

# 蚁群算法在白车身底板焊接路径规划中的应用

林巨广, 陈甦欣, 戴淮初, 黄文进  
(合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 利用 Delmia 软件建立了白车身底板的焊接工艺模型, 按照传统的机器人焊接路径规划对其进行仿真分析, 得到了焊枪走过的路程以及各焊点之间的平均距离等参数。阐述了蚁群算法的理论基础和算法流程, 依据该算法的计算思想并结合白车身底板焊接的自身特点, 设计了蚁群算法的计算程序, 从而找出了白车身底板焊接路径的最优解并且再次通过仿真得出新的参数, 并与之前参数进行对比。结果表明, 蚁群算法能够应用在焊接路径的规划研究上, 这也为今后焊接工艺的规划提供了新的思路。

**关键词:** 蚁群算法; 白车身; 焊接路径; 仿真

中图分类号: TH 181; TG 409 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2015)01-0005-05

## 0 序言

近年来国内汽车行业面临着快速创新和激烈竞争的局面,各大汽车生产企业为了能让自己立于不败之地,纷纷提高企业的汽车制造技术。其中焊接作为汽车生产的四大工艺之一,也成为各大企业重视的对象。特别是机器人焊接技术,不仅提高了车身整车和零件生产的自动化水平,而且相比于人工焊接,也极大地提高了焊接质量<sup>[1]</sup>。

据统计一台轿车白车身包括 300~500 个零部件、1 700~2 500 个定位销、4 000~5 000 个焊点,有 55~75 个焊接工作站<sup>[2]</sup>,如何规划焊接机器人焊接路径已经成为焊接工位规划的研究重点之一。目前机器人焊接路径常用的路径规划方法主要有模糊控制、神经网络、遗传算法以及人工势场法、A\* 算法和它们的改进算法等<sup>[3]</sup>。而蚁群算法是对自然界蚂蚁寻径觅食方式进行模拟而得出的一种仿生算法,在旅行商问题(TSP)、二次分配问题(QAP)、机器人路径规划等问题中具有广泛的应用,与焊接工艺相比两者具有相似之处,从理论上说蚁群算法可以为机器人焊接路径找到最优解。

文中使用蚁群算法,在 Delmia 仿真平台上建立了车身底板的焊接生产工作站,并模拟了机器人焊接生产过程,对焊接仿真路径进行了仿真、优化,结果显示利用蚁群算法得出的路径比传统的路径降低了工作时间。

收稿日期: 2013-07-19

基金项目: 国家科技支撑资助项目(2012BAF06B01); 国家智能制造装备发展专项资助项目(发改办高技[2011]2548 号)

## 1 研究的对象和方法

### 1.1 研究的对象

在焊接仿真过程中,首先应根据仿真确定的流程,将设计完成的白车身、输送装置、夹具与相关工装设备的数模导入到 Delmia 中,并选择合适的机器人,根据二维布局图形建立好工作站。图 1 是白车身底板焊接工位在现场的点焊工作站。



图 1 车身底板点焊工作站  
Fig. 1 Workstation of UB in spot welding

### 1.2 蚁群算法简介

蚁群算法是一种基于解空间参数化概率分布模型的搜索算法框架,通过在解空间参数化概率分布模型上产生可行解,可行解用来更新参数化概率模型,即更新解空间参数化概率分布函数,使得在新模型上的搜索能集中在高质量的解搜索空间内,如图 2 所示。每一次寻找路径结束之后,蚂蚁就会在路径上留下相应浓度的信息素,并更新整条路径上的信息素浓度。根据算法的正反馈机制,随着时间的

推移,路径 ABD 上信息素会越来越多,使得蚂蚁最终都会放弃 ACD 路径而选择 ABD 路径。

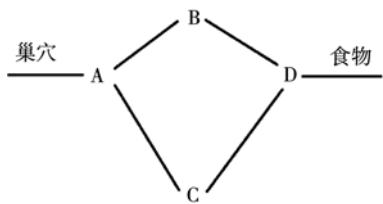


图2 蚁群的寻食路径

Fig. 2 Path of ant colony searching for foods

### 1.3 研究的思路

在焊接的各条路径中为了比较全面的衡量蚁群算法的优劣程度,常使用3个评价指标:最佳性能指标、时间性能指标和鲁棒性能指标<sup>[4]</sup>。基于蚁群算法的应用实例使用焊接路径的相对误差率 $\psi$ 、焊接路径的相对波动率 $\varphi$ 对路径的优劣程度进行评价,即

$$\psi = \left| \frac{l - l^*}{l^*} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$\varphi = \left| \frac{s - s^*}{s^*} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: $l, s$  分别为使用蚁群算法后路径的平均值、均方差; $l^*, s^*$  为初始路径的平均值、均方差。

## 2 焊接路径优化

### 2.1 底板仿真模型的分析

在焊接过程中,底板线具有焊点分布较广、焊枪喉深较大、上件工位较多、焊枪选型较统一等特点,如图3所示。由于在焊接过程中,经常要考虑机器人站位、焊枪与被焊工件、机器人与夹具之间的干涉问题,所以在实际工作过程中焊枪的行走路径非常复杂,迫切需求相关理论去解决路径最优解问题,以满足焊接节拍的要求。

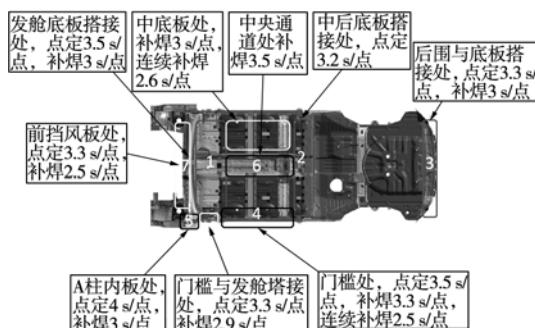


图3 底板焊接仿真工位

Fig. 3 Simulation workstation of UB welding

### 2.2 原始规划路径的仿真

仿真模型建好后,按照仿真流程,对车身底板进行初次仿真。在这仿真中焊枪是按照初始设置的顺序进行焊接的。由于其规划方法是仿真人员根据自己的工程经验进行确定的,因此针对不同的工程技术人员技术背景、资历不同,可能就会有多种不同的焊接路径规划方案。有些不合理的方案会使焊接机器人出现焊接作业顺序不合理、生产时间长、机器人焊接过程姿态变化大等问题,所以在仿真规划过程中要听取专家的经验,保证焊枪与被焊工件之间、焊枪与夹具之间没有干涉,机器人工作过程中姿态变化少。

### 2.3 蚁群算法的目标函数

在觅食过程中,蚂蚁需要经过 $N$ 个地方,共有 $\frac{(N-1)!}{2}$ 条路径。如何在不重复地走完一个地方的条件下,选择一条最优的路径,使蚂蚁在最短的时间下找到食物,这是研究重点。图4是假设蚂蚁需要经过的路径。

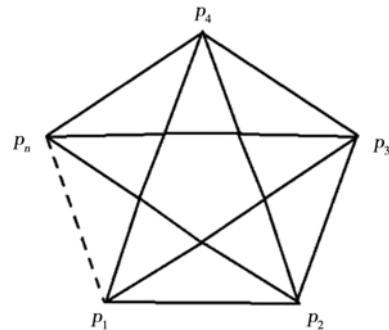


图4 蚁群路径

Fig. 4 Path of ant colony

已知路径顺序约束集 $L = \{l_{ij} \mid i, j \leq n, i \neq j\}$ ,地点集 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ ,路径 Euclidean 长度集 $D = \{p_1p_2, p_2p_3, \dots, p_ip_j\}$ ,每条路径花费的时间集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。则目标函数的数学模型为

$$p_ip_j = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3)$$

$$f(D) = \min \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n p_ip_j \quad (4)$$

各条路径中相邻目标点之间距离有所不同,求出最优路径后,为了从多方面说明此路径的优点,可以比较各路径的平均值( $\bar{f}_k(D)$ )和均方差( $f_k(D)$ )。从均值和均方差可以看出已规划的焊点与理论焊点的波动范围,若波动范围大,说明已规划焊点效果不好,这为今后焊点的规划提供了理论基础和一种焊点规划优劣程度的评价方法。各路径平均值和均方

差为

$$\bar{f}_k(D) = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n p_i p_j, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$f_k(D) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n [f_k(D) - \bar{f}_k(D)]^2}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

## 2.4 程序设计

确定好蚁群算法的顺序后,就可以得到算法的焊接路径优化的流程图,如图5所示.

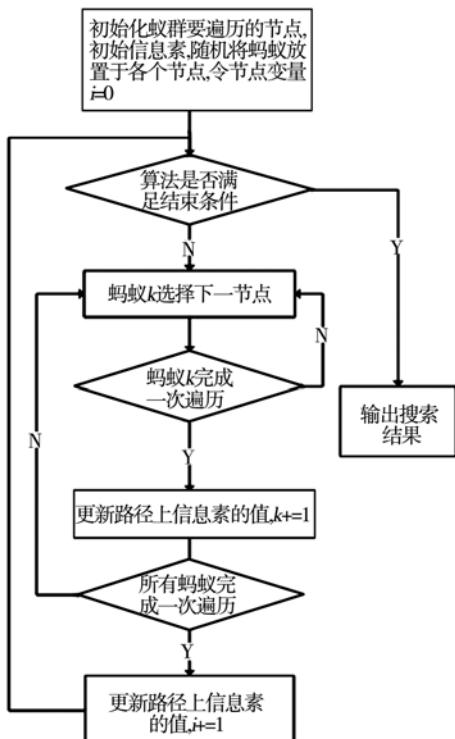


图5 蚁群算法流程

Fig. 5 Flow chart of ACO

当蚂蚁在某一路径上行驶时,这条路径上的信息素得到加强,而其它路径上的信息素是挥发,即

$$\left. \begin{aligned} \tau_{ij}(k) &= (1 - \rho_{k-1}) \tau_{ij}(k-1) + \frac{\rho_{k-1}}{|W|}, \\ (i,j) \text{ 是路径 } W \text{ 上的一条弧} \\ \tau_{ij}(k) &= (1 - \rho_{k-1}) \tau_{ij}(k-1), \\ (i,j) \text{ 不是路径 } W \text{ 上的一条弧} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $\tau_{ij}$ 为路径上的信息素,并且假设在初始时刻,各边的信息素量一样的,记为 $\tau_{ij}(0) = \tau(0)$ ; $\rho_k$ 为路径上信息素的挥发因子, $\rho_k \in (0, 1)$ ;通常使用 $1 - \rho_k$ 来反应蚂蚁个体之间相互影响的强弱,当 $\rho_k$ 过大时,以前搜索过的路径被再次选择的可能性增大,会影响到算法的随机性和全局性,若 $\rho_k$ 过小时,会使算法的收敛速度降低.

在 $t$ 时刻,当蚂蚁从一条途径选择另一条途径时,各路径都是以相同的概率被选择,计算公式为<sup>[5]</sup>

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in tabu^k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & j \in tabu^k \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $tabu^k$ 为禁忌表,表示蚂蚁下一步允许选择的目标; $\alpha$ 为信息启发式因子,反映了蚂蚁在运动过程中所积累的信息在蚂蚁运动时所起的作用,其值越大,则该蚂蚁越倾向于选择其它蚂蚁经过的路径,蚂蚁之间协作性越强; $\beta$ 为期望启发式因子,它反映了蚂蚁在运动过程中启发信息在蚂蚁选择路径中的受重视程度,其值越大,则该状态转移概率越接近于贪心规则; $\tau_{ij}(t)$ 表示路径上的信息素; $\eta_{ij}(t)$ 为启发函数,它是相邻两个城市之间的距离的倒数; $p_{ij}(t)$ 表示在 $t$ 时刻蚂蚁 $k$ 由元素(城市) $i$ 转移到元素(城市) $j$ 的状态转移概率.由于算法的记忆性,在一次循环中不会重复选择已经选择过的目标.当循环结束时,禁忌表清空,蚂蚁就可以重新自由选择目标.

利用Visual Studio 2008开发的应用程序,定义变量:禁忌表、所允许走过的焊点的坐标、信息素变化矩阵、焊点之间的距离矩阵、路径长度、起始焊点和当前焊点等.

## 3 实例验证

由于白车身是由数千个焊点将数百个薄板冲压零件拼装得到的<sup>[6,7]</sup>,在被机器人焊接的过程中,极易因受热和受压而出现应力和变形,而且还会导致焊接结构产生残余应力和残余变形,针对焊接顺序不仅影响残余应力的产生,而且对残余应力的分布和大小也有较大的影响<sup>[8]</sup>,所以合理地规划焊点布局可以有效地指导规划焊接路径,这样可以有效地避免板件的应力和变形的产生.

多机器人的焊点分配是一个多约束问题,在实际的焊点规划中,必须充分考虑各种约束条件,才能保证焊接的质量并且在焊接过程中不发生碰撞,顺利完成焊接任务<sup>[9]</sup>.在机器人焊接过程中,主要存在几何约束和工艺约束.根据不同焊接部位的焊点,确定不同的约束条件.一般情况下焊点可分为点定焊点和补焊焊点.为了确保板件之间的相对位置关系,保证板件之间不产生滑移、脱落等现象,在夹具上就对板件进行了点定焊接,所以点定焊点对车身焊接的精度、性能、质量等方面具有重要的影响作用;而补焊焊点是对点定焊点的补充,是在点焊焊接完成后,为了再次保证车身的焊接质量.在规划

焊点时,应综合考虑焊接原则、生产线现场条件、并进行工艺路线分析以及产品分块<sup>[10]</sup>,在满足被焊工件工艺性的要求下,所焊的焊点应分布在同一区域,这样可以保证焊钳作业范围适中、姿态简单、变换少、不频繁,机器人关节能够沿着一个方向旋转就能把工作完成,有效地降低焊点的焊接时间<sup>[11]</sup>.

### 3.1 机器人运动平稳性分析

机器人在焊接过程中,共有6个轴在动作。焊枪作为机器人臂的负载,也可以充当机器人的第7轴,扩大机器人的工作范围。为了保证机器人系统的稳定性,机器人的1~3轴是主要轴,由于其较大的惯量,不应发生太大的变化,而4~6轴是腕部轴,惯量较小,并且对焊点具有快速定位的特点,所以在机器人示教过程中,应更多地使机器人的4~6轴进行变化。同时为了减小机器人臂的摆动幅度,减少机器人之间的相互干涉,在确保焊枪能对所有焊点可达的情况下,保证机器人的第1,4和6轴不产生“旋转”效应。

### 3.2 机器人焊接规划的数学模型

根据文献[9]可知,工程中常用的焊点规划分配方法可以归结为0-1背包问题。在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<sup>[12]</sup>。由于要使时间最小化,故可取价值的倒数作为研究对象。

给定n个焊点 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ ,m个机器人 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ ,令 $X_{ij} = 1$ 表示焊点*i*属于机器人*j*, $X_{ij} = 0$ 表示不属于。 $C_i, C$ 是常数, $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示每个焊点的焊接时间, $C$ 表示工位的预定节拍时间, $V_{ij}$ 表示焊点和机器人之间的价值,要求将所有焊点都能分配给机器人,并使每个机器人的工作时间不超过预定的工位节拍时间,则机器人焊接焊点的背包问题的几何约束的数学模型可以描述为

$$\text{目标函数 } \max V_{ij} = \left( \min \sum_{i=1}^n C_i X_{ij} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$\text{约束条件 } s. t. \begin{cases} \min \sum_{i=1}^n C_i X_{ij} \leq C \\ X_{ij} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (10)$$

### 3.3 焊接仿真结果分析

以底板的UB020工位为例进行说明。首先初始化每只蚂蚁的信息,然后根据设定的循环次数,蚂蚁分别对最优路径进行寻找。每只蚂蚁的寻找过程为:首先判断其是否满足结束条件,如果不满足则根据信息素矩阵选择下一个焊点,然后焊点禁忌表,当蚂蚁遍历完所有焊点时,更新信息素矩阵,并将其当

前路径与最优路径进行比较,如果优于当前最优路径,则将当前路径更新为最优路径。如此反复迭代,直到所有蚂蚁走完规定的次数。根据程序的结果,在Matlab中利用三维曲线函数生成了焊接路径优化前后的空间模式,如图6所示,可明显看出优化后的焊接路径要优于传统路径。图6中x,y,z表示焊点的坐标。

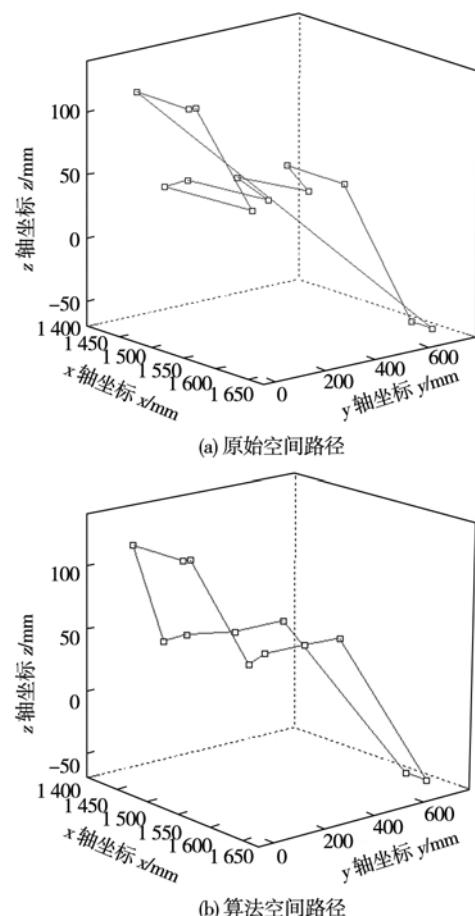


图6 两种路径的比较  
Fig. 6 Comparison between two 3D paths

通过在Delmia仿真平台上的试验,得出原始焊接路径焊枪走过的路程总长为1 323.199 mm,各焊点之间的平均距离为110.267 mm,均方差为19.61 mm;而经过蚁群算法优化后,焊枪走过的路程总长为1 279.763 mm,各焊点之间的平均距离为106.647 mm,均方差为10.83 mm。相比于传统的路径,蚁群算法得到的路径,相对误差率 $\psi = 3.3\%$ ,也就是所走的路程约减少了3.3%,相对波动率 $\varphi = 44.77\%$ ,如图7所示。图7中实线表示焊枪所需要经过的路径,虚线表示不是焊枪所需要经过的路径,即“首尾不封闭”的焊接模式。若采用“首尾封闭”的焊接模式,相对误差率 $\psi = 15\%$ ,相对波动率 $\varphi = 66.86\%$ 。通过试验分析可知,无论是采用哪种模

式,在算法的规划下,优化后焊接路径均比传统的路径效率高,这对汽车生产企业来说,具有重要的指导意义。

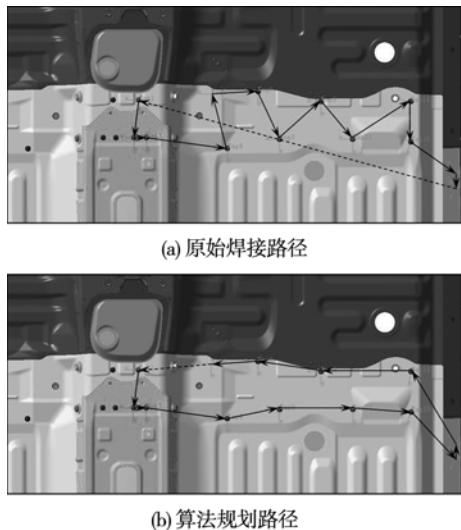


图7 焊接路径的比较

Fig. 7 Comparison between two paths

## 4 结 论

(1) 将蚁群算法应用于白车身焊接路径的规划,可以缩短焊枪的行走路程,明显地提高了焊接的生产效率。

(2) 比较使用算法前后的两个参数:相对误差率 $\psi$ 和相对波动率 $\varphi$ ,可知蚁群算法在焊接路径规划中的成功应用,为焊接工艺的优化提供了重要的理论价值。

## 参考文献:

- [1] 庞旭旻. 基于GA及DELMIA的白车身焊接机器人三维路径规划研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [2] Dong Wang, Li Hui, Teng Xiaotong. Off-line programming of spot-weld robot for car-body in white based on robcad[C]// Proceeding of the 2007 IEEE, Harbin: 2007: 763–768.
- [3] 胡世亮, 席欲庚. 一种通用的移动机器人路径规划仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1714–1720.  
Hu Shiliang, Xi Yugeng. A general-purpose moving robot path-planning simulation system [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1714–1720.
- [4] 段海滨. 蚁群算法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] 王家海, 王毅. 基于蚁群算法的白车身焊接机器人路径优化研究[J]. 制造业自动化, 2008, 5(30): 16–17, 23.  
Wang Jiahai, Wang Yi. A study on BIW welding robot path planning based on ant colony algorithm[J]. Manufacturing Automation, 2008, 5(30): 16–17, 23.
- [6] 林忠钦, 胡敏, 米新民, 等. 轿车白车身点焊装配过程有限元分析[J]. 焊接学报, 2001, 22(1): 36–40.  
Lin Zhongqin, Hu Min, Mi Xinmin, et al. FEM analysis or spot welding process in autobody manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(1): 36–40.
- [7] 赵欣, 张延松, 陈关龙, 等. 基于神经网络优化的车身镀锌板点焊性能预测[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 77–80, 84.  
Zhao Xin, Zhang Yansong, Chen Guanlong, et al. Performance prediction in spot welding of body galvanized steel sheets based on artificial neural network and its optimization[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(12): 77–80, 84.
- [8] 黎超文, 王勇, 韩涛. 焊接顺序对T形接头残余应力和变形的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 37–40.  
Li Chaowen, Wang Yong, Han Tao. Effect of welding sequences on welding residual stress and distortion of T-joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 37–40.
- [9] 晁永生, 刘海江. 白车身焊接机器人加工路径优化和仿真[J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 442–445.  
Chao Yongsheng, Liu Haijiang. Welding robot path optimization for body in white[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(4): 442–445.
- [10] 尹萍. 白车身生产线焊点规划方法研究与应用[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] 丁士祥. 车身焊接机器人自动线工艺设计方法[J]. 金属加工(热加工), 2010(10): 64–66.  
Ding Shixiang. Process design method of welding robot automatic line for BIW[J]. Mechanist Metal Forming, 2010(10): 64–66.
- [12] 刘海江, 张春伟, 徐君杰, 等. 基于遗传算法的白车身焊接机器人焊点分配[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 725–729.  
Liu Haijiang, Zhang Chunwei, Xu Junjie, et al. Assigning welding point of car-body-in-white to multi-robots based on genetic algorithm[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(5): 725–729.

**作者简介:** 林巨广,男,1963年出生,博士,研究员,博士研究生导师。主要从事汽车自动化装备、汽车试验台等方面研究。发表论文100余篇。Email: linjuguang@263.net

**通讯作者:** 陈甦欣,男,硕士,副教授,硕士研究生导师。Email: chensuxin2003@163.com