

冗余度弧焊机器人位置优化建模及算法

刘永¹, 王克鸿¹, 杨静宇²

(1. 南京理工大学 材料科学与工程系, 南京 210094;

2. 南京理工大学 计算机科学与技术学院, 南京 210094)

摘要: 围绕大型冗余度(11自由度)机器人工作站的路径规划, 提出龙门架机座的位置优化问题, 分析并建立了该问题的多目标优化数学模型。采用遗传算法为优化方法, 建立了问题的适应度函数, 并提出一种动态系数法解决多目标优化问题, 基于C++和matlab混合编程设计实现机器人机座优化的遗传算法程序, 基于该算法进行了仿真试验验证, 试验基于3自由度龙门架和6自由度机器人, 焊接某工件上两圆管垂直相贯形成马鞍形空间焊缝。结果表明, 通过该算法可以快速找到机器人机座接近目标最优解, 提出的多目标优化函数和算法保证了机器人关节运动平稳性。

关键词: 冗余度弧焊机器人; 路径规划; 遗传算法

中图分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)11-025-04

刘永



0 序 言

由关节型机器人(6自由度)、变位机(2自由度)和龙门架机座(3自由度)组成的11个自由度的大型冗余度弧焊机器人工作站的应用在重型机械行业占很大比重。然而在弧焊机器人倒立悬挂的环境下, 现场示教编程占用机器人大量时间, 而且几乎没有优化措施^[1]。因此研究大型机器人工作站的离线编程技术具有重要现实意义, 其中的重要课题之一是焊接过程的机器人路径规划问题。

焊接机器人机座本身安装在机架上, 是可以移动的, 属于冗余度弧焊机器人的路径规划问题, 与一般机器人路径规划不同。第一, 机器人各自由度的起始位姿和目标位姿是不确定的。第二, 弧焊机器人末端位姿是由焊缝的空间曲线和特征坐标系决定的, 即机器人末端运动路径和姿态是确定的。但反过来机器人机座在机架上一定范围内运动, 从这个意义上说大型机器人焊接路径规划是机架直角坐标的路径与机器人关节空间的轨迹联合规划问题。其次, 焊接作业要求机器人末端以设定的焊接速度运动, 焊接过程尽可能的平稳。

冗余度机器人规划是机器人领域的前沿课题,

一些学者已经取得可喜成果。如针对含变位机的冗余度机器人工作站, 建立融合多性能指标的目标函数, 采用遗传算法研究了机器人的轨迹优化问题^[2]。

1 路径规划问题的转化

空间焊缝的各点都对应一个空间坐标和特征坐标系, 称为焊点位姿, 一条空间焊缝可以由一系列的焊点位姿来表征。机器人焊枪端头位姿由各焊点位姿决定, 称为焊点焊枪位姿。由于机器人是冗余的, 因此, 满足焊点焊枪位姿的无碰解是一个集合, 也就是说, 对空间焊缝从起点到焊缝终点, 每一个焊点对应一个无碰解集, 称为焊点解集。由于该问题的非线性、多变量、强耦合性, 通常前后焊点的最优解并不能保证目标全局最优。但是焊点解集范围通常是比较大的, 如果盲目搜索导致组合爆炸问题。从常识上看, 机架带动机器人的运动(称机器人移动)相对机器人各关节运动(称机器人关节运动)从能量上讲是大的, 因此提出以下假设。

假设(前提): 机器人移动主要用于扩大机器人工作空间和避障。

机器人机座移动的距离尽可能短。一般来说, 对于无移动的关节机器人, 如果焊缝在机器人可达或者灵活空间, 机器人关节运动实现焊枪末端沿着空间焊缝运动; 对于无关节运动的移动机器人, 机器

人直接沿着空间焊缝运动。如果整条焊缝在机器人灵活(或可达)工作空间, 则机器人机座在焊接过程中不移动, 此时需要解决的问题则转化为优化机器人机座的位置, 使整条焊缝焊接过程中机器人各关节运动轨迹最平稳^[3]。文中称为机器人机座位置优化问题。

2 机器人机座位置优化问题建模

条件: 整条焊缝在机器人可达空间。

机器人在整条焊缝只需要 6 个关节自由度运动就可以到达焊缝各点, 这时机架 3 个自由度是冗余自由度。根据假设, 在焊接过程中, 机架 3 个自由度是不运动的, 但是机架 3 个自由度给定值不同, 即机器人位置不同, 对机器人关节空间的规划有显著影响。

期望: 整条焊缝上机器人运动尽可能平稳。为此, 提出融合目标 1 和目标 2 实现机器人运动最平稳。

目标 1: 在一次起弧的整条焊缝上机器人各关节角度变化绝对值之和最小。目标 1 函数为

$$\min \{f_1 = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^6 k_i \times |\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}| \right) \},$$

式中: $\theta_{i,j}$ 表示第 j 个焊缝位置点时第 i 个关节的角度; k_i 表示第 i 个关节的权值; N 表示整条焊缝上的离散点数。

目标 2: 各关节运动变化量绝对值的最大值最小。目标 1 保证整个过程运动变化量最小, 但可能会出现某个关节在轨迹上局部出现突变, 导致运动不平稳。目标 2 函数为

$$\min \{f_2 = \left(\max_{i=1}^6 k_i \times |\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}| \right) \}.$$

约束 1: 最佳(满意)焊枪末端位置及姿态是焊接工艺规划的结果。

约束 2: 机器人及机架与障碍物的距离大于 0 或某一阈值。数学表达为

$$d(R, O) > 0,$$

式中: R 表示机器人及机架; O 表示障碍物。

约束 3: 机器人无自干涉, 对该机器人来说也就是每个关节在一定运动范围。数学表达为

$$\theta_{i,1} < \theta_i < \theta_{i,2}, i = 1, 2, \dots, 6,$$

式中: $\theta_{i,1}$ 为第 i 个关节的下限; $\theta_{i,2}$ 为第 i 个关节的上限。

对该问题求解, 采用了遗传算法。遗传算法^[4]步骤比较简单, 文中不再赘述。

3 机器人机座位置优化遗传算法

3.1 机架自由度的编码

遗传算法的编码可以是位串、实数、有序串、树或图, Holland 最初的遗传算法是基于二进制串的, 类似于生物染色体结构, 易于用生物遗传理论解释, 各种遗传操作也易于实现。另外采用二进制编码式, 算法处理的模式最多。

在具体问题中, 直接采用解空间的形式进行编码, 可以直接在解的表现型上进行遗传操作, 从而易于引入特定领域的启发式信息, 可以取得比二进制编码更高的效率。实数编码一般用于数值优化, 有序串编码一般用于组合优化。

机架自由度的编码在程序中分别采用了二进制编码和实数编码两种方式。

3.2 建立适应度函数

对目标 1 建立适应度函数 F , 即

$$F = \begin{cases} C_{\max} - f_1, & f_1 < C_{\max}; \\ 0, & f_1 \geq C_{\max}. \end{cases}$$

式中: C_{\max} 为目标函数 f_1 的最大估计值。

融合目标 1 和目标 2 可以建立目标函数 f , 即

$$f = \min \{k_1 f_1 + k_2 f_2\},$$

式中: k_1, k_2 为两个目标的权值。

目标 1 和目标 2 是两个优化目标, 权值的大小难以确定。作者提出一种动态系数法来解决这个问题, 即多目标适应度函数以目标 1 为参考基准附加一个动态系数 k_{Coe} , k_{Coe} 由目标 2 来确定, 采用阈值+比例法。如果目标 2 的值 f_2 大于某一适应度阈值 σ_0 , 则 k_{Coe} 值为 $1 + \eta(f_2 - \sigma_0)$, 否则 k_{Coe} 值取 1。 σ_0, η 的取值决定于对关节局部变化量大小, η 为比例系数, 一般 σ_0 为 10~30。表达式为

$$f = \min \{k_{\text{Coe}} \times f_1\},$$

$$k_{\text{Coe}} = \begin{cases} 1, & f_2 \leq \sigma_0; \\ 1 + \eta(f_2 - \sigma_0), & f_2 > \sigma_0. \end{cases}$$

为解决约束问题, 采用罚函数法。目标函数表达式为

$$f = \min \left\{ k_{i,\text{Coe}} \times f_1 + \sum_{i=1}^2 k_{i,\text{Coe}} \times C_{i,\max} \right\},$$

式中: $k_{i,\text{Coe}}$ 为约束 1, 2 惩罚因子, 如果满足约束条件 1, 2 则为 0, 否则根据偏离约束 1, 2 的程度取值范围在 0~1 之间; $C_{i,\max}$ 为约束 1, 2 某一适当大值。

3.3 遗传算法实现

基于 matlab 和 C++ 混合编程^[5]实现了该问题

的遗传算法程序。程序流程框图如图 1 所示。为适应该问题可能出现多个接近目标最优解的情况, 改变遗传算法中随机数的初始值, 多次运行遗传算法步骤, 获取多个最佳个体。为此增加一个排序算法, 采用有序链表保留 N 个最佳个体, N 的值根据最优解允许偏差自动产生。产生的 N 个最佳个体在过渡过程机器人路径规划时作为备选解, 对于仅一条焊缝情形则选一个最佳个体即可。

由于适应度函数的计算涉及到空间焊缝和机器

人运动学逆解等计算问题而相当复杂, 在 matlab 中实现比较困难, 因此在 VC++ 环境下开发遗传算法主要实现个体适应度值的计算。C++ 和 matlab 之间的接口通过 mexFunction() 函数来实现, C++ 和 matlab 之间的接口实现方法见文献[3], 输入为 matlab 中遗传算法的个体解码变量值, 输出为该个体适应度值。在 matlab 中, 将 C++ 语言程序编译为动态连接库文件, 通过调用 C++ 语言编写的个体适应度计算函数获取适应度值。

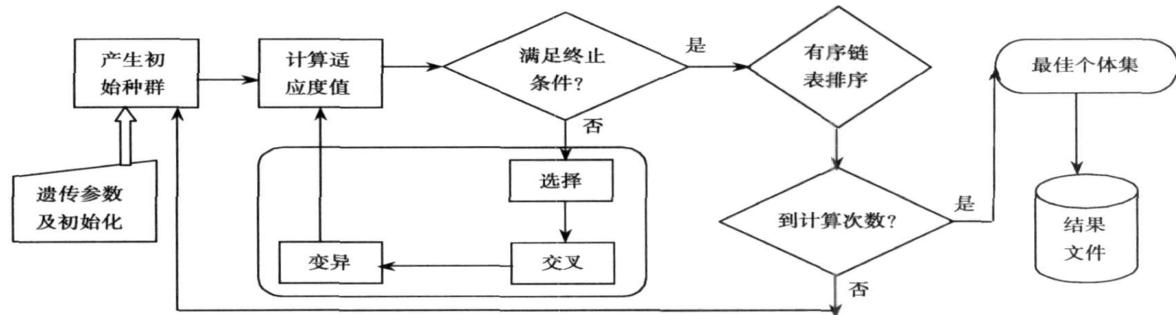


图 1 遗传算法程序流程框图

Fig. 1 Flowchart of genetic algorithm

4 遗传算法优化试验

不失一般性, 研究对象为某工件上两圆管垂直相贯形成的马鞍形空间焊缝, 几何尺寸为主管半径为 50 cm, 支管半径为 30 cm, 工件参考坐标系在主管与封头端面中心处, 支管中心线距离坐标系中心为 50.239 cm。

工作站为由奥地利 IGM 公司生产的机器人(6 自由度)、变位机(2 自由度)和龙门架(3 自由度)组成的 11 个自由度的大型冗余度弧焊机器人工作站。为优化机座位置, 假设变位机仅是一个工作台, 此时, 工作站实际自由度是 9 个龙门架横梁(左右) x 方向运动范围为 $-150 \sim 150$ cm, 中心向左运动为负值; 立柱(上下) y 方向运动范围为 $-150 \sim 50$ cm, 中心向上运动为负值; 悬臂(前后) z 方向运动范围为 $-100 \sim 200$ cm, 中心向后运动为负值。

龙门架、机器人处于初始状态时相对位置如图 2 所示。工件坐标系中心在机器人机座坐标系的下方 180 cm(x 方向偏移 180 cm), 前方 159 cm(z 方向偏移 159 cm), y 方向没有偏移。

试验参数为群体大小为 50, 实数编码, 初始值范围为 $-150 \sim 150$ cm, 排序适应度尺度变换, 轮盘

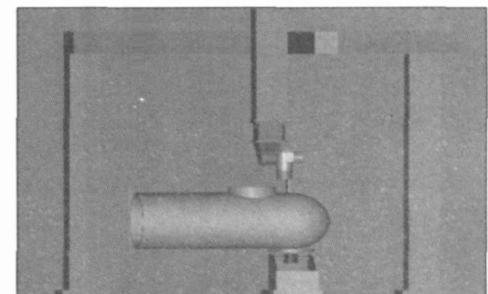


图 2 机器人工作站及嵌入工件

Fig. 2 Welding robot station embedded workpiece

赌选择, 单点交叉, 交叉概率为 0.8, 均匀变异率为 0.4, 最大遗传代数为 200。经实践, 适应度函数中参数的取值如下: $\sigma_0 = 10$; $\eta = 0.05$, $C_{1\max} = 100\ 000$, $C_{2\max} = 100\ 000$ 。试验分别采用了基于高斯函数的变异和均匀变异的方法, 基于高斯函数的变异遗传过程明显优于均匀变异, 变异参数设定不合适会导致早熟等遗传提前终止等现象。交叉和变异的概率对遗传过程和最终得到的最佳适应度值影响很大。

运行过程如图 3 所示, 经过 195 代遗传后因超出停滞代数限制而遗传停止, 找到接近目标最优解为 $x = -42.899$ cm, $y = -36.905$ cm, $z = 8.776$ cm。

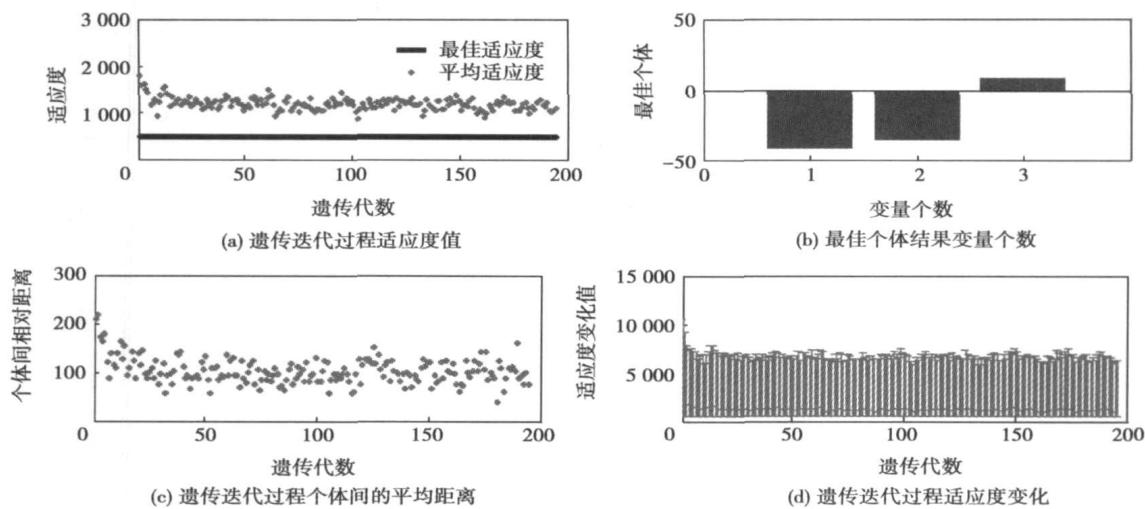


图 3 机座位置优化遗传算法计算过程

Fig. 3 Optimal process of robot position based on genetic algorithm

试验优化结果对应的机器人各关节角度轨迹如图 4 所示。

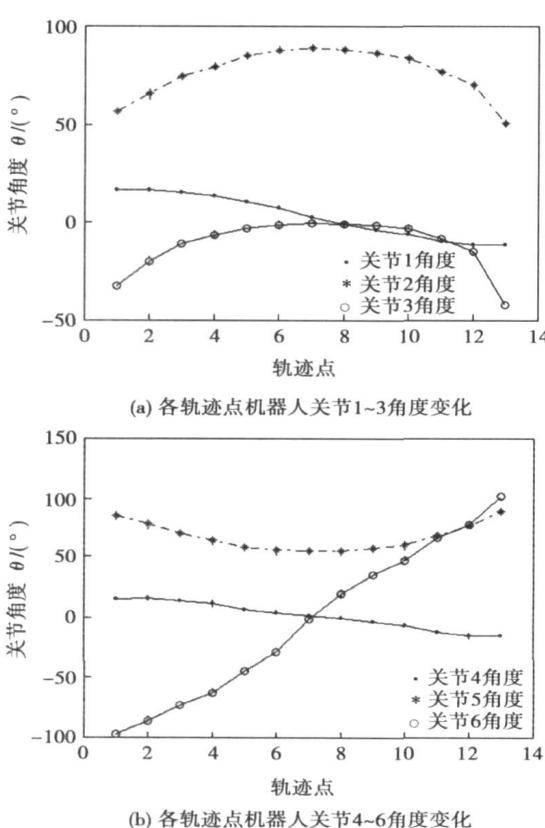


图 4 优化结果对应的机器人各关节角度轨迹

Fig. 4 Optimal result of robot joints

从图 4 看出, 整个焊接过程中, 焊缝 13 个位置上机器人 6 个关节角度变化幅度小且没有剧烈拐

点, 有利于机器人末端运动的平稳性, 验证了适应度函数建立、遗传算法求解及实现等的正确性。

5 结 论

针对冗余度机器人机座的位置优化问题, 建立了多目标优化数学模型, 引入遗传算法解决了机器人机座位置优化的计算问题。该算法可以快速、准确的找到接近目标最优解, 提出的多目标优化函数保证机器人关节运动平稳。为机器人机座的位置优化问题提出了一条可行的途径, 也验证了解决该问题所建立的数学模型和适应度函数的正确性。研究结果对大型 9 自由度机器人的离线编程实现有较大理论及实用价值。

参考文献:

- [1] 刘永, 徐越兰, 王克鸿, 等. 锅炉焊接机器人离线编程系统 [J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 52—56.
- [2] 崔鲲, 吴林, 陈善本. 遗传算法在冗余度弧焊机器人路径规划中的应用 [J]. 机器人, 1998, 20(5): 362—367.
- [3] 刘永. 大型机器人工作站智能化关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [4] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论及应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [5] 刘维. 精通 Matlab 与 C/C++ 混合程序设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

作者简介: 刘永, 男, 1973 年出生, 博士, 讲师。研究方向为机器人离线编程、过程自动控制, 完成省部级课题 4 项, 主持省自然科学基金 1 项。发表论文 20 余篇。

Email: liuy1602@yahoo.com.cn

experimental results can validate the current model and shows that the material flows and temperature distributions can be predicted precisely. From the research on material flows around the welding tool the formation of weld fash in friction stir welding is explained. The 3D material flow patterns on different thicknesses are studied, which is compared with the 2D case to show that the material flows obtained in 2D numerical simulation correspond to the ones near the bottom surface obtained in 3D simulation. The equivalent plastic strain distribution also shows that the shoulder can affect the material behaviors near the top surface and the effect of the shoulder becomes weaker near the bottom surface, which demonstrates that the 2D case correspond to the part near the bottom surface in 3D case.

Key words: friction stir welding; fully coupled thermo-mechanical model; material flow patterns; finite element method

Electrode arc equation and thermodynamic analysis of submerged arc welding with constant current power supply LIU Chaoying¹, HUANG Shisheng²(1. Faculty of Electronic Information and Mechatronic Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, Guangdong China; 2. Faculty of Mechanic Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640 China). p22—24

Abstract: The submerged arc welding (SAW) system consists of an inverted welding power supply with constant current output character, a wire feeder, a welding traveller and a controller. Taking the arc voltage and the setting voltage as input parameters, the controller gives a DC output, which is modulated in pulse width modulation scheme, to drive and adjust the wire feeding speed. A mathematical model related to the welding arc and the wire feeding speed during SAW is established in the form of a first order equation. The model described the balance relation between burning the procedure of the wire in the arc and the feeding of the wire via the wire-feeder. According to thermodynamic analysis of the power supply, molten pool and wire, a scheme for the selection of the wire diameter is obtained on basis of the diameter of the wire being in proportion to the square root of the welding current. A detailed equation between the wire diameter and the welding current is reported.

Key words: submerged arc welding; dynamic model; thermodynamic analysis; wire diameter

Optimal path modeling for redundant robot based on genetic algorithm LIU Yong¹, Wang Kehong¹, Yang Jingyu²(1. Department of Material Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China). p25—28

Abstract: To solve the optimizing problem of the path planning of robot with eleven degree-of-freedom, a multi-object mathematical model and solution plan has been proposed and analyzed. Using genetic algorithm as optimizing method, a adaptive degree function was built. The suitable parameter was obtained through lots of practices. The genetic algorithm procedure was designed and realized. Based on this algorithm, optimizing experiments were carried

out based on typical space transversal weld by using under 3 degree-of-freedom gantry and 6 degree-of-freedom robot. Results of experiments indicate that the suitable solution can be quickly found through the algorithm. This algorithm was simulated and also loaded to robot controller to do welding experiments. And the results show that robot joints move steady under the best position of robot placement and good welds have been acquired. It shows this method is correct and feasible.

Key words: redundant welding robot; path planning; genetic algorithm

Heating effect of plasma jet and particle flux in plasma spray

XIA Weisheng¹, ZHANG Haiou², WANG Guilan¹, YANG Yunzhen¹, ZOU Yang¹(1. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Digital Manufacturing and Equipment Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China). p29—32

Abstract The length of plasma jet was obtained on the basis of digital image processing and the CCD image gathering system, and heating effect was determined through the temperature rising of a substrate in the unit time by an IR pyrometer. Then comparative experiments of heating effect by plasma jet and particle flux were carried out under different spray distances and lengths of plasma jet to analyze their characteristics. Experimental results show that when the length of plasma jet is shorter than or equal to the spray distance, heating effect is dominated by plasma jet. However, if the length is longer than the spray distance, the heating effect of particle flux becomes more and more obvious, but the case for plasma jet drops rapidly. Therefore, the length of plasma jet as a characteristic evaluation index, can be adopted to select the reasonable spray distance. This is certified by the patterns and cross-section thickness profiles of deposited coatings under different spray distances.

Key words: plasma spraying; heating effect; plasma jet; particle flux; plasma jet length; spray distance

Fe-based alloy composite coating reinforced by $Ti(C_{0.3}N_{0.7})$ particle through laser cladding technology QI Yongtian, ZOU Zengda, QU Shiyao, ZHU Qingjun (School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China). p33—36

Abstract A new in-situ synthesis method is carried out to produce Fe-based alloy composite coating reinforced by $Ti(C_{0.3}N_{0.7})$ particle on the Q235 mild steel through CO_2 laser cladding technology. X-ray diffraction is used for phase identification in the composite coating. The microstructure of laser cladding layer is analyzed by means of optical microscopy, scanning electron microscopy, and electron probe microscopy analyzer. The microhardness distribution is measured by using microhardness tester. The results show that $Ti(C_{0.3}N_{0.7})$ particle is produced by an in-situ metallurgical reaction of TiN particle and graphite powder during laser cladding process. The shape of some $Ti(C_{0.3}N_{0.7})$ particle is similar to rhombus, and the others are irregular shape. Size of the fine $Ti(C_{0.3}N_{0.7})$ particles is within 0.1—5 μm , and evenly in dispersed the matrix. The micro-