

基于遗传算法的白车身焊接机器人焊点分配

刘海江¹, 张春伟¹, 徐君杰¹, 茆凡²

(1. 同济大学 机械工程学院 上海 201804; 2. 上汽技术中心, 上海 201804)

摘要: 分析了轿车白车身制造过程中多机器人拼焊工位焊点分配问题的特征, 将焊点与机器人抽象为空间点、以机器人运动时间的倒数为价值向量建立多背包问题数学模型, 利用遗传算法进行求解. 通过合理处理选择、交叉、变异遗传算子, 算法具有良好的搜索性能和收敛性. 侧围补焊工位焊点分配结果表明各机器人焊接任务均衡, 节拍时间控制在要求范围之内.

关键词: 白车身; 多机器人焊接; 遗传算法; 背包问题

中图分类号: TH 162

文献标识码: A

Assigning Welding Point of Car-body-in-white to Multi-robots Based on Genetic Algorithm

LIU Haijiang¹, ZHANG Chunwei¹, XU Junjie¹, MAO Fan²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. SAIC Motor Technical Center, Shanghai 201804, China)

Abstract: A genetic algorithm was proposed for solving the problem of assigning welding point to multi-robots in car body-in-white manufacture. With the welding point and robots as spatial point and motion time of the robot as value vector, a multi-knapsack problem model was established. Through processing selection, crossover and mutation genetic operators, convergence ability of the algorithm was strengthened. Taking the welding point allocation of the side panel repair welding working procedure as example, welding point allocation result shows that each robot has balanced burthen and the cycle time meets the engineering demands.

Key words: body-in-white; multi-robots welding; genetic algorithm; knapsack problem

零部件的载体, 其制造成本约占整车的 40%~60%, 生产时, 焊点多达 4 000~5 000 个. 为了能制造出高质、高效和低成本车身, 车身制造中广泛采用多机器人焊接技术^[1-2], 如图 1 所示. 为减少节拍所需时间, 优化配置机器人资源, 提高白车身制造的效率和质量, 必须对机器人焊接任务进行规划, 将诸多焊点合理分配给各焊接机器人. 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. 本文对多机器人焊点任务分配进行特征分析并建立数学模型, 利用遗传算法良好的搜索性能对模型进行求解, 最后以侧围补焊工位为例进行验证.



图 1 白车身制造多机器人拼焊工位

Fig. 1 Multi-robots station in car body-in-white manufacture

1 焊点任务分配数学模型

多机器人焊点任务分配问题中, 将焊点和机器人抽象为空间点, 焊点作为待分配的物体, 机器人作为背包, 机器人运行到焊点所需的时间 (假设机器人在空间运行速度为常量) 作为焊点与机器人之间的价值; 则焊点分配的问题可抽象为多背包问题^[3-4].

轿车车身是轿车的重要组成部分, 是整个轿车

收稿日期: 2009-04-22

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目 (2008AA04Z105)

作者简介: 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

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

经典背包问题中目标是价值总和最大,要使得运行时间最少,可采用运行时间的倒数作为评价标准.焊点分配的多背包模型如下:

给定 n 个焊点 $W = (W_1, W_2 \cdots W_n)$ 和 m 个机器人 $R = (R_1, R_2 \cdots R_m)$, 机器人与焊点之间的价值向量为 $V = V_{ij}$, (V_{ij} 表示焊点 i 与机器人 j 之间的价值) 要求将所有的焊点 i 都分配给机器人 R_j . 并且使得每个机器人焊接所需的时间总和为最小. 这里为了表示焊点的归属, 用 $m \times n$ 的矩阵来表示焊点与机器人之间的关系, $X_{ij} = 1$ 表示焊点 i 属于机器人 j , $X_{ij} = 0$ 则不属于. 焊点与机器人所组成的多背包问题的目标函数可描述为

$$\max \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n V_{ij} X_{ij} \right) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq 1 & \forall i \in \{1, 2, 3 \cdots n\} \\ \sum_{i=1}^n V_{ij} X_{ij} \leq C_j & \forall j \in \{1, 2, 3 \cdots m\} \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2)$$

价值向量 V_{ij} ($\forall i \in \{1, 2, 3 \cdots n\}, \forall j \in \{1, 2, 3 \cdots m\}$) 表示机器人与焊点间距离的运行所需时间. 考虑到仅仅是取倒数所得值会很小, 不利于比较, 在计算出所有焊点与机器人自己的距离后, 用其中最大者去除所有的距离, 然后在所得值之间进行比较, 此时值最大的价值仍然最大, 这样就比较容易解决问题. 焊点分配的数学模型则为

$$\max \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n V_{ij} X_{ij} \right) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} \left(\frac{\max(L_{ij})}{L_{ij}} \right) \quad (3)$$

式中, L_{ij} 为焊点与机器人之间的距离.

2 焊点任务分配的遗传算法

多机器人焊点任务分配问题属于 0-1 多背包问题, 解决 0-1 多背包问题算法很多, 处理方法也很灵活, 在时间和空间复杂度上可进行很多优化. 用来解决多背包问题的传统方法主要有递归法和贪心法等, 但用这两种方法来解决多背包问题都有其不可避免的缺点. 递归法虽能遍历搜索空间, 找到最优解, 但由于多背包问题的解空间是随着问题规模以幂级数增长的, 在递归搜索中有时会占用较多的空间, 所以递归法只适合解决小规模的多背包问题; 而贪心法通常很难找到真正最优解, 即使能找出较优的解, 也往往与真正的最优解相差很远. 遗传算法借

用了生物遗传学的观点, 通过自然选择、遗传、变异等作用机制, 实现各个个体的适应度的提高, 它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, 具有很强的鲁棒性, 在解决多背包问题上有很大优势, 接下来将讨论如何用遗传算法对焊点进行分配, 确定遗传编码, 适应性函数, 遗传算子等相关要素^[5].

2.1 目标函数

在机器人任务规划中, 假设存在 n 台机器人 W_i , 焊点总焊接时间为 N , 焊点组内部总移动时间为 O . 焊点 j 占用 T_j 的工作量, 某机器人 i 对它的满意程度为 P_{ij} , P_{ij} 和距离有关. $P_{ij} = 1/(L_{ij} + \sum L_{ob})$. L_{ij} 是焊点与机器人之间的距离, L_{ob} 是焊接区域中的障碍物的修正距离.

目标函数: $\max\{W_i(\sum P_{ij})\}$.

约束条件: ① 分配给单台机器人的任务总量不超过 $(N + O)/n$ (取整): $W_i(\sum T_j) \leq (N + O)/n$ (N 和 O 为定值). ② 比较各台机器人的任务量是否都与 $(N + O)/n$ 近似, 数学函数如

$$\min \left\{ \sum_{i \in R} [(N + O)/n - W_i(\sum T_j)]^2 \right\} \quad (4)$$

2.2 编码形式与适应度函数

(1) 遗传编码

根据 0-1 多背包问题解的特点, 采用二进制编码方式将上述机器人任务规划问题的解空间映射成基因位. 因此, 焊点分配多背包问题可以分解成多个 0-1 背包问题的串联形式, 其遗传编码可以用矩阵 $T(m \times n)$ 来表示, 其中 $T_{ij} = 1$ 表示焊点 i 由机器人 j 焊接, $T_{ij} = 0$ 表示焊点 i 不属于机器人 j 中.

(2) 适应度函数

根据编码情况及参考文献[3], 定义多机器人焊点任务分配问题的适应度函数如

$$f(T) = \sum_{j=1}^m J_j(T) + \sum_{j=1}^m G_j(T) + \sum_{i=1}^n H_j(T) \quad (5)$$

其中: $J_j(T)$ 为背包 j 的目标函数; $G_j(T)$ 为背包 j 超出约束条件的惩罚函数; $H_j(T)$ 为物体 i 隶属于多个背包的惩罚函数. 它们的构造为

$$J_j(T) = \sum_{i=1}^n T_{ij} P_{ij} \quad (6)$$

$$G_j(T) = \begin{cases} \alpha \left(C_j - \sum_{i=1}^n T_{ij} P_{ij} \right) & C_j - \sum_{i=1}^n T_{ij} P_{ij} < 0 \\ 0 & C_j - \sum_{i=1}^n T_{ij} P_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$H_j(T) = \begin{cases} \beta \left(1 - \sum_{j=1}^m T_{ij}\right) P_{ij} & \sum_{i=1}^n T_{ij} > 1 \\ 0 & \sum_{i=1}^n T_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, α 和 β 为惩罚系数.

2.3 遗传算子

根据焊点多背包问题的性质和上述编码的特点,本文采用基本遗传算法(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:采用按正比于适应值的轮盘赌方式进行随机选择,在选择轮盘赌的时候,用折半搜索的方法有效地减少比较次数,确保对应的轮盘在 $O(\log_2 N)$ 内找到 (N 为种群大小).

(2) 交叉:编码方式的基因位是以矩阵的方式存在,在交叉操作中等效为一个长度为 mn 的编码串.一点交叉操作的信息量比较小,交叉点位置的选择可能带来较大的偏差,一点交叉算子不利于长距模式的保留和重组,而且会出现编码串末尾的重要基因总是被交换的尾点效应.为解决这个问题,采用了一致交叉算子,所谓一致交叉就是编码串上的每一位按相同概率进行随机均匀交叉.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升高,太低则可能导致搜索阻滞,一般取 $P_c = 0.6 \sim 1.0$.

(3) 变异:拟对变异算子采用位点变异.先从群体中的个体编码串中随机挑选一个或者多个基因座,然后按照变异概率 P_m 进行变异,即将当前基因的值取非.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; P_m 太大则会导致将遗传搜索变成随机搜索,一般取 $P_m = 0.005 \sim 0.01$.

2.4 遗传算法流程

遗传算法的流程如图2所示:

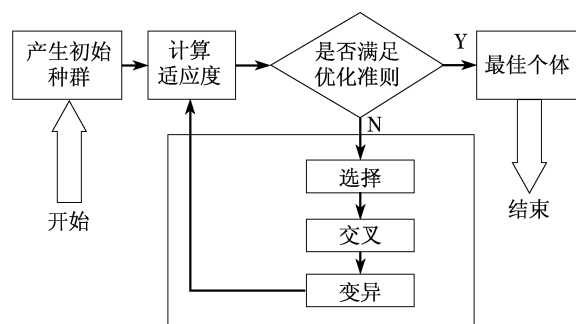


图2 遗传算法流程图

Fig.2 Work flow chart of genetic algorithm

3 白车身侧围补焊工位焊点任务分配实例

以帕萨特 B5 白车身侧围补焊工位为对象进行实例验证.此工位节拍中所要完成的焊接焊点数量为 124 个,要在 110 s 左右的工位节拍内完成所有焊点的焊接,每个焊点的平均焊接时间估算为 2.5 s(包括机器人的行程时间和焊接所用时间等),根据实际生产节拍时间的要求,选用 3 台焊接机器人进行分配.

对于焊接机器人模型,假设以下条件成立^[6-7]:

(1) 机器人运动速度比较平均,在焊点之间移动所需时间可取平均值.

(2) 机器人运动的位置精度能够符合要求,可确保焊接质量.

(3) 因为受到该工位其它设备位置的影响,机器人位置不加改变.

建立的数学模型为

$$W = \{f(W_i, R_j), r, E(g), t, X_{ij}\} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } g(W_i) \in \phi_z, \phi_y, \phi_x \quad (10)$$

$$W \in r(R_j) \quad (11)$$

$$E(g) \in \phi_y \quad (12)$$

$$F(g) \in \phi_x \quad (13)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$t(R_j) = \sum t_{mo} + \sum t_{ob} \quad (15)$$

$$W \in A \quad (16)$$

其中: $g = g(W_i)$; $t = t(g_k)$; $e = E(g)$; f 是多背包问题的遗传算法; W 为焊点任务规划问题; A 为点焊工艺; W_i 为焊点; N 为焊点数目; ϕ_z 为焊点群的位置(排列紧密性); $\phi_y = \begin{cases} 1, & \text{焊点位于外框} \\ -1, & \text{焊点位于内框} \end{cases}$; $\phi_x = \begin{cases} 1 & \text{焊点位于水平或者近似水平位置} \\ -1 & \text{焊点位于垂直或者近似垂直位置} \end{cases}$; $g(W_i)$ 为焊点分组,由工艺员完成,是人为因素; R_j 为机器人; $t(g_k)$ 为计算每个焊点组所需的加工时间 g_{k1} 和在焊点组内部的运动时间 g_{k2} ; L 是焊点组的总数, $t(g_k) = t(g_{k1}) + t(g_{k2})$; t_{mo} 为机器人调姿运动时间, t_{ob} 为单个焊点焊接时间; $E(g)$ 为根据焊点群所处的位置是内框或外框来分配任务; $F(g)$ 为根据焊点群所处的位置是水平或者垂直来分配任务;

$\alpha(w_i, g_k) = \begin{cases} 1 & \text{机器人 } w_i \text{ 可以到达焊点组 } g_k \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$

决策变量定义为

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{焊点 } i \text{ 分配给机器人 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

约束条件(10)表示给所有焊点按照焊点群的位置(水平或垂直)、排列紧密性、位于内外框等因素进行分组,减少目标的数量. 条件(11)表示在任务分配时必须考虑机器人的工作范围. 条件(12)表示在进行任务分配时,尽量要把侧围外板同一类型位置(外框或内框)的任务分给同一个机器人. 条件(13)表示在进行任务分配时,尽量要把侧围外板同一类型位置(水平或者垂直)的任务分给同一个机器人. 条件(14)表示决策变量的取值范围. 条件(15)表示机器人加工工时的计算方法. 条件

(16)表示规划必须符合点焊工艺.

以 VC++ 6.0 对算法进行编程实现^[8],在方正 Pentium 4 2.4 GHz 计算机中运行后,对各机器人进行焊点任务分配. 最终得到的分配结果为:A 机器人人为 43 个焊点,使用 X 型焊钳;B 机器人也为 43 个焊点,使用 C 型焊钳;C 机器人人为 38 个焊点,使用 X 型焊钳. 其中最长的焊接时间为 107 s,小于工位节拍的时间要求,能够完成焊接任务. 三台机器人分配比较平均,最大程度地利用了每台机器人的生产能力,缩短了工位的工时,故该分配方案能保证焊接机器人在工位节拍时间的允许范围内完成焊接任务. 其中 A 焊接机器人所分配到的焊接任务如图 3 所示.

焊点编号	焊钳种类	焊点所在组	内外框	X坐标	Y坐标	Z坐标
17	X焊钳	v-831-L	外框	1502.20	-506.80	1098.
18	X焊钳	v-833-L	外框	1582.10	-506.20	1101.
19	X焊钳	v-837-L	外框	1663.20	-506.10	1104.
20	X焊钳	v-839-L	外框	1702.10	-505.80	1105.
21	X焊钳	v-841-L	外框	1774.20	-505.80	1105.
22	X焊钳	v-843-L	内框	1813.20	-505.80	1103.
23	X焊钳	v-845-L	内框	1852.20	-505.80	1103.
24	X焊钳	v-831-L	内框	1952.10	-506.20	1098.
25	X焊钳	v-851-L	内框	2001.19	-506.70	1085.
26	X焊钳	v-853-L	内框	2051.70	-507.50	1081.
27	X焊钳	v-855-L	内框	2111.40	-509.20	1085.
28	X焊钳	v-857-L	内框	2160.80	-510.60	1079.
29	X焊钳	v-859-L	外框	2200.40	-511.80	1073.
30	X焊钳	u-581-L	外框	357.80	-719.10	466.
31	X焊钳	u-585-L	外框	499.10	-724.50	467.
32	X焊钳	u-585-L	外框	500.40	-723.90	495.

图3 A 机器人所得焊点

Fig.3 Allocated mission of robot A

4 算法比较与分析

尝试用多种方法对多机器人焊点分配问题进行求解,为了比较各种算法的性能,首先用 Matlab 软件随机选取四种不同焊点规模的任务,然后分别使用三种方法进行求解,求解结果如表 1 所示. 从表 1 可以看出,虽然传统算法在求解小规模规划问题时有一定的实用性,一旦求解规模较大,传统算法的求解速度将急剧下降,当规模大至 124 点时,计算机陷入瘫痪状态. 在解的质量上,递归算法在解小规模问题时也能求得最优解,贪心算法虽然能够解比递归算法规模大的问题,但是所求解的质量不高,根据实际经验判断所求解的可行性不大. 本文提出的用遗传算法求解多机器人焊点任务分配问题时,不仅在求解速度上比传统算法有优势,所求解的质量也很高,能够满足工程

需要,所求结果已经在实际生产中成功应用. 不足之处是随着问题规模的增大,求解时间也呈非线性增加,欲解决任意规模多背包问题还有待进一步研究.

遗传算法求解 0-1 多背包问题之所以成功与遗传算法本身的特点密切相关.

(1) 以价值向量的二进制编码作为运算对象. 传统的优化算法往往直接处理价值向量值本身,而遗传算法处理价值向量的二进制编码,使得可以借鉴生物学中的染色体和基因的概念,模仿自然界生物的遗传和进化机理,同时能够方便的应用遗传操作算子.

(2) 直接以适应度作为搜索信息,无需导数等其它辅助信息,大大降低了算法的计算量.

(3) 使用多个点的搜索信息,具有隐含并行性,避免了传统算法易于陷入局部最优解的缺点,同时也提升了算法的计算性能.

表 1 不同算法求解多背包问题性能对比
Tab.1 Comparison of different algorithms application on multi-knapsack problem

算法	不同焊点规模耗时及所求解质量							
	30 点		50 点		70 点		124 点	
贪心算法	26 s	近似解	724 s	近似解	8 128 s	近似解	—	—
递归法	864 s	最优解	—	—	—	—	—	—
本文算法	30 s	最优解	216 s	最优解	747 s	最优解	1 865 s	最优解

5 结语

白车身制造是汽车制造中的重要环节,通过对白车身多机器人拼焊工位焊点任务分配问题进行数学分析,建立多背包问题模型,并基于遗传算法设计出求解该问题的方法.以侧围为例对算法进行验证,结果表明通过合理的处理选择、交叉、变异遗传算子,算法能够有效收敛,焊点分配结果使各机器人焊接任务均衡,节拍时间控制在要求范围之内,满足工程实际需求.遗传算法求解多机器人焊点任务分配问题在计算速度和求解质量上均比传统算法有优势,但是随着问题规模的增大,求解时间也呈非线性增加,欲解决任意规模多背包问题尚需进一步研究.

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.

[2] 李东勃.焊接机器在汽车工业内的应用及其发展趋势[C]//埃

森焊接展览会论文集.北京:[s. n.],2002,26-33.

LI Dongbo. Welding robot application in automation automobile industry and development trend [C] // Symposium of International Welding Fair in Essen. Beijing: [s. n.], 2002, 26-33.

[3] 虞安波,杨家本.多背包问题的遗传算法求解[J].计算技术与自动化,2002,21(2):59.
YU Anbo, YANG Jiaben. Genetic algorithm for multi knapsack problem[J]. Computing Technology and Automation, 2002, 21 (2):59.

[4] Bischoff E E, Ratcliff M S W. Issues in the development of approaches to container loading[J]. Omega,1995,23(4):377.

[5] Ip W H,Li Y, Man K F. Multi-product planning and scheduling using genetic algorithm approach[J]. Computers & Industrial Engineering,2000,38:282.

[6] Huang S S. A new method of the parameter teaching and control for robotic spot welding system [C] // First International Conference on Manufacturing Technology. Hong Kong:[s. n.], 1991:249-251.

[7] 茆凡.白车身侧围焊点任务组合优化设计[D].上海:同济大学,2006.
MAO Fan. The optimization and allocation research about welding point of side of car-body-in-hite[D]. Shanghai: Tongji University,2006.

[8] Young Michael.掌握 Microsoft Visual C++ 编程[M].北京:电子工业出版社,1995.
Young Michael. Mastering microsoft visual C++ programming [M]. Beijing:Electronics Industry Press,1995.