

# 工程机械大型结构件机器人自动喷涂技术应用探索

宋延超, 陈亮, 李连成

(徐州重型机械有限公司, 江苏 徐州 221004)

**摘要:** 机器人自动喷涂技术能够显著提高喷涂效率和喷涂质量,然而由于产品结构特殊性和复杂性,机器人自动喷涂技术在起重机大型结构件中仍少有应用。本文从工程机械结构件吊挂及定位、编程参数设置、路径规划与轨迹优化、现场喷涂工艺优化等方面对大型结构件自动喷涂技术的应用进行阐述,并提供了具体方案以供同行参考。

**关键词:** 结构件; 喷涂机器人; 离线编程; 示教编程

中图分类号:TQ639 文献标志码:B 文章编号:1007-9548(2024)06-0024-03

## Application of Robot Automatic Spraying Technology for Large Structure Parts of Construction Machinery

SONG Yan-chao, CHEN Liang, LI Lian-cheng

(Xuzhou Heavy Machinery Co., Ltd., Xuzhou 221004, Jiangsu, China)

**Abstract:** The robot automatic spraying technology can effectively improve the spraying efficiency and spraying quality. But due to the particularity and complexity of product structure, the robot automatic spraying technology is seldom used in the large structural of crane. In this paper, the application of automatic spraying technology for large-scale structural parts is described from the aspects of the hanging and positioning determination, programming parameter setting, path planning, trajectory optimization and on-site spraying process optimization, and provided specific schemes for peer reference

**Key words:** structural components; spraying robot; off-line programming; trajectory planning

### 0 引言

喷涂机器人是工业生产中重要的涂装生产设备,不仅可以将涂装工从高污染的作业环境中解放出来,还可以降低涂装工的作业强度,提高喷涂质量稳定性,对涂装工业的发展起到了不可忽视的作用。在工程机械智能制造的大背景下,高质量、高效率、高效益和可持续发展理念使得机器人喷涂技术得到了广泛应用。零部件自动喷涂技术及其喷涂工艺优化成为工程机械行业研究的热点方向<sup>[1]</sup>,然而由于产品结构的特殊性和复杂性,自动喷涂技术在起重机大型复杂结构件中仍少有应用。

为了拓展自动喷涂技术在工程机械行业的应用范

围,提高结构件喷涂效率和外观质量一致性,笔者从吊具改善、机器人编程技术、喷涂参数及运行轨迹确认、程序验证以及喷涂工艺优化等角度就自动喷涂技术在工程机械结构件中的应用做以介绍。

### 1 工程机械结构件自动喷涂特点

#### 1.1 结构件类型特点

工程机械大型结构件其结构特征和尺寸大小存在较大差异,相同类型的结构件因产品型号不同存在尺寸和结构的差异,导致同一条喷涂线上需要自动识别的产品类型多达几百种,如何能让机器人准确识别如此种类繁多的结构类型,是实现自动喷涂面临的一个难题。

#### 1.2 结构件输送吊挂方式

工程机械结构件普遍采用自行葫芦小车或者积放链悬挂方式吊挂模式,因吊挂位置和吊挂链条的差异,不同工件在喷漆室的定位存在差异,结构件在喷漆室

收稿日期: 2023-06-25

作者简介: 宋延超(1986—),女,硕士,工程师,主要从事先进涂装技术与涂料性能研究。E-mail:xi450554437@126.com。

的姿态很难保持一致,自动喷涂无法有效实施,因此结构件的定位问题是实现自动喷涂的又一个难题。

### 1.3 示教编程与离线编程模式

因结构件形式复杂,喷涂范围较大,人工示教方式仍然是工程机械结构件普遍采用的机器人编程模式。示教编程时将人工喷涂经验直接转移到喷涂机器人的轨迹规划中,人为影响因素占比较大。另外人工示教编程需要在涂装线停产的前提下进行,示教时间越长,生产线的涂装效率越低。离线编程模式具有编程速度快的特点,但由于结构件定位偏差,导致离线编程程序轨迹与实际喷涂轨迹存在偏差,需要多次修改模拟验证,现场实际应用较少。如何平衡生产效率和编程工作,成为结构件自动喷涂亟需解决的难题。

## 2 结构件自动喷涂实施方案

### 2.1 结构件吊挂与定位

为实现喷漆室内工件准确定位,要求根据结构件类型选择不同长度和形式的吊具。同一类工件吊挂位置保持固定。如起重机伸臂、桁架臂类部件选择带平钩的链条,吊挂臂头臂尾,保证工件吊挂平稳性。也可以根据工件结构形式选择产品上固定位置的工艺孔,使用穿轴工装进行吊挂,保证吊挂工件的稳定性和位置相对一致性。车架、转台类工件设计合适吊装点,根据工件距离地面的高度选择不同长度的链条和吊具。对于高度尺寸差异较大的结构件,可以借助输送系统自动升降功能,在工件定位完成后,识别程序自动降低10~30 cm,保证工件底平面与地面的距离相对不变。吊具吊挂点数量遵循安全适中原则,吊挂点过多挂件操作不方便,且容易与机器人手臂干涉,影响喷涂效率和涂装质量。吊挂完成的工件,扫描后自动识别工件信息,并依靠条码精确定位技术,实现工件的定点喷涂。

### 2.2 喷涂机器人编程参数设置与程序优化

选择合理的喷涂工艺参数,对成功建立喷涂模型、减少涂装喷涂缺陷具有重要作用。

#### 2.2.1 工艺参数设置与确认

在选择以工艺评定的方式确认参数时,通常采用正交试验在样板上进行连续喷涂试验,而后使用检测仪器对喷涂后的漆膜外观质量进行评价。经过多组喷涂试验后,确定最优的喷涂工艺参数。在目前的生产条件下,通过现场工艺评定,以多次试验的方法建立起来的经验模型,相对于数学建模方法,应用更为广泛。

试验中一般保持喷枪喷涂角度尽量垂直、喷涂距离固定(一般约300 mm),并在涂料流量不变的前提下,调整喷枪系统的雾化压力和扇形压力,使雾化的涂料在工件上形成椭圆形图样,确认合适的扇幅宽度(一

般约300 mm)。

在流量和扇幅确认好之后,需要对喷涂搭接和喷涂速度进行验证。喷涂搭接一般选择1/2~2/3扇幅宽度,以某一固定速度在平面样板上进行试验喷涂。喷涂路径为从一条直线,上下间隔1 cm测量并记录单涂层漆膜厚度,根据扇幅范围内各间隔点处和扇幅中点的漆膜厚度计算扇幅搭接宽度。

根据现场生产节拍和喷涂道数,机器人自动喷涂速率一般控制在500~1 000 mm/s。复杂组合体分片之间的交接处存在漆膜厚度不均匀的现象,需要对不同区域特别是曲面特征差异比较大的区域的移动速度、喷涂搭接等参数进行调整,以保证工件漆膜喷涂效果。在同样的喷涂流量下,复杂或边缘等较小范围区域的膜厚差异可以通过微调喷枪移动速度、喷枪与车身之间的距离以及喷涂搭接等解决。一般不建议调整喷涂气压及扇幅、雾化参数,以减少喷涂流量的波动变化。

#### 2.2.2 喷涂轨迹及路径规划方法

喷涂轨迹及路径的规划是喷涂机器人系统中研究的热点与重点。根据零件吊挂位置、机器人的数量、排布位置及机械手臂可达范围,合理分配机器人的喷涂工作范围,使得每个机器人的喷涂时间相当,提高喷涂作业效率。

由于喷涂零件一般是复杂的曲面几何体,需要基于工件曲面几何形状特征将复杂零件划分为几个曲面特征差异较小的分区,再分别将每个区域进行轨迹规划,最后将相邻分区的轨迹路径进行连接整合形成完整的喷涂路径轨迹。根据结构件面积和类型,一般分为结构件左侧、右侧、里侧、前方、后面、上面、下面等区域进行轨迹规划。

在每个区域内,对于大面积的喷涂优先选择光栅形路径,如伸臂、车架等长宽比较大的长方体,一般选择沿着臂筒长边或车架腹板进行扫描,减少喷涂过程的拐角个数和拐角过渡时间,提高喷涂效率。对于喷涂形状不规则的零件表面或者中间有孔洞的部位,如基本臂臂尾、转台卷扬部位可按照先边缘后中间的螺旋形路径进行编程,减少喷涂轨迹重叠与涂料浪费。

喷枪在运行中一般保持与待喷涂面呈90°角的姿态,喷枪运行至零件边缘或者吊挂点、链条附近时,可以让喷枪适当地倾斜一定角度喷涂,减少喷枪与零件的碰撞风险。在轨迹规划过程中要尽量调整好各种过渡点的姿态转换,尤其注意要避免出现奇异点,减少机器人死轴的发生。

### 2.3 程序生成与优化

结合离线编程和人工示教编程技术的特点,为提高结构件编程效率和自动喷涂覆盖率,车架、转台、臂

架类等复杂结构件一般采用离线编程与人工示教编程结合的编程模式。

### 2.3.1 零件模型处理与轨迹生成

编程之前,需将 PROE 等图形软件中提取的结构件模型导入到机器人工作站中,系统会自动为导入的结构件模型配置相应的基础数据,如喷涂轨道、吊挂位置、喷枪与待喷涂工件之间的相对位置等,这些基础的定位数据将确保后期离线仿真的一致性。

机器人运动轨迹的生成主要是根据机器人逆运动学的原理,将前期生成的喷涂路径及位姿转换成机器人各关节运动的角度,实现喷涂作业<sup>[2-3]</sup>。由于零部件在仿真软件中的坐标定位与实际喷涂环境中的定位可能会存在差异,因此在编程过程中,需要对坐标系原点进行校正。在车架、转台和伸臂等大结构件的编程中,通常选择工件前后点(如臂头盖板顶点、臂尾终点)、中间特征点(如变幅铰点、固定腿方箱)等。

坐标原点确认好之后就可以根据工件的结构特点,并结合喷涂轨迹和路径的规划方法模拟生成喷涂轨迹。

### 2.3.2 程序仿真验证

为提高编程轨迹的可操作性和现场的可执行性,编程工作结束后,需要使用专业的仿真软件进行效果验证,减少机器人手臂不良姿态和系统报错概率。经过仿真模拟优化后,就可以通过机器人系统,将运动轨迹系统生成机器人可识别的程序语言,再根据系统指令将程序语言转化为各喷涂动作,实现工件的自动喷涂。

由于离线编程系统的模型是建立在理想规范的环境下,在实际生产时,机器人自身安装结构误差、工件的吊挂位置、吊具的系统定位误差等都会影响自动喷涂程序的实施效果<sup>[4]</sup>。因此程序生成后,需要在实际喷涂环境条件下让机器人执行一次空跑试验,再次验证喷涂轨迹路线正确可行,动作流程无报错、机器人手臂间无干涉和碰撞等情况,减少实际喷涂时的轨迹误差,保证喷涂程序的准确性。

### 2.3.3 人工示教编程工艺优化

为提高复杂部位的喷涂覆盖率和膜厚一致性,在自动喷涂程序验证后,可采用人工示教的方式,对结构件复杂部位(如伸臂的变幅支座、臂头臂尾、车架两侧支架、转台支架)的喷涂轨迹进行二次优化。操作者可直接使用示教机,将机器人手臂末端移动至优化区域进行轨迹的修改。人工示教完成后,需要手动使用示教器空机进行轨迹路线验证,验证动作的流畅性以及与实际干涉碰撞情况、检查机器人喷涂动作是否超出极限位置,总喷涂作业时间是否满足节拍要求,是否可消除等待时间等。优化完毕后,将优化程序加入到

主程序更新。

考虑现场自动喷涂节拍与涂装线体的平衡性,在人工示教优化过程中,如果优化区域轨迹相对复杂,手臂运行轨迹与工件或吊具干涉明显、运行等待时间过长等问题,在无喷涂覆盖率指标要求的前提下,建议自动喷涂时将该区域直接略过,并在喷涂后实施人工局部找补,以提高自动喷涂效率。

为提高结构件编程效率,对于结构件造型相同仅尺寸存在轻微偏差的结构件,可直接调用结构相似工件的程序在喷漆室手动使用示教器空机进行轨迹路线验证,并采用人工示教模式对轨迹进行优化保存,减少离线编程模型处理及程序仿真验证工作量。

## 3 喷涂工艺优化

根据起重机大型结构件的复杂程度,对伸臂、桁架臂等自动喷涂覆盖率较高的工件,自动喷涂后可直接下线找补入库。对于车架及转台等结构复杂、支架及腔体较多的结构件,机器人自动喷涂后,对于自动喷涂无法覆盖的部位(如复杂支架及内腔区域、工件边缘、工件间的重叠区域、链条干涉区域等),需要借助人工局部找补的方式,对结构件漆膜缺陷处进行找补喷涂,保证结构件喷涂漆膜覆盖完整均匀。

结构件喷涂下线后,通过检测各部位漆膜厚度均值、漆膜厚度标准差及喷涂时间等指标评估机器人自动喷涂程序的有效性,适时对该工件喷涂程序进行保存优化,保证工件喷涂效果。

## 4 结语

针对工程机械大型结构件尺寸偏大且造型复杂的特点,通过合理设计及优化吊具,采用人工示教编程与离线编程复合的编程模式,自动喷涂与人工局部找补的喷涂模式,结合现场实际喷涂工艺评定方法,是目前起重机大型工程机械结构件快速实现自动喷涂的主要解决方案。本文进行的是在特定机器人型号及产品结构下开展的自动喷涂工艺研究,调试思路和工艺方案可供同行业技术人员交流参考使用。

### 参考文献:

- [1] 张祥敢,王中杰,孙鲁飞.工业机器人在工程机械涂装工艺的应用前景分析[J].现代涂料与涂装,2020(8):43-45.
- [2] 李玉磊,胡建国,许能才,等.喷涂机器人轨迹离线编程仿真技术应用探讨[J].中国涂料,2021(11):53-60.
- [3] 帅佳慧.六自由度喷入机器人离线轨迹规划与仿真[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [4] 孟凡彬,赵成林,陈登阁.浅谈涂装喷涂机器人工艺调试过程[J].现代涂料与涂装,2019(1):44-45.