

三维侧钻井钻进轨迹多目标智能优化算法 的应用实验及结果分析

黄雯蒂^{1,2,3}, 胡杰^{1,2,3}, 陆承达^{1,2,3}, 吴敏^{*1,2,3}

(1. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北武汉 430074;
2. 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074;
3. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074)

摘要: 钻进轨迹多目标优化是实现定向井高效、安全钻进的关键之一。随着优化算法性能的不断改进, 求解轨迹优化问题能够得到具有更小轨迹长度、复杂度和中靶误差的轨迹设计方案, 然而算法的实用性尚未得到验证。本文利用结合自适应罚函数的多目标分解进化算法、基于最小模糊熵的综合评价方法, 解决三维侧钻井轨迹优化问题。将所提出的优化与决策方法在钻进过程智能控制实验系统中进行应用, 验证了所提方法的实用性, 能够为工程实际中的轨迹设计提供借鉴和指导, 并为后续轨迹跟踪控制提供参考。

关键词: 定向井; 三维侧钻井; 钻进轨迹; 轨迹优化; 多目标优化

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2022)04-0023-08

Experiment and result analysis of multi-object intelligent optimization algorithm for 3D sidetracking trajectory

HUANG Wendi^{1,2,3}, HU Jie^{1,2,3}, LU Chengda^{1,2,3}, WU Min^{*1,2,3}

(1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;
2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems,
Wuhan Hubei 430074, China;
3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education,
Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Multi-object optimization of drilling trajectory is one of the keys to achieve efficient and safe drilling. The improvement of the optimization algorithms can get smaller trajectory length and less complexity in finding solutions to the trajectory optimization questions. However, the practicability of the trajectory optimization algorithm has not been verified. In this paper, the multi-object decomposition evolutionary algorithm combined with the adaptive penalty function, and the comprehensive evaluation method based on minimum fuzzy entropy are used to study the 3D sidetracking well trajectory optimization problem. The proposed methods were verified for their practicability with application in the drilling process intelligent control experimental system. They can provide reference and guidance for trajectory design in engineering practice, and provide reference for drilling trajectory tracking control.

Key words: directional well; 3D sidetracking well; drilling trajectory; trajectory optimization; multi-objective optimization

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-06-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.04.004

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“复杂地质钻进过程智能控制”(编号: 61733016); 国家自然科学基金青年项目“地质钻进过程钻柱振动的多维度融合模型与自适应协调抑制”(编号: 62003317); 湖北省自然科学基金创新群体项目“地质钻探智能化技术及应用”(编号: 2020CFA031); 高等学校学科创新引智计划项目“复杂系统先进控制与智能自动化”(编号: B17040)

第一作者: 黄雯蒂, 女, 汉族, 1994年生, 博士研究生在读, 控制科学与工程专业, 主要从事复杂地质钻进轨迹多目标优化方法研究, 湖北省武汉市鲁磨路388号, hwd@cug.edu.cn。

通信作者: 吴敏, 男, 汉族, 1963年生, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 博士, 博士生导师, IEEE会士(IEEE Fellow), 中国自动化学会会士, 从事过程控制、鲁棒控制和智能系统的研究工作, 湖北省武汉市鲁磨路388号, wumin@cug.edu.cn。

引用格式: 黄雯蒂, 胡杰, 陆承达, 等. 三维侧钻井钻进轨迹多目标智能优化算法的应用实验及结果分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 23-30.
HUANG Wendi, HU Jie, LU Chengda, et al. Experiment and result analysis of multi-object intelligent optimization algorithm for 3D sidetracking trajectory[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 23-30.

0 引言

在定向钻进过程中,井下工具根据事先设定的轨迹穿过地层,到达指定的靶区。利用定向井,可以不受地面环境限制进行资源勘探,例如,地面是森林、城镇、湖泊等不便于直接垂直钻进的条件。定向井能够绕过复杂地层或地面障碍进行油气、矿产的勘探和开采或是增加采油率^[1],还可用于处理复杂井下事故,例如打捞钻具或侧钻继续完井等。钻进轨迹模型是定向钻进过程智能控制的基准,在复杂的地层条件下,地层自然造斜和地层软硬交替使钻进过程存在井壁坍塌、轨迹偏离等问题。如何利用地层信息和钻进操作参数信息,设计满足约束条件、工程需求、最优性能指标的空间曲线,是钻进轨迹优化方法要解决的问题。通过钻进轨迹优化,能够解决轨迹模型设计中存在的多目标、非线性约束等问题,从而实现复杂地质条件下高效、安全钻进。

为了减少钻进工程的时间和成本,已有研究针对最小化轨迹长度为优化目标进行轨迹优化,利用无约束极小化方法^[2]、变分原理求解泛函极值^[3]、数论序贯优化算法^[4]等数值优化方法最小化二维钻进轨迹的长度。对于数学模型复杂的三维轨迹优化问题,由于数值优化方法需要梯度信息、放宽约束条件等,具有一定的局限性。已有研究用进化算法^[5]、粒子群算法^[6]、遗传算法^[7-8]、蚁群算法^[9]求得满足约束条件的最短钻进轨迹,从而减少钻进工程成本^[10-11];或是以最小化钻柱扭矩为目标,用改进的粒子群算法求解轨迹优化问题^[12]。

轨迹长度很大程度上影响钻进成本,它由造斜点位置、井眼曲率以及井斜角和方位角变化率等参数决定,这些参数也会影响井身结构的复杂程度。复杂的井身结构所带来的影响能够通过轨迹优化设计解决^[13],在减小轨迹长度的同时降低井身结构的复杂度,要如何设置决策参数,这是一个多目标优化问题。已有研究以最小化轨迹长度和井身轮廓能量为目标,针对三维侧钻水平井轨迹优化问题利用非支配排序的遗传算法II(NSGA-II)求解^[14];以最小化轨迹长度和最小化钻柱扭矩为目标,针对大位移三维水平井轨迹的优化问题,研究多目标遗传算法(MOGA)^[15]和多目标粒子群算法^[16],在这个轨迹优化问题的基础上,增加最小化井身轮廓能量的目标,研究多目标细胞粒子群优化算法^[17]、多目标斑点鬣狗优化器^[18]和基于元胞自动机混合灰狼粒子群多

目标优化算法^[19]进行求解。

上述研究利用多目标优化算法求解轨迹优化问题,提升了算法性能和轨迹设计方案质量。然而,轨迹优化方法在钻进现场的实用性尚未得到讨论。本文针对侧钻、纠偏轨迹设计的需求,建立三目标多约束的轨迹优化问题,提出结合自适应罚函数的分解多目标进化算法和基于最小模糊熵的综合评价方法。基于钻进过程智能控制实验系统,对所提出的轨迹优化与决策方法的实用性进行验证。

1 定向钻进过程描述

在定向钻进过程中,钻机的绞车转盘系统通过下放钻杆来调整钻压,从而控制井底钻头与岩石的接触压力进行破岩钻进,沿设定的钻进轨迹到达目标点。同时,钻井液在井壁与钻杆之间的环空中循环,用于降低井底温度、带走井底岩屑、平衡井底压力、维持井壁稳定。在利用螺杆马达进行钻进时,钻井液还起到带动螺杆钻具旋转钻进的作用。

定向钻进的井下工具根据事先设定的轨迹穿过地层,到达指定靶区。靶区可以是以靶点为圆心、具有一定半径的圆形,也可以是以靶点为中心的矩形。利用定向井可以不受地面环境限制,或是绕过复杂地层和地面障碍进行油气、矿产的勘探和开采,还可用于处理复杂井下事故,例如打捞钻具或侧钻继续完井等。

目前,在定向钻进中使用较为广泛的造斜方式是通过调节螺杆马达的工具面角改变造斜率。要实现增斜、降斜或扭方位的目的,一般采用滑动钻进:锁定转盘使钻柱、井底钻具均不旋转,通过加压使钻杆滑动给进钻头。在稳斜钻进时,则采用复合钻进与滑动钻进相结合的模式。在重力作用下,倾斜的井眼中钻柱的下部与井壁下侧之间产生摩擦阻力,它会使钻柱往一侧靠近,产生方位漂移;如果钻进轨迹不够平滑,摩擦阻力使得钻压难以加到井底,导致产生滑动钻进困难的问题。这些问题都会严重影响钻进效率和安全性。

当钻进轨迹偏离设计轨迹太远时,需要进行纠偏轨迹设计;钻遇事故层、障碍物时,需要进行绕障轨迹设计^[20];遇到有必要进行事故处理、补采岩心的情况,需要进行侧钻轨迹设计^[21]。这类定向井都是要在原有轨迹的基础上设计一条新的轨迹到达目标靶点,具有较高的入靶要求,除了要求轨迹终点尽

可能接近目标靶点外,通常还会限制入靶的姿态(井斜角、方位角或是终点所在平面)。

以如图 1 所示的二段式三维侧钻井为例, O 为绕障起点, OA 和 AB 段为 2 个造斜段, B 点为轨迹造斜终点。 O 点在已有的轨迹上, 所以具有确定的坐标和方向; B 点与靶点的距离必须要在一定范围之内, 由于轨迹在进入靶区后不再改变钻进方向, 所以 B 点处的轨迹具有确定的方向。

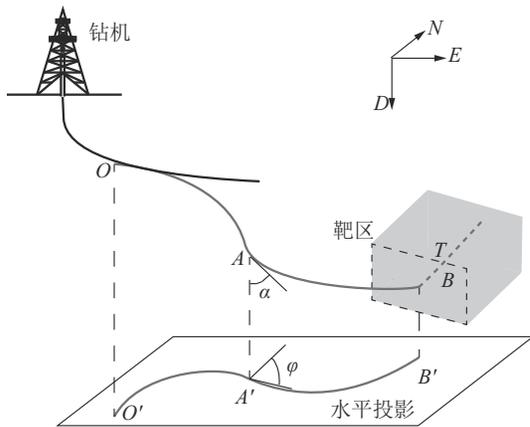


图 1 二段式三维侧钻井示意
Fig.1 Trajectory of a 3D sidetracking well with two segments

相对从地面到目标靶区的钻进轨迹整体, 纠偏、侧钻轨迹的长度更短。为了在较短的钻进轨迹长度内达到指定的井斜角和方位角变化, 纠偏轨迹和侧钻轨迹存在弯曲和扭转较大的情况, 产生下钻困难、钻压难以传递到井底等问题。因此, 本文以最小化轨迹长度、井身轮廓能量和中靶误差为优化目标, 建立轨迹优化问题, 针对这个轨迹优化问题研究优化与决策方法及其应用。

2 侧钻井轨迹优化与决策方法

为了有针对性地研究优化与决策方法, 首先需要分析轨迹优化问题的数学模型。

2.1 钻进轨迹优化问题

以最小化轨迹长度为优化目标, 能够有效减少钻进工程的时间成本, 提高效率。以最小化轨迹轮廓能量为优化目标, 能够降低钻进轨迹结构的复杂度。由于三维钻进轨迹具有弯曲和扭转, 较为复杂的轨迹可能导致滑动钻进困难, 而在要求轨迹长度较小的情况下, 井斜角、方位角的变化率较大。因

此, 最小化轨迹长度和最小化轨迹轮廓能量有一定的矛盾性, 这是一个多目标优化问题。在约束条件方面, 轨迹终点与靶点的距离应该在一定范围内, 可以利用不等式进行约束。

基于上述分析, 这个二段式三维侧钻井轨迹优化问题可以用式(1)的数学模型表示^[22]。

$$\begin{aligned} \min & \{f_1(x) = L, f_2(x) = Q_w, f_3(x) = TE\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} x_{lb} \leq x \leq x_{ub} \\ g_1(x) = \sqrt{(N_B - N_T)^2 + (E_B - E_T)^2} - H_{\max} \leq 0 \\ g_2(x) = |D_B - D_T| - D_{\max} \leq 0 \\ h_1(x) = (N_B - N_T)t_N + (E_B - E_T)t_E + (D_B - D_T)t_D = 0 \\ x = [k_{\alpha,1}, k_{\alpha,2}, k_{\varphi,1}, k_{\varphi,2}] \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ ——优化目标; L ——轨迹长度; Q_w ——井身轮廓能量; TE ——中靶误差; x ——决策变量; x_{lb} ——决策变量的下边界; x_{ub} ——决策变量的上边界; $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $h_1(x)$ ——轨迹终点的位置约束; N_B 、 E_B 、 D_B ——分别为轨迹终点的北坐标、东坐标和垂深; N_T 、 E_T 、 D_T ——目标靶点的北坐标、东坐标和垂深; H_{\max} 、 D_{\max} ——分别为靶窗的最大宽度和高度; t_N 、 t_E 、 t_D ——靶窗平面的法向量; $k_{\alpha,1}$ 、 $k_{\alpha,2}$ ——各井段的井斜角变化率; $k_{\varphi,1}$ 、 $k_{\varphi,2}$ ——各井段方位角变化率。

轨迹长度 L 是各井段长度之和:

$$L = L_{OA} + L_{AB} \quad (2)$$

L_{OA} 和 L_{AB} 可以由 x 和井段的井斜角、方位角变化求得。

井身轮廓能量 Q_w 是轨迹的曲率平方与挠率平方之和在轨迹长度上的积分, 用于评价钻进轨迹结构的复杂度:

$$Q_w = \int_0^L (\tau^2(x) + \theta^2(x)) dx \quad (3)$$

式中: θ ——轨迹挠率, 反映了井段偏离平面曲线的程度; τ ——曲率, 反映井段的弯曲程度, 可以利用井段的井斜角变化率、方位角变化率求得。

中靶误差 TE 定义为轨迹终点与靶窗中心点的距离与靶窗半对角线长度之比:

$$TE = \frac{\sqrt{(N_B - N_T)^2 + (E_B - E_T)^2 + (D_B - D_T)^2}}{\sqrt{(H_{\max}/2)^2 + (D_{\max}/2)^2}} \quad (4)$$

要计算约束值 $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $h_1(x)$, 就需要计算轨迹上点的坐标。设造斜段轨迹起点为 A , 待求的轨迹末端点为 B , 根据最小曲率法, AB 之间的钻进

$$\begin{cases} N_B = N_A + [\sin \alpha_A \cos \varphi_A \sin \epsilon_{AB} + (\cos \alpha_A \cos \varphi_A \cos \omega_A - \sin \varphi_A \sin \omega_A)(1 - \cos \epsilon_{AB})] / \tau_{AB} \\ E_B = E_A + [\sin \alpha_A \sin \varphi_A \sin \epsilon_{AB} + (\cos \alpha_A \sin \varphi_A \cos \omega_A + \cos \varphi_A \sin \omega_A)(1 - \cos \epsilon_{AB})] / \tau_{AB} \\ D_B = D_A + [\cos \alpha_A \sin \epsilon_{AB} - \sin \alpha_A \cos \omega_A (1 - \cos \epsilon_{AB})] / \tau_{AB} \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_A 、 E_A 、 D_A ——分别是 A 点的北坐标、东坐标和垂深坐标; N_B 、 E_B 、 D_B ——分别是 B 点的北坐标、东坐标和垂深坐标; α_A —— A 点的井斜角; φ_A —— A 点的方位角; ω_A —— A 点处的工具面角; τ_{AB} ——圆弧状轨迹 AB 的曲率; ϵ_{AB} —— AB 之间的弯曲角, $\epsilon_{AB} = l_{AB} \cdot \tau_{AB}$; l_{AB} —— AB 之间的轨迹长度。

利用给定的 B 点入靶方向也就是井斜角 α_B 和方位角 φ_B , 可以求得 ϵ_{AB} :

$$\cos \epsilon_{AB} = \cos \alpha_B \cos \alpha_A + \sin \alpha_B \sin \alpha_A \cos(\varphi_A - \varphi_B) \quad (6)$$

从而得到 $\tau_{AB} = \epsilon_{AB} / l_{AB}$ 。

2.2 侧钻井轨迹优化与决策方法

上述轨迹优化问题的数学模型具有 3 个优化目标, 其中轨迹长度和井身轮廓能量不能同时达到最优, 不等式约束和等式约束均具有非线性。一方面, 需要有效的寻优机制使种群收敛到未知的帕累托前沿面, 另一方面需要有效的约束处理方法使种群尽快收敛到可行域。针对轨迹优化问题的这些特点, 我们提出了结合自适应罚函数法的分解进化多目标算法; 为了在多目标优化之后从解集中选择一个满意的轨迹设计方案, 提出基于模糊综合评价的决策方法^[22]。轨迹优化与决策方法算法流程如下:

输入: 种群大小 N , 最大迭代次数 G , 权重向量 W , 轨迹优化问题, 决策参数的上限、下限;

输出: 最终轨迹设计方案的决策变量取值。

(1) 初始化种群: 根据井段长度、曲率、工具面角的限制范围生成 N 组决策参数 X , 计算轨迹长度、井身轮廓能量、中靶误差、约束值;

(2) 利用切比雪夫方法将种群分解为 N 个子问题;

(3) 生成子代, 计算当前种群中的可行解比例 r ;

(4) 根据 r 计算所有个体的适应度值 F ;

(5) 对于子问题邻域中的所有个体, 根据 F 进行更新;

轨迹为曲率最小的空间斜面圆弧。利用 A 点的空间坐标、井斜角、方位角、工具面角以及 AB 之间的曲率, 可以得到 B 点的坐标:

(6) 若迭代次数达到 G , 继续; 否则, 回到步骤 3;

(7) 利用最小模糊熵方法建立隶属函数;

(8) 计算解集中所有轨迹设计方案在模糊集轨迹长度“较短/中等/较长”、井轮廓能量“低/中等/高”、中靶误差“小/中等/大”中的隶属度;

(9) 根据隶属度, 计算所有解的模糊评价矩阵 R_i ;

(10) 计算所有 x_i 的综合评价价值 $Y_i = WR_i$ 。

根据 Y 对所有 x 排序, 输出 Y 最大的解作为最终的轨迹设计方案。

其中种群大小 N 、迭代次数 G 、权重向量 W 都可以根据具体问题的特点进行调整。利用公式(1)、(5)和(6)可以计算种群中所有个体的 $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $h_1(x)$ 值, $g_1(x)$ 、 $g_2(x)$ 、 $h_1(x)$ 均大于 0 的个体是可行解, 根据可行解与种群中所有个体数量之比得到可行解比例 r 。利用公式(1)~(4), 经过切比雪夫分解法, 根据 r 可以得到所有个体的适应度值 F 。

上述算法可以用 Matlab 软件实现, 利用轨迹优化与决策方法, 可以使种群穿过不可行域, 收敛到未知的帕累托前沿, 得到多目标轨迹优化问题的解集, 然后从中选择出满意度最高的解作为轨迹设计方案, 解决三维侧钻井轨迹多目标优化问题, 从而进行工程实践。

3 钻进轨迹优化仿真与实验

为了验证上一节所提出的轨迹优化与决策方法的有效性, 首先进行仿真, 然后基于钻进过程智能控制实验系统进行实验。

3.1 仿真结果分析

本文以一个三维侧钻井轨迹为例, 设置 $N=500$, $G=200$, 分别设置 $W=[1, 1, 1]$ 代表 3 个优化目标同样重要的情况、 $W=[8, 1, 1]$ 代表最小化轨迹长度最重要的情况、 $W=[1, 8, 1]$ 代表最小化井轮廓能量最重要的情况、 $W=[1, 1, 8]$ 代表最小化中靶误差最重要的情况; 侧钻起点井斜角 75° , 方位

角 310° , 坐标 $(0, 200, 500)$; 目标点井斜角 90° , 方位角 345° , 坐标 $(180, 750, 530)$ 。用本文中的算法, 在 Matlab 软件中进行求解。

用 HV (hypervolume) 指标评价得到的多目标解集, $HV=1.13 \times 10^{-2}$; 对比 NSGA-II 得到的解集 $HV=8.10 \times 10^{-3}$ 。证明本文所用的轨迹优化方法得到的解集具有更好的收敛性和多样性, 也就是轨迹方案整体具有更小的轨迹长度、井身轮廓能量、中

靶误差, 且轨迹方案之间的差异较大。

在进行决策之后得到轨迹方案的决策参数、优化目标函数值和在轨迹优化方案“较好”的隶属度 (见表 1), $W=[1, 1, 1]$ 时隶属度为 0.67, 这是由于 3 个优化目标相互矛盾, 所以没有隶属度更高的解。以 $W=[1, 1, 1]$ 时的轨迹优化方案为例, 利用决策参数计算井长、井斜角和方位角及造斜率、工具角 (表 2), 得出轨迹示意图如图 2 所示。

表 1 三维侧钻井轨迹多目标优化结果

Table 1 Results of 3D sidetracking well trajectory multi-object optimization

W	$k_{\alpha,1}/[(^\circ) \cdot (30 \text{ m})^{-1}]$	$k_{\alpha,2}/[(^\circ) \cdot (30 \text{ m})^{-1}]$	$k_{\varphi,1}/[(^\circ) \cdot (30 \text{ m})^{-1}]$	$k_{\varphi,2}/[(^\circ) \cdot (30 \text{ m})^{-1}]$	L/m	Q_w	TE	隶属度
[1, 1, 1]	1.9	6.4	2.5	2.5	212.0	6.9	0.14	0.67
[8, 1, 1]	2.0	6.6	2.4	2.2	210.7	7.2	0.34	0.90
[1, 8, 1]	2.0	5.8	2.3	2.7	214.4	6.5	0.76	0.80
[1, 1, 8]	1.9	6.4	2.5	2.5	212.2	6.9	0.14	0.90

表 2 $W=[1, 1, 1]$ 时决策参数对应的轨迹参数

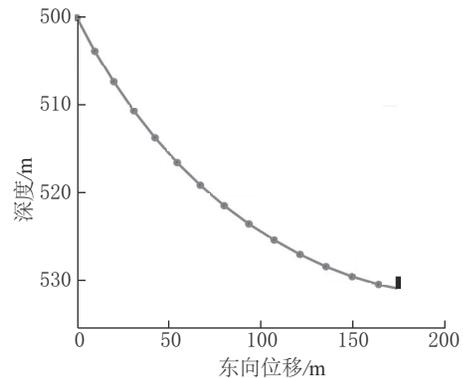
Table 2 Trajectory parameters corresponding to the decision parameters when $W=[1, 1, 1]$

井长/ m	井斜角/ ($^\circ$)	方位角/ ($^\circ$)	造斜率/ [($^\circ$) \cdot (30 m) $^{-1}$]	工具面角/ ($^\circ$)
11	75.8	311.1	6.5	72.9
44	78.3	314.4	6.5	73.1
77	80.8	317.7	6.6	73.2
110	83.4	321.0	6.6	73.3
143	85.7	323.5	6.7	73.4
173	87.6	324.2	6.7	73.5
212	90.1	325.2	6.7	73.5

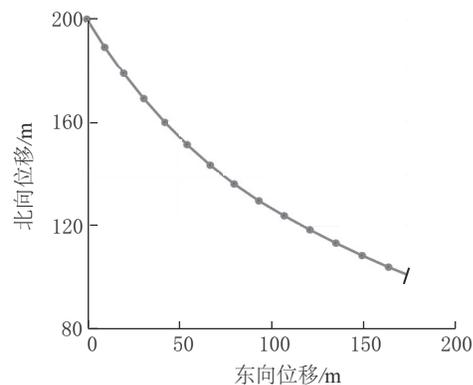
仿真结果表明, 结合自适应罚函数的分解多目标进化算法能够有效求解限制入靶方向的三维侧钻井轨迹优化问题, 基于模糊综合评价的决策方法能够从多目标优化得到的解集中选择出最具有满意度的轨迹设计方案。为了验证所提轨迹优化与决策方法在实际应用中具有实用性, 利用钻进过程智能控制实验系统, 进行轨迹优化实验。

3.2 实验系统功能与结构

钻进过程智能控制实验系统具有微型钻机、钻井液系统、轨迹系统、三轴转台等几个部分 (图 3)。利用微型钻机和钻井液系统, 可以完成钻进过程的钻压控制实验; 利用轨迹系统和三轴转台, 可以完成钻进轨迹优化实验系统功能结构如图 4 所示。



(a) 垂直剖面



(b) 水平投影

图 2 侧钻井轨迹仿真示意

Fig.2 Sidetracking well trajectory simulation result

钻进轨迹优化和轨迹跟踪控制实验。

轨迹优化问题的数学模型、优化算法、决策方法和轨

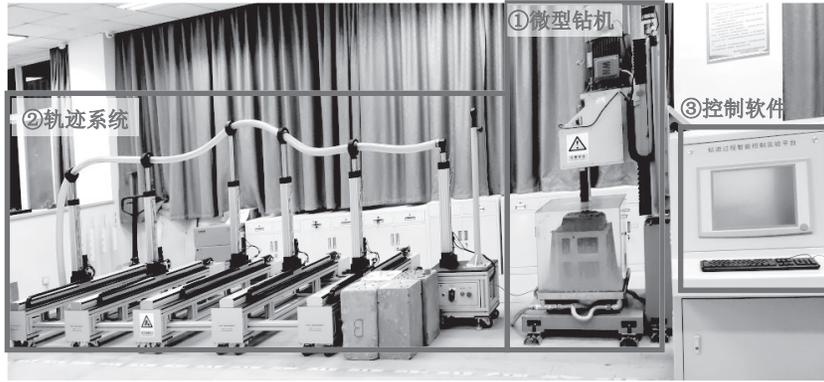


图3 钻进过程智能控制实验系统

Fig.3 Drilling process intelligent control experimental system

迹参数计算均由 Matlab 实现,且优化问题、优化算法和决策方法的参数均为固定值,函数输入为待优化轨迹的起点、终点信息,输出为轨迹上点的井斜角、方位角、三维坐标,以及井长、造斜率、工具面角。将 Matlab 函数打包成动态链接库函数后,在 VC++中调用。这样的方式便于针对不同钻进工程中的轨迹优化问题利用 Matlab 进行仿真实验,从而有针对性地调整参数和算法。人机交互界面由工业组态软件 WinCC 实现,保证实验室的系统运行环境与钻进现场工控机的运行环境保持一致,并且有利于整套系统随时根据钻井工程的改变而进行有针对性的修改以及迁移。

(2)以最小化轨迹长度、轨迹复杂度为目标,在决策变量范围约束、造斜点约束、轨迹终点约束以及其它特定的钻进工程约束下,优化当前测点与目标靶点之间的轨迹;

(3)以表格、垂直剖面图和水平投影图的形式,在人机交互界面中显示优化后的轨迹设计方案;

(4)将轨迹设计方案换算成轨迹系统各节点的水平、托举方向的移动距离,下发到微型钻机的轨迹系统中进行演示。

3.3 实验结果与分析

在钻进轨迹优化界面(图5)中输入轨迹起点信息:井斜角 75°,方位角 310°,坐标设定为(0, 200, 500);目标靶点信息:井斜角 90°,方位角 345°,坐标(180,100,530)。

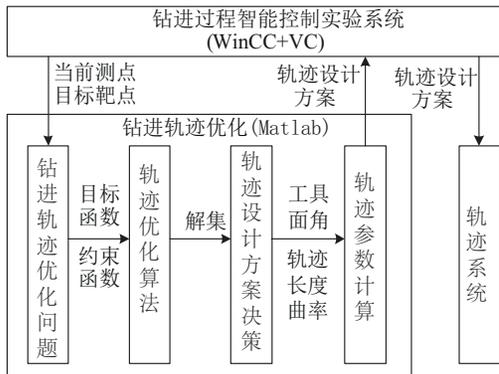


图4 钻进轨迹优化实验系统功能结构

Fig.4 Functional structure of the drilling trajectory optimization experimental system

轨迹优化程序能够实现的功能主要有以下几点:

(1)获取待设计轨迹的起点和目标点信息,并反映在人机交互界面中;

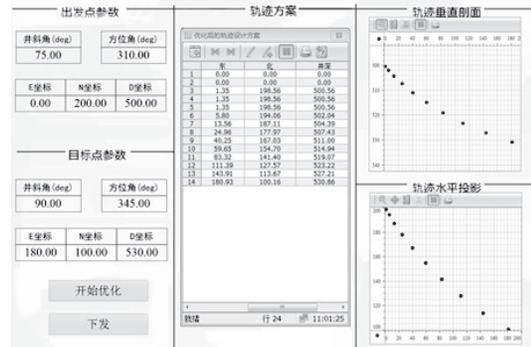


图5 钻进轨迹优化界面

Fig.5 Interface of drilling trajectory optimization

在点击开始优化后,输出的轨迹优化方案显示在界面上的表格中:轨迹上12个点处坐标、井长、造斜率、工具面角,用户可以拖动表格下方的滚动条查看不同参数。动态表格不仅可以显示当前出发点与

目标点之间的钻进轨迹设计方案,还可以通过调用归档数据查看历史轨迹设计方案。在界面右侧,根据轨迹方案中轨迹上点的坐标,绘制垂直剖面图和水平投影图。

对比第一节中的图2可以看出,仿真得到的三维侧钻井轨迹示意图与钻进轨迹优化实验模块中的结果一致,证明了实验模块中的轨迹模型、优化与决策方法运行正常,所提出的轨迹优化算法能够在钻进过程实验系统中应用。

将得到的轨迹设计方案中2个井段的起点、中点和终点的井斜角、方位角保持不变,将其坐标点按比例缩放,换算成轨迹系统的运动坐标。轨迹系统的5个滑块坐标分别为(0,0,0)、(0,0,0)、(52,60,17)、(81,120,26)、(100,180,30),单位为cm。将坐标点下发,轨迹系统对轨迹设计方案进行演示(图6)。其中滑块1不属于设计轨迹的部分,滑块2是轨迹起点所在位置,滑块5是轨迹终点所在位置。对比侧钻井轨迹三维仿真示意图,用前3个测点计算垂直剖面曲线的角度变化约为 21.6° ;用东坐标第60m处相邻3个测点,计算得角度变化约为 18.4° ;用东坐标第80m处相邻3个测点,计算得角度变化约为 6.1° ;用最后3个相邻测点,计算得到角度变化约为 0.2° 。总的来说,角度变化逐渐缓慢,这与轨迹系统的演示结果一致。



图6 轨迹设计方案演示结果

Fig.6 Result of trajectory design demonstration

根据以上轨迹优化实验的结果分析,结合自适应罚函数的分解多目标进化算法和基于模糊综合评价的决策方法能够在工控机上正常运行,得到的轨迹优化方案与计算机仿真结果一致;实验室轨迹系统演示结果与计算机仿真结果一致。通过轨迹优化实验,能够验证轨迹优化模型、轨迹优化与决策算法

在工控机上的实用性。利用轨迹优化程序所产生的轨迹优化方案、轨迹示意图,对于钻进工程中限定起点、终点位置和钻进方向的侧钻、绕障、纠偏轨迹设计具有指导意义。轨迹系统演示的钻进轨迹一方面能够直观展示轨迹的空间形态,另一方面能够为钻进过程智能控制实验系统中的轨迹跟踪控制实验打好基础。

4 结论

本文针对侧钻井轨迹、纠偏轨迹等限制轨迹终点钻进方向的轨迹优化问题,以最小化轨迹长度、井轮廓能量和中靶误差为目标,以靶窗平面为约束,建立钻进轨迹优化模型。针对三目标多约束的轨迹优化问题,提出结合自适应罚函数的分解多目标进化算法;为了从得到的解集中选择一个最终轨迹设计方案,提出了基于最小模糊熵的综合评价方法。利用钻进过程智能控制实验系统验证了上述轨迹优化与决策方法的实用性,为工程实际中的轨迹设计提供借鉴和指导,为后续轨迹跟踪控制提供有效参考。

在今后的研究中,有待考虑基于更为先进的随钻测量工具,研究相适应的在线轨迹优化方法^[23];或是结合钻进工况^[24]、钻进事故预警^[25]等研究轨迹优化问题与优化方法。进一步验证其它多目标优化算法与轨迹优化问题的实用性,为其它具有轨迹设计需求的钻井工程提供解决方案。

参考文献(References):

- [1] 贾雍,和鹏飞,袁则名,等.海上某气田悬空侧钻水平分支井技术及应用[J].钻探工程,2021,48(4):104-109.
JIA Yong, HE Pengfei, YUAN Zeming, et al. Application of horizontal branch wells in an offshore gas field[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):104-109.
- [2] 张焱,李骥,刘坤芳,等.定向井井眼轨迹最优化设计方法研究[J].天然气工业,2000,20(1):57-60.
ZHANG Yan, LI Ji, LIU Kunfang, et al. A study of optimized method for designing directional well trajectory[J]. Natural Gas Industry, 2000,20(1):57-60.
- [3] 刘绘新,孟英峰.定向井最优井身轨迹研究[J].天然气工业,2004,24(2):64-67.
LIU Huixin, MENG Yingfeng. Study on optimal hole trajectory of directional drilling[J]. Natural Gas Industry, 2004,24(2):64-67.
- [4] 鲁港,佟长海,邢玉德.基于约束优化方法的三维多靶井眼轨迹设计模型[J].石油学报,2005,26(6):93-95.
LU Gang, TONG Changhai, XING Yude. A model for design of three-dimensional multi-target wellbore trajectory based on re-

- stricted optimization [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(6): 93-95.
- [5] 王志月, 高德利, 秦星. 丛式井侧钻绕障水平井优化设计方法 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(4): 55-60.
WANG Zhiyue, GAO Deli, QIN Xing. Optimum design method for sidetracking horizontal well bypassing obstacle in cluster well [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2017, 32(4): 55-60.
- [6] Hosseini S, Ghanbarzadeh A, Hashemi A. Optimization of dog-leg severity in directional drilling oil wells using particle swarm algorithm [J]. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, 48(2): 139-151.
- [7] Shokir E M, Emera M K, Wally A W. A new optimization model for 3D well design [J]. *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, 2004, 59(3): 255-266.
- [8] Sha L, Pan Z. FSQGA based 3D complexity wellbore trajectory optimization [J]. *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies Nouvelles*, 2018, 73: 79.
- [9] 李成媛. 蚁群算法在井眼轨迹规划中的应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
LI Chengyuan. Research and application of ant colony optimization in well trajectory planning[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [10] Ilyasov R R, Svechnikov L A, Karimov M R, et al. Automation of optimal well trajectory calculations [C]//SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia, 2014.
- [11] Atashnezhad A, Wood D A, Fereidounpour A, et al. Designing and optimizing deviated wellbore trajectories using novel particle swarm algorithms [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 1184-1204.
- [12] 沙林秀, 潘仲奇. 基于NPSO的三维复杂井眼轨迹控制转矩的优选 [J]. *石油机械*, 2017, 45(10): 5-10.
SHA Linxiu, PAN Zhongqi. The complex wellbore trajectory control torque optimization based on NPSO algorithm [J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(10): 5-10.
- [13] 涂运中, 陈剑垚, 刘春生, 等. “慧磁”定向钻井中靶系统超高精度中靶技术研究 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(10): 1-6, 12.
TU Yunzhong, CHEN Jianyao, LIU Chunsheng, et al. Study on ultra-high precision target-hitting technology of SmartMag system [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneing)*, 2020, 47(10): 1-6, 12.
- [14] Huang W, Wu M, Cheng J, et al. Multi-objective drilling trajectory optimization based on NSGA-II [C]//Proceedings of the 11th Asian Control Conference, 2017: 1234-1239.
- [15] Mansouri V, Khosravian R, Wood D A, et al. 3-D well path design using a multi objective genetic algorithm [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 27(1): 219-235.
- [16] 李文燕. 复杂井眼轨迹的多目标优化技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
LI Wenyan. Research on multi-objective optimization technology for complex well trajectory [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [17] Zheng J, Lu C, Gao L. Multi-objective cellular particle swarm optimization for wellbore trajectory design [J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 77: 106-117.
- [18] Biswas K, Joy J S, Vasant P. Multi-objective spotted hyena optimizer for 3D well path optimization [J]. *Solid State Technology*, 2020, 63: 4011-4016.
- [19] Biswas K, Vasant P M, Vintaned J A G, et al. Cellular automata-based multi-objective hybrid grey wolf optimization and particle swarm optimization algorithm for wellbore trajectory optimization [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 85: 103695.
- [20] 李奇龙, 张承飞, 宋继伟, 等. 套管开窗侧钻技术在贵州地热钻井中的应用 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(7): 6-9.
LI Qilong, ZHANG Chengfei, SONG Jiwei, et al. Application of sidetracking in casing in guizhou geothermal drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil drilling and Tunneing)*, 2018, 45(7): 6-9.
- [21] 张文英, 张廷茂, 吴德军, 等. 侧钻技术在钻孔事故处理中的应用 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(6): 10-12.
ZHANG Wenying, ZHANG Tingmao, WU Dejun, et al. Application of sidetrack drilling technology in borehole accident [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil drilling and Tunneing)*, 2011, 38(6): 10-12.
- [22] Huang W, Wu M, Chen L, et al. Multi-objective drilling trajectory optimization using decomposition method with minimum fuzzy entropy-based comprehensive evaluation [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 107: 107392.
- [23] 汤凤林, 赵荣欣, 周欣, 等. 受控定向孔钻进用自动导航系统的分析研究 [J]. *钻探工程*, 2022, 49(2): 67-76.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. An automatic navigation system used for controlled directional drilling [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2): 67-76.
- [24] 范海鹏, 吴敏, 曹卫华, 等. 基于钻进状态监测的智能工况识别 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(4): 106-113.
FAN Haipeng, WU Min, CAO Weihua, et al. Intelligent drilling mode identification based on drilling state monitoring while drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneing)*, 2020, 47(4): 106-113.
- [25] 张正, 赖旭芝, 陆承达, 等. 基于贝叶斯网络的钻进过程井漏井涌事故预警 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(4): 114-121, 144.
ZHANG Zheng, LAI Xuzhi, LU Chengda, et al. Lost circulation and kick accidents warning based on Bayesian network for the drilling process [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneing)*, 2020, 47(4): 114-121, 144.