

针对规则化工件曲面的喷涂轨迹规划研究

邵振华, 周 波, 孟正大, 戴先中

(东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;
东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要:基于大曲率复杂自由曲面可被分片造型成若干个近似平面、圆柱面、圆锥面和球面组合的思想,文中分别针对平面、圆柱面、圆锥面、球面等不同规则化曲面的喷涂轨迹优化进行研究。首先根据平面的静态喷涂模型分别建立圆柱面、圆锥面、球面的喷涂模型,并以涂层均匀性为优化目标求解优化的路径参数,喷枪速度 v 和喷涂间距 d ,在此基础上分别给出针对平面、圆柱面、圆锥面、球面的喷枪轨迹的生成算法。最后通过仿真验证了所提方法的有效性、正确性。

关键词:喷涂机器人;轨迹规划;圆柱面;圆锥面;球面;仿真

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)03-0006-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.03.002

Research on Path Planning of Spray Painting for Standardized Workpiece

SHAO Zhen-hua, ZHOU Bo, MENG Zheng-da, DAI Xian-zhong

(Ministry of Education Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, Southeast University,
Nanjing 210096, China;
School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract:Complex free-form surfaces with high curvature can be segmented into several approximate plane, cylindrical surface, conical surface and spherical surface. Based on this idea, study on spray path planning for standardized workpiece, such as plane, cylindrical surface, conical surface, spherical surface. Firstly, according to static spray model of plane, establish the spray model of cylindrical surface, conical surface, spherical surface respectively, and taking coating uniformity as optimization target, solve the optimized path parameter of the painting velocity and stroke distance, then based on this, respectively give the generated algorithm of trajectory for plane, cylindrical surface, conical surface, spherical surface. Finally, the effectiveness and correction of the proposed method is verified by simulation.

Key words: spray painting robot; path planning; cylindrical surface; conical surface; spherical surface; simulation

0 引言

随着制造业的迅速发展以及人们对环境保护、工人保护的重视,喷涂机器人在生产中逐渐代替了手工劳动力,提高了生产效率并减少了劳动力成本。而喷涂机器人的喷枪轨迹直接影响着机器人对工件的喷涂效果。传统喷涂机器人的诸多缺点使得人们开始研究喷涂机器人离线编程方法与仿真技术。

1986年,A. Klein^[1]最先将离线编程技术应用于喷漆机器人,并提出基于CAD的喷漆机器人离线编程系统。Klein、Goodman和Suh等^[2-3]最早提出了解决

自动喷涂问题的离线编程系统框架,针对近似平面的简单曲面进行了轨迹规划。Chen和Sheng等^[4-6]采用将复杂曲面分割成简单平面的处理方法解决了一般复杂曲面的轨迹生成问题。目前,面向平面的喷涂轨迹优化取得了一定的研究成果,并得到了试验验证^[7-11]。而研究发现机械工程中的曲面类型中,圆柱面、圆锥面、球面等规则化曲面出现的次数较多,诸如汽车车门的类圆柱面、汽车保险杠拐角处的类圆锥面和导弹弹头的类球面等,因此这类曲面类型越来越受到研究者的关注。李发忠等^[12]针对凹凸结构曲面,采

收稿日期:2014-04-23

修回日期:2014-07-24

网络出版时间:2015-01-20

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(2010ZX04008-041)

作者简介:邵振华(1985-),女,硕士研究生,研究方向为工业机器人;周 波,博士,副教授,研究方向为工业机器人、移动机器人等;孟正大,教授,硕士生导师,研究方向为机器人运动控制、机器人智能控制等;戴先中,博士,教授,博士生导师,研究方向为机器人控制、神经网络软测量与控制等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150120.2200.027.html>

用微分几何的面积放大定理推导出自由曲面上的漆膜累积速率二次函数。文献[13]简单研究了大曲率柱面的轨迹规划,提供了一种圆柱和类圆柱的分片造型方法。周春焯等^[14]提供了根据球体经线分片和路径生成方法,但是未提供球面的厚度计算方法。

在复杂自由曲面被分片造型成若干个近似平面、圆柱面、圆锥面和球面组合后,在此基础上,文中分别针对平面、圆柱面、圆锥面、球面等规则化曲面的喷涂轨迹优化进行研究,根据平面的静态喷涂模型建立圆柱面、圆锥面、球面的喷涂模型,由此建立优化问题并利用数值优化方法求解路径参数,如喷枪速度和喷涂间距。然后分别针对这些规则化曲面给出喷枪轨迹的生成方法。最后将这些算法实现到该课题组开发的基于 Visual C++/MFC 和 OpenGL 喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统软件中,通过仿真验证所提方法的有效性,并能对仿真结果进行三维色彩化显示。

1 规则化工件的路径规划流程

喷涂机器人喷枪数学模型的建立和喷枪轨迹优化是喷涂机器人离线编程中的关键技术,国内外许多学者围绕此问题进行了研究。在喷枪数学模型的建立方面,研究者们主要集中于平面上喷枪数学模型的研究,对于规则曲面及自由曲面上喷枪数学模型的建立研究较少。在喷涂轨迹规划方面,面对复杂的自由曲面传统的处理方法是进行离散造型处理,形成若干个近似平面片,具体针对每个平面片进行喷涂轨迹优化,有时为了适应新的喷涂作业规则,不得不增加分片的数量来逼近平面,这样却降低了喷枪轨迹规划的效率。因此文中采用基于大曲率复杂自由曲面被分片造型成若干个近似平面、圆柱面、圆锥面和球面组合的思想,分别针对平面、圆柱面、圆锥面、球面上的喷涂轨迹优化进行研究,建立圆柱面、圆锥面、球面的喷涂模型,给出喷枪轨迹的生成方法,最后通过仿真验证所提方法的有效性。

在各种规则化曲面上的路径规划有三部分:规则化工件的喷涂建模、路径参数的求解、路径的生成。

2 规则化工件的喷涂模型

在实际的喷涂过程中,获取涂料在工件表面的分布规律即是喷涂过程建模。通过分析在喷涂过程中影响喷涂效果的因素,提出相应的喷涂建模假设,建立静态涂层累积速率模型。

2.1 平面的静态喷涂模型

针对平面静态喷涂模型,诸多研究学者做了大量研究并取得了一些成果。喷涂模型包括静态模型、动态模型和自由曲面模型三类。动态模型和自由曲面模

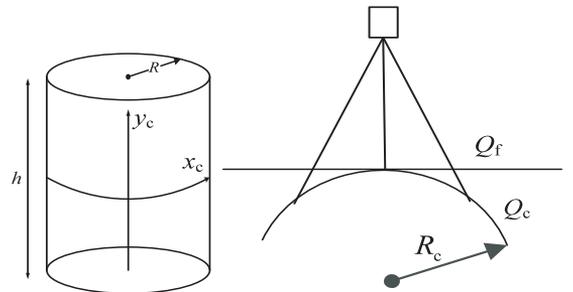
型可通过静态模型推导得到,所以文中选择静态涂层累积模型。比较常用的静态喷涂涂层生长率模型有很多,文中选择椭圆双 β 模型,其表达式如式(1)所示。

$$\frac{dq(s,t)}{dt} = \begin{cases} d_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{\beta_1-1} \left[1 - \frac{y^2}{b^2\left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)}\right]^{\beta_2-1} & \text{在椭圆内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, d_{\max} 表示单位时间涂层累积最大厚度; a, b 分别表示椭圆半长、短轴; β_1, β_2 表示参数。它们都是待拟合的模型参数。

2.2 圆柱面的静态喷涂模型

由于在喷涂过程中,随着喷枪与工件表面距离的变化,即不同截面,涂料的生长速率函数不会发生变化,它是喷炬的固有特性,喷枪在圆柱面上的涂层生长速率模型如图1(b)所示。 Q_c 是圆柱上的点, Q_f 是与圆柱面相切的平面上的点, Q_e 是 Q_f 的投影点, f_c, f_f 分别代表 Q_c, Q_f 两点的涂层厚度。文中建立了一个新的坐标系来确定圆柱面上的涂层累积模型,如图1(a)所示。 x_c 轴是沿圆柱面的方向, y_c 是圆柱的母线方向。



(a)坐标系示意图 (b)圆柱面喷涂模型的建立图

图1 圆柱面的喷涂模型示意图

将喷枪到圆柱面的高度 h 和圆柱半径 R_c 的比率记为 $\eta = h/R_c$ 。已知 Q_c 的坐标 (x_c, y_c) 根据圆柱的几何特性和平面的位置关系得到 Q_f 的坐标 (x_f, y_f) 。

$$x_f = \frac{R_c \eta \sin \frac{x_c}{R_c}}{\eta + 1 - \cos \frac{x_c}{R_c}} \quad (2)$$

$$y_f = \frac{y_c \eta}{\eta + 1 - \cos \frac{x_c}{R_c}} \quad (3)$$

根据漆通量不变的假设,

$$f_c dx_c dy_c = f_f dx_f dy_f \quad (4)$$

可计算得到:

$$f_c = f_f \frac{\eta^2 \left(-1 + \cos \frac{x_c}{R_c} + \eta \cos \frac{x_c}{R_c}\right)}{\left(1 + \eta - \cos \frac{x_c}{R_c}\right)^3} \quad (5)$$

2.3 圆锥面的静态喷涂模型

据分析,圆锥面上喷涂建模类似于圆柱面的喷涂建模过程,但也有些不同。下面详细介绍圆锥面喷涂模型,如图2所示。

对于圆锥面,建立坐标系的过程与前面圆柱面的过程相同。不同的是定义 $\eta = h/r$, 即喷枪到圆锥面的高度 h 和 r 的比率,如图2所示。 r 可根据式(6)计算得到:

$$r = \frac{R(R_1 - R_2)}{h_s \sin \varphi} \quad (6)$$

其中,圆锥面的上下面的半径为 R_1 和 R_2 ,上下面之间的距离为 h_s ,可得: $\varphi = \arctan \frac{R_2 - R_1}{h_s}$, $l = R/\sin \varphi$, $r = l \tan \varphi$ 。

在图1(a)中,已知 Q_c 的坐标 (x_c, y_c) ,根据圆锥面几何特性和平面的位置关系得 Q_f 的坐标 (x_f, y_f) 。

$$x_f = \frac{R_c \eta \sin \frac{x_c}{r}}{\eta + 1 - \cos \frac{x_c}{r}} \quad (7)$$

$$y_f = \frac{y_c \eta}{\eta + 1 - \cos \frac{x_c}{r}} \quad (8)$$

根据漆通量不变的假设,如式(4),可计算得:

$$f_c = f_f \frac{\eta^2 (-1 + \cos \frac{x_c}{r} + \eta \cos r)}{(1 + \eta - \cos \frac{x_c}{r})^3} \quad (9)$$

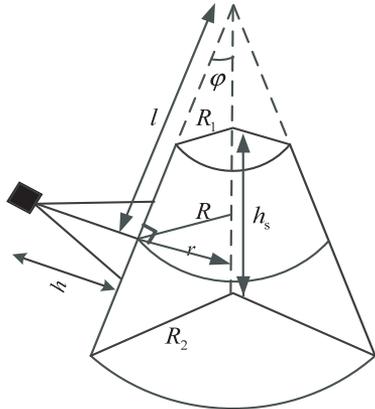


图2 圆锥面的喷涂模型示意图

需要注意的是在喷枪行走的过程中 r 是变化的,所以喷涂模型也是变化的,后面优化的路径参数也是变化的。

2.4 球面的静态喷涂模型

文中建立了一个新的坐标系来确定球面上的涂层累积模型, z 轴是喷枪喷射方向的反方向, y 是喷枪前进方向,如图3所示。图中 C_2 是球面上的点, C_1 是与球面相切的平面 P_1 上的点, C_2 是 C_1 的投影点,记 f_c, f_f

分别代表 C_2, C_1 两点的涂层厚度,平面 P_2 为过 C_2 点且与平面 P_1 平行的平面。

已知 C_2 的坐标 (x_c, y_c, z_c) ,假设 C_1 的坐标 (x_f, y_f, z_f) ,记喷枪到球面的高度为 h 和球面半径为 R_c ,喷枪喷射点到平面 P_2 的垂直高度为 h_s , S_2 为 P_2 平面上过 C_2 点的微小平面, S_1 为喷射点与 C_1 点连线与 P_1 平面的交点处的微小平面, S_2 是 S_1 在 P_2 上的投影面,设过 C_2 点且与喷枪在 C_2 点喷射方向垂直的平面为 S_3 ,即平面 S_3 与喷枪喷射点和 C_2 点的连线垂直。设过 C_2 点的微小切平面为 S_4 ,即平面 S_4 与 C_2 点的法向量垂直且过 C_2 点, S_2 与 S_3 夹角为 θ_s , S_3 与 S_4 平面的夹角为 γ 。

根据喷炬漆通量不变的假设,构造参考平面,通过微分几何的面积放大定理确定球面上某点的涂层累积厚度模型。

$$f_c = f_f \left(\frac{h}{h_s}\right)^2 \frac{\cos \gamma}{\cos \theta_s} = f_f \left(\frac{h}{l_s}\right)^2 \frac{\cos \gamma}{\cos^3 \theta_s} = f_f \left(\frac{h}{l_s}\right)^2 \frac{\cos(\theta_s + \beta_s)}{\cos^3 \theta_s} \quad (10)$$

其中, $\theta_s = \arctan\left(\frac{r_s}{h + R_c + z_c}\right)$; $\beta_s = \arcsin\left(\frac{r_s}{R_c}\right)$;
 $r_s = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$ 。

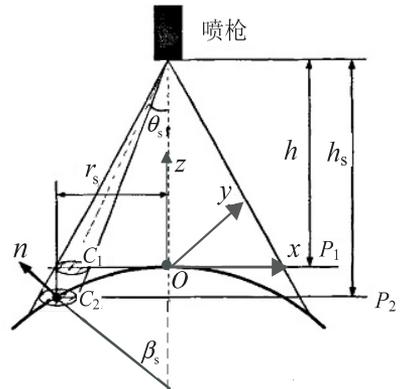


图3 球面的喷涂模型示意图

3 规则化工件表面路径的生成

路径的规划就是根据喷涂参数以及喷涂曲面确定喷枪在曲面上的行走路径,这里首先需要确定喷枪的行程间距 d 和喷涂速度 v ,可以根据喷涂要求使用数值优化算法确定。在获得行程间距 d 和喷涂速度 v 后,便可以对规则化工件进行路径规划。

3.1 路径参数优化

由规则化工件的静态喷涂模型推导得到多行程喷涂的涂层厚度分布模型,然后以喷涂工艺要求为优化目标建立的喷涂轨迹优化模型,并采用数值方法求解得到优化轨迹的关键参数。

(1) 多行程涂层厚度累积模型的推导。

行程之间任意点 s 的涂层厚度,其计算公式如下:

$$q_s(x) = \begin{cases} q_1(x) & 0 \leq x \leq d - a' \\ q_1(x) + q_2(x) & d - a' \leq x \leq a' \\ q_3(x) & a' \leq x \leq d \end{cases} \quad (11)$$

$$q_1(x) = 2 \int_0^{t_1} f(r_1) dt, 0 \leq x < d - a'$$

$$q_2(x) = 2 \int_0^{t_2} f(r_2) dt, a' \leq x \leq d$$

其中, t_1, t_2 分别表示两条行程在 s 点的喷涂时间的一半; r_1, r_2 表示 s 点到喷枪投射点的距离; a' 是喷涂模型的长轴。

(2) 行程参数的优化建模和求解。

任意点 s 的涂层厚度除了与模型本身有关外, 只与喷枪的移动速度 v 和行程间距 d 有关, 这样便可以建立 d 和 v 的优化问题。在考虑喷涂效果时, 主要考虑涂层的厚度以及厚度的均匀性, 这里将以涂层的期望厚度和厚度均匀性为目标建立优化目标函数。目标函数如下:

$$\min_{d \in (0, 2R]} E(d, v) = \int_0^d (q_s(x, d, v) - q_{avg})^2 dx / d \quad (12)$$

其中, $q_{avg} = \int_0^d q_s(x, d, v) dx / d$ 为平均厚度; q_d 为期望厚度。

约束条件为:

$$v \leq v_{max}, 0 \leq d \leq 2a', q_{avg} = q_d$$

在建立了优化问题之后, 采用数值优化算法对 d 和 v 进行寻优。

3.2 路径的生成

在获得了行程间距 d 和喷涂速度 v 之后, 便可以利用算法对喷涂路径进行规划, 针对圆柱面、圆锥面和球面等规则化工件曲面, 提出一种快速路径生成算法, 采用切割投影法在各规则化工件曲面内(如平面、圆柱面、圆锥面、球面)生成喷涂轨迹。该算法是利用各规则化曲面的几何参数形成一系列平面进行切割来完成轨迹规划。

(1) 平面的路径生成方法。

平面的几何参数有长度 a 和宽度 b 。喷枪在喷涂的过程中, 当需要拐弯时, 通常需要加减速, 这会造成能量的浪费和效率的下降; 同时, 当喷枪拐弯时其喷涂的涂层均匀性也将受到影响。所以在整个喷涂过程中, 喷枪拐弯的次数越少越好。为了满足这种要求, 平面的轨迹是沿长度 a 进行。具体步骤如下:

第一步: 构造第一个平面, 作平行于且经过 a 并垂直于平面的平面 P_1 ;

第二步: 选取 P_1 为参考面, 建立一簇距离为 d (行程间距) 的平行平面, 利用生成的平面簇与工件曲面求取交线;

第三步: 上一步得到的这些交线就是喷涂轨迹在

平面的投影点, 由于在喷涂过程中, 喷枪都是垂直于工件表面, 故根据工件表面的法向量可以获得喷枪的实际喷涂点位置与方向;

第四步: 对各行程之间进行路径连接, 从而构成各子片内的完整喷涂轨迹。

(2) 圆柱面的路径生成方法。

在空间中, 圆柱面由动直线平行于定直线, 并绕定直线旋转得到, 这条定直线即为轴线。建立绕轴线的一系列平面, 并使这些平面切割圆柱面即可得到圆柱面轨迹。具体步骤如下:

第一步: 构造第一个平面, 提取直线 l , 作过轴线与直线 l 的平面 P_1 ;

第二步: 选取 P_1 为参考面, 建立一簇夹角为 θ ($\theta = \delta/R, \delta$ 为行程间距) 的旋转平面, 利用生成的平面簇与工件曲面求取交线;

第三步: 上一步得到的这些交线就是喷涂轨迹在平面的投影点, 由于在喷涂过程中, 喷枪都是垂直于工件表面, 故根据工件表面的法向量可以获得喷枪的实际喷涂点位置与方向;

第四步: 对各行程之间进行路径连接, 从而构成各子片内的完整喷涂轨迹。

(3) 圆锥面的路径生成方法。

圆锥面的几何参数有底面圆弧半径、底面扇形夹角和圆锥高度。用一系列垂直于圆锥面轴线的平面切割球面。步骤如下:

第一步: 构造第一平面, 作垂直于轴线且过底面的平面 P_1 ;

第二步: 在确定第一个平面 P_1 基础上, 确定平面 P_2 , 在确定 P_2 的位置和速度时, 则需要以 P_1 和 P_2 之间的工件表面涂层的期望厚度及其均匀性最佳为优化目标, 对 d 和 v 进行优化, 获得最佳喷涂效果的 d_2 和 v_2 ;

第三步: 以此类推建立 P_3, P_4, \dots, P_i , 直到 P_{i+1} 与圆锥面没有交线。利用生成的平面与工件曲面求取交线, 这些交线就是喷涂轨迹在平面的投影点。由于在喷涂过程中, 喷枪都是垂直于工件表面, 故根据工件表面的法向量可以获得喷枪的实际喷涂点位置与方向;

第四步: 对各行程之间进行路径连接, 从而构成各子片内的完整喷涂轨迹。

(4) 球面的路径生成方法。

球面的几何参数只有球面半径, 沿球面的纬线进行路径规划。步骤如下:

第一步: 构造第一个平面, 作过赤道线且垂直轴线的平面 P_1 ;

第二步: 选取 P_1 为参考面, 建立一系列间距为 d 的平面簇, 利用生成的平面簇与工件曲面求取交线, 这些交线就是喷涂轨迹在平面的投影点。由于在喷涂过

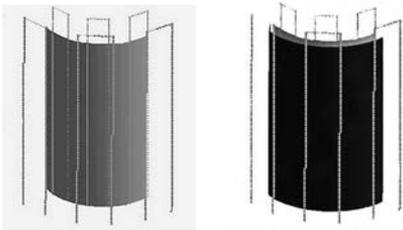
程中,喷枪都是垂直于工件表面,故根据工件表面的法向量可以获得喷枪的实际喷涂点位置与方向;

第三步:对各行程之间进行路径连接,从而构成各子片内的完整喷涂轨迹。

4 仿真结果

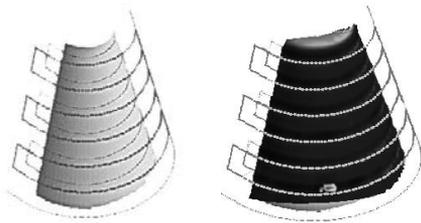
喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统由喷涂机器人离线轨迹规划与仿真软件、Microsoft Windows XP Professional 操作系统、Visual C++/MFC 开发环境、OpenGL 等组成。文中研究的算法已经全部在该课题组开发的喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统软件中予以实现。这里将利用该软件,针对相关的典型工件进行仿真规划,以验证文中算法的有效性和实用性。

对各个规则化工件进行离线轨迹规划与喷涂效果仿真,图中实体即为喷涂的对象,线条为喷涂轨迹。图 4、图 5 分别为圆柱面、圆锥面的仿真效果图,图(a)为轨迹生成图,图(b)为喷涂厚度的色彩效果图。



(a) 圆柱面路径生成图 (b) 圆柱面涂层效果图

图 4 圆柱面仿真结果



(a) 圆锥面路径生成图 (b) 圆锥面涂层效果图

图 5 圆锥面仿真结果

从图中可以看出,该系统能够很好地根据工件的特征生成相应的轨迹,对于曲面、平面、圆柱面、圆锥面、球面都能正确地生成轨迹;并且能够给出仿真的效果图。从图(a)中可以看出针对不同规则化工件表面可以生成合理正确的路径;从图(b)中可以看出在整个喷涂面上都获得了很好的喷涂效果,显示有很好的均匀性,可以达到要求。

5 结束语

文中对规则化工件表面的喷涂模型、喷涂路径快速规划等方面进行了详细的研究,在此基础上利用 MFC 和 OpenGL 技术将该算法实现到喷涂机器人离线轨迹规划与仿真系统中。该仿真系统能够正确地对导

入的不同规则化工件生成正确的喷涂轨迹,并能够 3D 可视化仿真喷涂轨迹,对仿真结果进行图形化显示,从而达到优化喷涂效果、提高喷涂效率和节省喷涂成本的目标。

参考文献:

- [1] Klein A. CAD-based off-line programming of painting robots [J]. *Robotica*, 1987, 5(4): 267-271.
- [2] Goodman E D, Hoppensteradt L T W. A method for accurate simulation of robotic spray application using empirical parameterization [C]//Proceedings of the 1991 IEEE international conference on robotics and automation. Sacramento, CA: IEEE, 1991: 1357-1368.
- [3] Suh S H, Woo I K, Noh S K. Development of an automatic trajectory planning system (ATPS) for spray painting robots [C]//Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. Sacramento: IEEE, 1991: 1948-1955.
- [4] Chen Heping, Fuhlbrigg T, Li Xiongzi. Automated industrial robot path planning for spray painting process: a review [C]//Proceedings of 4th IEEE conference on automation science and engineering. Arlington: IEEE, 2008: 522-527.
- [5] Chen Heping, Xi Ning, Sheng Weihua, et al. General framework of optimal tool trajectory planning for free-form surfaces in surface manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127(1): 49-59.
- [6] Sheng Weihua, Chen Heping, Xi Ning, et al. Tool path planning for compound surfaces in spray forming processes [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2005, 2(3): 240-249.
- [7] 王振滨, 赵德安, 王 斌, 等. 喷漆机器人离线编程系统探讨 [J]. *江苏理工大学学报: 自然科学版*, 2000, 21(5): 78-82.
- [8] Antonio K J, Ramabhadran R, Ling L T. A framework for optimal trajectory planning for automated spray coating [J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 1997, 12(4): 124-134.
- [9] 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, 2008.
- [10] 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.
- [11] 张永贵, 黄玉美, 彭中波, 等. 考虑动力学因素的喷漆机器人喷枪路径优化 [J]. *机械科学与技术*, 2006, 25(8): 993-996.
- [12] 李发忠, 赵德安, 姬 伟, 等. 面向凹凸结构曲面的喷漆机器人轨迹优化研究 [J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 22(4): 64-67.
- [13] 陆保印. 喷漆机器人喷枪轨迹设计与优化研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [14] 周春焯, 曾 勇. 面向球面的喷漆机器人经线喷涂轨迹优化 [J]. *机械设计与制造*, 2010(11): 130-132.

针对规则化工件曲面的喷涂轨迹规划研究

作者: [邵振华](#), [周波](#), [孟正大](#), [戴先中](#), [SHAO Zhen-hua](#), [ZHOU Bo](#), [MENG Zheng-da](#),
[DAI Xian-zhong](#)

作者单位: [东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室](#), [江苏 南京 210096](#); [东南大学 自动化学院](#), [江苏 南京 210096](#)

刊名: [计算机技术与发展](#) 

英文刊名: [Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期): 2015(3)

引用本文格式: [邵振华](#). [周波](#). [孟正大](#). [戴先中](#). [SHAO Zhen-hua](#). [ZHOU Bo](#). [MENG Zheng-da](#). [DAI Xian-zhong](#) [针对规则化工件曲面的喷涂轨迹规划研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(3)