

# 基于遗传算法的白车身机器人焊接路径规划

张春伟, 刘海江, 姜冬冬

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 分析了轿车白车身制造过程中机器人拼焊工位焊接路径规划的特征, 将焊点与机器人的工具原点抽象为空间点, 根据图论理论建立各点的关系图, 将约束条件转化为局部有向关系矩阵, 以机器人空间运动最短距离为目标, 建立货郎担问题数学模型, 利用遗传算法求解. 依据关系矩阵产生合法初始种群, 并确定选择、交叉、变异等遗传算子, 以MATLAB语言编程计算. 行李箱盖补焊工位焊接路径规划结果表明, 该方法能够对机器人焊接路径合理规划, 规划方案已成功用于工程实际.

**关键词:** 白车身; 机器人焊接; 有向图; 遗传算法; 货郎担问题  
**中图分类号:** TH 162 **文献标识码:** A

## Robot Welding Route Planning in Car-Body Welding Process Based on Genetic Algorithm

ZHANG Chunwei, LIU Haijiang, JIANG Dongdong

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A genetic algorithm combined with graph theory was proposed for solving the problem of welding route planning in car body-in-white manufacture. By regarding the welding point and tool center point frame as spatial point to establish relationship graph, transforming constraint factors into directed relationship matrix and using minimum motion distance of welding gun as object function, a traveling salesperson problem model was established. Generation of legal initial population and processing of selection, cross and mutation genetic operators were based on directed relationship matrix. MATLAB language was used to program. Taking the welding route planning of the deck lid repair welding station as example, planning result shows that welding route is reasonable and this scheme has been implemented successfully in engineering.

**Key words:** body-in-white; robot welding; directed graph;

genetic algorithm; traveling salesperson problem

轿车车身是轿车的重要组成部分, 是整个轿车零部件的载体, 制造成本约占整车的40%~60%, 焊点多达4 000~5 000个. 为了高质、高效和低成本, 车身制造中广泛采用多机器人焊接技术<sup>[1-2]</sup>. 机器人的焊接顺序对焊接质量和焊接成本以及焊接速度都有较大的影响. 为了减少生产节拍时间, 缩短整体工时, 提高白车身制造的效率和质量, 合理规划焊接顺序是生产线工艺规划中的一项重要工作<sup>[3]</sup>. 机器人焊接路径规划在数学上视作货郎担问题, 是一个经典的组合优化问题, 早期的研究者使用线性规划法<sup>[4]</sup>、动态规划法<sup>[5]</sup>和分枝定界法<sup>[6]</sup>等精确算法来求解. 精确算法由于在运算时间上没有优势, 已基本被近似算法取代. 近似算法中, 一类是使用各种纯数学的方法构造时间复杂度为多项式; 还有一类是使用常规的启发式: 通常首先构造一个所有顶点回路, 然后使用2交换法、3交换法和其他局部优化方法优化回路. 传统的计算方法由于存在局部最优和计算量过大等问题, 致使遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、粒子群算法和神经网络等仿自然算法成为目前研究的热点<sup>[7]</sup>. 遗传算法(genetic algorithm)是模拟自然界生物进化过程与机制求解极值问题的一类自组织、自适应人工智能技术, 是近几年发展起来的一种崭新的全局优化算法, 具有较强的群体搜索能力和鲁棒性, 可优化复杂系统.

本文分析焊接路径及其约束, 基于有向图建立数学模型, 利用遗传算法良好的搜索性能求解模型, 最后以行李箱盖补焊工位为例进行验证.

## 1 焊接路径规划的图论模型

在白车身拼焊工位中, 机器人的作业对象是分

收稿日期: 2010-04-19

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2008AA04Z105)

第一作者: 张春伟(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车车身数字化工艺规划系统. E-mail: 666zhangchunwei@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘海江(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为数字化设计与制造、产品集成精度加工测试与控制.  
E-mail: lhj@tongji.edu.cn

布在车身零件上的诸多焊点,它们在空间上是不连续的,在数学上属于离散问题.焊接路径规划实际上是对这些离散点先后排序,因此归结于图论问题,也是货郎担问题,属于 NP (non-deterministic polynomial)-Complete 问题.它的一般描述为:货郎想去访问若干村,最后回到出发地.给定各村之间所需的行走时间,应该怎样安排路径使货郎能对每个村恰好访问一次而总时间最短.本研究的路径规划可以理解为—台机器人的焊钳从工具原点 TCPF(tool center point frame)出发,焊接所有焊点组,重新回到作业原点,求路程或时间最短.

如不考虑焊接过程中的约束(例如由于焊接变形等因素,要求焊点密集区对焊接顺序的要求),机器人可在任意路径作业,则焊接路径规划可以说成:给定一个正权完全无向图,求其最短的哈密尔顿道路<sup>[8]</sup>.

将每个焊点看作顶点,机器人可移动路径作为边,花费时间或距离作为关联函数,则焊接路径规划可构成如下网络图:

$$D = (V(D), A(D), \varphi_D) \quad (1)$$

式中:  $V(D)$  为点集,即机器人作业的焊点,  $V(D) = \{0, 1, \dots, m\}$ ;  $A(D)$  为边集,即机器人可能经过的路径集,  $A(D) = \{(i, j) | i, j = 0, 1, \dots, m, i \neq j\}$ ;  $\varphi_D$  为关联函数,  $\varphi_D = \{\phi_{ij} | (i, j) \in A\}$ ,  $\phi_{ij}$  为机器人经过对应弧  $(i, j)$  的费用(时间或距离等).

则,机器人焊接路径规划的图论模型为

$$\min F = \sum_{i \neq j} \varphi_{ij} \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & A_{ij} \text{ 在最优路径} \\ 0, & A_{ij} \text{ 不在最优路径} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i \neq j} \delta_{ij} = 1, \quad i \in V(D) \quad (4)$$

$$\sum_{i \neq j} \delta_{ij} = 1, \quad j \in V(D) \quad (5)$$

式(3)—(5)保证每个顶点只有1个出边和入边.

如图1a所示,由节点A至F组成的正权完全图,节点间的细线称作边,设线的长度为边权,则粗线是货郎担问题的解.

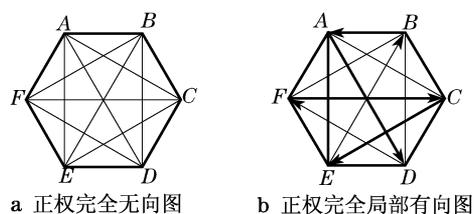


图1 货郎担问题的图论表示

Fig.1 TSP problem denoted by graph theory

但实际工程中,焊接路径规划并不是没有任何约

束的纯数学问题.由于焊接变形及空间约束等因素,这些焊点中的某些点不能仅以距离衡量优劣,焊接顺序由焊接工艺及其他实际条件决定.这就要求在规划路径中必须考虑局部焊点顺序,即上述网络图中某些边是有方向的.此时,网络图是包含部分有向边的正权完全图(图1b),解法更复杂.将部分有向图转换成关系矩阵形式,结合遗传算法求解,效果良好.

## 2 焊接路径规划的遗传算法

精确求解货郎担问题,可采用分支与定界法.就是在搜索过程中不断地构造分支与确定界值;一旦确定了界值,则对大于等于界值的分支不再搜索;最后得到的界值就是问题的最优解.货郎担问题属于 NP 中最难的一类,不能在多项式时间内求解.如果有  $n$  个村庄,那么巡游路径共有  $(n-1)!/2$  条,计算的时间和  $(n-1)!$  成正比.当村庄数  $n=20$ ,巡回路径有  $1.2 \times 10^{18}$  种;  $n=100$ ,巡回路径多达  $4.6 \times 10^{155}$  种.如果精确求解,将发生计算爆炸.因此,实际中只需求得满足工程需要的近似最优解.

遗传算法借用生物遗传学观点,通过自然选择、遗传、变异等作用机制,提高各个体的适应度,是近几年发展起来的一种崭新的全局优化算法,可用于复杂系统优化,鲁棒性很强,很多学者已经利用其解决货郎担问题<sup>[9-11]</sup>.接下来讨论如何用遗传算法规划焊接路径,利用优先关系矩阵产生合法初始种群,确定遗传编码、适应度函数、遗传算子等相关要素.

### 2.1 初始种群的产生

初始种群的产生,在一般遗传算法中都是随机的,但在局部有向的货郎担问题中,却是十分关键的,决定着算法的最终结果是否满足特定的局部顺序要求.将有特定顺序要求的焊点根据有序关系用优先关系图表示<sup>[12]</sup>,然后利用优先关系图得到优先关系矩阵,根据优先关系矩阵产生合法初始种群.有序关系包括前序关系和后序关系.若焊点  $W_i$  必须在焊点  $W_j$  之前完成,则称  $W_i$  为  $W_j$  的前序焊点,关系矩阵中  $W_{ij} = 1$ .反之,则称  $W_i$  为  $W_j$  的后序焊点.若  $W_i$  与  $W_j$  无先后约束关系,则为无序关系,  $W_{ij} = 0$ .采用优先关系描述焊点间的约束关系,运算关系矩阵,寻求合理焊接路径.关系矩阵  $R_{(m \times n)}$  可表示为

$$R_{(m \times n)} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & W_{ij} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{0}$  为零矩阵.

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & j > i \text{ 且 } j \text{ 与 } i \text{ 为有序关系} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

若焊点组{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}中点5~10对应图1b中A—F,则 $\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R}_{(10 \times 10)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

通过 MATLAB 程序,按以下机制处理关系矩阵,产生初始种群——

程序算法中采用随机法变换关系矩阵,循环搜索,直至产生  $N(\mathbf{R})$  个个体为止.假设共有  $n-1$  个焊点,则优先关系矩阵为  $n$  维.算法过程如下<sup>[13]</sup>:

步骤一,令  $x=1$ .

步骤二,如果  $x \geq n$ ,终止;否则,进入下一步.

步骤三,首先判断  $\mathbf{R}$  中有哪些列的元素全为 0,选出这些列.假设  $\mathbf{R}$  共有  $k$  列的元素全为 0,然后产生一个 1 到  $k$  之间服从均匀分布的随机数  $r$ ,  $r = r_{\text{an}}[1, k]$ ,用来选取这  $k$  列中的一个作为被分配的元素,被选中的列所在  $\mathbf{R}$  的列号就为分配到  $x$  基因位上的值.

步骤四,设步骤三中被分配到  $x$  基因位上的列号为  $y$ ,则将  $\mathbf{R}$  中的第  $y$  行和第  $y$  列全部删除,产生新的关系矩阵  $\mathbf{R}_{(n-1) \times (n-1)}$ .

步骤五,令  $x = x + 1$ ,转至步骤二.

## 2.2 编码形式与适应度函数

### (1) 遗传编码

一般来说,遗传算法对解空间的编码大多采用二进制编码形式,但对于货郎担等排序问题采用对访问村庄序列进行组合的方式,即对  $N$  个村庄访问时取  $N$  进制编码,每个染色体长度为  $N$ ,每个基因从 1 到  $N$  的整数集中仅取 1 个值.

### (2) 目标函数与适应度函数

生产节拍是衡量生产线及线中特定工位的重要指标,可以用焊接工位最短工作时间作为规划的目标函数,以评价机器人焊接路径规划的优劣,即

$$F = \min\{T_z\} \quad (8)$$

$$T_z = \sum t_{\text{mo}} + \sum t_{\text{ob}} \quad (9)$$

式中:  $T_z$  为点焊机器人工作总时间;  $\sum t_{\text{mo}}$  为机器人调姿运动总时间;  $\sum t_{\text{ob}}$  为机器人焊接总时间.

一般来讲,每个工位上的焊接对象是固定的,单

个焊点焊接时间是一致的,则点焊机器人的工作总时间取决于机器人调姿运动时间  $\sum t_{\text{mo}}$ ,而  $\sum t_{\text{mo}}$  则由焊接路径的长短决定.任意两焊点  $p, q$  之间的距离  $d_l$  采用欧氏距离表示

$$d_l = \sqrt{(X_p - X_q)^2 + (Y_p - Y_q)^2 + (Z_p - Z_q)^2} \quad (10)$$

$$\text{则路径总长 } L = \sum_{l=1}^{N-1} d(l) \quad (11)$$

在遗传算法中,适应度函数必须取正值,因此可将上式映射成求最大化且函数非负的形式作为适应度函数<sup>[14]</sup>,即

$$f = 1/L \quad (12)$$

## 2.3 遗传算子

根据货郎担问题的性质和上述编码的特点,采用基本遗传算法(SGA).基本遗传算法由选择、交叉和变异三个算子构成.具体策略描述如下:

(1) 选择 采用最优保存方法,即将群体中适应度最大的  $h$  个个体直接替换适应度最小的  $h$  个个体.

(2) 交叉 采用单断点交叉法.记参与交叉的双亲分别为双亲 1 和双亲 2.现以双亲 1 的交叉结果为例介绍交叉算子规则,见图 2.

①若选中的染色体数为奇数,则随机删掉一个.将选好的偶数染色体随机组对;组对的每一对染色体,若基因数为  $n$  (焊点总数),随机生成  $[1, n]$  中一个正整数,作为断点基因位.

②保持双亲 1 断点基因左段不变,删除双亲 2 上的相同基因,将双亲 2 的剩余基因保持原有顺序替换双亲 1 断点基因右段,双亲 1 断点前基因按顺序后移,断点后,删除与双亲 2 断点前相同的基因位.如图 2 所示.

双亲1	2	1	3	5	4	6	7
双亲2	5	2	3	1	4	7	6
后代	5	2	1	3	4	6	7

图 2 交叉算子示例

Fig.2 Demonstration of cross operation

上述交叉变换中,双亲 1,2 中基因位 3 和 4 有顺序约束,交叉后新个体仍然满足该约束关系.交叉概率  $P_c$  越大,群体中新结构引入越快,已获得的优良基因结构丢失的速度也相应增大;  $P_c$  太低则可能导致搜索阻滞.一般取  $P_c = 0.6 \sim 1.0$ .

(3) 变异 利用关系矩阵进行变异操作以满足局部顺序.

步骤一,随机生成  $[1, n]$  中一个正整数  $z$  作为断点基因位.保持断点基因左段不变,对其右段进行变

异操作.

步骤二,删除优先关系矩阵中所有左段基因所在的行和列.

步骤三,令  $x = z$ .

步骤四,如果  $x \geq n$ ,退出;否则,进入下一步.

步骤五,首先判断  $R$  中有哪些列的元素全为 0,选出这些列.假设  $R$  共有  $k$  列的元素全为 0,然后产生一个 1 到  $k$  之间服从均匀分布的随机数  $t$ ,  $t = r_{\text{an}}[1, k]$ ,用来选取  $k$  列中的一个作为被分配的元素,被选中的列所在  $R$  的列号就为分配到  $x$  基因位上的数字.

步骤六,设步骤五中被分配到  $x$  上的列号为  $y$ ,则将  $R$  中的第  $y$  行和  $y$  列全部删除,产生新的关系矩阵  $R_{(n-1) \times (n-1)}$ .

步骤七,令  $x = x + 1$ ,转至步骤四.

变异概率  $P_m$  太小,可能使某些基因位过早丢失的信息无法恢复,太大则会将遗传搜索变成随机搜索.一般取  $P_m = 0.005 \sim 0.010$ .

## 2.4 路径优化的遗传算法流程

遗传算法的流程如图 3 所示.

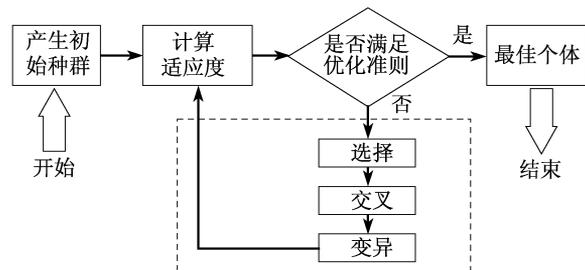


图3 遗传算法流程图

Fig.3 Work flow chart of genetic algorithm

## 3 应用实例

以某车型轿车行李箱盖补焊工位验证上述方法的有效性.行李箱盖属于汽车覆盖件,既是外观装饰性的零件,又是封闭薄壳状的受力零件,任何微小的缺陷都会在涂漆后引起光线的漫反射而损坏外形的美观,因此在制造中表面不允许有波纹、皱折、边缘拉痕和其他破坏表面美感的缺陷.行李箱盖由内外板构成,内外板之间的连接方式主要是点焊.图 4 为某箱盖补焊工位机器人需要焊接的焊点分布,各点坐标及初始顺序如表 1 所示,序号 1 为机器人工具点原点坐标.由于焊接工艺的需要,图 4 中凸显的位置有类似于图 1b 所示的顺序要求.

用第 2 节中的方法求出其关系矩阵作为约束条件,然后用 MATLAB 语言对上述遗传算法编程求

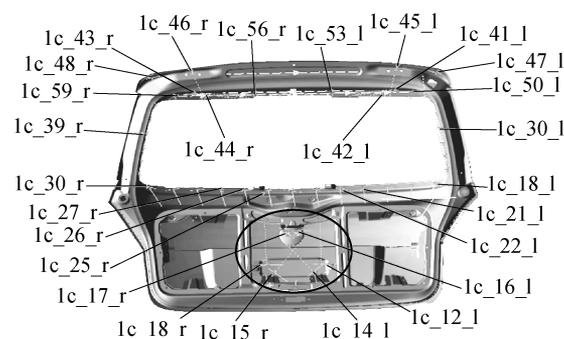


图4 行李箱盖补焊工位焊点分布图

Fig.4 Welding point distribution of deck lid repair welding station

表1 某车型行李箱盖补焊工位焊点信息

Tab.1 Welding point information of deck lid repair welding station

初顺序	点号	X/mm	Y/mm	Z/mm
1	TCPF	3 500.000	0	1 200.000
2	lc_14_l	2 987.502	-70.745	503.010
3	lc_15_r	2 987.539	70.753	503.016
4	lc_17_l	3 019.880	12.504	675.279
5	lc_18_r	2 810.766	-506.334	819.798
6	lc_22_l	2 870.851	-170.747	819.868
7	lc_26_r	2 870.841	170.755	819.874
8	lc_30_r	2 810.748	506.357	819.784
9	lc_34_l	2 640.606	-506.950	994.952
10	lc_39_r	2 640.606	506.943	994.944
11	lc_41_l	2 542.064	-336.129	1 120.508
12	lc_42_l	2 547.799	-298.113	1 122.123
13	lc_43_r	2 542.057	336.139	1 120.506
14	lc_44_r	2 547.777	298.083	1 122.104
15	lc_45_l	2 468.820	-340.009	1 169.659
16	lc_46_r	2 468.858	340.000	1 169.665
17	lc_47_l	2 478.258	-476.573	1 164.175
18	lc_48_r	2 478.249	476.581	1 164.141
19	lc_25_r	2 876.841	85.473	819.166
20	lc_27_r	2 863.479	255.909	820.621
21	lc_21_l	2 863.499	-255.911	820.622
22	lc_16_l	3 019.886	-12.500	675.269
23	lc_13_r	2 981.556	99.114	533.090
24	lc_12_l	2 981.556	-99.115	533.089
25	lc_50_l	2 554.234	-403.939	1 114.038
26	lc_53_l	2 585.534	-135.398	1 126.962
27	lc_56_r	2 585.533	135.380	1 126.973
28	lc_59_r	2 554.236	403.947	1 114.063

解.取交叉概率  $P_c = 0.8$ ,变异概率  $P_m = 0.1$ ,迭代 500 次后得出如下路径顺序:

焊接路径:1→19→7→20→8→10→18→16→28→13→14→27→26→12→11→15→17→25→9→5→21→6→4→2→23→24→3→22→1

其空间走向如图 5 所示.由图可见,约束部位满足约束条件,其他焊点按路径最短轨迹运行.该方案已经成功地在某大型轿车生产厂中得到验证.

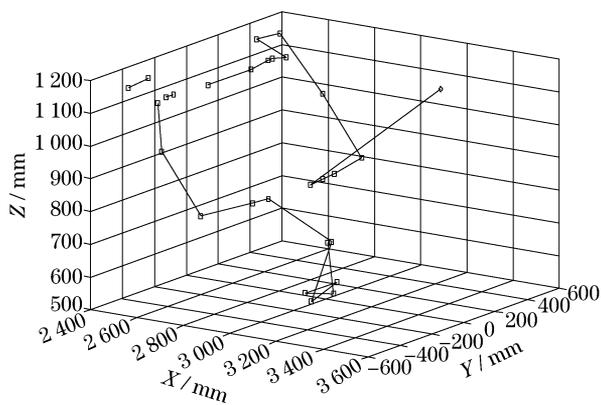


图 5 路径规划结果

Fig.5 Welding route planning results

#### 4 算法比较与特点分析

虽然货郎担问题是数学上的一个经典问题,国内外也有大量研究,但多数都以纯数学看待,涉及工程的较少.由于工程实际中存在很多约束,使得基本货郎担问题在某种程度上发生了实质性改变.笔者试着用动态规划算法、一般遗传算法和本文提出的图论与遗传算法相结合,来解决点焊机器人焊接路径规划问题.结合工程实际,用这三种算法分别求解某轿车白车身生产线中行李箱盖补焊工位 AFO120 (27 个焊点)和车顶定位焊工位 AFO470 (46 个焊点),如表 2 所示.结果显示,动态规划算法在求解精度上

表 2 不同算法求解货郎担问题性能对比

Tab.2 Comparison of different algorithms application to TSP

算法	运算时间/s		求解质量		总距离/mm		局部顺序保持能力
	AFO120	AFO470	AFO120	AFO470	AFO120	AFO470	
动态规划	390	—	精确	—	5 418.9	—	无
一般遗传	45	288	近似最优	近似最优	5 517.2	8 779.5	无
本算法	42	294	近似最优	近似最优	5 697.1	9 009.4	有

#### 5 结语

机器人焊接路径规划是汽车白车身制造中提高生产节拍、提高生产效率、减少能源消耗的重要途径,通过对白车身机器人焊接路径规划问题进行数学分析,建立有向约束货郎担问题模型,并基于图论和遗传算法,设计出求解方法.以行李箱盖补焊工位为例验证算法.结果表明,应用有向关系矩阵结合遗传算法,可以很好地解决工程实际中的局部顺序约束问题,焊接路径规划结果符合焊接工艺要求,同时使总体路径较短、满足工程实际需求.在解决大规模

优于遗传算法,但运算时间过长,尤其是规划任务增加时会无解.一般遗传算法求解质量稍逊于动态规划,但仍在可接受范围,运算时间上占优势,可以解决规模稍大的问题.而图论与遗传算法相结合机器人焊接路径优化问题时,在求解的质量和速度与一般遗传算法比较接近,说明它保留了一般遗传算法的特点.此外,在涉及特定工艺的局部顺序保持能力这一车身焊接中经常出现的问题上,只有本算法具有这种能力,并已在实际生产中成功应用.不足之处是由于遗传算法的特点,重复求解时结果并不完全一致,且随着问题规模的增大,求解时间也呈非线性增加,目前还不能解决任意规模的货郎担问题.

综上所述,本算法较之以往算法有以下特点:

(1) 保持一般遗传算法的无导数计算从而大大降低计算量,能并行求解以避免陷入局部最优.

(2) 合法初始种群产生机制.一般遗传算法中的初始种群都是随机产生,但在局部有向的货郎担问题中,将有特定顺序要求的焊点根据有序关系用优先关系图表示,然后利用优先关系图得到优先关系矩阵,根据优先关系矩阵产生合法初始种群.

(3) 遗传过程中局部约束保持不变.在遗传算子操作过程中采用单断点交叉、利用关系矩阵进行变异,以满足局部顺序在遗传过程中始终满足工艺要求的状态,保证规划结果的正确性.

问题方面,遗传算法求解机器人焊接路径优化比传统算法有优势.但是由于其自身特点,所得只是一近似最优解,且重复求解结果并不完全一致.因此,规划后的路径还需要工艺人员进行三维仿真验证后的微调.更加完善的解决方案有待进一步研究.

#### 参考文献:

- [1] 黄天泽,黄金陵.汽车车身结构与设计[M].北京:机械工业出版社,1992.  
HUANG Tianze, HUANG Jinling. Automotive body structure and design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992.

(下转第 598 页)