

基于改进蚁群算法的海上稠油热采井钻井顺序优化

吴俊涛^{1,2}, 刘伟^{1,2*}, 邓金根^{1,2}, 谭强^{1,2}, 何奇³

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

3 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206

* 通信作者, liuwei@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-08-21; 修回日期: 2023-12-15

国家自然科学基金面上项目(52074313)资助

摘要 蒸汽吞吐是广泛应用的稠油开采方式之一。海上稠油区块钻井作业成本高, 故钻井的同时对邻近已完钻井进行注热, 该模式可大幅提高钻采效率, 然而存在注热井蒸汽窜至在钻井风险。本文对热采井的汽窜风险进行了研究, 并提出了改进蚁群算法, 以求解出满足安全距离且钻井总工期最短的钻井顺序。首先, 构建了三维储层, 模拟向井底注热时井周温度场与压力场分布规律。结果表明, 向非均质储层注热时, 蒸汽易沿高渗通道突进, 9 d时间窜流距离可超 90 m。其次, 对蚁群算法做出了改进, 将归一化的井底最小距离引入位置转移概率, 将钻井停工时间引入信息素更新策略, 优化求解钻井顺序。结果表明, 针对渤海油田典型案例, 当设定安全距离为 400~460 m时, 该算法较人工选取法可节约钻井总工期 15~30 d。本文提出的改进蚁群算法可以快速高效求解出钻井总工期最短的钻井顺序, 为钻进顺序的优选提供了定量化计算方法, 对节约钻井成本、增强海上稠油热采井钻井安全性具有重要意义。

关键词 海上稠油热采; 蒸汽吞吐; 非均质储层; 蚁群算法; 钻井顺序优化

中图分类号: TE52; TP18

Drilling sequence optimization of offshore heavy oil thermal wells based on improved ant colony optimization algorithm

WU Juntao^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, DENG Jingen^{1,2}, TAN Qiang^{1,2}, HE Qi³

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China

Received: 2023-08-21; Revised: 2023-12-15

Abstract Steam stimulation is widely applied in heavy oil production. The cost of drilling in offshore heavy oil field is high, so that the mode of drilling other wells and injecting heat into the completed wells at the same time can greatly improve the efficiency of drilling and production. However, there is a risk of steam from heat injection well leaking into the drilling well. This paper studies the risk of steam channeling in thermal production wells, and proposes an improved ant colony optimization (IACO) algorithm to

引用格式: 吴俊涛, 刘伟, 邓金根, 谭强, 何奇. 基于改进蚁群算法的海上稠油热采井钻井顺序优化. 石油科学通报, 2024, 04: 637-647

WU Juntao, LIU Wei, DENG Jingen, TAN Qiang, HE Qi. Drilling sequence optimization of offshore heavy oil thermal wells based on improved ant colony optimization algorithm. Petroleum Science Bulletin, 2024, 04: 637-647. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.048

solve the drilling sequence that meets the safety distance and has the shortest total drilling period. Firstly, a three-dimensional reservoir was established to simulate the distribution of temperature and pressure fields around the well when injecting heat into the well. The results show that when injecting heat into heterogeneous reservoirs, steam is prone to break through along the high-permeability channels, and the channeling flow can exceed 90 m in 9 days. The results show that, for typical case of Bohai Oilfield, the algorithm can save 15~30 days of total drilling time compared with the manual selection method when the safety distance is set to 400~460 m. The IACO algorithm proposed in this paper can quickly and efficiently output the drilling sequence with the shortest drilling duration, which provides a quantitative method for the optimization of the drilling sequence. It is of great significance for saving drilling costs and enhancing the drilling safety of offshore heavy oil thermal recovery wells.

Keywords offshore heavy oil thermal well; steam stimulation; heterogeneous reservoirs; ant colony optimization algorithm; drilling sequence optimization

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.048

0 引言

稠油资源储量非常丰富,世界探明稠油储量超过8000亿t,我国稠油探地质储量约200亿t,已探明储量约40亿t^[1],其中海上稠油资源储量大,渤海油田稠油资源占新增探明储量一半以上^[2],具有巨大的开发潜力,对保障我国能源安全具有重要作用。

蒸汽吞吐是现场应用最多的开采方式之一。选用水平井的井型以提高蒸汽加热范围,水平段采用裸眼完井方式。当注热井与其他井裸眼段距离较小时,高温蒸汽可能窜流至邻井,造成相邻开发井出现井口温度上升、产液量增加等现象。我国胜利油田、辽河油田等稠油油藏具有埋藏浅、储层物性好、岩石胶结强度低、非均性强等特点,稠油开发井注热过程中多次发生汽窜^[3-4]。

为充分提高稠油油藏钻采效率,海上稠油区块采用钻井和注热并行模式,即钻井同时对邻近已完钻井进行注热。为避免注入的蒸汽或蒸汽冷凝后的热水窜流至在钻井,需严格控制注热井与在钻井裸眼段距离。当注热井与在钻井裸眼段距离小于窜流安全距离时,应停钻或停止注热以避免发生窜流。为保证安全钻井,减少停工时间,提高注热和钻井效率,应对钻井和注热顺序优化设计,确保在钻井与注热井的井底间距大于窜流安全距离的同时尽可能缩短钻井停工时间。

目前钻井顺序优化的研究主要是实现丛式井防碰撞、油田盈利能力优化等目的。曹向峰等^[5]以防碰井段总长度最小为优化目标,使用遗传算法对钻井顺序优化。为实现油田净现值(Net Present Value, NPV)最大化,Wang等使用决策树搜索算法、Lu使用遗传算法、Leeuwenburgh等将近似梯度法与优先级控制结合对钻井顺序进行优化^[6-8]。Gavin等^[9]使用数值模拟的方法模拟了不同钻井顺序对井壁失稳风险、资源枯竭

管理等问题影响。针对本文涉及时间与距离两种因素,且同时考虑钻井与注热两种操作的钻井顺序优化问题,未见相关研究。

枚举求解法的时间复杂度为 $O(n!)$,计算量随井的数量的增加呈指数型增长,求解代价大。可以将钻井顺序优化问题看作路径规划问题,选用启发式算法进行路径寻优可极大降低计算量。启发式算法在处理路径规划问题上有着优异的表现,如蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)^[10]等。Dorigo等受蚂蚁觅食行为启发提出蚁群算法^[11-12],认为蚂蚁会在经过的路径留下“信息素”,路径越短蚂蚁经过后留下的信息素就越多,信息素浓度越高的路径会引起越多的蚂蚁聚集,最终蚂蚁集中在最短路径。蚁群算法在寻找最优路径问题具有鲁棒性强、收敛性好、自适应性强、计算量低等优势,被广泛应用于旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)^[13-14]、机器人路径规划(Robot Path Planning, RPP)^[15]、车辆路径优化问题(Vehicle Routing Problem, VRP)^[16]等方面。

随着对蚁群算法研究的不断深入与面临问题复杂度的提升,许多研究者提出针对特殊问题的改进蚁群算法,旨在提高蚁群算法的稳定性、收敛速度、自适应性、全局寻优能力等性能。Bullheimer等^[17]改进了蚁群算法信息素更新策略,将最短路径的信息素作为下次迭代的全局初始信息素,提升了收敛速度。Duan等^[18]改进了状态转移规则,增强目标路径被选中的概率,提高了全局搜索能力。鲍惠芳等^[19]改进了蚁群算法中的挥发因子 ρ ,增大不同路径选择的差异化,提高了收敛速度。现有的改进蚁群算法主要起到提高收敛速度、增强全局搜索能力等作用,并无同时考虑时间与距离因素的路径优化研究。针对本文涉及时间与距离的钻井顺序优化问题,需对算法改进后求解。

本文模拟了蒸汽吞吐时地层注热对井周温度场与

压力场的影响,对稠油热采井汽窜风险进行了研究。对蚁群算法位置转移概率进行改进,使蚂蚁在路径选择上更倾向于井底间距更大的井,以增强钻井安全性,对信息素更新策略做出改进,使该算法可以求解时间优化问题,基于改进的蚁群算法求解出给定井底安全

距离下使钻井总工期最短的钻井顺序。

1 稠油储层注热对温度场与压力场的影响

为研究稠油储层注热对井周温度场与压力场的影响,构建了三维储层结构模型,如图1所示。储层尺寸为18 m×120 m×500 m,设置两个水平井,采用一注一采的开采方式,水平井间距为100 m。应用CMG油气藏数值模拟软件开展储层注热模拟研究,模拟参数具体取值如表1所示。

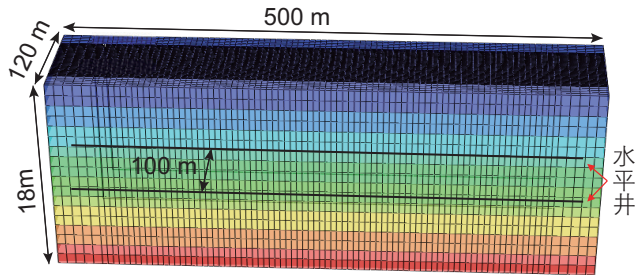


图1 数值模拟的三维储层结构模型

Fig. 1 Three-dimensional reservoir geometry model of numerical simulation

1.1 均质储层注热

假设储层均质、各向同性,分别模拟以300 t/d、350 t/d的注汽速率向地层注热,观察注热30 d后井周温度场与压力场的分布。油藏数值模拟计算结果如图2与图3所示。

表1 模拟参数取值

Table 1 Simulation parameter values

参数	取值	参数	取值
储层深度/m	1033	岩石骨架比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	766
储层厚度/m	18	水比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	4200
上覆地应力/MPa	19.5	油比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	2500
最大水平地应力/MPa	17.3	水压缩系数/ MPa^{-1}	4.5×10^{-10}
最小水平地应力/MPa	15.2	油压缩系数/ MPa^{-1}	5.0×10^{-10}
地层压力/MPa	10.3	水的粘度/ $mPa \cdot s^{-1}$	1.0
弹性模量/GPa	0.8	孔隙度	0.35
泊松比	0.28	50°C地面原油粘度/ $mPa \cdot s^{-1}$	36000
粘聚力/MPa	0.65	岩石骨架导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	1.89
内摩擦角/ $^\circ$	27.0	油导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	0.12
储层渗透率/mD	2900	水导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	0.69
地层温度/ $^\circ C$	50	含油饱和度	0.7
蒸汽温度/ $^\circ C$	350	热膨胀系数/ $^\circ C^{-1}$	9.72×10^{-5}

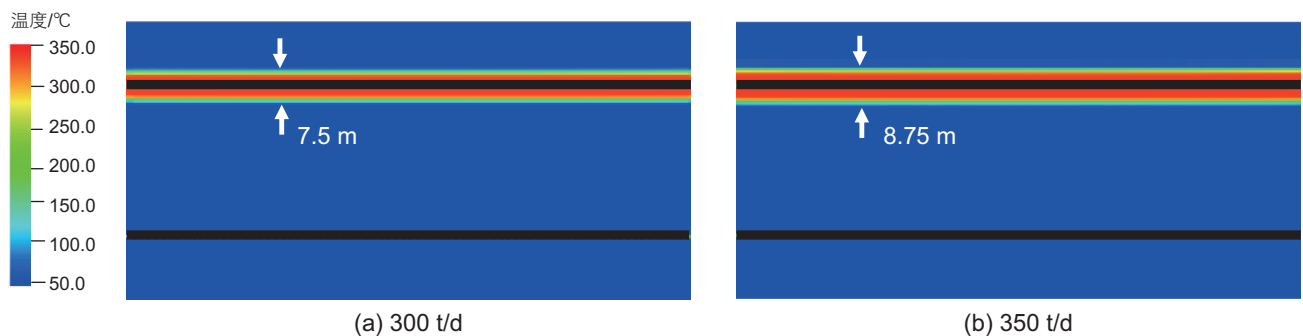


图2 均质储层注热30 d后温度场分布,注汽速率分别为:(a) 300 t/d; (b) 350 t/d

Fig. 2 Temperature field distribution of homogeneous reservoir after heat injection for 30 days. The steam injection rates are: (a) 300 t/d; (b) 350 t/d

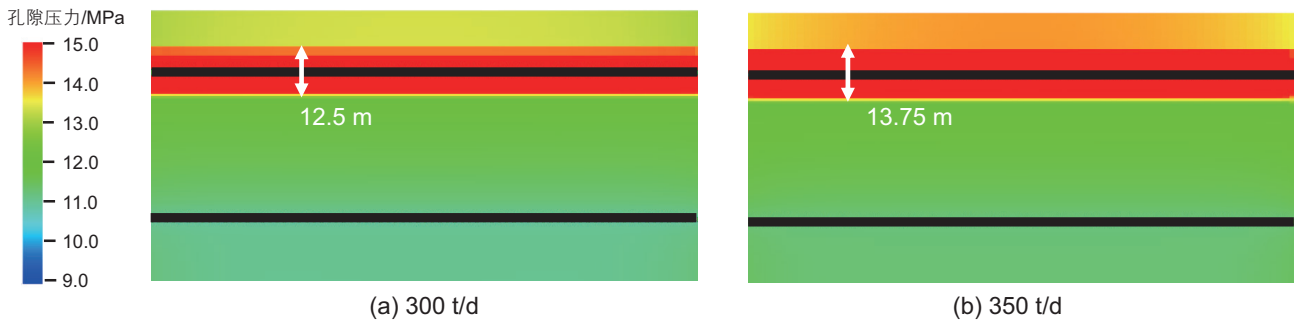


图3 均质储层注热30 d后压力场分布, 注汽速率分别为: (a) 300 t/d; (b) 350 t/d

Fig. 3 Pressure field distribution of homogeneous reservoir after heat injection for 30 days. The steam injection rates are: (a) 300 t/d; (b) 350 t/d

由计算结果可知, 蒸汽对均质储层水平段均匀加热, 温度、压力影响范围总体较小。随注热速率增加, 温度、压力影响范围逐渐扩大, 当以最大速率 350 t/d 注入蒸汽, 注热 30 d 后, 温度、压力最大影响范围分别为 8.75 m 与 13.75 m, 表明蒸汽对均质储层井周加热范围较小, 故均质储层注热不会窜流至邻井。

1.2 非均质储层注热

断层、河道沉积环境等原因造成地层呈现非均质性, 形成天然高渗通道。稠油储层一般埋藏浅、储层

物性好、压实程度低, 高温蒸汽加热稠油储层后, 会造成岩石胶结弱化、强度降低, 可能会在储层形成“蚯蚓洞”状的次生高渗通道。储层中天然或次生的高渗通道易造成井周非均匀吸热, 蒸汽易沿高渗通道突进, 窜流至邻井。将图 1 中的储层井间设置一条窄高渗通道, 通道渗透率为储层渗透率的 20 倍, 模拟存在高渗通道的储层注热后温度压力场分布规律, 以 300 t/d 的速率注入蒸汽, 随蒸汽注入量增加, 井周温度场、压力场演化规律如图 4 与图 5 所示。

由计算结果可知, 当储层存在高渗通道时, 在井

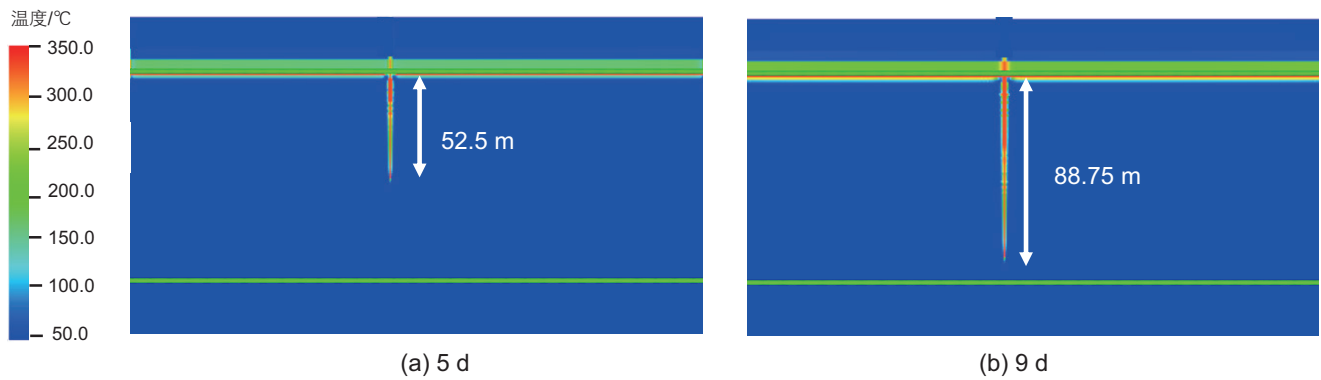


图4 非均质储层不同注热时间的温度场演化规律: (a) 5 d; (b) 9 d

Fig. 4 Temperature field evolution patterns in inhomogeneous reservoirs with different heat injection times: (a) 5 d; (b) 9 d

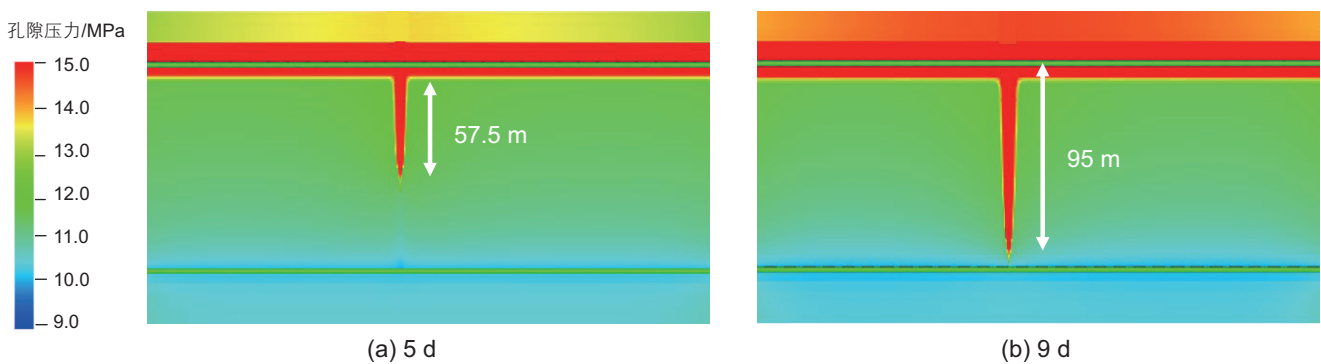


图5 非均质储层不同注热时间的压力场演化规律: (a) 5 d; (b) 9 d

Fig. 5 Pressure field evolution patterns in inhomogeneous reservoirs with different heat injection times: (a) 5 d; (b) 9 d

周加热储层的同时,蒸汽沿高渗通道突进,储层非均匀吸热。随时间增加,高渗通道蒸汽前缘不断前进,当注热至第9天时温度和压力沿高渗通道波及范围分别达到了88.75 m和95 m。因此对于存在高渗通道的非均质储层,注热井容易沟通邻井,造成生产井温度、含水率上升,影响正常生产作业。

2 模型建立

2.1 问题描述

海上钻井船悬臂梁覆盖范围有限,平台井口间距小^[4],井底距离逐渐增大,渤海某稠油区块三维井眼轨迹如图6所示。海上稠油热采井一般选用水平井的井型以提高加热与采油效率,水平段采用裸眼完井方式,水平段以上部分采用套管完井。注蒸汽时,水平井上部由套管、水泥封固,井周仅发生热传导,蒸汽通过裸眼段进入储层,对井底温度场、压力场造成复杂影响。

若采用钻井与注热并行模式,当在钻井与注热井的井底间距小于窜流安全范围时,存在窜流风险。钻井期间发生汽窜会影响钻井安全,只能通过停钻或与停止注热的方式避免风险,从而延长工期,增加作业成本。为最大限度减小窜流风险,有必要对钻井和注热顺序优化设计,保证在钻井与注热井的井底间距大于窜流安全范围的同时使钻井停工时间最短。

2.2 数学模型

为实现安全钻井,同时使窜流引起的停工时间最短,本文以钻井停工时间最短为目标,建立在满足约束条件的数学模型,目标函数与约束条件等如下所示。

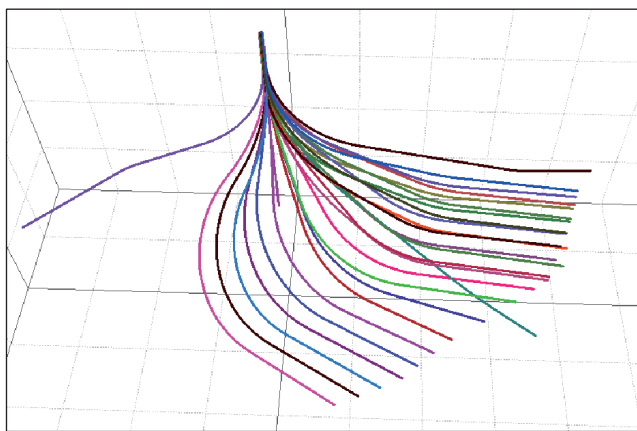


图6 某稠油区块三维井眼轨迹

Fig. 6 Three-dimensional wellbore trajectory in a heavy oil block

目标函数为:

$$T = \min \sum t_{ij} \quad (1)$$

式中, i, j 为井的编号; t_{ij} 为*i*井钻完换到*j*井的停工等待时间; d ; T 为钻完所有井的总停工时间, d 。

模型约束为:

(1)在钻井与注热井井底间距大于安全距离。

$$lb_{ij} \geq ls \quad (2)$$

式中, lb_{ij} 为井*i*与井*j*的井底最小距离, m ; ls 为窜流安全距离, m 。

(2)同一时间最多有一口井钻进,每口井仅钻进一次。

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{建井完成} \\ 0 & \text{未建井} \end{cases} \quad (3)$$

式中, b_i 为*i*井的建井状态值。

(3)同一时间最多有一口注热井,每口井仅注热一次。

$$h_i = \begin{cases} 1 & \text{完成注热} \\ 0 & \text{未注热} \end{cases} \quad (4)$$

式中, h_i 为*i*井的注热状态值。

(4)一口井建井完成后才能注热,已注热井数量小于已钻井数量。

$$0 \leq h_i \leq b_i \leq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n h_i \leq \sum_{i=1}^n b_i \quad (6)$$

式中, n 为井的数量。

(5)最终完成所有井的钻进,待遍历完成时

$$\sum_{i=1}^n b_i = n \quad (7)$$

3 改进的蚁群算法

Dorigo等^[11-12]认为蚂蚁觅食过程会在路径上留下信息素,越短的路径留下的信息素浓度越高,蚂蚁倾向于选择信息素浓度高的路径,如图7所示,蚂蚁逐渐向更短的路径聚集,从而找出一条最优路径。

信息素具有挥发性,随着蚂蚁经过,路径上信息素不断释放与挥发,当前时刻路径上信息素值与前一时刻蚂蚁留下的信息素、信息素挥发速率等参数有关,定义为^[10]:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (8)$$

式中, $t, t+1$ 表示时刻(或迭代次数), τ_{ij} 表示路径(i, j)

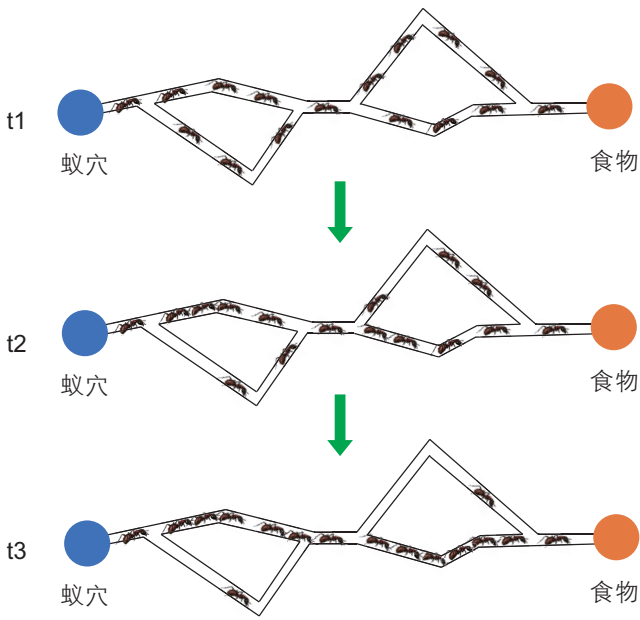


图7 蚂蚁觅食过程

Fig. 7 Ant foraging process

j)的信息素值, ρ 为信息素挥发速率, m 为蚂蚁数量, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为蚂蚁 k 在路径 (i, j) 留下的信息素。

3.1 改进位置转移概率

对于单个蚂蚁来说, 已访问的位置将不再访问。当蚂蚁到达位置 i 后, 会自由选择下个位置 j , 通过信息素值与位置点之间的距离计算位置转移概率 p 。

针对本文钻井顺序优化问题, 应增加井底距离较远的井被选中的概率, 使在钻井与注热井距离尽可能远, 以增加钻井安全性, 因此将井底距离引入位置转移概率计算公式。筛选出满足安全距离的待钻井, 使用最大-最小归一化方法将井底距离归一化处理, 使其位于 $[0, 1]$ 之间, 定义为:

$$z_{ij} = \frac{lb_{ij} - \min lb_i}{\max lb_i - \min lb_i} \quad (9)$$

式中, lb_{ij} 为井 i 与井 j 的井底最短距离, $\min lb_i$ 、 $\max lb_i$ 为井 i 至待钻井距离的最大、最小值。井底距离越大, 则 z 值越大。为使井底距离大的井具有更大的位置转移概率, 改进位置转移概率 p 的计算方法为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) z_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_{\text{allow}}} \tau_{il}^\alpha(t) z_{il}^\beta} & j \in N_{\text{allow}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, α 为信息素影响因子, β 为能见度影响因子, N_{allow} 为在当前可访问的位置集合。井底距离越大, 则

z 值越大, 位置转移概率 p 值就越大。

如果每只蚂蚁都选择概率最大的位置点作为下次访问的位置, 则很容易陷入局部最优值, 失去全局搜索能力。将“轮盘赌”法^[20]应用在蚁群算法的路径选择, 使算法具有一定随机性, 增强了蚁群算法的全局寻优能力。

3.2 改进信息素更新策略

对于信息素更新策略的不同, $\Delta\tau_{ij}^k$ 的计算方法有蚁周模型(Ant Cycle System, ACS)、蚁量模型(Ant Quantity System, AQS)、蚁密模型(Ant Density System, ADS)3种^[10], 其中蚁周模型应用范围最广、效果最好。原模型使用路径总和计算信息素增量, 而本文目标函数式(1)使总停工时间最短, 因此使用停工时间总和替换蚁周模型中的路径总和, 改进蚁周模型为

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/T_k & \text{如果蚂蚁} k \text{ 经过路径} (i, j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, Q 为初始信息素浓度, T_k 为蚂蚁 k 遍历所有井后所需的停工时间和, 表示为

$$T_k = \sum_{ij} t_{ij}^k \quad (12)$$

式中, t_{ij}^k 为蚂蚁 k 从钻完井 i 换到井 j 的停工等待时间, d 。

总停工时间 T_k 越小, 则 $\Delta\tau_{ij}^k$ 越大, 式(8)算出的信息素浓度越高, 根据位置转移概率, 该路径被选择的概率就越大, 从而使蚂蚁沿着停工时间短的路径行走, 进而实现停工时间短的路径寻优。

3.3 算法实现步骤

对于钻井顺序优化问题, 不仅要考虑停工时间, 还要严格控制注热井与在钻井的井底距离。对选取待钻井的策略为, 当有井正在注热, 且无满足安全距离的可钻井时, 则等待注热完成后重新选择。对于注热井的选择, 当有井正在钻进, 且无满足安全距离的可注热井时, 则等待钻井完成后再次选择。

基于蚁群算法的模型求解步骤主要包括参数初始化、寻找下一口待钻井与注热井、更新信息素、记录最短路径等, 算法执行流程如图8所示, 具体实现步骤如下:

(1)参数初始化。蚁群算法基本参数取值为: 信息素影响因子 $\alpha=1$, 能见度影响因子 $\beta=1$, 信息素挥发速率 $\rho=0.2$, 初始信息素 $Q=20$, 蚂蚁数量 $m=50$, 迭代次数 $E=200$ 。

(2)井的数据处理。根据三维井眼轨迹计算出水平井裸眼段最小距离矩阵 lb , 根据现场情况设定建井周

期 pd 与注热周期 ph 。

(3)寻找下一口待钻井。随机生成每只蚂蚁初始位置,即第一口要钻的井。将其状态设置为建井完成,并加入蚂蚁 k 的禁忌表 $tabu_k$,禁忌表中的位置不可再访问。此时即可进行注热操作,状态标记为正在注热。查找距离当前的注热井大于给定安全距离的可钻井集合 N_{allow} 。如果 N_{allow} 集合为空,则停止钻井,待注热完成,钻井停工时间为当前注热井的剩余注热时间,即

$$t=ph-th \quad (13)$$

如果 N_{allow} 集合不为空,计算位置转移概率 p ,确定下一口待钻井。

(4)更新注热井状态。记录当前注热井已注热时间 th ,如果有在钻井,则注热时间增加一个钻井周期, th 更新为 $th+pd$ 。如果注热时间 th 大于注热周期 ph ,则标记当前井注热状态为注热完成,并查找满足安全距离的待注热井集合 H_{allow} 。如果 H_{allow} 集合为空,则停止注热,令 $th=0$;如果 H_{allow} 集合不为空,则确定下一口

注热井, th 更新为 $th-ph$ 。

(5)更新钻井状态,将禁忌表 $tabu_k$ 与所有井的集合取差集,如果差集非空,说明有未钻井,则返回步骤(2)。

(6)计算蚂蚁 k 的钻井停工时间 T_k 。

(7)更新信息素值 τ 。

(8)更新最短停工时间 T 。如果 $T < T_k$,则更新 T 的值为 T_k ,并记录钻井路径。

4 算例分析

海上作业费用高,当设定安全距离较大时,容易出现钻井或注热等待的情况,造成工期延长,从而增加作业成本。若设定安全距离较小,可能面临较大的汽窜风险,从而危及钻井安全。

本文以渤海某稠油油田为例,图9为井底最小距离矩阵,平均建井周期为12天,平均注热周期为26

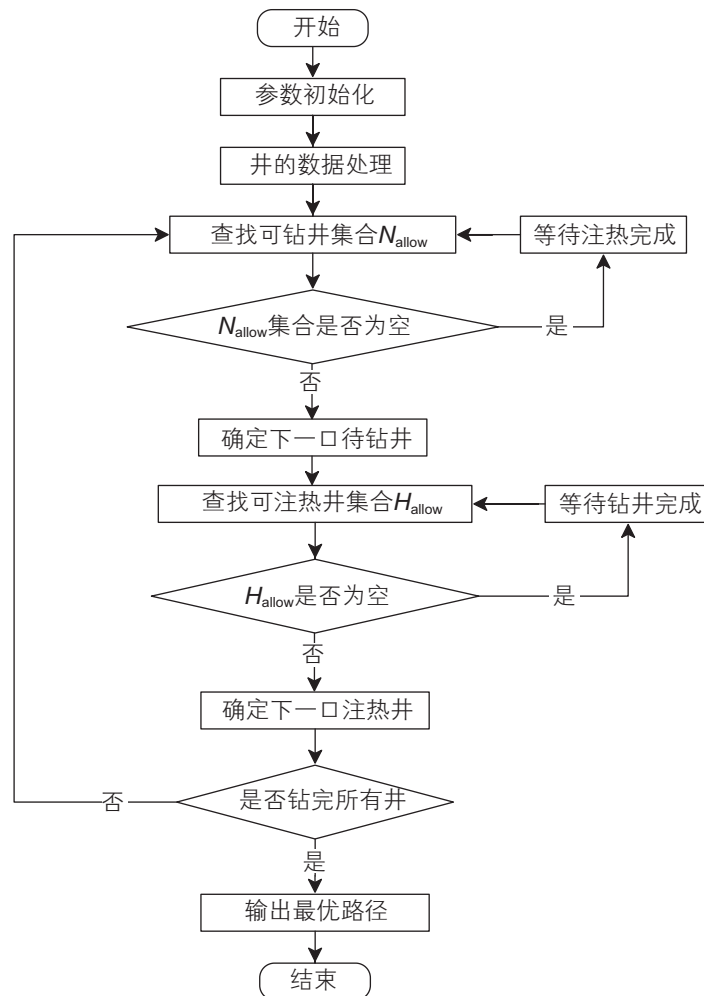


图8 算法执行流程图
Fig. 8 Algorithm execution flow chart

井号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	277	138	121	122	78	479	468	410	365	88	181	95	92	159	350	313	272	220	144	251	381	382	289	374	323	92	253
2		0	74	100	337	216	348	129	105	267	140	474	454	197	91	336	419	486	99	226	292	344	360	326	364	187	291	79
3			0	298	482	93	97	171	467	196	137	76	199	188	106	218	106	308	76	287	395	118	225	285	91	249	322	111
4				0	140	374	119	479	311	301	87	96	128	430	456	350	363	115	289	406	202	495	85	161	256	91	363	279
5					0	227	377	95	85	135	263	487	356	156	146	426	456	320	128	75	420	293	475	101	293	143	414	96
6						0	107	336	286	85	74	239	455	277	87	97	403	226	192	395	183	267	356	436	165	326	488	108
7							0	391	98	497	402	213	365	250	405	179	77	296	456	97	217	375	80	474	382	280	92	249
8								0	116	199	353	280	379	498	482	268	482	78	96	153	291	266	451	271	216	272	357	89
9									0	98	164	441	236	202	90	485	204	423	308	189	439	393	233	407	450	215	168	299
10										0	87	232	70	458	322	81	106	105	228	84	95	364	178	391	219	219	85	75
11											0	174	231	320	459	81	358	289	217	443	197	90	317	313	164	402	500	491
12												0	83	236	429	92	346	490	142	87	343	455	306	450	97	378	174	210
13													0	310	467	418	448	292	292	428	98	443	204	99	374	78	72	303
14														0	413	414	147	155	262	163	416	406	279	132	341	117	229	193
15															0	104	110	163	88	374	375	272	170	417	277	479	447	179
16																0	113	176	144	464	96	297	82	420	84	252	500	178
17																	0	287	397	165	112	157	293	415	146	202	432	308
18																		0	195	215	479	287	425	139	312	295	482	93
19																			0	119	352	188	487	487	322	431	201	316
20																				0	374	332	262	130	481	271	86	349
21																					0	234	163	316	116	290	302	300
22																						0	214	85	376	185	471	79
23																							0	479	223	93	89	315
24																								0	399	221	224	233
25																									0	183	155	91
26																										0	85	99
27																											0	365
28																												0

图9 井底距离矩阵

Fig. 9 Wellbore distance matrix

天, 即 $pd=12$ d, $ph=26$ d。应用改进的蚁群算法求解给定安全距离的最短钻井停工时间, 对钻井停工与不停工时的典型工况进行对比分析。在相同安全距离条件下时, 对比人工选取法与改进蚁群算法选取钻井顺序所需钻井总工期的差异。

从计算量上来看, 枚举求解法的时间复杂度为 $O(n!)$, 计算量随井的数量的增加呈指数型增长, 求解代价大。该算法的时间复杂度为 $O(mnT)$, m 、 n 、 T 分别为蚂蚁数量、井的数量、迭代次数, 随着井的数量 n 的增加, 该算法计算量并没有显著增加。以渤海某稠油油田 28 口井为例, 枚举法求解时间复杂度约为 $3.05 \times 10^{29}(28!)$, 蚁群算法的时间复杂度约为 $2.8 \times 10^5(50 \times 25 \times 200)$, 因此该算法极大的降低了计算量。

改进蚁群算法求解出给定安全距离的最短钻井停工时间, 结果如图 10 所示, 安全距离小于 400 m 时无需停工, 安全距离为 410~430 m、440~450 m、460 m 时, 最短停工时间分别为 2 d、4 d 和 6 d。

将人工选取钻井顺序的方法与改进蚁群算法计算的钻井总工期进行对比。人工选取钻井顺序具有一定随机性, 当有多口井满足安全距离时, 对于最优并选

择策略缺乏指导。本文分别以最大距离原则、最小距离原则、随机选取原则进行手动选取钻井顺序, 即有多口井满足安全距离时, 分别以距离最大、距离最小、随机选取的方式从中选择下一口待钻井, 选取注热井与待钻井的策略与 3.3 节中改进蚁群算法的策略一致。分别以 400 m、420 m、440 m、460 m 为安全距离, 计算钻井总工期如图 11 所示, 平均节约工期是指 3 种人工选取法所需的平均钻进总工期与改进蚁群算法所需钻进总工期的差。人工选取法得出钻井顺序的停工时

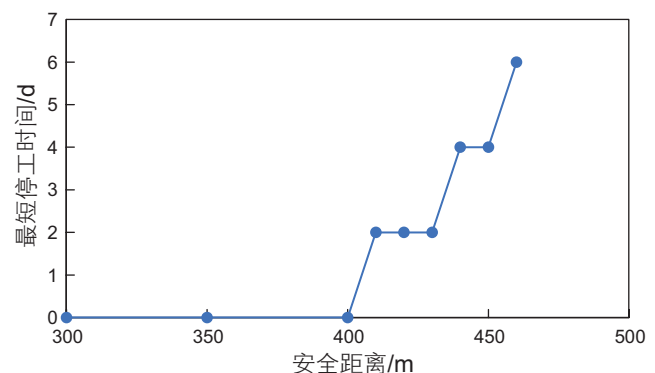


图10 不同安全距离下的最短停工时间

Fig. 10 The shortest downtime at different safety distances

间长，所需的钻井总工期均大于改进蚁群算法的工期。基于本文案例，该算法相较于人工选取法平均可节约钻井总工期 15~30 d，且避免了人工选取的随机性。

改进蚁群算法算出的钻井顺序大幅缩短了钻井总工期，为钻井安全距离的设定与钻井顺序优选提供了指导，对缩短钻井工期、节约钻井成本、提高钻井安全性具有重要意义。

对需要停工和无需停工的两种工况进行分析。安全距离为 300 m 和 450 m 时具体钻井与注热顺序如表

2 所示，停工时间分别为 0 d 和 4 d，平均井底距离分别为 412.6 m 与 479.2 m。当安全距离为 300 m 时，6# 井建井完成后即可进行注热操作，钻井和注热均无需停工。当安全距离为 450 m 时，钻井工期需延长 4 d。

每日的在钻井与注热井如表 3 所示。在第 205 d，注热井为 7# 井，无满足安全距离的待钻井，因此需暂停钻井，直至 7# 井钻井完成。此时 7# 井已注热 24 d，因此须暂停钻井 2 d，第 207 d 开始 17# 井的钻进与 5# 井的注热。同样在第 327~328 d 时暂停钻井 2 d，故总

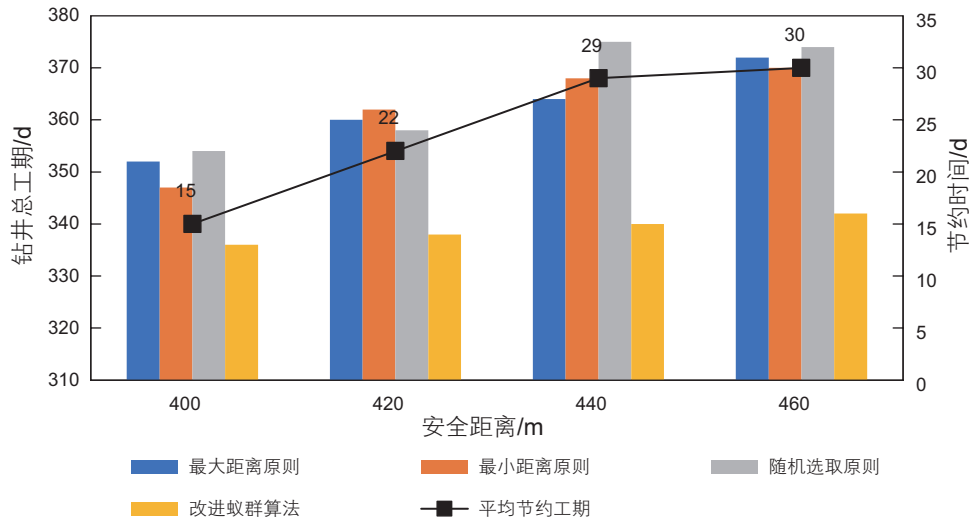


图 11 不同算法的计算的钻井总工期

Fig. 11 Total drilling duration calculated by different algorithms

表 2 不同安全距离下的钻井与注热顺序

Table 2 Drilling and heat injection sequence at different safety distances

安全距离/m	钻井顺序	注热顺序	钻井停工时间/d	平均井底间距/m
300	[6, 8, 17, 4, 15, 7, 13, 14, 9, 27, 5, 12, 22, 25, 1, 19, 11, 21, 16, 20, 28, 18, 3, 23, 2, 24, 26, 10]	[6, 8, 15, 4, 17, 9, 7, 14, 13, 27, 5, 12]	0	412.6
450	[16, 20, 9, 27, 28, 21, 19, 23, 7, 24, 5, 8, 4, 15, 14, 10, 1, 17, 3, 12, 2, 22, 18, 11, 6, 13, 26, 25]	[16, 19, 23, 8, 7, 5, 12, 27, 15, 20]	4	479.2

表 3 安全距离为 450 m 时的钻井与注热顺序

Table 3 Drilling and heat injection sequence at a safety distance of 450 m

总工期/d	在钻井编号	当前井钻井时间/d	注热井编号	当前井注热时间/d	井底距离/m
1	16#	1			
13	20#	1	16#	1	464
25	9#	1	16#	13	485
37	27#	1	16#	25	500
39	27#	3			
49	28#	1			
61	21#	1			
73	19#	1			
85	23#	1	19#	1	487
97	7#	1	19#	13	456

(续表)

总工期/d	在钻井编号	当前井钻井时间/d	注热井编号	当前井注热时间/d	井底距离/m
109	24#	1	19#	25	487
111	24#	3	23#	1	479
121	5#	1	23#	11	475
133	8#	1	23#	23	451
137	8#	5			
145	4#	1	8#	1	479
157	15#	1	8#	13	482
169	14#	1	8#	25	498
173	14#	3			
181	10#	1	7#	1	497
193	1#	1	7#	13	479
204	1#	12	7#	24	479
205	停工 2 d		7#	25	
207	17#	1	5#	1	456
219	3#	1	5#	11	482
231	12#	1	5#	23	487
235	12#	5			
243	2#	1	12#	1	474
255	22#	1	12#	13	455
267	18#	1	12#	25	490
269	18#	3	27#	1	482
279	11#	1	27#	11	500
291	6#	1	27#	23	488
293	6#	3			
303	13#	1	15#	1	467
315	26#	1	15#	13	479
326	26#	12	15#	24	479
327	停工 2d		15#	25	
329	25#	1	20#	1	481

钻井工期延长 4 d。

5 结论

稠油资源储量丰富、开发潜力大,海上稠油油田采用钻井与注热并行的模式可以大幅提高钻采效率,但注热井注入的蒸汽可能窜流至邻近在钻井,影响钻井安全。本文基于改进蚁群算法对钻井顺序进行优化,得出以下结论:

(1)蒸汽对均质储层水平段均匀加热,温度、压力影响范围总体较小,不会造成汽窜。对于存在高渗透

道的非均质储层,蒸汽易沿天然或次生高渗通道突进,造成井底窜流,9 d窜流距离可超 90 m。当在钻井与注热井的井底距离较小时,则存在窜流风险。

(2)对蚁群算法进行改进可求解钻井顺序优化问题,相较于枚举法 $O(n!)$ 的时间复杂度,该算法 $O(mnT)$ 的时间复杂度可以极大降低计算量。

(3)人工选取法得出的钻井顺序停工时间长,所需的钻井总工期大于改进蚁群算法。针对渤海油田典型案例,当设定安全距离为 400~460 m 时,该算法可节约钻井总工期 15~30 d,对钻井顺序优选、节约钻井成本、增强海上稠油热采井钻井安全性具有重要意义。

参考文献

- [1] 王宝军,刘鹏,李冠群,等.海上热采井注采一体化井口技术研究与应用[J].石油机械,2022,50(3):50-56. [WANG B J, LIU P, LI

- G Q, et al. [Technical research and application of integrated injection-production wellhead for offshore thermal recovery wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2022(03): 50–56.]
- [2] 孙鹏霄, 刘英宪. 渤海稠油油藏开发现状及热采开发难点与对策[J]. *中国海上油气*, 2023, 35(2): 85–92. [SUN P X, LIU Y X. Development status and thermal development difficulties and strategy of Bohai heavy oil reservoirs[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(2): 85–92.]
- [3] 曹嫣媛, 刘冬青, 张仲平, 等. 胜利油田超稠油蒸汽驱汽窜控制技术[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 739–743. [CAO Y B, LIU D Q, ZHANG Z P, et al. Steam channeling control in the steam flooding of super heavy oil reservoirs, Shengli Oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 739–743.]
- [4] 蔡宁骁, 王真理, 周大胜, 等. 注蒸汽稠油热采开发区浅层汽窜的微重力勘探方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(1): 235–242. [CAI N X, WANG Z L, ZHOU D S, et al. Microgravity exploration method for shallow steam channeling in steam injection heavy oil thermal recovery development filed[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(1): 235–242.]
- [5] 曹向峰, 管志川, 史玉才, 等. 海上丛式井组钻井顺序优化模型及求解方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(3): 96–101. [CAO X F, GUAN Z C, SHI Y C, et al. Drilling sequence optimization model and its solution method for offshore cluster wells[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2016, 40(3): 96–101.]
- [6] WANG Z, HE J, TANAKA S, et al. Efficient drilling sequence optimization using heuristic priority functions[J]. *SPE Journal*, 2022, 27(01): 133–152.
- [7] LU R, REYNOLDS A C. Joint optimization of well locations, types, drilling order, and controls given a set of potential drilling paths[J]. *SPE Journal*, 2020, 25(3): 1285–1306.
- [8] LEEUWENBURGH O, CHITU A G, NAIR R, et al. Ensemble-based methods for well drilling sequence and time optimization under uncertainty[C]//*ECMOR XV – 15th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*. Amsterdam, Netherlands, 2016.
- [9] GAVIN L, JAGTENBERG P. Probabilistic assessment of pressure depletion and inflation and its impact on the drilling dequence for the Sangomar Field, Senega[C]//*SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. OnePetro*, 2020.
- [10] 郭城成, 田立勤, 武文星. 蚁群算法在求解旅行商问题中的应用综述[J]. *计算机系统应用*, 2023, 32(3): 1–14. [GUO C C, TIAN L Q, WU W X. Survey on ant colony algorithm for solving traveling salesman problem[J]. *Computer Systems Applications*, 2023, 32(3): 1–14.]
- [11] MARCO D, MAURO B, THOMAS S. Ant colony optimization[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, 1(4): 28–39.
- [12] MARCO D. Positive feedback as a search strategy[J]. *Technical Report*, 1991: 91–16.
- [13] WANG Y, HAN Z. Ant colony optimization for traveling salesman problem based on parameters optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 107: 107439.
- [14] FLOOD M M. The traveling-salesman problem[J]. *Operations Research*, 1956, 4(1): 61–75.
- [15] ZHANGQI W, XIAO GUANG Z, QINGYAO H. Mobile robot path planning based on parameter optimization ant colony algorithm[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 2738–2741.
- [16] YU B, YANG Z Z. An ant colony optimization model: the period vehicle routing problem with time windows[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(2): 166–181.
- [17] BULLNHEIMER B, HARTL R F, STRAUSS C. An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem[J]. *Annals of Operations Research*, 1999, 89: 319–328.
- [18] DUAN P, AI Y. Research on an improved ant colony optimization algorithm and its application[J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2016, 9(4): 223–234.
- [19] 鲍惠芳, 方杰, 张进思, 等. 基于改进蚁群算法的低碳冷链配送路径优化[J]. *系统仿真学报*, 2023: 1–12. [BAO H F, FANG J, ZHANG J S, et al. Optimization on cold chain distribution routes considering carbon emissions based on improved ant colony algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2023: 1–12.]
- [20] LIANG Z, GUO R, SUN J, et al. Orderly roulette selection based ant colony algorithm for hierarchical multilabel protein function prediction[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: e6320273.