

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.022

基于 PID 参数优化控制的 伞钻液压系统仿真分析*

张 磊

(河南科技职业大学 机电工程学院, 河南 周口 466000)

摘要:针对传统液压伞钻的钻孔定位中,人为因素对定位精度影响大、调整时间长、自动化程度低、工作效率不高的问题,以 YSJZ4.8 全液压四臂伞钻为研究对象,采用 PID 算法,对液压伞钻的液压系统进行了优化。对液压缸采用了闭环控制,基于遗传算法对 PID 参数进行了优化,并通过阶跃信号对参数优化后系统进行了仿真分析;建立了虚拟样机动力学仿真模型,获得了位姿改变过程中活塞杆位移与液压缸负载的变化情况,对优化系统施加了变负载,分析、比较了活塞杆真实位移与理论值之间的差异。研究结果表明:经优化设计后的液压系统具有较高的稳定性及快速响应性,对变负载具有较高的位置控制精度,可满足伞钻的实际工作要求。

关键词:液压伞钻;液压系统;活塞杆位移;ADAMS;仿真分析

中图分类号:TH137;TH134;TD421

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)12-1530-05

Simulation analysis of hydraulic system of parachute drill based on PID parameter optimization control

ZHANG Lei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University
of Science and Technology, Zhoukou 466000, China)

Abstract: Aiming at the problem that at the traditional drilling positioning of hydraulic parachute drill, human factors had great influence on positioning accuracy, adjustment time, level of automation and efficiency, taking YSJZ4.8 full hydraulic four arm umbrella drill as the research object, PID algorithm was used to optimize the hydraulic system of the hydraulic parachute drill. The closed-loop control was adopted in the hydraulic cylinder. PID parameters were optimized based on genetic algorithm, and the system was simulated and analyzed by step signal. The dynamic simulation model of virtual prototype was established to obtain the change of piston rod displacement and hydraulic cylinder load during the change of position and orientation. The variable load was applied to the optimization system to compare and analyze the difference between the real displacement of piston rod and the theoretical value. The results indicate that the optimization system has high stability and fast response, and has high position control accuracy for variable load, which meets the requirements of umbrella drilling.

Key words: hydraulic umbrella drill; hydraulic system; piston rod displacement; ADAMS; simulation analysis

0 引 言

立井开拓作为深层矿井重要施工方式,施工过程复杂,且受地质影响大,施工时间相对总工期占比较

高^[1]。伞钻作为井筒开凿的重要设备,通过提高其开拓效率,可有效提高立井施工的机械化程度^[2]。目前,立井开拓用伞钻控制方式主要为气动和液压两种形式。其中,气动伞钻进尺慢、效率低,因此,液压伞钻的应用相对较为广泛。

收稿日期:2020-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875385);河南省社科联资助项目(SKL-2018-1956)

作者简介:张磊(1982-),男,河南周口人,讲师,主要从事机电液一体化技术、机械工程等方面的研究。E-mail:zhanglei20191002@163.com

传统液压伞钻由手动阀组成液压控制阀组,工作中需手动调节换向阀控制液压缸,通过改变伞钻位姿实现钻孔定位^[3]。该方法简单、可靠,但人为因素对定位精度影响较大,且调整时间长,影响施工效率。

为了解决以上问题,笔者设计基于 PID 参数优化控制的伞钻液压系统,对液压伞钻的机械臂位姿进行控制,以提高立井开拓效率及钻孔定位精度。

1 单臂液压系统分析

笔者以 YSJZ4.8 全液压四臂伞钻为研究对象,对单组工作臂液压系统进行研究。该伞钻由立柱、大臂、支撑臂、液压系统及凿岩机构成^[4],4 组钻臂及支撑臂安装于立柱。

伞钻单臂液压系统如图 1 所示。

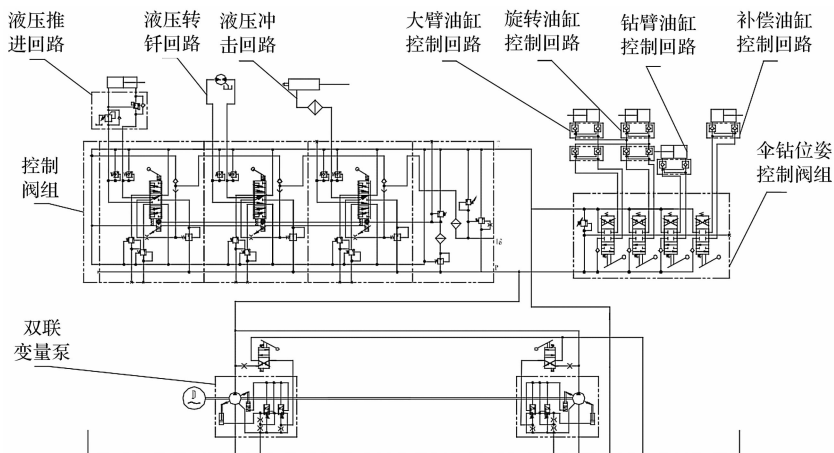


图 1 伞钻单臂液压系统图

图 1 中,由于钻臂油缸及大臂油缸对位姿影响较大,笔者对其实施闭环控制;在控制器将钻臂末端位置信息进行计算分析后,将控制信号发送与比例换向阀,通过比例换向阀调节机械臂位姿^[5];钻臂及大臂油缸通过磁致伸缩传感器实时采集液压杆位置信息;控制系统的快速响应性及稳定性取决于信号校正,PID 控制器通过调节信号,优化系统动态特性。

2 单臂液压系统仿真

AMESim 为液压系统仿真分析的重要工具^[6]。在系统建模前,笔者作如下假设:

- (1) 对单臂位姿控制进行建模;
- (2) 设油液为非压缩性介质;
- (3) 忽略油液温度变化。

大臂液压缸 AMESim 仿真模型如图 2 所示。

仿真模型中各参数为:

液压缸活塞杆及活塞直径分别为 40 mm、80 mm;比例换向阀输入电流为 100 mA,最大流量为 40 L/min;液压泵排量为 46.7 L/r,额定转速为 1 000 r/min。

PID 校正信号为^[7]:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中: $e(t)$ —活塞杆位移误差信号; $u(t)$ —控制模块校正输出信号; T_i —积分时间常数; k_p —比例常数;

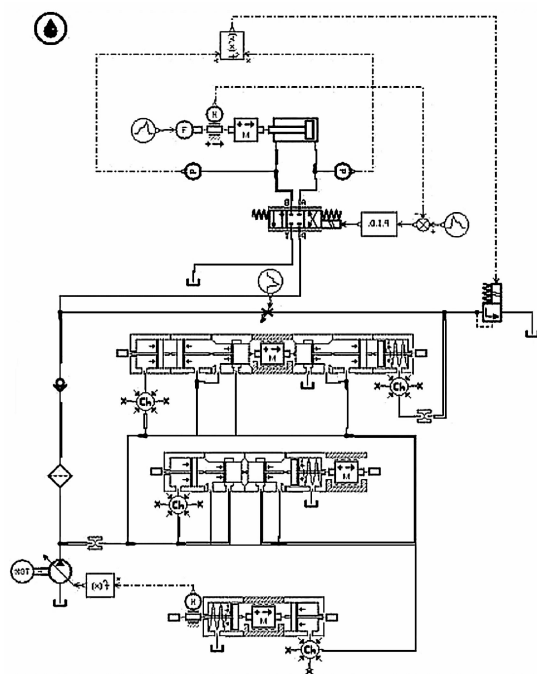


图 2 大臂液压缸闭环控制系统 AMESim 仿真模型

T_d —微分时间常数。

比例、积分、微分常数影响系统整体动态特性,因此,需对以上参数进行整定、优化。

笔者利用 AMESim 的批处理功能,分别对改变比例、积分、微分常数后液压缸出口压力 P 变化进行仿真。

比例常数改变时,液压缸的出口压力仿真结果如图 3 所示。

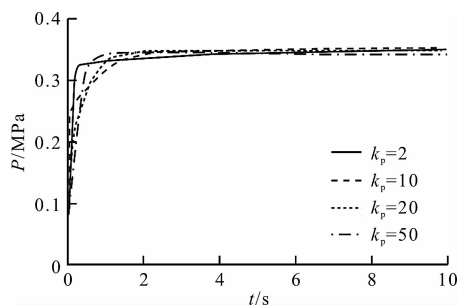


图 3 比例常数改变时液压缸出口压力

积分常数改变时,液压缸的出口压力仿真结果如图 4 所示。

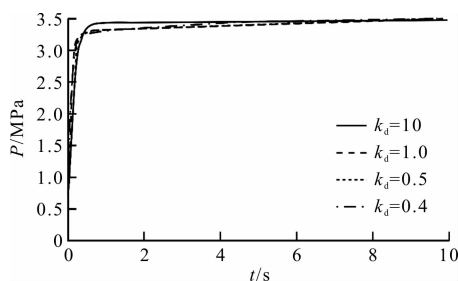


图 4 积分常数改变时液压缸出口压力

微分常数改变时,液压缸的出口压力仿真结果如图 5 所示。

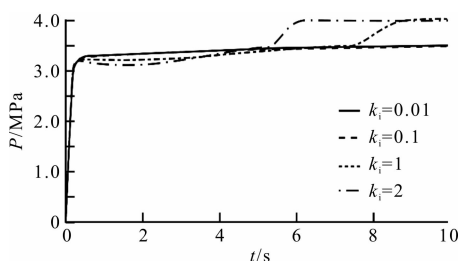


图 5 微分常数改变时液压缸出口压力

通过对图(3~5)的仿真分析可知:

(1) 针对系统阶跃响应,增大比例常数,系统快速响应性提高,稳态误差降低,但超调量增大;(2) 增大积分常数时,稳态误差降低,但动态响应性及稳定性降低;(3) 增大微分常数系统快速响应性提高,但稳定性降低。

根据 PID 参数变化对系统动态特性的影响,笔者通过遗传算法求解系统最优参数。

参数优化的目标为降低系统稳态误差,提高系统稳定性及快速响应性。笔者通过 AMESim 进行仿真分析,调整 k_d 、 k_i 为(0,1), k_p 为(0,50),设定活塞杆最大位移为 20 mm;约束条件为活塞杆最大移动速度,其于 2 s ~ 10 s 稳定时波动及静态误差最小,选取基因交叉

概率及变异概率分别为 0.8、0.05,种群范围为 50,迭代次数为 40,变异幅度为 20%。

笔者通过 AMESim 遗传算法优化模块,获取 PID 优化参数为: $k_d = 0.994$, $k_i = 0.996$, $k_p = 20.022$ 。

笔者对优化参数进行仿真分析。液压缸出口压力 P 变化曲线如图 6 所示。

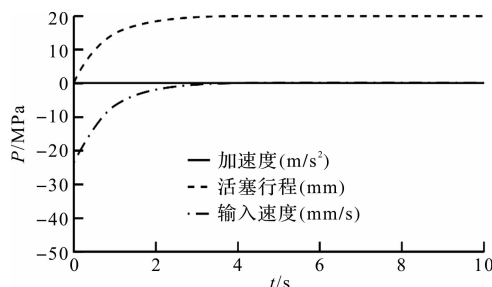


图 6 优化后液压缸出口压力

由图 6 可知,PID 参数优化后,系统快速响应性明显提高,虽后期具有小压力波动,但超调量低于 3%,系统整体动态特性得到提高。

3 单臂 ADAMS 建模仿真

3.1 单臂 ADAMS 建模

笔者通过 ADAMS 对负载力在单臂位姿改变时的变化进行建模仿真^[8]。由于 ADAMS 直接建模困难,笔者通过 SolidWorks 建立单臂模型,并将其导入 ADAMS^[9-10]。

此处设定各组成部件材质为钢,密度为 7 800 kg/m³,泊松比为 0.29,弹性模量为 2.07×10^5 N/mm³。

组件之间的约束关系如表 1 所示。

表 1 组件连接类型

连接部件	连接类型
固定架-地面	固连副
旋转臂-固定架	旋转副
液压缸活塞杆-液压缸缸体	圆柱移动副
倾斜液压缸活塞杆-钻臂	旋转副
倾斜液压缸缸体-大臂	旋转副

笔者按表 1 添加约束条件,获得 ADAMS 模型。

3.2 单臂工作空间分析

单臂末端可达范围为单臂工作空间,笔者通过蒙特卡罗法确定单臂工作空间^[11]。

(1) 通过 ADAMS 中 RAND 函数,生成若干 0 ~ 1 随机数。

则活塞杆伸出量为:

$$s_i = s_{\min} + (s_{\min} - s_{\max}) \cdot \text{rand}(j) \quad (2)$$

式中: s_i —第 i 各活塞杆伸出量,mm, $i = 1, 2, 3, 4$;

$s_{\min}$ —活塞杆最小伸出量,此处取 0; $s_{\max}$ —活塞杆最大伸出量,此处取 100 mm; $rand(j)$ —内置随机函数,产生个 0 ~ 1 随机数, $j = 10\ 000$ 。

(2) 通过批量处理,获得末端点坐标值。

笔者根据各坐标值,通过 MATLAB 绘制三维图形。

伞臂工作空间投影如图 7 所示^[12]。

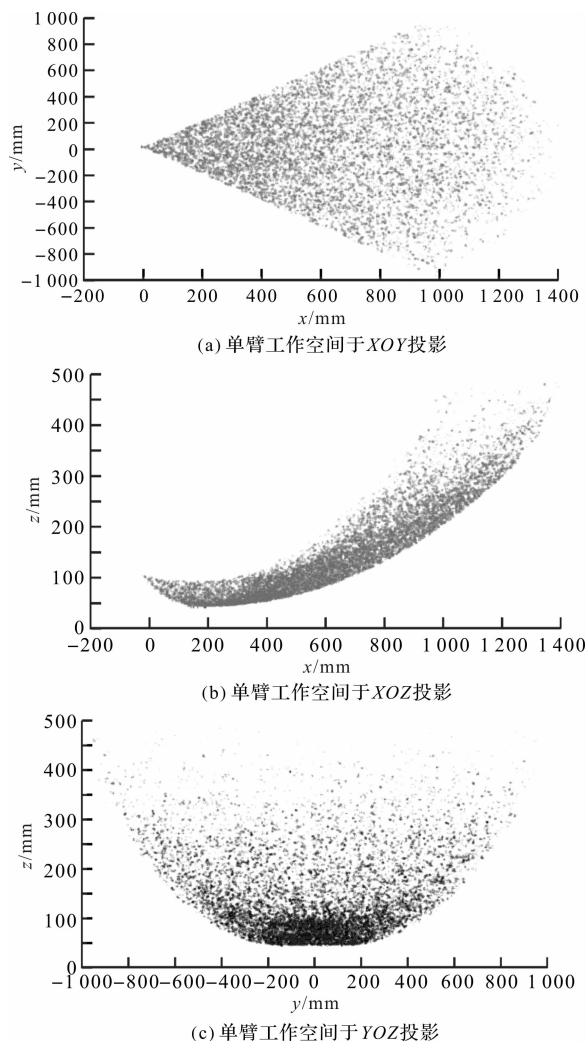


图 7 伞臂工作空间投影

由图 7 可知,伞臂以旋转臂为中心工作空间近似对称,且临界空间于高度方向为近似光滑曲面。

4 变负载下活塞杆位移分析

由于液压缸负载随单臂位姿变化而变化,笔者需要对于优化后的液压系统进行分析;在 ADAMS 仿真分析中,钻臂液压缸及大臂液压缸输入斜率分别为 5 和 9,获得单臂位姿。

笔者分别将钻臂及大臂液压缸受力情况加载于液压系统 AMESim 模型中,对比例换向阀施加斜坡控制信号,设定时长为 5 s。

由于钻臂及大臂结构均匀,位姿调整时负载力变

化近似线性,即:

$$f_1 = 208.19t - 8.1375 \quad (3)$$

$$f_2 = 30.821t + 118.23 \quad (4)$$

式中: f_1, f_2 —大臂、钻臂液压缸负载力, N; t —单臂动作时长, s。

笔者设定仿真中活塞杆位移为实际位移,将其与虚拟样机位移进行比较,获得变负载下位姿调整时位移 l 情况,其对比如图 8 所示。

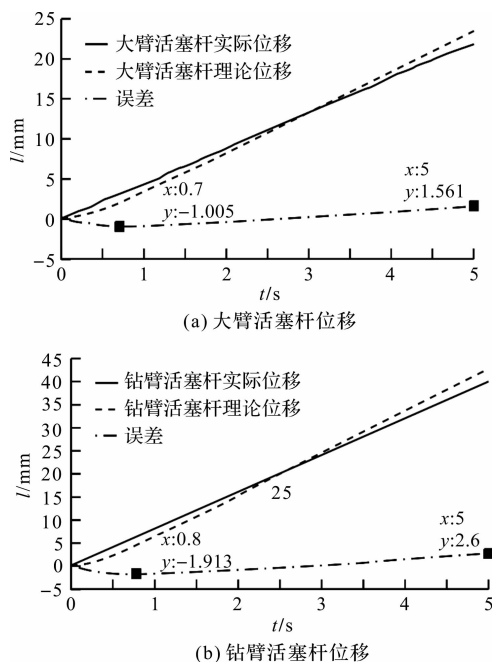


图 8 活塞杆位移对比

由图 8 可知:动作开始时机械臂自重由连接铰链平衡,负载力较小,液压缸理论位移小于实际位移;位姿改变,负载力增大,理论位移逐步增加并大于实际位移。

大臂、钻臂液压缸相对位移误差 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为:

$$\varepsilon_1 = 1.561/24 \approx 0.065 \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = 2.6/43 \approx 0.061 \quad (6)$$

笔者将固定架底座中点设定为起点,机械臂末端位移幅值 l 及误差 ε 对比如图 9 所示。

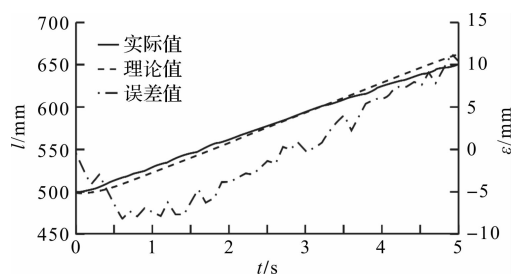


图 9 机械臂末端位移幅值及误差对比

由图 9 可知,该过程中误差最大值约为 11 mm。

综合分析井下实际工况可知,笔者所提出的优化方案可以满足伞钻的精度要求。

5 结束语

由于传统液压伞钻钻孔定位中,定位精度低、自动化程度低,笔者以 YSJZ4.8 全液压四臂伞钻为研究对象,采用 PID 算法对液压伞钻液压系统进行了优化设计,得到结果如下:

(1)笔者对伞钻钻臂及大臂液压缸实施闭环控制,并采用改进 PID 算法对误差信号进行了校正,实现了机械臂的自动化控制;

(2)采用遗传算法对控制系统 PID 参数进行整定,通过系统的节约信号仿真可知,系统稳定性及快速响应性均明显提高;

(3)通过 ADMAS 建立伞钻单臂模型,将液压缸负载力加载于 AMESim 进行仿真,获得了变载荷下液压缸理论位移,并将其与实际位移进行了比较分析,由分析结果可知,优化后系统满足变负载自动化控制要求。

参考文献 (References):

- [1] 马甲年. 雅店井田工业场地与开拓方案设计比选研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(6): 4-7.
- [2] 符爱红. 全液压伞钻液压系统设计与仿真[J]. 机床与液压, 2016, 44(8): 99-102.
- [3] 程志彬, 马传银, 杨晓信. 液压伞钻研制及其在立井硬岩爆破施工中的应用[J]. 建井技术, 2010, 31(1): 35-38, 34.
- [4] 何志清, 李 条. YSJZ4.8 型全液压伞钻在平煤六矿北二进风立井井筒施工中的应用[J]. 建井技术, 2017, 30(3): 33-34.
- [5] 乔志刚, 张晓刚, 赵 斌, 等. 快锻液压机速度位置复合控制特性仿真研究[J]. 液压与气动, 2019(8): 13-20.
- [6] 姚丽英, 高宇龙, 张占东. 基于 AMESim 的液压支架用液控单向阀工作特性分析[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 75-77.
- [7] 贺云波, 陈家俊. 永磁同步电机的复合控制及参数自整定研究[J]. 机电工程, 2019, 36(9): 995-1000.
- [8] 田 波, 王尧尧, 朱康武, 等. 绳驱动机械臂动力学建模及 ADAMS 仿真研究[J]. 机电工程, 2019, 36(8): 803-808.
- [9] 申文强, 聂松林, 尹方龙, 等. 一种新型低速大扭矩水液压马达结构设计及仿真分析[J]. 液压与气动, 2019(6): 17-21.
- [10] 于 宁. 8300HV 液压机主缸缸体的强度校核和优化设计[J]. 液压气动与密封, 2018(2): 38-39.
- [11] 陶 梅, 任青文. 基于正交试验—蒙特卡罗法的边坡破坏概率研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 132-135.
- [12] 宁 冉, 李重光, 楼宇丽, 等. 基于多图像处理单元的 MATLAB 计算全息图快速算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 60-65.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

张 磊. 基于 PID 参数优化控制的伞钻液压系统仿真分析[J]. 机电工程, 2020, 37(12): 1530-1534.

ZHANG Lei. Simulation analysis of hydraulic system of parachute drill based on PID parameter optimization control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(12): 1530-1534.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>