

# HCW-90型全液压自动猫道钻具翻板机构控制优化

钟蔚岭<sup>1</sup>, 王清岩<sup>\*1,2</sup>, 盛洁<sup>1</sup>, 金赠伍<sup>1</sup>, 李恺君<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026;  
2. 吉林大学-四川宏华石油设备有限公司产学研用合作基地, 四川 广汉 618300)

**摘要:**针对HCW-90型全液压自动猫道钻杆翻越档销进入V型槽的动作进行研究,涉及钻杆翻越档销、钻杆沿翻板滚动以及钻杆稳定在V型槽内等3个动态过程。操纵翻板机构的液压缸动作的控制信号是影响管体运移快速性和平稳性的主要因素,翻板动作的同步性则决定了管体运移的空间姿态和定位精度。本文主要采用机液联合仿真的方法,对HCW-90型全液压自动猫道的翻板机构进行模拟测试,分析机构的动态性能,研究确保钻杆稳定运移且能提高快速性的具体措施。

**关键词:**全液压自动猫道;钻具输送;翻板机构;联合仿真

**中图分类号:**P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0324-09

## Control synchronization optimization for the transfer mechanism of HCW-90 full hydraulic automatic catwalk

ZHONG Weiling<sup>1</sup>, WANG Qingyan<sup>\*1,2</sup>, SHENG Jie<sup>1</sup>, JIN Zengwu<sup>1</sup>, LI Kaijun<sup>1</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Jilin University-Honghua Petroleum Equipment Co., Ltd. Industry-University-Research Cooperation Base, Guanghan Sichuan 618300, China)

**Abstract:** This paper has studied the movement that HCW-90 full hydraulic automatic catwalk drives a drilling rod over the stop pin and entering the V-groove, which involves three dynamic processes: the drilling rod over the stop pin, the drilling rod rolling along the transfer, and the drilling rod stabilizing in the V-groove. The control signal of the action of the hydraulic cylinder that manipulates the transfer mechanism is the main factor that affects the rapidity and stability of tubes' movement. The synchronization of transfers' movement determines the spatial attitude and positioning accuracy of tubes' movement. This paper mainly simulated the dynamic performance of the mechanism transfer mechanism of HCW-90 full hydraulic automatic catwalk with the method of mechanical-hydraulic co-simulation, and studied the specific measures to ensure the stable movement of the drilling rod and improve the rapidity.

**Key words:** full hydraulic automatic catwalk; drill rod transport; transfer mechanism; co-simulation

## 0 引言

全液压自动猫道是一种可取代深井钻机常规猫道实现地面与钻井台间管具自动输送的辅助作

业装置,用以解决常规管柱输送作业效率低、操作人员劳动强度大、设备及人员的安全性差等问题<sup>[1-8]</sup>。

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.054

基金项目:国家深部探测技术与实验研究专项资助项目“深部大陆科学钻探装备研制”(编号:SinoProbe-09-05)

作者简介:钟蔚岭,男,汉族,1998年生,硕士研究生在读,地质工程专业,研究方向为先进钻探装备与机具,吉林省长春市西民主大街938号, zhongwl20@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:王清岩,男,汉族,1970年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事先进钻探设备与机具、基础工程施工设备与机具、流体传动及控制技术方面的科研与教学工作,吉林省长春市西民主大街938号, wangqy@jlu.edu.cn。

引用格式:钟蔚岭,王清岩,盛洁,等.HCW-90型全液压自动猫道钻具翻板机构控制优化[J].钻探工程,2021,48(S1):324-332.

ZHONG Weiling, WANG Qingyan, SHENG Jie, et al. Control synchronization optimization for the transfer mechanism of HCW-90 full hydraulic automatic catwalk[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):324-332.

吉林大学建设工程学院依托国家深部探测仪器装备研制专项子课题(SinoProbe-09-05)“深部大陆科学钻探装备研制”项目设计了HCW-90型全液压自动猫道<sup>[9-10]</sup>。

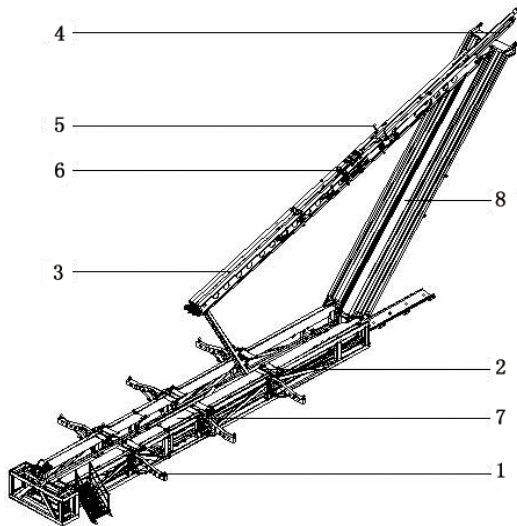
本文以HCW-90型全液压自动猫道的钻具翻板机构为研究对象,建立其RecurDyn多体动力学模型及AMESim液压系统模型,并进行联合仿真,提出合适的液压系统控制策略,测试全液压自动猫道翻板机构的优化措施。

## 1 HCW-90型全液压自动猫道结构特点

### 1.1 总体结构

全液压自动猫道它包括多个子系统,各系统之间通过协调动作共同完成管具在地面和钻台面之间的自动输运工作<sup>[11]</sup>。

HCW-90型全液压自动猫道如图1所示,为举升式动力猫道,主要部件包括:钻杆支腿、翻板机构、起升机构、推送机构、防坠落机构等,各机构联合作业,实现管具在钻台面及地面之间的自动输送<sup>[12]</sup>。



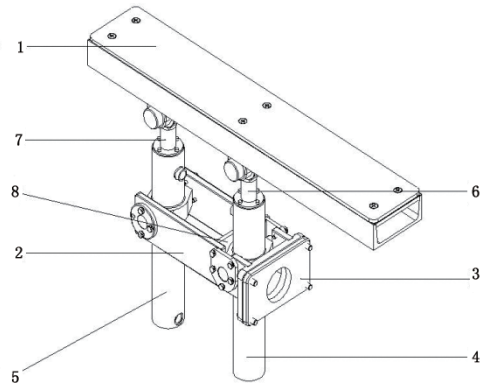
1—钻杆支腿;2—翻板机构;3—起升机构;4—推送机构;5—防坠落机构;6—翻出机构;7—猫道平台;8—坡道

图1 HCW-90型全液压自动猫道

### 1.2 钻具翻板机构

如图2所示,HCW-90型全液压自动猫道翻板机构由横向布置在平台左右两侧的6组翻板及其液压驱动油缸构成。每组翻板由2个固定铰接在缸筒耳板上的液压缸驱动,分别用于实现管具的翻入和

翻出动作。



1—翻板;2—缸筒耳座;3—翻板底座;4—翻入液压缸;5—液压缸翻出;6—翻入活塞杆;7—翻出活塞杆;8—液压缸限位板

图2 翻板结构示意图

翻板机构驱动管具翻出的动作较为简单,而管具翻入则依次完成翻板起升带动其越过档销、沿翻板滚动、进入举升滑道V型槽并稳定停留等动作过程,钻具翻入V型槽过程中,翻板机构内侧液压缸处在停止状态,外侧液压缸活塞杆伸出,于是翻板机构可简化为单边驱动的四连杆机构,如图3所示。

根据余弦定理,该四连杆机构满足:

$$L^2 + [H + x(t)]^2 - 2L[H + x(t)]\cos\theta_1 = L^2 + H^2 - 2LH\cos\theta_2$$

$$\cos\theta_2 = [1 - \sin\theta_1 L] / [H + x(t)]$$

该四连杆机构中,翻出活塞杆行程函数 $x(t)$ 与翻板倾角 $\theta_1$ 关系方程:

$$[x(t) + 0.5H]^2 = L^2[1.25 - \sin\theta_1] - LH\cos\theta_1$$

翻出活塞杆行程速率 $v$ 与翻板倾角 $\theta_1$ 关系方程:

$$Hv + 2x(t)v = L^2(1 - w\cos\theta_1) + LHw\sin\theta_1$$

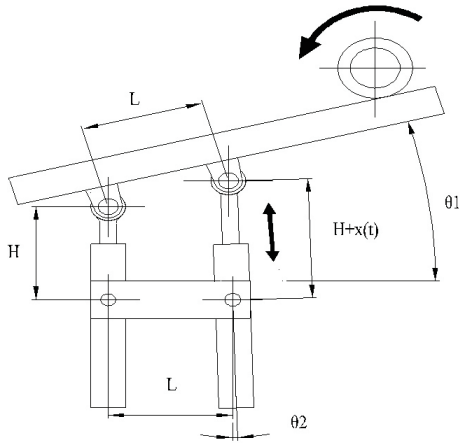
其中: $v = \dot{x}(t)$ ,  $w = \dot{\theta}_1$ 。

## 2 翻板机构RecurDyn多体动力学模型

本文基于韩国FunctionBay公司开发的RecurDyn软件构建HCW-90型全液压自动猫道钻具翻板机构的多体动力学模型。

翻板机构多体动力学模型如图4所示,其中V型槽结构已做透明处理,钻杆支腿已做隐藏处理。

翻板机构工作过程中的参考部件构建一个统一



L—液压缸与缸筒耳座间铰点的距离,同样为活塞杆与翻板间铰点的距离;H—翻出液压缸与缸筒耳座间铰点到翻出活塞杆与翻板间铰点的距离,翻入液压缸与缸筒耳座间铰点到翻入活塞杆与翻板间铰点的距离为 $H+x(t)$ ;x(t)—活塞杆位移行程,以活塞杆伸出液压缸的方向为正; $\theta_1$ —翻板与水平面夹角,以逆时针方向为正; $\theta_2$ —翻入液压缸轴向与竖直方向的夹角,以逆时针方向为正

图3 翻板结构简图

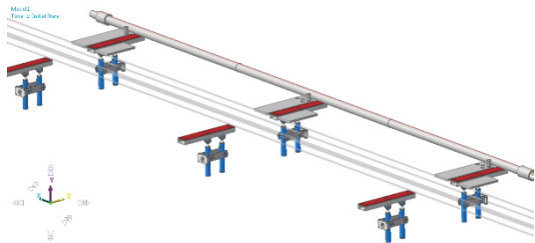


图4 翻板机构 RecurDyn 多体动力学模型

的实体,并与大地固定约束。缸筒耳座通过固定约束与大地固连,液压缸通过旋转副约束与缸筒耳座铰接,液压缸与活塞杆间采用圆柱副约束,活塞杆与翻板采用旋转副约束。翻出液压缸受到液压缸限位板的限制作用,分析钻具翻入V型槽的过程时,设置其与大地固定约束。

本文以 $\varnothing 127\text{ mm}$ 钻杆作为管具范例,也是分析过程中的具体研究对象,单根钻杆质量为277.79 kg,包括接头在内的钻杆总长9.96 m。钻杆为细长管体结构,由3组翻板驱动运移。钻杆初始位置设定在平台档销外侧,沿平台纵向位置钻杆质心距离中间翻板机构的中间对称面的距离为190 mm。为确保仿真结果的准确性,钻杆模型等分为3段实体,

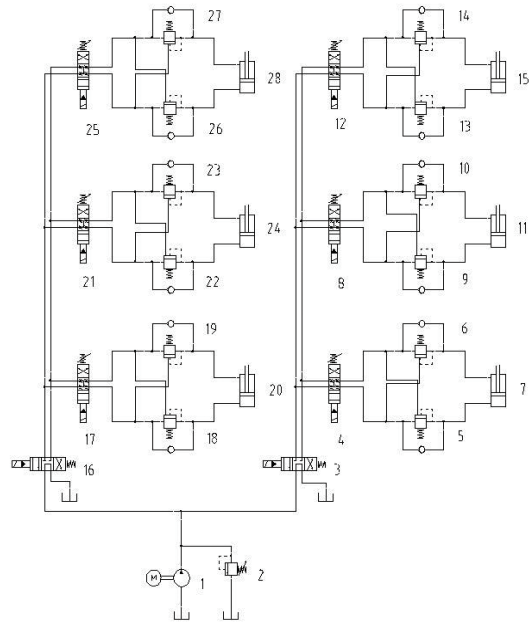
分别设置各段与其相应的翻板的接触约束。此外,钻杆与V型槽以及猫道平台支承面之间的接触约束也采用的同样的方法处理。翻入液压缸与翻入活塞杆间建立轴向力。翻板机构在RecurDyn软件中的各个实体、约束、载荷等相关设置参见表1。

表1 翻板机构多体动力学模型参数

实体	参数
圆柱副	翻出液压缸-翻出活塞杆 位移驱动为0
轴向力	翻入液压缸-翻入活塞杆 力大小GPIN
接触	档销、翻板、猫道平台、V型槽-钻杆 刚度系数100000,阻尼系数300,动摩擦系数0.3

### 3 翻板机构 AMESim 液压回路模型

本文为该钻具翻板机构设计了新的液压控制系统,该系统为开式系统并采用闭环控制。如图5所示为一侧钻具翻板机构的液压原理图。所述的液压控制系统采用美国DANFOSS公司45系列开式液压泵作为动力元件,电液比例阀采用DANFOSS PVG32多路阀,翻板机构的2个液压缸各自采用一片独立阀片进行控制。



1—定量泵;2—溢流阀;3、16—三位四通阀;4、8、12、17、21、25—电液比例阀;5、6、9、10、13、14、18、19、22、23、26、27—平衡阀;7、11、15—翻入液压缸;20、24、28—翻出液压缸

图5 钻具翻板机构液压原理

该回路右侧为翻入支路,用于控制钻具翻入V型槽的动作,左侧为翻出支路,用于控制钻具翻入钻具支腿的动作。每处液压缸采用电液比例阀控制,通过预先设定的电信号以及活塞杆反馈的位移信号自动调节比例阀开度,自动控制液压缸行程。

本文采用AMESim软件构建钻具翻板机构的液压控制系统,如图6所示,本文仅分析钻具翻入V型槽的过程,只针对了3个动作的液压缸进行了设

置。液压系统的主要参数如下:

系统压力:15 MPa;流量:45 L/min。每条支路的液压缸由相同的电液比例阀控制,阀的最大开度输入电信号值为1 mA,固有频率为200 Hz,阻尼比为0.99。液压缸设置:行程为0.5 m,初始位移为0.1 m,液压缸内径80 mm,活塞杆直径50 mm。该系统采用闭环控制,引入PID控制器,比例系数取10,积分系数取0.5,微分系数取0.1,一阶时间常数取0.01。

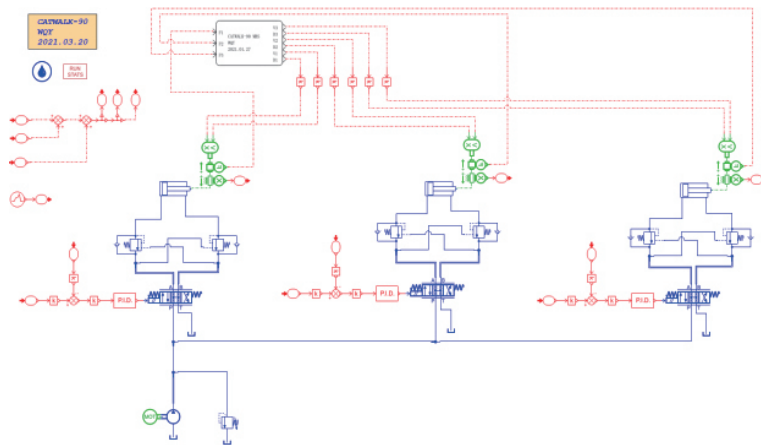


图6 翻板机构AMESim液压控制回路模型

#### 4 联合仿真

单一的多体动力学软件分析无法真实反映机构的实际工作状态。本文采用RecurDyn与AMESim联合仿真方式分析钻具翻板机构的翻入动作,由AMESim输入液压缸轴向力,再由RecurDyn反馈活塞杆的行程位移及速度。

RecurDyn与AMESim通过FMI(Functional Mock-up Interface)标准进行联合仿真。FMI是一种工具或者独立的标准,通过利用xml文件和编译好的C代码程序,提供动态模型的数据交换和联合仿真<sup>[13-15]</sup>。

##### 4.1 AMESim设置

在AMESim中创建FMI类型的接口功能块,设置3处数据输出端口F1、F2、F3,分别对应RecurDyn模型中的3处轴向力,以及6处数据输入端口D1、V1、D2、V2、D3、V3,分别对应RecurDyn模型中液压缸与活塞杆间的相对位移以及相对速率。

在完成编译后利用C++编译器生成FMU文件。

##### 4.2 RecurDyn设置

在RecurDyn中添加3处数据输入端口与6处数据输出端口。其中,轴向力函数设为GPIN(1),对

应数据输入端口,表示从AMESim输入值。由于RecurDyn与AMESim软件默认的单位制差异,数据输出端口函数取0.001倍值。

FMI版本设置为2.0,再导入FMU文件构建联合仿真环境后进行联合仿真计算。

##### 4.3 联合仿真结果

本文为HCW-90型全液压自动猫道钻具翻板机构在AMESim中调定了3组控制信号,信号曲线为线性曲线,信号值为翻入活塞杆的设定位移行程函数。

分析钻具翻入V型槽的过程可知,为实现钻具入V型槽即可自行稳定,钻具翻板机构需尽可能地降低钻具滚入V型槽前的动能,通过调整钻具翻板机构的动作增加碰撞、沿程损失可以起到减速的效果。

###### 4.3.1 控制信号1

阶段1:时间0~8 s,信号值0~0.042;阶段2:时间8~8.5 s,信号值0.042~0.042;阶段3:时间8.5~9.5 s,信号值0.042~-0.03;阶段4:时间9.5~20 s,信号值-0.03~-0.03。

仿真时长20 s,计算步数2000,计算结果如图7~12所示。其中图中各曲线的稳定段未作展示处理。该信号控制翻板抬升钻杆越过档销,钻杆继续



沿翻板滚动,同时翻板外侧快速下行,至其内侧上翘一定高度,钻杆脱离翻板后于猫道平台滚动一定距离,再沿翻板斜面滚动,钻杆在脱离翻板后与猫道发生碰撞,滚入V型槽中后逐渐稳定。

根据图9可知,钻杆在 $t=17.8\text{ s}$ 时在V型槽内稳定,并且在翻入过程中,钻杆未出现明显的管体偏斜。其中,计算结果显示液压缸推力在钻杆稳定后出现剧烈的振荡,为使图7的展示结果保真,图7未作全部展示。根据图7和10,在 $t=8.4\sim 9.2\text{ s}$ 间,钻杆翻越档销后重新着陆翻板,钻杆和翻板间的接触力最大达到 $F=22519\text{ N}$ ,液压缸推力最大达到 $F=18001\text{ N}$ 。根据图11, $t=10.32\text{ s}$ 时,钻杆脱离与猫道平台发生碰撞,产生最大接触力 $F=50885\text{ N}$ 。对于重载钻具,如钻铤,应尽量避免使用此类信号。

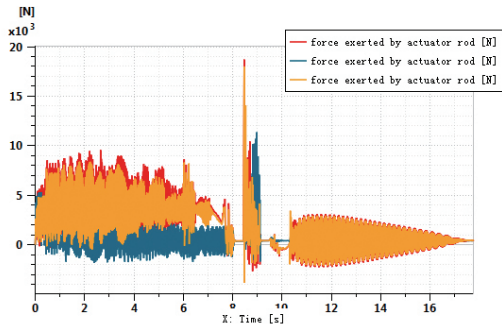


图7 信号1液压缸推力

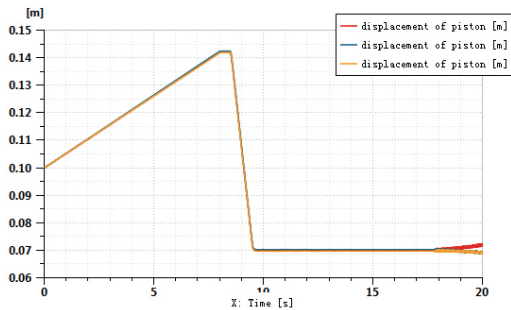


图8 信号1活塞杆位移行程

### 4.3.2 控制信号2

阶段1:时间 $0\sim 9\text{ s}$ ,信号值 $0\sim 0.043$ ;阶段2:时间 $9\sim 9.5\text{ s}$ ,信号值 $0.043\sim 0$ ;阶段3:时间 $9.5\sim 20\text{ s}$ ,信号值 $0\sim 0$ 。

仿真时长 $20\text{ s}$ ,计算步数 $2000$ ,计算结果如图13~18所示。

该信号首先控制翻板抬升钻杆,在钻杆翻越档销时,翻板的右端快速下行,钻杆翻过档销后与翻板

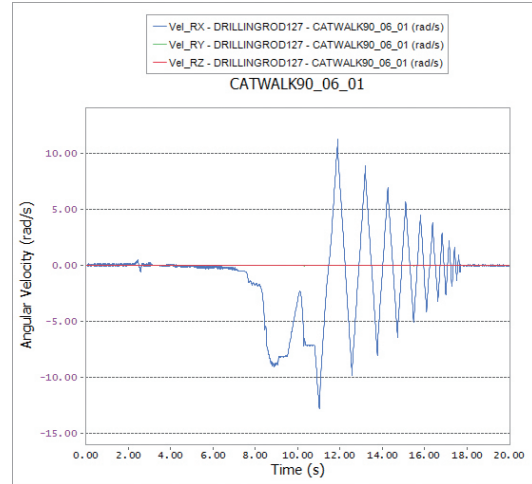


图9 信号1钻杆绕空间x、y、z轴翻转速率

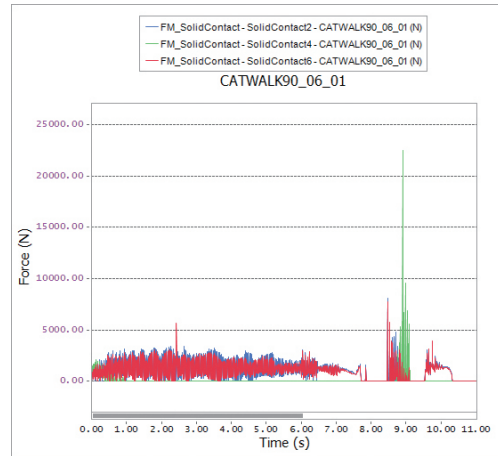


图10 信号1钻杆与翻板间接触力

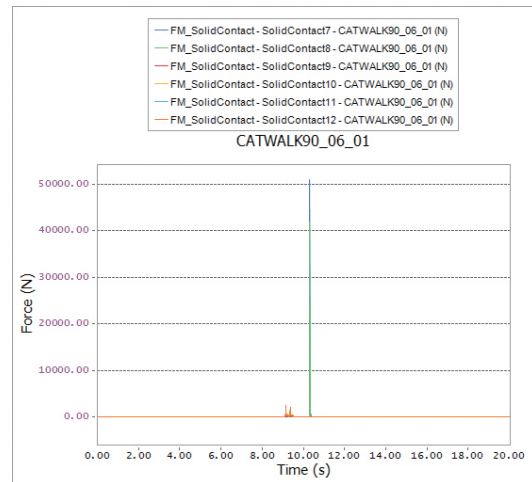


图11 信号1钻杆与猫道平台间接触力

产生较大的碰撞,在钻杆沿翻板滚至猫道平台后,钻杆基本沿水平方向滚入V型槽中,并最终稳定。

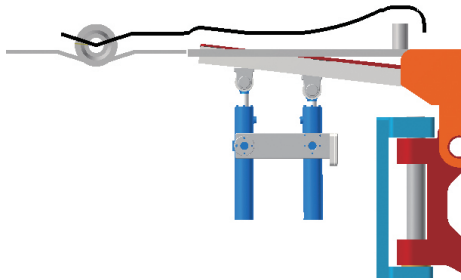


图 12 信号 1 钻杆与质心运动迹线

根据图 15 可知钻杆在  $t=18.5\text{ s}$  能稳定于 V 型槽中,并且在翻入过程中未出现明显的管体偏斜现象。根据图 16 和图 13,在  $t=9.3\sim 11\text{ s}$  间,钻杆翻越挡销后与翻板发生明显的碰撞,钻杆与翻板间接触力最大为  $F=16740\text{ N}$ ,此时液压缸推力突变至  $F=57489\text{ N}$ ,引起液压系统极大的振动。根据图 17,钻杆与猫道平台间产生的最大的接触力  $F=16422\text{ N}$ ,远小于控制信号 1。对于重载钻具,也应尽量避免使用此类信号。

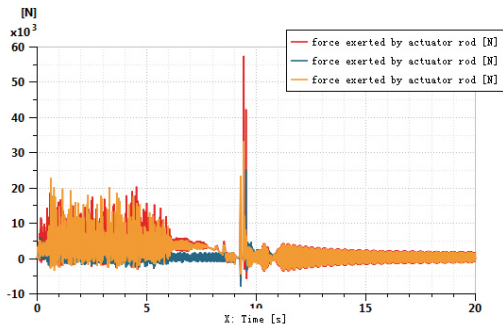


图 13 信号 2 液压缸推力

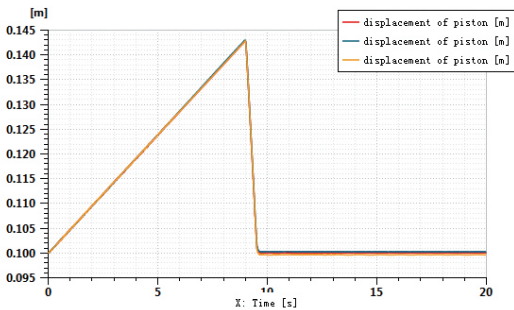


图 14 信号 2 活塞杆位移行程

### 4.3.3 控制信号 3

阶段 1:时间  $0\sim 9\text{ s}$ ,信号值  $0\sim 0.043$ ;阶段 2:时间  $9\sim 9.3\text{ s}$ ,信号值  $0.043\sim 0.04$ ;阶段 3:时间  $9.3\sim 10.3\text{ s}$ ,信号值  $0.04\sim -0.05$ ;阶段 4:时间  $10.3\sim 10.8\text{ s}$ ,信号

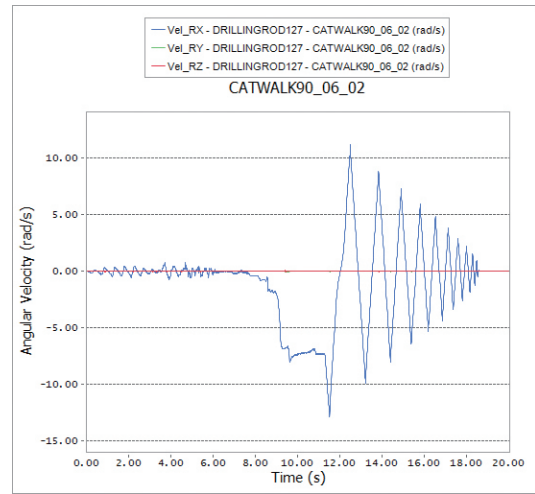


图 15 信号 2 钻杆绕空间 x、y、z 轴翻转速率

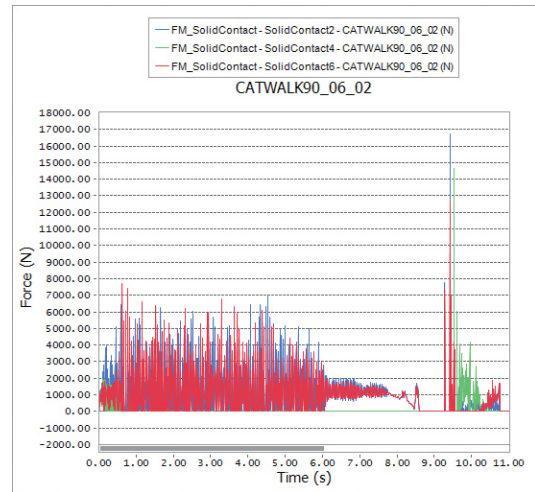


图 16 信号 2 钻杆与翻板间接触力

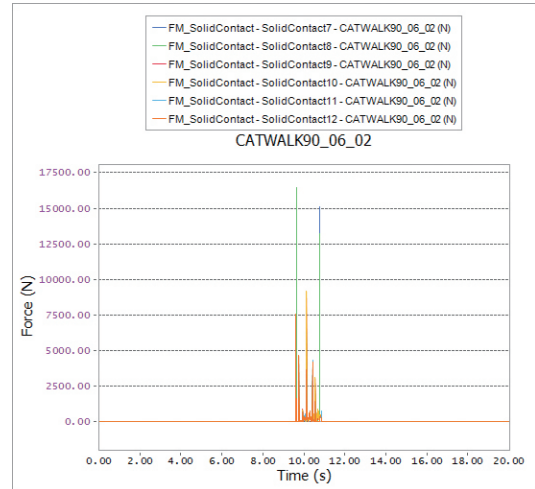


图 17 信号 2 钻杆与猫道平台间接触力

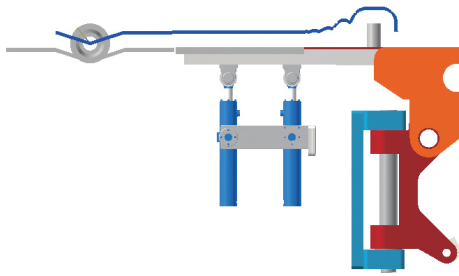


图 18 信号 2 钻杆与质心运动迹线

值-0.05~0;阶段5:时间 10.8~18.3 s,信号值 0~0。

仿真时长 18.3 s,计算步数 1830,计算结果如图 19~24 所示。

该信号控制钻具翻板机构抬升钻杆越过档销,钻杆沿翻板滚入猫道平台面,与此同时,翻入活塞杆快速下行至翻板左端上翘,钻杆再次沿翻板上行的同时翻板复位,钻杆回落猫道平台后缓缓滚入 V 型槽中并最终稳定。

根据图 21 可知,钻杆在  $t=18.1$  s 稳定在 V 型槽中,并且在翻入过程中未出现明显的管体偏斜现象。根据图 19、22 和 23 可知,该控制信号产生的钻杆与翻板间的接触力、液压缸推力以及钻杆与猫道平台间产生最大接触力都小于控制信号 1、2,特别的,钻杆与猫道平台间产生最大接触力仅为  $F=3279$  N。说明该信号控制下钻杆运移过程平滑,碰撞小,运行效果最优。

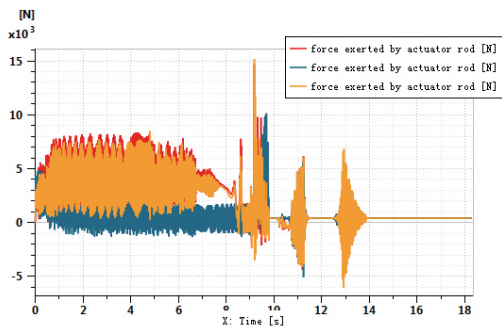


图 19 信号 3 液压缸推力

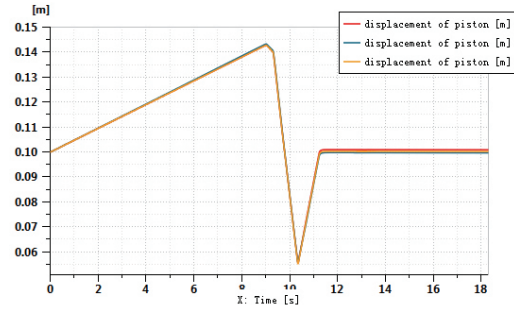


图 20 信号 3 活塞杆位移行程

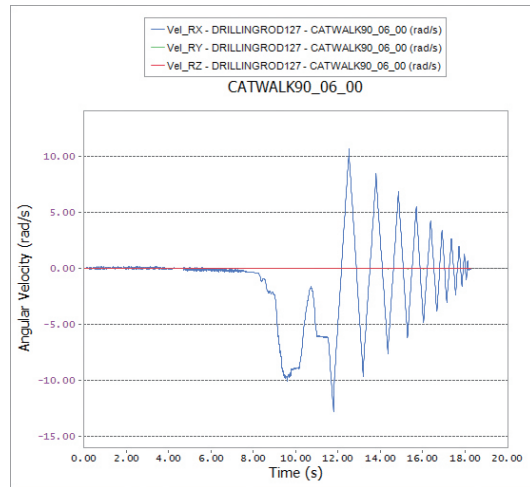


图 21 信号 3 钻杆绕空间 x、y、z 轴翻转速率

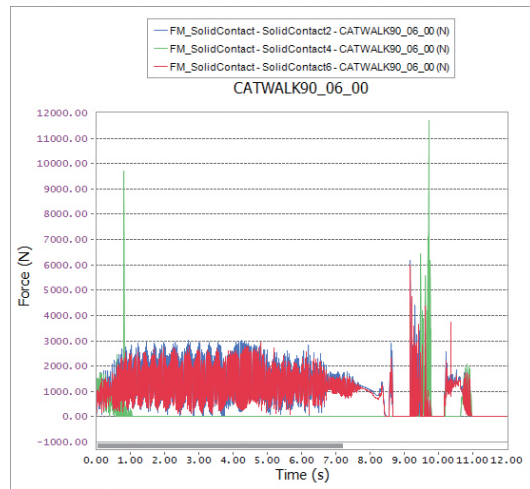


图 22 信号 3 钻杆与翻板间接触力

### 5 成本优化液压控制系统

由于电液比例阀价格高昂,为降低使用成本,翻板机构液压控制系统设计采用一片电液比例阀辅以分流阀控制,其余设置不变,Amesim 模型如图 21 所示。采用控制信号 3 进行联合仿真,仿真时长 20 s,计算步数 2000,计算结果如图 25~27。

HCW-90 型全液压自动猫道的翻板机构实际采用一片电液比例阀与分流阀控制,其中,流量通过 1:2 分流阀分为 1/3 与 2/3 流量,2/3 流量再经过 1:1 分流阀分为两路。根据以上结果可知,通过分流阀与电液比例阀控制翻板机构存在明显的同步性差异。

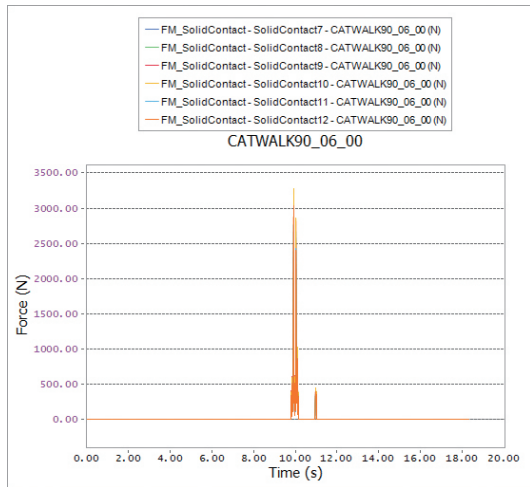


图23 信号3钻杆与猫道平台间接触力

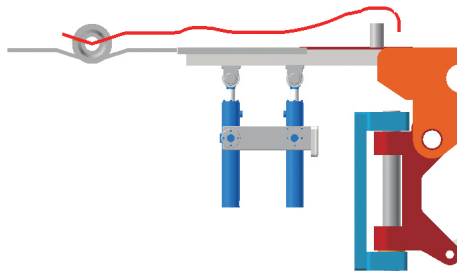


图24 信号3钻杆与质心运动迹线

翻板机构的同步性情况如图26所示,3处活塞杆的同步性要低于三片阀系统,但依旧保持在允许的范围内。

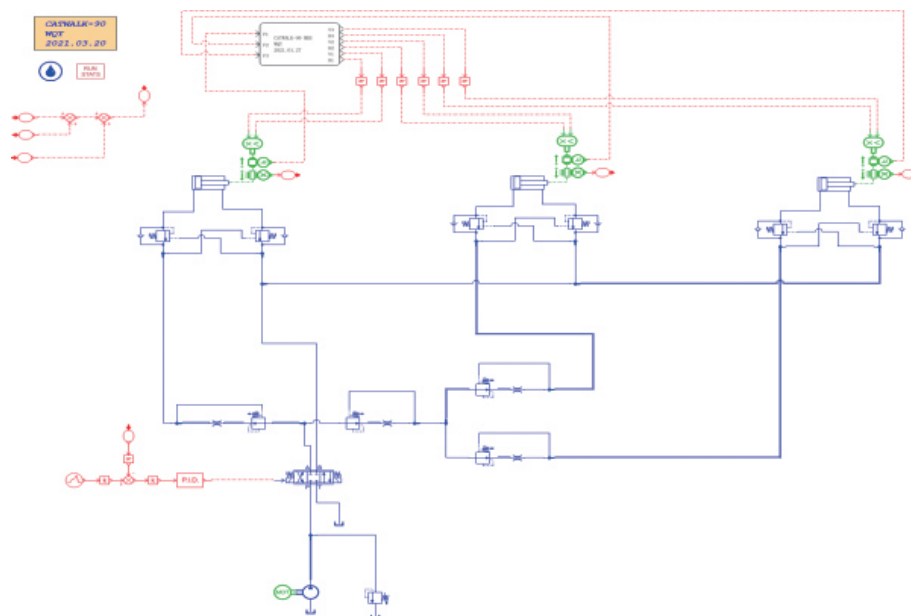


图25 成本优化型液压控制系统

### 6 结论

本文基于RecurDyn和Amesim软件对HCW-90型全液压自动猫道钻具翻板机构进行了仿真分析,模拟了将 $\varnothing 127$  mm钻杆翻入V型槽的过程,采用联合仿真分析的方法能够准确地反映翻板机构机械传动系统、液压控制系统以及电控信号之间的耦合关系,具有技术上的先进性。

为翻板机构获得良好的运移和定位特性,钻具在进入V型槽前应尽量减小其动能,具体措施包括采用平滑过渡的控制信号延长翻板液压缸运动时间、优化运动轨迹以及控制液压控制回路压力变化等。本文基于上述措施的综合影响因素提出三种控制信号。图9、15、21所示,钻杆在运移过程中未出现明显的管体偏斜。由图10、11、16、17、22、23结果可知,在钻具翻越档销时以及脱离翻板进入V型槽前容易发生碰撞,因此可在V型槽边缘以及翻板中部设置一定宽度的缓冲垫,起缓冲作用。钻具在V型槽稳定的过程中会不可避免地产生碰撞,因此在V型槽内也应当增加缓冲垫及增大摩阻来减振。

此外,各缸分别采用独立的电液比例阀进行控制,导致研制成本高昂,本文亦提出针对一侧三组翻板机构液压缸仅采用一片电液比例阀操纵、辅以分流阀进行同步控制的方案,经联合仿真分析,采用该方案时翻板机构的同步性与控制精度将有所降低,但依旧能满足翻转功能的需求。



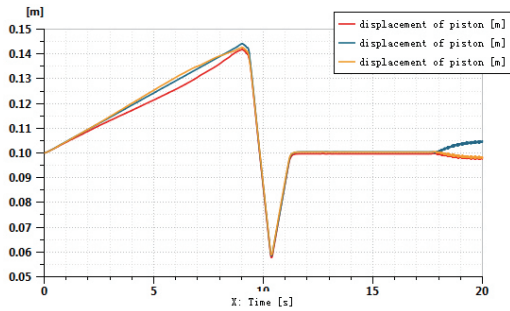


图 26 成本优化型活塞杆位移行程

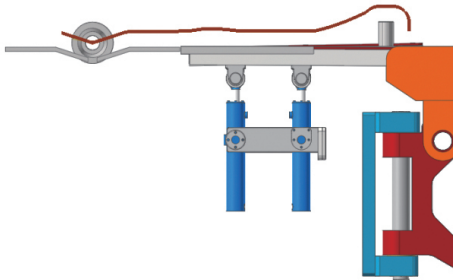


图 27 成本优化型钻杆质心运动轨迹

#### 参考文献:

- [1] 刘春宝,王定亚,王耀华,等. DM3/3.3-J液缸举升式动力猫道设计与试验[J]. 石油机械, 2016, 44(9): 41-46.
- [2] 刘春宝,杨海刚,祝贺,等. DM4.5/10.5-L1 动力猫道的研制[J]. 机械工程师, 2016(9): 178-180.
- [3] 孙巧雷,徐军,王杰,等. 动力猫道提升过程动力学建模与分析[J]. 力学与实践, 2017, 39(3): 260-267.
- [4] 康思杰,于萍,靳恩朝,等. 全液压自动猫道举升系统控制策略研究[J]. 机床与液压, 2016(3): 102-105.
- [5] 宋杰,于萍,赵楠. 全液压自动猫道防坠落机构优化设计及仿真分析[J]. 石油矿场机械, 2018, 47(3): 33-38.
- [6] 米树刚,李建华,李健,等. CSD1800ZD型自动化岩心钻机的应用与分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 94-99.
- [7] 薛倩冰,张金昌. 智能化自动化钻探技术与装备发展概述[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 9-14.
- [8] 王旱祥,车家琪,刘延鑫,等. 适用于中低高度钻台的液压动力猫道系统设计[J]. 石油机械, 2016, 44(12): 12-15.
- [9] 张飞宇. 全液压排管机动力学特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [10] 张春鹏. 全液压自动猫道举升系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [11] 郑庆元,江正清,装峻峰,等. 猫道机液压系统可靠性分析[J]. 机床与液压, 2014, 42(19): 199-203.
- [12] 孙友宏,吕兰,于萍,等. 深井钻机全液压自动钻具运输装置: CN102926685A [P]. 2013-02-13.
- [13] 陈敏,李盛,李新有,等. 基于FMI的平整机装备综合特性研究[J]. 工业加热, 2020, 49(10): 15-18.
- [14] 苏一博,臧晶,玉绍康. 基于FMI的功能模拟单元创建与仿真分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(14): 1-2.
- [15] 陆冠华,郝明瑞,胡松,等. 基于FMI的飞行器分系统多源异构模型一体化仿真[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(6): 99-104.