

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.002

# 机器人涂胶技术研究现状及发展趋势

曹玥凡<sup>1</sup>, 梁泽明<sup>2</sup>, 黎应学<sup>3</sup>, 毕运波<sup>1</sup>

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310058; 2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089;

3. 中航成飞民用飞机有限责任公司, 四川 成都 610065)

**摘要:**涂胶机器人对大尺寸构件制造中的轨迹规划困难和视觉感知方法的适应性差等问题, 制约了其在制造领域, 尤其是在航空航天领域中的应用。阐述了国内外涂胶机器人的应用现状, 重点介绍涂胶机器人的末端执行器设计、轨迹规划、质量检测以及运动控制等关键技术研究现状, 并分析目前存在的问题与难点。探讨涂胶机器人技术发展趋势, 为智能化和自动化涂胶机器人技术研究提供参考。

**关键词:**自动化涂胶; 执行器; 轨迹规划; 质量检测; 运动控制; 研究现状; 发展趋势

**中图分类号:** TP242    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0013-05

## Current Research Status and Development Trend of Robotic Gluing Technology

CAO Yuefan<sup>1</sup>, LIANG Zeming<sup>2</sup>, LI Yingxue<sup>3</sup>, BI Yunbo<sup>1</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China;

3. AVIC Chengfei Civil Aircraft Company Ltd., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Regarding the limited application by glue application robots in the manufacturing field, especially in the aerospace field, due to the difficulty of trajectory planning and the poor adaptability of visual perception methods in the manufacturing of large-size components, this paper elaborates the current status of domestic and overseas robot applications in gluing manufacturing, emphasizes on end-effector design, trajectory planning, quality inspection and motion control for gluing robots, analyzes the problems and technical challenges of the existing methods, and explores the technological development trends of gluing robots in the manufacturing field, providing a reference for the research on intelligent and automated gluing robot technologies.

**Keywords:** automated gluing; effector; trajectory planning; quality inspection; motion control; research status; development trend

## 0 引言

工业机器人具有高柔性、高灵活度、高精度和高效率等特点, 被广泛应用于焊接、喷涂、装配以及检测等制造环节。涂胶是制造环节中实现零部件可靠连接的重要一环, 而传统的手工操作已经不能满足工业制造中高效、可靠的需求。近年来, 涂胶机器人的应用日趋普遍, 通过涂胶工艺精确控制, 能够显著提高生产效率和产品质量<sup>[1]</sup>, 在鞋靴制造<sup>[2-3]</sup>、汽车制造<sup>[4-6]</sup>、电力电子<sup>[7]</sup>等领域有着较为成熟的应用, 在航空航天领域中<sup>[8-9]</sup>涂胶机器人也渐渐崭露头角。

## 1 机器人涂胶设备应用现状

### 1.1 涂胶装备分类

随着运动控制、视觉感知等技术的发展, 涂胶

设备从单轴式涂胶设备、机械仿形涂胶设备、软仿形涂胶设备发展至智能涂胶机器人<sup>[10]</sup>, 涂胶机器人不仅集成了前几种设备的优点, 还在涂胶轨迹生成及跟踪、涂胶质量检测等方面有着优异的表现, 使得涂胶系统更为智能。

涂胶机器人根据工业机器人的类型可分为直角坐标式涂胶机器人、圆柱坐标式涂胶机器人以及关节式涂胶机器人。直角坐标式涂胶机器人<sup>[11-12]</sup>由3个一维直线运动单元组成, 其组合多样, 扩展能力强, 且工作空间范围可调, 这种机器人精度较高且简单经济。圆柱坐标式涂胶机器人<sup>[13-14]</sup>由1个转动单元和2个直线移动单元组成, 其结构紧凑, 更为灵活。关节式涂胶机器人是目前常见的涂胶机器人形式, 其运动通过多个相互连接杆件的关节旋转来实现末端位姿调整<sup>[15-16]</sup>。

第一作者简介: 曹玥凡(1997—), 男, 上海人, 硕士研究生, 研究方向为机器人、机器视觉, yf\_cao@zju.edu.cn。

## 1.2 涂胶机器人应用现状

目前涂胶机器人的应用涉及制鞋、汽车制造、电力电子以及航空航天制造等工业领域。在汽车制造业,涂胶机器人被广泛用于车身底部的焊缝密封涂胶、抗石击涂胶等整车涂胶场合,从硬件设计<sup>[17-18]</sup>到软件优化<sup>[19]</sup>层面实现了高效、稳定、高质量。涂胶机器人目前已经在宝马、东风日产等国内外主流整车制造工厂中投入使用。

在航空制造领域,自动化涂胶设备的应用仍然处于起步阶段。据统计,使用胶接结构的飞机有 100 多种。美国 B-58 重型超声速度轰炸机的胶接壁板面积占 80%,用胶量超过 400 kg,而波音 747 客机的密封胶用量达到了 450 kg。虽然航空制造业用胶量持续提升,但是由于工艺要求较高,目前国内鲜有智能涂胶设备应用于飞机装配环节中,主要还是依赖人工涂胶。

近年来有学者针对风电叶片<sup>[20]</sup>、飞机壁板、航天卫星构件<sup>[21]</sup>等大型构件减震、密封人工涂胶操作中效率低下、质量不稳等问题,研究使用涂胶机器人替代人工操作。大型构件形状由于结构复杂,刚性差、易变形,从而导致涂胶精度较低,因此涂胶机器人在飞机壁板等大型构件制造中的应用仍然有很大的发展空间。

## 2 机器人涂胶关键技术研究

涂胶机器人关键技术主要包括涂胶末端执行器设计、涂胶轨迹规划与生成、涂胶质量检测、涂胶机器人运动控制等四个方面。

### 2.1 末端执行器设计

涂胶末端执行器是机器人完成涂胶任务的关键部件之一,涂胶末端执行器的结构设计、质量等参数最终都影响涂胶的质量好坏。涂胶末端执行器主要由涂胶阀(定量机)、控制器、视觉组件、供胶组件等组成(图 1)。

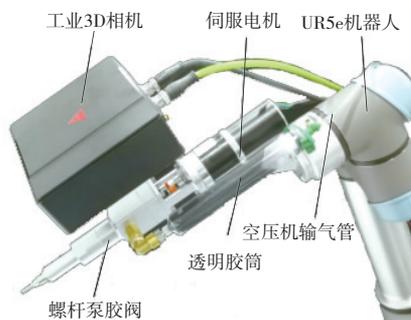


图 1 涂胶末端执行器

涂胶阀作为末端执行器的核心驱动单元,其类型直接影响胶嘴的出胶量控制精度。电磁阀响应快,对于低黏度胶体有着广泛应用;螺杆阀适用于高黏度胶体,主要应用于电力电子等高精度领域。目前,涂胶阀主要针对特定任务场景进行选用,尚无统一解决方案。

视觉组件根据其安装方式可以分为跟随式和固定式,跟随式主要是将视觉组件安装于末端执行器上,跟随机器人运动,该安装方式更为灵活便捷,可随着机器人移动随时采集数据实现工件信息提取和胶体检测等任务<sup>[22]</sup>;而固定式则是将视觉组件安装在机架等位置不随机器人移动,该方法多见于生产流水线且目标工件尺寸不大的情况下<sup>[23-24]</sup>。

为了提升涂胶机器人末端动态性能,除了结构轻量化外,涂胶末端执行器多采用模块化设计,通过快速切换结构可以支持涂胶阀与视觉组件灵活组合,从而实现多任务场景下的生产需求。但是当前涂胶末端执行器尚因不具备在线换胶、供胶管道清洗等复杂操作功能,仍需进一步研究。

### 2.2 涂胶轨迹规划

随着现代工业生产的智能化发展,依靠传统在线示教编程的方法已不再满足工业涂胶的生产需求,目前两种主要的涂胶轨迹生成方法是基于离线编程和视觉感知的方法。

基于离线编程的涂胶轨迹生成方法主要是基于目标模型文件对涂胶机器人和工件进行参数化建模设计,再通过路径规划等方法实现涂胶操作。基于离线编程的方式,对于工件定位精度有较高的要求。离线编程的工件定位主要依赖于夹具工装,其定位精度会随着使用次数的增加而降低。基于离线编程的方法稳定性较高,但生产成本较高,灵活性差,对复杂生产任务和场景的适应性较差。

基于视觉感知的涂胶轨迹生成方法则是通过实测图像等数据提取目标关键信息、自动识别涂胶轨迹特征点并生成涂胶轨迹,该方法灵活性更高。有学者将视觉感知技术与离线编程结合,通过轨迹特征识别以及模型匹配等二维图像处理算法,降低了涂胶机器人离线编程的难度。YANG等<sup>[25]</sup>通过视觉相机采集涂胶目标图像,并通过模型库以及图像处理算法提取涂胶路径。FAN等<sup>[26]</sup>提出基于分布模型的图像特征提取算法和深度标定优化 PNP 算法,对发动机工件上的孔进

行定位并生成涂胶轨迹(图2)。

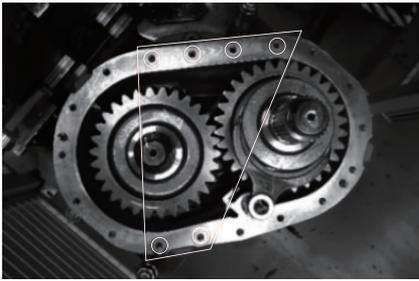


图2 发动机涂胶点二维视觉检测定位

基于二维视觉的图像处理算法能够有效地对涂胶工件进行定位以及识别涂胶轨迹的特征点,从而降低离线编程的难度,提升涂胶机器人的灵活性。虽然采用二维图像的视觉检测算法耗费的计算资源较少,但其提供的位置信息也较为有限,导致定位精度和稳定性相对较差。因此有学者提出使用三维视觉测量方法进行机器人涂胶研究。

为了简化三维轨迹点特征提取,WU等<sup>[27]</sup>将线结构光采集得到的鞋类三维几何信息投影至二维,以简化特征提取,再恢复至三维空间获得涂胶轨迹。文献[8]通过T-scan点云扫描仪采集高精度点云数据(图3),基于主曲线理论和B样条曲线拟合涂胶轨迹,该方法无需示教操作以及离线编程,因而增加了涂胶机器人系统的柔性。三维视觉能够提供直观的轨迹特征信息,直接用于轨迹生成或实时修正,但三维数据计算成本较高,影响涂胶效率。

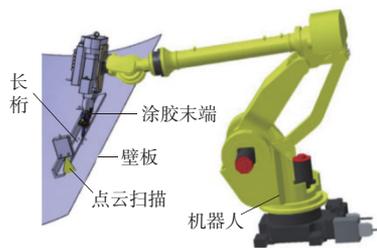


图3 T-scan飞机长桁壁板涂胶扫描

近年来,多模态感知技术<sup>[28-30]</sup>的出现,验证了多种数据信息的融合并能够使机器人感知、理解环境,完成视觉检测任务。文献[22]通过将三维结构光相机和机械臂集成开发鞋类自动喷涂系统,采用结构光相机扫描获得目标局部三维模型,结合二维图像中的ROI区域提取出涂胶轨迹。PAGANO等<sup>[31-32]</sup>将直角坐标机器人与视觉设备相结合提出了一种适用于二维平面物体以及三维物体涂胶任务的柔性涂胶机器人,结合二维图像

和三维点云的特点,根据涂胶目标的不同,灵活地完成涂胶任务。但是目前多模态感知技术在涂胶机器人领域仍处于起步阶段,尚未广泛应用。

### 2.3 涂胶质量检测

目前主要的涂胶质量检测方法是基于视觉的非接触式测量检测技术,且基于视觉的涂胶机器人的涂胶任务以及检测任务通常可以同时进行,在基于视觉引导涂胶任务的同时,并实时反馈涂胶结果。

涂胶质量检测技术主要可以分为二维胶体检测和三维胶体检测。二维胶体检测通过工业相机采集涂胶图像,采用语义分割和特征提取等方法分析图像中的灰度、颜色等信息,进一步得到胶体质量参数<sup>[33]</sup>。但是工业相机在单一视角下采集的涂胶图像不能完全覆盖检测胶条,因此姜志远等<sup>[34]</sup>采用一体式圆盘设计将3个CCD相机360°分布,对胶条进行全覆盖检测,实现了涂胶质量在线监控和缺陷预警。传统二维图像检测算法能够较为精准地检测出涂胶质量参数,进行缺陷检测,但是提出的算法往往适应性和智能化程度较低,无法应对更为复杂的涂胶检测任务。

随着机器学习和深度学习算法的发展,有学者采用支持向量机或语义分割等算法来提高胶体缺陷检测和识别的准确率和智能化程度。基于支持向量机的涂胶缺陷检测方法主要通过Canny算子提取图像特征,训练支持向量机实现涂胶缺陷的识别,其准确率可达95%<sup>[35-36]</sup>。除此之外,陈甦欣等<sup>[37]</sup>提出了一种基于区域生长和融合特征支持向量机的涂胶缺陷检测算法,通过融合涂胶区域的梯度信息和纹理信息,能够精确、高效地检测区域生长分割得到的涂胶区域图像中的胶体缺陷。基于深度学习的二维图像检测方法则是通过构建涂胶数据集训练深度学习模型预测涂胶图像中的缺陷特征,实现涂胶缺陷的检测识别。田文<sup>[38]</sup>提出了改进的YOLOv3深度学习算法,提升了涂胶检测过程中的效率和准确性。朱立忠等<sup>[39]</sup>提出了基于简化区域生成网络和多尺度特征融合改进语义分割网络Faster-RCNN,分割识别涂胶缺陷区域,其准确率可达97.5%。

二维胶体检测方法无法获得胶体的三维特征,对于胶体的高度信息无法进行定量分析,而且二维图像质量容易受到环境影响,导致检测的可靠性和稳定性较低。三维胶体检测方法通过结构光测距、激光测距以及双目立体视觉方法等获取

胶体三维信息,相较于二维检测方法更便于对胶体进行全方位的质量检测。文献[21]利用3个线结构光传感器组合测量的方法对胶条进行全方位的非接触测量(图4),并进一步研究了胶体颜色和出胶量对误差测量的影响。XIAO等<sup>[40]</sup>针对复杂形状胶体一致性检测困难的问题,提出了基于线结构光和外极约束算法的双目视觉特征匹配算法检测胶体形状,测量其绝对误差小于1.04 mm,相对误差小于10%。

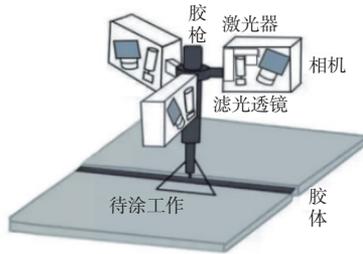


图4 组合线结构光胶体测量结构

## 2.4 涂胶机器人运动控制技术

涂胶机器人的运动控制也同样影响着最终涂胶的效果。由于胶体流动、粘附等特殊特性,机器人涂胶作业时的运动控制性能是保障胶体涂敷形成的胶条满足生产工艺指标的关键要素。

通过构件胶体的厚度、黏度以及剥离强度与机器人末端出胶口的速度建立数学模型并以此控制速度,能够对涂胶末端移动速度和喷涂姿态参数进行修正,从而获得更好的效果。通过视觉检测实际位置和基准位置之间的偏移量,对轨迹进行补偿优化。视觉伺服能够实现涂胶机器人更高精度和更稳定的控制。随着人工智能技术的发展,PREZAS等<sup>[41]</sup>采用视觉+控制结合AI智能驱动的方法,在涂胶过程中通过视觉实时检测结果调整机器人运动速度,补偿路径跟踪过程中的干扰。

目前涂胶机器人运动控制技术多集中单机器人控制,并且在视觉加控制结合等方面取得了较好的进展,能够实现胶体精准涂敷,但是面向大尺寸零件的多机器人协同涂胶控制技术的研究尚未见公开报道,在多机器人协同涂胶的时空冲突消解方面亟待进一步研究。

## 3 机器人涂胶技术发展趋势

为应对产品涂胶操作自动化、智能化发展的需求,机器人涂胶技术的未来发展趋势集中于以下四个方面:

### 1) 多功能模块化设计

未来的涂胶机器人将趋向于多功能化,能够完成除涂胶外的多种工艺任务。通过模块化设计,涂胶机器人可以根据生产需求灵活更换不同功能模块或工具,实现多工序的协同作业。这种一体化的设计将大大提高生产效率,减少设备投入和生产空间的占用。模块化的设计则使得机器人能够根据不同的生产任务进行快速调整或更换组件,以实现生产过程的高效切换和灵活适应。

### 2) 自动化与智能化集成

未来的涂胶机器人将更加智能化。通过集成各类传感器、人工智能算法,实现对涂胶过程的实时监控与优化。涂胶机器人将能够自动识别不同工件表面特性,分析涂胶需求,自动调整涂胶量、速度和路径。智能化系统还可以预测涂胶质量,并进行实时反馈调整,以确保涂胶的一致性和质量。

### 3) 多模态信息融合

涂胶机器人通常采用二维图像或三维点云信息等单一形式的图像数据来获取工件信息,其可靠性较低。目前在机器人、自动驾驶等领域,许多学者将目光集中于多模态信息融合算法,通过多种传感器数据信息融合,能够使系统做出更可靠的判断,进而使机器人快速、准确地完成任务。同样,融合多种传感器信息,能够进一步提升机器人涂胶操作的可靠性、效率和性能。

### 4) 多机器人协作与人机协作

多涂胶机器人协作是未来机器人涂胶的发展趋势之一,机器人之间通过互联通信,对涂胶任务进行划分,相互合作,构成涂胶机器人集群,进而以更快的节拍更高效地完成涂胶任务。此外,人机交互也是今后一个重要的发展方向,通过传感技术和安全控制技术,操作员能够实时对涂胶机器人工作进行干预,从而实现对生产流程的监控和优化。

## 4 结语

机器人涂胶技术已取得长足进步,广泛应用于一般工业生产制造中,并呈现出自动化、智能化、柔性化、集群化的应用发展趋势。但面对大尺寸、高精度和高复杂度的生产需求,涂胶机器人仍然存在多功能模块化设计不足、轨迹规划依赖离线编程、基于视觉感知的涂胶质量检测方法的适应性差、人机协同作业难等问题,亟待进一步深入研究,以推动制造业智能化转型升级。

## 参考文献:

- [1] 金禹铭. 航天器结构板表面高粘度胶体涂覆技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.
- [2] 谷峥岩. 基于机器视觉的鞋底自动化涂胶系统设计[D]. 芜湖:安徽工程大学,2022.
- [3] 周晓虎. 基于点云信息的机器人曲面鞋底涂胶关键技术研究[D]. 苏州:苏州大学,2023.
- [4] 汪振中. 机器人在汽车挡风玻璃自动涂胶系统的应用[J]. 电子技术与软件工程,2019(1):236.
- [5] 韩健睿,张瑞祺,郭瑞莲,等. 一种基于工业视觉的汽车密封件涂胶工作站研究[J]. 科技创新与应用,2021,11(27):62-64.
- [6] 唐晓玲,陈进方,沈敏. 涂装车间PVC涂胶机器人射流枪嘴调试应用及质量控制[J]. 现代涂料与涂装,2024,27(2):30-32,39.
- [7] 饶建红,邹荣飞,杨庆华. 基于激光线扫传感器锂电池动态涂胶系统方案设计[J]. 制造业自动化,2022,44(7):82-85.
- [8] 许斌,周新房,王伟华,等. 面向飞机长桁壁板的柔性化机器人涂胶系统[J]. 航空制造技术,2022,65(19):100-106,118.
- [9] 雷沛,夏凤琴,孙海龙,等. 面向飞机大部件的密封胶自动涂覆机器人系统研究[J]. 航空制造技术,2023,66(12):59-67.
- [10] 唐德威,宗德祥,邓宗全,等. 涂胶机器人视觉系统的应用研究[J]. 机器人,2006,28(1):1-4.
- [11] 庄伟,邓海津,康婧. 基于可编程运动控制器的多功能纸盒自动涂胶机的设计[J]. 自动化技术与应用,2020,39(3):18-22,37.
- [12] 王建国. 风电叶片自动涂胶设备的设计[J]. 机械工程与自动化,2024(3):85-86.
- [13] 郑鋈,路书礼. 一种汽车白车身生产线中圆柱坐标机器人的运动学及仿真[J]. 机械工程师,2020(12):129-131.
- [14] 张浩. 基于圆柱坐标的香蕉采摘机器人负载机械臂系统设计[D]. 广州:广东工业大学,2021.
- [15] 张羽. 飞机壁板涂胶机机械系统设计[D]. 西安:西安学院,2015.
- [16] 梅雪川,葛光军,林粤科,等. 涂胶机器人技术现状与发展趋势[J]. 现代制造技术与装备,2016,52(1):159-160.
- [17] 李富强. 基于线结构光的车顶焊缝涂胶机器人系统关键技术研究[D]. 厦门:厦门理工学院,2018.
- [18] 成华,滑德富. 涂胶机器人在艾瑞泽7白车身上的应用[J]. 现代零部件,2014(5):42-44.
- [19] 杨恒亮,朱浩翔,鲁迪. 一种基于3D视觉补偿的机器人整车涂胶应用[J]. 装备机械,2010(1):19-21.
- [20] 王瀚培. 卫星构件涂胶面三维重建与涂胶轨迹规划[D]. 上海:东华大学,2023.
- [21] 王一,李龙飞,陆坤龙. 基于组合线结构光的涂胶质量检测系统设计[J]. 激光与红外,2021,51(10):1371-1377.
- [22] LEE C Y, KAO T L, WANG K S. Implementation of a robotic arm with 3D vision for shoes glue spraying system[C]//Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence. Shenzhen China: ACM, 2018:562-565.
- [23] PAGANO S, RUSSO R, SAVINO S. A vision guided robot for gluing operations [M]//Transactions on Engineering Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2020:15-28.
- [24] 曹兰. 基于线激光扫描的鞋底点胶路径规划方法[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2022, 43(4):64-69.
- [25] YANG Z G, AN Y, SUN Y B, et al. Research on intelligent glue-coating robot based on visual servo[J]. Physics Procedia, 2012, 24:2165-2171.
- [26] FAN J H, ZHANG Y J, PENG S H, et al. Robot gluing localization method based on monocular vision [C]//Second Optics Frontier Conference. ONLINE, China: SPIE, 2022:25.
- [27] WU X J, LI Z F, WEN P Z. An automatic shoe-groove feature extraction method based on robot and structural laser scanning [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(1):1729881416678135.
- [28] ZHANG J M, LIU H Y, YANG K L, et al. CMX:cross-modal fusion for RGB-X semantic segmentation with transformers [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(12):14679-14694.
- [29] ZHAO Z X, BAI H W, ZHANG J S, et al. CDDFuse: correlation-driven dual-branch feature decomposition for multi-modality image fusion[C]//2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2023:5906-5916.
- [30] 李彦, 范彦志, 方怡哲, 等. 融合图像与点云的曲面工件涂胶质量检测方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(8):53-60.
- [31] PAGANO S, RUSSO R, SAVINO S. A vision guided robotic system for flexible gluing process in the footwear industry [J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing, 2020, 65:101965.
- [32] PAGANO S, RUSSO R, SAVINO S. A smart gluing process by a vision guided robotic system [M]//Advances in Italian Mechanism Science. Cham:Springer International Publishing, 2020:414-422.

(下转第 29 页)

