

# HCW-90型全液压自动猫道钻杆支架 起升同步性分析

盛洁<sup>1</sup>, 王清岩<sup>\*1,2</sup>, 钟蔚岭<sup>1</sup>, 李锐君<sup>1</sup>, 金赠伍<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:** 本文针对HCW-90型全液压自动猫道的钻杆支架起升过程进行研究, 采用多体动力学与液压控制系统联合仿真方法, 分析了钻杆支架起升液压缸动作的同步性对钻杆从支架末端运动至平台档销限位处的动态过程的影响。重点讨论了起升液压缸同步性对管体空间姿态、动力学参数、管体运动至终了处与档销碰撞过程。进一步分析了管体受到限位后趋于稳定的动态过程和定位精度。此外, 综合考虑管体运移的快速性、平稳性和定位准确性, 对起升液压缸的液压控制系统的输入信号进行了合理调整, 并在满足工作性能的前提下, 提出了采用分流阀构建低成本液压控制系统的方案。

**关键词:** 全液压自动猫道; 钻杆支架; 联合仿真; 起升同步性

**中图分类号:** P634.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-9686(2021)S1-0316-08

## Analysis of hoisting synchronization of the HCW-90 full hydraulic automatic catwalk drill pipe bracket

SHENG Jie<sup>1</sup>, WANG Qingyan<sup>\*1,2</sup>, ZHONG Weiling<sup>1</sup>, LI Kaijun<sup>1</sup>, JIN Zengwu<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:** In this paper, the lifting process of the HCW-90 full hydraulic automatic catwalk drill pipe bracket is studied, and the influence of the synchronicity of the lifting hydraulic cylinder action on the movement of the drill pipe from the end of the bracket to the limit of the platform pin is analyzed by using the co-simulation method of multi-body dynamics and hydraulic control system. The effect of the synchronicity of the lifting hydraulic cylinder on the position and attitude of the pipe body, the dynamic parameters and the collision process between the pipe body and the stop pin at the end of the movement are discussed. The dynamic process and positioning accuracy of the pipe body tending to stability after being limited are also analyzed. In addition, considering the rapidity, stability and positioning accuracy of pipe transfer, the input signal of the hydraulic control system of the hoisting hydraulic cylinder has been properly adjusted, and under the premise of satisfying the working performance, the scheme of constructing the low-cost hydraulic control system by diverting valve is put forward.

**Key words:** full hydraulic automatic catwalk; drilling pipe bracket; co-simulation; lifting synchronization

收稿日期: 2021-05-31    DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.S1.053

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: 盛洁, 女, 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, shengjie20@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: 盛洁, 王清岩, 钟蔚岭, 等. HCW-90型全液压自动猫道钻杆支架起升同步性分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 316-323.

SHENG Jie, WANG Qingyan, ZHONG Weiling, et al. Analysis of hoisting synchronization of the HCW-90 full hydraulic automatic catwalk drill pipe bracket[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1): 316-323.

## 0 引言

深井陆地钻机进行地面与钻井平台间管具运输作业所采用的普通猫道以人力操作为主。劳动强度大,危险性较高,作业效率非常低,容易发生人身伤亡事故,钻具损坏几率也很高<sup>[1-4]</sup>。为了尽量缩短深井钻探的辅助作业时间、减轻作业人员的劳动强度并提高安全性,实现地面向钻井平台运输钻具的自动化和智能化是十分必要的<sup>[5-11]</sup>。全液压自动猫道的钻杆运移系统能够在钻井作业中自动将钻具从地面钻杆排架运移到钻井平台上,而钻杆支架是其关键执行机构之一。

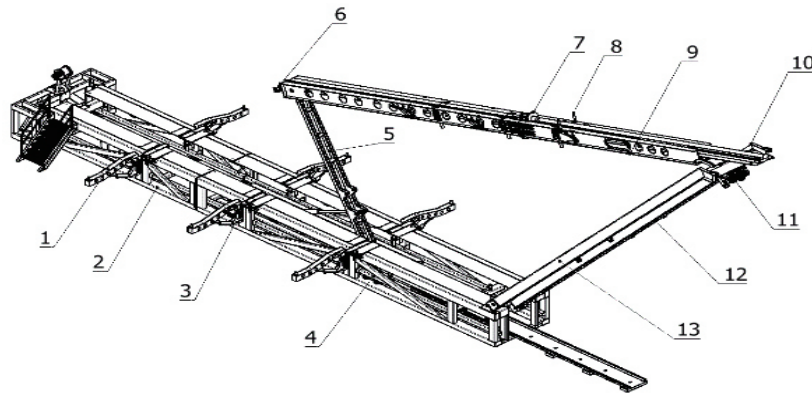
目前行业中应用的全液压自动猫道多采用液压缸驱动的连杆机构作为钻杆支架的主要动力部件。HCW-90型全液压自动猫道是基于四川宏华石油设备有限公司的DBS-90型钻机设计的自动化机具。由于DBS-90型钻机钻台面较高,距离地面12.5 m,而且受到起升机构所需空间的影响,HCW-90型全液压自动猫道的平台高度高于钻杆排架,因此其钻杆支架上部设计为阶梯状型面,钻杆支架的数量为3个,每个钻杆支架内包含一根液压缸,各缸同步动作完成单根常规石油钻杆或套管的起升。

起升过程中3根液压缸分别驱动各自所属的钻

杆支架运动,将钻具从钻杆支架运移至平台侧方翻板机构可操作区域,管体沿其支承面滚动或滑动至平台侧方与档销碰撞,而后稳定停留在翻板动作的可操作位置。在此过程中,钻杆支架动作的启动、运动和停止过程,是影响管体运移平稳性和快速性的主要因素,而钻杆支架动作的同步性则决定了管体运移的空间位姿和运移终了时的定位精度。本文主要采用多体动力学和液压控制系统联合仿真的方法,对所研制的产品样机进行测试。首先进行各缸采用单独的电液比例阀的控制方案的综合性能分析,而后针对采用单片电液比例阀结合分流阀的控制方案进行分析,重点考察3个钻杆支架带载起升过程中的同步性,观察管体空间位姿变化过程,计算管体与档销碰撞的接触力,进一步对两种控制方案进行评估。

## 1 HCW-90型全液压自动猫道结构和工作原理

HCW-90型全液压自动猫道由钻杆支架、平台、翻板机构、滑道变幅机构、撑杆机构、钻杆推送机构、钻杆顶出机构、防坠落机构、举升滑道、变角机构、提升滑车、双缸马达驱动的链条和坡道组成如图1所示。



1—钻杆支架;2—平台;3—翻板机构;4—滑道变幅机构;5—撑杆机构;6—钻杆推送机构;7—钻杆顶出机构;  
8—防坠落机构;9—举升滑道;10—变角机构;11—提升滑车;12—双缸马达驱动的链条;13—坡道

图1 HCW-90型全液压自动猫道结构

HCW-90型全液压自动猫道和顶驱配合完成钻具从地面到底座平台的输运。平台和举升滑道采用分体结构,钻杆支架设计有阶梯形滚道,铰接在平台两侧;钻具挡销内安装有接近开关,用于翻板机构自动控制;采用提升滑车驱动链传动机构或齿轮齿条机构实现滑道举升,配以缓冲助力油缸,利用双轴

倾角传感器检测并调整滑道位姿,确保运行平稳;采用双液压马达驱动链传动机构推送钻具;猫道采用机电液一体化控制,工作效率高,精度高,稳定性好<sup>[12]</sup>。

## 2 主要研究工作内容

钻杆进入猫道平台过程中,钻杆支架起升,使钻杆沿其上表面滚动至猫道平台侧方规定位置,实现钻杆自动运移的第一步。钻杆运移速度过大会对猫道平台上的档销产生较大的冲击力甚至会直接滚入猫道平台内造成事故,速度过小又会卡在猫道平台和钻杆运移系统之间,驱动钻杆支架起升的液压缸间不同步问题也会导致钻杆无法起升<sup>[13-15]</sup>,因此,本文主要针对钻杆支架起升过程中的同步性、钻杆的位姿控制、钻杆与档销碰撞的接触力等3方面的问题进行研究。

钻杆支架起升过程中的同步性即3根液压缸分别驱动3个负载的钻杆支架起升时,能否保持同时启动,保持相同的位移、受力和速度运行,运行终了时同时停止在相同位置。

钻杆的位姿即运行过程中钻杆在 $x, y, z$ 三轴上的坐标,钻杆重心的坐标,钻杆是否沿垂直于钻杆支架支承面的轴旋转,沿平行于钻杆支架支承面的轴平移。

钻杆与档销碰撞的接触力即钻杆沿钻杆支架末端运移至平台侧方可操作区域过程中碰撞档销产生的接触力。

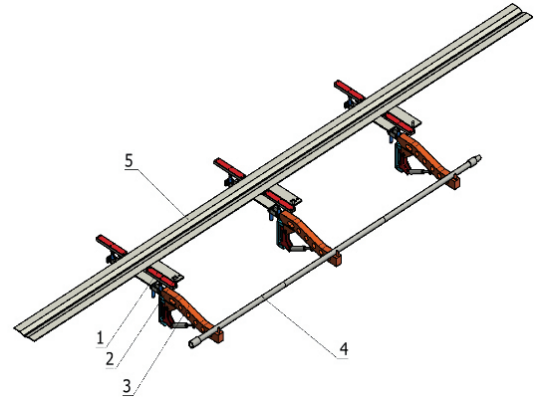
## 3 基于虚拟样机技术的动态仿真

### 3.1 RecurDyn 建模

根据研究内容将HCW-90型全液压自动猫道结构适当简化,留下钻杆支架、平台、翻板机构和档销等部件以及驱动液压缸,然后将模型导入RecurDyn软件的工作区,如图2所示。按照装配和动作原理在各个部件间添加必要的约束,设置钻杆与钻杆支架、钻杆与翻板机构、钻杆与档销间的接触关系,为驱动钻杆支架的液压缸添加轴向力和运动副。上述工作完成后设置求解参数并运行仿真计算,确保多体动力学分析过程可顺利通过,然后在RecurDyn软件中设置联合仿真参数,采用通用数据接口GCoSim,其中3个液压缸的输出力将从液压回路仿真分析软件Amesim获得,对于RecurDyn软件而言是输入变量;液压缸的速度和位移则是多体动力学分析的结果,设置为输出变量传递给Amesim。

### 3.2 Amesim 建模

HCW-90型全液压自动猫道钻杆支架的液压



1—翻板机构;2—档销;3—钻杆支架;4—钻杆;  
5—平台

图2 钻杆支架 MBS 模型

控制回路模型是在Amesim中建立的,钻杆支架液压回路设计采用多片电液比例阀同步控制和单片电液比例阀与分流阀联合控制2种方案。首先对每个液压缸分别采用独立电液比例阀进行控制的回路分析。所搭建的仿真分析模型采用线性分段函数作为输入信号、采用恒定转速的定量泵供油,各联电液比例阀为连接在各阀工作油口上的液压缸提供流量,液压缸行程作为反馈信号,用于实现位置闭环控制。液压缸与多体动力学模型的联接采用联合仿真接口实现,选择接口类型为Functional Mock-up Interface,设置液压缸的3个轴向力为输入值 $F_1, F_2, F_3$ ,液压缸的速度、位移为输出值 $V_1, D_1, V_2, D_2, V_3, D_3$ ,建立液压系统模型如图3所示。

根据图3所示的液压原理,结合液压猫道执行元件的参数要求,选定液压元件型号和参数如表1所示。设置液压缸参数:活塞直径 $D=100$  mm;活塞杆直径 $d=60$  mm;行程 $S=500$  mm。

### 3.3 RecurDyn 和 Amesim 联合仿真

在RecurDyn中接收Amesim输出的FMU文件,然后运行进行联合仿真,运行时间设为10 s,步长设为1000,观察钻杆支架起升过程中的同步性、钻杆的位姿、钻杆与档销的碰撞。

## 4 钻杆支架动态仿真分析

在Amesim软件中设置分段线性位移信号,第一组分段线性位移信号为 $0\sim 0.1$  m,1 s; $0.1\sim 0.1$  m,9 s,驱动钻杆支架起升的3个液压缸位移如图4所示,通过图4中位移曲线可知,3个液压缸的位移

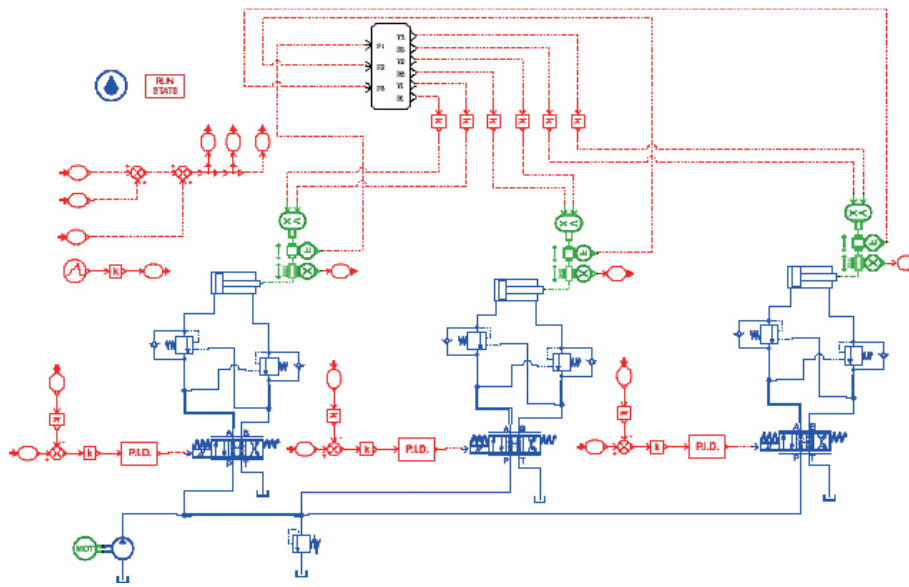


图3 钻杆支架液压原理

表1 液压元件规格型号明细

序号	型号	名称	数量
1	MBS-1250	压力传感器	3
2	PVG32-8	电液比例阀	3
3	FY-100/60-500/16	液压缸	3

趋势与设定的位移信号趋势相同,但是在数值上也有微小的差别,3个液压缸从左到右位移依次增加不超过0.01 m。通过图5中速度曲线可知,液压缸速度在1.2 s之前3个液压缸速度几乎重合,在1.2~3.5 s之间左侧液压缸速度低于中间和右侧液压缸速度,之后速度趋于稳定便没再图中显示。通过图6中液压缸受力曲线可知在初始时间液压缸受到较大的力,在1.2 s之前3个液压缸受力曲线几乎重合,在1.2~3.5 s之间左侧液压缸受力低于中间和右侧液压缸,之后3个液压缸受力趋于稳定便没再图中显示。

在RecurDyn中可以得到钻杆的重心变化曲线如图7所示,x方向上钻杆的重心基本没变化,在3.44 s钻杆与档销碰撞,钻杆重心在10 s内并没有完全稳定停留在进一步翻板动作的可操作位置,运行终了时仍存在微小的波动,而且钻杆中心轴与x轴不平行有一定夹角如图8所示。钻杆需要稳定的时间长在工程中会增加辅助作业时间、增加成本、作业效率降低。从图9中可以看出在3.59、3.67、3.74 s时钻杆与左侧档销三次碰撞,接触力最大为

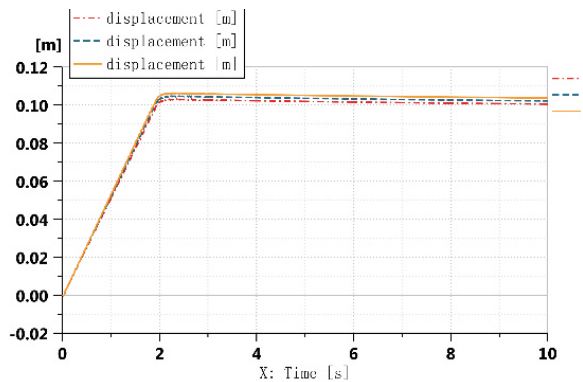


图4 第一组液压缸位移曲线

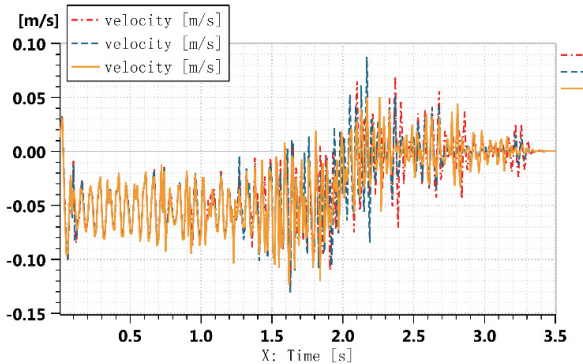


图5 第一组液压缸速度曲线

4535.93 N。钻杆与中间档销和右侧档销并没有碰撞故没有接触力。

通过分析可知钻杆重心并未处在3个液压缸的中点位置,出现偏载,钻杆运行终了时的定位精度不

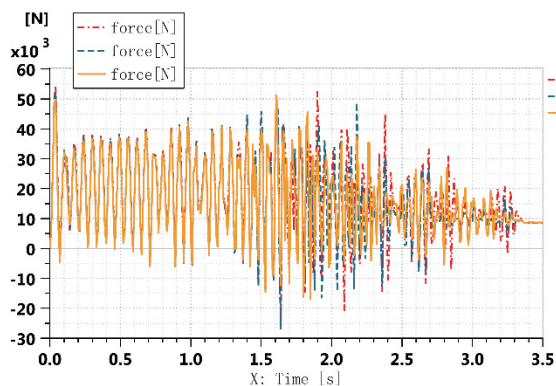


图6 第一组液压缸受力曲线

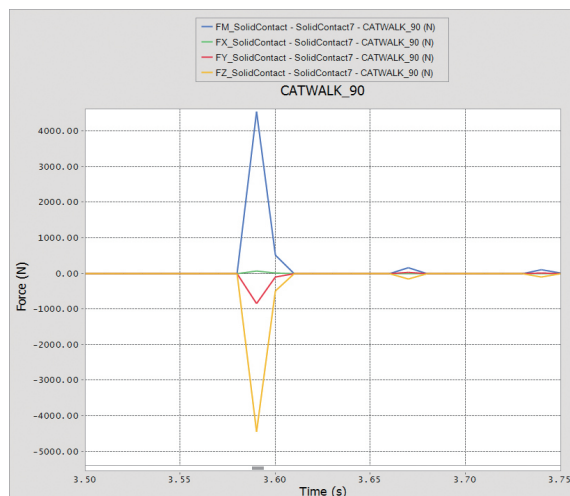


图9 第一组钻杆与左侧档销接触力

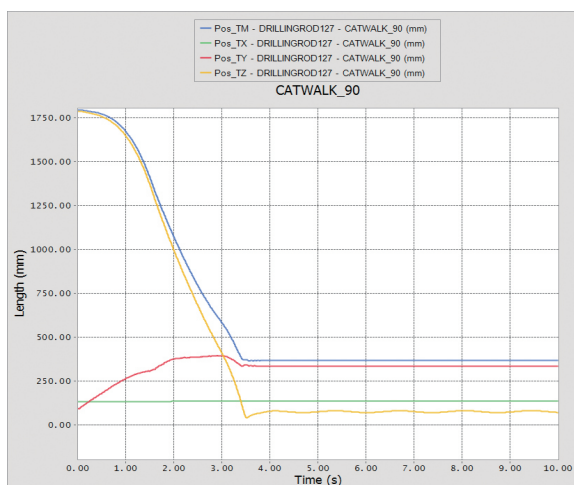


图7 第一组钻杆重心变化曲线

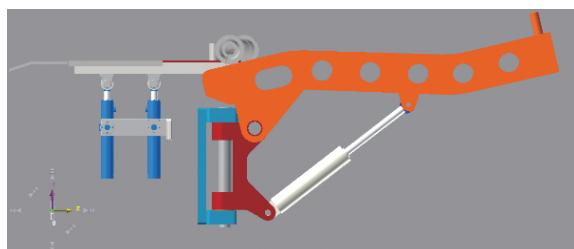


图8 第一组运行終了钻杆位姿

高,钻杆只与一个档销碰撞会加剧档销的破坏,对于产品实际应用过程而言极为不利。

对第一组分段线性位移信号进行改进,改进后的第二组分段线性位移信号为0~0.2 m,3 s;0.2~0.2 m,4 s;0.2~0 m,3 s,驱动钻杆支架起升的3个液压缸位移如图10所示。通过图10中位移曲线可知,3个液压缸的位移与设定的趋势相同,中间液压缸与右侧液压缸位移较为接近,与左侧液压缸位移差值不超过0.01 m。通过图11中速度曲线可知,液压缸速度趋势相同,

在1~3 s时左侧液压缸和中间液压缸速度大于右侧液压缸。通过图12中液压缸受力曲线可知在1~3 s时左侧液压缸和中间液压缸受力大于右侧液压缸。

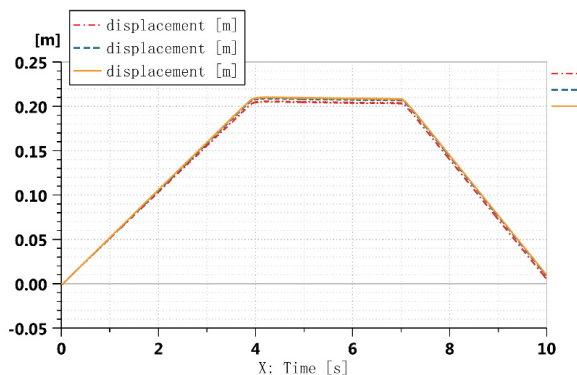


图10 第二组液压缸位移曲线

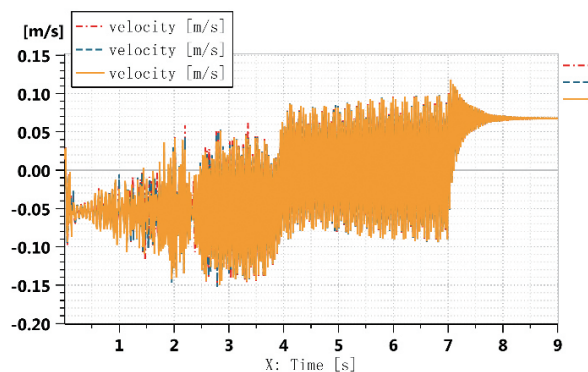


图11 第二组液压缸速度曲线

在RecurDyn中得到钻杆的重心变化曲线如图13所示,x方向上钻杆的重心基本没变化,大约在

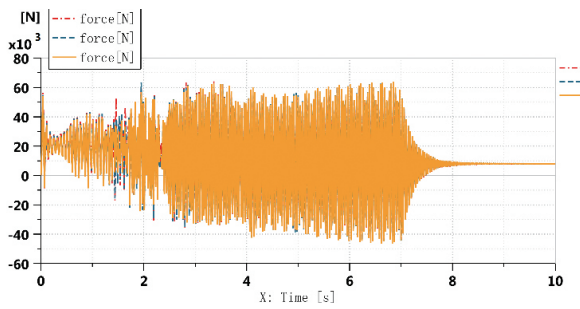


图 12 第二组液压缸受力曲线

3.2 s 时  $z$  方向上重心有回弹, 钻杆重心在 10 s 内并没有完全稳定停留在进一步翻板动作的可操作位置, 仍存在微小的波动。从图 14 中可以看出在 3.55~3.70 s 时钻杆与左侧档销 5 次碰撞, 接触力最大为 4763.43 N。从图 15 中可以看出在 3.6 s 和 3.65 s 时, 钻杆与中间档销碰撞, 接触力为最大 771.71 N。从图 16 中可以看出, 在 3.6 s 和 3.65 s 时, 钻杆与右侧档销碰撞, 接触力最大为 1539.42 N。钻杆与 3 处档销均有碰撞而不是只与一处档销碰撞加剧破坏, 延长了档销使用寿命, 减少了辅助作业时间。

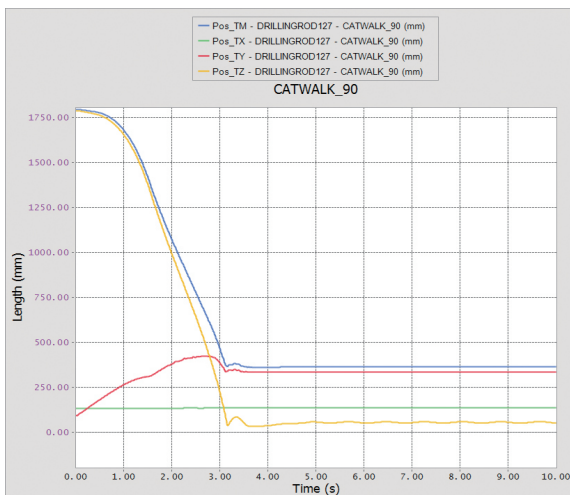


图 13 第二组钻杆重心变化曲线

第二组信号相比于第一组信号同步性有了提高, 提高钻杆支架的同步性。

考虑管体运移的快速性、平稳性和定位准确性, 还需要对信号进行优化, 对仿真模型原理进行调整结合实际井场情况进行调整, 增益  $k$  也进行相应调整, 对分段信号优化后得到第三组信号为 0~0.85 m, 2 s; 0.85~0.1 m, 3 s; 0.1~0.125 m, 2 s; 0.125~0.135 m, 0.5 s; 0.135~0 m, 2.5 s。通过图 17 和图 18

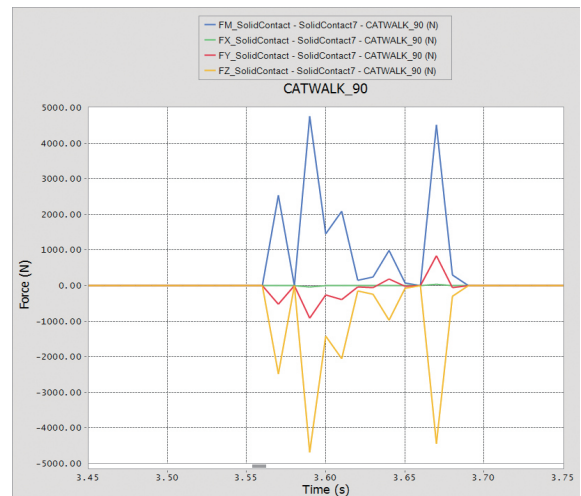


图 14 第二组钻杆与左侧档销接触力

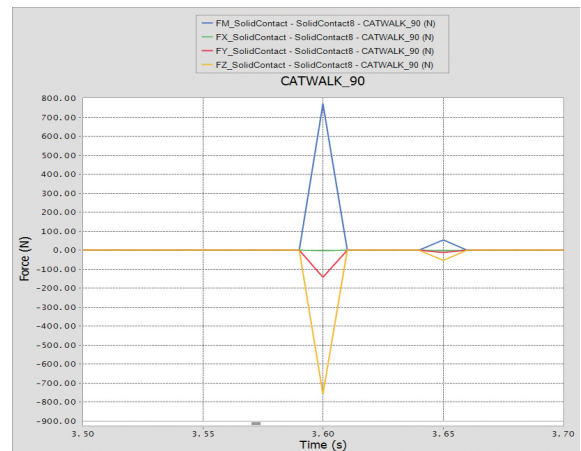


图 15 第二组钻杆与中间档销接触力

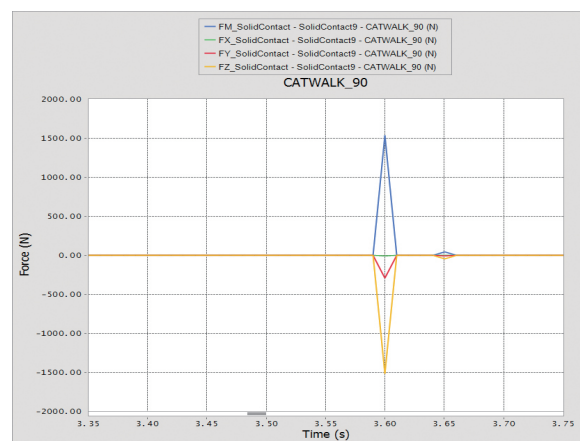


图 16 第二组钻杆与右侧档销接触力

可知运行过程中 3 个液压缸位移, 速度基本相同, 通过图 19~21 可以看出优化后钻杆几乎与 3 个档销同时碰撞, 且接触力趋势相同, 都是先有小的接触力,

然后有较大的接触力,之后又有较小的接触力,约1 s之后又有较小的接触力然后接触力变为零直到运行时间终了,3个档销同时均匀受力。信号较为理想。

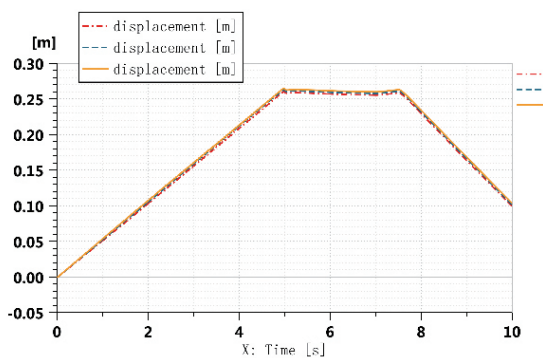


图 17 第三组液压缸位移曲线

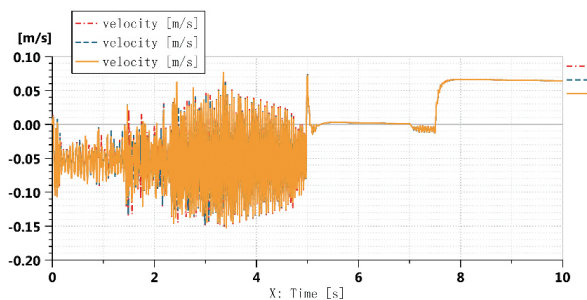


图 18 第三组液压缸速度曲线

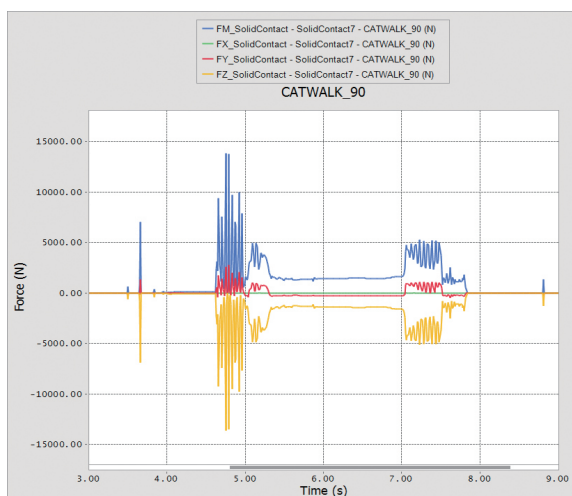


图 19 第三组钻杆与左侧档销接触力

上述液压原理中使用了三片三位四通电液比例阀,考虑实际井场情况,降低成本,提出改换用一片三位四通电液比例阀,然后增加分流阀如图 22 所示的方案。

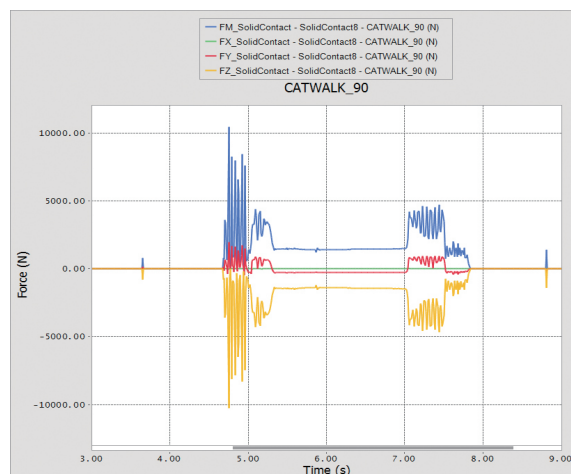


图 20 第三组钻杆与中间档销接触力曲线

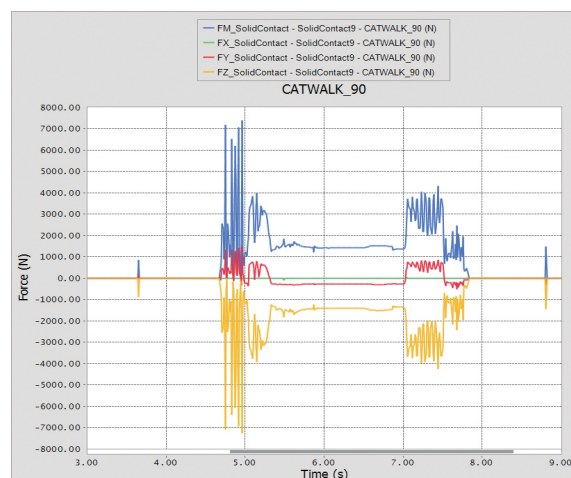


图 21 第三组钻杆与右侧档销接触力

## 5 结论

(1)各液压缸采用单独的电液比例阀进行控制方案同步性能好,管体运移的空间位姿好,3个液压缸基本保持同步,动作快速准确,但行程终了处管体对档销冲击力大,造成钻杆与档销间多次碰撞,需要进行控制信号与反馈控制系统参数的进一步优化。

(2)采用单片电液比例阀结合分流阀的控制方案同步性较差,3个液压缸不同步,运行终了时3个液压缸仍有较小的位移差,但定位精度较为准确,由于分流阀具有节流作用,速度平稳性相对好一些,且成本较第一种方案低。

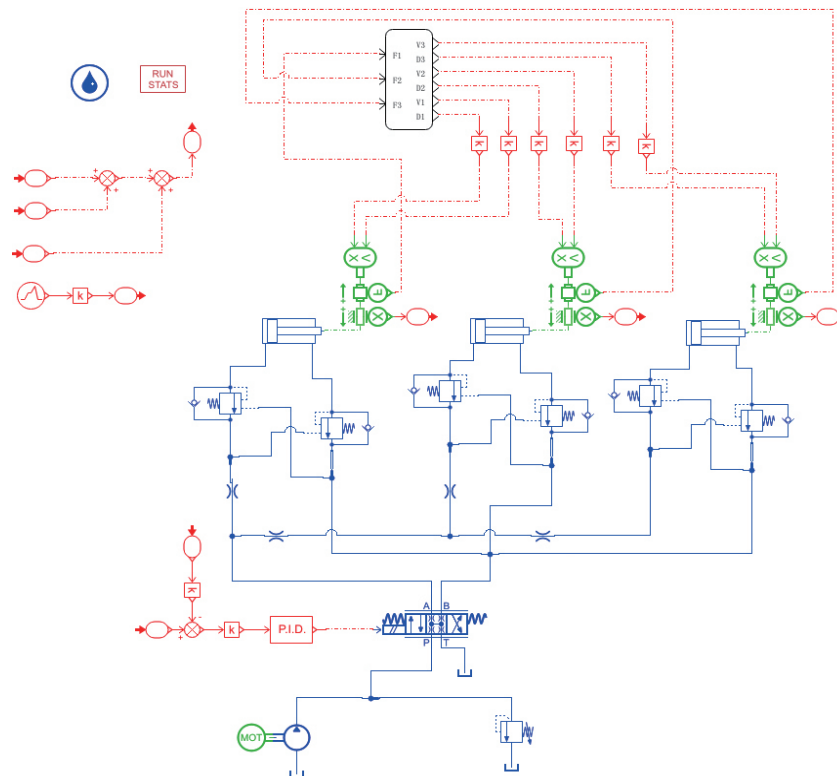


图 22 改进后钻杆支架液压原理

参考文献:

[1] 刘丽娜,于萍.全液压自动猫道研究[J].机床与液压,2016,(2): 105-107.

[2] 赵楠,于萍,宋杰,等.液压猫道翻转机构工程破坏实例分析及优化[J].石油矿场机械,2018,47(3): 39-43.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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].探矿工程(岩土钻掘工程),2021,48(2): 94-99.

[6] 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.

[7] 高鹏举,董耀,刘凡柏,等.5000米地质岩心钻机主绞车设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4): 40-45.

[8] 李进付,安庆宝,董怀荣.钻台自动化机械手装置的研制[J].石油机械,2010,(11): 80-81.

[9] 杨双业,于兴军,黄悦华,等.管柱自动化处理系统在钻机改造升级中的应用[J].机械工程师,2016,(11): 154-156.

[10] 孙友宏,时元玲,王清岩.国际深部大陆科学钻探装备研究进展[J].地球学报,2016, 110-117.

[11] 王早祥,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.

[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] 张鹏,于萍,王清岩,等.全液压自动猫道钻杆运移系统设计及仿真分析[J].机床与液压,2014,(11): 142-144,156.

[14] 王玮,王岩.液压动力猫道系统的机构设计与分析[J].佳木斯职业学院学报,2016,(10): 496.

[15] 李友兴,董宗正,刘永胜,等.猫道机踢出装置同步问题的探讨[J].船舶,2016,27(6): 87-93.