

# 基于遗传算法的喷涂机器人喷枪路径规划

赵德安<sup>1</sup> 陈 伟<sup>2</sup> 汤 养<sup>1</sup>

1. 江苏大学, 镇江, 212013      2. 江苏科技大学, 镇江, 212003

**摘要:**根据复杂曲面的几何特性和拓扑结构,对曲面进行分片处理,在每一片上进行喷涂机器人喷枪路径的规划。将整个表面上的喷枪路径顺序组合问题看成乡村邮递员问题(ORPP),并采用哈密尔顿图形法表示 ORPP,用遗传算法进行求解。个体编码采用代表哈密尔顿图中顶点的实数编码和代表每片上路径方向的编码相结合的方法,可实现对问题空间的全局快速寻优。最后以某品牌汽车车身后备箱为喷涂对象进行仿真实验,实验结果验证了所提算法的有效性。

**关键词:**喷涂机器人;路径规划;遗传算法;路径组合

**中图分类号:**TP24      **文章编号:**1004—132X(2008)07—0777—03

## Tool Path Planning of Spray Painting Robot Based on Genetic Algorithms

Zhao Dean<sup>1</sup> Chen Wei<sup>2</sup> Tang Yang<sup>1</sup>

1. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

2. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212003

**Abstract:** A complex curved surface has to be divided into several patches and the path planning for each patch was performed. The path integration problem can be modeled as an open rural postman problem (ORPP), and a graph transformation method by using a Hamiltonian graph represented all the required edges in the ORPP. A genetic algorithm was advanced to solve the ORPP. The chromosome of GA made use of both numbers of the vertexes in the Hamiltonian graph and numbers of the edges in the original graph, which was a new encoding method and was able to search optimal solutions within the entire fields. Simulations were carried out on automotive body parts and the results validate the proposed algorithm.

**Key words:** spray painting robot; path planning; genetic algorithm; path integration

### 0 引言

喷涂机器人喷枪路径规划是喷涂机器人离线编程法中的关键技术。以平面或规则曲面为作业对象的喷涂机器人喷枪路径规划方法已逐渐成熟,并得到了实验论证<sup>[1,2]</sup>。近年来,由于汽车、航天、造船等工业领域的要求,有关如何在复杂曲面上进行喷涂机器人喷枪路径的规划已成为国内外新的研究热点。文献[3-6]提出将复杂曲面分片处理后在每一片上进行喷枪路径规划的方法,但并未考虑每片上的喷枪路径优化组合问题,无法进一步提高喷涂机器人的工作效率。

本文在前人研究成果的基础上,重点讨论了复杂曲面分片后的喷枪路径组合问题,采用遗传算法(genetic algorithm,GA)对该问题进行求解,并进行了仿真实验和分析,实现了喷涂机器人喷枪路径的优化。

### 1 喷涂机器人喷枪路径规划方法

#### 1.1 复杂曲面分片

许多复杂曲面有以下两个特点:①曲面是一

个复连通区域;②曲面上某些点的曲率比较大。这两种情况下使用一般的计算机辅助几何设计(computer aided geometric design,CAGD)中的曲面造型方法是很难处理的,但如果采用曲面分片的方法,就可以使问题简化。为了高效率地生成复杂表面上的喷枪路径,首先对复杂曲面进行三角网格划分,再按照相邻三角片(面)之间的连接规则生成若干较大的片,并保证每个片为单连通区域且可近似看为一个平面,最后在每个较大的片上使用 bounding box 法生成喷枪路径<sup>[3]</sup>。各个三角面连接成片的步骤如下<sup>[6]</sup>:①先指定一个最大偏离角 $\beta$ ,再指定任意一个三角面为初始三角面;②计算初始三角面周围所有三角面的法向量与初始三角面法向量的夹角,如果夹角小于 $\beta$ ,则将该三角面与初始三角面连接成片;③寻找尚未连接成片的三角面作为新的初始三角面,重复第②步,直到所有三角面都连接成片。

由此可见,只要能指定适当的最大偏离角 $\beta$ ,即可将每个片近似看为一个平面。复杂表面上的喷涂机器人喷枪路径生成步骤如图1所示。

#### 1.2 每片上的喷枪路径规划

喷涂机器人喷枪路径通常有两种模式:Z字

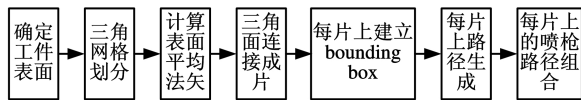


图 1 喷枪路径生成步骤系统

形路径和螺旋形路径。 $Z$  字形路径规划比较简单,缺点是喷涂后在每一片的边界处涂层厚度均匀性较差;螺旋形路径避免了这个缺点,但在喷涂过程中喷枪路径上容易出现断点。图 2 所示的是同一个平面上不同的路径模式和喷枪走向,其中图 2a~图 2c 是  $Z$  字形路径,图 2d 是螺旋形路径。复杂曲面分片后,可按照每一片上不同的路径模式和喷枪走向建立喷枪路径的评价函数,并以评价函数值最大为优化目标,选出最佳喷枪路径模式和走向<sup>[5]</sup>。

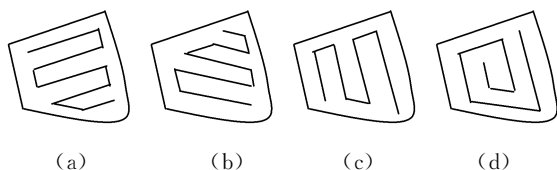


图 2 同一片上的不同路径模式和走向

喷涂机器人喷涂作业的优化目标之一是尽可能使工件表面上的涂层厚度  $q$  均匀,因此,喷到工件表面上的涂料需要部分重叠。图 3a 为两条相邻喷枪路径上重叠区域俯视图,图 3b 为其涂层侧面剖视图。采用 bounding box 法设计喷枪路径时,确定两个喷涂行程的涂层重叠区域宽度  $d$  是生成喷枪路径的关键因素,在完成喷枪路径模式和走向设计后,可选取工件表面上涂层厚度方差最小为优化目标,利用黄金分割法解出  $d$  的优化值,最终生成每片上的喷枪路径<sup>[5-7]</sup>。

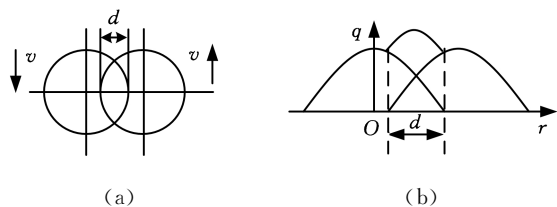


图 3 重叠区域涂层分布示意图

## 2 喷枪路径的优化组合

### 2.1 喷枪路径组合问题的转化与建模

喷涂机器人喷涂作业的另一个优化目标是使喷涂时间最短。复杂曲面分片后每片上的喷枪路径组合如图 4 所示。为简化问题,图中将每一片上的路径看成是一条边。喷枪路径组合问题的实质就是喷枪依照怎样的顺序喷涂每一片,使得喷枪经过的路径最短。因此,可将喷枪路径组合问题看成乡村邮递员问题(rural postman problem, RPP)<sup>[8]</sup>。按照图论原理,假设一个无方向的连接

图  $G(V, E, R, \omega; E \rightarrow Z^+)$ , 其中,  $V$  表示顶点集,  $E$  表示边集,  $R$  表示  $E$  的任意一个子集,  $\omega$  表示边的权(实际喷枪路径的长度)。RPP 问题就是在图  $G$  中求出一条经过所有边且只经过一次的具有最短距离的回路。由于喷涂机器人喷枪路径组合不需要形成回路,故可将喷枪路径组合问题定义为开环乡村邮递员问题(open rural postman problem, ORPP)。与旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)类似,ORPP 问题也是一个典型的 NP 难题<sup>[8]</sup>。

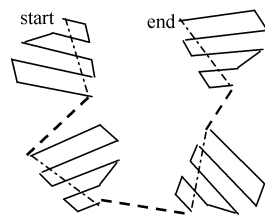


图 4 不同片上的喷枪路径组合

设  $D = \{d_{ij}\} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$  是由图  $G$  中不在同一条边上的顶点  $i$  和顶点  $j$  之间的最短距离所组成的集合,而各个顶点间的距离可使用 Floyd 算法算出。为使问题进一步简化,采用 Kang 等<sup>[9]</sup> 提出的哈密尔顿图形法表示 ORPP 问题。如图 5 所示,用一个顶点代表原始图  $G$  中的一条边,从而形成一个完整的哈密尔顿图:

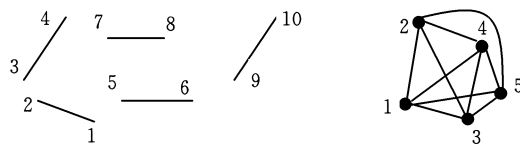


图 5 将原始图  $G$  转变为哈密尔顿图  $g$

$g(V^H, E^H, \omega^H)$ , 其中,  $V^H$  表示哈密尔顿图的顶点集,  $E^H$  表示边集,  $\omega^H$  表示边的权且  $\omega^H \in D$ 。图  $g$  中,每条边的权值是不固定的,其值由原始图  $G$  中同一条边上的顶点的排列顺序决定。设对于图  $g$  中顶点集  $V^H = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  的一个排列顺序为  $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ ,  $t_i \in V^H$ , 则 ORPP 问题可表示为

$$\min \tilde{L} = \sum_{i=1}^n \omega_i + \sum_{j=1}^{n-1} \omega_j^H$$

其中,  $\omega_i$  表示图  $g$  中  $t_1, t_2, \dots, t_n$  顶点对应的原始图  $G$  中的边的权值,  $\omega_j^H$  表示图  $g$  中边的权值。由于原始图  $G$  中的每条边的权  $\omega_i$  在本问题中认为是定值,故上述优化问题可简化为

$$\min L = \sum_{j=1}^{n-1} \omega_j^H$$

由此,ORPP 问题就变为在哈密尔顿图中找到一个所有顶点的排列,使得按照这个排列喷枪经过

的路径  $L$  最短。

2.2 遗传算法求解 ORPP 问题

GA 具有并行搜索、鲁棒性强和搜索效率高等优点,在求解组合优化领域的 NP 问题上显示出强大的搜索优势<sup>[10]</sup>,因此可用于求解 ORPP 问题。由于喷涂机器人喷枪路径组合问题自身的特点,应用 GA 时,需要特殊的个体编码及交叉、变异等遗传操作方法。

(1)个体编码。个体编码的长度为  $|V^H|$ 。由于在哈密尔顿图中每个顶点表示原始图  $G$  中的一条边,为了区分每条边的起点和终点(即曲面每片上喷枪路径的起点和终点),个体编码中除了包含顶点信息的实数编码  $P_i$  外,还要有表示原始图  $G$  中的每条边方向的二进制编码  $P_{s_i}$ 。例如,当  $|V^H| = 7$  时,随机产生的一个个体的编码  $P_i = 3125746, P_{s_i} = 0010110$ 。其中  $P_{s_i}$  中 1 值表示与初始设定的边的方向相同,0 值表示与初始设定的边的方向相反。

(2)适应度函数。适应度函数值用来决定哪些个体允许进入下一轮进化,哪些需要从种群中剔除。为了便于在遗传算法中进行选择操作,一般将最小值优化问题转换为最大值优化问题,可以将适应度函数取为  $F = U - L$ ,其中,  $U$  应该选择一个合适的数,使得所有个体的适应度为正值。在群体进化过程中,为了选择出适应度高的个体,种群规模保持为定值  $P_{size}$ ,在每一代种群运算之前先对种群中的所有个体按照其适应度大小进行降序排列,并将适应度值最高的  $P_{size}$  个个体遗传到下一代。

(3)交叉操作。交叉操作是以某一概率相互交换某两个个体之间的部分编码,生成新个体的过程。这里对  $P_i$  采用顺序交叉(order crossover, OX),对  $P_{s_i}$  采用双点交叉。OX 保证了在进行个体巡回路线的有效顺序修改时各个顶点的原有排列顺序基本不变,其具体操作步骤可参考文献[11]。OX 操作中父代个体原本是随机选取的,但为了生成性能更加优良的后代,先在种群中随机选取五对个体,再选择其中适应度值最高的一对个体作为父代进行 OX 操作。双点交叉是在个体编码串中随机设置两个交叉点,然后再进行部分基因交换。交叉操作的一个例子如下:父代编码  $P_1 = 31 \underline{25746}, P_{s_1} = 0 \underline{010110}, P_2 = 67 \underline{42513}, P_{s_2} = 1 \underline{101101}$ ;子代编码为  $C_1 = 31 \underline{25746}, C_{s_1} = 1 \underline{010101}, C_2 = 31 \underline{42576}, C_{s_2} = 0 \underline{101110}$ 。

(4)变异操作。对  $P_i$  采用倒位变异,即将个体编码中随机选取的两个基因座之间的基因逆序排

列,从而产生一个新的个体。对  $P_{s_i}$  采用基本变异,即对个体编码随机挑选一个或多个基因座,并对这些基因座的基因值取反变动。

3 仿真实验

以某品牌 SUV 汽车车身后盖为喷涂对象进行仿真实验。按照复杂曲面分片方法,车身后盖被分为 7 片,即遗传算法中个体编码  $P_i$  和  $P_{s_i}$  各为 7 位。算法中各参数选择如下:种群规模  $P_{size} = 100$ ,交叉概率  $x_{rate} = 0.20$ ,变异概率  $m_{rate} = 0.05$ ,最大进化代数  $T = 100$ 。不同的解对应的进化过程如图 6 所示。从图中可看出最优个体对应的目标函数值随进化过程呈单调下降趋势,最后趋于定值;而在进化大约 70 代后,平均适应度基本不再变化,算法收敛。

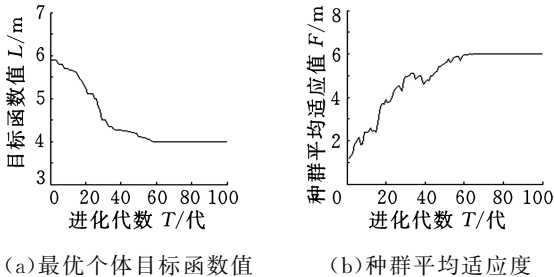


图 6 仿真结果图形

表 1 所示的是在对车身后盖喷涂作业时,采用遗传算法的路径组合和随机路径组合喷枪所经过的路径总长度和喷涂时间的比较。由此可看出使用基于遗传算法的路径组合时,喷涂时间大约节约了 18%,从而提高了喷涂机器人的喷涂效率。

表 1 遗传算法与随机算法仿真结果比较

	基于遗传算法的路径组合	50 次随机路径组合平均值
路径总长度(m)	29.5	35.2
喷涂时间(s)	91.2	110.9

4 结论

针对复杂曲面上的喷涂机器人喷枪路径优化组合问题的特点,在遗传算法中采用改进的个体编码、交叉、变异操作。仿真实验表明该算法收敛速度快,计算效率高,并能有效缩短喷涂作业的时间,为建立新型喷涂机器人离线编程系统奠定了基础。提出的算法还可以用于其他类型机器人路径规划,例如机器人研磨复杂曲面的路径规划、复杂曲面上的清洁机器人路径规划等。

(下转第 792 页)

社,2003.

- [3] 阎胜文,瞿金平,韦建召.单螺杆振动塑化挤出机螺杆转动对其轴向振动的影响[J].中国机械工程,2006,17(9):941-945.
- [4] 《数学在螺杆泵设计与制造中的应用》编写组.数学在螺杆泵设计与制造中的应用[M].北京:科学出版社,1977.
- [5] Atoyan S V, Generalov M B, Trutnev N S. Calculation of Force Parameter During Compaction of Powder Materials in Screw Extruders[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1998, 34(11): 730-734.
- [6] Böhme G, Wunsch O. Analysis of Shear-thinning Fluid Flow in Intermeshing Twin-screw Extruders [J]. Archive of Applied Mechanics, 1997, 67: 167-178.
- [7] Sombatsompop N, Panapoy M. Effect of Screw Rotating Speed on Polymer Melt Temperature Profiles in Twin Screw Extruder [J]. J. Material Sci., 2000, 35(1): 6131-6137.
- [8] Kougiya F A. Improvement in Extruder Productivity [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2003, 39(7): 381-383.
- [9] 张琳,瞿金平,李建波.振动力场强化单螺杆挤出固体输送的离散单元法模拟[J].中国机械工程,2006,17(22):2406-2410.
- [10] 吴序堂.齿轮啮合原理[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [11] Huang Hanxiong, Jiang Guo, Mao Shanqiang. Microstructure and On-line Shear Viscosity of PP/nano-CaCO<sub>3</sub> Composites Prepared by Twin-screw Extruder[J]. J. Material Sci., 2006, 10(1): 1007-1012.
- [12] Tatarnikov A A, Burtelov L V, Gorbunov D B. Effect of Leakage Flow on Processing of Resinous Mixtures in the Pressure Zone of an Extruder[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2005, 41(3): 174-179.
- [13] Kajiwarra T. Numerical Study of Twin-extruders by Three Dimensional Analysis-development of Analysis Technique and Evaluation of Mixing Performance for Full Flight Screw[J]. Polym. Eng. Sci., 1996, 36(16): 21-42. (编辑 袁兴玲)

(上接第 779 页)

# 参考文献:

- [1] Antonio J K, Ramabhadran R, Ling T L. A Framework for Trajectory Planning for Automated Spray Coating[J]. International Journal of Robotics and Automation, 1997, 12(4): 124-134.
- [2] 刁训娣,赵德安,李医民,等.喷漆机器人喷枪轨迹设计及影响因素研究[J].机械科学与技术,2004(4):396-398.
- [3] Sheng W H, Xi N, Song M. Automated Cad-guided Robot Path Planning for Spray Painting of Compound Surfaces [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tankamutsa:Japan,2000:1918-1923.
- [4] Chen H P, Xi N, Chen Y. Cad-guided Spray Gun Trajectory Planning of Free-form Surfaces in Manufacturing[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2003, 2(6): 47-69.
- [5] Sheng W H, Chen H P, Xi N. Tool Path Planning for Compound Surfaces in Spray Forming Processes [J]. Automation Science and Engineering, 2005, 2(6): 240-249.
- [6] Chen H P, Xi N, Sheng W H. A General Framework for Automatic CAD-guided Tool Planning for Surface Manufacturing [C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei:China, 2003:3504-3509.
- [7] 陈伟,赵德安,汤养.自由曲面喷漆机器人喷枪轨迹优化[J].农业机械学报,2008,39(1):147-150.
- [8] Cook C, Schoenefeld D A, Wainwright R L. Finding Rural Postman Tours [C]//Proceedings of the 1998 ACM symposium on applied computing, Atlanta:USA,1998:318-326.
- [9] Kang M, Han C. Solving the Rural Postman Problem Using a Genetic Algorithm with a Graph Transformation [C]//Proceedings of the 1998 ACM Symposium on Applied Computing, Atlanta: USA, 1998:356-360.
- [10] 胡燕海,严隽琪,叶飞帆.基于遗传算法的混合流水车间构建方法[J].中国机械工程,2005,16(10): 888-891.
- [11] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.

(编辑 马尧发)

**作者简介:**魏 静,男,1978 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为机械传动、新型双螺杆捏合混炼机的研制与开发等。发表论文 5 篇。**张光辉**,男,1937 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。**李凤吉**,男,1982 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室硕士研究生。**江春来**,男,1980 年生。重庆大学机械传动国家重点实验室硕士研究生。

**作者简介:**赵德安,男,1956 年生。江苏大学电气信息工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为机器人控制、智能控制、计算机控制。发表论文 60 余篇。**陈 伟**,男,1981 年生。江苏科技大学电子信息学院助教。**汤 养**,女,1980 年生。江苏大学理学院讲师。