

PEN TU JI QI REN GUI JI YOU HUA JI SHU YAN JIU

喷涂

机器人

轨迹优化技术研究

◎ 陈 伟 著



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

503162, 51505193)、江苏省自然



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

• 广州 •

版权所有 翻印必究

图书在版编目(CIP)数据

喷涂机器人轨迹优化技术研究 / 陈伟著. —广州: 中山大学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-306-05787-7

I. ①喷… II. ①陈… III. ①喷漆机器人—自动化技术—研究 IV. ①TP242.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 187986 号

喷涂机器人轨迹优化技术研究

pen tu ji qi ren gui ji you hua ji shu yan jiu

出 版 人: 徐 劲

策划编辑: 陈 露

责任编辑: 范正田

封面设计: 汤 丽

责任校对: 江旭玉

责任技编: 汤 丽

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020-84111996, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020-84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020-84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 17 印张 214 千字

版次印次: 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换



摘要

喷涂机器人是一种重要的先进涂装生产装备，在国内外广泛应用于汽车等产品的涂装生产线。喷涂机器人的喷涂效果与物体表面形状、喷涂过程参数等诸多因素有关。为了达到新的喷涂作业标准，实现高效、低成本的生产目标，对新喷涂建模的分析以及高性能喷涂机器人轨迹优化算法、控制策略的研究已成为国内外学者们关注的热点。目前，由于工业制造业的发展，出现了越来越多表面形状复杂的工件，原有的喷涂模型以及轨迹优化理论已经不能适应新的生产要求。因此，将新的数学方法应用于喷涂机器人轨迹优化研究中，并在此基础上提出一些新的精度高、效率高的机器人轨迹优化算法，从而推动喷涂机器人离线编程技术的发展是非常有必要的。本书在国家自然科学基金项目（61503162，51505193）和江苏省自然科学基金项目（BK20150473）的支持下，比较深入和全面地对喷涂机器人轨迹优化技术中的难点问题和关键问题进行了研究，研究内容主要由以下几个部分构成：

第一，针对工业生产中喷涂工件复杂多样的特点，提出了三种适用于不同场合且实用性较强的喷涂工件曲面造型方法：一种是基于平面片连接图 FPAG 的曲面造型方法，该方法先对曲面进行三角网格划分，再将划分后的三角面连接成平面片，最后使用基于平面片连接图 FPAG 的合并算法



将各个平面片连接成为较大的片。第二种是基于点云切片技术的曲面造型方法，该方法主要分为总体算法描述、切片层数的确定、切片数据的分离、切片数据计算、多义线重构五个部分。第三种是喷涂工件 Bézier 曲面造型方法，该方法又分为 Bézier 张量积曲面造型和 Bézier 三角曲面造型两种，实例验证结果表明 Bézier 张量积曲面造型方法和 Bézier 三角曲面造型方法均是有效的，且计算实时性较好。

第二，提出了从规划喷涂路径角度优化喷涂轨迹、提高喷涂质量的思想。根据喷涂机器人实际工作的需要，提出两种喷涂机器人空间路径规划方法：一种是基于分片技术的喷涂机器人空间路径规划，该方法主要是应用于复杂曲面上的路径规划，将复杂曲面分片问题表示为一个带约束条件的单目标优化问题，并给出相应的分片算法，再建立每一片喷涂路径的评价函数，并以此为依据来规划喷涂路径，从而为获得更佳的优化轨迹并得到更好的喷涂效果提供了基础；另一种是基于点云切片技术的喷涂机器人空间路径规划，该方法通过设定切片方向和切片层数，对点云模型进行切片处理，得到切片多义线后对其平均采样，然后估算所有采样点的法向量，最后利用偏置算法获取喷涂机器人空间路径。实验结果表明，这两种方法都比较实用，且计算速度较快，能够在保证喷涂机器人喷涂效率的同时，达到更佳的喷涂效果。

第三，提出了平面和规则曲面上喷涂机器人轨迹优化方法。在写出平面或规则曲面的函数表达式后，研究了三种涂层累积速率数学模型： β 分布模型、无限范围模型和有限范围模型。以采样点上的涂层厚度方差最小为优化目标，对沿指定空间路径的喷涂机器人喷枪轨迹优化问题进行研究；然后根据约束条件的不同将喷枪轨迹优化问题分成一般约束条件和指定空间路径两类；最后详细分析了指定空间路径的喷枪轨迹优化问题的求解方法，并进行了仿真实验。

第四, 针对实际工业生产中许多喷涂工件形状复杂, 喷涂时会遇到多个喷涂面且各个喷涂面的法向量夹角都比较大的问题, 提出了面向三维实体的喷涂机器人空间轨迹优化方法。利用实验方法建立一种简单的涂层累积速率数学模型, 并采用基于平面片连接图 FPAG 的曲面造型方法对三维实体进行分片; 规划出每一片上的喷涂路径后, 以离散点的涂层厚度与理想涂层厚度的方差为目标函数, 在每一片上进行喷涂轨迹的优化, 并按照两片交界处空间路径方向的不同分 PA-PA、PA-PE、PE-PE 三种情况研究了两片交界处的喷涂轨迹优化情况, 仿真实验结果表明两片交界处的喷涂空间路径为 PA-PA 时涂层厚度均匀性最佳; 采用哈密尔顿图形法表示各个分片上的喷涂轨迹优化组合问题, 分别采用 GA 算法、ACO 算法、PSO 算法对其进行求解, 并通过仿真实验验证了各个算法的可行性。最后, 在自行设计的喷涂机器人离线编程实验平台上进行了喷涂实验, 并对几种算法结果进行了比较。实验结果表明, 提出的面向三维实体的喷涂机器人轨迹优化方法完全能满足涂层厚度均匀性的要求; 而使用 PSO 算法虽然需要消耗少量的系统运算执行时间, 但与其他算法相比更加节约喷涂时间, 显著提高了喷涂效率。

第五, 针对范围在十几米内, 各局部法向量方向差异不大的自由曲面或复杂曲面上的喷涂问题, 提出了曲面上的喷涂机器人空间轨迹优化方法。首先研究了自由曲面上的喷涂轨迹优化方法: 采用实验方法建立了表达式较简单的涂层累积速率模型后, 通过分析喷涂过程中各个可控参数对喷涂效果的影响, 建立自由曲面上涂层厚度数学模型; 在此基础上生成喷涂机器人空间路径, 得出轨迹优化设计是带约束条件的多目标优化问题, 并选取时间最小和涂层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; 仿真实验和喷涂实验表明, 该算法完全符合预设的喷涂质量和喷涂效率的要求。其次, 研究了曲面上的静电喷涂机器人轨迹优化问题,



在利用实验方法得到静态喷涂涂料空间分布的径向厚度剖面函数后，推导出一种新型、实用的静电旋转喷杯（ESRB）涂层累积模型；以某品牌汽车车身为喷涂对象进行静电喷涂实验研究，并对喷涂结果进行了分析和讨论。

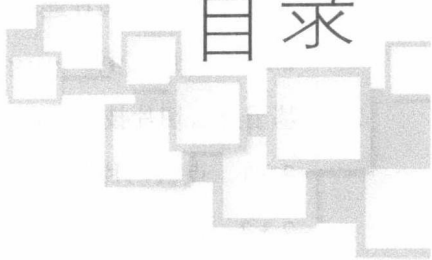
第六，研究了 Bézier 曲面上的喷涂机器人轨迹优化方法。首先对 Bézier 曲面进行分析后，提出了利用测地曲率寻找最优喷涂机器人初始轨迹的方法；然后建立了 Bézier 曲面上的喷涂模型，给出了 Bézier 曲面上某一点的涂层厚度数学表达式；在找出 Bézier 曲面等距面的离散点列阵后，使用 3 次 Cardinal 样条曲线和 Hermite 样条曲线插值方法，规划出喷涂空间路径；最后沿指定的喷涂空间路径，以涂层厚度方差最小和喷涂时间最短为优化目标，给出带约束条件的喷涂机器人轨迹多目标优化问题的数学表达式，并采用理想点法进行求解，从而获得了 Bézier 曲面上的喷涂机器人优化轨迹。实例验证结果和喷涂实验结果证明了所提方法的有效性和实用性，且喷涂路径的走向对喷涂效果和效率有重要影响。

第七，针对复杂曲面面积大、分片多，喷涂设备离线编程系统执行慢、效率低等问题，提出了一种基于 Bézier 方法的复杂曲面喷涂机器人轨迹优化方法。运用 Bézier 三角曲面造型技术对复杂曲面造型后，找出复杂曲面等距面上的离散点列；在提出指数平均 Bézier 曲线定义及性质后，结合其调控灵活的特点，将其运用于复杂曲面喷涂机器人空间路径生成算法中；然后沿指定喷涂路径提出一种新的复杂曲面上的喷涂轨迹优化方法。喷涂实验结果表明，运用指数平均 Bézier 曲线后不仅提高了喷涂路径规划过程中的灵活性和“柔性”，而且大大简化了复杂曲面上喷涂作业的步骤，满足喷涂效果的同时提高了喷涂效率；在针对大面积复杂曲面工件进行喷涂作业时，使用该方法进行匀速喷涂效果会更好。

第八，研究了高压静电喷涂机器人轨迹优化方法。利用流体力学相关知识，给出了高压静电喷涂过程中的四种数学模型：空气场湍流模型、静

电场模型、静电喷涂雾滴轨迹模型和静电旋转喷杯模型。针对高压静电喷涂过程中可调参数多、路径曲线局部调控性差等问题，提出了一种新的高压静电喷涂机器人路径规划方法。在构建一组新的基作为 T-Bézier 基后，提出了 T-Bézier 曲线定义及性质；利用该曲线拟合工件曲面等距面上的离散点列阵，再反求曲线的控制顶点，从而生成基于 T-Bézier 曲线的静电喷涂空间路径。通过有限元分析软件 ANSYS 进行仿真实验，验证了各种数学模型的正确性。以某品牌汽车车身为喷涂对象，使用 ABB 高压静电喷涂机器人进行喷涂实验，实验中沿指定路径采用涂料流量优化控制方法进行匀速喷涂，最后对实验结果进行了分析和讨论，证明了所提方法的有效性。

关键词：喷涂机器人，轨迹优化，曲面造型，路径规划，Bézier 曲线曲面，自由曲面，复杂曲面



目录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外喷涂机器人发展现状	5
1.2.1 国外喷涂机器人发展现状	5
1.2.2 国内喷涂机器人发展现状	9
1.3 喷涂机器人轨迹优化与离线编程技术研究概述	10
1.3.1 基本知识	10
1.3.2 喷涂机器人离线编程系统简介	13
1.3.3 国内外研究现状及存在的问题	15
1.4 主要研究内容	20
第 2 章 喷涂工件曲面造型方法研究	24
2.1 引 言	24
2.1.1 基于参数曲面的造型方法	24
2.1.2 基于 CAD 模型的曲面造型方法	25



2.1.3	基于工件扫描系统的曲面造型方法	25
2.2	基于平面片连接图 FPAG 的曲面造型方法	26
2.2.1	三角面连接成平面片的算法	27
2.2.2	基于平面片连接图 FPAG 的合并算法	28
2.2.3	应用实例	30
2.3	基于点云切片技术的曲面造型方法	32
2.3.1	点云切片数据获取	33
2.3.2	截面数据处理	42
2.3.3	应用实例	48
2.4	喷涂工件 Bézier 曲面造型研究	53
2.4.1	预备知识	53
2.4.2	喷涂工件 Bézier 张量积曲面造型方法	61
2.4.3	喷涂工件 Bézier 三角曲面造型方法	63
2.4.4	应用举例	68
2.5	本章小结	73
第 3 章	喷涂机器人空间路径规划方法研究	75
3.1	引 言	75
3.2	基于分片技术的喷涂机器人空间路径规划	76
3.2.1	复杂曲面分片方法	77
3.2.2	每一片上进行喷涂路径规划	82
3.2.3	应用实例	83
3.3	基于点云切片技术的喷涂机器人空间路径规划	89
3.3.1	末端执行器位姿数学模型	89
3.3.2	喷涂机器人空间路径的获取	90

3.3.3 应用实例	92
3.4 本章小结	95
第4章 平面和规则曲面上的喷涂机器人轨迹优化	97
4.1 引 言	97
4.2 涂层累积速率数学模型的建立	97
4.2.1 β 分布模型	99
4.2.2 无限范围模型	100
4.2.3 有限范围模型	100
4.3 喷涂机器人轨迹优化问题	103
4.3.1 喷涂机器人轨迹优化问题中的约束条件	105
4.3.2 沿指定空间路径的喷涂机器人轨迹优化问题	106
4.4 喷涂机器人轨迹优化问题的求解技术	107
4.5 仿真实验	109
4.6 本章小结	111
第5章 面向三维实体的喷涂机器人空间轨迹优化研究	112
5.1 引 言	112
5.2 数学模型的建立	114
5.3 三维实体分片及每一片上的喷涂轨迹优化	115
5.3.1 三维实体分片	115
5.3.2 每一片上的轨迹优化	116
5.3.3 两片交界处的轨迹优化	118
5.3.4 多片交界处的轨迹优化	125
5.3.5 实验仿真	126



5.4	三维实体上的喷涂轨迹优化组合	128
5.4.1	喷涂轨迹优化组合问题的转化与建模	128
5.4.2	遗传算法求解 TTOI 问题	130
5.4.3	蚁群算法求解 TTOI 问题	132
5.4.4	粒子群算法求解 TTOI 问题	135
5.5	喷涂实验研究及算法比较	137
5.6	本章小结	139
第 6 章	曲面上的喷涂机器人空间轨迹优化研究	140
6.1	引 言	140
6.2	一种简单的曲面上喷涂机器人轨迹优化方法	141
6.3	自由曲面上喷涂机器人空间轨迹优化方法	145
6.3.1	基于长方体模型法的喷涂机器人空间路径规划	146
6.3.2	自由曲面上的喷涂模型	150
6.3.3	自由曲面上的喷涂轨迹优化	152
6.3.4	仿真实验	154
6.3.5	喷涂实验	156
6.4	曲面上的静电喷涂机器人轨迹优化	157
6.4.1	ESRB 喷涂模型的建立	159
6.4.2	静电喷涂实验	162
6.5	本章小结	168
第 7 章	Bézier 曲面上的喷涂机器人轨迹优化	170
7.1	引 言	170
7.2	喷涂机器人最优初始轨迹选择方法	171

7.2.1	初始轨迹相对位置确定	173
7.2.2	初始轨迹方向选择	174
7.3	喷涂机器人空间路径生成方法	175
7.3.1	Bézier 曲面等距面离散点列计算	176
7.3.2	离散点列的连接	177
7.4	喷涂机器人轨迹优化	181
7.5	应用实例	183
7.6	本章小结	186
第 8 章	基于 Bézier 方法的复杂曲面喷涂机器人轨迹优化 ..	187
8.1	引 言	187
8.2	基于指数平均 Bézier 曲线的喷涂空间路径生成方法	189
8.2.1	指数平均族及其性质	189
8.2.2	指数平均 Bézier 曲线定义与性质	193
8.2.3	指数平均 Bézier 曲线喷涂空间路径生成	199
8.3	复杂曲面上喷涂机器人轨迹优化算法	201
8.4	喷涂实验	204
8.5	本章小结	206
第 9 章	高压静电喷涂机器人轨迹优化研究	208
9.1	引 言	208
9.2	高压静电喷涂中相关数学模型研究	209
9.2.1	空气场湍流模型	210
9.2.2	静电场模型	212
9.2.3	静电喷涂雾滴轨迹模型	212



9.2.4	静电旋转喷杯喷涂模型	215
9.3	基于 T-Bézier 曲线的喷涂机器人路径生成	217
9.3.1	T-Bézier 基的生成	217
9.3.2	T-Bézier 曲线的几何性质与喷涂机器人路径生成	220
9.4	高压静电喷涂模型仿真实验	221
9.4.1	网格划分	221
9.4.2	空气场	221
9.4.3	静电场	224
9.5	高压静电喷涂实验	224
9.6	本章小结	230
第 10 章	结束语	231
10.1	总 结	231
10.2	以后的研究工作	235
参考文献		238

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

机器人是综合了人的特长和机器特长的一种拟人的机械电子装置，既有人对环境状态的快速反应和分析判断能力，又有机器持续工作时间长、精确度高、抗恶劣环境的能力，从某种意义上说它也是机器进化过程的产物。机器人技术是综合了计算机、控制论、机构学、信息和传感技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术，是当代研究十分活跃、应用日益广泛的领域^[1-2]。

在所有自动喷涂设备中，最为常用的就是喷涂机器人（spray painting robot），它是在经过编程系统编程后，伺服电机驱动机械臂的各个关节进行运动，通过末端执行器自动喷出涂料或者是其他加工材料的工业机器人。国外对喷涂机器人的研究较早，目前已进入了产业化阶段。在我国，喷涂机器人系统方面的研究起步较晚，现在国内的制造企业在生产中基本上还是引进国外喷涂机器人。2015年最新统计资料显示，现阶段国外进口的喷涂机器人已经占到国内市场80%以上，瑞士ABB，日本发那科、安川，



德国库卡四家公司合计占据约 60% 的市场份额。

喷涂机器人又叫喷漆机器人，是可进行自动喷漆或喷涂其他材料的工业机器人。喷涂机器人主要由机器人本体、计算机和相应的控制系统组成，液压驱动的喷涂机器人还包括液压油源，如油泵、油箱和电机等。喷涂机器人多采用 5 或 6 自由度关节式结构，手臂有较大的运动空间，并可做复杂的轨迹运动，其腕部一般有 2~3 个自由度，可灵活运动。较先进的喷涂机器人腕部采用柔性手腕，既可向各个方向弯曲，又可转动，其动作类似人的手腕，能方便地通过较小的孔伸入工件内部，喷涂其内表面。喷涂机器人广泛用于汽车、仪表、电器、搪瓷等工艺生产部门。喷涂机器人主要有以下几个优点^[3-5]：（1）柔性好，工作范围大，升级可能性大，可实现内表面及外表面喷涂，在汽车制造行业中可实现多品种车型的混线生产，如轿车、旅行车、皮卡等车型混线生产。（2）喷涂质量和材料使用率高，仿形喷涂轨迹精确，可提高外观喷涂质量；降低喷涂量和清洁溶剂的用量。（3）易于操作和维护，并可离线编程，大大缩短现场调试时间；使用接插件结构和模块化设计，可实现快速安装和更换元器件，极大地缩短维修时间，便于维护保养。（4）设备利用率高，喷涂机器人的利用率可达 95%。图 1.1 是应用在汽车制造工业中的喷涂机器人。



图 1.1 喷涂机器人在汽车制造工业中的应用

以前的喷涂机器人多采用人工示教编程方式, 示教编程在技术实现上比较简单, 但费力、效率低下且精度差。目前, 离线编程方式已经成为喷涂机器人中最为常用的编程方式。在喷涂机器人离线编程系统中, 先对喷涂工件进行造型, 再通过建立合适的喷涂模型并对末端执行器运动轨迹进行优化, 从而保证涂层厚度的均匀性, 减少涂料总量, 降低喷涂成本, 提高喷涂效率, 最后在离线编程系统中进行仿真并将程序下载到喷涂机器人中进行喷涂作业。

目前, 喷涂机器人在国内外广泛应用于汽车等产品的涂装生产线。对于诸如汽车、电器及家具等产品, 其表面的喷涂效果对产品质量有相当大的影响。产品表面的色泽在相当程度上取决于涂层厚度的均匀度, 如果表面的涂层厚度不均匀, 会引起表面不光洁, 并出现边缘涂料的流挂和涂料橘皮现象, 而且涂层过厚的地方在使用过程中会出现皲裂。因此, 涂层均匀度是一个很重要的指标, 在保证最小涂层厚度的情况下, 均匀的涂层厚度可以减少涂料总量, 降低喷涂成本。在工业生产中, 涂装作业一直以来都是一道比较粗放的工序, 成本高、效率低且环境污染大。在静电喷涂技术出现以前, 空气喷涂的涂料转移率仅在 30% 左右。而高压静电喷涂效率很高, 涂料利用率可以达到 80%。但是高压静电喷涂中的影响因素非常多, 包括静电电压、旋杯转速、旋杯与工件间距、工件曲率、涂料雾粒直径、空气场压力、静电场大小、带电雾粒密度、雾滴电荷量, 等等。而对高压静电喷涂的研究涉及数学、控制学、计算机学、电子学、流体力学、机械学等多门学科的交叉。因此, 如何建立精确的多变量因素影响下的高压静电旋杯喷涂模型是一件非常困难的事情。目前, 国内对高压静电旋杯喷涂模型的理论研究基本上是空白的。而国外在此领域的理论研究中, 基本上都是忽略了许多参量对喷涂模型的影响, 只是在考虑了静电电压等一些主要因素的基础上, 建立起来了比较粗糙的静电喷涂模型。除此之外, 工件