

浅谈涂装机器人仿真技术开发与应用

李文鹏¹, 孙中乐², 张进¹, 王勉¹, 齐有升¹, 李明轩¹, 周磊¹, 饶文文¹

(1.零跑科技股份有限公司,浙江 金华 321000; 2.奇瑞汽车鄂尔多斯分公司,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 本文聚焦涂装机器人车型仿真调试,详细梳理离线仿真工作站搭建流程,为后续工作搭建坚实平台。接着对车型数模进行专业处理,保证数据精准匹配,避免后续调试误差。然后深入介绍了机器人仿真系统的建立过程,搭建虚拟调试场景。尤其重视参数设置,涉及运动、喷涂等多类关键参数。离线仿真软件与实车工艺调试结合的系统工程,二者相辅相成。通过这一系列关键步骤,推动涂装机器人高效、精准完成车型仿真调试,提升涂装质量与生产效能。

关键词: 喷涂机器人; 仿真技术; 虚拟调试; 参数设置

中图分类号:TQ639

文献标志码:A

文章编号:1007-9548(2026)01-0053-04

Development and Application of Simulation Technology for Painting Robot

LI Wen-peng¹, SUN Zhong-le², ZHANG Jin¹, WANG Mian¹, QI You-sheng¹,

LI Ming-xuan¹, ZHOU Lei¹, RAO Wen-wen¹

(1.Leapmotor Technology Co., Ltd., Jinhua 321000, Zhejiang, China;

2.Ordos Branch, Chery Automobile Co., Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China)

Abstract: This article focuses on the simulation and debugging of coating robot models, detailing the process of setting up an offline simulation workstation to lay a solid foundation for subsequent work. It then elaborates on the professional processing of vehicle model data to ensure precise data matching and avoid errors in subsequent debugging. The article further introduces the establishment process of the robot simulation system and the creation of a virtual debugging environment. Special attention is paid to parameter settings, including various key parameters such as motion and spraying. The integration of offline simulation software with real vehicle process debugging is a systematic project where both complement each other. Through this series of critical steps, the article aims to promote the efficient and accurate completion of vehicle model simulation and debugging by coating robots, thereby enhancing coating quality and production efficiency.

Key words: spray painting robot; simulation technology; virtual commissioning; parameter setting

0 引言

当前,喷涂机器人领域成熟品牌众多,像日本安川都林(YASKAWA DOOLLIM)、德国杜尔(DURR)以及瑞士的ABB等。这些品牌都将仿真技术视为核心关键,会依据不同用途展开独立开发。各品牌都有与之匹配的仿真软件,见表1。在众多品牌中,ABB喷涂机器

人在市场上表现突出。本文将围绕ABB喷涂机器人仿真技术的开发与应用展开深入论述,剖析其技术特点、应用场景及优势,为相关领域提供参考。

表1 品牌与对应的仿真软件

机器人品牌	仿真软件名称
YASKAWA DOOLLIM	MotoSim EG
ABB	RobotStudio
DURR	3D-OnSite

收稿日期:2024-05-21

作者简介:李文鹏(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事汽车涂装现场工艺规划及管理、工艺调试及品质提升、新车型导入、新产品新工艺前瞻性研究与应用。E-mail:lwppq@163.com。

1 仿真技术难点

在汽车制造领域,机器人自主开发对于提升生产

效率与产品质量意义重大,然而当前机器人自主开发面临着诸多挑战。

1.1 机器人自主开发现状

目前,新开发车型的喷涂机器人轨迹仿形工作大多委托给第三方专业厂家完成。这种模式存在明显弊端,在新车型开发阶段,难以对机器人的喷涂可达性及喷涂能力进行有效验证。由于缺乏自主验证手段,无法满足车型项目提前分析的要求,导致在后续生产中可能出现各种问题,影响生产进度与产品质量。例如,机器人在实际喷涂过程中可能因可达性不足而无法完成某些部位的喷涂,或者喷涂能力不达标导致涂层质量不佳。

1.2 机器人自主开发经济性

从经济层面来看,机器人自主开发的成本不容小觑。依据需要调试的机器人数量、油漆颜色调试数量以及项目周期要求的不同,单款车型的整个调试费用高达几十万元。高额的调试费用增加了汽车制造企业的生产成本,压缩了利润空间。若企业能够实现机器人自主开发,减少对第三方厂家的依赖,将有效降低调试成本,提高企业的经济效益。

1.3 机器人自主开发时效性

在新车型项目初期阶段,对相关工艺设计进行模拟验证及仿真至关重要。例如车身四门两盖工装设计、充电口盖工装设计等,这些设计在车型开发前期就需要充分考虑。常规做法是在仿形中进行验证,若工装设计不合理,后期工艺调试过程中会出现诸多弊端,如掉脏、肥边、少漆等质量缺陷。通过提前进行自主仿真验证,可以及时发现并解决这些问题,有效降低后期工艺调试的难度与时间,提高新车型的开发效率。

攻克机器人仿真技术的难点,实现机器人自主开发,在成本和产品开发周期上为新车型的推出创造价值。在当前竞争激烈、不断内卷的汽车制造销售市场,这不仅能够提升企业的核心竞争力,还能满足市场对新产品快速推出的需求,具有十分积极的现实意义。

2 机器人仿真开发步骤

机器人仿真开发是确保喷涂机器人高效、精准作业的关键环节,其开发过程包含5个关键步骤。

1)虚拟空间建模:在专业的机器人软件 Robot Studio 中,导入新开发车型的三维模型,以此为基础创建虚拟的喷涂系统。技术人员需精心编制车身的仿真轨迹程序,模拟机器人在实际喷涂中的运动路径。完成程序编制后,进行离线仿真轨迹动态验证,通过虚拟环境观察机器人运动是否流畅、轨迹是否准确,提前发现并解决潜在问题;

2)五点法定位:运用五点法对工件在空间中的位

置进行精准定位,获取其坐标数据。将运算得到的工件坐标空间位置数据准确导入现场机器人系统,为机器人的实际操作提供精确的位置参考,确保机器人能够准确到达指定喷涂位置;

3)车型索引参数设置:借助 Brush Editor 软件,对喷涂程序的逻辑进行细致设定。根据不同车型的特点和喷涂要求,调整程序中的各项参数,如喷涂速度、喷枪角度等,使喷涂程序能够更好地适应不同车型的喷涂需求;

4)现场轨迹示教:利用示教工具,技术人员在实车环境中对仿真轨迹进行现场调试。通过实际操作,验证机器人轨迹与仿真轨迹的一致性,及时发现并纠正因现场环境差异导致的轨迹偏差,确保机器人在实际喷涂中能够按照预定轨迹准确运行;

5)喷涂数据标准化:采用 ShopFloorEditor 软件对喷涂参数进行优化调整,并将调整后的参数固化。经过实车验证,确保喷涂参数达到最佳状态,实现喷涂质量的稳定和高效。通过这5个关键步骤,结合问题剖析锁定的两大关键因素和实施的12个步骤(见表2),可有效提升机器人仿真开发的质量和效率。

3 仿真结果分析

采用一系列软件将数模数据转换成现场机器人能够识别的程序,主要处理方法为:查看《RAPID 指令、函数和数据类型参考手册》《RobotStudio 操作员使用手册》;依据现场安装布局图纸使用 AutoCAD 设计布局图纸;SolidWorks 数模轻量化处理;ShopFloorEditor 进行参数和轨迹调整;RobotStudio 进行建站和仿真系统建立。

通过对1:1仿真工作站建立过程的摸索、仿真系统建立过程中参数的配置研究,以及运行程序的编写和调用探讨,最终攻克机器人自主仿真技术,实现机器人喷涂轨迹仿真即可用,车型导入周期缩短且可控,后期工艺参数优化自主。建立的仿真工作站实现混线生产时的节拍验证,机器人运动关节的限位验证,运行时的碰撞检测验证,喷涂轨迹及扇幅的均匀性验证,机器人动作的平稳性验证等功能。

以 B1B2 工艺现场 B1 站为例,对机器人定位,机器人位置详见图1。

机器人选型在 RobotStudio 软件中建立工作站 ABB 模型库中选择与现场机器人型号相同的数模。机器人模型选择加载到 RobotStudio 软件空间后,右键设定位置,XYZ+四元素角度;机器人在空间设定的位置。另一种设置方式,按照 80°角安装方式进行设定,即 RobotStudio 软件中建立工作站。如果调整机器人位置,可以做 180°平面调整。

表 2 关键因素和实施步骤

关键因素项	步骤	目标分解项	具体措施
虚拟喷涂机器人工作站建立	1	输送链跟踪技术建模	参考手册,建立输送跟踪,设置启动窗口和跟踪工作区域
	2	仿真平台基础数模处理	建立机器人与喷房,机器人与机器人,机器人与车身的碰撞干涉区域
	3	车型数模轻量化处理	借助 Catia 软件进行数模轻量化处理
	4	雾化器数模工具坐标建立	查阅雾化器说明手册,在软件中创建带工件坐标系的雾化器数模
	5	机器人安装位置参数确立	查阅设计手册,设定机器人安装位置
	6	各数模空间位置坐标确立	查阅设计图纸,确定数模自身坐标点和换算坐标点
仿真工作站系统及二次开发接口程序编写	7	建立虚拟基础仿真系统	根据现场机器人软硬件实际配置,创建一致的仿真系统,使机器人本体与软件配置保持一致
	8	建立工件坐标和工具坐标	修改默认工件坐标和工具坐标,同步到仿真工作站
	9	建立输送链运行仿真环境	测量现场实际链速,配置每台机器人的起喷点和跟踪区域,对齐任务框架
	10	开发标准主程序逻辑	在 Rapid 程序中建立 T_ROB1 例行主程序,设置程序 Main 进入点
	11	建立标准的模块化喷涂子程序	根据车型特点和节拍要求,综合考虑重叠率和机器人关节转换,合理划分喷涂区域
	12	程序在线同步验证	参考 ShopFloorEditor 和 FFFTP 手册,对参数和轨迹进行导入与导出修改

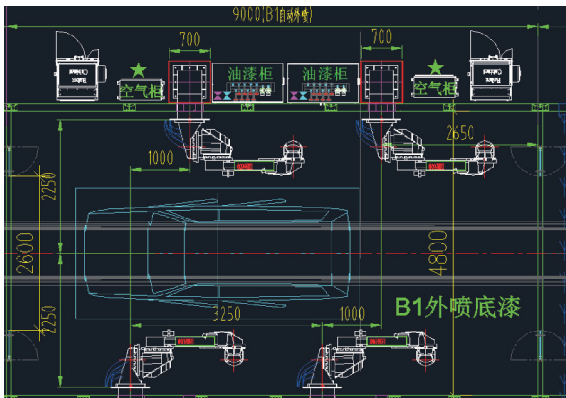


图 1 机器人位置(主视图)

数模与现场定位确认:通常采用五点法进行确认,即在工作站中的车身数模表面上选 5 个特征点,ABB 喷涂机器人在仿真过程中,解决车身实际位置与车身数模位置高度一致时,采用五点法进行定位。机器人采用伺服控制,具有独立的算法,在车身数模取 5 个特征点(见图 2),录入到 WobjCalculate 程序中。

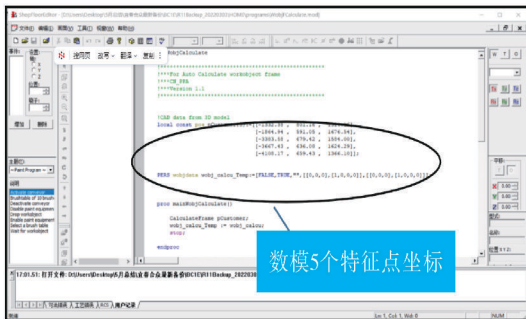


图 2 数模在空间的 5 个特征点

示教实车对应数模的 5 个点,采用 WobjCalculate 程序运算得出实际车身与数模车身的坐标差,即实际工件与数模矢量值。矢量值即工件坐标值,将工件坐标值录入工件坐标定义中,再次验证点位的准确性。

WobjCalculate 程序 5 点示教完成后,机器人通过伺服系统自动运算工件矢量值,直接完成设置即可(见图 3)。

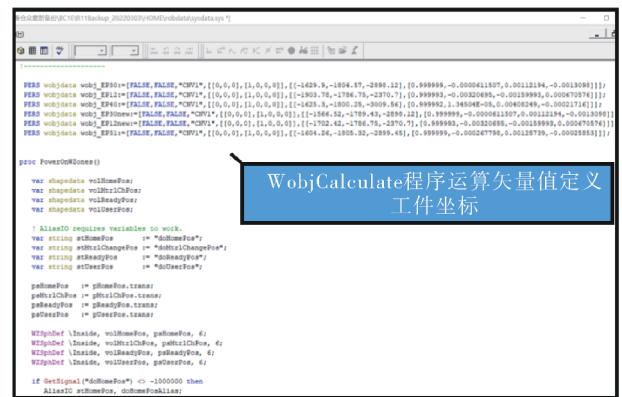


图 3 数模与实际车身偏差矢量值

示教第 5 点时,验证 X、Y、Z 坐标值。示教器框架:工件坐标系;工具:选 RB100iSSD_40;点位和数模设定值小于 5 mm,证明 5 点示教完成。数模与实际车身坐标一致,即可实现虚拟空间的轨迹与实际车身一致,从而实现机器人轨迹可以互传,实现仿真。

4 喷涂数据标准化

喷涂数据标准化是确保机器人喷涂质量稳定、高效的关键环节,它贯穿于机器人喷涂的整个过程,为实

际生产提供精准、可靠的数据支持。

4.1 喷涂参数定义

当机器人喷涂仿真轨迹制作完成后,需将轨迹加载至刷子表。此时,运用 ShopFloorEditor 软件对喷涂的四大核心参数进行精准定义,分别是高压静电值、喷涂流量、整型空气值以及雾化旋杯转速值。高压静电值影响着涂料颗粒的带电情况,进而决定其在车身表面的吸附效果;喷涂流量直接关系到单位时间内涂料喷出的量,对膜厚有着关键影响;整型空气值能够调整喷涂图形的形状和大小,保证喷涂的均匀性;雾化旋杯转速值则影响着涂料的雾化程度,使涂料以更细腻的状态喷涂在车身上。通过精确设定这些参数,为后续的喷涂程序编制奠定基础。

4.2 程序模块编写需紧密结合现场实际车身位置

首先,要尽可能建立与现场位置尺寸完全一致的仿真工作站,并准确确定被喷涂工件在坐标系中的位置。这样做的好处在于,当把离线完成的仿真程序导入现场运行时,能够最大程度保证实际轨迹与仿真轨迹高度相符,同时有效减少机器人出现奇异点、极限位置报警的概率。在实际生产中,有时会出现仿真中能顺利模拟运行的轨迹程序,在实际机器人运行时却偶发报警的情况,这主要与工作站建立的准确性以及工件坐标测量的准确性密切相关。

其次,编写程序时要充分考虑现场机器人的清洗换色时间,最好比现场实际时间稍长 1 s 左右,这可通过程序的等待指令来实现。这样做的目的是充分验证生产节拍是否满足要求。特别要注意的是,在连续仿真运行时,要密切观察每次机器人的喷涂循环时间是否存在较大差异。如果出现较大差异,大概率是起喷位置时的输送跟踪距离发生了变化。

此外,在编写程序过程中,要确保程序与实际运行程序保持一致。程序中的常见喷涂指令、喷涂速度、工具型号、程序模块化命名以及刷子表编号等都要进行规范化处理,这有利于在程序调试时提高导入效率,为后续的工艺调试提供极大便利。

4.3 喷涂效果验证

喷涂程序编制完成后,需要对实际喷涂效果进行严格验证。良好的仿形和合适的重叠率对车身膜厚均匀性起着重要作用。在 B1B2 工艺中,B1 层膜厚需控制在 $(13 \pm 2) \mu\text{m}$ 的范围内,B2 层则参照油漆厂家的 TDS 文件进行调试。对于油漆色差的调试,要明确色差标准值(通过色差仪测量 0# 板)以及色差控制范围。因为电泳、B1、B2、CC 层都可能带来油漆车身的外观缺陷,所以必须严格控制各个环节的参数,确保最终喷涂效果符合质量要求。

5 结语

在汽车制造中,机器人仿形调试作为涂装工艺关键环节,经过系统梳理、实践与完善,意义重大。从问题处理看,车型开发初期,其能提前规避设计问题,减少后期生产隐患。

实际调试时,可快速定位解决难题。如提升机器人动作平稳性,能减轻关节冲击、降低设备损耗,减少抖动颗粒问题,提高喷涂质量。构建与实际一致的工作站模型和轨迹,可大幅缩短轨迹对点调试时间,避免多次带车停线调试导致的动能损耗与调试人员高强度劳动。离线仿真工作站还能为新车型规划提供前期验证,辅助公司决策。

实施过程中,掌握工具软件操作、借鉴手册资料,可提升建立仿真工作站的效率与实用性。重要参数设置要与现场一致,像机器人关节限位等,且在仿真中充分验证,防止设备与室体、车身碰撞。汽车涂装车间工艺调试主要针对色差与外观,需收集整理数据并对比分析,为后续优化提供方向。工艺参数包括喷涂流量等,调试前要标定测量,研究喷涂扇幅与参数的关系。实车喷涂时,观察漆膜干湿程度,及时调整参数。

汽车涂装机器人自主仿真技术与应用是离线仿真软件与实车工艺调试结合的系统工程。离线仿真为工艺调试提供支持,提高效率;工艺调试问题又促进离线仿形轨迹优化,二者相辅相成,共同保障油漆车身外观质量,提升企业竞争力。

参考文献:

- [1] 陈佳成.喷涂机器人仿形调试与质量提升[J].机电技术,2024(4):99-103.
- [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] 黄波,吕超,李健.汽车涂装机器人全新车型仿形调试及常见问题研究[J].现代涂料与涂装,2020(7):35-37.
- [4] 冯锐,邱春雷.汽车涂装作业机器人关键技术分析[J].内燃机与配件,2022(19):50-52.
- [5] 秦奥帆.浅谈喷涂机器人自主仿形调试难点及解决方案[J].汽车实用技术,2021(24):114-117.
- [6] 丁帅,冯双霞,贾帅锋,等.浅谈水性漆喷涂机器人仿形调试问题的解决方法[J].现代涂料与涂装,2022(3):33-35.
- [7] 陈欣婷,吴拉,甘正贤.浅谈优化涂装机器人仿形提升外观质量[J].现代涂料与涂装,2020(6):64-67.
- [8] 高孔长.新车型涂装喷涂机器人仿形开发及漆膜调试[J].汽车实用技术,2023(20):140-144.