

船舶工业机器人曲面喷涂喷枪轨迹离线规划

马淑梅¹, 罗 曦¹, 李爱平¹, 杨连生^{1,2}

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: 以喷涂速度、喷涂高度和轨迹间距为优化对象, 建立曲面漆膜厚度分布模型, 结合曲面外形, 以漆膜厚度最均匀为优化目标, 以粒子群算法为优化算法获取最优喷涂参数组合; 运用非均匀有理 B 样条(NURBS)技术拟合曲面, 利用曲面控制顶点生成喷枪路径, 结合路径与最优喷涂参数组合得到曲面喷涂轨迹. 通过对船首外表面及平面、凹曲面、凸曲面、S 型曲面的仿真分析, 验证了喷涂机器人曲面喷涂喷枪轨迹离线规划方法的可行性和有效性.

关键词: 船舶工业; 喷涂机器人; 曲面喷涂; 轨迹离线规划
中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A

Offline Trajectory Planning on Curved Surface for Spray Painting Robot in Shipbuilding Industry

MA Shumei¹, LUO Xi¹, LI Aiping¹, YANG Liansheng^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd, Shanghai 200137, China)

Abstract: Taking painting velocity, spray gun standoff and trajectory pitch as optimization objectives, establishing film thickness distribution model for trajectory planning on curved surfaces. Considering the surfaces to be painted, setting film thickness uniformity as optimization goal, using particle swarm optimization(PSO) algorithm to optimize the objects. Fitting the surfaces with non-uniform rational B-spline(NURBS), generating painting passes by NURBS control points. Combining optimal objects with painting passes, the trajectory for painting process on curved surface can be obtained finally. By analyzing the results of painting simulation on prow, planar, concave, convex and S type surface, the validity and effectiveness of offline trajectory planning method for spray painting robot were verified.

Key words: shipbuilding industry; spray painting robot;

curved surface painting; offline trajectory planning

喷枪轨迹的规划对船舶工业喷涂机器人的应用过程有重要影响, 而离线规划可以提高效率节约涂料并保证膜厚均匀性. 离线规划包含喷涂参数优化和喷涂路径生成两大问题. 对于喷涂参数优化, Suh 等^[1]基于建华立的模型开发了喷涂机器人自动轨迹规划系统(automatic trajectory planning system, ATPS); Ramabhadran 等^[2-3]通过简单漆膜厚度分布模型, 结合给定路径优化了喷涂速度; 张永贵^[4]建立了用于拟合膜厚分布的双 β 模型, 但不能预测膜厚分布. 对于路径生成, Sheng 等^[5]研究了复杂曲面分片处理算法, 但没有阐明分片处理后的膜厚分布情况; Atkar 等^[6]提出一种针对自由曲面, 通过选择初始喷涂线确定叠加间距使膜厚分布均匀, 但该方法实质是直纹面简化代替自由曲面生成路径, 难以规划复杂自由曲面轨迹; Andulkar 等^[7-8]将自由曲面三角网格化, 根据喷涂区域形心位置及区域内各三角面片的平均法向量确定喷涂位置, 以此规划曲面喷涂路径, 但未优化喷涂高度等参数; 此外陈伟^[9]、邵振华^[10]、曾勇^[11]等规划了各类曲面的喷涂路径.

本文面向船舶喷涂机器人, 通过研究喷涂参数优化及喷枪路径生成, 提出基于非均匀有理 B 样条(non-uniform rational B-spline, NURBS)曲面及其控制顶点的喷枪轨迹离线规划方法. 基于曲面喷涂膜厚分布模型, 针对曲面外形, 采用粒子群算法优化喷涂参数. 利用 NURBS 曲面控制顶点生成喷涂路径. 结合喷涂路径及路径间距 d 、喷涂高度 h 及喷涂速度 v 等参数得出喷涂轨迹, 经实例仿真验证了方法的可行性和有效性.

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 上海经信委资助项目(沪 CXY-2013-25); 上海科委资助项目(No. 14111104400)

第一作者: 马淑梅(1967—), 女, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为数字化设计与制造、逆向工程技术和快速原型制造技术.

E-mail: mashumei@tongji.edu.cn

通讯作者: 罗 曦(1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为数字化制造技术. E-mail: 1432400luoxi@tongji.edu.cn

1 喷枪轨迹离线规划过程

喷涂轨迹离线规划包含喷涂参数优化及喷嘴运

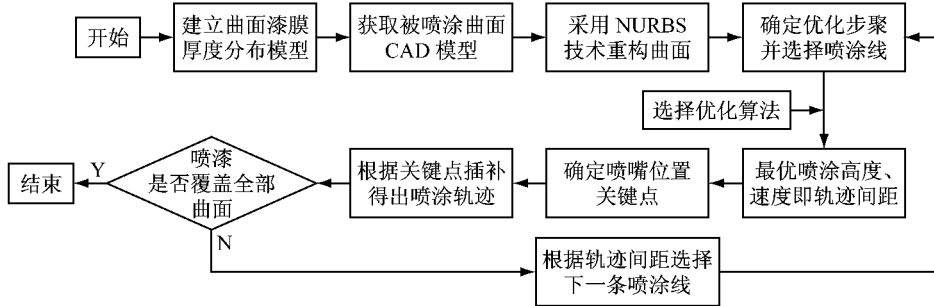


图 1 喷枪轨迹离线规划流程图

Fig.1 Sketch of offline trajectory planning

针对曲面喷涂的喷枪轨迹离线规划,建立漆膜厚度分布模型,获取曲面 CAD 模型,运用 NURBS 技术重构曲面;按曲面外形确定优化步骤,在曲面上选取喷涂线;选择优化算法,得到最优喷涂参数组合,确定初始喷涂线上关键点;根据最优喷涂高度和喷涂方向计算喷嘴关键位置,插补得到运动路径;根据喷涂速度和所得路径规划喷涂轨迹;按最优轨迹间距确定下一条喷涂线,经优化得到对应最优喷涂参数,生成下一条喷涂轨迹,直到覆盖整个曲面。

2 喷枪轨迹离线规划方法

2.1 漆膜厚度分布模型的建立

喷漆覆盖区域内各点处膜厚与点的位置、曲面形状、喷枪与曲面相对位置和方向等因素有关;基于 β 分布模型, v, h 和 d 等主要影响因素,建立漆膜厚度的平面和曲面分布模型。

2.1.1 平面分布模型

图 2 所示为喷枪喷涂示意图,图中, P 为喷嘴位置, ω 和 ω_1 分别为 h 和 h_1 对应高度下的漆膜覆盖范围的宽度, T_{max} 为膜厚最大值, x_1 和 x 为对应 h_1 和 h 高度下同一位置的点, R 为覆盖范围的圆半径, $R = \omega/2, \theta$ 为喷枪张角,膜厚 $T(x)$ 在 x 轴方向遵循 β 分布, $T(x)$ 表达式如式(1)所示,描述了最终喷涂状态的模型,

$$T(x) = \frac{16Q_0}{3\pi\omega v} \left(1 - \frac{4x^2}{\omega^2}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

式中: Q_0 为喷漆流量; β 为量纲一参数,经拟合确定; $T_{max} = \frac{16Q_0}{3\pi\omega v}$. 根据喷漆累积过程(图 3), $x=r_0$ 处

动路径两部分,规划具体流程如图 1 所示. 图中, CAD 表示计算机辅助设计.

膜厚 $T(r_0)$ 可表示为

$$T(r_0) = 2 \int_0^{t_1} q(r) dt, r \in [r_0, R] \quad (2)$$

式中: t_1 为 $x=r_0$ 处喷涂时间的一半; $q(r_0)$ 表示距圆心为 r_0 处漆膜厚度累积速率; q_{max} 为最大漆膜累积速率. $q(r)$ 表示为

$$q(r) = q_{max} \left(1 - \frac{4r^2}{\omega^2}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中, $\beta' = \beta - 0.5$

$$q_{max} = \frac{4vT_{max}I_{\beta}\beta'}{\pi\omega} \quad (4)$$

式中, $I_{\beta} = \int_0^{\pi/2} \cos^{2\beta-1} \phi d\phi$

喷嘴型号不变时, θ 为定值, ω 和 h 成正比,如图 2 所示,不同高度 h_1 和速度 v_1 下膜厚分布如式(5)所示.

膜厚累积示意图见图 3.

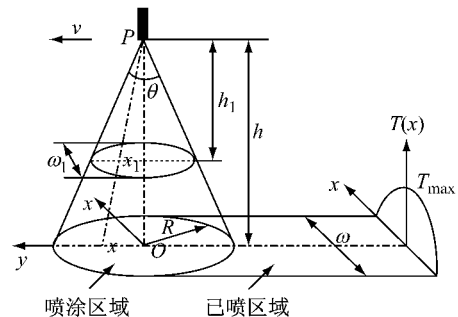


图 2 喷枪喷涂示意图

Fig.2 Sketch of painting process

$$T(r_0) = 2q_{max} \int_0^{t_2} \left(1 - \frac{4x^2}{\omega^2} \cdot \left(\frac{h}{h_1}\right)^2\right)^{\beta-1} dt \cdot \left(\frac{h}{h_1}\right)^3 \quad (5)$$

式中, $t_2 = \frac{\sqrt{R^2 - r_0^2}}{v_1}$.

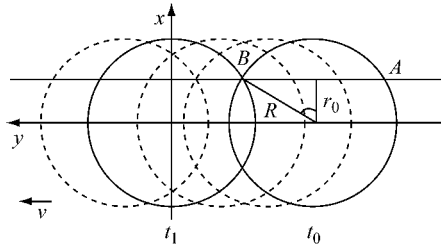


图 3 膜厚累积示意图

Fig.3 Sketch of paint film accumulating

2.1.2 曲面分布模型

将曲面分为凹曲面和凸曲面,两类曲面上喷涂示意图如图 4 所示,其中 $P(x_p, y_p)$ 为喷嘴位置,喷

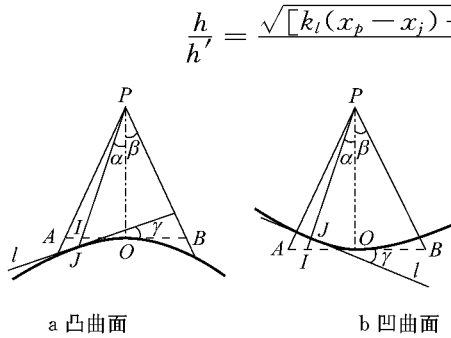


图 4 凸曲面和凹曲面喷涂示意图

Fig.4 painting model on convex and concave surfaces

若将经过点 J 处的总喷涂时间 t 平均分成 k 个时长为 t' 的时间间隔,则在第 i 段时间间隔内 α_i 和 γ_i 可视为定值 $r_i = h \tan \alpha_i$. 因此,由式(2)和式(5),第 i 段时间区间内的膜厚如式(7)~(8)所示, J 处膜厚如式(9)所示.

$$T_{J_i} = T_{I_i} \cdot (l_{PI_i} / l_{PJ_i})^2 = \left(\frac{h \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{h' \cdot \cos \alpha} \right)^2 \cdot 2 \int_0^{t'} q(r_i) dt, \text{ 凸曲面} \quad (7)$$

$$T_{J_i} = T_{I_i} \cdot (l_{PI_i} / l_{PJ_i})^2 = \left(\frac{h \cdot \cos(\alpha - \gamma)}{h' \cdot \cos \alpha} \right)^2 \cdot 2 \int_0^{t'} q(r_i) dt, \text{ 凹曲面} \quad (8)$$

$$T_J = \sum_{i=1}^k (l_{PI_i} / l_{PJ_i})^2 \cdot 2q_{\max} \int_0^{t'} \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_i}{\tan^2 \beta} \right)^{\beta-1} dt \quad (9)$$

此时 T_J 为适用于平面与曲面喷涂的膜厚分布模型,即 $\gamma_i = 0$ 时表示平面分布模型. 根据平面上各点与曲面上对应点的关系建立曲面分布模型,推导出不同喷涂参数下对应的曲面分布模型,如式(10)

嘴到曲面的距离为 h , PO 为喷涂方向, AB 为曲面上一点 O 处的切线且 $AB \perp PO$, PA 和 PB 所在直线表示喷漆边界, l 为曲面上任意一点 $J(x_j, y_j)$ 的切线,斜率为 k_l , 点 P 到 l 的距离为 h' , 所在直线斜率为 k_p , PJ 与 PO 夹角为 α , (的半角为 β , 点 J 处和 O 处法线夹角为 γ , 则有:

$$\frac{l_{PI}}{l_{PJ}} = \frac{h \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{h' \cdot \cos \alpha}, \text{ 凸曲面}, \quad (6a)$$

$$\frac{l_{PI}}{l_{PJ}} = \frac{h \cdot \cos(\alpha - \gamma)}{h' \cdot \cos \alpha}, \text{ 凹曲面} \quad (6b)$$

式中, l_{PI} 和 l_{PJ} 分别为 PI 和 PJ 相对应线段的长度, 以下同.

所示.

$$T_J = \sum_{i=1}^k (l_{PI_i} / l_{PJ_i})^2 \cdot \frac{8vT_{\max}\beta'I_{\beta}}{\pi\omega} \cdot \left(\frac{h}{h_1} \right)^3 \cdot \int_0^{t'} \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha_i}{\tan^2 \beta} \right)^{\beta-1} dt \quad (10)$$

为使整体膜厚更加均匀,根据漆膜厚度分布模型确定 d , 如图 5 所示. 根据 J 点所处位置,若 T_{1J} 和 T_{2J} 分别表示 J 点在第一、二道轨迹下的膜厚值,则 T_J 可表示为式(11), 所得 T_J 即为曲面分布面模型.

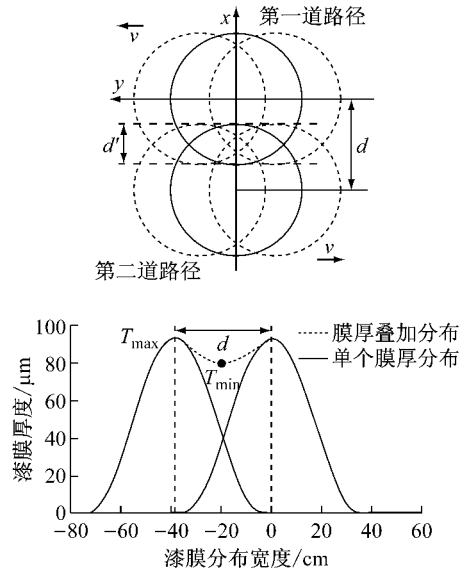


图 5 喷漆叠加示意图

Fig.5 Sketch of overlapped paint film

$$T_J = \begin{cases} T_{1J}, & J \text{ 点在第一道轨迹下非叠加区域} \\ T_{1J} + T_{2J}, & J \text{ 点在叠加区域} \\ T_{2J}, & J \text{ 点在第二道轨迹下非叠加区域} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 喷涂参数优化

本文对喷枪轨迹离线规划时,将 h 、 d 、 v 作为优化对象. 由分析可知,漆膜厚度分布模型随 h 和 v 变化,因此对应着不同的 d . 合适的轨迹间距将使膜厚更均匀,如图 5 所示,因此需要运用粒子群算法对 h 、 d 、 v 协同优化. 在参数优化过程中,以叠加区域内的膜厚最均匀为优化目标,即:

$$\min_{d \in [0, R]} E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \epsilon)^2 \quad (12)$$

式中: n 为叠加区域内选取点的数量; T_i 为叠加区域内第 i 个点处膜厚值; ϵ 为 $T_i (i=1, 2 \dots n)$ 的平均值.

由于曲面曲率影响膜厚分布,因此需要逐一优化各条轨迹对应的喷涂参数,具体过程如下:① 根据曲面凹凸性选择对应漆膜厚度分布模型,优化沿首条喷嘴轨迹喷涂的喷涂参数,采用式(12)分析初始喷涂线上的膜厚,得出首条轨迹最优喷涂高度 h_1 及喷涂速度 v_1 ;② 基于已有喷涂结果,根据式(12),采用算法优化得出第二条轨迹的参数 h_2, d_1, v_2 ;③ 重复步骤②使得喷漆覆盖曲面所有角落,则每条轨迹对应的参数即为各自最优喷涂参数. 为提高优化喷涂参数的效率,本文选用粒子群算法优化喷涂参数. 粒子具有位置和速度两个特征,通过迭代寻找最优解. 每次迭代时粒子通过跟踪个体和全局极值更新速度和位置^[12],并通过学习因子、随机数和惯性权重^[13]调节搜索速度.

2.3 喷枪运动路径的确定

曲面喷涂喷枪运动路径一般有两种生成方式:分片喷涂^[5]和整体喷涂^[6]. 前者缺点在于曲面分割算法复杂,曲面拼接处膜厚分布不均;后者将规则曲面代替自由曲面,仅适用于直纹面的喷涂轨迹生成. 本文提出的喷枪运动路径规划方法可克服上述方法的缺点. NURBS 技术可精确表示规则曲线与曲面,引入控制节点权因子,有利于控制曲线曲面形状^[14]. 控制顶点的位置反映了曲面及曲线的走势,如图 6 所示.

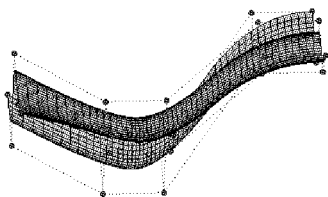


图 6 NURBS 曲面和控制顶点

Fig. 6 NURBS surface and control points

2.3.1 喷嘴位置的确定

(1) 初始喷涂线的选取

初始喷涂线,即曲面上与第一道喷涂路径对应的曲线. 为减少算法运算量,保证膜厚在曲面边界均匀分布,选取便于轨迹规划的一条边界作为初始喷涂线,求出该曲线对应的控制顶点坐标,如图 7 所示.



图 7 初始喷涂线及其控制顶点

Fig. 7 Starting line and its control points

(2) 喷嘴位置关键点及运动路径的确定

将各控制顶点投影到曲线上获取投影点,如图 8 所示. 若两相邻投影点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 之间法矢夹角 $\phi > 15^\circ$,则在曲线上 $x' = (x_1 + x_2)/2$ 处增加一个节点 (x', y') ,并求出该点处法矢,再计算该点处法矢与相邻点处法矢的夹角,直到任意两相邻节点处法矢夹角均小于 15° ,得到关键点位置. 取与关键点在法向距离为 h (由参数优化获取) 的点作为喷嘴位置关键点,并用三次样条曲线插补,得出喷嘴运动路径,如图 9 所示.

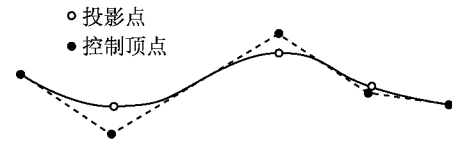


图 8 控制顶点及其在初始喷涂线上的投影点

Fig. 8 Control points and its projection on starting line

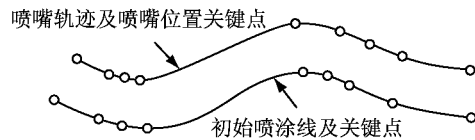


图 9 喷嘴轨迹及其关键点示意图

Fig. 9 Trajectory and its key points

由初始喷涂线得到首条喷嘴运动路径,根据优化后各条轨迹间距选择 d_1 ,再按照文中所述方法确定对整个曲面的喷涂路径,使喷漆覆盖整个曲面.

2.3.2 喷涂方向的确定

喷涂工艺规定了喷涂方向必须时刻与喷涂表面垂直,因此通过 NURBS 技术重构曲面,计算曲面各点处法矢,以初始喷涂线为例,初始喷涂线上各点处法矢如图 10 所示,喷涂方向与法矢方向相反.

3 仿真实验及分析

3.1 仿真实验

为了验证第 2 节中的轨迹规划方法,设目标膜

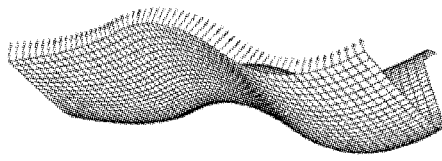


图 10 曲面节点法矢示意图

Fig.10 Normal vectors of points on the surface

厚为 $80\ \mu\text{m}$, 分别对船首曲面、平面、凹曲面、凸曲面和 S 型曲面喷涂仿真. 经实验确定在 $Q_0 = 1.4\ \text{L} \cdot$

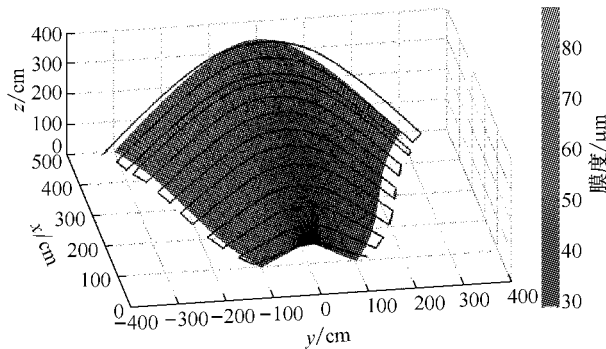
$\text{min}^{-1}, h = 35\ \text{cm}, v = 600\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $T_{\text{max}} = 92.98\ \mu\text{m}, \omega = 71\ \text{cm}, \beta_r = 3.5$.

首先对船首部分曲面进行喷涂仿真, 经优化算法得到喷涂参数见表 1. 图 11a 表示船首曲面喷涂后的漆膜厚度仿真, 其中所示轨迹按 x 轴坐标递增排列为表 1 中轨迹 1 到轨迹 13, 经计算得出整体膜厚均值为 $79.5465\ \mu\text{m}$; 图 11b 取 $y=0$ 和 $x=0$ 处膜厚表示曲面膜厚分布情况.

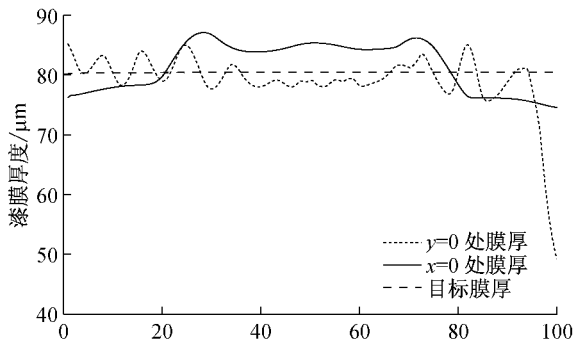
表 1 船首曲面喷涂参数表

Tab.1 Painting parameters for prow surface

轨迹号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	627	588	497	456	430	513	621	504	502	645	459	527	506
高度/cm	36.6	38.6	41.8	43.5	45.6	43.6	40.7	44.1	44.2	53.9	54.4	45.4	53.2
间距/cm		28.3	32.3	36.4	40.4	40.4	34.2	34.2	38.6	32.3	16.1	32.3	28.3



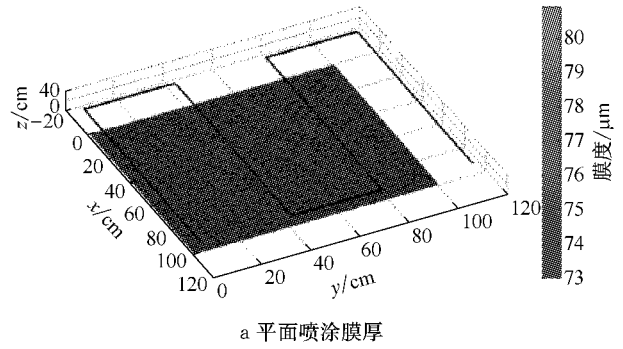
a 船首曲面膜厚



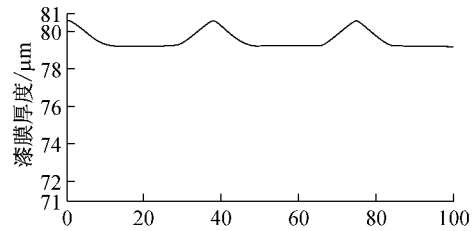
b 膜厚分布 ($x=0, y=0$ 处)

图 11 船首曲面膜厚示意图在 $x=0$ 和 $y=0$ 处膜厚分布
Fig.11 Trajectory for a prow surface and thickness distribution on $x=0, y=0$

对平面喷涂仿真, 经优化得到 $v = 634\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}, h = 36.7\ \text{cm}, d = 37\ \text{cm}$, 膜厚如图 12 所示, 其中沿 x 轴方向膜厚分布均匀; 对凹曲面喷涂仿真, 经优化得到 $v = 587\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}, h = 34.8\ \text{cm}, d = 35\ \text{cm}$, 膜厚如图 13 所示; 对凸曲面喷涂仿真, 经优化得到 $v = 657\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}, h = 36.6\ \text{cm}, d = 37\ \text{cm}$, 膜厚如图 14 所示; 对 S 型曲面喷涂仿真, 经优化得到 $v = 606\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}, h = 37.7\ \text{cm}, d = 38\ \text{cm}$, 膜厚如图 15 所示.



a 平面喷涂膜厚



b 沿 y 轴方向的膜厚分布

图 12 平面喷涂膜厚示意图和沿 y 轴方向的膜厚分布
Fig.12 Trajectory for a planer surface and film distribution on y axis

3.2 分析对比

图 11—15 为膜厚的整体分布情况及走势图. 在图 11 中, 靠近 $x=500\ \text{cm}$ 处表示未叠加区域与叠加区域的膜厚差异; 由于 d 的选取, 造成 $y=0$ 处膜厚曲线波动幅度小频率较大. 仿真时 d 取 x 轴方向网格最小间距的整数倍, 若网格间距足够小, d 将更贴近最优间距, 但程序运算量成倍增加. 考虑程序运算效率及膜厚均匀程度, 本文将曲面划分成 100×100 的四节点网格, 得出图示 $y=0$ 处的膜厚结果.

根据图 12—15, 对平面、凹曲面和凸曲面喷涂时, 漆膜厚度在较小范围内波动, 整体分布比较均匀, 具体对比如表 2 所示; 但对于 S 型曲面的喷涂仿

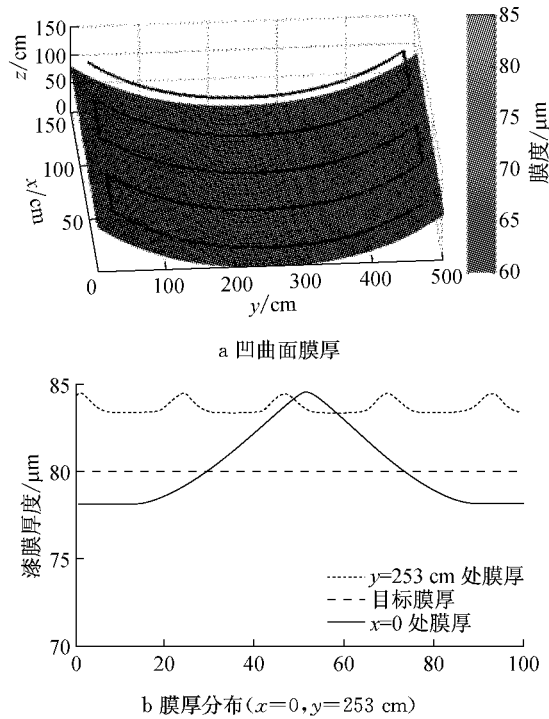


图 13 凹曲面膜厚示意图和 $x=0$ 和 $y=253$ 处膜厚分布
Fig.13 Trajectory for a concave surface and film distribution on $x=0, y=253$ cm

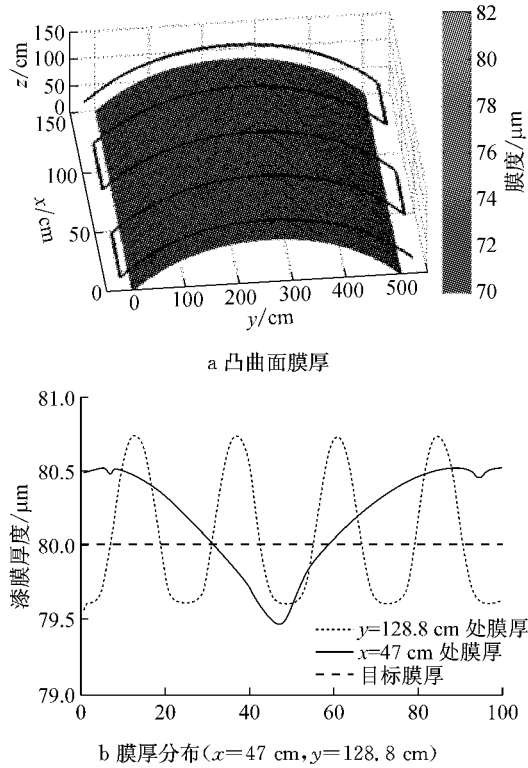


图 14 凸曲面膜厚示意图和 $x=47$ cm 和 $y=128.8$ cm 处膜厚分布
Fig.14 Trajectory for a convex surface and film distribution on $x=47$ cm, $y=128.8$ cm

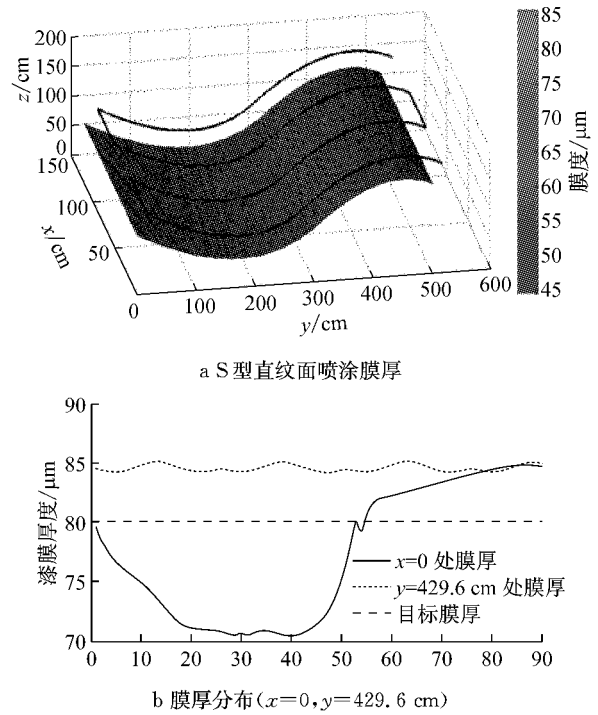


图 15 S型直纹面喷涂膜厚示意图和 $x=0$ 和 $y=429.6$ cm 处膜厚分布

Fig.15 Trajectory for a S shaped surface and film distribution on $x=0, y=429.6$ cm

真,由于同一条轨迹上喷枪喷涂速度不变,使凹曲面和凸曲面部分喷涂时间不同,造成两部分膜厚相差较大。

表 2 喷涂仿真结果对比

Tab.2 Simulation results on different surfaces

曲面外形	喷涂速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	喷涂高度/cm	叠加间距/cm	目标膜厚/ μm	平均膜厚/ μm	膜厚最大偏差/%
船首曲面	见表 1	见表 1	见表 1	80	79.546 5	9.75
平面	634	36.7	37	80	79.875 2	1.62
凹曲面	587	34.8	35	80	79.338 4	4.02
凸曲面	657	36.6	37	80	80.110 3	1.45
S型曲面	606	37.7	38	80	76.961 4	12.4

在喷涂过程中,平面喷涂轨迹的长度 L_p 等于被喷涂区域长度 l ,凹曲面 $L_a < l$,凸曲面 $L_t > l$,因此在 l 和喷涂速度相同时,膜厚存在以下关系: $T_a < T_p < T_t$. 为得到相同的目标膜厚,喷涂速度关系为: $v_t > v_p > v_a$.

通过与近年来其他曲面喷涂喷枪轨迹离线规划方法对比,文献[7]中提出的方法喷涂仿真得到的结果与本文所得结果对比见表 3. 经比较,采用文中方法仿真得到的数据优于文献[7],主要由于文献[7]中未根据曲面外形优化 v 和 h ,而本文考虑 v 和 h 对膜厚的影响建立膜厚分布模型,并对 h, v 和 d 进行

协同优化.因此,通过对比验证了文中离线轨迹规划方法的可行性.

表3 不同轨迹规划方法最大偏差对比

Tab.3 Simulation results of different planning methods

不同轨迹规划方法的最大偏差	平面	凹曲面	凸曲面	S型曲面
本文方法的最大偏差/%	1.62	4.02	1.45	12.4
文献[7]方法的最大偏差/%	8.39	16.83	28.3	45.1

4 结论

(1) 根据船舶工业喷涂机器人作业特点,建立适用于描述漆膜在平面和曲面上分布状态的膜厚分布模型,更好地预测不同喷涂参数下膜厚分布情况,通过对不同表面的喷涂仿真验证了模型的可行性和有效性;

(2) 根据所得漆膜分布模型,采用粒子群优化算法,同时优化喷涂速度、喷涂高度和轨迹间距,得出最优参数组合,经过对船首曲面的喷涂膜厚仿真,验证了喷涂参数的可行性,有效地改善了曲面喷涂质量;

(3) 引入NURBS技术,根据曲面控制顶点确定喷嘴关键位置,通过三次样条曲线插补得到喷枪运动路径,通过对不同曲面的轨迹离线规划,并与文献[7]中离线规划方法对比,验证了本文方法可行性和有效性.

参考文献:

- [1] 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. Sacramento: IEEE, 1991:1948-1955.
- [2] Ramabhadran R, Antonio JK. Fast solution techniques for a class of optimal trajectory planning problems with applications to automated spray coating [C]//IEEE Trans Robot Automation. San Diego: IEEE, 1997(13):519-530.
- [3] Antonio JK, Ramabhadran R, Ling T L. A framework for optimal trajectory planning for automated spray coating[J]. International Journal of Robotics and Automation, 1997(12): 124.
- [4] 张永贵. 喷漆机器人若干关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学机械自动化研究所, 2008.
- ZHANG Yonggui. Study on some key techniques of spray painting robot[D]. Xi'An: Institute of machine and automation of Xi'An University of Technology, 2008.
- [5] SHENG Weihua, XI Ning, SONG Mumin, et al. Automated CAD-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces[C]//Proceedings of Intelligent Robots and Systems, [S.l.]: IEEE, 2000, 3: 1918-1923.
- [6] Atkar P N, Greenfield A, Conner D C, et al. Uniform coverage of automotive surface patches [J]. International Journal Robot Research, 2005(24): 883.
- [7] Andulkar M V, Chiddarwar S S, Maerhe A S. Novel integrated offline trajectory generation approach for robot assisted spray painting operation[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015(37): 201.
- [8] Andulkar M V, Chiddarwar S S. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot[J]. Industrial Robot-An International Journal, 2015, 42(3):228.
- [9] 陈伟. 喷涂机器人轨迹优化关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学电气信息工程学院, 2012.
- CHEN Wei. Research on key techniques of robotic spray painting trajectory optimization [D]. Zhenjiang: School of Electrical and Information Engineering of Jiangsu University, 2012.
- [10] 邵振华,周波,孟正大,等. 针对规则化工件曲面的喷涂轨迹规划研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(3):6.
- SHAO Zhenhua, ZHOU Bo, MENG Zhengda, et al. Research on path planning of spray painting for standardized workpiece [J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(3):6.
- [11] 曾勇,龚俊,许宁,等. 面向犄角型曲面的喷涂机器人喷涂轨迹优化[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014,48(5):791.
- ZENG Yong, GONG Jun, XU Ning, et al. Tool trajectory optimization of spray painting robot for horn surface [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014,48 (5):791.
- [12] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995:1942-1948.
- [13] SHI Yuhui, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C] // IEEE International Conference of Evolutionary Computation. Anchorage: IEEE Press, 1998:69-73.
- [14] 王益. 基于NURBS控制点重构的曲面加工误差测量与评定技术研究[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学系, 2014.
- WANG Yi. Research on measurement and evaluation of surface machining error based on reconstruction of NURBS control points[D]. Hangzhou: College of Mechanical Engineering of Zhejiang University, 2014.