

静电喷涂涂层厚度分布模型的研究进展

张淑珍, 毛伟, 甄晶博, 李春玲

(兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 静电喷涂是利用高压静电电场使带负电的涂料微粒沿着电场相反的方向定向运动, 并将涂料微粒吸附在工件表面的一种喷涂方法。在静电喷涂中, 涂层厚度分布模型是喷涂机器人离线编程和轨迹规划作业中影响涂层厚度均匀性的关键因素, 对提高喷涂质量和涂料转移率具有重要意义。因此, 喷涂机器人轨迹规划的一个首要和基础的问题是如何建立准确的涂层厚度分布模型。重点综述了近年来静电喷涂涂层厚度分布模型的国内外研究进展, 并在此基础上归纳了涂层厚度分布模型存在的问题, 与此同时, 归纳了常用涂层厚度仿真的方法——经验模型法和CFD仿真法。喷涂仿真包括静态喷涂仿真和动态喷涂仿真, 静态仿真常用欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法, 动态仿真常用动喷枪法和动壁面法, 其中, 动壁面法结合动网格为动态仿真主要方法。常见的动网格模型有三种: 弹性光顺模型、铺层模型、局部重构模型。而在动态仿真中, 动网格法常用有两种模型: 一种是弹性光顺模型结合局部重构模型, 另一种是铺层模型。最后对未来涂层厚度分布模型和涂层厚度仿真的研究进行了简要展望。

关键词: 涂层厚度; 喷涂机器人; 静电喷涂; 涂层厚度仿真; 动壁面法; 动喷枪法; 动网格模型

中图分类号: TQ639 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0291-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.038

Research Progress of Coating Thickness Distribution Model by Electrostatic Spraying

ZHANG Shu-zhen, MAO Wei, ZHEN Jing-bo, LI Chun-ling

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: Electrostatic spraying is a kind of spray painting method used to make negatively charged paint particles move in the opposite direction of the electric field by high voltage electrostatic field, and adsorb the paint particles on the surface of the workpiece. In electrostatic spraying, the spray coating thickness distribution model is a key factor affecting the coating thickness uniformity in off-line programming and trajectory planning for spray painting robots, so it has important significance for improving the spray quality and paint transfer efficiency. Therefore, a primary and fundamental issue in the trajectory planning of spray robots is how to establish an accurate coating thickness distribution model. The research progress of electrostatic spray coating thickness distribution model at home and abroad in recent years was mainly reviewed. Based on this, the problems of coating thickness distribution model were summarized and the commonly used coating thickness simulation methods were in-

收稿日期: 2018-07-11; 修订日期: 2018-09-04

Received: 2018-07-11; Revised: 2018-09-04

基金项目: 甘肃省自然科学基金 (17JR5RA126)

Fund: Supported by Gansu Province Natural Sciences Fund (17JR5RA126)

作者简介: 张淑珍 (1969—), 女, 副教授, 主要研究方向为特种机器人技术、工业机器人技术及应用、数字化设计仿真技术。

Biography: ZHANG Shu-zhen (1969—), Female, Associate professor, Research focus: special robot technology, industrial robot technology and application, digital design and simulation.

通讯作者: 毛伟 (1990—), 男, 硕士, 主要研究方向为静电喷涂技术。邮箱: 17361569108@163.com

Corresponding author: MAO Wei (1990—), Male, Master, Research focus: electrostatic spray technology. E-mail: 17361569108@163.com

investigated at the same time: empirical model method and CFD simulation method. Spray simulation included static spray simulation and dynamic spray simulation. Euler-eulerian and Eulerian-Lagrangian methods were commonly used in static simulations, while the dynamic spray gun method and dynamic wall method were commonly used in dynamic simulation and the dynamic wall method combined with dynamic mesh was the main method of dynamic simulation. There were three common dynamic mesh models: spring smoothing model, layering model, and local remeshing model. In dynamic simulation, there were two models commonly used in the dynamic grid method: spring smoothing model combined with local remeshing model and layering model. Finally, the research on the distribution model and simulation of coating thickness is expected briefly.

KEY WORDS: coating thickness; spray painting robots; electrostatic spray; coating thickness simulation; moving wall method; moving spray gun method; dynamic mesh model

机器人喷涂技术不仅在汽车、机械等工业领域广泛应用,也在航空及飞机涂装上大量应用^[1-3]。随着喷涂技术的发展和对环境问题的重视,人们对喷涂产品质量提出了更高的要求,优化表面喷涂质量和提高涂料转移效率已成为喷涂机器人的核心技术之一^[4-5]。对喷涂作业而言,涂层厚度均匀性是喷涂质量的重要控制指标^[6],尤其是复杂曲面喷涂已成为近年来机器人喷涂技术的难点和研究热点^[7]。

按涂料雾化原理将喷涂分为非静电喷涂和静电喷涂两大类。静电喷涂因其具有较高的涂料转移率,得到了广泛的应用。静电喷涂包含静电旋杯喷涂和静电空气喷涂,研究认为,静电空气喷涂涂料雾化效果好于静电旋杯,成为近年来应用越来越广泛的涂装方法^[8]。静电喷涂中的关键问题是涂层厚度分布模型和喷涂轨迹规划,这也是影响喷涂质量和效率的重要因素。

目前,静电喷涂膜厚分布大多通过经验反复调试获得,因此,只考虑轨迹规划方法,没有科学准确的喷涂膜厚分布模型(尤其是曲面涂膜厚度分布模型),将不能保证喷涂机器人有高效和稳定的喷涂质量。由于喷枪喷射的涂料分布沉积过程相当复杂,尤其是在静电空气喷涂中,雾化颗粒受静电场、流场、离心力场及靶场等多场耦合作用,涉及数学、计算机学、流体力学、机械学等学科的交叉,使得涂膜厚度分布模型成为机器人静电喷涂离线编程以及提高喷涂质量和效率的制约瓶颈。因此,建立准确的涂层厚度沉积率模型,对喷涂机器人轨迹规划、实现自动化喷涂和提高喷涂表面质量及涂料转移率有重要意义。

1 静电喷涂涂层厚度分布模型的研究进程

静电喷涂始于20世纪80年代后期,美国 Ransburg Automotive 公司首次研发了高压静电喷涂装置。20世纪末,德国又研发了静电旋杯喷涂技术,有效解决了涂料雾化问题,推动了静电喷涂技术的发展。随着喷涂技术的发展,又出现了静电空气喷涂技术,成为近年来各研究者研究的热点。

1.1 静电喷涂原理

静电喷涂^[9]以接地被涂物为正极,涂料雾化装置为负极,两极间形成高压静电场,被雾化的涂料粒子通过电极感应或电晕荷电,在电场力和喷枪轴向气流作用下被吸附在被涂物表面形成涂膜。静电喷涂通常包括四个过程:涂料雾化、液滴荷电、输运和沉积过程^[10]。其中,输运和沉积过程决定雾粒沉积速度和位置。输运过程中,雾粒大小、气液两相流场和非均匀静电场三者耦合作用影响雾粒运动,被涂物表面曲率、射流轨迹、喷涂轨迹曲率、曲面边界条件等决定荷电雾粒在曲面上的沉积位置。

1.2 静电喷涂涂层厚度分布理论模型的研究

在研究涂料沉积过程中,出现了两大类模型:以喷枪喷雾为圆锥形建立的无限范围模型和以喷枪喷雾形状为椭圆形建立的有限范围模型。无限范围模型是当喷枪与被喷工件表面的距离趋近无穷大时,涂层厚度趋近于零,主要有柯西分布模型^[11]和高斯分布模型^[12]等。无限范围模型仅适应于喷枪垂直于工件平面的情况,应用较少。有限范围模型综合考虑了被喷表面曲率半径、喷枪与被喷表面的距离等因素,在喷枪张角范围外的工件表面上,涂料沉积速率为零,典型的有椭圆形分布模型^[13]、抛物线分布模型^[14]、 β 分布模型^[15]、椭圆双 β 分布模型^[16]、分析沉积模型^[17]和组合模型^[18]等。

近年来,国内外学者在静电喷涂涂层厚度分布模型、静电喷雾流场分析及涂层质量影响因素方面进行了大量研究。汪清等人^[19]利用 GRACO 的 PRO3500 型空气静电喷枪对空气静电喷涂工艺进行了探讨,给出了空气静电喷枪在使用、工作条件等方面的注意事项。东华大学刘彦娜^[20]通过对静电雾化理论进行研究,得到了喷涂流量、静电电压、涂料颗粒直径等参数的计算公式,建立了圆锥射流过程的流场和速度场计算域模型,并用 Fluent 软件分析了静电雾化场中各种因素的相互耦合机理。陈汇龙等^[21]基于石灰浆液脱硫率的算法,对荷电气液两相流场进行了分析,建立了静电荷雾的计算域模型、两相流模型。赵德安等^[22]

通过研究静电电压与喷涂模型之间的关系,建立了高压静电旋杯的变量喷涂模型。曾勇等^[23]通过研究改变喷涂半径、喷涂距离等主要参数,并结合实验数据分析,得到了二次曲面上涂层厚度的计算表达式。王军锋等^[24]对荷电喷雾两相采用颗粒拟流体方法,用 $k-\varepsilon-kp$ 模型对荷电喷雾气液两相湍流流场进行了数值模拟,并与实验结果进行了比较,表明该模型可以较好地模拟荷电气液两相湍射流流场。王贞涛等^[25]采用相位多普勒粒子动态分析仪对荷电喷雾两相流场进行了测量,获得了不同气液比下的雾滴粒径、两相速度与湍流脉动强度等随荷电电压的变化情况。赵培^[26-27]在平面喷涂件上进行了静态喷涂试验和仿真分析,建立了椭圆抛物面厚度沉积模型,并探究了喷涂高度和静电电压对喷涂质量的影响。

Conner 等^[28]基于静电旋杯(ESRB)喷枪的研究,建立了双高斯涂料沉积模型,即绕喷枪轴旋转的一维偏置高斯模型(即沉积中心不在喷枪中央轴上)和以喷枪与被喷面交点为中心的二维高斯模型。建立的两种 ESRB 喷涂模型类似火山型的不对称分布,他们认为雾化装置旋杯在理想状态下是轴对称的,但在实际喷涂中,受成型空气和喷枪周围环境气流等因素的影响,实际涂料沉积模型是不对称的。建立的模型虽然精度高,更接近于有限元模型,但是其数学模型过于复杂。Debanjan^[29]讨论了静电喷涂中,施加外电场作用改变带电粒子运动的原因。Domnick^[30-31]借助计算流体力学方法(CFD)对静电旋杯雾化过程进行了模拟仿真。V. viti^[32]考虑荷电粒子对静电场的影响以及静电场和流场对涂料雾粒的耦合作用,采用 CFD 的方法对旋杯式静电喷涂过程进行了数值模拟,通过拉格朗日法对涂料雾粒运动轨迹进行了模拟,并且用 $k-\varepsilon$ 模型计算了湍流场的影响,用随机方法计算了湍流消散。Colbert^[33]假设静电旋杯喷涂为轴对称模型,考虑连续相流场、静电场和雾粒轨迹因素,对静电喷涂膜厚模型进行了仿真预测。Kyoung^[34]对静电旋杯喷涂传输过程进行了仿真,得出静电电压对传输效率影响最大,喷射流线对粒子荷质比变化较敏感。Mark 等^[35]采用动态笛卡儿八叉树网格和浸入边界法,求解静电旋杯喷涂流场 Navier-Stokes 方程,并进行了仿真。Stevenin 等^[36]研究了成型空气流变化对静电喷涂过程的影响,并进行了数值仿真和试验研究。

1.3 静电喷涂曲面涂层厚度分布模型研究

在喷涂作业中,被喷工件形状复杂多变,由于静电喷涂受到静电场作用,带电雾粒在输运过程中,受到电场力作用而被吸引在被喷表面,所以被喷表面形状、曲率以及表面边界条件等对涂膜分布和涂层质量有很大影响。

Chen 等^[37]假设在喷涂射流流线为直线的情况下,采用微分几何面积放大定理将平面涂层厚度投射

到曲面上,并推导了曲面上一点的涂层厚度计算公式。Sebastia 等^[38]利用概率密度函数的核心密度估计法来计算曲面涂膜厚度。Conner^[28]研究了静电喷枪涂料粒子以曲线投影线投射在曲面上的理论模型,用参数 $C1$ 描述了曲线形状,并采用不同半径的圆柱喷涂面和喷枪倾角喷涂实验优化参数 $C1$ 。李发忠等^[39]以漆流形状为圆锥体,推导了曲面上的漆膜生长模型。Wei^[40]假定喷枪喷雾为圆锥型,被喷曲面上一点法线方向与喷枪射线的夹角为 γ ,采用曲率圆的方法,计算被喷曲面上的涂层厚度,并以圆柱面为例给出了验证算法和实验,但文献未给出曲率圆所属的曲线。王其红等人^[41]以平面试件为基础研究对象,采用 Goodman 方法测量了试件上采样点的涂层厚度值,并在此基础上,建立了自由曲面上的涂层厚度分布模型。李喆等人^[42]采用平面喷涂模型的投影法进行了曲面模型的应用修正。李发忠等人^[43]通过面积放大定理推导了自由曲面上的涂料成长率函数,通过优化轨迹研究了凹凸结构曲面的涂层厚度,并进行仿真与实验结果对比,证明了该方法的有效性。曾勇^[44]将大曲率类自然二次曲面拟合成自然二次曲面的组合,运用变喷涂半径和轨迹分段的方法讨论了自然二次曲面上涂层厚度的计算方法。

以上研究虽然对静电喷涂涂层厚度分布进行了分析,但这些研究通常以平面为对象进行各种各样的理论和实验研究,来确定和预测涂层厚度分布,建立的涂料沉积模型都较为简单,虽然在预测平面或曲率较小的规则曲面时能达到较好的效果,但对应用于复杂曲面则效果较差,甚至无能为力。

2 涂层厚度仿真分析研究

涂层厚度仿真计算方法通常包括经验模型法和 CFD 模拟仿真法。经验模型法是利用喷涂成膜简化模型,通过喷涂点厚度叠加计算出涂层厚度,无法应用于复杂形面的涂层厚度仿真计算。

CFD 仿真是从涂层形成机理上来研究问题,利用计算流体动力学结合实验数据来计算涂层厚度,在理论上可适应于各种条件的喷涂涂层厚度仿真,能有效求解流场、静电场等问题^[45]。涂层厚度 CFD 仿真首先建立喷涂条件,然后按喷涂过程,即雾化过程、喷雾过程、输运过程、碰撞粘附过程,分别建立物理模型,最后求解模型得到涂层厚度分布^[46]。

建立喷涂条件即建立喷枪和喷涂目标壁面模型,对喷涂控制域进行网格划分。动态喷涂需设定移动区域和喷枪轨迹,同时结合动网格解决流场形状随边界运动改变的问题。涂料雾化是通过压缩空气的冲击,使涂料变成细小涂料微粒的过程。早期采用相位多普勒测量仪等仪器测量液滴雾化后的速度和颗粒直径,将液滴的速度和粒径作为已知条件进行仿真。在喷雾

过程中, 涂料雾化流场视为空气和涂料微粒的两相流。目前, 流体动力学处理两相流的方法为欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法, 前者是在空气-颗粒两相流建模中涂料作为拟流体, 后者则将气相处理为连续相, 涂料颗粒视为离散相。碰撞粘附过程是涂料颗粒碰撞工件表面和湿膜表面形成涂料膜。液滴碰撞一般有四种模式^[47]: 粘附模式、反弹模式、伸展模式、飞溅模式。研究者根据不同的模拟方法和四种碰撞模式之间临界点的判据, 提出了不同的涂料颗粒碰撞模型。

2.1 CFD 求解流程

CFD 求解过程如图 1 所示^[48]。一个完整的求解问题的数学表述由控制方程、初始条件和边界条件构成。控制方程的建立是进行 CFD 求解的前提, 而连续的初始条件和边界条件是方程得到确切解的前提。

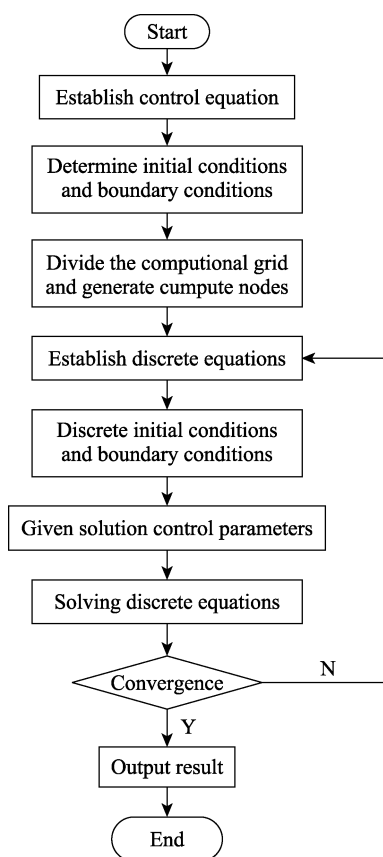


图 1 CFD 求解过程

Fig.1 CFD solution flowchart

采用数值方法求解控制方程, 需将控制方程在空间域进行离散, 而在离散的过程中, 需使用网格。针对不同的问题, 网格使用不同: 在二维问题的离散中, 常用三角形和四边形等网格单元模式; 对于三维问题, 常用网格单元有四面体、六面体等。CFD 的前处理阶段需划分网格, 常见的网格划分软件有 Gambit、ICEM CFD 等, 网格划分完毕后, 直接在边界上指定初始条件和边界条件, 由前处理模块将这些条件按离散的方式分配到相应的节点上。在完成方程组的离散

化并设置好边界条件和初始条件后, 还需设置研究流体的特性参数和湍流模型的经验系数等。完成上述设置后, 便可利用相应的方法进行求解, 求解完成后, 可通过矢量图、等值线图、流线图等表示求解得到的结果。

2.2 喷涂模拟

喷涂按喷枪运动分为静态喷涂和动态喷涂。对静态喷涂 (喷枪不运动) 涂料沉积模型进行研究的主要有意大利的加贝拉^[49]、德国的乔燕^[50]和福格莉亚^[51]、浙江大学刘国雄^[52]等。对动态喷涂 (喷枪运动) 涂料沉积模型进行研究的主要有德国的乔燕^[53]和多姆尼克^[54]、加拿大的托吉克^[55-57]等。

2.2.1 静态喷涂模拟

静态喷涂建模即确定喷枪静止情况下, 喷涂区域的涂层厚度分布情况。静态涂层生长率模型的表达式可写为^[46,58]:

$$dh(x, y, t) / dt = f(x, y, a(t), t) \quad (1)$$

式中: $h(x, y, t)$ 为 t 时刻 (x, y) 点的涂层累积厚度; t 为喷涂时间; $a(t)$ 为喷枪的位置和方向。

在静态喷涂模拟中, 常见的有欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法。喷雾过程大都采用欧拉-拉格朗日模型建模, 即气相被处理为离散相, 离散相数据通过计算流场中大量的涂料微粒的运动得到统计结果, 进而可以详细地对单独颗粒进行跟踪和计算。

2.2.2 动态喷涂模拟

动态喷涂是喷枪相对于被喷件运动。动态喷涂涂层厚度仿真有两种方法: 一种是利用静态喷涂涂层厚度模型积分, 另一种是动态喷涂 CFD 模拟。

由静态喷涂厚度模型方程积分得动态喷涂模型为^[29,32]:

$$H(x, y) = \int_0^t f(x, y, a(t), t) dt \quad (2)$$

式中: $H(x, y)$ 为动态喷涂涂层厚度; (x, y) 为喷涂目标面上任意一点; t 为 (x, y) 点接受喷涂的总时间。

静态模型积分法得到的涂层厚度非常均匀, 在平面或简单的曲面喷涂模拟中能得到较好的结果。但应用于不规则的复杂曲面时, 曲面的形状对喷涂流场和漆膜特性具有很大影响, 因而积分法不适用于复杂曲面或不规则曲面的动态喷涂涂层厚度仿真。

动态喷涂 CFD 仿真常见有动壁面法^[55]和动喷枪法^[56]。动壁面法指喷枪固定, 壁面位置运动的喷涂方法, 该方法的优势在于不使用动网格, 计算量相对较少, 但受限制较多, 故而并不常用。动喷枪法是喷枪移动, 壁面位置相对固定的喷涂方法, 该方法能够较好地模拟喷雾流场随喷枪移动而发生的变化。动喷枪法需结合动网格模型进行计算。动网格可用三种模型进行计算^[59]: 弹性光顺模型、铺层模型、局部重构模型。在动态模拟中, 动网格法常用有两种模型: 一种是

弹性光顺模型结合局部重构模型;另一种是铺层模型。研究表明,第一种模型更适合于动喷枪法喷涂模拟^[60]。

动态喷涂膜厚度计算的关键问题是解决 CFD 的运动边界问题,研究采用两种方法:一种是欧拉-拉格朗日模型结合多个静态喷涂叠加来研究动态喷涂问题;另一种是采用欧拉-拉格朗日模型结合动网格法。

在实际应用中,只有动态喷涂涂层厚度分布才有实际意义,但从计算时间角度考虑,需要 N 个时间步长的动态喷涂计算时间,可看作 N 个静态喷涂的累积,而动态喷涂成膜计算时间大约为静态喷涂的 N 倍^[57],因此要使动态喷涂成膜计算时间大大缩短,关键在于缩短静态喷涂成膜计算时间。

3 总结与展望

喷涂涂层厚度分布模型对喷涂机器人轨迹规划过程至关重要,已有的涂层厚度分布模型、研究方法并不能完全满足现有的工作任务,目前的研究都偏向于一些较为简单或者单一的被喷曲面,同时,在对喷涂机器人进行轨迹规划时,缺少深入的复杂形面成膜理论和多参数化成膜理论的支持,因而存在成膜机理、涂层厚度仿真、复杂曲面喷涂轨迹规划等难题。综上所述,涂料沉积模型研究还存在以下研究难点:

1) 多场耦合作用下多变量荷电涂料粒子沉积数学模型。涂料颗粒受静电场、气液两相流场、空气场、被喷件曲面靶场等多场耦合作用,与此同时,涂料的雾化和涂层的形成涉及流体流动、雾化、挥发、颗粒输运、沉积等物理过程,因此,影响涂层厚度分布的因素很多,如不同的喷涂装置和喷涂环境,不同的喷涂参数(如雾化压力、喷嘴压力、供料压力、喷嘴流量、喷涂距离、喷涂速率、喷涂角度等)。如果在研究静电喷涂和建立模型的过程中,考虑这些因素对涂层厚度分布模型的影响,将在一定程度上提高模型的精准度和普适性。但是,每引入一种因素都会使喷涂实验数量呈爆炸性增长,模型的建立也将更加复杂。因而,如何确定涂料粒子在多场耦合作用下的多变量输运模型,使得涂料沉积模型能够真实反映被喷件表面涂膜厚度的分布,是机器人静电空气喷涂轨迹规划和离线编程的基础,也是未来研究的难点。

2) 动态变参数喷涂涂膜厚度分布。工件形状复杂多变,且存在一些喷涂区域会剧烈变化的特殊形面,因此,不宜采用不变的喷涂距离和喷嘴流量等参数进行喷涂。这些特殊的区域需要采用动态变参数喷涂,即动态调整喷涂参数,这不仅能够满足特殊区域的喷涂要求,而且可提高喷涂质量和效率。

3) 喷涂涂层厚度 CFD 仿真。喷涂轨迹规划和涂层厚度仿真是影响涂层均匀性的关键环节。目前,喷涂涂层厚度分布模型的主要问题是无法应用于复杂曲面和变参数轨迹规划,缺少复杂曲面的成膜理论和变参数理论的支持。采用计算流体力学(CFD)仿

真,使用欧拉-拉格朗日模型结合欧拉-欧拉模型研究涂层厚度,是未来涂层厚度仿真发展的方向。

参考文献:

- [1] 王国磊, 吴丹, 陈恳. 航空制造机器人现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 479(10): 26-30.
WANG Guo-lei, WU Dan, CHEN Ken. Current status and development trend of aviation manufacturing robot[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2015, 479(10): 26-30.
- [2] 王丰超, 王立平, 梁新成, 等. 智能化喷涂机器人研究进展[J]. 航空制造技术, 2015(9): 675-679.
WANG Feng-chao, WANG Li-ping, LIANG Xin-cheng, et al. Research review of the intelligent spraying robots[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2015(9): 675-679.
- [3] SEEGMILLER N, FRANKS R, BAILIFF J. Precision robotic coating application and thickness control optimization for F-35 final finishes[J]. SAE international journal of aerospace, 2009, 2(1): 284-290.
- [4] 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.
CHEN Wei. Research on key techniques of robotic spray painting trajectory optimization[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.
- [5] POOZESH S, AKAFUAH N, SATIO K. Effects of automotive paint spray technology on the paint transfer efficiency—A review[J]. Automobile engineering, 2018, 232(2): 1-20.
- [6] 张明. 浅谈机器人喷涂的膜厚控制[J]. 现代涂料与涂装, 2006(6): 31-33.
ZHANG Ming. Brief introduction of film thickness control during paint spraying by robot[J]. Modern paint and finishing, 2006(6): 31-33.
- [7] 陈雁, 邵君奕, 张传清, 等. 喷涂机器人自动轨迹规划研究进展与展望[J]. 机械设计与制造, 2010(2): 149-151.
CHEN Yan, SHAO Jun-yi, ZHANG Chuan-qing, et al. Developments and prospects of research on automatic trajectory planning for painting robot[J]. Machinery design & manufacture, 2010(2): 149-151.
- [8] 周涛. 用于喷涂汽车外饰件的机器人喷枪的特点[J]. 汽车工艺与材料, 2003(7): 31-33.
ZHOU Tao. Characteristics of robot spray guns in spraying for automotive exterior trimming parts[J]. Automobile technology & material, 2003(7): 31-33.
- [9] 王锡春. 环境保护与汽车涂装[J]. 中国涂料, 2005, 20(2): 34-36.
WANG Xi-chun. Environmental protection and car coating[J]. China paint, 2005, 20(2): 34-36.
- [10] 金辉辉, 王军锋, 王泽, 等. 静电喷雾研究与应用综述[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 1999, 20(3): 18-21.
JIN Han-hui, WANG Jun-feng, WANG Ze, et al. Review on research and application of electrostatic spraying[J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 1999, 20(3): 18-21.
- [11] ANTONIO J K. Optimal trajectory planning for spray coating[C]// IEEE international conference on robotics &

- automation. USA: IEEE Press, 1994: 2570-2577.
- [12] FREUND E, ROKOSSA D, ROSSMANN J. Process-oriented approach to an efficient off-line programming of industrial robots[C]// Conference of the IEEE industrial electronics society. USA: IEEE Press, 1998: 208-213.
- [13] 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 & automation. USA: IEEE Press, 1991: 1948-1955.
- [14] BALKAN T, ARIKAN M A S. Surface and process modeling and off-line programming for robotic spray painting of curved surface[J]. Journal of robotics systems, 2000, 17(9): 479-494.
- [15] 陈雁, 颜华, 王力强, 等. 机器人匀速喷涂涂层均匀性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1210-1213.
CHEN Yan, YAN Hua, WANG Li-qiang, et al. Coating uniformity with a uniform robotic spray gun velocity[J]. Journal of Qinghua University (natural science edition), 2010, 50(8): 1210-1213.
- [16] 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.
ZHANG Yong-gui, HUANG Yu-mei, GAO Feng, et al. New model for air spray gun of robotic spray painting[J]. Journal of mechanical engineering, 2006, 42(11): 226-233.
- [17] CONNER D C, GREENFIELD A, ATKAR P N, et al. Paint deposition modeling for trajectory planning on automotive surface[J]. IEEE transactions on automation science and engineering, 2005, 2(4): 381-392.
- [18] 冯川, 孙增圻. 机器人喷涂过程中的喷炬建模及仿真研究[J]. 机器人, 2003, 25(4): 353-358.
FENG Chuan, SUN Zeng-qi. Models of spray gun and simulation in robotics spray painting[J]. Robot, 2003, 25(4): 353-358.
- [19] 汪清, 彭小俊. 空气静电喷枪喷涂工艺探讨[J]. 材料保护, 1998(8): 26-27.
WANG Qing, PENG Xiao-jun. Discussions on air electrostatic thermal spraying technology[J]. Materials protection, 1998(8): 26-27.
- [20] 刘彦娜. 静电雾化过程的理论分析与数值模拟[D]. 上海: 东华大学, 2009.
LIU Yan-na. Theoretical analysis and numerical simulation of electrospray process[D]. Shanghai: Donghua University, 2009.
- [21] 陈汇龙, 赵英春, 林清龙, 等. 石灰浆液电荷喷雾脱硫流场的数值模拟[J]. 江苏大学学报, 2012, 33(4): 420-424.
CHEN Hui-long, ZHAO Ying-chun, LIN Qing-long, et al. Numerical simulation of flow field on desulphurization through electrostatic spraying of lime slurry[J]. Journal of Jiangsu University, 2012, 33(4): 420-424.
- [22] 李发忠. 静电喷涂机器人变量喷涂轨迹优化关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
LI Fa-zhong. Research on trajectory optimization of electrostatic spray robot with variable parameter[D]. Zhengjiang: Jiangsu University, 2012.
- [23] 曾勇, 龚俊, 陆保印. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪路径的规划[J]. 机械科学与技术, 2010(5): 675-679.
ZENG Yong, GONG Jun, LU Bao-yin. Path planning of a spray painting robot for complex curved surface[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2010(5): 675-679.
- [24] 王军锋, 闻建龙, 罗惕乾. 荷电喷雾两相湍流流场的数值计算[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2004(1): 13-16.
WANG Jun-feng, WEN Jian-long, LUO Ti-qian. Numerical modeling of charged two-phase jet flow in electrostatic spray[J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2004(1): 13-16.
- [25] 王贞涛, 罗惕乾, 岑旗钢. 荷电喷雾两相流场的试验[J]. 排灌机械工程学报, 2010(1): 68-72.
WANG Zhen-tao, LUO Ti-qian, CEN Qi-gang. Experiment on electrostatic spray two-phase flow[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2010(1): 68-72.
- [26] 赵培. 多场耦合作用机器人静电空气喷涂沉积厚度模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
ZHAO Pei. The research of deposition model of robot electrostatic spray under the coupling of multi field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [27] 张淑珍, 赵培, 毛伟, 等. 静电喷涂新模型的实验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1217-1224.
ZHANG Shu-zhen, ZHAO Pei, MAO Wei, et al. Experimental study on a new model of electrostatic spray painting high voltage engineering[J]. High voltage technology, 2018, 44(4): 1217-1224.
- [28] CONNER D C, GREENFIELD A, ATKAR P N, et al. Paint deposition modeling for trajectory planning on automotive surfaces[J]. IEEE transactions on automation science & engineering, 2005, 2(4): 381-392.
- [29] MUKHERJEE D, ZOHDI T I. Electromagnetic control of charged particulate spray systems—Models for planning the spray-gun operations[J]. Computer-aided design, 2014, 46(1): 211-215.
- [30] DOMNICK J, SCHEIBE A, YE Q. The simulation of the electrostatic spray painting process with high-speed rotary bell atomizers. Part I: Direct charging[J]. Particle & particle systems characterization, 2005, 22(2): 141-150.
- [31] DOMNICK J, SCHEIBE A, YE Q. The simulation of electrostatic spray painting process with high-speed rotary bell atomizers. Part II: External charging[J]. Particle & particle systems characterization, 2007, 23(5): 408-416.
- [32] VITI V, KULKARNI J, WATVE A. Computational fluid dynamics analysis of the electrostatic spray painting process with a rotating bell cup[J]. Atomization and sprays, 2010, 20(1): 1-17.
- [33] COLBERT S A, CAIRNCROSS R A. A computer simulation for predicting electrostatic spray coating patterns[J]. Powder technology, 2005, 151(1-3): 77-86.
- [34] IM K S. Simulation of spray transfer processes in electrostatic rotary bell sprayer[J]. Journal of fluids engineering, 2004, 126(3): 449-456.
- [35] MARK A, ANDERSSON B, TAFURI S, et al. Simulation of electrostatic rotary bell spray painting in automotive paint shops[J]. Atomization & sprays, 2013, 23(1): 25-45.
- [36] STEVENIN C, BERAUX Y, CHARMEAU J Y, et al. Shaping air flow characteristics of a high-speed rotary-bell sprayer for automotive painting processes[J]. Journal of fluids engineering, 2015, 137(11): 1884-1889.
- [37] CHEN He-ping. A general framework for automated CAD-guided optimal tool planning in surface manufac-

- turing[D]. Lansing: Michigan State University, 2003.
- [38] TAFURI S, EKSTEDT F, CARLSON J S, et al. Improved spray paint thickness calculation from simulated droplets using density estimation[C]// ASME 2012 international design engineering technical conferences & computers and information in engineering conference IDETC/CIE. USA: [s. n.], 2012: 339-347.
- [39] 李发忠, 赵德安, 张超, 等. 基于CAD的喷涂机器人轨迹优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 213-217.
LI Fa-zhong, ZHAO De-an, ZHANG Chao, et al. Trajectory optimization of spray painting robot based on CAD [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2010, 41(5): 213-217.
- [40] XIA W, YU S, LIAO X. Paint deposition pattern modeling and estimation for robotic air spray painting on free-form surface using the curvature circle method[J]. Industrial robot, 2010, 37(2): 202-213.
- [41] 王其红, 陈伟, 赵德安, 等. 自由曲面上喷涂机器人喷枪轨迹规划方法研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2007, 21(6): 57-60.
WANG Qi-hong, CHEN Wei, ZHAO De-an, et al. Research on trajectory planning of spray gun of painting robot on free-form surface[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2007, 21(6): 57-60.
- [42] 李喆, 刘樾, 程爽, 等. 曲面零件自动喷涂中的膜厚控制与仿真分析[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(6): 13-16.
LI Zhe, LIU Yue, CHENG Shuang, et al. Thickness control and computer simulation analysis of automatic spraying on curved surfaces[J]. Aviation precision manufacturing technology, 2013, 49(6): 13-16.
- [43] 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.
LI Fa-zhong, ZHAO De-an, JI Wei, et al. Trajectory optimization of spray painting robot for concavo-convex surfaces[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2008, 22(4): 64-67.
- [44] 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.
ZENG Yong, GONG Jun. Trajectory optimization of spray painting robot for natural quadric surfaces[J]. China mechanical engineering, 2011, 22(3): 282-290.
- [45] VITI V, KULKARNI J. Computational fluid dynamics ansys of the electrostatic spray painting process with a rotating bell cup[J]. Atomization & sprays, 2010, 20 (20): 1-17.
- [46] 陈雁, 王国磊, 陈恳. 复杂曲管机器人喷涂理论与技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2016.
CHEN Yan, WANG Guo-lei, CHEN Ken. Complex curved pipe robot spraying theory and technology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2016.
- [47] 史春涛, 周颖, 张宝如, 等. 喷雾模型的发展及其在内燃机 CFD 中的应用[J]. 拖拉机与农用运输车, 2006, 33(2): 39-42.
SHI Chun-tao, ZHOU Ying, ZHANG Bao-ru, et al. Development of spray model and its application to CFD of IC engine[J]. Tractor & farm transporter, 2006, 33(2): 39-42.
- [48] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
TANG Jia-peng. FLUENT 16.0 super study manual[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2016.
- [49] MIRKO G, MARCO V, GIANCARLO B. CFD modeling of a spray deposition process of paint[J]. Macromolecular symposia, 2002, 187(1): 719-729.
- [50] YE Q, DOMNICK J, SCHEIBE A. Simulation of the spray coating process using a pneumatic atomizer[C]// Proceedings of the 18th annual conference on liquid atomization and spray systems. Zaragoza: ILASS-Europe, 2002.
- [51] FOGLIATI M, FONTANA D, GARBERO M, et al. CFD simulation of paint deposition in an air spray process[J]. JCT research, 2006, 3(2): 117-125.
- [52] 刘国雄. 空气雾化涂料喷枪喷涂流场仿真及特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
LIU Guo-xiong. Simulation study on the spray flow field of air atomized paint spray gun[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [53] YE Q, SCHEIBE A. Unsteady numerical simulation of electrostatic spray painting processes with moving atomizer[C]// The 13th international coating science and technology symposium. Denver: [s. n.], 2006.
- [54] DOMNICK J, SCHEIBE A, YE Q. Unsteady simulation of painting processes with high speed rotary bells[C]// 11th international annual conference on liquid atomization and spray systems. Colorado: [s. n.], 2009.
- [55] TOLJIC N, CASTLE G S P, ADAMIAK K, et al. A full numerical model of the industrial electrostatic coating process for moving targets[J]. Journal of electrostatics, 2013(71): 299-304.
- [56] TOLJIC N, CASTLE G S P, ADAMIAK K, et al. A 3-D numerical model of the electrostatic coating process for moving targets[C]// Proceeding of 13th international conference on electrostatics. United Kingdom: Institute of Physics publishing, 2011.
- [57] TOLJIC N, ADAMIAK K, CASTLE G S P, et al. 3D numerical model of the electrostatic coating process for moving objects using a moving mesh[J]. Journal of electrostatics, 2012(70): 499-504.
- [58] 周波, 邵振华, 孟正大, 等. 基于高斯和模型的喷涂机器人涂层生长率建模[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(S1): 463-466.
ZHOU Bo, SHAO Zhen-hua, MENG Zheng-da, et al. Gaussian sum based coat growth rate modeling of spray painting robots[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2013, 41(S1): 463-466.
- [59] 隋洪涛, 李鹏飞, 马世虎, 等. 精通CFD动网格工程仿真与算例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
SUI Hong-tao, LI Peng-fei, MA Shi-hu, et al. Proficient in CFD dynamic grid engineering simulation and practical examples[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2013.
- [60] YE Q. Using dynamic mesh model to simulate electrostatic spray painting[J]. High performance computing in science and engineering, 2006, 12(5): 173-183.