

激光切割路径优化的双重编码改进遗传算法

杨建军, 刘保业, 鞠录岩

(青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:针对激光切割路径优化的特点,将其归纳为旅行商问题,并利用改进遗传算法进行求解。为使优化更具实际意义,建立了考虑时间距离和热效应的多目标优化数学模型。改进的遗传算法采用双重编码对轮廓扫描顺序和各轮廓的起始点同时进行优化。在编码设计时,被切割件除考虑多边形情况外还考虑到圆及椭圆的情况,通过构建的适应函数将多目标函数转化为单目标优化问题,同时为提高算法的优化性能,适应函数采用动态控制,并改进了交叉与变异操作。仿真结果表明,该算法能有效地对激光切割路径进行优化。

关键词:激光切割;路径优化;改进遗传算法;双重编码

中图分类号:TH164; TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1009-3443(2012)06-0684-04

Dual coding improved genetic algorithm for optimization of laser cutting path

YANG Jian-jun, LIU Bao-ye, JU Lu-yan

(College of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: The laser cutting path optimization was reduced to the traveling salesman problem and solved by improved genetic algorithm. To make this optimization more practical, a multi-objective mathematical optimization model which has considered time distance and heating effect was made. In the improved genetic algorithm, the dual coding was adopted to optimize the scanning order and the starting point of the contour simultaneously, and in the design of coding, the circle and ellipse situation were taken into account in addition to the polygonal. The multi-objective problem was transformed to single objective optimization problem through the construction of fitness function. In order to improve the optimal performance of the algorithm, fitness function adopted dynamic control, the crossover and mutation operations were improved. The computation results show this algorithm can optimize the laser cutting path effectively.

Key words: laser cutting; path optimization; improved genetic algorithm; dual coding

在激光切割过程中,工件的加工时间等于激光实际出光时间与激光头空行程时间之和,且被切割轮廓的边界长度是固定不变的,即激光实际出光时间是固定不变的,所以只有缩短激光头空行程时间才能缩短工件的加工时间。同时因为被切割轮廓为封闭式图形,因此在分析路径问题时可不考虑具体的轮廓轨迹,只需从轮廓中提取一个点来代替该轮廓,

该点表示激光切割该轮廓时的起点和终点^[1]。待切割轮廓可简化为平面内的点集,路径优化问题则转化为求解平面点间的最短路径问题。

在激光切割过程中影响路径规划的因素很多。其中,已切割掉板材孔洞的处理与热效应是影响路径规划的重要因素^[2]。文献[3]用人工势场法等传统方法分析了路径规划问题;文献[4,5]采用最近邻算法、遗传算法等智能算法进行路径规划。上述路径规划方法中均没有考虑到热效应的影响且在建立目标函数时没考虑到激光头的具体移动速度。

收稿日期:2011-11-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075220).

作者简介:杨建军(1977—),男,博士,副教授;研究方向:系统工程优化、智能优化算法;E-mail:yjjdem@163.com.

本文结合激光切割的具体工艺特点,建立相应的路径优化数学模型,并利用改进后的遗传算法对其进行求解。

1 数学模型的建立

激光切割路径规划应使空行程时间最短,在此基础上本文还考虑热效应的影响。

由时间、距离、速度的关系可知,当速度变化时,时间最短不一定是距离最短,在此采用时间距离的概念,即时间最短的距离。激光切割空程运行时, xy 轴扫描机构都能以最大速度运行,所以从一个轮廓的起点 $P_i(x_i, y_i)$ 到另一个轮廓的起点 $P_j(x_j, y_j)$,空行程时间取决于 $\max\{\text{fabs}(x_j - x_i), \text{fabs}(y_j - y_i)\}^{[6]}$,此距离即为时间距离。

设激光切割的初始原点为 $P_0 = (x_0, y_0)$,则时间距离最短的目标函数为

$$\min f_1 = \sum_{i=0}^{n_c-1} \max\{\text{fabs}(x_{i+1} - x_i), \text{fabs}(y_{i+1} - y_i)\} + \max\{\text{fabs}(x_0 - x_{n_c}), \text{fabs}(y_0 - y_{n_c})\},$$

式中: n_c 为被切割轮廓的个数; (x_i, y_i) 为轮廓 i 的起始点坐标。

在实际激光切割过程中,要想获得较高的生产效率及加工质量,不但要使时间距离尽可能短,还要考虑热效应影响,尽可能使加工过程中产生热量的影响最小,减少热变形或由于过热而引起的板材报废^[2]。

工件上某点经时间 t 后的温度计算方法^[7]为

$$T(L, t) = \frac{q}{vh(4\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} \exp\left[-\left(\frac{L^2}{4at}\right)\right],$$

$$t = \frac{l_1}{v} + \frac{l_2}{u}.$$

式中: L 为工件上某点到热源运行轴线的垂直距离; t 为传热时间; q 为热源有效功率; v 为光束移动速度; u 为激光头空程运行时的速度在 x 轴或 y 轴上较大的分速度; h 为板厚; λ 为导热系数; c 为被加工材质的比热容; ρ 为被加工材质的密度; a 为被加工材质的热扩散率; l_1 为被加工轮廓的周长; l_2 为路径上相邻特征点之间的距离在 x 轴或 y 轴上投影的较大值。

考虑热效应的目标函数为:

$$\min f'_2 = \max\left\{\sum_{j=1}^i T_{ij}(L, t) \mid i = 2, 3, \dots, n_c\right\},$$

式中: T_{ij} 表示在加工第 j 个孔时产生的热量,经过相应的传热时间 t 对加工第 i 个孔时温度的影响。

在加工过程中,当被加工轮廓到某点的距离达到一定程度时,对该点温度的影响将很小,为减少运算量,当影响温度小于设定的 T_{\min} 时则忽略不计。根据该温度即可得到相应的极限距离,计算过程中只考虑该极限距离范围内的轮廓。

约束条件:

(1) 激光切割板材时激光焦点位置不变,为满足此约束条件,空行程时应避开已切割掉的板材孔洞^[2]。在约束条件处理时,判断路径的各个直线段是否与已切割轮廓相交。如果相交,则该解不可行,需重新产生。

(2) 激光切割过程中应满足加工点的温度不大于允许温度 T_s 的约束,即 $f'_2 \leq T_s$ 。此约束条件可利用惩罚函数转化为无约束问题,即 $f_2 = f'_2 + M \times \max\{0, (f'_2 - T_s)\}$, M 为惩罚因子。

2 算法设计

2.1 编码设计

激光切割轮廓路径优化要对各轮廓的扫描顺序和各轮廓的起始点位置同时进行优化。针对该情况,本文采用双重整数编码方式。第1行的整数编码表示各轮廓的扫描顺序;第2行的整数编码表示与各轮廓相对应的起始点位置,例如当轮廓为四边形时,起始点可取顶点集合 $\{1, 2, 3, 4\}$ 中的任意一个值,当轮廓为圆或椭圆时,为减少计算量,可仅取轮廓上的几个特征点,可把 $360^\circ/m$ 等分,采用整数编码时,用 $\{1, 2, \dots, m\}$ 与 $\{360^\circ/m, 2 \times 360^\circ/m, \dots, 360^\circ\}$ 一一对应,本文把 360° 8 等分。图1所示为一个轮廓加工路径。

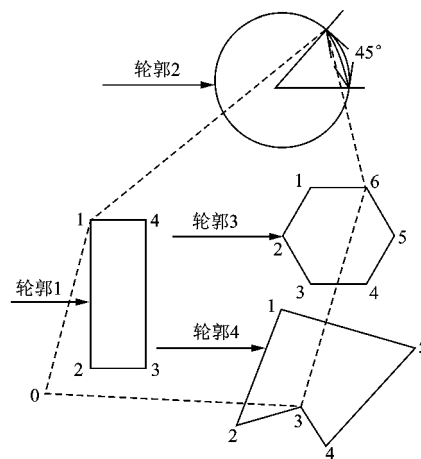


图1 轮廓加工路径图

Fig. 1 The processing path of contour

0 为激光初始原点,切割路径为轮廓 1(起始点为该轮廓特征点 1)、轮廓 2(起始点为 1)、轮廓 3(起始点为 6)、轮廓 4(起始点为 3),其染色体表示为

$$C_a = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 6 & 3 \end{pmatrix}^{\circ}$$

2.2 适应函数的建立

在遗传算法优化过程中,适应函数值大的个体被选中遗传到下一代的概率大,因此问题的优化目标方向应与适应函数值变大的方向一致,所以适应函数不能直接采用该目标函数,应加以调整,本文首先构造了初步适应函数值 $F' = \mu \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$, 式中, μ 为调整系数。

同时为避免遗传算法未成熟收敛及无目标随机搜索,在算法早期,应使种群中各个体被选中遗传到下一代的概率相近,随着优化的进行,应使优秀个体被选中的概率逐渐增大。因此,本文对适应函数的计算实施了动态控制,根据种群的初步适应函数值,最终适应函数值 F_i 的计算方法设计为

$$F_i = \begin{cases} \bar{F}' + k_1 c_1^n \frac{F'_i - \bar{F}'}{\bar{F}'_{\max} - \bar{F}'} \bar{F}', & F'_i \geq \bar{F}' \\ \bar{F}' + k_2 c_2^n \frac{\bar{F}' - F'_i}{\bar{F}' - \bar{F}'_{\min}} \bar{F}', & F'_i < \bar{F}' \end{cases}$$

式中: \bar{F}' 、 \bar{F}'_{\max} 、 \bar{F}'_{\min} 为动态调整前种群初步适应函数的平均值、最大值、最小值; n 为循环代数; k_1 、 k_2 、 c_1 、 c_2 为调整系数,本文取 $k_1 = 0.1$ 、 $k_2 = -0.05$ 、 $c_1 = 1.01$ 、 c_2 的取值应保证在最大遗传代数时最小适应函数值非负,本文的最大遗传代数设为 300 代,据此可取 $c_2 = 1.01$ 。

2.3 交叉操作

为提高遗传算法的优化性能,设计了与问题适应的多种交叉方法增加种群的多样性。交叉时随机选择以下 3 种交叉方法中的一种:(1) 第 1 行的整数编码即轮廓扫描顺序交叉,各基因对应的第 2 行整数编码即起始点不变;(2) 第 2 行整数编码即起始点交叉,各基因对应的第 1 行编码不变;(3) 轮廓扫描顺序和起始点同时实施交叉。轮廓扫描顺序交叉时采用交错交叉,起始点交叉时采用算数交叉。

第(1)种交叉方法具体操作如下:

父代 1: 1 4 2 6 5 3
 2 1 4 3 2 4

父代 2: 1 2 3 5 6 4
 3 4 1 2 4 3
过渡代: 1 1 4 2 2 3 6 5 5 6 3 4
 2 3 1 4 4 1 3 2 2 4 4 3
子代 1: 1 4 2 3 6 5
 2 1 4 1 3 2
子代 2: 1 2 5 6 3 4
 3 4 2 4 4 3

在父代 1 和父代 2 中按照第 1 行轮廓的扫描顺序分别取一个基因放到过渡代中(各轮廓对应的起始点不变),依次循环形成过渡代,然后按次序取过渡代个体中第 1 行的基因(各轮廓对应的起始点仍不变),判断子代 1 中是否有此基因,若有则放到子代 2 中,无则放到子代 1 中,依次循环形成子代。

2.4 变异操作

为了扩展算法的搜索结构,设计了多种变异方法。变异时随机选择以下 3 种变异方法中的一种:(1) 轮廓扫描顺序变异,对应的起始点不变;(2) 起始点变异,轮廓扫描顺序不变;(3) 轮廓扫描顺序和起始点同时变异。轮廓扫描顺序变异时采用移位变异,起始点变异时在其轮廓特征点范围内采用非均匀变异。第(1)种变异方法具体操作如下:

父代: 1 4 2 6 5 3 8 9 7
 2 3 3 1 4 5 4 6 2
子代: 1 4 8 9 2 6 5 3 7
 2 3 4 6 3 1 4 3 2

在父代轮廓扫描顺序中随机选择 2 个基因值 2、3,把它们之间的基因段(2,6,5,3)取出,然后在剩下的扫描顺序基因段中随机选出一基因值 9,把取出的基因段(2,6,5,3)插入到此位置之后,同时各基因对应的起始点不变,从而形成子代。

3 优化算例

根据本文算法,采用 Visual C++ 编写优化程序,并对一块金属板的切割路径进行优化设计。该金属板的孔洞包括多边形、圆、椭圆,孔洞个数为 30。已知金属的材料为 45 钢,板厚 5 mm,板长 10 m,板宽 5 m,激光功率 1 000 W,光束速度 2.5 m/min,激光头 xy 轴最大移动速度 4 m/min。

分别采用只考虑时间距离的单目标常规遗传算法和单目标改进遗传算法(目标为时间距离最短),以及多目标改进遗传算法(调整系数分别取 $\mu = 4$ 和 0.6) 进行优化,优化结果如表 1 所示。

表1 优化结果对比表

Tab.1 The comparison table of optimizing result

设计方法	时间距离/m	最高温度/℃	轮廓扫描顺序(起始点)
单目标常规遗传算法	42.74	300.56	21(3), 16(3), 17(3), 11(4), 12(4), 19(4), 18(3), 14(3), 13(2), 7(4), 6(2), 1(2), 2(3), 3(2), 8(8), 9(2), 5(4), 4(4), 10(2), 15(3), 20(3), 30(6), 25(3), 29(1), 28(4), 27(2), 26(7), 23(3), 24(3), 22(4)。
单目标改进遗传算法	38.87	350.99	15(6), 20(3), 25(3), 30(6), 29(1), 28(4), 27(2), 26(7), 23(3), 24(3), 22(4), 21(3), 16(3), 17(3), 11(4), 12(4), 19(4), 18(3), 14(3), 13(2), 7(1), 6(2), 1(2), 2(3), 3(2), 8(8), 9(2), 5(4), 4(4), 10(2)。
多目标改进遗传算法 ($\mu = 4$)	40.82	156.45	4(3), 5(4), 10(4), 9(3), 8(8), 13(3), 7(4), 2(2), 1(2), 3(3), 6(7), 12(4), 11(2), 17(2), 19(5), 14(4), 20(3), 15(5), 18(4), 16(3), 22(7), 21(2), 23(3), 25(5), 24(2), 30(2), 29(4), 28(4), 27(2), 26(5)。
多目标改进遗传算法 ($\mu = 0.6$)	75.23	142.37	9(1), 2(3), 1(3), 13(2), 17(1), 29(2), 25(2), 24(2), 23(2), 26(6), 27(2), 21(4), 3(3), 7(3), 10(5), 20(3), 14(1), 15(4), 5(3), 18(3), 19(4), 22(7), 12(6), 11(3), 6(3), 28(2), 30(5), 8(2), 4(3), 16(5)。

从优化结果可以看出,单目标改进遗传算法与单目标常规遗传算法相比,时间距离减小了9.1%,但单目标优化时温度高;而采用本文多目标改进遗传算法进行优化时,当目标函数中的调整系数 $\mu = 4$ 时,优化后的时间距离比只考虑时间距离最小的单目标改进遗传算法优化结果仅增大了5.0%,而最高温度却降低了55.4%,同时还可根据需要对调整系数进行调整,以获得不同的优化结果。

4 结 语

本文考虑到空行程时激光头 xy 轴都能以最大速度运行,采用时间距离作为优化目标,并考虑热效应的影响,建立了以时间距离最短和温度最低的多目标优化函数,使优化结果更具有实际意义,并将其转化为单目标优化问题。

采用改进遗传算法进行求解。根据问题特点采用了双重整数编码方式,同时对轮廓扫描顺序和各轮廓起始点位置进行优化;考虑被切割件为圆及椭圆的情况,把圆、椭圆按角度 m 等分;为提高遗传算法的优化性能,适应函数实施了动态控制,并设计与问题相适应的多种交叉、变异方法来提高算法的优化性能。

参考文献:

- [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):234-236.
LI Ni-ni, CHEN Zhang-wei, CHEN Shi-ze. Optimization of laser cutting path based on local search and genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Appli-

cations, 2010, 46(2):234-236. (in Chinese).

- [2] 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 Lu-ning, WANG Xiao, ZHANG Yong-kang. Technological treatments of laser cutting for sheet[J]. Applied Laser, 2002, 22(6):533-538. (in Chinese).
- [3] CHANG Chien-chou, YU Kumg-chen, SHUO Yan-hou. A fundamental tool path planning problem for circles in layered manufacturing[J]. Integrated Computer-aided Engineering, 2008, 15(10):37-52.
- [4] 刘会霞,王 霄,蔡 兰.分层实体制造激光头切割路径的建模与优化[J].中国激光,2004,31(9):1137-1142.
LIU Hui-xia, WANG Xiao, CAI Lan. Modeling and optimizing laser torch path in laminated object manufacturing technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(9):1137-1142. (in Chinese).
- [5] 孟宪权,赵英男,薛 青.遗传算法在路径规划中的应用[J].计算机工程,2008,34(16):214-217.
MENG Xian-quan, ZHAO Ying-nan, XUE Qing. Application of genetic algorithm in path planning [J]. Computer Engineering, 2008, 34(16): 214-217. (in Chinese).
- [6] 杨伟东,檀润华,颜永年,等.遗传算法在快速成形轮廓路径规划中的应用[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(10):2179-2183.
YANG Wei-dong, TAN Run-hua, YAN Yong-nian, et al. Application of genetic algorithm for scanning path planning in rapid prototyping [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(10):2179-2183. (in Chinese).
- [7] 张永康.激光加工技术[M].北京:化学工业出版社,2004.

(责任编辑:荣先辉)