

油管输送式射孔排炮优化问题的改进蚁群算法^①

吴雅娟, 周 红, 李 博

(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 大庆 163318)

摘 要: 为解决油管输送式射孔排炮问题中射孔枪总长最短的优化需求, 建立了优化问题的数学模型, 将问题的搜索空间抽象为图来表示, 将蚁群算法应用于该问题的求解。算法局部搜索采用贪婪的策略, 以及伪随机比例的状态转移规则, 为避免算法早熟收敛, 对信息素增量的计算公式进行了改进。实验结果与回溯法对比表明, 蚁群算法解决此问题更有效。

关键词: 蚁群算法; 贪婪策略; 射孔枪; 排炮

Improved Ant Colony Algorithm for Cannon Arrangement for Tubing Conveyed Perforation Problem

WU Ya-Juan, ZHOU Hong, LI Bo

(School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: To solve the optimization requirement of shorting total joint length among perforators in cannon arrangement for tubing conveyed perforation problem, the mathematical model of optimization problem was build, search space was abstract to graphic explanation, then ant colony algorithm was applied to this problem. In this paper, greedy algorithm was applied in local searching, the pseudo-random proportional rule was adopted, computational formula of Pheromones Increment was improved. The results show that the solution which ant colony algorithm produces is better than the one which backtracking algorithm produce.

Key words: ant colony algorithm; greedy algorithm; cannon arrangement; perforator

油管输送式射孔是从 20 世纪 70 年代发展起来的一种射孔方法, 主要应用于较长井段或是多个层段地层的射孔, 基本原理是把一口井射孔所需的全部射孔枪串联, 接到油管柱尾端, 形成一个硬链接管串, 下入井中定位并射孔^[1]。地下油层的分布是产层和夹层交替出现, 射孔枪通过接头相连接, 接头处不能装弹, 如果射孔枪接头与产层相对应, 就会减少产层射开孔数从而影响油气产量。因而产层所对应的接头总长最小是油管输送式射孔排炮的优化目标。

油管输送式射孔排炮优化问题, 是要寻求不同长度的射孔枪一种最优编排, 属于组合优化问题。当射孔井段长, 射孔枪系列多时, 人工设计无法满足最优化目标, 使用暴力计算方法存在着组合爆炸问题, 文

献[2]使用回溯法解决问题, 但是当搜索空间较大时回溯法效率仍然较低。

蚁群算法(Ant Colony Algorithm)是由意大利学者 Dorigo 等^[3]人在 20 世纪 90 年代受到真实蚁群的觅食机制的启发而提出的一种新的进化计算方法^[4], 广泛应用于求解各类组合优化问题^[5-7]。本文建立了油管输送式射孔排炮问题的优化模型, 对应用蚁群算法解决此问题进行了深入探讨研究。

1 问题描述

1.1 问题分析

图 1 展示了抽象过的射孔枪的串接方式以及地层中产层和夹层交替的情况, 模拟射孔枪接头和产层相

① 基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F2007-11)

收稿时间:2011-07-07;收到修改稿时间:2011-07-29

对应的某种射孔枪串接方案。为说明射孔枪的串接方式，图中用两根射孔枪简单举例，但是当实际地层较厚时，可能用到几十根射孔枪的串接。射孔枪最优串接方案的目标函数是，实现产层所对应的射孔枪接头总长度最小，约束条件是射孔枪串长度要小于油气层总厚度。

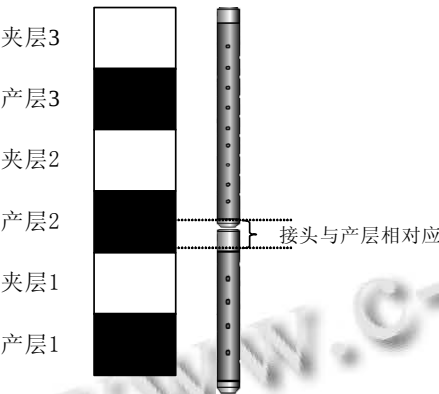


图 1 射孔枪与地层对应示意图

1.2 数学模型

模型的基本假设条件如下：

- ① 模型建立的前提是假设不同枪型射孔枪接头长度相同
- ② 不考虑特殊地层的情况，油气层总厚度内全部用射孔枪串接。

目标函数：

$$f = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

约束条件：

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij} x_{ij} \leq oillength \tag{2}$$

参数说明：

- 枪的序号
- 枪的型号
- 枪串的总枪数
- 枪的型号总数
- 第根使用型枪的枪长
- 油层总厚度

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果枪型} j \text{在第} i \text{根枪调度的位置} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

2 算法设计

2.1 问题搜索空间

找到不同长度射孔枪的一种最优编排，即对不同长度射孔枪进行调度，找到约束条件下的最优调度。采用如图 2 所示的搜索空间定义，行表示可以被调度的枪型，列表示需要串接的枪的最大根数。圆圈的大小表示选择概率的大小，蚁群算法通过搜索，不断提高最短路径上节点的选择概率，最终找到满意的可行解。

图 2 中模拟对三种枪型的排列，分别是 1m 枪、2m 枪和 3m 枪。根据总油层厚度确定需要排列枪的最大根数，图中模拟为 5 根。为满足问题定义中的约束条件，每次进行下一根枪型的选择时，要根据本次所选路径上枪长总和是否超过油层总厚度，确定下次所选枪型的禁忌表。图 2(a)表示搜索的初始状态，所有枪型在各个排列阶段被选择的概率均等，搜索中选择概率的大小由信息素和局部启发信息决定。图 2(b)表示几次迭代后，搜索空间的变化，此时最可能的枪长排列是 2m-3m-1m-1m。

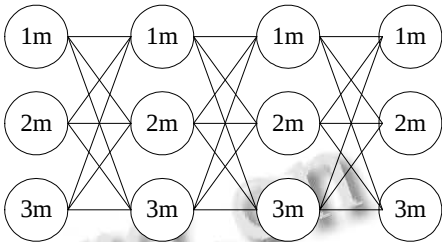


图 2 (a) 搜索初始状态

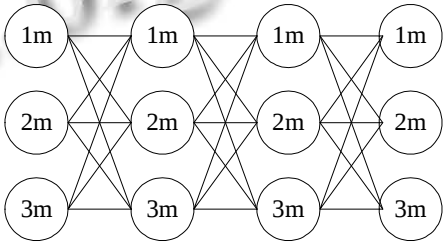


图 2 (b) 几次迭代后

2.2 算法步骤

算法步骤如下：

① 初始化过程：

初始化常量： m 枪型总数， n 枪串的总枪数根据油层厚度确定， α 信息素相对重要性， β 启发信息相对重要性， ρ 信息素挥发系数， q_0 概率选择参数， N_{cmax} 最大迭代次数。

初始化变量: t 时间计数器, N_c 循环次数计数器, $\tau_{ij}(t)$ 信息素强度初始值, $\Delta\tau_{ij}$ 信息素增量, $allowed_k$ 禁忌表。

初始化蚁群分布: 随机分布于初始化节点。

② 一只蚂蚁搜索一条路径的过程。搜索直到枪型禁忌表中枪型已满为止, 每次局部搜索, 根据状态转移规则来搜索枪型, 应用信息素局部更新规则更新节点。增加搜索的步数, 根据公式 2 判断下一步禁忌表。搜索完成后记录所走路径长度, 加入到平均路径的计算中, 计算所走路径信息素增量 $\Delta\tau(r,s)$ 。

③ a 只蚂蚁进行搜索, 搜索完成后更新最短路径上节点的信息素浓度 $\tau(r,s)$ 。

④ 记录到目前为止的最短路径, 若循环次数小于最大循环次数 $N_{c_{max}}$, 初始化蚁群分布, 返回步骤 2, 否则输出最优调度。

2.3 算法中各个公式的确定

2.3.1 状态转移规则

位于第根 r 枪的蚂蚁通过状态转移规则决定要选择的枪型 s

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in allowed_k} \{ [\tau(r,u)]^\alpha [\eta(r,u)]^\beta \} & q \leq q_0 \\ s & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

式中 q 是 $[0,1]$ 区间内的随机数, q_0 为一个参数, 当 $q \leq q_0$ 时按照先验知识进行搜索, 否则按照概率公式进行搜索。 $\tau(r,u)$ 表示第 r 根枪处枪型 u 的信息素量, $\eta(r,u)$ 表示第 r 根枪处枪型 u 的启发函数。 s 是由公式 4 给出的概率分布公式选出的一个随机变量。

$$P_k(r,s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r,s)]^\alpha [\eta(r,s)]^\beta}{\sum_{u \in allowed_k} [\tau(r,u)]^\alpha [\eta(r,u)]^\beta} & \text{如果 } s \in allowed_k \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

由式 3 和式 4 确定的状态转移规则被称为伪随机比例规则。这个状态转移规则倾向于选择信息素浓度高和与产层对应接头短的节点。参数 q_0 的大小决定了利用先验知识搜索和随机选择新路径之间的相对重要性。当一只蚂蚁处于第根枪处搜索枪型时, 随机产生 $0 < q < 1$, 判断 q 的大小, 根据转移规则进行下一结点的搜索。

2.3.2 启发函数 η_{ij} 的计算

$$\eta_{ij} = \frac{Q}{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m c_{kj} x_{kj}} \quad (5)$$

式中 Q 为常量用于调节 η_{ij} 的大小。局部搜索启发信息 η_{ij} 的计算采用贪婪策略, 每一步选择, 都考虑使目标函数值即接头总长增量最小的枪型。在选择第 i 根枪的时候, 从候选枪型集合中选择一种枪型, 枪长与前 $i-1$ 根枪相加后, 判断枪尾处于油层中的接头大小, 选择接头最小的枪型。每一步搜索都只考虑当前状态, 不考虑全局状态。如果只按照 η_{ij} 进行局部搜索, 得到的常常是局部最优解, 蚁群算法在局部搜索过程中会结合信息素量, 做出枪型的选择。

2.3.3 信息素全局更新

蚁群系统中只有全局最优路径上的节点可以进行信息素的全局更新。这种规则以及上述伪随机状态转移规则的使用都是为了让蚂蚁的搜索集中在当前循环为止所找出的最好路径周围, 使搜索更具指导性。信息素全局更新规则如下:

$$\tau(r,s) = (1 - \partial_1) \tau(r,s) + \partial_1 \Delta\tau(r,s) \quad (6)$$

$$\Delta\tau(r,s) = \begin{cases} \tau_0 \left(1 - \frac{Z_{cur}}{\bar{Z}} \right) & r, s \in \text{全局最优调度中的节点} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

由于最初的搜索具有随机性, 信息素量对指导后续搜索的作用应该被削减, 因此信息素随着时间的推移会发生挥发现象。 ∂_1 ($0 < \partial_1 < 1$) 为挥发系数, 避免路径上轨迹量的无限累加。

信息素增量 $\Delta\tau(r,s)$ 的计算是本文对经典蚁群算法的计算方式的改进, τ_0 是初始信息素值, Z_{cur} 为第 k 只蚂蚁搜索结果的目标函数值, $\bar{Z}$ 为目标函数的平均值。这种信息素的更新方法, 可以缩小可行解间的信息素差异, 避免过早收敛。

2.3.4 信息素局部更新

蚂蚁在建立解决方案的过程中, 应用局部信息素更新规则来更新节点, 信息素的局部规则如下:

$$\tau(r,s) = (1 - \rho) \tau(r,s) + \rho \Delta\tau(r,s) \quad (8)$$

其中 ρ 为参数, $0 < \rho < 1$, 一直蚂蚁在从第根枪处搜索枪型节点的移动过程中, 局部更新规则的使用使得相应节点信息素量逐渐减小, 从而避免蚂蚁收敛到同一路径。

3 实验结果分析

文章采用文献[2]中的测试数据。对参数的调整采用“三步走^[8]”的方法确定最优参数组合。第一步枪型数 $m=4$, 蚂蚁数 $a=4$; 第二步参数粗调, 调整取值范围

较大的信息素启发因子 $\delta=1$ ，期望启发式因子 $\beta=4$ ，参数 $Q=5$ 以控制启发信息 η 在一个合理的范围内取值；第三步参数微调，在较小取值范围内调整全局信息素挥发因子 $\rho_1=0.3$ ，局部信息素挥发因子 $\rho=0.1$ ；最后确定最大循环次数 $N_{cmax}=1000$ 。

对文献[2]中最后一组测试数据测试，得到的实验结果如表 1 所示：

表 1 蚁群算法结果

数据项	数据值
油层数据	3.7, 2.8, 3.3, 9.0, 2.5, 7.9, 2.5, 3.1, 4.7, 3.1, 3.7
枪串排列结果	4-2-4-4-3-4-4-3-3-4-3-4
响应时间 (单位：秒)	1.6
目标函数值 (单位：米)	0.2

多组实验数据进行计算时间的测试，测试结果与文献[2]中的回溯法进行对比，结果如表 2 所示：

表 2 蚁群算法与回溯法计算时间对比

油层数据 (米)	油层厚度 (米)	蚁群算法时间 (秒)	回溯法时间 (秒)
3.5, 2.1, 4.7	10.3	0.2	0.2
2.6, 1.6, 2.2, 9.8, 1.4, 6.8, 1.4, 2.0, 3.6, 2.0, 2.6	36	0.9	0.2
3.7, 2.8, 3.3, 9.0, 2.5, 7.9, 2.5, 3.1, 4.7, 3.1, 3.7	46.3	1.6	75.0
8.2, 2.7, 5.2, 7.5, 6.6, 5.8, 8.4, 2.3, 6.5, 5.5, 9.8, 4.7, 12.0, 2.7, 5.3, 3.8, 6.9	103.9	9.2	198.0

从表 2 可以，看出当油层数据比较简单时，使用蚁群算法与回溯法的效率相当，甚至蚁群算法耗时会更长，但是当油层厚度增加，油层数据复杂时，蚁群算法执行效率远高于回溯法。蚁群算法作为一种智能优化算法，能够利用积累的知识和启发信息找到问题

的最优解，而回溯法的基本思想是遍历，所以问题规模较大时，蚁群算法的效率要高于回溯法。

4 结 论

蚁群算法在解决离散优化问题上具有突出的优越性。本文通过对油管输送式射孔排炮优化问题进行分析研究，提出了问题的数学模型。把问题的搜索空间抽象为图来表示，进而提出用蚁群算法解决该优化问题。通过实验测试表明蚁群算法能有效的解决该问题，并且通过与文献数据的对比，蚁群算法在解决油管输送式射孔排炮优化问题上具有较高的执行效率。本文是对蚁群算法在该问题领域应用的一种尝试。

参考文献

- 1 万仁溥.现代完井工程.第 3 版.北京:石油工业出版社,2008.
- 2 陈汶滨,张述,刘小玲.基于回溯法油管传输射孔排炮算法研究.西南石油大学学报,2010,32(3):176-179.
- 3 Colormi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies. Proc. of the First European Conference on Artificial Life. Paris, France, 1991.
- 4 倪庆剑,邢汉承,张志政,王蓁蓁.蚁群算法及其应用研究进展.计算机应用与软件,2008,25(8):12-16.
- 5 Stützle T, Dorigo M. ACO Algorithms for the Traveling Salesman Problem. Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science. Chichester, UK: Wiley, 1999. 163-183.
- 6 Zwaans W, Marques C. Ant colony optimisation for Job shop scheduling. Proc. of Workshop on Genetic Algorithms and Artificial Life.1999.
- 7 Maniezzo V, Carbonaro A. An ANTS heuristic for the frequency assignment problem. Future Generation Computer Systems, 2000,16:927-935.
- 8 段海滨.蚁群算法原理及其应用.北京:科学出版社, 2005: 116.