

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.06.008

# 基于蚁群算法的运动时间优化算法研究

魏 鹏, 罗红波, 赵 康, 龙 伟

(四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065)

**摘 要:** 液压凿岩台车在现代隧道掘进施工中发挥了重要作用, 现有液压凿岩台车在进行寻找孔位时, 由操作人员完成, 找孔顺序、找孔时间无优化, 导致寻找孔位时间浪费, 效率低. 针对上述问题, 对长臂多关节智能凿岩机面向超大隧道断面与复杂孔系的多节变运动与寻孔路径的时间进行优化, 创新研究如下: 通过对凿岩隧道形式、开挖方式分析和炮眼参数的设定, 对左右两机械臂钻孔任务提出无碰规划方案, 同时以多关节机械臂各个关节变量的总变化时间作为优化目标函数, 采用蚁群算法优化目标函数, 得到寻找孔位时间最短的优化寻找孔位路径, 提高了液压凿岩台车机械臂的定位找孔效率.

**关键词:** 液压凿岩台车; 孔序规划; 蚁群算法; 优化; 时间

**中图分类号:** TP301.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2018)06-1171-09

## Optimization of multi-joint robot motion of hydraulic drilling vehicle based on ant colony algorithm

WEI Peng, LUO Hong-Bo, ZHAO Kang, LONG Wei

(College of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Hydraulic rock drilling rig plays an important role in modern tunneling construction. The existing hydraulic drilling rig is completed by the operator when locating the hole position. The order of locating holes and the time to search holes is not optimized, which results in time waste and low efficiency. In view of the above problems, in this paper, the multi-node motion and the time of locating hole path of long arm multi-joint intelligent rock drill are optimized for large tunnel section and complex hole system. The innovative research is as follows: by the rock drilling tunnel form and excavation mode analysis, as well as the explosion hole parameters setting, a collision-free planning is proposed for the left and right manipulator drilling tasks. At the same time, the total change time of each joint variable of the multi-joint manipulator is used as the optimization objective function. The ant colony algorithm is used to optimize the objective function, and the optimized hole finding path with the shortest hole positioning time is obtained, which improves the positioning and finding efficiency of the hydraulic rock drilling rig mechanical arm.

**Keywords:** Hydraulic drilling jumbo; Hole sequence planning; Ant colony optimization; Optimization; Time

收稿日期: 2018-05-08

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2017GZ0352); 国家“十三五”重大专项(2016ZX05045)

作者简介: 魏鹏(1993-), 男, 硕士生, 河北石家庄市人, 研究方向为计算机数控技术及工业设备自动化.

通讯作者: 龙伟. E-mail: scdxlongwei@yeah.net

## 1 引言

新一代长臂多关节、智能、高效凿岩台车的需求日益急迫,其长臂多关节智能凿岩机面向超大隧道断面与复杂孔系的多节变运动与凿孔路径的时间优化问题的研究为提高凿岩钻孔智能化、效率有着重要的实际意义. 本文根据隧道掘进需覆盖断面和所钻孔形式,进行炮眼参数设置,提出无碰的钻孔路径规划方案,并通过分析多关节机械臂完成不同工位钻孔任务时各个关节角和位姿变换所用时间,提出以各个关节变化时间为目标的优化函数优化关节变量顺序及钻孔路径,运用蚁群算法在 Matlab 中对该函数进行优化仿真,生成最终优化的关节变量顺序及钻孔路径.

## 2 炮眼参数及布置

液压凿岩台车在钻爆法中主要作用是完成炮眼的钻进任务,钻孔任务中,首先要对炮眼(周边眼、掏槽眼、辅助眼)的布置、数目、深度和角度这些参数进行预先设定.

掏槽眼一般位于开挖断面中央靠近隧底,其作用是作为最先爆破部位,炸出一个空腔,有利于后续上部及周边炮眼爆破时岩石的崩落. 掏槽形式根据掏槽眼和开挖凿岩面的夹角,分为直角掏槽、斜眼掏槽和混合掏槽. 其中直角掏槽形式更适用于凿岩台车钻孔使用. 周边眼沿隧道开挖轮廓线布置,用来崩落岩石形成隧道断面,按照岩石硬度类别,极硬岩周边眼间距约 55~70 cm,硬岩周边眼间距约为 450~650 mm,软质岩周边眼间距约为 350~500 mm. 辅助炮眼布置在周边眼和掏槽眼之间,一般间距为 400~600 mm,同时尽可能的使得爆破出的石块大小相等以便于装填运输. 同时,辅助炮眼和周边炮眼的底部应在尽量保持在同一垂直面上,而掏槽眼深度则比前两则多出 100 mm. 图 1 所示炮眼在隧道开挖断面的基本布置.

对于钻孔误差要求:掏槽跑眼间距离误差和眼底间距离误差应小于等于 50 mm;辅助眼间距离误差应小于等于 100 mm;周边眼距离误差小于等于 50 mm,眼底位置不能超过开挖断面轮廓线 150 mm.

基于以上钻孔任务的设定,总结出炮眼布置参数如表 1 所示.

## 3 多关节机械臂孔序规划与运动优化

本文采用双机械臂结构设计,对钻孔任务提出

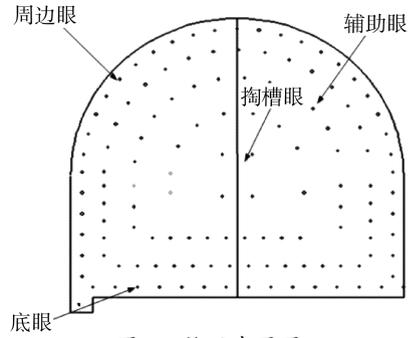


图 1 炮眼布置图  
Fig. 1 Blast-hole layout

表 1 炮眼布置参数

Tab. 1 Blanking arrangement parameters

炮眼形式	炮眼间距(cm)
掏槽眼	50~70
周边眼	50~70
辅助眼	40~60

规划,高效地利用两机械臂同时钻孔作业,也为钻孔顺序的自动控制提供合理的设计方案,提高液压凿岩台车整个钻孔速度. 基于机械臂结构,从钻孔“空间-时间-结构”上对钻孔方案进行分析,提出钻孔方案同时,抽象出钻孔顺序路径的数学模型,并基于此对其进行优化分析确定最终路径方案,图 2 为机械臂构简图.

### 3.1 机械臂孔序问题分析

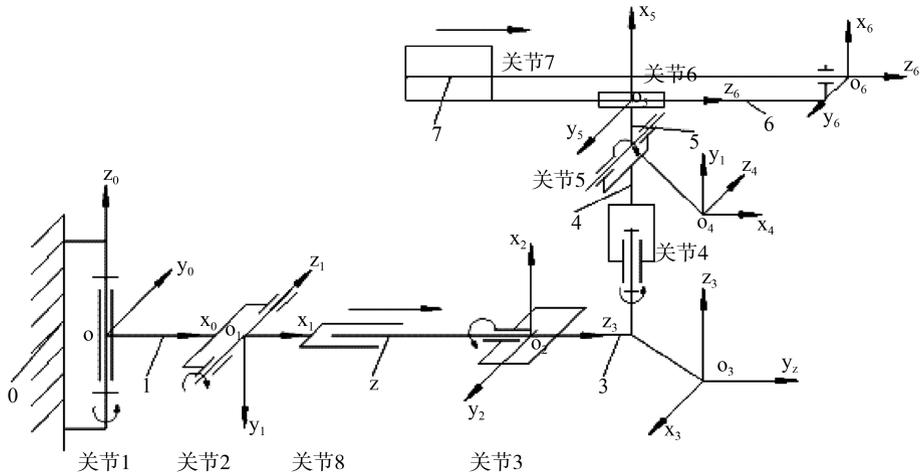
3.1.1 机械臂总体钻孔无碰方案分析 为实现大断面的凿岩钻孔任务,采用双机械臂结构设计,两机械臂存在工作空间交叉重叠区域  $U$ ,如图 3 所示.

左侧机械臂的凿岩覆盖空间为  $U$  右侧包络线以左区域,为  $K_2UU$ ;右侧机械臂的凿岩覆盖空间为  $U$  左侧包络线以右的区域,为  $K_1UU$ ;两机械臂工作空间存在交叉重叠区域  $U$ . 为避免机械臂间发生碰撞,两机械臂在完成钻孔任务时必须遵循如下原则.

1) 左臂和右臂不能同时工作在两臂的交叉区域  $U$  的上部或是下部;

2) 为保证左右两臂的高效作业利用,当其中某一臂完成作业时,另一臂也能同时完成钻孔任务.

基于以上两点整体规划原则,将重叠区域  $U$  分为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四部分如图 4(以断面中心线为对称中心),并提出如下 7 种钻孔任务路径(机械臂行走路径)空间规划方案.



0—机械臂底座; 1—双向十字铰; 2—伸缩臂; 3—回转支撑结构; 4—连接件; 5—推进梁托架; 6—推进梁; 7—凿岩机及钻杆

图 2 机械臂机构简图及连杆坐标系

Fig. 2 Drill arm mechanism diagram and connecting rod coordinate system

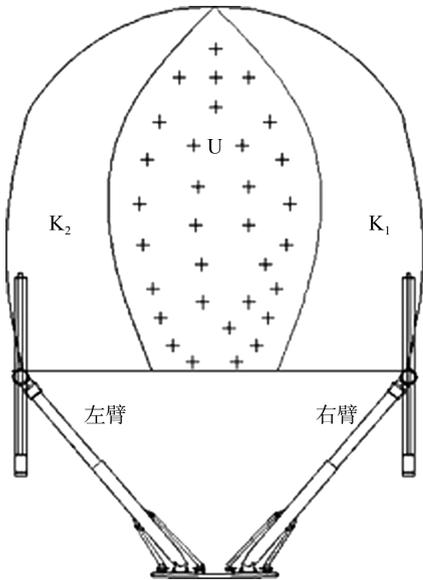


图 3 双机械臂工作区间交叉重叠示意图  
Fig. 3 Double-arm arm working range cross-overlapping schematic diagram

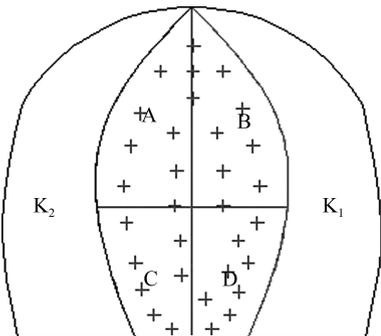


图 4 工作重叠区域 U 划分示意图  
Fig. 4 Work overlap area U division diagram

不同时钻 U 区孔: 方案 a 左臂先钻 A, B 区域, 同时右臂从右下角开始; 方案 b 左臂先钻 C, D 区域, 同时右臂从右下角开始; 方案 c 左臂先钻 A, C 区域, 同时右臂从右下角开始. (左臂和右臂结构以及钻孔布局完全对称, 所以右臂也可以钻 A, B, 或 B, D, 或 C, D 区域, 同时左臂从左下角开始钻孔).

同时钻 U 区孔: 方案 d 左臂钻从 B 到 A 区域, 右臂钻从 C 到 D 区域; 方案 e 左臂钻从 A 到 B 区域, 右臂钻从 D 到 C 区域; 方案 f 左臂钻 A 区域同时右臂钻 D 区域, 或左臂钻 C 区域同时右臂钻 B 区域(以中心线分开布置).

对方案 a~f 进行分析:

1) 当左右机械臂同时工作在重叠区域 U 时, 方案 a, b 中左右机械臂都存在工作在极限位置处, 使得两机械臂实际工作行程增大, 而方案 c 则在平衡左右两臂钻孔数量的同时, 使得机械臂关节的偏角范围相对于方案 a, b 减小, 保证了左右两机械臂的高效利用, 所以以三种方案中 c 方案最为合理

2) 当左右机械臂同时工作在重叠区域 U 时, 方案 d, e 也存在上述方案 a, b 中的问题, 所以这里只针对方案 c 与方案 f 进行比较, 可以看到方案 c 中左右两臂同一时刻钻孔时两机械臂间的空间位置距离相对于方案 f 大很多, 更能保证两机械臂间无碰撞规划的可靠性, 所以方案 c 的机械臂空间路径规划是优于方案 f.

综上所述分析, 在无碰要求和提高机械臂利用率上, 方案 c 更为合理. 针对方案 c, 机械臂行走路径(钻孔路径)又有如下四种大致规划: 左臂钻孔行

走路径从区域  $A \rightarrow C \rightarrow K_2$  或是  $C \rightarrow A \rightarrow K_2$  且先钻两臂所钻靠近区域孔(即中心线附近孔),右臂钻孔路径从区域  $K_1 \rightarrow B \rightarrow D$  或是  $K_1 \rightarrow D \rightarrow B$ (最后完成钻中心线附近孔). 如图 5 所示按照方案 c 绘制大约 130 个孔的钻孔路径规划方案.

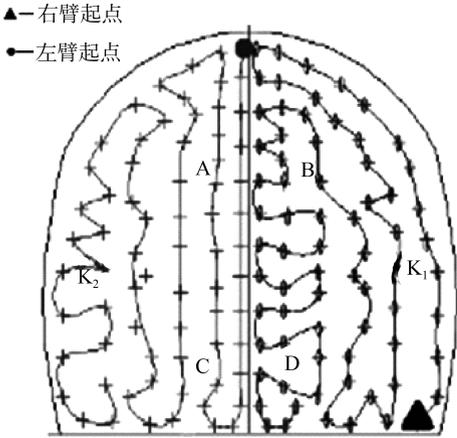


图 5 方案 c 钻孔路径规划示意图

Fig. 5 Scheme c drilling path planning diagram

3.1.2 机械臂孔序规划分析 文献[1-3]中提到由于机械臂各个多自由度关节的关联配合运动,使得机械臂所完成的钻孔位置变得离散随机,为提高钻孔工作效率,将钻孔顺序的规划问题视为 N-TSP 问题——对于单个机械臂完成随机钻孔任务而言,完成所有  $m$  个钻孔任务有  $(m-1)!$  条路径的可能,在这  $(m-1)!$  条路径中搜索出一条最短路径即为机械臂末端钻头所移动距离最短的路径,这就成为了典型的旅行商(TSP)问题<sup>[4-6]</sup>,从某一点出发,一次遍历所有城市(炮眼位置)且只行走一次所走的最短路径进行优化处理. 这种基于最短路径 TSP 问题目标函数如下式.

$$d = \sum_{i=1}^{m-1} d_i \quad (1)$$

式(1)中,  $d$  为完成所有钻孔任务机械臂末端钻头总行程;  $d_i$  为两孔间钻头行走距离.

但是,这么归纳有一个必要条件:机械臂在每两个孔间移动的速度一致,忽略机械臂机械结构对钻头移动速度影响. 但机械臂在实际钻孔任务时,钻头从某一孔到达下一孔位置机械臂各个关节变量有多种变化组合,而且每一种变化的孔间移动的速度是不一样的.

如图 6 中四个炮孔位置示意图,根据第一章中炮眼位置参数可知,为保证爆破后所得岩渣体积大小相当,炮眼间距基本在 700 mm 左右,所以这里考虑最简单模型,让孔 1,2,3,4 围成一个边长为

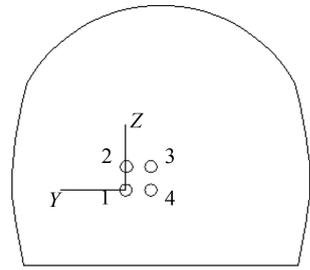


图 6 4 个炮孔位置示意图

Fig. 6 4 hole position diagram

600 mm 的正方形,设孔 1 位置坐标为  $(0,0)$ (为左侧机械臂在图 3.4 所示初始位置时钻杆中心在凿岩面投影),则孔 2,3,4 位置坐标分别为  $(0,600)$ ,  $(-600,600)$ ,  $(-600,0)$ .

当把孔 1 作为钻孔起始点时,完成这四个钻孔任务总共有 6 种路线,按照 TSP 问题求解最短路径可以为  $R_1: 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$  或是  $R_2: 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ ,钻头的总行程为  $d_1 = 1800$  mm;如果钻头钻孔路径选择为  $R_3: 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ ,钻头的总行程为  $d_2 = 2048$  mm,此时  $d_1 < d_2$ ,  $R_1$  或是  $R_2$  为最优钻孔路径方案. 但这里我们忽略了孔序规划时机械臂不同关节在孔间移动时的速度对最终钻头移动速度的影响,由空间几何求解可以得到如表 2 所示  $R_1, R_2$  两条路径中第一步各个关节的变量值(由于每一次凿岩机推进梁补偿位移大致相等,所以这里不考虑凿岩机推进梁补偿进给量和限定伸缩臂伸出长度).

表 2  $R_1, R_2$  两条路径各个关节变量值

Tab. 2  $R_1, R_2$  two path of each joint variable value

路径	关节变量值*					$\Delta d_3$
	$\Delta\beta_1$	$\Delta\beta_2$	$\Delta\beta_3$	$\Delta\beta_4$	$\Delta\beta_5$	
$R_1$	0	$8.19^\circ$	0	0	$8.19^\circ$	—
$R_2$	$8.16^\circ$	0	0	$8.16^\circ$	0	—

\* 关节变量值  $\Delta\beta$  ( $i=1,2,3,4,5$ )为从某一位置到下一个位置的各个关节转动量的数值.

表 3 各关节角速度取值

Tab. 3 The angular velocity of each joint

关节	1	2	3	4	5
$\beta$ (rad/s)	$\frac{1}{30}\pi$	$\frac{1}{30}\pi$	$\frac{1}{10}\pi$	$\frac{1}{10}\pi$	$\frac{2}{15}\pi$

当各个关节旋转角速度取值如表 3 时,两条钻孔路径所用定位时间可根据如下公式求得(忽略液压元件启动到达稳定运动状态及机械臂定位后晃

动直至相对静止状态所花时间).

$$t = \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\beta_i}{\beta_i} \quad (2)$$

式(2)中,  $t$  为机械臂姿态变换所花费总时间;  $\Delta\beta_i$  为关节  $i$  转动的数值;  $\beta_i$  为关节  $i$  的角速度.

根据式(1), 分别求得  $R_1$  与  $R_2$  两种方案所走相同路径距离所花时间(单位: s).

$$t_1 = \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\beta_i}{\beta_i} = \frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} = \frac{\Delta\beta_5}{\beta_5} = 1.7 \quad (3)$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\beta_i}{\beta_i} = \frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} = \frac{\Delta\beta_4}{\beta_4} = 2.1 \quad (4)$$

比较式(2)和式(3)可以看出  $t_1 < t_2$ , 机械臂从孔1到孔2运动所花时间比从孔1到孔4所花时间要少, 机械臂在相同的距离移动上所花时间不同, 当完成所有钻孔任务时, 不同路径上所花费的时间总量肯定也不一样, 所以本文中机械臂的孔序规划问题不能归纳以最短路径为目标的 TSP 问题.

从钻孔任务全局规划出发, 孔序规划的目标是钻完所有炮眼所花时间最少, 最高效率地完成钻孔任务. 如果不考虑所有液压元件启动至稳态及机械臂从某一位置到达下个钻孔位置时晃动至相对静止时间, 且完成每个钻孔所花时间相同, 那么机械臂的钻孔任务规划问题便可以抽象为机械臂完成所有定位找孔所花费时间最少问题, 相邻两孔位间机械臂移动所花时间函数如式(1)所示, 当需要完成所有  $n$  个孔位移动所花时间最少目标函数则为

$$T_{\min} = \sum_{j=1}^n t_j = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\beta_{ij}}{\beta_i} \quad (5)$$

式(5)中,  $T$  为机械臂完成所有钻孔任务总耗时;  $n$  为需要完成钻孔数目;  $t_j$  为从孔  $j-1$  到孔  $j$  各个关节转动时间,  $\Delta\beta_{ij}$  为关节  $i$  从孔  $j-1$  到孔  $j$  转动的数值;  $\beta_i$  为关节  $i$  的角速度.

### 3.2 基于蚁群算法的机械臂孔序优化

3.2.1 构建数学模型 针对 3.1.2 节中抽象出的钻孔规划任务问题的数学模型式(5), 可以发现机械臂关节  $i$  转动量  $\Delta\beta_{ij}$  与关节变量存在如下数值关系.

$$\Delta\beta_{ij} = |\theta_{i,j} - \theta_{i,j-1}| \quad (6)$$

式(6)中,  $\theta_{i,j}$  为关节  $i$  在孔  $j$  处的关节变量参数;  $\theta_{i,j-1}$  为关节  $i$  在孔  $j-1$  位置关节变量参数. 由于关节变量带有正负号(绕旋转轴旋转方向不同), 所以这里要取绝对值.

所以根据式(6)钻孔路径规划问题目标函数式(5)可以写成下式.

$$T_{\min} = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^5 \frac{|\theta_{i,j} - \theta_{i,j-1}|}{\beta_i} \quad (7)$$

对于孔序规划问题的描述要求可知, 对于完成  $n$  个钻孔任务总共有  $(n-1)!$  种路径方案(确定钻孔起点), 对孔序规划的优化问题求解便可以描述为如何在这  $(n-1)!$  种路径中找出目标函数  $T_{\min}$  取得最小值解时的那条孔序路径即为最优的路径方案, 即求解时间最短的 TSP 问题.

当给定  $n$  个钻孔任务点后, 所有钻孔任务点的集合为  $Z=(1,2,3,\dots,n)$ , 两钻孔任务点间移动的时间为  $t_{ij}$  ( $i, j \in Z$ , 这里  $i, j$  为不同钻孔点位置, 注意与上面关节  $i$  区分), 两钻孔点间时间的集合为  $T$ . 那么根据 TSP 求解一次性完成所有要求钻孔任务且每个钻孔任务点只经历一次的最短时间问题, 令完成所有钻孔任务点时:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{边}(i,j) \text{ 在最优解路径上} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

根据构建的数学模型式(7)有

$$t_{ij} = \sum_{m=1}^5 \frac{|\theta_{m,j} - \theta_{m,i}|}{\beta_m} = \frac{40 * |\theta_{1,i} - \theta_{1,j}| + 37.5 * |\theta_{2,i} - \theta_{2,j}|}{\pi} \quad (8)$$

则问题的目标函数为

$$f = \min \sum_{i \neq j} t_{ij} A_{ij} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \neq i} A_{ij} = 1, i \in Z \quad (10)$$

$$\sum_{i \neq j} A_{ij} = 1, j \in Z \quad (11)$$

$$\sum_{i,j \in S} A_{ij} \leq |S| - 1, S \in Z \quad (12)$$

$$A_{ij} \in \{0,1\}, i, j \in Z$$

其中,  $|S|$  为集合  $S$  中所有包含图  $G$  的顶点个数, 约束条件(10)和(11)意味着对每个钻孔任务点而言, 仅有一条边进和一条边出, 约束(12)保证没有任何子回路解的产生.

针对此类问题, 最简单的算法是采用枚举算法找出准确解, 当钻孔任务多达上百个时, 所需循环的阶数相当大, 求解出最优结果时间是无法预知的, 影响求解效率, 如今许多研究成果中, 以遗传算法、生物进化算法、蚁群算法、人工鱼群算法以及多种多目标系统的群集智能等为主的优化算法<sup>[7-12]</sup> 为求解这类似问题提供了可行方法, 其中, 蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)<sup>[13-15]</sup> 由意大利学者 DOrigo、Maniezzo 等在上世纪 90 年代初提出用以求解旅行商问题、指派问题、job-shop 调度等问题, 取得了一系列较好的实验成果<sup>[16-18]</sup>. 所以

这里采用蚁群算法对该目标函数进行求解优化。

3.2.2 蚁群算法求解孔序优化问题 蚁群算法(ACO)是与 TSP 问题的求解联系在一起的,基本思想是:通过模拟蚂蚁的觅食行为,蚂蚁觅食的时候在所走的路径上会留下信息激素,当这条路径上行走的蚂蚁越多,留下的信息激素也就越多,反过来信息激素多的那条路径也会吸引更多的蚂蚁过来通过这条路径,这也是蚂蚁算法的正反馈机理。如果在给定点,一只蚂蚁要在不同路径中选择,那些被先行蚂蚁大量选择的路径(也就是信息素留存较浓的路径)被选中的概率也更大,这较多的信息素意味着较短的路径,这便可以决策出问题较好的答案<sup>[17-19]</sup>。

根据蚁群算法的思想和钻孔路径规划的具体要求,求解该目标函数有如下特征。

1) 在一个钻孔任务点按照概率选择走向下一个钻孔任务点,这个概率由图中边上的轨迹浓度和问题空间的自启发因子共同决定。

2) 蚂蚁在走过的路径上会留下轨迹(信息素),该信息素会影响后来的蚂蚁,使得蚁群走向最优的解(路径)。

3) 同时钻孔路径规划时要避免第二次钻同一位置孔,所以必须给定每只蚂蚁一个限制表,使得蚂蚁构造的解符合钻孔路径不重复的要求。通过一个用数组  $\text{tabu}[n]$  存放蚂蚁每次访问过的钻孔点即限制蚂蚁选择走过点的禁忌表来实现这一要求<sup>[20]</sup>。

蚁群算法中蚂蚁是随机放置在被选择的钻孔任务点中,在构建解的每一步,蚂蚁  $K$  都要按照一定的随机比例规则的概率行为选择行动方向走向下一个点,当前位于点  $i$  的蚂蚁选择点  $j$  作为下一个觅食点的概率<sup>[20]</sup>如下。

$$P_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \text{tab } u} [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}(t)]^\beta}, & \text{if } j \notin \text{tab } u \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, $j \notin \text{tab } u$  表示蚂蚁的禁忌表中不包含点  $j$ ,即  $j$  点是蚂蚁没有觅食经过的点,可以走向  $j$  点; $\tau_{ij}(t)$  表示  $t$  时刻在边  $(i, j)$  上的轨迹(信息素)浓度; $\eta_{ij}(t)$  表示边  $(i, j)$  的自启发量,是根据问题空间的特征给算法的引入的一个引导算法寻优的值,因此根据孔序优化目标函数式(8)和式(9)取自启发函数为

$$\eta_{ij} = \frac{1}{\tau_{ij}} \quad (14)$$

$\alpha$  和  $\beta$  为两个可以调整的参数,分别代表信息素浓度和自启发因子的权重。

每只蚂蚁要影响以后蚂蚁的行为,必须要在走过的路径上留下信息素,而信息素是挥发性的,所以在完成一次点的行走后要对留下的信息素浓度进行更新。蚁群算法中信息素更新过程有三种,分别是 ant-Cycle、ant-Density 以及 ant-Quantity<sup>[21]</sup>。其中 ant-Cycle 信息素更新方式为当蚂蚁完成了了一条路径的觅食(即构建了一个解)后,根据解的质量(完成所有钻孔任务所花时间的大小)决定信息素的增量;而 ant-Density 和 ant-Quantity 的更新方式则是实时在线更新,在每只蚂蚁选择下一个觅食点后就对信息素浓度进行更新。

本文采用 ant-Cycle 更新方式。

对于第  $K$  个蚂蚁在边  $(i, j)$  上引发的信息素为

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q, & \text{蚂蚁 } k \text{ 的路径经过边 } (i, j), \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, $Q$  为一个可以选择的常数, $t_k$  为第  $K$  个蚂蚁寻找到的路径上的时间表征函数。

那么各条边上的  $m$  只蚂蚁留下的信息素总和为

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \tau_{ij}^k(t) \quad (16)$$

在整个路径选择中所有路径的信息素浓度更新方式如下。

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (17)$$

式中, $\rho$  为信息素挥发系数,取值  $0 \leq \rho < 1$ 。

通过蚁群算法求解给定钻孔任务点最短时间问题的流程图如图 7 所示。

图 7 中, $N_c$  为循环次数; $N_{\text{max}}$  为最大循环次数; $s$  为禁忌表索引初始值为 1;

$N$  为禁忌表容量(钻孔任务点总数)。

以左侧机械臂为例,按照图 5 方案 c 中钻孔起始点坐标设定为  $(-701, 8830)$ (左侧机械臂在图 2 所示初始位置时机械臂底座中心线在凿岩面投影垂直地面方向为凿岩面直角坐标的  $y$  轴,地面水平线为  $x$  轴且指向左侧),随机选取 33 个钻孔点  $1, 2, 3, \dots, 33$ ,其中 1 为起始点,当机械臂移动至各个钻孔点时各个关节的关节变量值和在凿岩面的坐标描述如表 4。

根据蚁群算法的求解方法实现这 33 个钻孔任务点的参数条件设置如表 5 所示。

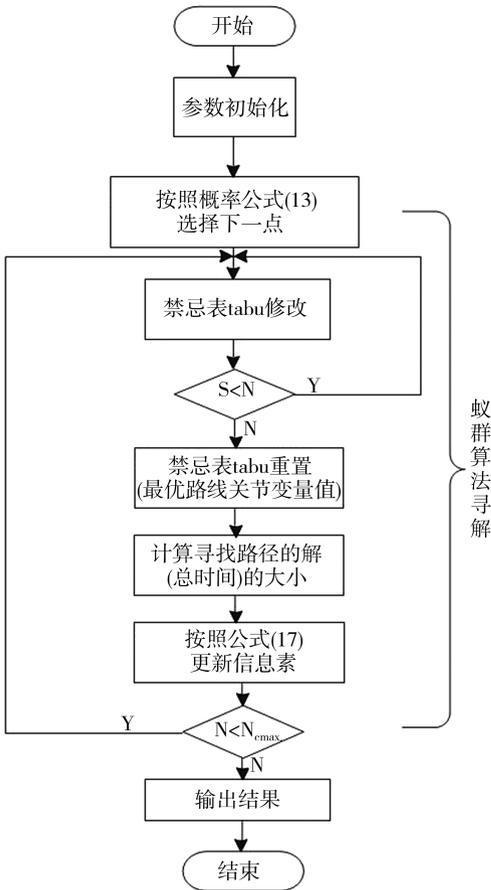


图 7 蚁群算法求解钻孔最短时间流程图  
Fig. 7 Ant colony algorithm solves the shortest time flow chart

表 4 33 个钻孔点各个关节变量值和坐标描述

Tab. 4 33 joint points for each joint variable and coordinate description

No.	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	坐标值
1	-8.19°	-145°	90°	98.19°	-35°	(-701,8830)
2	0°	-138.5°	90°	90°	-41.5°	(0,8500)
3	-5.65°	-135°	90°	95.65°	-45°	(-561,7991)
4	34.7°	-91.4°	90°	55.3°	-88.6°	(4249,3160)
5	-0.56°	-130.6°	90°	90.56°	-49.4°	(-50,7610)
6	-6.4°	-118°	90°	96.4°	-62°	(-628,6351)
7	2.8°	-125°	90°	87.2°	-55°	(303,7089)
8	12.5°	-140°	90°	77.5°	-40°	(1147,8350)
9	8.8°	-90°	90°	81.2°	-90°	(1030,2230)
10	-1.5°	-96°	90°	91.5°	-84°	(-192,2760)
11	19.3°	-74.5°	90°	70.7°	-105.5°	(2522,1675)
12	9.8°	-120°	90°	80.2°	60°	(1099,6554)
13	25.5°	-122°	90°	64.5°	-58°	(2751,6632)
14	18°	-118°	90°	72°	-62°	(2031,6288)
15	27°	-116°	90°	63°	-64°	(3036,5993)
16	32.8°	-115°	90°	57.2°	-65°	(3654,5825)

(续表 4)

17	14.5°	-112°	90°	75.5°	-68°	(1709,5659)
18	2.8°	-106°	90°	87.2°	-74°	(346,4992)
19	6.5°	-109.5°	90°	83.5°	-70.5°	(787,5397)
20	23.4°	-95°	90°	66.6°	-85°	(2936,3609)
21	11.5°	-98°	90°	78.5°	-82°	(1457,4300)
22	33.4°	-102.4°	90°	56.6°	-77.6°	(3964,4740)
23	7.6°	-134°	90°	82.4°	-46°	(748,7895)
24	9.5°	-130°	90°	80.5°	-50°	(976,7532)
25	-6.62°	-82°	90°	96.62°	-98°	(-874,2193)
26	-1.5°	-80.5°	90°	91.5°	-99.5°	(-197,2082)
27	-2.5°	-73.6°	90°	92.5°	-106.4°	(-335,1419)
28	0°	-65.2°	90°	90°	-114.8°	(0,430)
29	2.8°	-68.5°	90°	87.2°	-111.5°	(370,560)
30	8.8°	-60.4°	90°	81.2°	-119.6°	(1142,125)
31	15.6°	-58.6°	90°	74.4°	-121.4°	(2003,60)
32	24.8°	-62.5°	90°	65.2°	-117.5°	(3165,279)
33	32.5°	-60.4°	90°	57.5°	-119.6°	(4035,137)

表 5 算法中各个参数设置

Tab. 5 Algorithm in the various parameters set

参数	设定值
蚂蚁总数(M)	33
初始信息素浓度( $\tau_{ij}(0)$ )	0
信息素挥发系数( $\rho$ )	0.1
蚂蚁循环最大次数( $N_e \max$ )	200
常量(Q)	100
概率选择中信息素浓度权重( $\alpha$ )	1
概率选择中自启发因子权重( $\beta$ )	1

在 MATLAB 中通过编程,对这 33 个钻孔任务的优化. 求解结果路径如图 8 所示.

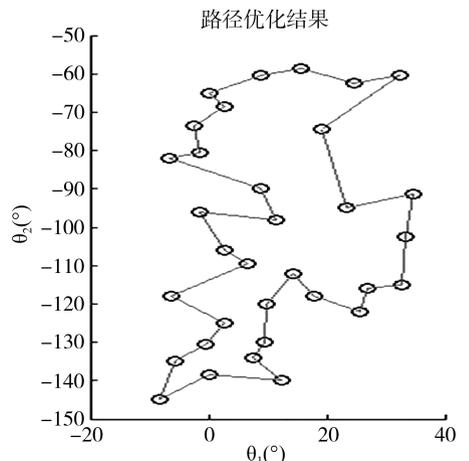


图 8 关节变量 1,2 角度值变化顺序  
Fig. 8 Joint variable 1,2 angle value change order

通过蚁群算法<sup>[22, 23]</sup>对目标函数进行优化并在 Matlab 中仿真出关节 1, 2 最优角度变化方案如图 8 所示, 33 个钻孔点的行走路径如图 10 所示, 根据图 9 中最短时间与循环次数可以看出, 当循环次数达到 60 次以上时, 关节变化的最短时间变趋于稳定, 意味最短时间路径已经得到, 这为后续钻孔自动化控制提供一个可行的关节角变化和路径运动方案<sup>[24-27]</sup>.

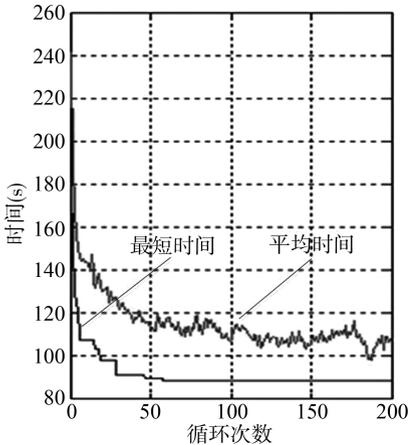


图 9 33 个钻孔顺序寻优时间

Fig. 9 33 drilling order optimization time

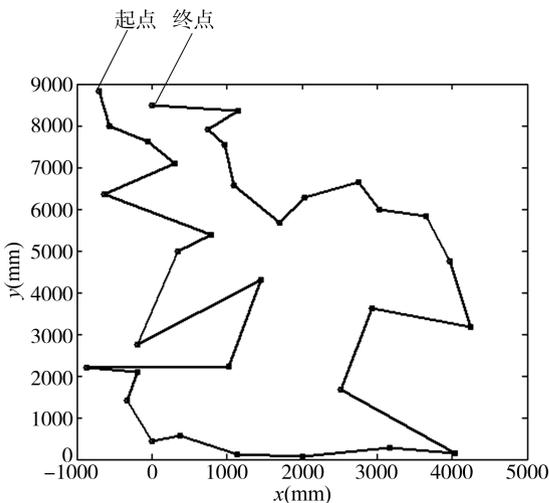


图 10 33 个钻孔点路径优化结果

Fig. 10 33 drill hole path optimization results

## 4 结 论

本文主要针对左右两机械臂结构提出无碰的孔序规划方案, 并基于相同机械臂移动路径距离, 机械臂各个关节变动时间不同提出钻孔顺序并非以最短路径为目标的 TSP 问题, 对于高效率钻孔的要求, 抽象出机械臂完成  $n$  个钻孔任务所花时间的数学函数, 并以此函数的最小值作为孔序规划优

化目标, 运用蚁群算法优化 33 个钻孔点结果生成最终孔序, 提高凿岩钻孔效率, 避免盲目钻孔。

## 参考文献:

- [1] 殷建坤. 多臂凿岩台车钻孔序规划研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [2] 吴万荣, 殷建坤. 一种三臂凿岩台车孔序规划[J]. 合肥工业大学学报, 2013, 36: 149.
- [3] 周友行, 何清华. 基于遗传算法的凿岩机器人孔序规划[J]. 机器人, 2002, 24: 62.
- [4] Soylu B. A general variable neighborhood search heuristic for multiple traveling salesmen problem [J]. Comput Ind Eng, 2015, 90:390.
- [5] Böckenhauer H J, Mömke T, Steinová M. Improved approximations for TSP with simple precedence constraints [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2010, 21 :32.
- [6] Bi S, Dong X, Ma Y. The design and Analysis of TSP problem based on genetic algorithm and ant colony algorithm [J]. Int J Educ Manage Eng, 2012, 2: 56.
- [7] 王剑文, 戴光明. 求解 TSP 问题算法综述[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30: 72.
- [8] 马良, 蒋馥. 多目标旅行售货员问题的蚂蚁算法求解[J]. 系统工程理论方法应用, 1999, 8: 23.
- [9] 吴斌, 史忠植. 一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法[J]. 计算机学报, 2001, 24: 1328.
- [10] Laporte G. The TSP: an overview of exact and approximate algorithm [J]. Eur J Oper Res, 1992, 59: 231.
- [11] 江铭炎, 袁东风. 人工鱼群算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [12] 肖人彬. 面向复杂系统的群集智能[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [13] Tomera M. Ant colony optimization algorithm applied to ship steering control [J]. Procedia Comput Sci, 2014, 35: 83.
- [14] Huang S H, Lin P C. A modified ant colony optimization algorithm for multi-item inventory routing problems with demand uncertainty [J]. Transport Res E, 2010, 46: 599.
- [15] Huang M. Improved ant colony algorithm in the distribution of reactive power compensation device and optimization [J]. Procedia Eng, 2010, 7: 257.
- [16] 张纪会, 高齐圣. 自适应蚁群算法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17: 1.
- [17] 黄友锐. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

- [18] 高海昌, 冯博琴. 智能优化算法求解 TSP 问题[J]. 控制与决策, 2006, 21: 241.
- [19] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [20] 何靖华. 面向仿生制造的蚂蚁算法分析研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
- [21] 胡钢. 协同进化的二元蚁群算法[D]. 宁波: 宁波大学, 2010.
- [22] 蔡琴. 全方位移动避障实时轨迹控制算法的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54: 76.
- [23] 王晓天, 边思宇. 基于遗传算法和神经网络的 PID 参数自整定[J]. 吉林大学学报: 理学版, 2018, 56: 954.
- [24] 刘建国, 柳思健, 付恒. 基于汽车导航电子地图的汽车 AFS 分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2018, 39: 2.
- [25] 陈文平, 梁文快, 李毅. 基于滚动时域的遗传-免疫算法优化航班着陆调度[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2016, 53: 312.
- [26] 陶国娇, 李智. 带认知因子的交叉鸽群算法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 296.
- [27] 袁琴琴, 吕林涛. 基于改进蚁群算法与遗传算法组合的网络入侵检测[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2017, 29: 85.

#### 引用本文格式:

中文: 魏鹏, 罗红波, 赵康, 等. 基于蚁群算法的运动时间优化算法研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 1171.

英文: Wei P, Luo H B, Zhao K, *et al.* Optimization of multi-joint robot motion of hydraulic drilling vehicle based on ant colony algorithm [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 1171.