

基于 S 曲线加减速的石油钻机钻速自动控制方法

童明金

(中石化物资装备部 国际事业公司,北京 100728)

摘要:针对传统钻速控制方法存在的工作效率和控制精度低、控制时间长的问题,设计一种基于S曲线加减速的石油钻机钻速自动控制方法。通过负荷辛普森求解公式计算石油钻机钻速的曲线长度,将最大轮廓误差以及最大向心加速度设定为约束条件,对石油钻机钻速进行规划。使用S曲线加减速方法对石油钻机启动输入信号进行二次规划以有效抑制系统扭振,再通过粒子群优化算法对S曲线中的参数进行优化,获取最小程度激发残余振荡的S曲线,实现对石油钻机钻速的自动控制。仿真结果表明:该方法能够有效提升控制效率和控制精度,同时还能有效减少自动控制时间。

关键词:S曲线加减速;石油钻机;钻速自动控制;粒子群优化算法

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0232-04

Automatic Control Method of Drilling Rate of Oil Rig Based on S-curve Acceleration and Deceleration

TONG Mingjin

(International Business Company, Sinopec Material and Equipment Department, Beijing 100728, China)

Abstract: To address the problems of low efficiency, poor control accuracy and increased control time of traditional drilling rate control method, an automatic drilling rate control method based on S-curve acceleration and deceleration is designed. The curve length of drilling rate of oil rig is calculated by Simpson solution formula of load, and the maximum contour error and maximum centrole acceleration are set as the constraint conditions for planing the drilling rate of oil rig. The S-curve acceleration and deceleration method is used to carry out quadratic programming for the starting input signal of the oil drilling rig to suppress the torsional vibration of the system effectively, and the parameters in the S-curve are optimized by particle swarm optimization algorithm to obtain the S-curve with minimum excitation residual oscillation, so as to realize the automatic control of drilling speed of the oil drilling rig. Simulation results show that the designed method can effectively improve the control efficiency and accuracy, and reduce the automatic control time as well.

Keywords: S-curve acceleration and deceleration; oil rig; automatic control of ROP; particle swarm optimization algorithm

0 引言

现代数控技术在航天及国防等多个领域得到了广泛的关注和应用,同时也成为现代制造技术发展的重要手段之一^[1-2]。近几年来,我国的石油钻机制造技术取得了突飞猛进的发展,目前已经进入自主研发阶段,整体水平得到较大程度的提升^[3]。虽然已有的石油钻机能够满足我国基本的勘探工作需求,但是如何有效自动控制石油钻机钻速成为各个制造厂商需要解决的首要问题。

相关专家针对该方面的内容进行了大量研究。汪首坤等^[4]构建了电机执行机构的简化模型,借助模型使用三参量控制方法对加速度进行控制。刘清友等^[5]将钻井机器人作为研究对象,根据钻井液排量来控制钻压和钻速,设计了一种单参数控制模型。本文在已有方法的基础上,提出一种基于S曲线加减速的石油钻机钻速自动控制方法。经实验测试证明,该方法能够有效降低自动控制时

间,提升控制精度和控制效率提高量。

1 方法设计

1.1 石油钻机钻速规划

非均匀有理B样条^[6-7]的节点参数能够均匀分布,但需要在其中加入权因子。同时,为了确保方法具有更好的实时性,需要在预处理阶段分别求解不同基函数的表达式,同时将其统一为矩阵的形式进行存储。

通过德布尔-考克斯递推进行基函数计算,详细的计算式如式(1)所示。

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i < u_{i+1} \\ 0, & u_i \geq u_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1}-u}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

式中: $N_{i,0}(u)$ 和 $N_{i,k}(u)$ 代表两个取值不同的基函数; k 代表多样式样条数量; u_i 代表节点基底元素。

通过控制顶点可以确定节点矢量是一个参数化问题,同时根据点 p_i 确定唯一一条参数插值曲线。在此基础上,为了提高控制效果,实时确保曲线的起点和终点能够与多边形的顶点在同一位置^[8]。其中,节点矢量表示为

$$\mathbf{U} = \left\{ \left(\frac{\sum_{j=1}^k l_j + \frac{l_{k+1}}{2}}{L} \right), \left(\frac{\sum_{j=1}^{k+1} l_j + \frac{l_{k+2}}{2}}{L} \right), \dots, \left(\frac{\sum_{j=1}^{n-k} l_j + \frac{l_{n-k}}{2}}{L} \right) \right\} \quad (2)$$

式中: \mathbf{U} 代表节点矢量集合; l_j 代表第 j 条曲线的长度; n 代表节点数量的总数; l 代表曲线的长度。其中,任意一条控制曲线的分段矢值多样式函数 $C(u)$ 表示为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)} \quad (3)$$

式中: d_i 代表控制顶点; ω_i 代表权值。

在上述分析的基础上,以下通过复合辛普森求积公式计算控制曲线的长度,详细的操作步骤如下。

1) 将控制曲线节点参数区间划分为 $[u, u_{i+1}]$, 将各个子区间表示为 $[x_k, x_{k+1}]$, 同时将控制曲线的长度表示为 $s_{i,i+1}$, 具体的计算式为

$$s_{i,i+1} = \int_{u_i}^{u_{i+1}} \left| \frac{\delta C(u)}{du} \right| du \quad (4)$$

式中 d 代表节点参数的总数。

2) 在 $[u, u_{i+1}]$ 区间上,对控制曲线的长度进行 n 等分,并对等分结果进行复合辛普森求解计算,如式(5)所示。

$$s_{i,i+1} = \sum_{k=0}^{n-1} \int_{x_k}^{x_{k+1}} \left| \frac{\delta C(u)}{du} \right| du + R_n(u) \quad (5)$$

式中 $R_n(u)$ 代表余项,计算公式如式(6)所示。

$$R_n(u) = \frac{h}{180} \left(\frac{h}{2} \right)^4 \left| \frac{\delta C(u)}{du} \right|_{u-\eta}^{(4)} \quad (6)$$

式中 η 代表任意参数。

3) 在明确控制顶点和节点矢量等信息的基础上,建立 NURBS 曲线^[9-10],并通过曲线也能够确定定义域内的任意参数值。这一过程中,需要使用德布尔-考克斯递推公式获取对应的坐标值,计算式如式(7)所示。

$$p(u) = \begin{cases} \sum_{j=0}^n d_j N_{i,k}(u) \\ \sum_{j=0}^n d_j^i N_{i,k}(u) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $p(u)$ 代表参数的坐标值; d_j 代表第 j 个控制顶点。NURBS 的总长度 L 计算公式为

$$L = \sum_{i=k}^M s_{i,i+1} \quad (8)$$

式中 M 代表控制顶点总数。

4) 将最大轮廓误差以及最大向心加速设定为约束条件,对石油钻机钻速进行初次规划。

1.2 基于 S 曲线加减速的石油钻机钻速自动控制

a) 最高钻速分析

在 S 曲线的加减速过程中,不存在速度突变的情况,因此其能够有效减弱加工过程中的柔性冲击。为此,分析 S 曲线加减速过程中的积分关系,同时获取对应的位移 S 表达式:

$$S = V_{\text{start}} t + \frac{1}{6} j_{\text{max}} t^3 \quad (9)$$

式中: V_{start} 代表曲线的起始端速度; j_{max} 代表最大允许加速度; t 代表石油钻机运行时间。

当待加工曲线的长度足够长时,通过最高钻速能够达到指令钻速;如果曲线过短,最高加速度无法达到指令钻速。以下重点针对上述两种情况进行分析。

1) 分析情况 1: 能够进一步获取加加速段和减加速段的运行时间,具体如式(10)所示。

$$t_1 = t_2 = \left(\frac{F - V_{\text{start}}}{j_{\text{max}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: F 代表指令钻速; t_1 和 t_2 代表两个不同阶段的运行时间。

2) 分析情况 2: 能够获取加加速段和加减速度的运行时间:

$$t_3 = t_4 = \left(\frac{F - V_{\text{start}}}{j_{\text{min}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中 j_{min} 代表最小允许加速度。

b) 优化 S 曲线

为了有效控制石油钻有机启动时发生振荡,需要通过 S 曲线规划输入信号。由于以往是通过经验设置曲线参数,难以规划合理的曲线^[11],因此,本文主要通过粒子群算法对 S 曲线进行优化,进而获取最小程度激发残余振荡的 S 曲线。优先对粒子群优化算法^[12]的详细操作步骤进行分析,过程如下。

首先设定一个由 m 个粒子组成的群体在 D 维空间中飞行获取最优解,其中粒子 i 在 t 时刻的位置属性表示为

$$x_r^k = (x_{r1}^k, x_{r2}^k, \dots, x_{rD}^k) \quad (12)$$

式中 x_r^k 代表搜索空间的上下值。速度属性表示为

$$v_r^k = (v_{r1}^k, v_{r2}^k, \dots, v_{rD}^k) \quad (13)$$

式中 v_r^k 代表搜索速度。其中,粒子的自身最优位置 p_r^k 和整个粒子群中目前的最优位置 p_g^k 表示为

$$\begin{cases} p_r^k = \{p_{r1}^k, p_{r2}^k, \dots, p_{rD}^k, \dots, p_{rD}^k\} \\ p_g^k = \{p_{g1}^k, p_{g2}^k, \dots, p_{gD}^k, \dots, p_{gD}^k\} \end{cases} \quad (14)$$

在粒子群算法中,粒子个体不断地改变自身的位置和速度,则在 $i+1$ 时刻,粒子个体的速度和位置分别为

$$\begin{cases} v_{rd}^{k+1} = v_{rd}^k + c_1 r_1 (p_{rd}^k - x_{rd}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{rd}^k) \\ x_{rd}^{k+1} = x_{rd}^k + v_{rd}^{k+1} \end{cases} \quad (15)$$

式中: r_1 和 r_2 代表学习因子; c_1 和 c_2 代表任意常数。

为了全面提升粒子算法的搜索能力,需要全面增加搜索效率,同时还需要在速度公式中加入惯性因子 ω , 计算公式如式(16)所示。

$$v_{rd}^{k+1} = \omega v_{rd}^k + c_1 r_1 (p_{rd}^k - x_{rd}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{rd}^k) \quad (16)$$

适应度函数的建立会直接对寻优结果产生影响,合理的适应度函数能够准确反映出系统的性能特征,进而获取更好的优化参数。

c) 自动控制

为了提高系统的控制性能,需要将上升时间 t_r 、超调量 M_p 以及系统误差 e 等参数以不同的形式融入到适应度函数中,确保系统的快速性以及稳定性得到有效提升。在上述操作的基础上,在平方误差积分准则的基础上对控制输入的绝对值进行补充。设定 $f(t_r)$ 代表惩罚函数,则对应的计算公式为

$$f(t_r) = \begin{cases} k, & \text{false} \\ t, & \text{ture} \end{cases} \quad (17)$$

适应度函数表示为

$$J = \int_0^{\infty} (\eta_1 |e(t)| + \eta_2 |u(t)| + \eta_3 |M_p|) + f(t_r) \quad (18)$$

式中: η_1 和 η_2 代表权值; η_3 代表惩罚因子; M_p 代表平方误差; $e(t)$ 代表时间项。

通过粒子群算法对 S 曲线的参数进行优化估计,详细的操作过程如图 1 所示。

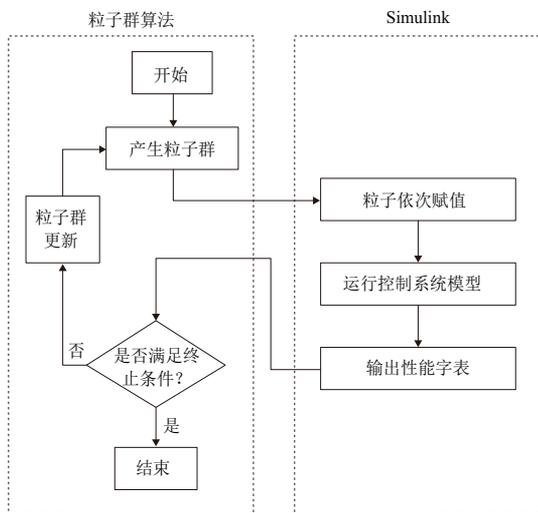


图 1 粒子群对 S 曲线的优化流程

结合上述对 S 曲线的优化流程,能够实现对石油钻机钻速的自动控制,具体步骤如下:

- 1) 通过速度以及位置等相关公式,设定相关参数和权重范围,同时随机形成粒子的位置和速度;
- 2) 粒子在进入 Simulink 模块后,选取适应度,并根据适应度确定全部最优和局部最优;
- 3) 计算不同粒子的适应度取值,同时选取最优 p_r^k 和 p_g^k ;
- 4) 若未满足终止条件,继续更新粒子个体的位置和速度;
- 5) 假设达到设定的迭代次数,则输出经过优化后的结果,实现石油钻机钻速自动控制;反之,则跳转至步骤 2)。

2 仿真实验测试与分析

为了验证本文所提的基于 S 曲线加减速的石油钻机钻速自动控制方法的有效性,在 Matlab 环境中设定石油

钻机的相关参数,在曲线规划的过程中进行参数计算,并进行对比实验测试。

1) 控制效率提高量

分析经过不同控制方法进行钻速控制后,记录不同方法控制过程所用的整体时间;然后计算本文方法、文献方法之间用时差与文献方法用时的比值,得到石油钻机的控制效率提高量变化情况如图 2 所示。

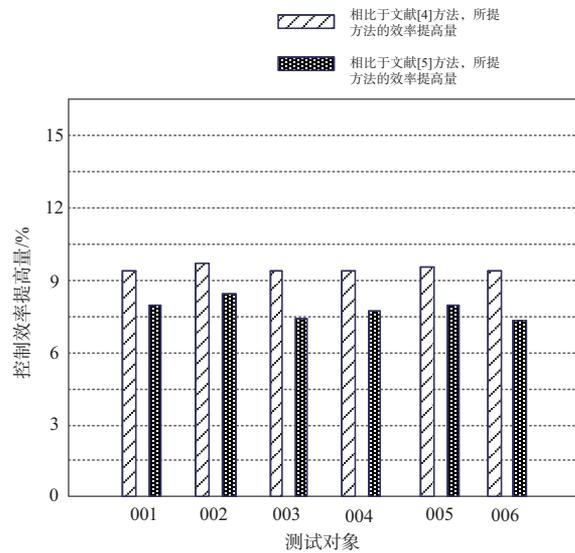


图 2 本文方法的控制效率提高量对比

分析图 2 中的实验数据可知,相比于两种文献方法,本文所提方法的控制效率明显有所提高,这主要是因为所提方法对石油钻机钻速进行了规划,通过规划结果能够更好地对钻速进行控制,同时也能够更好地提升石油钻机的控制效率。

2) 石油钻机钻速自动控制精度测试分析

为了验证所提方法的控制效果,优先分析所提方法进行石油钻机钻速规划前后的曲线变化情况,Matlab 软件输出的详细实验结果如图 3 所示。

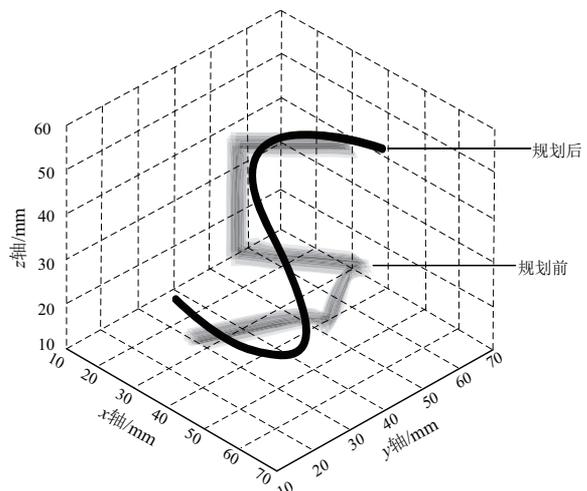


图 3 石油钻机钻速规划前后 S 曲线变化情况

分析图 3 中的实验数据可知,当对石油钻机的钻速进行规划后,S 曲线相比规划前变得更加平滑。

为了进一步验证所提方法控制性能的好坏,实验将石油钻机钻速自动控制精度作为测试指标。其中,控制精度越高,说明控制效果越好。实验对比结果如图 4 所示。

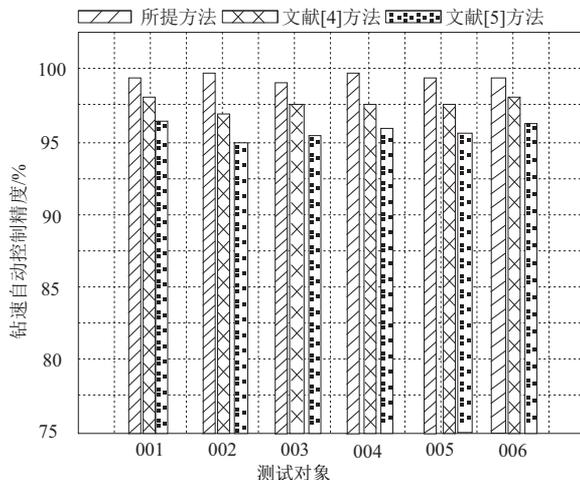


图 4 不同方法的钻速自动控制精度对比结果

分析图 4 中的实验数据可知,所提方法的石油钻机钻速自动控制精度最高;文献[4]方法次之;文献[5]方法最低。由此可见,所提方法具有更好的控制效果。

3) 石油钻机钻速自动控制响应时间测试分析

实验分析 3 种不同方法在不同测试样本下的控制响应时间变化情况,具体实验结果如表 1 所示。

表 1 不同方法的控制响应时间对比

测试数量/个	钻速自动控制响应时间/s		
	所提方法	文献[4]方法	文献[5]方法
10	34.5	40.6	45.8
15	47.8	49.5	52.6
20	56.4	59.2	69.4
25	63.3	66.8	75.8
30	75.4	77.9	80.1
35	84.6	88.2	90.4
40	88.7	93.4	99.6
45	94.6	97.2	107.5
50	105.7	108.4	116.4

分析表 1 中的实验数据可知,当石油钻机的数量增加,各个方法对应的钻速自动控制响应时间也开始呈直线

上升趋势。但是相比文献[4]方法和文献[5]方法,所提方法的控制响应时间明显较少一些,说明所提方法能够以较快的速度实现石油钻机钻速自动控制,从而充分验证了所提方法的优越性。

3 结语

针对传统方法存在的不足,本研究结合 S 曲线加减速方法设计了新的石油钻机钻速自动控制方法。经实验测试证明,所提方法能够有效提升控制效率提高量和控制精度,同时还能够有效降低控制时间,更好地完成石油钻机钻速自动控制。但是由于时间以及人为等多方面因素的限制,致使所提方法仍然存在一定的不足,后续将对其开展更深入的研究。

参考文献:

- [1] 张东海,王昌荣. 智能石油钻机技术现状及发展方向[J]. 石油机械,2020,48(7):30-36.
- [2] 何庆,马广蛇,张洪,等. 基于云平台的钻机远程状态监测与诊断系统[J]. 石油机械,2019,47(8):47-54.
- [3] 丛成. 石油钻井机械钻速转矩自动控制方法研究[J]. 自动化与仪器仪表,2020(4):85-88.
- [4] 汪首坤,胡晓宇,史晓新,等. 基于 3 参数的加速度控制方法研究[J]. 北京理工大学学报,2020,40(4):434-440.
- [5] 刘清友,刘文全,朱海燕,等. 钻井机器人的连续油管钻压和钻速控制模型[J]. 石油学报,2019,40(10):1255-1262.
- [6] 林旭军,张树有,王进,等. 可去除自交且具有可调节光滑的非均匀有理 B 样条等距曲线生成方法[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(8):1920-1926.
- [7] 任利娟,张广鹏,王元,等. 基于压缩控制点的 B 样条曲线重构算法[J]. 西安理工大学学报,2019,35(2):163-171.
- [8] 周湛清,夏长亮. 永磁电机增量式直接预测速度控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2020,52(6):94-102.
- [9] 梁奇敏,李剑,聂臻,等. 基于转矩的安全钻进控制[J]. 中国矿业,2019,28(5):53-56,76.
- [10] 李建亭. 石油钻机平移棘爪步行器卡爪失效分析及优化[J]. 机械制造与自动化,2020,49(3):75-77.
- [11] 江本赤,王建彬,苏学满. 辛普森积分法在双 NURBS 曲线随动插补中的应用[J]. 机械科学与技术,2019,38(1):96-103.
- [12] 耿焕同,周山胜,陈哲,等. 基于分解的预测型动态多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2019,34(6):1307-1318.

收稿日期:2021-08-30

(上接第 219 页)

- [6] 陈登攀,朱建军,黄稟通,等. 对汽车主动悬架 LQG 算法的优化仿真研究[J]. 计算机仿真,2021,38(6):72-77.
- [7] 武柏安,龙海洋,李耀刚,等. 基于遗传算法的磁流变半主动悬架最优控制[J]. 机床与液压,2021,49(9):109-114.
- [8] 李以农,朱哲葳,郑玲,等. 基于路面识别的主动悬架多目标控制与优化[J]. 交通运输工程学报,2021,21(2):129-137.

- [9] 时培成,徐增伟,王锁,等. 变论域自适应模糊 PID 主动悬架控制研究[J]. 机械科学与技术,2019,38(5):713-720.
- [10] 寇发荣,李冬,许家楠,等. 车辆电动静液压主动悬架内模 PID 控制研究[J]. 液压与气动,2018(6):1-7.
- [11] 李洁,黄艳宾,杨静,等. 汽车悬架的 PID 控制仿真研究[J]. 系统科学学报,2018,26(2):101-104.

收稿日期:2021-07-28