效果的仿真研究。根据LQR控制策略分别设计了扭转和轴向反馈控制器，模拟分析了无反馈控制器、只施加扭转反馈控制器、只施加轴向反馈控制器以及同时施加扭转和轴向反馈控制器4种情况下工作参数对系统响应的影响，并将双向LQR控制与顶驱控制的仿真结果进行了对比分析。研究结果表明：只有当同时施加扭转方向和轴向的LQR反馈控制时，钻柱的黏滑运动和跳钻才均被有效抑制；对比顶驱控制，基于LQR控制策略设计的轴-扭双向反馈控制器对系统的振动控制效果更好。研究结论可为钻柱振动控制研究提供理论参考。

关键词：钻柱轴-扭耦合振动；LQR控制；3自由度模型；输入角速度；轴向相对位移
中图分类号：TE92 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202407048

LQR Control of Axial-Torsional Bidirectional Vibration of Drill String in Oil and Gas Wells

Li Xinye[1] Zhang Wenbo[1] Guo Xiaoqiang[1] Zhang Wenxue[1] Ye Chengyang[2]
（1. *School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology*; 2. *College of Mechanical, Aerospace and Automotive Engineering, Polytechnic University of Turin*）

Abstract: To effectively solve the failure problem induced by axial-torsional bidirectional vibration of drill string, with the help of the 3-DOF dynamics model of drill pipe, a simulation study was performed on the suppression of linear quadratic regulator (LQR) control on the axial vibration and torsional vibration of drill string. First, based on the LQR control strategy, torsional and axial feedback controllers were designed. Second, the influences of working parameters on the response of the system were simulated under four conditions (without feedback controller, with only torsional feedback controller, with only axial feedback controller, and with both torsional and axial feedback controllers). Finally, the simulation results of LQR control and top drive control were compared. The results show that the stick slip of drill string and bounce of bit are effectively suppressed only when both axial and torsional feedback controllers are applied. The axial-torsional feedback controller designed based on the LQR control strategy is better performed than the top drive control. The study results provide theoretical reference for

* 基金项目：国家自然科学基金项目“深海天然气水合物固态流化开采立管气-液-固三相流致振动特性研究”（52105125）、“超深水双梯度无隔水管全井钻柱系统多场耦合非线性振动特性研究”（12472009）、“钻杆纵-扭耦合非线性振动及其控制研究”（11972145）。

investigating the vibration control of drill string.

Keywords: axial-torsional bidirectional vibration of drill pipe; LQR control; 3-DOF dynamics model; input angular velocity; axial relative displacement

0　引　言

钻柱在钻井系统中起着重要作用，现场观测表明，钻井过程中钻柱会出现剧烈的振动现象——轴向振动、扭转振动和横向振动，这将分别导致跳钻、黏滑和涡动现象，严重降低钻井能量的有效传递。因此，有必要提出相应的振动控制方法，减少钻杆失效事故和提高机械钻速。

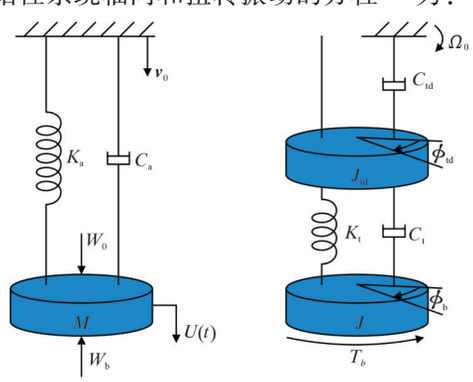
钻柱振动及控制问题一直受到国内外学者的关注，并开展了大量的研究。J. D. JANSEN 等[1]提出一种主动阻尼系统用于扭转集总参数模型，只用电气元件来实现，以调谐顶驱的方式来抑制自激振动。A. S. YIGIT 等[2]对前面模型进行修正得到轴-扭耦合的 3 自由度模型，并设计了一种状态反馈控制器。M. ZAMANIAN 等[3]考虑了转盘、钻井液阻尼和主动阻尼系统的影响，得到一个具有 2 个扭转自由度和 1 个纵向自由度的轴-扭耦合集总参数模型。I. BOUSSAADA 等[4]基于含有状态时滞的钻柱轴扭耦合振动模型，又考虑了反馈时滞的影响，讨论了 PID 控制对钻柱振动的抑制效果。E. Z. LOSOYA 等[5]通过试验证实，利用 PID 控制可以有效实现对钻压和钻柱转速的实时控制。ZHANG X.[6]基于钻柱的轴扭振动，设计了一种针对扭转振动的 PD 反馈控制器和一个用来估计轴向运动的状态观测器，取得了良好的控制效果。F. ZRIBI 等[7]为了消除系统的黏滑振动，设计了一种鲁棒控制器，将钻头速度保持在所需速度，并且实现了控制器性能试验验证。姜寅令等[8]提出了基于改进粒子群优化 PID 参数的鲁棒控制器，抑制钻头的黏滑振动，利用 Matlab/Simulink 建立模型仿真进行数值分析，并且设计模拟钻头卡钻试验。A. P. CHRISTOFOROU 等[9]、S. M. MODELING[10]、张奇志等[11]都基于钻柱轴扭耦合振动模型，设计了线性二次型调节器 LQR（linear quadratic regulator）控制器，该控制器能有效地减轻跳钻和黏滑现象。J. D. J. MACLEAN 等[12]提出了一种改进的带跟踪器的积分谐振控制器，能够有效抑制黏滑运动。LU C. D. 等[13]使用二阶贝塞尔-勒让德积分不等式，提供了延迟相关的充分条件，以设计一个具有抗振补偿器的适当动态输出反馈控制器用于振动抑制。A. N. SADEGHI 等[14]对钻柱扭转振动的控制提出了通过调节转盘转速、钻压和底部阻尼来进行黏滑运动控制，从而保证对黏滑运动具有更好的控制效果。陆承达等[15]对地质钻进过程智能控制的研究与发展进行了综述，展望了未来要突破地质钻进过程智能控制将面临的关键科学问题，为资源勘探和开发提供了技术支撑。

综上所述，针对钻柱轴-扭耦合振动诱发的失效问题，考虑钻柱的轴-扭耦合效应，采用钻头-岩石相互作用模型，建立了钻柱轴扭耦合振动系统的 3 自由度模型，设计了针对轴向振动和扭转振动的 LQR 控制器，并将 LQR 反馈控制与顶驱控制的仿真结果进行了对比分析，探究了 2 种控制方式对钻柱振动的控制效果。

1　3 自由度动力学模型

假设转盘由一个通过变速箱的电枢控制直流电机驱动，基于线性二次型调节器设计反馈控制器，将 LQR 反馈控制器产生的边界条件简化为 1 个单自由度边界条件，建立含有基于 LQR 控制策略设计反馈控制器的 3 自由度集总参数模型（见图 1）。为便于观察与分析，将轴向单自由度以及扭转 2 自由度分开表示。图 1a 为轴向单自由度物理模型。其中 $\boldsymbol{U}$ 为钻头的绝对轴向位移，m；$\boldsymbol{v}_0$ 为恒定的轴向进给速度，m/s。图 1b 为扭转 2 自由度物理模型，其中 $\boldsymbol{\phi}_{td}$ 和 $\boldsymbol{\phi}_b$ 分别为转盘和钻头的角位移，rad；$\boldsymbol{\Omega}_0$ 为转盘恒定的输入角速度，rad/s。

钻柱系统轴向和扭转振动的方程[16]为：



a. 轴向单自由度模型　　b. 扭转2自由度模型

图 1　钻柱 3 自由度系统的物理模型

Fig. 1　Physical model of 3-DOF system of drill string

$$\begin{cases} M\ddot{U} + C_a\dot{U} + K_a(U - v_0 t) = W_0 - W_b \\ J\ddot{\phi}_b + C_t\dot{\phi}_b + K_t(\phi_b - \phi_{td}) = -T_b \\ J_{td}\ddot{\phi}_{td} + C_{td}\dot{\phi}_{td} + K_t(\phi_{td} - \phi_b) - nT_m = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中：

$$J_{td} = J_{rt} + n^2 J_m \tag{2}$$

$$\begin{cases} T_m = K_m I \\ L\dot{I} + R_m I + K_m n\dot{\phi}_{td} = V_c \\ V_c = K_m n\Omega_0 \end{cases} \tag{3}$$

$$W_b = \begin{cases} K_c\left[\dfrac{W_0}{K_c} + U - v_0 t - s_0\sin(n_b\phi_b)\right], \\ \text{if } \left(\dfrac{W_0}{K_c} + U - v_0 t\right) \geqslant s_0\sin(n_b\phi_b) \\ 0, \text{if } \left(\dfrac{W_0}{K_c} + U - v_0 t\right) < s_0\sin(n_b\phi_b) \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} T_b = W_b\left[\dfrac{2}{3}r_b\mu(\dot{\phi}_b) + \xi\sqrt{r_b\delta_c}\right] \\ \mu(\dot{\phi}_b) = \dfrac{2}{\pi}\arctan(\varepsilon\dot{\phi}_b)\left(\dfrac{f_1 - f_0}{1 + \delta|\dot{\phi}_b|} + f_0\right) \\ \delta_c = \dfrac{2\pi R_p}{\Omega_0} \\ R_p = C_1 W_0\sqrt{\Omega_0} + C_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中：M为钻柱的等效质量，kg；$\ddot{U}$为钻头轴向加速度，m/s²；K_a为钻柱的纵向刚度，N/m；C_a为钻柱的纵向阻尼，N·s/m；$\dot{U}$为钻头轴向速度，m/s；K_t为钻杆的扭矩，N·m；C_t为钻杆的角动量，N·m·s；C_{td}为变速箱的角动量，N·m·s；W_0为初始钻压，N；W_b为钻柱工作时钻头受到的钻压，N；T_b为钻柱工作时受到的扭矩，N·m；J为集中转动惯量，kg·m²；$\ddot{\phi}_b$为钻头角加速度，rad/s²；$\dot{\phi}_b$为钻头角速度，rad/s；J_{td}为转盘侧的总转动惯量，kg·m²；$\ddot{\phi}_{td}$为转盘角加速度，rad/s²；$\dot{\phi}_{td}$为转盘角速度，rad/s；J_{rt}为转盘的转动惯量，kg·m²；J_m为电机转轴的转动惯量，kg·m²；n为变速箱的齿轮传动比；T_m为电机驱动转盘的扭矩，N·m；K_m为电机常数，N·m/A；I为直流电机的电枢电流，A，其取决于电机的运行特性，此处为激励直流电机；L为直流电机的电枢电感，H；R_m为直流电机的电枢电阻Ω；V_c为钻柱系统直流电机输入电压，V；K_c为地层接触刚度，N/m；s_0为初始切削深度，m；n_0为钻头系数，选用PDC钻头，n_b=1；r_b为钻头半径，m；δ_c为切削深度，m；$\mu(\dot{\phi}_b)$为摩擦函数[17]，用于表征钻头与地层之间的摩擦行为；ε为钻头切削摩擦因数，f_1为静摩擦因数，f_0为动态摩擦因数，δ为摩擦因数，无量纲；ξ为切削系数，由钻头类型决定，无量纲；R_p为初始钻压W_0、输入角速度Ω_0和钻头岩石特性的函数；C_1和C_2分别为钻头摩擦相关系数和钻头切削相关系数。

采用Runge-Kutta法对钻柱轴-扭耦合非线性振动系统控制方程进行数值计算，同时借助MATLAB进行编程计算，可获得钻柱系统轴向和扭转振动响应数据。

2　LQR控制器设计

根据LQR应用工程实例，总结LQR最优控制器的一般设计步骤如下[18-19]：

（1）求取被控系统的状态空间表达式；

（2）根据被控系统，明确被控系统的性能指标函数中的参数，即被控系统的状态变量X和系统输入U；

（3）根据控制系统的被控对象选取合适的状态加权系数矩阵Q和控制加权系数矩阵R，多次试验得到满足控制系统要求的参数Q和R；

（4）用MATLAB计算求解Riccati方程求解矩阵P；

（5）用MATLAB计算求解反馈增益矩阵K；

（6）判断求得的反馈增益矩阵K是否满足控制系统要求，若否则返回第（3）步重新操作，若是则设计完毕。

LQR最优控制的设计流程图如图2所示。

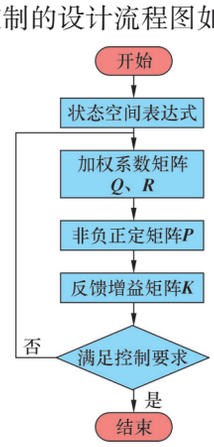


图2　LQR最优控制的设计流程图[19]

Fig. 2　Design flow chart of LQR optimal control[19]

基于LQR控制原理，对式（1）中的式（1-2）、（1-3）和式（3）中的式（3-2）进行线性化处理得到钻柱系统的控制微分方程：

$$\begin{cases} J\ddot{\phi}_b = -C_t\dot{\phi}_b - K_t(\phi_b - \phi_{td}) - T_b \\ J_{td}\ddot{\phi}_{td} = -C_{td}\dot{\phi}_{td} - K_t(\phi_{td} - \phi_b) + nK_m I \\ L\dot{I} = V_c - R_m I + K_m n\dot{\phi}_{td} \end{cases} \tag{6}$$

令 $x_1=\phi_b$，$x_2=\phi_{td}$，$x_3=\dot{\phi}_b$，$x_4=\dot{\phi}_{td}$，$x_5=I$，则式（6）可以写成如下矩阵形式：

$$\dot{X}=AX+BV_c \tag{7}$$

其中：

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\dfrac{K_t}{J} & \dfrac{K_t}{J} & -\dfrac{C_t}{J} & 0 & 0 \\ \dfrac{K_t}{J_{rt}+n^2J_m} & -\dfrac{K_t}{J_{rt}+n^2J_m} & 0 & -\dfrac{C_{td}}{J_{rt}+n^2J_m} & \dfrac{nK_m}{J_{rt}+n^2J_m} \\ 0 & 0 & 0 & -\dfrac{nK_m}{L} & -\dfrac{R_m}{L} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$B=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 1/L\end{bmatrix}^T \tag{9}$$

式中：X为状态向量，$X=\begin{bmatrix}\phi_b & \phi_{td} & \dot{\phi}_b & \dot{\phi}_{td} & I\end{bmatrix}^T$；$A$为系数矩阵；$B$为输入矩阵。

选取如下的性能指标函数：

$$J=\frac{1}{2}\int_0^\infty\left(X^TQX+RV_c^{\ 2}\right)\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中：Q为状态加权系数矩阵；R为控制加权系数矩阵。

矩阵P满足 Ricatti 方程：

$$PA+A^TP-PBR^{-1}B^TP+C^TQC=0 \tag{11}$$

式中：P为 Riccati 方程的解矩阵；C为输出矩阵。

通过式（11）求解P，可得反馈增益矩阵：

$$K=R^{-1}B^TP \tag{12}$$

系统的控制律为：

$$V_c=K_mn\Omega+K\left(x-x_d\right) \tag{13}$$

式中：Ω为钻头的角速度，rad/s。

在工程实际中，通常选取Q和R为对角矩阵。在该系统中，R和Q分别选取为 950 和

$$Q=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 2\,000 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 85\,000 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 95\,000\end{bmatrix}$$

将其代入 Ricatti 方程求出矩阵P后，根据式（12）可得反馈增益矩阵为：

$$K=\begin{bmatrix}K_1 & K_2 & K_3 & K_4 & K_5\end{bmatrix} \tag{14}$$

由式（14）转化可得K=［-21.2　20.16　26.83　35.16　0.033］。

根据式（13），在保证钻头和转盘以期望的转速转动的同时，保持扭转振动为零所需的控制电压为：

$$\begin{aligned}V_c=&K_mn\Omega-K_1\left(\phi_b-\phi_{td}\right)-K_2\left(\phi_{td}-\Omega t\right)\\&-K_3\left(\dot{\phi}_{td}-\Omega\right)-K_4\left(\dot{\phi}_b-\Omega\right)-K_5I\end{aligned} \tag{15}$$

同理，设计钻柱轴向状态反馈控制器时，主动控制轴向振动需要操纵大钩载荷F_h，初始钻压的表达式为：

$$W_0=Mg-F_h \tag{16}$$

式中：M为钻柱的质量，kg。

与上述过程类似，为对式（1）中的第 1 个方程进行线性化处理，令$y_1=U$，$y_2=\dot{U}$，则其可转化为：

$$\begin{cases}\dot{y}_1=y_2\\ \dot{y}_2=-\dfrac{K_a}{M}y_1-\dfrac{C_a}{M}y_2-\dfrac{1}{M}F_h\end{cases} \tag{17}$$

将上式转换为状态空间表达式：

$$\dot{Y}=CY+DF_h \tag{18}$$

式中：Y为状态向量，$Y=\begin{bmatrix}y_1 & y_2\end{bmatrix}$；$C$为系数矩阵，$C=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -\dfrac{K_a}{M} & -\dfrac{C_a}{M}\end{bmatrix}$；$D$为输入矩阵，$D=\begin{bmatrix}0 & -\dfrac{1}{M}\end{bmatrix}^T$。

R和Q分别选取为 720 和 $Q=\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 100\end{bmatrix}$，根据 Riccati 方程求出矩阵$P$后，由式（12）得反馈增益矩阵：

$$K=\begin{bmatrix}K_6 & K_7\end{bmatrix} \tag{19}$$

由式（19）转换可得K=［102 160.06　962.59］。

钩载控制的表达式为：

$$F_h=Mg-W_0+K_6\left(U-v_dt\right)+K_7\dot{U} \tag{20}$$

式中：v_d为大钩速度，m/s。

3　控制机理分析

借助前面建立的钻柱轴-扭振动模型和 LQR 控制器，设置不同的控制方式，开展钻柱轴-扭振动控制机理研究，具体参数（见表 1）主要依据文献［16］获得。

3.1　无控制钻杆的轴向与扭转振动

在输入角速度和给定标称钻压分别为 6.28 rad/s 和 75 kN 时，钻柱振动系统的响应如图 3 所示。从图 3 可见：钻压和扭矩的波动范围较大，在前 10 s 内，出现了$W_b=0$的情况，与此相对应的钻头轴向相对位移为 7.3 mm，这表明钻头与地层失去了接触，导致钻柱振动系统出现了跳钻现象；转盘的驱动角速度和输入角速度相同，而钻头的角速度波动范围为 0~13.67 rad/s，钻头角速度的完整波形先是减小至 0 后又逐渐增大到峰值，体现了钻头由黏滞阶段到滑脱阶段的过程。

表 1　钻柱旋转系统的相关参数

Table 1　Relevant parameters of drill string rotation system

参　数	数值	参　数	数值
等效质量/kg	34 000	电枢电阻/Ω	0.01
轴向刚度/(N·m^{-1})	580 000	电枢电感/H	0.005
轴向阻尼/(N·s·m^{-1})	30 000	初始切削深度/m	0.001
变速箱的阻尼/(N·s·m^{-1})	0	钻头半径/m	0.108
集中转动惯量/(kg·m^2)	415	摩擦因数	2
电机常数/(N·m·A^{-1})	6	动态摩擦参数	1
扭转刚度/(N·m·rad^{-1})	938	切削系数	1
扭转阻尼/(N·s·m·rad^{-1})	3.75	齿轮传动比	7.2
地层接触刚度/(N·m^{-1})	10^8	钻头系数	1
转盘的转动惯量(kg·m^2)	930	静摩擦参数	1.6
电机转轴转动惯量/(kg·m^2)	23	钻头摩擦相关系数	1.35×10^{-8}
钻头切削摩擦因数	60	钻头切削相关系数	1.9×10^{-4}

3.2　只施加扭转状态反馈控制器

扭转状态反馈控制器主要控制钻柱的转速达到所需要的值，以实现钻柱扭转振动控制的目标。钻柱振动系统加入扭转反馈控制器后（Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN）的响应如图 4 所示。从图 4 可见：在系统响应稳定下来之后，钻压在标称钻压 75 kN 附近略有波动，轴向相对位移的最大值为 2 mm（见图 4a 和图 4c）；钻头的绝对角速度在输入角速度 6.28 rad/s 附近略有波动，放大钻头绝对角速度 40~50 s 阶段曲线，发现钻头角速度的波动范围不超过 0.2 rad/s（见图 4d）。而且相比较于图 3，钻压和扭矩的波动范围均明显减小，轴向最大相对位移相比于控制前减小 73.6%，钻柱的扭转相对角位移也逐渐趋于稳定，钻柱振动系统的跳钻现象和黏滑振动均被有效抑制。

钻柱振动系统在施加扭转反馈控制器后（Ω_0=10.47 rad/s，W_0=75 kN）的响应如图 5 所示。从图 5 可见：增大输入角速度后，相比于图 4a，在系统响应的前 20 s 内，出现了 W_b = 0 的情况，这表示钻头与井底接触不稳定，钻头与井底失去接触，系统发生了跳钻现象，与此相对应的轴向相对位移为 16 mm；但在 20 s 之后，即系统响应稳定之后，尽管钻压、扭矩和轴向相对位移的响应波动范围也比较大，但振动的振幅都有所降低。

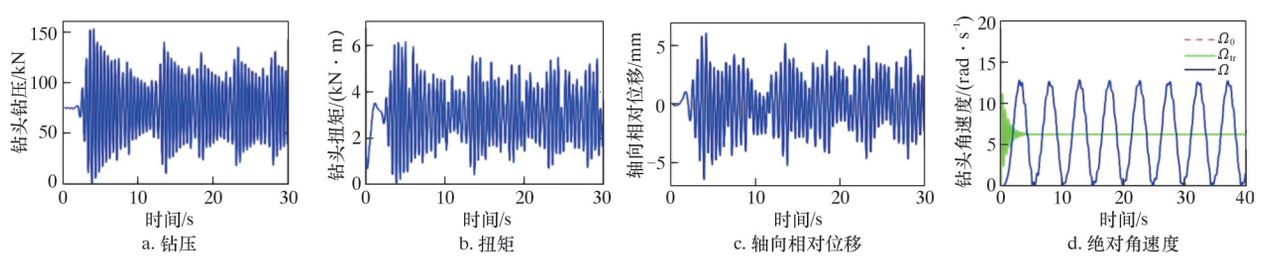


图 3　钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN）

Fig. 3　Response curve of drill string vibration system（Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN）

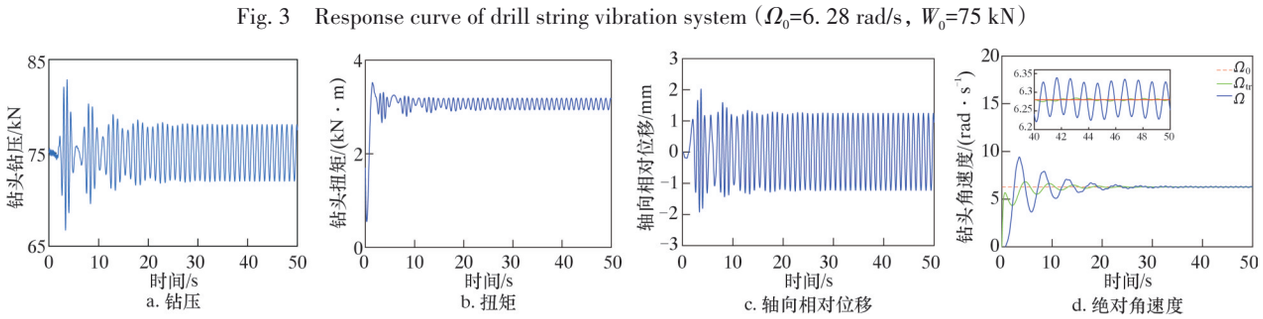


图 4　加入扭转反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN）

Fig. 4　Response curve of drill string vibration system with added torsinal feedback controller（Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN）

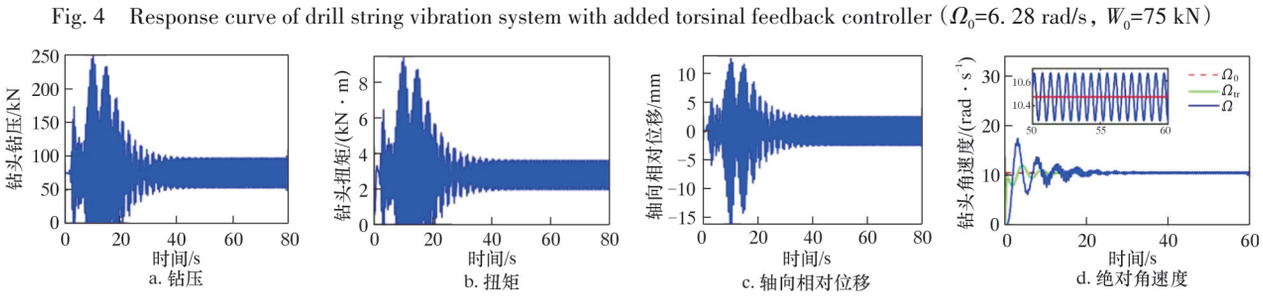


图 5　加入扭转反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=10.47 rad/s，W_0=75 kN）

Fig. 5　Response curve of drill string vibration system with added torsinal feedback controller（Ω_0=10.47 rad/s，W_0=75 kN）

钻柱振动系统在施加扭转反馈控制器后（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=120 kN）的响应如图 6 所示。将图 6 与图 5 相比较可以观察到：系统响应达到稳定状态所需时间变长，在系统响应的前 55 s 内，仍会出现 W_b = 0 的现象，这表明跳钻现象依旧存在，而且由于钻头反弹使得钻压和扭矩达到了非常大的值，但相较于图 5a，跳钻现象有所减缓；在系统响应稳定之后，由于输入角速度和初始钻压的增大，使得系统各项响应的波动范围均有所增大，放大钻头绝对角速度 50~60 s 的时间历程曲线图可以发现，钻头角速度的波动范围大小为 1.3 rad/s，与图 5d 同时间段的响应波动范围（0.45 rad/s）相比较增大了 189%。由此可得，在系统响应达到稳定状态之后，钻柱没有出现黏滑和跳钻现象。

钻柱振动系统在施加扭转反馈控制器后（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=160 kN）的响应如图 7 所示。图 7 与图 6 相比可以发现，尽管前 40 s 内跳钻现象有所减小，但仍旧存在，且钻压和扭矩的波动范围比较大，钻压最大达到了 400 kN，相对应的轴向相对位移为 18 mm。但放大钻头绝对角速度 50~60 s 的时间历程曲线可以发现，相比较于图 6d，在输入角速度保持不变，增大标称钻压后，钻头角速度的波动范围有所减小，而轴向振动的各项响应波动范围依旧较大。

综上所述，对不同工作参数下钻柱系统的仿真结果分析发现，施加扭转反馈控制器之后的钻柱振动系统的黏滑振动被成功消除，但是钻柱的轴向振动会随着工作参数的变化而不断变化，甚至在系统响应未稳定之前出现了跳钻现象。

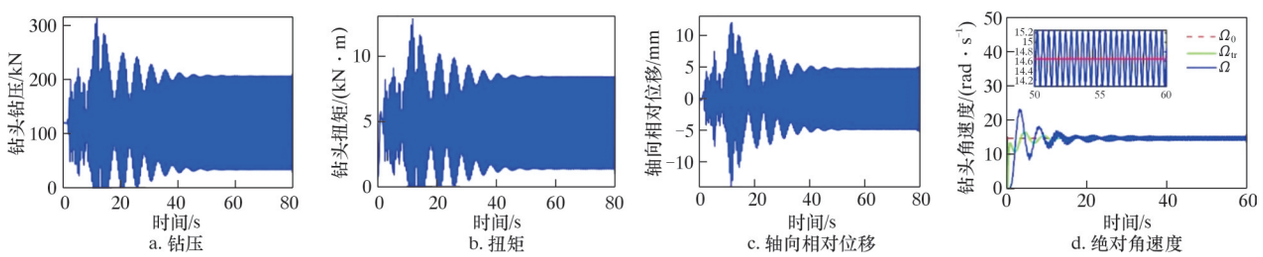


图 6　施加扭转反馈控制器后钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=120 kN）

Fig. 6　Response curve of drill string vibration system with added torsinal feedback controller（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=120 kN）

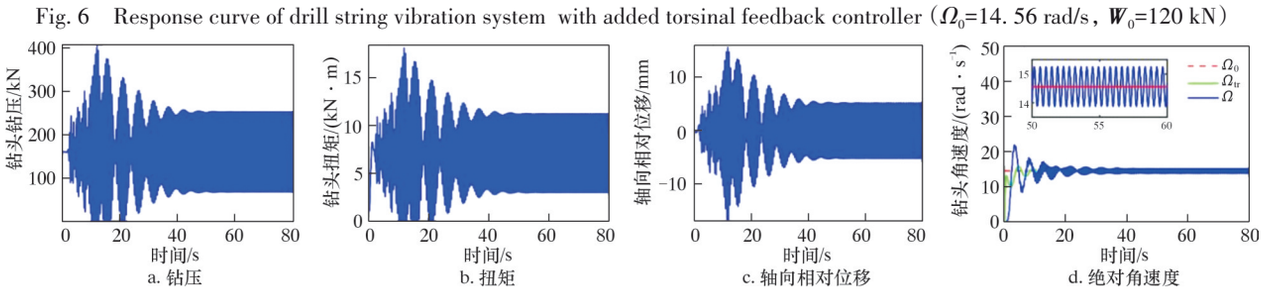


图 7　施加扭转反馈控制器后钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=160 kN）

Fig. 7　Response curve of drill string vibration system with added torsinal feedback controller（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=160 kN）

3.3　只施加轴向状态反馈控制器

钻柱纵向状态反馈控制器主要控制钻柱的钻压，实现所设置的钻压。钻柱振动系统在施加轴向反馈控制器后（Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN）的响应曲线图如图 8 所示。由图 8 可知钻压和扭矩的波动范围有所减小，轴向相对位移最大值为 0.4 mm，钻柱系统的跳钻现象被成功抑制。同时，钻柱系统也一直存在黏滑振动。从图 8d 可以看出，7 s 后系统进入稳定响应状态，转盘的驱动角速度等于输入角速度值，而钻头的角速度波动范围为 0~13.67 rad/s。钻柱振动系统在施加轴向反馈控制器后（Ω_0=10.47 rad/s，W_0=75 kN）的响应曲线图如图 9 所示。从图 9 可以看出，增大输入角速度后，相比于图 8d，转盘的驱动角速度逐渐稳定于输入角速度值，而钻头的角速度波动范围增大为 0~21.09 rad/s。添加轴向反馈控制器可以减小纵向振动位移，抑制跳钻现象的产生。钻柱振动系统在施加轴向反馈控制器后（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=160 kN）的响应曲线图如图 10 所示。图 10 与图 9 相比可知，钻压和扭矩的波动范围还是比较大，钻压最大值达到 167 kN，而钻柱系统的黏滑振动一直存在。

综上所述，对不同工作参数下钻柱系统的仿真结果分析发现，添加轴向反馈控制器之后的钻柱系统的跳钻现象被成功消除，但钻柱在系统响应未稳定之前出现了更为严重的黏滑现象。

3.4　同时施加轴向和扭转状态反馈控制器

钻柱振动系统在施加双向反馈控制器后（Ω_0=

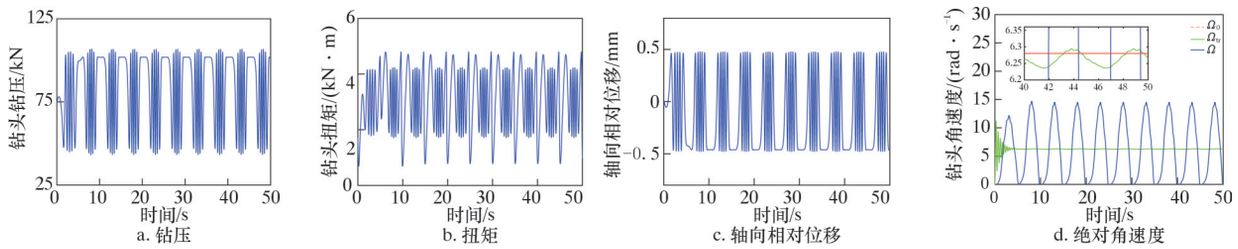


图 8　施加轴向反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线(Ω_0=6.28 rad/s，W_0=75 kN)

Fig. 8　Response curve of drill string vibration system after applying axid feedback controller (Ω_0=6.28 rad/s, W_0=75 kN)

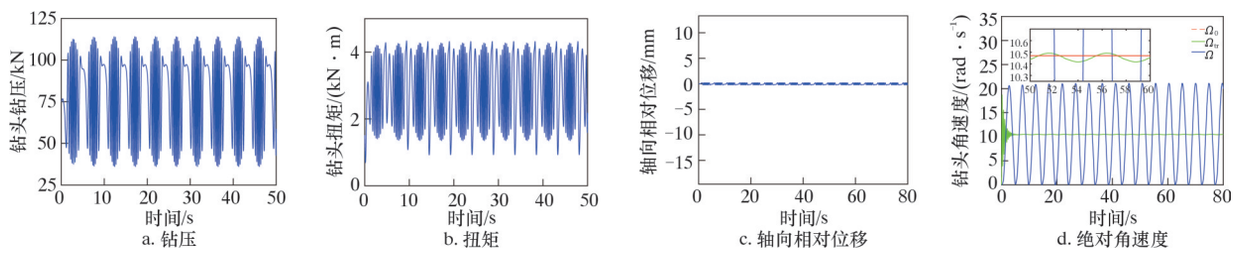


图 9　施加轴向反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线(Ω_0=10.47 rad/s，W_0=75 kN)

Fig. 9　Response curve of drill string vibration system after applying axid feedback controller(Ω_0=10.47 rad/s, W_0=75 kN)

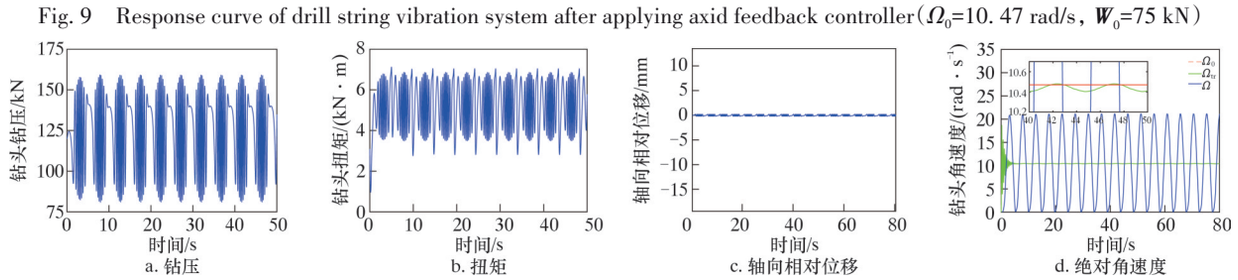


图 10　施加轴向反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线(Ω_0=14.56 rad/s，W_0=160 kN)

Fig. 10　Response curve of drill string vibration system after applying axid feedback controller(Ω_0=14.56 rad/s, W_0=160 kN)

10.47 rad/s，W_0=75 kN）的响应曲线如图 11 所示。从图 11 可见：在钻柱响应达到稳定状态以后，钻压在标称钻压附近小幅波动，扭矩的波动范围也被控制在很小的范围内，钻头的轴向相对位移波动幅度也很小；相较于图 5，与只施加扭转方向反馈控制器的钻柱相比较，系统响应达到稳定状态需要的时间缩短了约 10 s，且起始钻压就比较接近于标称钻压。这表明系统达到稳定运行状态前的跳钻现象被成功消除，最终 $W_{b\,max}$=87 kN，相较于未加入纵向反馈控制器之前减小了 13%；钻头角速度的波动范围为 10.37~10.57 rad/s，与图 5d 相比较，扭转振动也有所减轻。

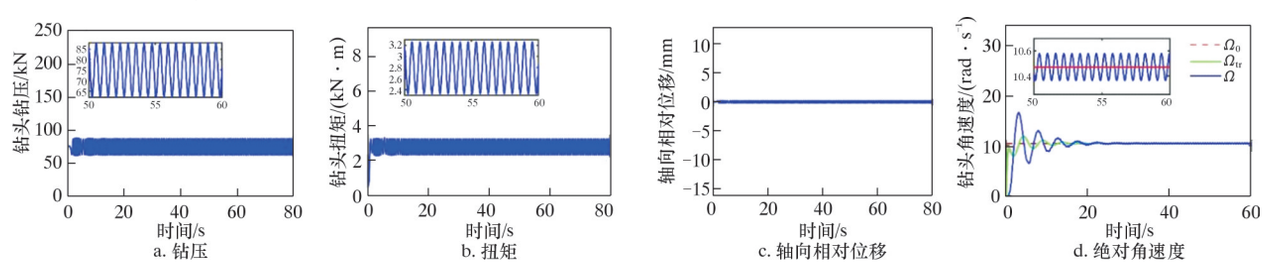


图 11　施加双向反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线(Ω_0=10.47 rad/s，W_0=75 kN)

Fig. 11　Response curve of drill string vibration system after applying bidiectional feedback controller (Ω_0=10.47 rad/s, W_0=75 kN)

在给定输入角速度和标称钻压分别为 14.56 rad/s 和 120 kN 时，钻柱振动系统在施加双向反馈控制器后的响应曲线图如图 12 所示。对比图 12 与图 6 可知，钻压和轴向振动位移的波动范围大大减小，在系统响应的前 40 s，钻压、扭矩和轴向相对位移曲线已趋于平稳状态，且最大钻压 $W_{b\,max}$=132 kN，轴向相对位移的波动幅度仅为 0.2mm。虽然添加轴向反馈控制器前后系统钻头的绝对角速度均在输入角速度附近略有波动，但是相较于只添加扭转反馈控制器，添加纵向反馈控制器之后钻头的绝对角速度更加接近于输入角速度（见图 12d），这意味着对钻柱的扭转振动控制效果更好。

钻柱振动系统在施加双向反馈控制器后（Ω_0=14.56 rad/s，W_0=160 kN）的响应曲线，如图 13 所

示。在系统响应的前 40 s，钻头与地层的接触已经稳定，钻压的波动范围稳定在 145~175 kN，最大钻压 $W_{b\,max}$=175 kN，减小了 35%；扭矩和轴向相对位移的波动范围也大大减小，这意味着钻柱发生疲劳破坏的可能性也降低了。与此同时，钻头的绝对角速度也更加接近于输入角速度，使得系统的运行更加稳定。

结果表明，同时施加扭转方向和轴向的 LQR 反馈控制后，黏滑运动和跳钻现象均可得到有效抑制。

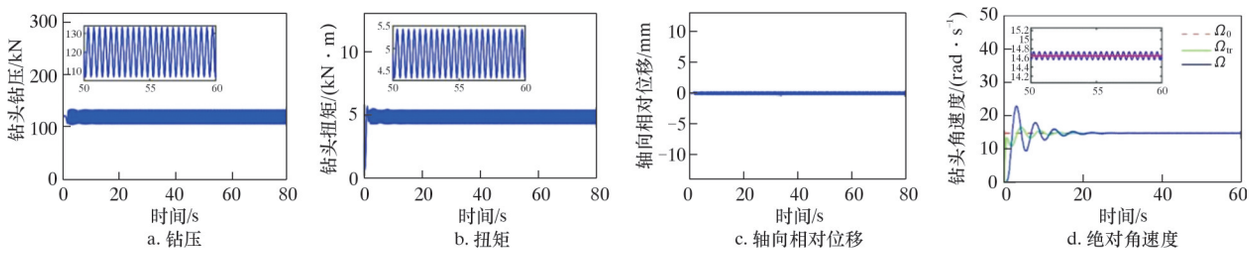


图 12　施加双向反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=14. 56 rad/s，W_0=120 kN）

Fig. 12　Response curve of drill string vibration system after applying bidiectional feedback controller（Ω_0=14. 56 rad/s，W_0=120 kN）

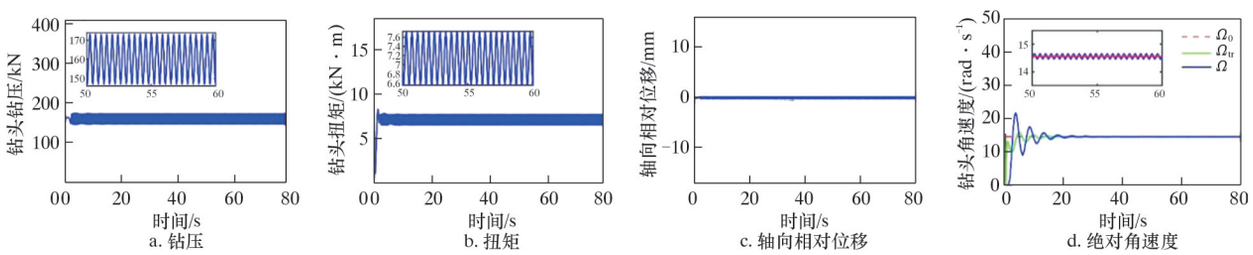


图 13　施加双向反馈控制器后的钻柱振动系统响应曲线（Ω_0=14. 56 rad/s，W_0=160 kN）

Fig. 13　Response curve of drill string vibration system after applying bidiectional feedback controller（Ω_0=14. 56 rad/s，W_0=160 kN）

3. 5　LQR 控制与顶驱控制的对比

笔者模拟仿真了 3 种地层刚度下输入角速度对轴向相对位移的影响，以对比 LQR 控制与顶驱控制 2 种控制方式对钻柱振动的控制效果。经过顶驱控制和施加双向 LQR 控制之后，系统响应振幅随输入角速度的变化如图 14~图 17 所示。

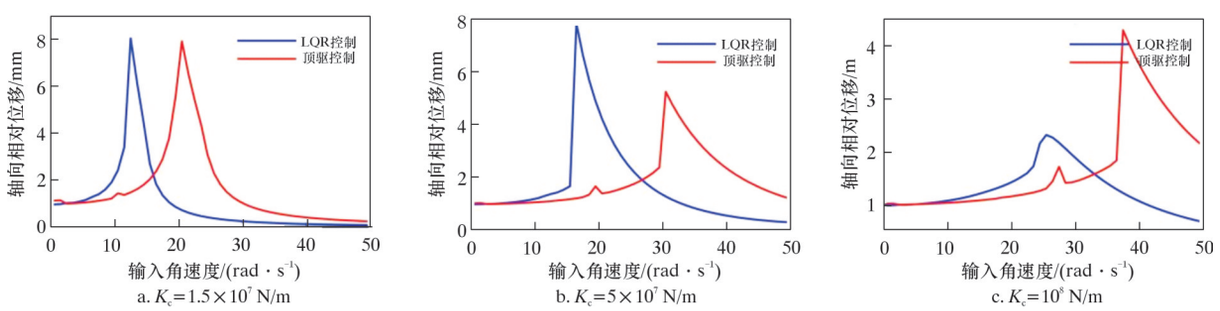


图 14　转盘输入角速度对轴向相对位移的影响

Fig. 14　Effect of rotary table input angular velocity on axial relative displacement

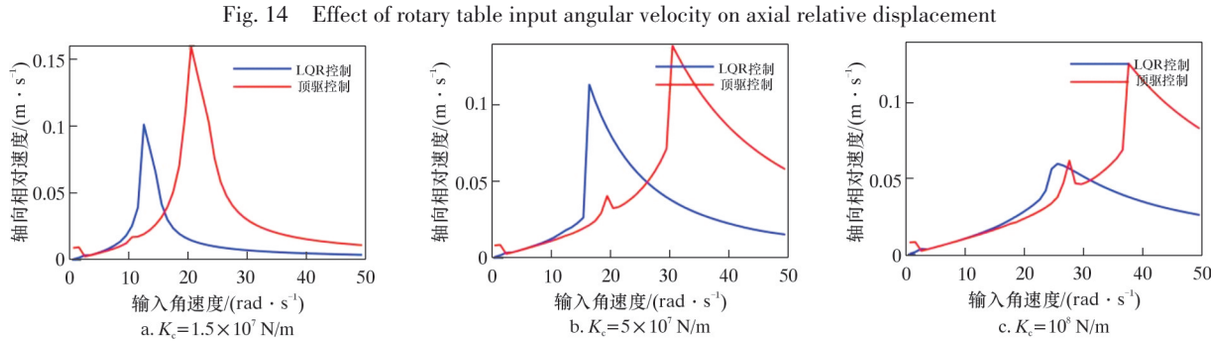


图 15　转盘输入角速度对轴向相对速度的影响

Fig. 15　Effect of rotary table input angular velocity on axial relative velocity

从图 14~图 17 可见：2 种控制方式的振幅曲线变化趋势较为相似，随着底层刚度的增加，系统出现峰值时对应的输入角速度也随之增大；且比较每种响应的幅值曲线发现，轴向振动响应出现

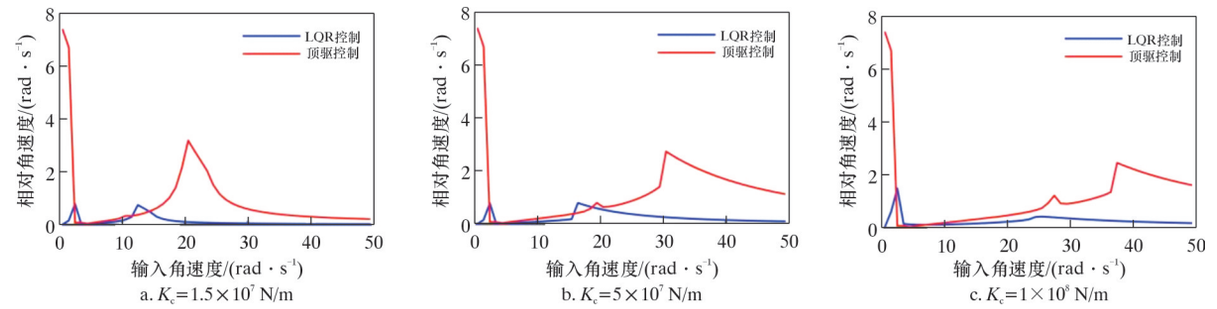


图 16　转盘输入角速度对相对角速度的影响

Fig. 16　Effect of rotary table input angular velocity on relative angular velocity

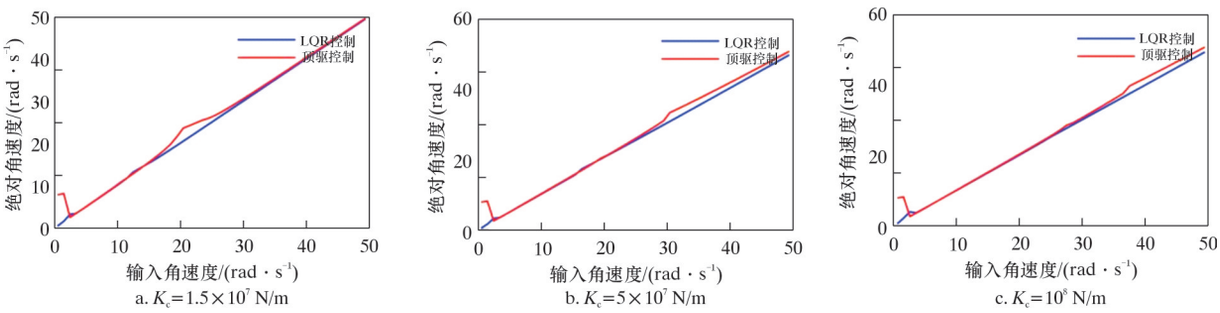


图 17　转盘输入角速度对绝对角速度的影响

Fig. 17　Effect of rotary table input angular velocity on absolute angular velocity

峰值所对应的输入角速度与扭转响应出现峰值所对应的输入角速度值是相同的。在地层刚度为 1.5 × 10⁷ N/m 时，施加双向 LQR 反馈控制之后的系统和施加顶驱控制后的系统分别在 12.5 和 20.5 rad/s 时，轴向相对位移和相对速度达到了峰值；当输入角速度为 0~16.09 rad/s 时，添加扭转反馈控制器的轴向相对位移和相对速度振幅明显大于施加顶驱控制后的系统；在地层刚度为 5 × 10⁷ N/m 时，添加纵向反馈控制器之后的系统和施加顶驱调谐 I-k-c 控制后的系统分别在 16.5 和 30.5 rad/s 时，轴向相对位移和相对速度达到了峰值；当输入角速度大于 26.5 rad/s 时，扭转反馈控制器的轴向相对位移和相对速度振幅明显小于施加顶驱控制后的系统，而且双向 LQR 控制策略对于扭转振动的控制效果比顶驱调谐控制效果更为良好。施加轴向反馈控制器后系统的相对角速度在仿真区间内无限接近于 0，表明钻头绝对角速度无限接近于输入角速度，钻柱运动系统的黏滑振动被消除；在地层刚度为 10⁸ N/m 时，施加双向 LQR 控制器和施加顶驱控制后的系统分别在 25.5 和 37.5 rad/s 时轴向相对位移和相对速度达到了峰值，对应的轴向相对位移分别为 2.3 和 4.3 mm。随着地层刚度的增加，系统各项响应的幅值（峰值）开始向右移动，即系统发生跳钻现象对应的输入角速度也随之增大。

4　结　论

（1）只施加扭转方向的 LQR 反馈控制时，钻柱的黏滑运动虽能被有效抑制，但钻柱仍可能出现跳钻现象；只施加纵向 LQR 反馈控制后，跳钻现象能被有效抑制，但钻柱仍可能出现黏滑运动。只有同时施加双向反馈控制时，钻柱的黏滑运动和跳钻现象才能被有效抑制。

（2）对比 LQR 控制和顶驱控制的仿真结果发现，2 种控制下所得结果趋势大致相同，在输入角速度较小时，施加顶驱控制的系统比施加双向 LQR 控制器的系统对钻柱轴向振动的控制效果更好，但是施加双向 LQR 控制器的系统扭转响应振幅一直小于施加顶驱控制的扭转响应振幅。相较于顶驱速度控制器，基于 LQR 控制策略设计的轴-扭双向反馈控制器对系统的振动控制效果更好。

参　考　文　献

[1] JANSEN J D. VAN DEN STEEN L. Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drill strings [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 179 (4): 647-668.

[2] YIGIT A S, CHRISTOFOROU A P. Stick-slip and bit-bounce interaction in oil-well drillstrings [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2006, 128 (4): 268-274.

[3] ZAMANIAN M, KHADEM S E, GHAZAVI M R. Stick-slip oscillations of drag bits by considering damping of drilling mud and active damping system [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 59 (3/4): 289-299.

[4] BOUSSAADA I, CELA A, MOUNIER H, et al. Control of drilling vibrations: a time-delay system-based approach [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46 (3): 226-231.

[5] LOSOYA E Z, GILDIN E, NOYNAERT S F. Real-time rate of penetration optimization of an autonomous lab-scale rig using a scheduled-gain PID controller and mechanical specific energy [J]. IFAC-Papers OnLine, 2018, 51 (8): 56-61.

[6] ZHANG X. Dynamics, nonlinear instabilities, and control of drill-strings [D]. College Park: University of Maryland, 2020.

[7] ZRIBI F, SIDHOM L, KRAMA A, et al. Enhancement of drill string system operations with adaptive robust controller and hardware in-the-loop validation [J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 556: 117716.

[8] 姜寅令，张周，张强，等. 柔性钻柱扭转振动及控制研究 [J]. 石油矿场机械，2024，53 (4)：18-27.
JIANG Y L, ZHANG Z, ZHANG Q, et al. Research on coupled vibration and control of flexible drill strings [J]. Oil Field Equipment, 2024, 53 (4): 18-27.

[9] CHRISTOFOROU A P, YIGIT A S. Fully coupled vibrations of actively controlled drillstrings [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267 (5): 1029-1045.

[10] MODELING S M. Modeling, simulation and control of stick-slip and bit-bounce vibration in an oilwell drill string [D]. Newfoundland: Memorial University of Newfoundland, 2012.

[11] 张奇志，吴永强. 抑制钻柱黏滑振动和钻头反弹的建模与控制 [J]. 石油钻采工艺，2018，40 (5)：553-558，595.
ZHANG Q Z, WU Y Q. Modeling and control of restraining stick slip vibration of drill strings and bounce of drill bits [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40 (5): 553-558, 595.

[12] MACLEAN J D J, VAZIRI V, APHALE S S, et al. Suppressing stick-slip oscillations in drill-strings by modified integral resonant control [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 228: 107425.

[13] LU C D, HE Z Q, CHEN L F, et al. Suppressing coupled axial-torsional vibration of drill-string system considering regenerative cutting induced delay and actuator saturation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70 (11): 11608-11617.

[14] SADEGHI A N, ARIKAN K B, ÖZBEK M E. Modelling and controlling of drill string stick slip vibrations in an oil well drilling rig [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216: 110759.

[15] 陆承达，甘超，陈略峰，等. 地质钻进过程智能控制研究进展与发展前景 [J]. 煤田地质与勘探，2023，51 (9)：31-43.
LU C D, GAN C, CHEN L F, et al. Development and prospect of intelligent control of geological drilling process [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51 (9): 31-43.

[16] 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.
DUAN C C, LI X Y, ZHANG L J, et al. Top drive control of axial-torsional coupled nonlinear vibration of drill string [J]. Journal of Vibration Engineering, 2024, 37 (9): 1535-1545.

[17] HOSSEINZADEH A, BAKHTIARI-NEJAD F. A new dynamic model of coupled axial-torsional vibration of a drill string for investigation on the length increment effect on stick-slip instability [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2017, 139 (6): 061016.

[18] TASHAKORI S, VOSSOUGHI G, ZOHOOR H, et al. Prediction-based control for mitigation of axial-torsional vibrations in a distributed drill-string system [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30 (1): 277-293.

[19] 吴永强. 抑制钻机黏滑振动和钻头反弹的建模与控制 [D]. 西安：西安石油大学，2019.
WU Y Q. Modeling and control of suppressing stick-slip vibration of drill rigs and bit bounce [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.

第一作者简介：李欣业，教授，博士生导师，生于 1966 年，主要从事复杂机械系统的动力学建模、理论分析与数字化仿真，非线性振动系统动力学行为的分岔与控制，动力系统的运动稳定性研究等工作。地址：(30040) 天津市北辰区。email：xylihebut@163.com。

通信作者：郭晓强，副教授，硕士研究生导师。email：786526101@qq.com。

收稿日期：2024-07-13　　**修改稿收到日期：**2024-09-10

（本文编辑　杨晓峰）