

## 基于蚁群算法的激光切割工艺路径优化

李世红<sup>1</sup>, 袁跃兰<sup>1</sup>, 刘绅绅<sup>2</sup>, 饶运清<sup>2</sup>

(1. 贵州交通职业技术学院 汽车工程系, 贵州 贵阳 550008; 2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 切割工艺路径规划是影响钣金激光切割效率的关键问题之一, 钣金件的激光切割工艺路径优化问题可以转化为带有约束条件的广义旅行商问题 (GTSP)。为了保证钣金激光切割质量、提高切割效率, 在进行切割路径规划时必须满足顺着切、不跨区域切割、走空程时尽量不经过已切割区域等工艺要求。建立了以上述工艺要求为约束、以空行程最短为目标的优化模型。在算法设计与实现上, 首先通过建立零件信息的预处理机制进行工艺约束处理, 然后运用蚁群算法进行模型求解, 最后通过实际算例证明了该方法的有效性, 即能够在满足工艺约束的前提下获得较优的切割路径。

**关键词:** 切割工艺; 路径优化; 蚁群算法; 广义旅行商问题; 切割工艺约束

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2019.04.011

**中图分类号:** TH16; TG458

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2019) 04-0069-05

## Optimization on laser cutting process path based on ant colony algorithm

Li Shihong<sup>1</sup>, Yuan Yuelan<sup>1</sup>, Liu Shenshen<sup>2</sup>, Rao Yunqing<sup>2</sup>

(1. Department of Automotive Engineering, Guizhou Jiaotong Vocational Technical College, Guiyang 550008, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Path planning of cutting process is one of the key problems of affecting the laser cutting efficiency for sheet metal, and the path optimization problem of laser cutting process for sheet metal part can be transformed into a generalized traveling salesman problem (GTSP) with constraints. In order to ensure the laser cutting quality and efficiency, some technological requirements such as cutting along one direction, not cutting across the regions and going through the empty space as far as possible without passing through the cut area should be met during cutting path planning. And an optimization model with the above process requirements as the constraints and the shortest idle path as the target was established. In algorithm design and implementation, firstly, the processing of process constraints was achieved by setting up the pre-processing mechanism of part information, and then the above model was solved by ant colony algorithm. Finally, a case test shows that this method is effective, that is, the optimal cutting path can be obtained under the premise of satisfying the process constraints.

**Key words:** cutting process; path optimization; ant colony algorithm; generalized traveling salesman problem; cutting process constraints

具有高效、高精度及高质量等优秀特性的激光切割工艺是钣金加工企业中最常用的切割方式之一<sup>[1-4]</sup>。激光切割时, 激光头沿既定切割路线依次在零件轮廓的切割点打孔, 然后切割该零件轮廓, 再经由空行程到下一零件切割点, 不断循环直至所有零件被切割。为保证切割质量和切割效率, 在设计切割路线时应遵循以下原则: (1) 尽可能不跨区

域切割, 优先选择邻近零件依次切割; (2) 考虑切割带来的热效应, 应尽量使切割板材顺着板材某方向切割; (3) 激光切割时, 空行程路径应尽量避免经过已切割零件轮廓; (4) 空行程路径尽可能短。

激光切割工艺路径优化问题既是寻找一条在满足工艺约束的前提下的较短的切割路径, 关键点在于切割零件间的切割顺序以及每个零件的切割起点的确定。为了能够对零件的切割起点和切割顺序同时优化, 可以将激光切割工艺路径优化问题看作广义旅行商问题 (Generalized Traveling Salesman Problem, GTSP)<sup>[5-7]</sup>, 将一个含有  $M$  个特征点的零件轮廓看作含有  $M$  个城市点的城市集合, 然后基于蚁群算法求解 GTSP 问题<sup>[8]</sup>, 提出满足不跨区域切割、避免已切割零件轮廓区域、顺着切等约束条件的激光切割工艺路径优化问题的求解算法。

收稿日期: 2018-09-11; 修订日期: 2018-12-09

基金项目: 工信部智能制造专项子课题 (工信厅装函 [2017] 468 号)

作者简介: 李世红 (1967-), 女, 工学学士, 讲师

E-mail: 1293998325@qq.com

通讯作者: 饶运清 (1968-), 男, 博士, 教授

E-mail: ryq@hust.edu.cn

## 1 问题建模

### 1.1 零件信息表达

待切割零件可以看作由线段、圆及圆弧3种基础元素组成的封闭轮廓围成,有的零件具有内外两层轮廓。组成零件的封闭轮廓又称为环,其中将基础元素的连接点和某些基础元素的1/2、1/4、1/6点称为特征点。建立存储特征点信息的二维数组,定义基础元素类,由基础元素组成轮廓类,轮廓类组成零件类,然后通过零件数组存储一个待切割板材零件信息,如图1所示,其中 $V_1, V_2, \dots, V_{24}$ 为特征点。

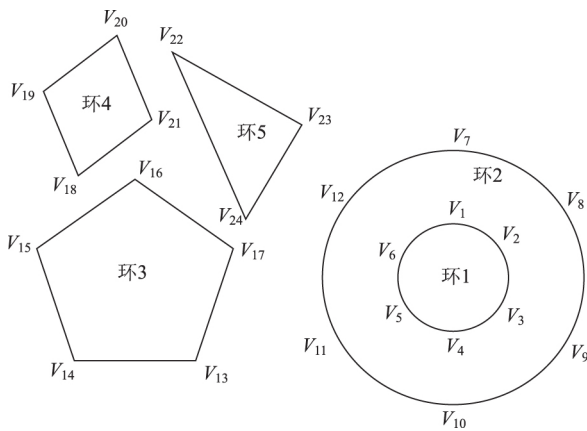


图1 零件信息表达

Fig. 1 Expression of part information

### 1.2 数学建模

将一个零件轮廓上的所有特征点当作广义旅行商问题中的城市点,而一个零件上所有零件轮廓的特征点就当作一个城市点集。求解激光切割的最优路径即转化为GTSP问题中求解城市点集之间的旅行商问题。设某待切割板材,机床原点为 $O$ ,零件为 $C_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,组成零件的轮廓环为 $R_j (j=0, 1, 2, \dots, m)$ ,其中 $R_0$ 为外环,其余为内环,特征点为 $V_{ijk}$ ,其中 $i$ 代表零件编号, $j$ 代表零件中的环编号, $k$ 代表某个环上的特征点编号,则切割路径总长度 $D$ 的表达式为:

$$D = S_0 + \sum_{i=1}^{n-1} S_i + S_n \quad (1)$$

$$S_0 = s(O, V_{11k}) + \sum_{j=1}^{m_1-1} \{s(V_{1jk}, V_{1(j+1)k}) + s(V_{1m_1k}, V_{10k})\} \quad (2)$$

$$S_i = s(V_{i0k}, V_{(i+1)1k}) + \sum_{j=1}^{m_{(i+1)}-1} \{s(V_{(i+1)jk}, V_{(i+1)(j+1)k}) + s(V_{(i+1)m_{(i+1)}k}, V_{(i+1)0k})\} \quad (3)$$

$$S_n = s(V_{n0k}, O) \quad (4)$$

式中: $S_0$ 表示从机床原点到第1个零件的内轮廓的起始点的距离、第1个零件内轮廓之间的距离、第1个零件最后一个内轮廓到外轮廓的距离这三者之和; $S_i$ 表示第 $i$ 个零件外轮廓起始点到第 $i+1$ 个零件的第1个内轮廓的起始点距离、第 $i+1$ 个零件轮廓各起始点之间的距离、第 $i+1$ 个零件的最后一个内轮廓起始点到外轮廓起始点的距离这三者之和; $S_n$ 表示最后一个外轮廓起始点到机床原点的距离; $s(*, *)$ 表示两个轮廓的特征点之间的距离。

假设一待切割板材上零件排样位置已经确定,零件集合 $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ ,共含有 $n$ 个零件,零件之间不重叠,即 $C_i \cap C_j = \emptyset$ ;组成某零件 $C_i$ 的轮廓环为 $R_i = \{R_{i0}, R_{i1}, \dots, R_{im}\}$ ,该零件共含有 $m$ 个轮廓环,其中 $R_{i0}$ 代表该零件外轮廓环即父环,其余为子环;该零件某轮廓环 $R_{ij}$ 上有特征点集合 $V_{ij} = \{V_{ij1}, \dots, V_{ijk}\}$ ,该轮廓环上有 $k$ 个特征点;每个特征点在排样图上已经确定位置信息,则特征点 $V_{ijk}$ 的坐标表示为 $(X_{ijk}, Y_{ijk})$ ;如果某零件的某个轮廓 $R_{ij}$ 已经被切割,则将其放入已切割零件轮廓集合 $R_F$ ,即 $R_{ij} \in R_F$ ,其中零件 $C_i$ 的轮廓 $R_{ij}$ 已经被切割;如果一个零件到零件 $C_i$ 之间可以通过特征点连接而不经其他所有零件,则将其放入零件 $C_i$ 的紧邻轮廓 $R_{is}$ ;切割工艺路径是由两两零件轮廓环上的特征点连接组成,如 $V_{ijk} V_{uvw}$ 即是零件 $i$ 的 $j$ 环到零件 $u$ 的 $v$ 环的线段路径表达;假设概率 $P_{ijk}^{uvw}$ 表示特征点 $V_{ijk}$ 的下一个特征点选择特征点 $V_{uvw}$ 的概率。

结合公式(1)~公式(4)对总路径长度的表达,以及对切割加工中加工信息和工艺约束的描述,建立数学模型如下:

$$\text{目标函数: } f = \min D \quad (5)$$

约束:

$$P_{ijk}^{uvw} = 0, V_{uvw} \notin R_{is} \quad (6)$$

$$P_{ijk}^{uvw} > P_{ijk}^{rst}, X_{uvw} < X_{rst} \quad (7)$$

$$V_{ijk} V_{uvw} \text{ 与 } R_F \text{ 中任一元素无交点} \quad (8)$$

## 2 算法实现

### 2.1 紧邻零件集合策略

为了满足切割约束中不跳着切的切割约束,需要将零件切割工艺路径的寻找范围限定在一个零件切割轮廓的临近零件中寻找。这样不仅使得算法的搜索范围得以缩小,而且能够有效避免因分散切割造成板材应力变化而对切割质量造成影响的情况。

经过现实切割总结出的经验可以得知, 这样优先选取紧邻轮廓切割也是更加有利于寻找较短路径。一个零件的紧邻零件即是一个零件的周边可以与之通过特征点连接而不经其他零件轮廓的所有零件集合, 循环对每个零件与其他零件进行可达性判断, 即可建立所有零件的紧邻零件集合。

## 2.2 候选城市集合策略

在激光切割过程中, 为了避免激光头随动结构碰到已切割区域形成的加工件边缘造成打刀<sup>[9]</sup>, 要求每次激光切割的路径尽量不经过已经切割区域, 算法实现中, 设置一个待切割点候选策略, 如图2所示。依据上述准则, 通过循环判断每个城市点与其所在零件的临近零件集合的特征点之间是否满足上述准则, 满足则加入其 Allow 集合, 依次动态更新其候选城市集合。

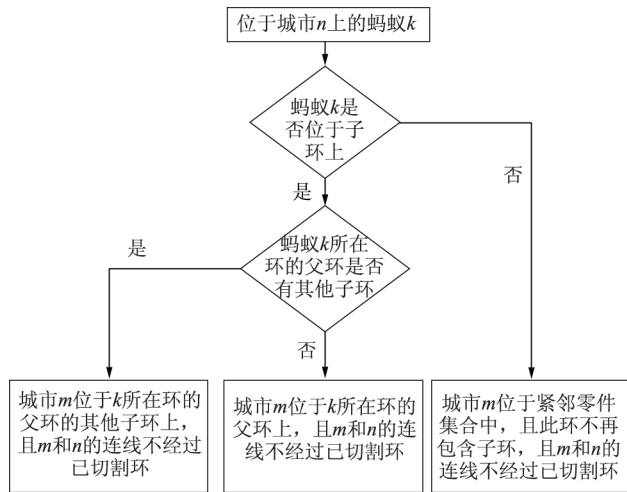


图2 候选集合确定原则

Fig. 2 Principle of determining candidate set

## 2.3 蚂蚁路径构造

蚁群算法中, 每只蚂蚁在确定下一个城市点的时候都需要在其 Allow 集合中进行选择。

蚂蚁路径的整体构造过程如下:

Step 1: 判断蚂蚁  $k$  所在城市是否位于最后一个未访问的环, 如果是则生成路径完成, 如果不是则跳转至 Step 2;

Step 2: 判断蚂蚁  $k$  所在城市的候选城市集合是否为空, 如果不为空, 则按照一定方式从候选集合中选择下一候选城市并跳转 Step 1, 如果为空, 则跳转至 Step 3;

Step 3: 检索蚂蚁  $k$  所在城市点的前一城市点的候选集合是否有未标记城市点, 如果有则更替蚂蚁  $k$  当前所在城市点, 并跳转 Step 2, 同时标记更替过

的城市点, 如果没有则跳转 Step 4;

Step 4: 此时仅考虑蚂蚁  $k$  所在城市的紧邻零件集合, 从中选取离蚂蚁  $k$  所在城市点最近的特征点作为蚂蚁  $k$  的下一城市点, 并跳至 Step 2。

## 2.4 基于工艺约束的状态转移概率

每只蚂蚁在某个城市点选择其下一个城市点是从其 Allow 集合中选取 (跨切割区域时采用距离最近选取除外), 而其满足临近零件集合且经过已切割区域的判断后, 对于每个城市点的选择概率应该基于公式 (9) 和公式 (10) 进行。

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\sigma_{ij}(t)]^\alpha [\rho_{ij}]^\beta [\delta_{ij}]^\gamma}{\sum [\sigma_{ij}(t)]^\alpha [\rho_{ij}]^\beta [\delta_{ij}]^\gamma} \quad (9)$$

$$\delta_{ij} = \frac{\frac{1}{X_{(j)}}}{\frac{1}{X_{(1)}} + \dots + \frac{1}{X_{(j)}} + \dots + \frac{1}{X_{(n)}}} \quad (10)$$

式中:  $p_{ij}^k(t)$  表示蚂蚁  $k$  在时刻  $t$  时, 位于城市点  $i$ , 选择其候选城市集合 Allow 中某城市点  $j$  的概率;  $\sigma_{ij}(t)$  表示在  $t$  时刻城市  $i$  和城市  $j$  之间的信息素浓度;  $\rho_{ij} = 1/d_{ij}$ , 表示任一只蚂蚁位于城市  $i$ , 可能选择城市  $j$  的距离期望值;  $d_{ij}$  表示城市  $i$  到城市  $j$  的距离;  $\delta_{ij}$  表示城市点  $i$  的候选城市集合中, 基于顺  $X$  轴依次切割选择城市点  $j$  的选择概率;  $X_{(j)}$  表示候选城市点  $j$  的横坐标值;  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别代表信息素浓度和距离期望以及顺  $X$  轴依次切割对选择决策的重要程度系数<sup>[10]</sup>。如果下一个选择城市  $j$  是已经访问过的城市, 则  $p_{ij}^k(t) = 0$ 。

## 2.5 信息素更新机制

在所有蚂蚁完成一次遍历后, 各路径上的信息素更新<sup>[11]</sup>将按照公式 (11) ~ 公式 (13) 进行更新:

$$\sigma_{ij}(t+n) = \theta \sigma_{ij}(t) + (1-\theta) \Delta \sigma_{ij}(t+n) \quad (11)$$

$$\Delta \sigma_{ij}(t+n) = \sum_{k=1}^m \Delta \sigma_{ij}^k(t+n) \quad (12)$$

$$\Delta \sigma_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{路径包含}(i, j) \\ 0, & \text{路径不包含}(i, j) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $t$  表示一次路径生成前的时刻;  $t+n$  表示完成一次路径更新后的时刻;  $\theta$  为信息素挥发剩余系数,  $\theta < 1$ ;  $\Delta \sigma_{ij}$  表示在  $t$  时刻城市  $i$  和城市  $j$  之间的信息素浓度增量;  $\Delta \sigma_{ij}^k$  表示第  $k$  只蚂蚁在一次遍历后在城市  $i$  与城市  $j$  之间留下的信息素增量;  $m$  为蚂蚁数;  $Q$  表示一只蚂蚁在一次路径遍历中释放的信息素总量, 是一个常数;  $L_k$  表示第  $k$  只蚂蚁本次遍历的总路径长度。

为了增大搜索效率,采用精英蚂蚁策略<sup>[12]</sup>,每次迭代中最短路径的信息素更新两次,第2次更新加上当前信息素增量乘以系数 $e$ , $e < 1$ 。

## 2.6 算法整体流程图

算法的整体流程如图3所示。

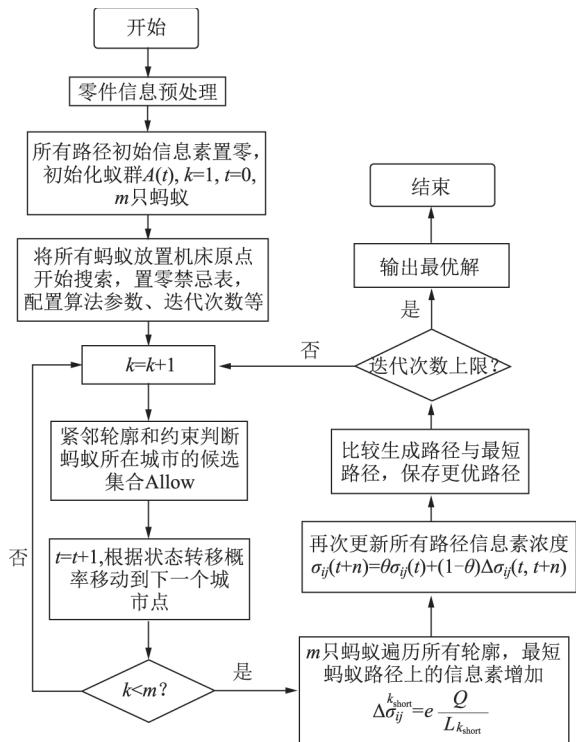


图3 蚁群算法流程图

Fig. 3 Flow chart of ant colony algorithm

## 3 算法实例

为了验证算法的可行性,在 Windows Win7, CPU 2.5GHz, 2G RAM, Visual C++ 6.0 开发环境下,板材排样采用 SmartNest 排样软件,使用板材尺寸为 3000 mm × 1800 mm,厚度为 3 mm,材质为 Q235 钢,板材上排样零件规格信息见表1,对应的零件图形如图4所示。经过算法排序优化后的切割路径如图5所示,可满足工艺约束的要求。

## 4 结语

将激光切割工艺路径优化问题转化为带有约束信息的广义旅行商问题,建立基于不跨区域切割、避免经过已切割区域、顺着切等工艺约束的处理机制,利用蚁群算法能够有效解决工艺路径优化问题。但算法是基于特征点集的广义旅行商问题求解寻优,

表1 零件信息

Table 1 Information of parts

序号	数量	周长/ m	零件规格/ mm × mm	序号	数量	周长/ m	零件规格/ mm × mm
1	1	0.867	314 × 181	14	1	1.42	348 × 400
2	1	0.865	317 × 144	15	1	1.361	369 × 353
3	1	0.748	280 × 120	16	1	1.395	353 × 370
4	1	1.114	337 × 315	17	1	1.482	494 × 280
5	1	3.217	575 × 575	18	1	3.571	1122 × 430
6	1	2.06	756 × 205	19	2	1.279	573 × 92
7	2	0.688	280 × 104	20	1	1.516	520 × 309
8	1	0.918	280 × 205	21	1	1.457	378 × 416
9	1	0.929	303 × 191	22	1	1.981	665 × 352
10	1	1.113	313 × 303	23	1	3.231	1010 × 350
11	1	1.055	386 × 201	24	1	4.032	1130 × 630
12	1	1.123	335 × 281	25	1	1.344	359 × 313
13	1	1.138	315 × 280	26	1	1.37	424 × 295

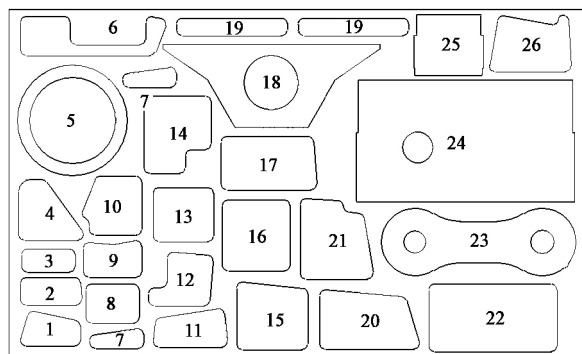


图4 零件排样

Fig. 4 Layout of parts

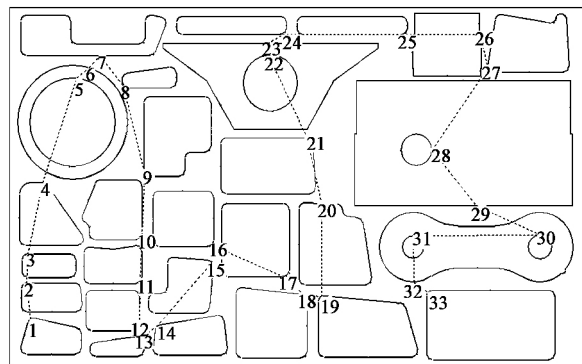


图5 切割路径

Fig. 5 Cutting path

搜索解空间较大,求解效率较低。下一步研究重点将针对实际生产中经常出现的复杂切割图形,研究如何通过问题规模降维或其他方法对算法效率进一

(下转第77页)

- [5] 石磊, 肖华, 陈军, 等. 先进高强度钢板弯曲类回弹特性的试验研究 [J]. 材料科学与工艺, 2009, 17 (5): 672-679.  
Shi L, Xiao H, Chen J, et al. Experimental research of the bending springback property on advanced high strength steel [J]. Materials Science and Technology, 2009, 17 (5): 672-679.
- [6] 刘伟, 刘红生, 邢忠文, 等. 高强钢板冲压成形的回弹规律与工艺参数研究 [J]. 材料科学与工艺, 2010, 18 (6): 758-761.  
Liu W, Liu H S, Xing Z W, et al. Study on process parameters and springback rule for stamping of high strength steel sheet [J]. Materials Science and Technology, 2010, 18 (6): 758-761.
- [7] 吴统超, 詹梅, 古创国, 等. 大型复杂薄壁壳体第一道次旋压成形质量分析 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19 (1): 121-126.  
Wu T C, Zhan M, Gu C G, et al. Forming quality of the first pass spinning of large-sized complicated thin-walled shell [J]. Materials Science and Technology, 2011, 19 (1): 121-126.
- [8] 苟春梅, 吴民, 董静, 等. 汽车冲压件工艺参数优化及回弹控制 [J]. 锻压技术, 2018, 43 (2): 34-37.  
Gou C M, Wu M, Dong J, et al. Process parameter optimization and springback control of automotive stamping parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 (2): 34-37.
- [9] 吴信涛, 丁方强, 刘国凯, 等. DP800 双相高强钢折弯及回弹研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 7 (4): 38-42.  
Wu X T, Ding F Q, Liu G K, et al. Bending and springback of high-strength dual phase steel DP800 [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 7 (4): 38-42.
- [10] 陈东辉, 张建. 基于 CAE 的 QP980 超高强钢零件冲压开裂及回弹控制 [J]. 锻压技术, 2018, 43 (5): 177-183.  
Chen D H, Zhang J. Crack and springback control of ultra high strength steel QP980 parts based on CAE [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 (5): 177-183.
- [11] 黄伟, 李梦群, 杨亚威. 基于 Dynaform 的 V 形件弯曲回弹数值模拟 [J]. 锻压技术, 2014, 39 (6): 118-121.  
Huang W, Li M Q, Yang Y W. Numerical analysis of springback for V-shaped pieces based on Dynaform [J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39 (6): 118-121.
- [12] 代洪庆, 赵妍, 户春影, 等. V 形件自由弯曲回弹的数值模拟影响因素分析 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, 22 (3): 26-29.  
Dai H Q, Zhao Y, Hu C Y, et al. Simulation analysis of V-bending forming and influencing factors of springback [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22 (3): 26-29.

(上接第 72 页)

步优化, 以更加高效地获得符合工艺要求的切割路径。

#### 参考文献:

- [1] 徐路宁, 王霄, 张永康. 激光切割板材的工艺处理 [J]. 应用激光, 2002, 22 (6): 533-538.  
Xu L N, Wang X, Zhang Y K. Technological treatments of laser cutting for sheet [J]. Applied Laser, 2002, 22 (6): 533-538.
- [2] 毕华丽. 激光切割技术中工艺技术的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
Bi H L. Experiment Research on Key Technology of Laser Cutting Technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [3] 李泳, 张宝峰. 复杂轮廓激光切割路径优化算法的研究 [J]. 天津理工大学学报, 2007, 23 (3): 76-79.  
Li Y, Zhang B F. Study on optimization algorithm of laser cutting path for complex contours [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2007, 23 (3): 76-79.
- [4] 郭华锋, 李菊丽, 孙涛. 激光切割技术的研究进展 [J]. 徐州工程学院学报: 自然科学版, 2015, 30 (4): 71-78.  
Guo H F, Li J L, Sun T. On the research progress of laser cutting technology [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Science Edition, 2015, 30 (4): 71-78.
- [5] Vladimir Dimitrijević, Zoran Šarić. An efficient transformation of the generalized traveling salesman problem into the traveling salesman problem on digraphs [J]. Information Sciences, 1997, 102 (1-4): 105-110.
- [6] Oysu C, Bingul Z. Application of heuristic and hybrid-GASA algorithms to tool-path optimization problem for minimizing airtime during machining [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, 22 (3): 389-396.
- [7] 谭阳. 求解广义旅行商问题的若干进化算法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
Tan Y. The Study of Several Evolutionary Algorithms for Solving Generalized Travelling Salesman Problem [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [8] Gong B C, Jiang T Y, Xu S Z, et al. An improved ant colony algorithm based on path optimization strategy for TSP [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 543-547: 1681-1684.
- [9] 孙鑫. 二维激光切割路径优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
Sun X. Research on Path Optimization of Two Dimension Laser-cutting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [10] Marco Dorigo, Luca Maria Gambardella. Ant colonies for the traveling salesman problem [J]. BioSystems, 1997, 43 (2): 73-81.
- [11] 郭平, 鄢文晋. 基于 TSP 问题的蚁群算法综述 [J]. 计算机科学, 2007, 34 (10): 181-184, 194.  
Guo P, Yan W J. The review of ant colony algorithm based on TSP [J]. Computer Science, 2007, 34 (10): 181-184, 194.
- [12] 刘天孚, 程如意. 带精英策略和视觉探测蚁群算法的机器人路径规划 [J]. 计算机应用, 2008, 28 (1): 92-93, 96.  
Liu T F, Cheng R Y. Ant algorithm with elitist strategy and vision detection for mobile robot path planning [J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28 (1): 92-93, 96.