

自由曲面喷漆机器人喷枪轨迹优化^{*}

陈伟 赵德安 汤养

【摘要】 根据实验数据确定平面上的涂层累积速率二次函数后,建立了自由曲面上的漆膜厚度数学模型。在此基础上生成喷漆机器人喷枪空间路径,得出喷枪轨迹优化设计是带约束条件的多目标优化问题,并选取时间最小和漆膜厚度方差最小作为目标函数,应用带权无穷范数理想点法进行求解。最后通过计算机仿真的结果,论证了数学模型和优化算法的可行性。

关键词: 喷漆机器人 自由曲面 轨迹 优化 仿真

中图分类号: TP242.2; TG174.461

文献标识码: A

Trajectory Optimization on Robotic Spray Painting of Free-form Surfaces

Chen Wei¹ Zhao Dean² Tang Yang²

(1. Jiangsu University of Science and Technology 2. Jiangsu University)

Abstract

Due to the complex geometry of free-form surfaces, generating paint gun optimization trajectories for free-form surfaces to satisfy paint thickness requirement is still a challenge. A quadratic function of the paint deposition rate on a plane was proposed according to the experimental data, and then a mathematical model of film thickness on a free-form surface was established. Instead of widely used parametric representation of surfaces, a planar facet scheme was used to obtain the painting surfaces approximately. A multi-objective constraint optimization problem was formulated for the trajectories optimization. An optimal tool trajectory with an optimal time and film quantity deviation was generated by the weighed ideal point approach. The generated trajectory was verified by the simulation results. The results show that the developed optimal tool planning algorithm can be applied to generate optimal tool trajectories.

Key words Spray painting robot, Free-form surface, Trajectory, Optimization, Simulation

引言

早期喷漆机器人编程中普遍采用“人工示教法”,这种方法存在不少缺点。采用喷漆机器人离线编程系统,利用计算机自动寻找出产生最佳喷涂效果的喷枪运动轨迹,则可以解决上述问题,提高喷涂质量。近年来,在平面上或规则曲面上的喷漆机器人喷枪轨迹设计与优化的理论已逐渐成熟,并得到了实验论证^[1~3]。然而,在实际生产中,绝大部分的工件表面形状都是不规则的自由曲面。由于自由

曲面的几何特性十分复杂,目前在自由曲面上喷漆的喷枪轨迹优化研究工作还很少。

本文根据自由曲面特点,在漆膜厚度数学模型的基础上,具体研究自由曲面上的喷漆机器人喷枪轨迹优化问题。

1 数学模型的建立

1.1 喷枪轨迹数学模型

喷枪位置和姿态在固定的笛卡尔坐标系 XYZ 中可定义为一个 6 维的时间的矢量函数: $\mathbf{a}(t) =$

收稿日期: 2006-10-19

^{*} 江苏省高技术研究项目(项目编号:BG2006023)

陈伟 江苏科技大学电子信息学院 助教, 212003 镇江市

赵德安 江苏大学电气信息工程学院 教授 博士生导师, 212013 镇江市

汤养 江苏大学理学院 讲师

$[p(t), o(t)]^T$, 其中 $p(t) = [P_x(t), P_y(t), P_z(t)]^T$, 表示喷枪相对于固定的笛卡儿坐标系 XYZ 的位置, $o(t) = [O_x(t), O_y(t), O_z(t)]^T$, 表示喷枪相对于坐标轴的角度。

1.2 漆膜厚度数学模型

人们已经研究出多种平面上或规则曲面上涂层累积速率数学模型, 如有限范围模型^[1]、 β 模型^[4]等。考虑到这些模型的表达式都很复杂, 在建立自由曲面上的漆膜厚度数学模型时并不适用, 因此通过在平面上喷漆实验获得的实验数据来推导涂层累积速率函数表达式。为了简化模型, 假设喷漆时的外界环境参数(温度、气压、湿度等)和喷枪本身技术参数(喷枪张角、喷射压力、油漆粘度等)都为恒定。

设喷枪喷出的漆流形状是一个圆锥体, 其油漆空间分布模型如图 1a 所示。图中 ϕ 为圆锥的张角, h 为喷枪至平面的垂直距离, R 为平面上的喷涂半径, r 是平面上一点 Q 离喷枪中心投影点的距离, θ 是 Q 点和喷枪的连线与喷枪中轴线的夹角。平面上的涂层累积速率 G 数学表达式为: $G = f(r, h)$ 。实际应用中, 喷枪与工件表面的距离一般保持不变, 则 G 只与 r 有关, 即 $G = f(r)$ 。此时 G 与 r 的函数图形可以近似看成一条二次曲线^[1], 如图 1b 所示。对于已给定的喷枪而言, 当 $r > R$ 时, $G = 0$; 当 $r \leq R$ 时, G 是以 r 为变量的二次函数, 从而在轨迹优化时可不考虑喷枪喷射张角 ϕ , 简化了优化过程。实验中采用 Goodman 提出的测量点列表技术测取平面上不同位置的涂层累积速率数据后^[5], 即可得到 r 与 G 的函数关系式。已知涂层累积速率 G 后, 通过对时间 t 的积分, 得到平面上某一点的漆膜厚度 q 。

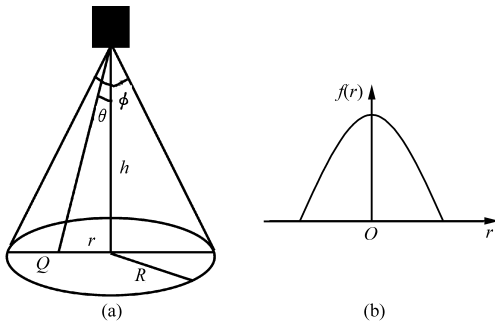


图 1 油漆空间分布模型和涂层累积速率函数图
Fig. 1 Paint distribution model and the material deposition rate function

自由曲面上一点 S 的漆膜生长模型如图 2 所示, 平面 P_1 为参考平面, P_2 为过点 S 且与 P_1 平行的平面, θ_i 为喷枪和点 S 的连线与喷枪中轴线之间的夹角, h 为喷枪到参考平面 P_1 的垂直距离, h_i 为喷枪到平面 P_2 的垂直距离 (h_i 随着 θ_i 的变化而变

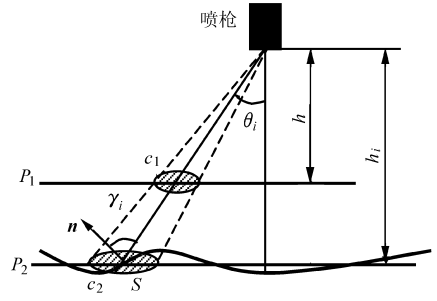


图 2 自由曲面上的漆膜生长模型
Fig. 2 Paint film deposition of free-form surfaces

化)。当指定了期望的漆膜厚度后, 参考平面 P_1 可根据实验得到的理想的喷枪与工件距离来确定。假设喷枪喷到参考平面上和自由曲面上的油漆量相等, 喷枪在参考平面 P_1 上喷出的很小的一块圆形面为 c_1 , c_1 在平面 P_2 上的投影为 c_2 , 则两块圆面的面积关系是

$$S_{c_2} = \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 S_{c_1}$$

S_{c_1} 和 S_{c_2} 分别是 c_1 和 c_2 的面积。设 c_1 上漆膜厚度为 q_1 , 则 c_2 上的漆膜厚度 q_2 为

$$q_2 = q_1 \left(\frac{h}{h_i}\right)^2 \tag{1}$$

设圆形面 c_3 与喷枪喷射方向垂直且与 c_2 在同一个圆锥形漆流张角下, 如图 3a 所示, 则 c_3 与 c_2 之间的夹角即为 θ_i ; 再设 c_3 的法向量与自由曲面上过点 S 的一小块圆形面 c_4 的法向量 n 夹角为 γ_i , 如图 3b 所示, 则 c_3 和 c_4 上漆膜厚度分别为

$$q_3 = \frac{q_2}{\cos \theta_i} \tag{2}$$

$$q_s = q_3 \cos \gamma_i \tag{3}$$

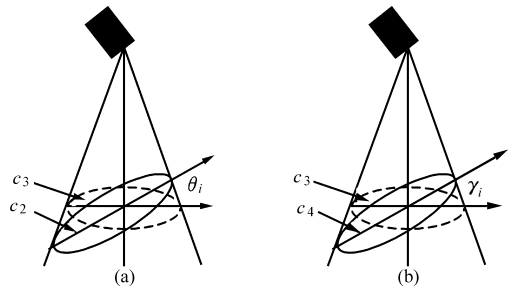


图 3 不同夹角圆形面之间关系示意图
Fig. 3 Relationship of the circles with different angles

由式(1)~(3)可得自由曲面上的漆膜厚度表达式为

$$q_s = q_1 \left(\frac{h}{h_i}\right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos \theta_i}$$

设喷枪到自由曲面上一点 S 的距离为 l_i , 则 $h_i = l_i \cos \theta_i$ 。当 $\gamma_i \geq 90^\circ$ 时, 没有油漆能喷到该点上, 因此, 自由曲面上一点 S 的漆膜厚度数学表达式为

$$q_s = \begin{cases} q_1 \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i} & (\gamma_i < 90^\circ) \\ 0 & (\gamma_i \geq 90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

2 喷枪空间路径生成方法

喷枪的一条空间轨迹可定义为喷枪经过的一系列点的集合,而喷枪轨迹包括喷枪空间路径和喷枪移动速率两部分。本文考虑一种可行的喷枪空间轨迹确定方法,即先指定期望的喷枪空间路径,这种情况下,问题就转化为如何找到喷枪沿指定路径的最优时间序列,使得喷枪沿此轨迹进行喷涂作业时所定义的优化目标达到最优。因此,轨迹优化问题就把每时刻的最优变量个数从一般喷枪轨迹优化问题中的6个(喷枪的位姿)减少为1个,从而大大简化了问题的复杂性。

CAD中自由曲面造型的方法有许多种,如Bezier法、B样条法等。这些方法造型得到的参数曲面表达式精度高,但表示形式很复杂,使得这些参数曲面表达式难以应用于自由曲面上的喷枪轨迹规划^[6]。喷枪移动速率的设计影响喷漆时间和工件表面涂层均匀性,而喷枪空间路径的设计影响涂层覆盖率。为保证工件表面每一处都能被涂层覆盖,可采用“bounding box”法设计喷枪空间路径^[7],该方法中确定两个喷漆行程的涂层重叠区域宽度 d 是生成喷枪空间路径的关键因素,具体步骤如下:①由工件CAD模型确定自由曲面,并对曲面进行三角网格划分。②按照相邻三角面之间拓扑结构连接生成若干个较大的片,且每个片可近似看作平面。③利用黄金分割算法得出 d 值后,确定喷枪移动方向,生成每片上的喷枪路径。④连接每片上的喷枪路径,生成自由曲面上的喷枪路径。

为得到均匀的涂层,喷到工件表面上的油漆有一部分是重叠的,如图4所示。当确定 d 后,重叠区域的漆膜厚度在算法中由两次喷涂的漆膜厚度迭加得到。另外,生成喷枪空间路径时必须充分考虑自由曲面的几何特性,例如接近曲面边界处的路径应尽量平行于边界线,有关设计喷枪空间路径的详细原则可参考文献^[8]。

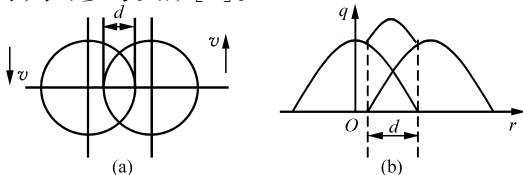


图4 重叠区域漆膜分布图

Fig. 4 Film deposition of the overlap

(a) 重叠区域俯视图 (b) 涂层侧面剖视图

3 喷枪轨迹的优化

喷枪轨迹优化设计中优化目标有多个,例如时间、每一点的漆膜厚度、油漆的总消耗量,等等,因此喷枪轨迹优化设计是一个多目标优化问题。数学上解决多目标优化问题通常是采用分段常函数逼近优化目标函数的方法。这里,选取时间和漆膜厚度作为优化目标进行讨论。首先,将喷枪空间路径分割成 p 段并设每一段上喷枪速度恒定, d_k 表示第 k 段的长度, v_k 表示喷枪在第 k 段路径上的移动速度, t_k 表示第 k 段路径上喷漆时间。对于分割成 p 段后的每一段路径,再分别第二次分割成 m 段更短的路径。假设在 m 小段路径上的喷漆时间都相等,设为 t' 。将式(4)两边求导得

$$\frac{dq_s}{dt} = \frac{dq_1}{dt} \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i} = f(r_i) \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i} \quad (5)$$

其中

$$r_i = h \tan \theta_i$$

假设 m 小段中每一个段上 θ_i 与 γ_i 变化极小,三角网格中第 j 个三角面中第 k 段路径上的漆膜厚度为

$$q_{jk} = \sum_{i=1}^m f(h \tan \theta_i) \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i} t'_k \quad (6)$$

t'_k 表示 m 小段上每一段的喷漆时间。由此,第 j 个三角面上的漆膜厚度为

$$q_j = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m f(h \tan \theta_i) \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i} \frac{t_k}{m} \quad (7)$$

可以写成

$$q_j = \sum_{k=1}^p \frac{d_k}{m v_k} \sum_{i=1}^m f(h \tan \theta_i) \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i} \quad (8)$$

自由曲面上按指定路径喷漆的总时间为

$$T = \sum_{k=1}^p t_k = \sum_{k=1}^p \frac{d_k}{v_k} \quad (9)$$

喷枪轨迹优化问题的目标是找到一条能使工件表面上漆膜厚度方差最小且喷漆时间最短的喷枪轨迹。设理想的漆膜厚度为 q_d ,允许最大漆膜厚度偏差为 q_w ,则喷枪轨迹优化问题可表示为

$$\begin{cases} \min L = (L_1, L_2) \\ \text{s. t. } |q_j - q_d| \leq q_w \end{cases} \quad (10)$$

其中 $L_1 = \sum_{k=1}^p \frac{d_k}{v_k}$ $L_2 = \sum_{j=1}^N (q_j - q_d)^2$

$$q_j = \sum_{k=1}^p \frac{d_k}{m v_k} \sum_{i=1}^m f(h \tan \theta_i) \left(\frac{h}{l_i} \right)^2 \frac{\cos \gamma_i}{\cos^3 \theta_i}$$

可见,这是一个带约束条件的多目标优化问题。求解多目标优化问题的方法有很多种,如线性加权和法、极大极小法、理想点法等。这里使用带权无穷范数理想点法来求解该问题。理想点法是先分别求出各目标函数的极小值,作为理想值,然后让各分量目

标函数尽量逼近各自的理想值。该算法步骤如下:

① 求理想点。求 $f_i^* = f_i(x) = \min_{x \in D} f_i (i = 1, 2)$, 得理想点 $F^* = (f_1^*, f_2^*)$ 。② 检验理想点。当 $x_1^* = x_2^*$ 时, 绝对最优解 $x^* = x_1^*$, 停止; 否则转步骤③。

③ 确定权系数: $\omega_i > 0$ 且 $\sum_{i=1}^2 \omega_i = 1$ 。④ 求辅助非线性规划问题: $\min V$; s. t. $\omega_i [f_i(x) - f_i^*] \leq V (i = 1, 2) (x \in D, V \geq 0)$, 得最优解 (\bar{x}, \bar{v}) , 输出 \bar{x} 。其中, V 是 $\omega_i [f_i(x) - f_i^*] (i = 1, 2)$ 的一个共同上界, D 为 x 可行域。

4 仿真

设理想漆膜厚度 $q_d = 50 \mu\text{m}$, 漆膜厚度最大允许偏差 $q_w = 10 \mu\text{m}$, 喷枪喷出的圆锥形漆流底面半径 $R = 50 \text{ mm}$ 。通过平板上的喷漆实验数据得到漆膜生长速率为

$$f(r) = \frac{1}{10}(R^2 - r^2) \quad (\mu\text{m/s})$$

生成并优化平板上的喷枪轨迹后, 得到喷漆机器人喷枪移动速率(匀速)和每两个喷漆行程的涂层重叠区域宽度分别为: $v = 323.3 \text{ mm/s}$, $d = 39.2 \text{ mm}$ 。

以某轿车的车门为例。在 GID7.2 中输入车门的 CAD 图形后, 通过 GID 网格图形输出功能, 得到车门三角网格图形(允许误差 2 mm), 共由 $1\ 386$ 个三角面组成。在确定 $d = 39.2 \text{ mm}$ 后, 按照文献[7]路径生成规则, 得到喷枪空间路径, 如图 5 所示。路径上有 292 个等分的离散点, 即路径均匀分为 292 段, 设在每一段上喷枪移动速率恒定, 则有 292 个速率需要优化。每一段路径再分为 10 段。由此, 优化算法中各个参数如下: $q_d = 5 \times 10^{-5} \text{ mm}$, $q_w = 1 \times 10^{-5} \text{ mm}$, $R = 50 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$, 三角面个

数 $N = 1\ 386$, 分段段数 $p = 292$, $d_k = 50 \text{ mm}$, $m = 10$, 权向量 $\omega = (0.5, 0.5)^T$, 匀速喷涂时 $v = 323 \text{ mm/s}$, 优化喷涂时以 $v = 323 \text{ mm/s}$ 作为算法迭代的初始值。下面在 2.80G PC 上, 分优化喷涂和匀速喷涂两种情况进行仿真。仿真结果如表 1 所示, 由表 1 可看出, 优化轨迹喷涂不仅比匀速轨迹喷涂效果更佳, 而且更节约时间, 提高了生产效率。

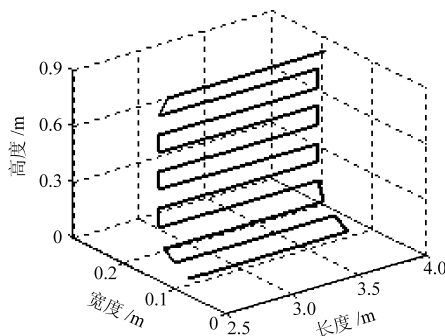


图 5 车门喷漆路径

Fig. 5 Gun path for the part of the door

表 1 优化喷涂与匀速喷涂仿真结果

Tab. 1 Simulation results for optimal and non-optimal tool planning

| 参数 | 优化 | 匀速 | 参数 | 优化 | 匀速 |
|---------------------|------|------|---------------------|------|------|
| 平均厚度/ μm | 49.6 | 49.4 | 最小厚度/ μm | 46.7 | 44.7 |
| 最大厚度/ μm | 52.9 | 57.2 | 喷漆时间/s | 44.2 | 47.8 |

5 结论

(1) 喷漆机器人喷枪轨迹优化设计是一个多目标优化问题。实际应用中选取一个或几个需要的目标进行优化。

(2) 仿真实验表明, 优化轨迹喷涂和非优化轨迹喷涂都满足给定的约束条件, 但是前者所花费的时间小于后者, 且喷涂效果更好。

参 考 文 献

- 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.
- Suh S H, Woo I K, Noh S K. Development of an automatic trajectory planning system (ATPS) for spray painting robots [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, Sacramento, 1991:1 948~1 955.
- 刁训娣, 赵德安, 李医民, 等. 喷漆机器人喷枪轨迹设计及其影响因素研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(4):396~398.
- Sahir Arıkan M A, Tuna Balkan. Process modeling, simulation, and paint thickness measurement for robotic spray painting [J]. Journal of Robotic System, 2000, 17(9):479~494.
- Goodman E D, Hoppensteradt L T W. A method for accurate simulation of robotic spray application using empirical parameterization[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, USA, Sacramento, 1991: 1 357~1 368.
- Lai J Y, Wang D J. A strategy for finish cutting path generation of compound surfaces [J]. Computers in Industry, 1994, 25(2):189~209.
- Sheng W H, Xi N, Song M, et al. Automated cad-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces[C]. IEEE/RSJ International Conference On Intelligent Robots And Systems, Japan, Tankamutsa, 2000: 1 918~1 923.
- Chen H P, Xi N, Zhou H W. Robot trajectory integration for painting automotive parts with multiple patches [C]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, China, Taipei, 2003:3 984~3 989.