

文章编号:1674-2869(2018)03-0333-07

喷涂机器人的喷涂轨迹规划

潘 洋¹, 冉 全^{*1}, 邹梦麒²

1. 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 30205;
2. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116

摘 要:为了解决喷涂机器人喷涂作业后涂料不均匀堆积问题,在平面静态喷涂模型的基础上,提出了一种面向复杂曲面的喷涂机器人轨迹规划方法。首先通过椭圆双 β 喷涂模型,在一定条件下计算出了平面喷涂中相邻轨迹涂层的最佳重叠距离;在平面喷涂的基础上,分析了平面喷涂与复杂表面喷涂的映射关系;然后通过最小二乘自然二次曲面拟合的方法将复杂曲面拟合成规则的圆形曲面;最后通过多段分割曲线逼近目标函数,找到了复杂曲面上相邻两条路径之间的最优区间设计方法。结果表明,该方法为解决涂料不均匀堆积问题提供了新的思路。

关键词:喷涂机器人; 轨迹规划; 椭圆双 β 分布模型; 最小二乘自然二次曲面拟合法

中图分类号:TP66 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.03.020

Trajectory Planning of Spray Painting Robots

PAN Yang¹, RAN Quan^{*1}, ZOU Mengqi²

1. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: To solve the problem of non-uniform deposition of painting after spraying operations of spray robots, a trajectory planning method for spray robots facing complex surfaces was designed based on flat static spraying model. First, the overlap value of adjacent tracks was calculated at about 80 mm in plane spraying coating by using the ellipse dual- β spraying model. Second, the mapping relationship between plane spraying and complex surface spraying was analyzed on the basis of plane spraying. Then the complex surface was fitted into regular circular surfaces by least squares method for natural quadric surface fitting. Finally, the optimization objective function was approximated with the piecewise constant to design the optimal interval between two adjacent paths on a complex surface. The results showed that proposed method could simplify spraying trajectory planning for spray robots.

Keywords: spray painting robot; trajectory planning; ellipse dual- β spraying model; least squares natural quadric fitting method

自从工业机器人应用于制造业,随着其机构精度、离线编程技术、数字控制技术的不断发展,其稳定、高精度、耐重复、恶劣环境中作业的特点便体现在制造业生产环节中的方方面面。而作为汽车外壳喷漆、陶瓷外表涂装的喷涂设备,喷涂机

器人在涂料喷涂领域则具有至关重要的作用。目前的喷涂机器人主要用于平面喷涂和曲面喷涂两个方面。但是随着人们生活水平的提高,人们的审美要求也在不断的提高。另外,在陶瓷烧制过程中不均匀的釉料会产生裂纹,造成工件报废,所

收稿日期:2017-12-29

作者简介:潘 洋,硕士研究生。E-mail: 420665325@qq.com

*通讯作者:冉 全,硕士,副教授。E-mail: ranquan@yeah.net

引文格式:潘洋,冉全,邹梦麒. 喷涂机器人的喷涂轨迹规划[J]. 武汉工程大学学报,2018,40(3):333-339.

以喷涂过程中涂料的厚度要尽可能均匀。

针对这一问题,国内外有关学者对喷涂机器人喷枪轨迹优化^[1-7]问题展开了深入的研究。张永贵^[8]等采用BP神经网络方法进行漆膜表面函数拟合,提出一种椭圆双 β 漆膜厚度分布模型。MAYUR V^[9]等基于二次抛物线模型提出了一种用于在自由曲面上自动生成轨迹的新型离线机器人编程方法。曾勇^[10-12]等根据圆锥面的几何特点,给出了圆锥面上的喷枪轨迹生成方法,优化了圆锥曲面喷涂时的涂料平整度。高峰^[13]等采用包容盒算法,实现了喷涂轨迹的自动生成。但上述已有研究中,对喷涂机器人喷射轨迹的研究并不彻底,大部分只是针对一条轨迹上的涂料堆积情况进行分析。同时,针对复杂曲面上喷射轨迹研究的方法比较复杂。

为此,本文在平面喷涂模型研究的基础上,提出了一种最小二乘自然二次曲面拟合法^[14]对复杂曲面进行拟合,并采用多段分割曲线逼近目标函数的方法分析了相邻两条轨迹间的涂料堆积情况,简化了喷涂机器人复杂曲面喷射轨迹的优化问题,研究所得结果具有广泛的实用价值。

1 平面静态喷涂模型

为了更好的研究喷涂机器人的轨迹规划问题,将喷枪在平面静态喷涂过程中的作业原理简化为图 1 所示的模型。

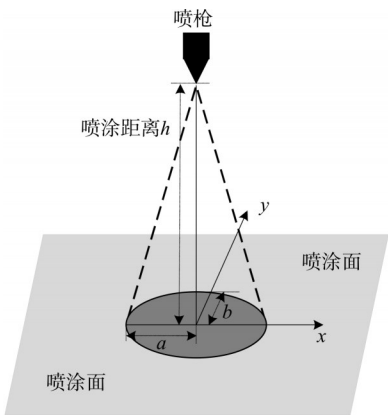


图 1 喷枪平面静态喷涂
Fig. 1 Plane static spraying of spray gun

如果将初始条件设为喷枪喷涂高度一定且喷枪轴线垂直于平面,它符合文献^[15]提出的椭圆双 β 分布模型。模型如下:

$$Z(x,y)=Z_{\max}(1-\frac{x^2}{a^2})^{\beta_1-1}[1-\frac{y^2}{b^2(1-\frac{x^2}{a^2})}]^{\beta_2-1}$$
$$-a\leq x\leq a,-b\sqrt{1-x^2/a^2}\leq y\leq b\sqrt{1-x^2/a^2}$$

(1)

其中: $Z(x,y)$ 为喷涂区域中任一点的涂层厚度累计速率函数; x,y 为坐标变量; Z_{\max} 为喷枪中心投影点涂层厚度; a,b 为椭圆形喷涂区域的长短轴; β_1 为 x 方向截面中 β 分布指数; β_2 为 y 方向截面中 β 分布指数。

为了计算方便,模型中相关参数值选用了2017年亚太地区大学生数学建模竞赛(Asia and Pacific Mathematical Contest in Modeling, APMCM)中给出的 a,b,Z_{\max},β_1 和 β_2 的计算方法:

$$\begin{bmatrix} 129.8665 & -55.2435 & 1.7436 & -297.3908 \\ 52.5130 & -5.7480 & 0.7394 & -128.6368 \\ 59.7245 & 393.9655 & -0.1244 & 150.0184 \\ -7.0125 & 34.5045 & 0.0284 & -9.5229 \\ -4.6130 & 18.3620 & 0.0113 & -0.3924 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ h \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ Z_{\max} \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

(2)

式(2)中: P_1 为喷枪的雾化压力, P_2 为隔膜泵压力, h 为喷涂高度。

上述模型是喷枪单点喷涂的模型。实际上,喷枪需要沿着规划路径移动,以便待喷涂的工件表面均匀地覆盖涂料,如图 2 所示。

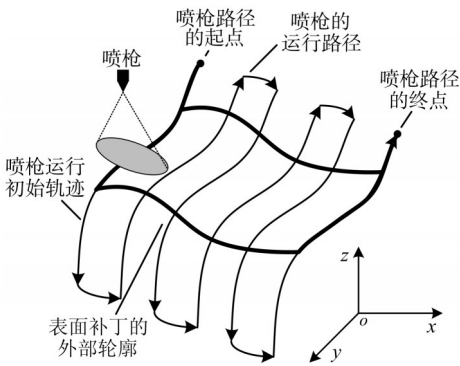


图 2 喷涂轨迹
Fig. 2 Spraying track

上述模型是喷枪单点平面喷涂的模型。实际上,当喷枪需要沿着图 2 所示规划路径移动时,可知喷涂区域的涂料厚度在单点喷涂时中间部分较厚,两侧较薄。两条轨迹的厚度分布关系如图 3 所示。

在实际喷涂过程中,喷枪以速度 v 经过时间 t 后涂层移动到图 4 虚线所在位置, x 表示喷涂范围内某点 S 到喷涂路径的距离。

则静态喷涂时 S 点的厚度为:

$$Z(x,y)=Z_{\max}(1-\frac{x^2}{a^2})^{\beta_1-1}[1-\frac{y^2}{b^2(1-\frac{x^2}{a^2})}]^{\beta_2-1} \quad (3)$$

理论上,动态喷涂模型是静态喷涂模型对时间的积分,则运动时S点处的厚度累积为:

$$Z_s(x,y)=\int_0^T Z(x,y)dt \quad (4)$$

式(4)中: T 为该点接受喷涂的总时间。

联立式(3)和式(4)可以得到:

$$Z_s(x,y)=Z(x,y)T=Z_{\max}(1-\frac{x^2}{a^2})^{\beta_1-1}[1-\frac{y^2}{b^2(1-\frac{x^2}{a^2})}]^{\beta_2-1}T \quad (5)$$

对于一个实际喷枪, P_1 和 P_2 可取 0.2 MPa, h 取 225 mm,求解矩阵可得 a 、 b 、 Z_{\max} 、 β_1 和 β_2 分别为 109.8 mm、47.1 mm、212.8 μm 、2.365 5 和 4.899 9。那么有:

$$Z_s(x,y)=212.8T(1-\frac{x^2}{109.8^2})^{1.365\ 5}\times [1-\frac{y^2}{47.1^2(1-\frac{x^2}{109.8^2})}]^{3.899\ 9} \quad (6)$$

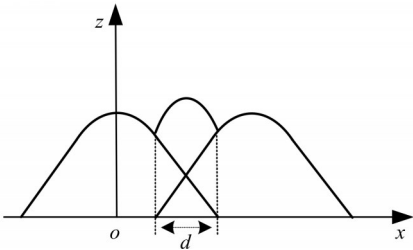


图3 涂层重叠区域
Fig. 3 Coating overlap area

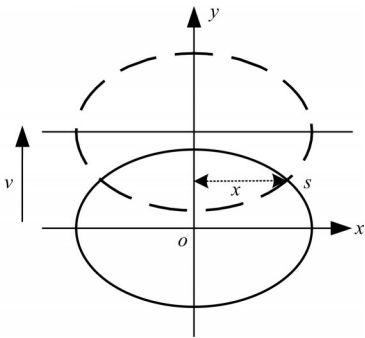


图4 动态喷涂示意图
Fig. 4 dynamic spraying diagram

图5所示为平面相邻轨迹喷涂的过程,点 O 为喷枪中心的投影点。为确定喷枪轨迹的合适相邻间距,使用静态喷涂模型进行求解,结果同样适用与喷枪的匀速运动。匀速运动时,轨迹涂层厚度在 y 方向可视为一致,因此式(6)中可以忽略 y 和 T 。

令 $y=0,T=1$ 则,式(6)可以简化为:

$$Z_s(x)=212.8(1-\frac{x^2}{109.8^2})^{1.365\ 5} \quad (7)$$

要实现均匀喷涂,应该尽量保证点 S 处的厚度与点 O 处的厚度基本一致。

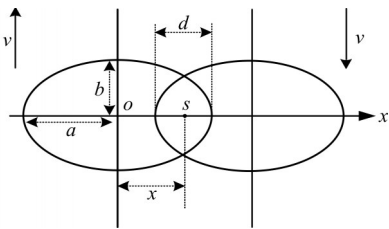


图5 平面喷涂示意图
Fig. 5 Plane spraying diagram

在MATLAB中绘制出 $Z(x,y)$ 的函数如图6所示。可以看出涂料在平面上的堆积情况。

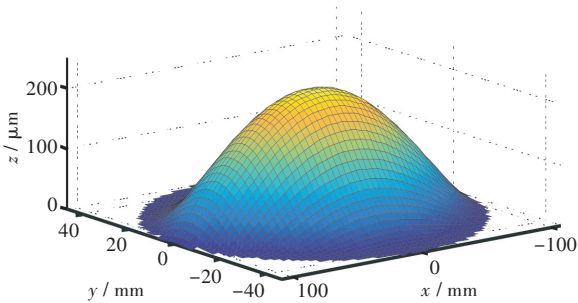


图6 静态喷涂厚度分布
Fig. 6 Distribution of static spraying thickness

其在 $y=0$ 上的映射如图7所示。

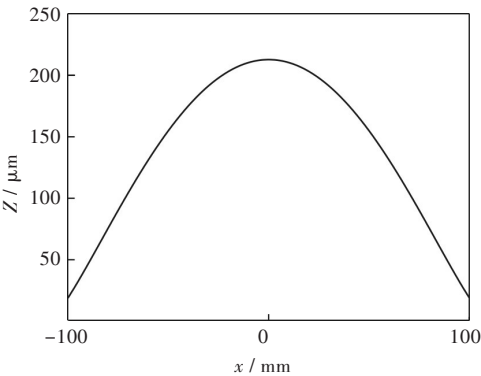


图7 静态喷涂厚度在 $y=0$ 平面上的投影
Fig. 7 Static spraying thickness on the $y=0$ plane

设图3中叠加处某一点的水平坐标为 x_0 ,则叠加厚度由公式(7)推导如下:

$$Z=212.8(1-\frac{x_0^2}{109.8^2})^{1.3655}+212.8(1-\frac{(2\times 109.8-d-x_0)^2}{109.8^2})^{1.3655} \quad (8)$$

在MATLAB中得到涂层叠加厚度 Z 与间距 d 和 x_0 的关系如图8所示。

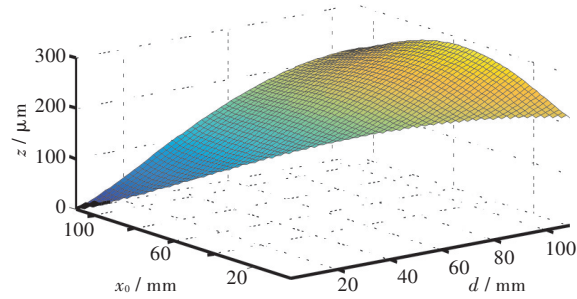


图 8 x_0 与 d 对叠加厚度的影响关系

Fig. 8 Effect of x_0 and d on superposition thickness

叠加厚度 $Z=Z_{\max}$ 时才能最大均匀化厚度,那么有:

$$\frac{Z_{\max}}{2} = 212.8(1 - \frac{x_0^2}{109.8^2})^{1.3655} = 106.4 \tag{9}$$

可求得 $x_0=69.3\text{ mm}$,根据式(8)相邻轨迹厚度需相等,则下式成立:

$$2 \times 109.8 - d - x_0 = x_0 \tag{10}$$

可解得相邻轨迹重叠距离 $d=81.1\text{ mm}$ 。

当喷枪保持以上相邻轨迹重叠距离工作时可保证平面喷涂均匀。

2 曲面动态喷涂模型

曲面 $z=-y^2+y-xy(-10\leq x\leq 10,-10\leq y\leq 10)$ 如图 9 所示。

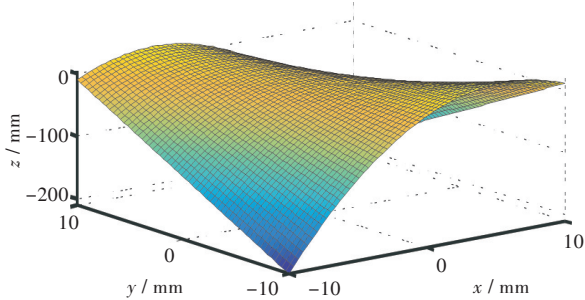


图 9 函数 $z=-y^2+y-xy$

Fig. 9 Function $z=-y^2+y-xy$

由图 9 可知,喷枪喷出的涂料由平面变到曲面上,而喷到平面上的椭圆也应该转化为曲面上的椭圆,建立转换关系如图 10 所示。

图 10 中,点 f 为喷涂圆锥中轴线与待喷涂曲面的交点,点 b 为喷枪中心点 p 在曲面上的垂直投影点, β 为 pb 与 pf 的夹角, h 为点 p 到图中水平面 ae 的垂直距离, h_1 为线段 pb 的长度, h 与 h_1 的长度近似相等。点 e 为喷涂圆锥中轴线和平面 ae 的交点。过点 e 且垂直于喷涂圆锥中轴线的截面圆为 c_1 ,半径为 r 。 c_e 为平面 ae 与喷涂圆锥面截得的椭圆, c_e 的短轴和圆 c_1 的直径近似相等,椭圆 c_e 的长轴为线段 mn 。假设喷涂作业中平面和曲面的喷涂量一致,则圆 c_1 的面积 S_{c1} 与椭圆 c_e 的面积 S_{ce} 比值为:

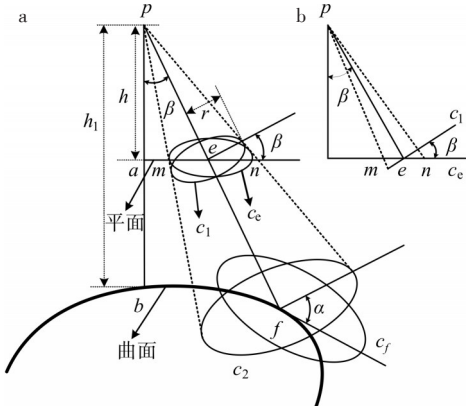


图 10 (a)椭圆投影面转换关系,(b)图(a)中过线段 mn 的垂直截面

Fig. 10 (a) Conversion relationship between Ellipse and projection surface, (b) The vertical coross-section view through line of mn in diagram (a)

$$\frac{S_{c1}}{S_{ce}} = \frac{\pi r^2}{\frac{1}{2} \pi r \cdot mn} = \tag{11}$$

$$\cos \beta - r^2 \frac{\sin^2 \beta}{l_2^2 \times \cos \beta} \approx \cos \beta$$

涂料在 c_1 上的厚度 q_1 与 c_e 上的厚度 q_e 的关系为:

$$q_e = q_1 \cos \beta \tag{12}$$

圆形面 c_1 与圆形面 c_2 平行且在同一个圆锥形涂料张角下,根据几何关系可知这两圆形面的面积关系如下:

$$S_{c_2} = (\frac{h_1}{h})^2 S_{c1} \tag{13}$$

则涂料在 c_2 上的厚度 q_2 与 c_1 上的厚度 q_1 的关系为:

$$q_2 = (\frac{h}{h_1})^2 q_1 \tag{14}$$

椭圆面 c_f 为 f 点与曲面 $z=-y^2+y-xy$ 的切面,故与 c_2 的圆锥形涂料张角一致, c_1 和 c_2 的夹角为 α ,则 c_f 上的涂层厚度 q_f 与 q_2 关系为:

$$q_f = q_2 \cos \alpha \tag{15}$$

假设喷枪在曲面 $z=-y^2+y-xy(-10\leq x\leq 10,-10\leq y\leq 10)$ 上的喷涂路径如图 11 所示。

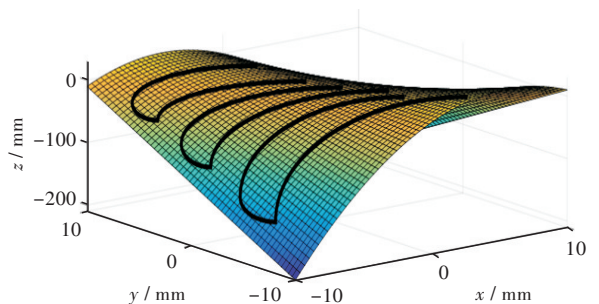


图 11 曲面喷涂路径

Fig. 11 Surface spraying path

则喷枪对曲面的喷涂,可以转化成喷枪对着曲线路径的喷涂。将 x 看作是定值,则曲面 $z=-y^2+y-xy$ ($-10\leq x\leq 10, -10\leq y\leq 10$)可以看作为抛物线,进而可求得曲面上任意一点 y_0 切线的斜率 $k=z'=-2y_0+1-x$ 。进行曲面喷涂时的平面投影如图12所示。

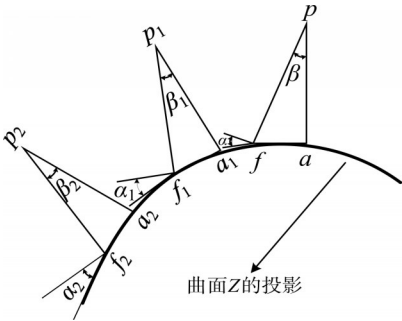


图12 平面投影示意图

Fig. 12 Flat projection diagram

图12中的曲线进行圆弧拟合的圆的方程为:

$$x^2-2Ax+y^2-2By-C=0 \tag{16}$$

其圆心坐标为 (A,B) ,圆弧半径为:

$$\rho=\sqrt{A^2+B^2+C} \tag{17}$$

令 $z=x^2+y^2$,则可将方程转化为一次函数形式,进而可得曲线上点 G 对圆弧的误差为:

$$\lambda_g=z_g-2Ax_g-2By_g-C \tag{18}$$

图13为圆弧拟合示意图。 h 为喷枪到逼近圆弧的距离, h_g 为喷枪到原始曲线的距离, α_g 为点 (x_g,y_g) 在原始曲线法线与逼近圆弧法线的夹角。

由于喷涂高度的变化导致涂层厚度发生改变,需要分析喷枪距离 h 和法向偏角 α_g 对喷涂厚度的共同影响。

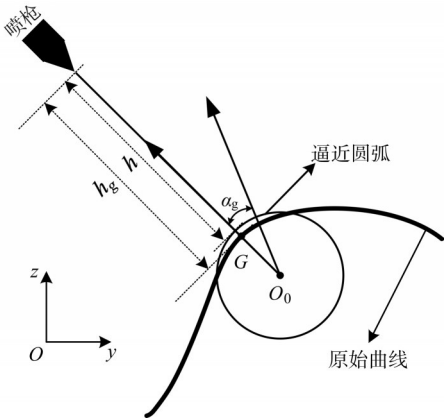


图13 拟合示意图

Fig. 13 Fitting diagram

在喷涂误差范围内,如果要保证圆弧能够逼近目标曲面,需满足圆弧到原始曲线上各点的平方和最小,即

$$\begin{cases} Q_{\min}=\sum_{g=1}^n\lambda_g^2=\sum_{g=1}^n(z_g-2Ax_g-2By_g-C)^2 \\ \text{s.t.} \frac{q_d-\Delta q_d}{q_{\min}\cos(\alpha_g)}\leq(\frac{h}{h_g})^2\leq\frac{q_d+\Delta q_d}{q_{\max}} \end{cases} \tag{19}$$

式(19)中: q_d 为轨迹优化后原始曲面上涂层厚度的平均值; q_{\min} 为轨迹优化后原始曲面上涂层厚度的最小值; q_{\max} 为轨迹优化后原始曲面上涂层厚度的最大值。令

$$\frac{\partial Q}{\partial A}=\frac{\partial Q}{\partial B}=\frac{\partial Q}{\partial C}=0 \tag{20}$$

采用修正 Gauss-Newton 法^[16]可求得参数 A 、 B 、 C 的取值,从而将原始曲线的一端拟合成为圆弧。进而可将原始曲线转化为无数段小圆弧组成。其所对应的关系如图14所示。

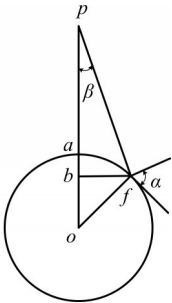


图14 圆弧拟合关系示意图

Fig. 14 Arc fitting relationship diagram

图14中 b 为球面上喷涂投影点。设线段 $pa=h$, $pf=l$, $po=l_1$ 则线段 $pb=l\cos\beta$,球的半径为 ρ ,由余弦定理求得:

$$\begin{aligned} \alpha &= \pi - \arccos \frac{l^2 + \rho^2 - l_1^2}{2l\rho} = \\ &= \pi - \arccos \frac{l^2 - 2\rho h - h^2}{2l\rho} \end{aligned} \tag{21}$$

所以其静态时间累积喷涂模型为:

$$\begin{aligned} q_f &= q_e \frac{h^2}{l^2 \cos^3 \beta} \cos \alpha = \\ &= q_e \frac{4h^2(\rho+h)^3(l^2-2\rho h-h^2)}{\rho(l^2+h^2+2\rho h)^3} \quad (\alpha < 90^\circ) \end{aligned} \tag{22}$$

选取曲面的一条路径 j ,将其分成 n 段曲线,并将其中的一端曲线选择出来进行研究。如图15所示为一路径划分示意图,假设在每一段的路径上,喷枪的移动速度是相等的。设在第 k 段的长度为 d_k ,速度为 v_k ,在其上的喷涂时间为 t_k 。然后将第 k 段进行二次分割,分割成 m 段曲线,在每小段上的喷涂时间也都相等,设为 t_k' 。

那么对式(22)中的 q_f 求时间 t 的导数可得:

$$\begin{aligned} \frac{dq_f}{dt} &= \frac{dq_e}{dt} \frac{4h^2(\rho+h)^3(l^2-2\rho h-h^2)}{\rho(l^2+h^2+2\rho h)^3} = \\ &= Z(x_i,y_i) \frac{4h^2(\rho+h)^3(l^2-2\rho h-h^2)}{\rho(l^2+h^2+2\rho h)^3} \end{aligned} \tag{23}$$

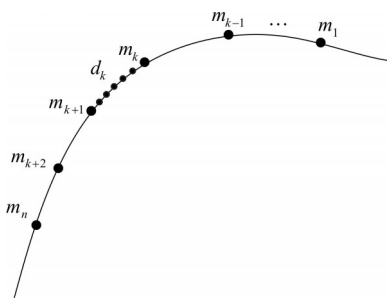


图 15 路径划分示意图
Fig. 15 Path division diagram

假设每段曲线中的每一个小段上的 α_i 与 β_i 的变化都极小,则第 k 段路径上的涂层厚度为:

$$q_k = \sum_{i=1}^m Z(x_i, y_i) \frac{4h^2(\rho_i + h_i)^3(l_i^2 - 2\rho_i h_i - h_i^2)}{\rho_i(l_i^2 + h_i^2 + 2\rho_i h_i)^3} \quad (24)$$

相邻路径 $j+1$ 上的涂层厚度为:

$$q_{j+1} = \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{mv_k} \sum_{i=1}^m (Z(x_i - 2a + d, y_i) \frac{4h^2(\rho_{i,j+1} + h_{i,j+1})^3(l_{i,j+1}^2 - 2\rho_{i,j+1} h_{i,j+1} - h_{i,j+1}^2)}{\rho_{i,j+1}(l_{i,j+1}^2 + h_{i,j+1}^2 + 2\rho_{i,j+1} h_{i,j+1})^3}) \quad (25)$$

则曲面上任意一点 (x_i, y_i) 处的涂层厚度可以表示为:

$$q = q_j + q_{j+1} \quad (a - d \leq x \leq a) \quad (26)$$

则喷枪轨迹优化问题可表示为:

$$\begin{cases} L_{\min} = \sum_{j=1}^N (q - q_{\max})^2 \\ \text{s.t. } |q - q_{\max}| < 10\% \times q_{\max} \end{cases} \quad (27)$$

从而可以通过以公差最小与喷涂面厚度差小

于 10% 为优化条件,获得路径 $j, j+1$ 之间的最佳重叠距离 d_j 。

3 结果与讨论

如图 16 所示,设初始喷涂轨迹为曲面 $z=-y^2+y-xy$ 与平面 $x=1$ 相交的曲线,即曲线 $z=-y^2$ 。并令喷涂起始点为曲线 $z=-y^2$ 上的一点 $p_0(1,0,0)$ 。使用第一章中平面喷涂模型的参数,并代入相关数值,通过 MATLAB 计算出初始轨迹和相邻轨迹在 x 方向上的涂层重叠距离 d 。实验中选取了 5 个离散点,计算结果如表 1 所示。图 16 中, p_0, m_0, r_0 分别表示离散点 1 在初始轨迹、重叠间距中间点、相邻轨迹上的位置。表 1 中 $q(p, m, r)$ 表示三个点 $p(x, y, z), m(x, y, z), r(x, y, z)$ 处的涂层厚度。

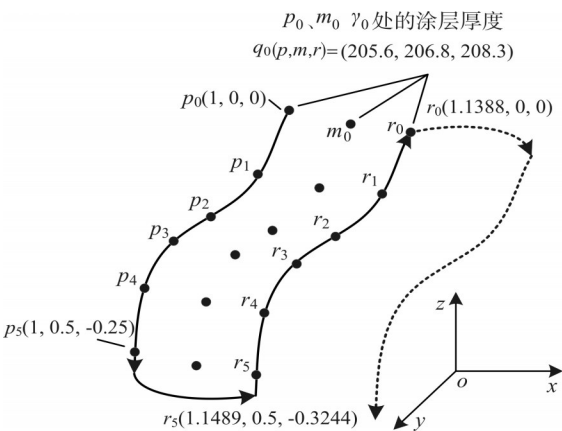


图 16 实验示意图
Fig. 16 Experimental diagram

表 1 计算结果
Tab. 1 Calculation results

| 离散点编号 | 初始轨迹位置 $p(x, y, z) / \text{m}$ | 相邻轨迹位置 $r(x, y, z) / \text{m}$ | 涂层重叠距离 d / mm | 离散点对应涂层厚度 $q(p, m, r) / \mu\text{m}$ |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---|
| 1 | $p_0(1, 0, 0)$ | $r_0(1.138\ 8, 0, 0)$ | 80.9 | $q_0(205.6, 206.8, 208.3)$ |
| 2 | $p_1(1, 0.1, -0.01)$ | $r_1(1.1457, 0.1, -0.024\ 6)$ | 73.9 | $q_1(205.1, 203.4, 204.1)$ |
| 3 | $p_2(1, 0.2, -0.04)$ | $r_2(1.1462, 0.2, -0.069\ 2)$ | 73.5 | $q_2(204.2, 200.8, 199.7)$ |
| 4 | $p_3(1, 0.3, -0.09)$ | $r_3(1.1436, 0.3, -0.133\ 1)$ | 76.1 | $q_3(203.4, 199.7, 195.1)$ |
| 5 | $p_4(1, 0.4, -0.16)$ | $r_4(1.1484, 0.4, -0.219\ 4)$ | 71.3 | $q_4(205.1, 200.4, 189.9)$ |
| 6 | $p_5(1, 0.5, -0.25)$ | $r_5(1.1489, 0.5, -0.324\ 4)$ | 70.8 | $q_5(205.1, 192.1, 188.9)$ |

由表 1 数据可知,各离散点对应的涂层厚度分布符合厚度差小于 10% 的优化条件。

4 结 语

1) 基于平面静态喷涂的椭圆双 β 分布模型,研究了平面喷涂时两轨迹之间的涂料堆积情况,

得出相邻轨迹之间的涂料最佳重叠距离 d ,并在 MATLAB 中进行了验证。

2) 根据对平面喷涂与曲面喷涂之间的映射关系的研究,使用了一种复杂曲面的最小二乘自然二次曲面拟合法,简化了复杂曲面喷涂轨迹规划的研究。

3)通过多段分割曲线逼近目标函数的方法,提出了一种相邻路径之间涂料的最佳重叠距离的计算思路,并在 MATLAB 中进行了验证。该方法为喷涂机器人在复杂曲面上的轨迹规划问题提供了新的参考。

参考文献:

[1] 陈伟. 喷涂机器人轨迹优化关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.

[2] 张彦铎, 葛林凤. 一种新的基于 MMAS 的机器人路径规划方法[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(5): 76-79.

[3] 于乾坤, 王国磊, 任田雨, 等. 一种移动喷涂机器人的高效站位优化方法[J]. 机器人, 2017, 39(2): 249-256.

[4] 李芳, 顾海巍. 喷涂机器人运动学与轨迹规划算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 25-28.

[5] 缪东晶, 王国磊, 吴聊, 等. 自由曲面均匀喷涂的机器人轨迹规划方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013(10): 1418-1423.

[6] ARIKAN M A S, BALKAN T. Process simulation and paint thickness measurement for robotic spray painting[J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2001,

50(1): 291-294.

[7] 周青松. 喷涂机器人人机交互及离线编程系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[8] 张永贵, 黄玉美, 高峰, 等. 喷漆机器人空气喷枪的新模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 226-233.

[9] MAYUR V A, SHITAL S C. Incremental approach for trajectory generation of spray painting robot[J]. An International Journal, 2015, 42(3): 228-241.

[10] 曾勇, 龚俊, 杨东亚, 等. 圆锥面组合曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(1): 97-103.

[11] 曾勇, 龚俊. 面向自然二次曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 中国机械工程, 2011, 22(3): 282-290.

[12] 曾勇. 大型复杂自由曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

[13] 高峰, 吴俊军. 基于包容盒分解的快速干涉检验算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(6): 435-440.

[14] 陈光, 任志良, 孙海柱. 最小二乘曲线拟合及 MATLAB 实现[J]. 兵工自动化, 2005, 24(3): 107-108.

[15] 冯浩, 吴秋, 王小平. 基于椭圆双 β 模型的球面喷涂轨迹优化[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 249-252.

[16] 薛嘉庆. 最优化原理与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 121-126.

本文编辑: 陈小平



(上接第 328 页)

[10] LIANG H D, HAN J H, GUO G H. Template matching algorithm of radar beam scan type recognition [J]. Journal of Electronics (China), 2014 (2): 100-106.

[11] TIANY J, JU X C, QI Z Q, et al. Improved twin support vector machine [J]. Science China (Mathematics), 2014, 22(2): 417-432.

[12] ASHOK K P, PAVITRA H. An adaptive approach for the reconstruction and modeling of as-built 3D pipe-

lines from point clouds [J]. Automation in Construction, 2016, 72(12): 65-78

[13] 鲍磊. 高速铁路钢轨质量评估[J]. 中国冶金, 2014(11): 9-13.

[14] IGOR D. BM3D filter in salt-and-pepper noise removal [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2016, 10(1): 1-11.

[15] 孙一帆, 张敬磊, 王丝丝. 因子分析与多层神经网络组合的酒驾辨识模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(7): 127-132.

本文编辑: 陈小平