

doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.S1.043

# 水切割机器人路径规划方法

王玫<sup>1</sup> 孟正大<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>南京工程学院工程基础实验与训练中心,南京210013)

(<sup>2</sup>东南大学自动化学院,南京210096)

**摘要:** 以汽车内饰件切割路径优化为研究对象,提出了一种改进禁忌表蚁群算法,实现优化排序.根据水切割过程特点和工艺要求,进行了水切割路径规划问题分析与建模,设计了改进的禁忌表,利用分层思想将禁忌表划分为3段:内部小环段、内部大环段和外部轮廓段,各段的优先级依次降低,并确定了与此相应的禁忌表的更新规则.在此基础上,给出了基于改进禁忌表蚁群算法的水切割路径优化排序方法,对轮廓切割顺序和各轮廓起始点选择同时进行优化.仿真与实验结果表明,改进禁忌表蚁群算法是可行、有效的,可大大缩短水切割机器人的示教编程时间,显著提高水切割作业的效率和质量.

**关键词:** 水切割; 机器人; 路径优化; 蚁群算法

**中图分类号:** TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2012)S1-0212-05

## Path planning method of water-jet cutting robot

Wang Mei<sup>1</sup> Meng Zhengda<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Experimental and Training Center for Engineering Fundamentals, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

(<sup>2</sup>School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Taking the optimization of path planning of cutting automotive interior ornament as the research object, an improved tabu list based ant colony algorithm is presented to achieve cutting sequence optimization. According to the characteristics and technology demands of the water-jet cutting process, water-jet cutting path planning problem was analyzed and modeled. Taking advantage of the hierarchy principle, an improved tabu list was designed, which was divided into three sections: interior small loop, interior large loop, exterior outline section, and their priority reduces successively. Corresponding updating rules of the tabu list were proposed. The water-jet cutting path planning method based on the improved ant colony algorithm was proposed with which the cutting sequence of outlines and selection of starting point for cutting every outline are optimized simultaneously. Simulation and experimental results show that the improved tabu list based ant colony algorithm is feasible and effective. The teaching programming time of water-jet cutting robots can be shortened greatly, efficiency and quality of water-jet cutting jobs can be raised evidently.

**Key words:** water-jet cutting; robot; path optimization; ant colony algorithm

通常的机器人切割过程中,切割先后顺序以及轮廓的切割起始点主要是根据经验安排,作业编程繁琐耗时,经常发生机器人作业顺序不合理的情况,导致生产周期长,降低生产效率.通过切割优化

排序可减少机器人切割加工的空行时间,提高加工效率.对于切割优化排序问题,文献[1-3]是将切割路径优化问题简单地抽象为旅行商(traveling salesman problem, TSP)模型,然后利用传统的遗传算

收稿日期: 2012-06-28. 作者简介: 王玫(1959—),女,副教授, wangmei@njit.edu.cn.

基金项目: 国家高档数控机床与基础制造装备重大专项资助项目(2010zx04008-041)、江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2009001).

引用格式: 王玫,孟正大.水切割机器人路径规划方法[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(S1):212-216. [doi: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.S1.043]

法、蚁群算法、模拟退火算法等智能算法进行优化<sup>[4]</sup>。切割优化排序中每一个切割轮廓都由多个顶点和边组成,并且切割顺序有内外之分,把切割路径优化简单抽象为常规的旅行商问题,优化效果差。针对以上问题,文献[5]提出了两步遗传算法,先执行全局搜索封闭轮廓切割起始点的位置,然后局部搜索最优的切割顺序,得到的优化效果比较好。陈金成等<sup>[6-7]</sup>对轮廓切割路径优化问题提出了具有主从两条不同编码方式染色体的遗传算法,得到的优化结果能满足其生产要求。

上述研究基本上都是针对激光和等离子切割,本文以汽车内饰件机器人水切割为研究对象,提出切割优化排序方案。对机器人空行路径进行优化,对切割排序问题进行分析和建模,提出了基于改进禁忌表的蚁群算法,对具有三维空间曲面的汽车内饰件中轮廓切割顺序和各轮廓起始点同时进行优化,实验表明该算法的可行性与有效性,可在不影响切割质量的前提下提高生产效率。

## 1 水切割路径规划问题分析与建模

### 1.1 切割路径规划问题分析

本研究的所有切割轮廓均为封闭式切割路径,即加工的起始点和终止点在同一位置。一个封闭切割轮廓一般由多个子路径组成,两个相邻子路径的连接点称为节点,包括起始节点和非起始节点。起始节点是指可作为水刀开始切割或结束切割的节点;其他节点即为非起始节点。对于封闭式的加工路径,所有节点均可作为起始节点,但只能选择一个。

切割的最终目的是要切割出所有的封闭切割轮廓而形成工件。整个切割过程是水刀头从工作零位出发,快速行进到某一内部封闭切割轮廓上的切割起始点,然后开高压水开始切割,依次切割完该有向有序的封闭轮廓又回到切割起始点,然后关高压水,快速行进到下一个内部封闭轮廓上的切割起始点,重复前面类似过程,直到切割完所有内部封闭轮廓;再关高压水,快速行进到外部轮廓切割起始点,开高压水,切割外部轮廓;完成切割后关高压水,快速返回到机器人工作零位,完成整个工件的切割加工过程。

在切割过程中,工件上各个切割轮廓的加工顺序以及每个封闭轮廓的切割起始点的选取是否合理直接影响到加工效率,尤其当很多加工轮廓分布在一个具有复杂空间曲面的工件上。

切割工件中一般包含多个待切割的内部轮廓和外部轮廓,内部轮廓又有大小之分。在实际加工中,按水切割工艺要求,切割排序优化过程主要遵循以下几个原则:

1) 先内后外原则 内部封闭轮廓切割是指将工件上的内部封闭环路内的废料切除的过程,外部轮廓切割是指沿工件的外部边缘将整个工件从材料上切割下来的过程。为避免工件从加工材料中完全切割下来后无法准确定位,应首先切割内部轮廓,所有内部轮廓切完后,再切割外部轮廓。

2) 先小后大原则 在切割过程中,先切小尺寸,以减少对工件刚度的影响,降低材料在高压水冲击力下的变形和工件定位误差。

3) 路径最短原则 路径最短原则是优化排序的最基本原则,是缩短加工时间和提高生产效率的关键途径。

最短路径的选择可抽象为 TSP 问题模型,它属于组合优化范畴,已被证实是一个 NP 难题。对于点到点(point to point,PTP)加工,由于每次切割运动都可简化为空间的一个点(相当于 TSP 中的一个城市),因此,PTP 加工中切割优化排序问题可看成常规的 TSP 问题。而本文切割模型中的封闭切割轮廓都由若干个顶点和边组成,并且切割轮廓有大小和内外之分,因此不能简单抽象为常规 TSP 问题。针对水切割轮廓的特殊性,本文提出了一种改进禁忌表蚁群算法。为遵循上述原则,这里采用分层思想对切割轮廓进行归类和优化:

1) 第一层:内部很小的孔,在切割路径中抽象为一个点,一般为几何图形的中心点。

2) 第二层:比较大的内部封闭轮廓,每个封闭切割轮廓均由不同的边组成,边包括直线、曲线等,对于多条边组成的封闭轮廓,其切割节点集合包含每条边的端点,对于仅有单条边组成的封闭轮廓,可通过离散化,并根据精度要求均匀选取几个离散点组成其切割节点集。

3) 第三层:外部边缘轮廓(有且仅有一个),为不影响优化效果,与较大封闭轮廓一样不能简单抽象为一个点,其切割节点集的选取同较大内部轮廓。

### 1.2 切割路径排序问题建模

定义1 封闭式切割轮廓为环,记为 LOOP,分为内环与外环,内环又有大环和小环之分。任意内部小环记为 LOOP<sub>i</sub>,将小环特征点抽象为环的中

心点,记为  $T_{p,i0} (i=1, 2, \dots, n)$ ;任意内部大环记为  $LOOP_j$ ,其对应的切割节点的总数记为  $v$ ,则第  $j$  个内部大环  $LOOP_j$  对应的第  $k$  个切割节点记为  $P_{j,k} (k=1, 2, \dots, v)$ ;外环记为  $LOOPE$ ,其切割节点总数为  $\omega$ ,则外环上任意切割节点记为  $E_{p,l} (l=1, 2, \dots, \omega)$ . 环集为  $\{ LOOPT_1, \dots, LOOPT_n, LOOP_1, \dots, LOOP_m, LOOPE \}$ , 顶点集  $\{ T_{p,10}, \dots, T_{p,n0}, P_{1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{1+(1)}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{m+(k)}, E_{p,1}, E_{p,2}, \dots, E_{p,\omega} \}$ .

水刀从  $P_s$  (工作零位) 出发,切割排序优化任务就是指确定各封闭轮廓的切割顺序和各轮廓的切割起始点,使切割过程中空行程的路径最短.然而,轮廓上的切割起始点从工艺上看并不唯一,在优化算法中应考虑切割起始点总数为所有内部封闭轮廓的总切割节点数加上外部轮廓总切割节点数  $\omega$ .  $LOOPT_i$  上的切割起始点记为  $T_{p,i}$ ,  $LOOP_j$  上的切割起始点记为  $P_j$ ,  $LOOPE$  上的切割起始点记为  $P_E$ ,显然  $P_j \in \{ P_{j-1}, \dots, P_{j+(k)} \}$ ;  $P_E \in \{ E_{p,1}, \dots, E_{p,\omega} \}$ . 设对所有封闭轮廓切割起始点的一个访问顺序为  $T = \{ P_s, t_{p,1}, \dots, t_{p,n}, t_1, \dots, t_m, P_E, P_s \}$ , 其中  $t_i \in \{ P_1, \dots, P_m \}$ , 则切割路径的性能指标下式:

$$D = d(P_s, t_{p,1}) + \sum_{i=1}^{n-1} d(t_{p,i}, t_{p,i+1}) + d(t_{p,n}, t_1) + \sum_{j=1}^{m-1} d(t_j, t_{j+1}) + d(t_m, E_p) + d(E_p, P_s) \quad (1)$$

## 2 基于改进禁忌表蚁群算法的切割路径优化

### 2.1 改进禁忌表蚁群算法

Dorigo 等<sup>[8]</sup>在 1991 年根据“蚂蚁寻找食物”的集体行为最早提出了蚁群算法的基本模型,1992 年,Dorigo 又在其博士论文中进一步阐述了蚁群算法的核心思想,该算法具有并行分布式正反馈机制的特点,在路径优化中得到较广泛的应用.

与传统的蚁群算法相比,在水切割优化排序过程中,将水刀看作蚂蚁,将封闭轮廓的切割节点看作城市,蚂蚁(水刀)走过路径上城市(切割节点)的顺序自然形成了一个切割排序.由于传统的蚁群算法是用来优化点到点加工类型的 TSP 问题,而切割优化排序问题中每一个封闭切割轮廓都由多个顶点和边组成,并且切割时遵循先小后大、先内后外的约束条件,故需对传统蚁群算法进行改进,以解决实际切割优化排序问题.由于蚂蚁  $k (k=1, 2, \dots, m)$  在搜索运动过程中,根据各条路径

上的信息量确定其转移方向,用禁忌表  $tabu_k (k=1, 2, \dots, m)$  记录蚂蚁  $k$  当前所走过的轮廓,  $tabu_k$  随着蚂蚁的移动不断更新.在搜索过程中,蚂蚁根据各条路径上的信息素浓度及路径的启发信息计算状态转移概率  $p_{ij}^k(t)$ ,而  $p_{ij}^k(t)$  基于禁忌表进行计算,故本文主要是对蚂蚁的禁忌表和搜索方法进行重新设计.

利用分层思想将禁忌表划分为 3 段:内部小环段、内部大环段、外部轮廓段,各段的优先级依次降低.每只蚂蚁的禁忌表在初始化时,需将属于内部大环和外部轮廓的切割节点全部设置为禁忌转移状态,内部小环上的切割节点全部设置为允许转移状态.当蚂蚁访问完所有内部小环时,将所有内部大环的切割节点恢复为允许转移状态,当所有内部大环都访问完时,将外部轮廓的切割节点恢复为允许转移状态(见图 1).其次,由于每个封闭轮廓有且仅有一个切割起始点,而每个切割轮廓的长度是固定不变的,所以为了简化计算,每当蚂蚁走到这个封闭轮廓上的任意一点时,属于该封闭轮廓上的所有切割节点均不再访问,即在禁忌表中均设置为禁忌转移状态.经过这样的处理,运用蚁群算法,在满足水切割约束条件下,可使蚂蚁在搜索封闭轮廓的切割顺序时,同时也选择了各个封闭轮廓的切割起始点.

### 2.2 汽车内饰件水切割路径优化方法

基于改进禁忌表的蚁群算法的切割路径优化方法主要包括以下几个步骤:

① 从工件的 CAD 模型中提取出每个封闭轮廓的切割节点,确定蚂蚁的搜索空间;

设  $m$  是蚁群中蚂蚁的个数; $n$  表示所有切割节点个数; $b_i(t)$  表示  $t$  时刻位于切割节点  $i$  的蚂蚁的个数  $m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$ ;  $\Gamma = \{ \tau_{ij}(t) | c_i, c_j \subset C \}$  是  $t$  时刻集合  $C$  中元素(切割节点)两两连接  $l_{ij}$  上残留的信息量的集合.  $\tau_{ij}(t)$  表示  $t$  时刻在路径  $(i, j)$  上的信息量.

② 初始化时间  $t=0$  和循环次数  $N=0$ ,设置最大循环次数  $N_{max}$ ,将  $m$  只蚂蚁置于切割工作零位上,蚂蚁个数  $k=0$ ,令有向图上每条边  $(i, j)$  的初始化信息量  $\tau_{ij}(t) = \text{const}$ ,  $\text{const}$  为常数,且初始时刻  $\tau_{ij}$  变化量  $\tau_{ij}(0) = 0$ .

③ 按照先小后大,先内后外的原则初始化每只蚂蚁的禁忌表.

④ 首先按照常规蚁群算法搜索内部小环;状态转移概率  $p_{ij}^k(t)$  由下式计算得到:

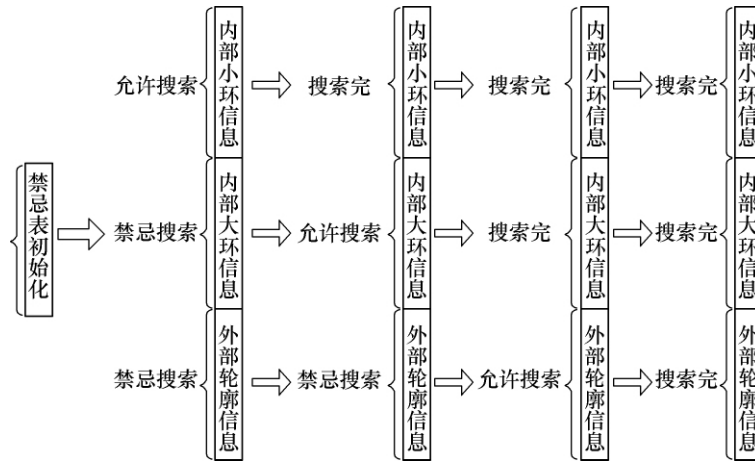


图1 改进蚁群禁忌表搜索过程

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为信息启发式因子;  $\beta$  为期望启发式因子;  $\text{allowed}_k = \{C - \text{tabu}_k\}$  表示蚂蚁  $k$  下一步允许选择的节点集合;  $\eta_{ij}(t)$  为启发函数,其计算如下式:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

式中  $d_{ij}$  表示相邻两节点距离. 为防止残留信息素过多造成启发信息被残留信息淹没,当每只蚂蚁搜索完所有节点后,需更新处理蚂蚁残留信息.在  $t+n$  时刻在路径  $(i, j)$  上的信息量按下式调整<sup>[8]</sup>:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (5)$$

式中  $\rho \in [0, 1]$  表示信息素挥发系数,则  $1-\rho$  为信息素残留系数;  $\Delta\tau_{ij}(t)$  表示本次循环中  $(i, j)$  上信息素增量.初始时刻  $\Delta\tau_{ij}(0) = 0$ ,  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  表示第  $k$  只蚂蚁在本次循环中留在路径  $(i, j)$  上的信息量.应用 Ant-Cycle 模型更新信息量,即蚂蚁完成一个循环后更新所有路径上的信息素  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  的求法为

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } (i, j) \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $Q$  表示信息素浓度;  $L_k$  表示第  $k$  只蚂蚁在本次循环中所走的路径总长度.针对复杂空间曲面,本文采用安全平面方法规划两节点间的无碰过渡路径,计算路径长度.

⑤ 搜索完内部小环后,修改内部大环的禁忌表.按④同样方法搜索内部大环,在选择内部大环

顺序的同时,也选择了其切割起始点.

⑥ 内部大环搜索完后,修改外部轮廓的禁忌表,对外部轮廓的节点进行搜索.

⑦ 按式(4)与(5)更新每条路径上的信息量.

⑧ 若满足条件,即若循环次数  $N$  达到最大循环次数  $N_{\max}$ ,则循环结束并输出程序计算结果,否则清空禁忌表并跳转到③.

### 3 切割优化排序结果与分析

图2中给出了待优化的工件切割轮廓信息,待切轮廓包含10个小孔,5个大轮廓以及1个外部边缘,共有48个切割节点.采用第2节介绍的改进禁忌表蚁群算法,令蚁群算法参数如下:蚂蚁个数为60,最大迭代次数为50,信息启发因子为1,期望启发因子为5,信息挥发系数为0.8,信息素强度为100.迭代后得到的优化排序结果及各轮廓切割起始点如图2所示,路径长度为10 039.428 mm,满足先小后大、先内后外的原则.

将优化得到的水切割路径数据,转化为 MO-TOMAN UP-20 机器人程序,进行水切割实验,实验结果表明采用改进禁忌表蚁群算法,对本文中的切割排序规划问题能进行很好的优化,通过对各轮廓切割顺序规划和切割起始点的选择,能很好地优化空行路径.由此可见,采用改进禁忌表蚁群算法是可行的、有效的.同时,将该方法与遗传算法进行了比较,在优化效果相同的情况下,优化速度比后者快得多.

### 4 结语

本文以汽车内饰件水切割路径优化为研究对象,对切割优化排序问题进行分析 and 建模,提出了一种改进禁忌表蚁群算法.根据水切割过程特点和

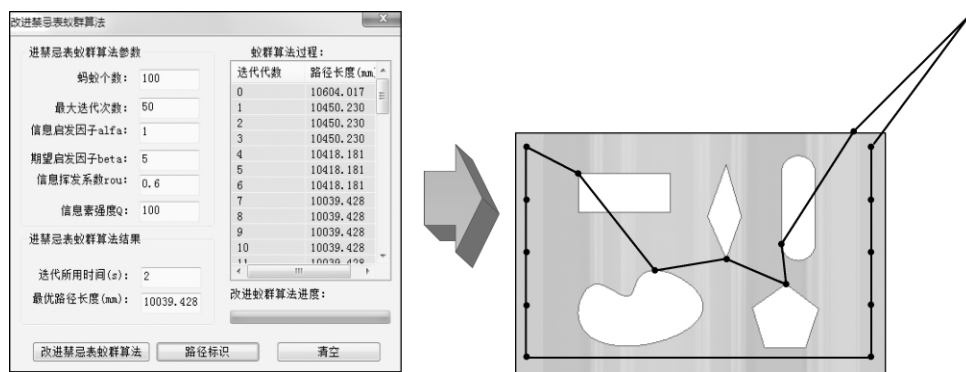


图 2 改进禁忌表蚁群算法优化结果

工艺要求,设计了改进的禁忌表,利用分层思想可将禁忌表划分为3段:内部小环段、内部大环段、外部轮廓段,各段的优先级依次降低,确定了与此相应的禁忌表的更新规则.在此基础上,给出了基于改进禁忌表蚁群算法的水切割路径优化排序方法.仿真与实验结果表明,改进禁忌表蚁群算法在解决水切割优化排序问题中是可行、有效的,可大大缩短水切割机器人的示教编程时间,显著提高水切割作业的效率和质量.

### 参考文献 (References)

- [1] 李妮妮,陈章位,陈世泽.基于局部搜索和遗传算法的激光切割路径优化[J].计算机工程与应用,2010,46(2):234-239.  
Li Nini, Chen Zhangwei, Chen Shize. Optimization of laser cutting path based on local search and genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 234-239. (in Chinese)
- [2] 何汉武.数控等离子切割机的路径优化[D].上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2008.
- [3] 刘会霞,王霄,蔡兰.钣金件数控激光切割割嘴路径的优化[J].计算机辅助设计与图形学,2004,16(5):660-665.
- [4] 高海昌,冯博琴,朱利.智能优化算法求解 TSP 问题[J].控制与决策,2006,21(3):241-248.  
Gao Haichang, Feng Boqin, Zhu Li. Reviews of the meta-heuristic algorithms for TSP [J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 241-248. (in Chinese)
- [5] Lee Moon-Kyu, Kwon Ki-Bum. Cutting path optimization in CNC cutting processes using a two-step genetic algorithm [J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(24): 5307-5326.
- [6] Chen J C, Zhong T X. A hybrid-code genetic algorithm based optimization of non-productive paths in CNC machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(3): 163-168.
- [7] 陈金城.多轴联动高性能数控加工的运动优化与复杂轨迹实时控制策略[D].上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2001.
- [8] 段海滨.蚁群算法原理及其应用[M].北京:科学出版社,2005:25-45.