

中大型乘用车涂装机器人喷涂策略研究

宋伟卿, 余海彬

(广汽传祺汽车有限公司, 广州 511434)

摘要: 当前市场火热的中大型(大尺寸)乘用车, 涂装领域机器人喷涂尚存在相关课题: 喷涂受限和漆膜外观品质差。本文以 G 主机厂生产的 E 系列中大型商务车为例进行分析和多轮验证, 最终成功解决了喷涂课题, 达成出车管控要求, 实现从“喷涂受限”→“可以正常喷涂”→“外观提升达成品质要求”的逐步提升。验证结果表明: 针对中大型乘用车, 在不影响产量前提下可以采用优化喷涂参数、喷涂轨迹及调整叠枪率等措施进行喷涂改善, 以满足喷涂节拍要求和品质要求。

关键词: 中大型乘用车; 机器人喷涂; 喷涂受限; 节拍; 喷涂参数; 喷涂轨迹

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)10-0034-05

Research on Spraying Strategy of Medium and Large Passenger Car Painting Robot

SONG Wei-qing, YU Hai-bin

(Guangzhou Automobile Group Motor Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract: At present, in the hot market of medium and large (large size) passenger cars, there are still related issues in the field of robot spraying: spraying limitation and poor appearance quality of paint film. This paper takes the E series of medium and large commercial vehicles produced by G OEM as an example to carry out analysis and multiple rounds of verification, and finally successfully solve the problem of spraying, meet the requirements of vehicle control, and realize the gradual improvement from "limited spraying" → "normal spraying" → "appearance improvement to meet the quality requirements". The verification results show that for medium and large passenger cars, measures such as optimizing spraying parameters, spraying trajectory and adjusting gun stacking rate can be adopted to improve the spraying without affecting the output, so as to meet the requirements of spraying time and quality.

Key words: medium and large passenger cars; robot spraying; spray limitation; beat; spraying parameter; spray path

0 引言

随着汽车市场的不断发展, 为了获得更舒适的出行体验, 人们对于汽车产品的要求也更加多元化。除了具备长续航、更高级别的自动驾驶、高颜值、低成本外, 还需要具备更大更宽敞的乘坐空间。特别是伴随二孩政策的全面放开, 大尺寸的 7 座车型成为众多家庭的出行首选, 随之而来的是中大型 SUV(越野车)和 MPV

(商务车)受到越来越多消费者的关注。中大型 SUV 内部空间宽敞, 乘坐舒适, 通常拥有大容量的后备厢空间; MPV 车型不仅具有时尚大方的外观和宽敞舒适的内部空间, 而且能够满足多人同时出行的需求。但两者车身尺寸通常较常规车型更大, 生产制造与常规车型存在差异, 给人工和机器人作业特别是对于机器人涂装喷涂的可实现性带来了挑战。

1 汽车涂装喷涂简介

1.1 机器人在车身涂装领域的应用和发展趋势

汽车涂装是在汽车表面进行连续涂膜处理的工艺, 为了提高汽车表面的耐腐蚀和抗老化能力, 同时赋

收稿日期: 2024-11-27

作者简介: 宋伟卿(1988—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事涂装领域机器人调试工作。E-mail: songwq@gacmotor.com。

予汽车良好的装饰性和美感。随着自动化程度的不断提升,汽车面漆的涂装基本采用机器人静电旋杯自动喷涂。机器人能替代人工在高污染的环境下进行作业,喷涂稳定性强,施工作业效率高,同时有效避免人员直接接触漆雾^[1]。通过离线编程可以实现复杂车身结构的喷涂,近些年来瑞士 ABB、日本发那科、安川等公司研制出的喷涂机器人在世界范围内得到广泛应用。

智能化、集成化、协同化是当前机器人喷涂在汽车涂装领域应用的重要趋势。机器人喷涂技术与数学建模、人工智能技术相结合,并考虑喷涂机器人特性,建立一套智能化喷涂系统,提高喷涂的自动化效率和柔韧性是发展的必然^[2]。未来的喷涂机器人将更加注重

精准化控制,其中包含涂层厚度的实时监测和调整,喷涂速度和角度等关键参数的精准调节。

1.2 机器人涂装喷涂的实现

机器人喷涂主要由机器人相关设备、涂料循环管路、待喷涂车身、喷涂材料、喷涂轨迹和参数、生产节拍等多个元素共同协调完成,是一项复杂的系统性工程,任何一项都能对喷涂后漆面外观效果产生重要影响。通过编程利用计算机辅助路径规划来进行复杂的喷涂作业,机器人喷涂稳定性和喷涂质量更高^[3],涂装车身的面漆机器人喷涂流程如图 1 所示,分为编制调试计划、离线仿形和在线示教三大部分。参数锁定后,可以根据具体需求进行参数调整以满足多样化的喷涂需求。

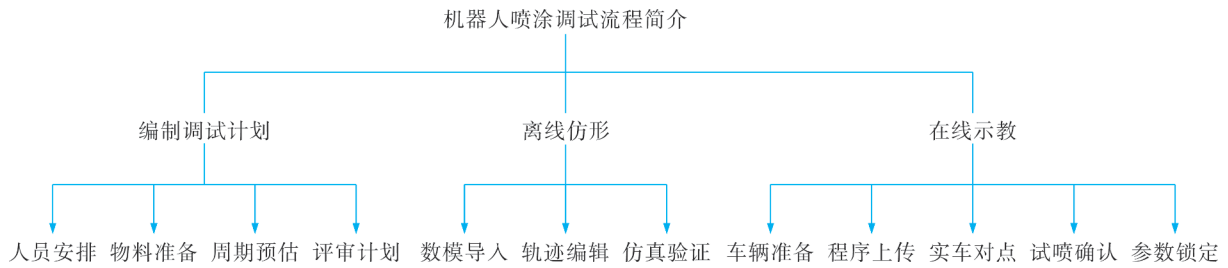


图 1 机器人喷涂调试流程

2 大尺寸车型涂装喷涂

针对中大型 SUV/MPV 等乘用车,其尺寸相比普通车型更大,喷涂不可达,存在喷涂受限的课题,对此各主机厂开展了大量的探索和尝试。通过调研和查询相关文献可知,目前行业内广泛采用的方法主要有手工补漆和降低生产节拍。手工补漆会造成生产端的人工成本上升,同时喷涂的精度和稳定性不如机器人喷涂,容易造成品质波动;同时降低生产节拍会造成产能的下降,需要结合主机厂的生产计划酌情考虑。综合来看,两者均存在一定的局限性,不作为最佳的改善方案。

基于以上现状,本文以国内某 G 主机厂 E 系列中大型商务车的涂装喷涂课题为例,通过一系列在线验证,希望寻求更优的解决方案,实现从“喷涂受限”→“可以正常喷涂”→“外观提升达成品质要求”的逐步优化。

2.1 喷涂课题描述 & 解析

E 系列中大型商务车在喷涂轨迹编程时,仿真软件提示报警如图 2 所示。通过分析发现,产生报警的根本原因是:喷涂车身尺寸太大,当前节拍下难以实现整车喷涂,部分位置喷涂受限。当前喷涂节拍设定为 65.5 s,在现有喷涂参数及轨迹情况下,仿真分析发现需要 71.5 s 节拍才能解除喷涂受限,实现 E 系列车型

的正常喷涂。从人、机、料、法、环等 5 个维度,寻找影响 E 系列商务车喷涂节拍的各项因素,具体如表 1 所列。

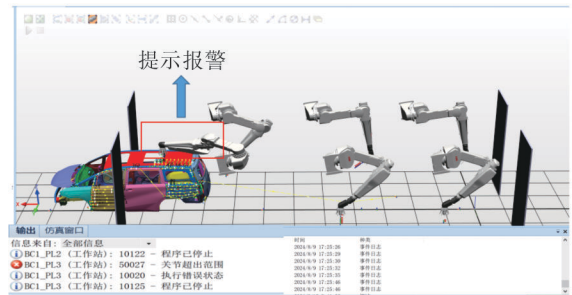


图 2 机器人提示报警示意

表 1 影响 E 系列商务车喷涂节拍的相关因素

类别	因素	影响程度	局限性
人	手工补漆	中	稳定性差,精度低
机	喷涂链速/节距	大	影响产能
	机器人品牌型号	小	
料	涂料	小	
法	喷涂参数轨迹	大	
	喷涂枪速	大	影响漆膜外观
	喷幅/枪距	大	
环 仿	喷房温湿度	小	

范围”报警,运用仿真软件继续开展分析,锁定该 E 车型完成整车连续喷涂的节拍需求为 71.5 s,后续从节拍出发展开讨论。从表 1 中影响程度大的因素着手,通过调整相关参数,实现节拍的优化,最终使 E 系列车型能够正常喷涂并满足外观品质要求。

2.2 喷涂课题对策及效果验证

通过上述分析,E 系列商务车喷涂节拍要求比当前生产节拍高,为了解除 E 车型喷涂受限的问题,可以从两个方面着手:1)调整当前生产节拍至 71.5 s,以满足 E 系列车型生产节拍要求。2)降低 E 系列车型喷涂节拍需求至 65.5 s,在当前生产节拍的前提下完成 E 车型喷涂。

2.2.1 对策一

延长当前 65.5 s 的喷涂节拍至 71.5 s,以满足 E 系列车型喷涂节拍要求。

根据表 1 节拍的影响因素和计算公式:节拍=节距/链速,可采取降低当前量产车型生产链速或增加喷涂节距,延长节拍至 71.5 s,以满足 E 系列车型喷涂需求。核算后发现,节拍降至 71.5 s 后,产能损失为 4 台/h,如表 2 所列。

表 2 满足 E 车型生产节拍前提下的产能损失核算

项目	节拍/s	链速/ ($m \cdot \min^{-1}$)	节距/m	JPH	产能损失/ ($台 \cdot h^{-1}$)
现状(当前量产车型)	65.5	6.3	6.9	54	4
需求(E 系列车型)	71.5	<6.3	>6.9	50	

对策一实施后预计将造成产能损失为 4 台/h,与公司既定的产量计划不符,需要重新检讨对策。

2.2.2 对策二

E 车型喷涂节拍需求从 71.5 s 降低至 65.5 s,以满足当前生产节拍。

从喷涂枪速、轨迹、喷幅等关键因素,并结合过往车型调试经验和实绩,对 E 系列车型喷涂所需的节拍进行调整优化。

1) 喷涂枪速及调整原则

枪速是指涂装机器人在运动过程中的行进速度,枪速越快则机器人在单位时间内行走距离越远,喷涂效率越高。但长期枪速过快会造成设备超负荷运行,同时加大机器人与车身碰撞风险,外观品质难以保障。综合上述因素,在允许的范围内,尽可能提高喷涂枪速,可以降低节拍需求。结合 E 车型造型及机器人喷涂路径规划,A 柱、B 柱、后侧围、车门水切周边等部位枪速不宜过快,容易出现机器人报警(机器人手臂检查点异常)、机器人撞喷房壁板等问题,调整枪速时需要重点

关注。

2) 提高枪速验证

本文重点针对 E 车型四门两盖、顶盖等部位进行枪速调整。经过仿真和现场验证,将现行枪速由 400 mm/s 提升至 550 mm/s,喷涂节拍需求将由现行 71.5 s 降低至 68.5 s,且未出现报警。但是与 65.5 s 的喷涂要求仍存在差距,需要继续寻找方案,确保 E 系列车型能在当前节拍完成喷涂,解除喷涂受限课题。

3) 优化喷涂轨迹

机器人的喷涂轨迹,可以理解为喷涂机器人喷枪的一条空间轨迹即喷枪经过一系列点的集合。轨迹优化的主要目标是提高喷涂效率、缩短喷涂时间以及提高漆膜的膜厚均一性。结合 E 系列车型当前课题,希望寻求更优的喷涂路径和逻辑,进一步降低喷涂节拍需求^[4]。

根据 E 系列车型的外观特征,同时结合机器人安装特性对各机器人的喷涂部位进行详细分工,合理优化机器人喷涂轨迹^[5]。

当前机器人喷涂轨迹规划如图 3 所示,单侧 3 个机器人分工如下。PL1:前翼子板→A 柱→后车门→C 柱→机器人 Home 位置。PL2:前车门→B 柱→D 柱→后翼子板→机器人 Home 位置。PL3:发动机盖→A 柱 1→全车顶→尾盖→机器人 Home 位置。

优化机器人喷涂轨迹后如图 4 所示,单侧 3 个机器人分工如下。PL1:前翼子板→A 柱→车顶 1→后翼子板→机器人 Home 位置。PL2:前车门→A 柱→B 柱→车顶 2→尾盖→机器人 Home 位置。PL3:发动机盖→后车门→C 柱→D 柱→机器人 Home 位置。

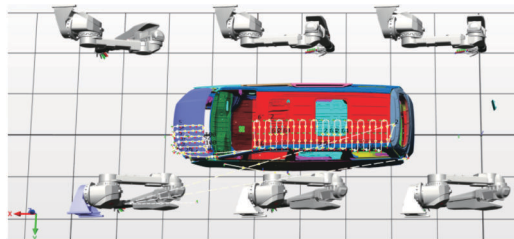


图 3 满足 E 系列车型需求节拍

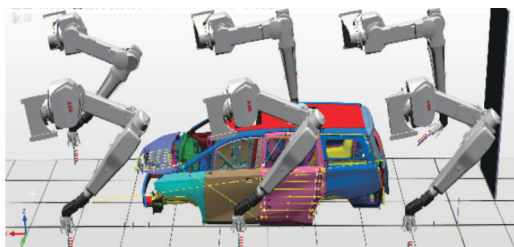


图 4 满足当前生产节拍

上述对策实施后,喷涂受限得到解决,喷涂节拍由 68.5 s 进一步降低至 65.5 s, 与现行喷涂节拍保持一致。但喷涂后膜厚均一性较差,绝大多数测量点位的膜

厚处于基准下限,如图 5 所示,最终造成漆膜外观品质不达标(特别是长波值超标),整体视觉效果差,如图 6 所示,无法达成出车要求,需要进一步寻求解决方案。

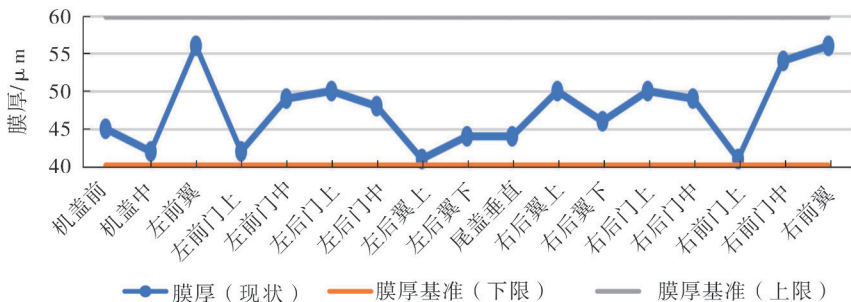


图 5 不同部位清漆涂层的膜厚

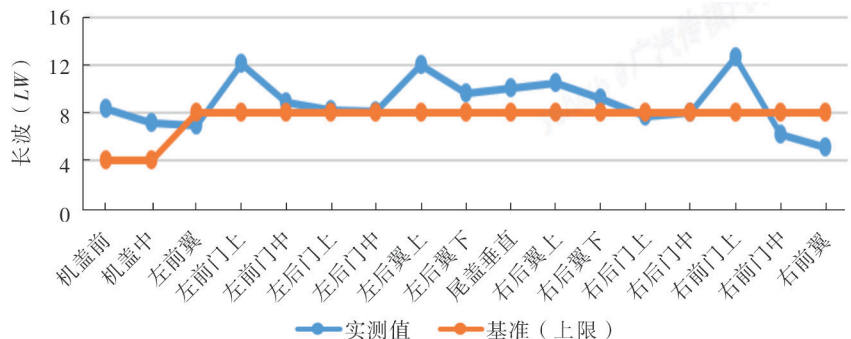


图 6 不同部位长波测量值

2.3 外观品质优化

膜厚对外观品质有直接影响,确保不出现明显流挂的前提下,清漆膜厚整体提升能很好地改善漆膜外观不达标的问题,因此当务之急为解决清漆膜厚整体偏下限和均一性差的问题,计划分两步开展调整优化:1)提升整体膜厚(解决整体膜厚偏下限);2)优化局部膜厚(改善膜厚均一性)。

2.3.1 提升整体膜厚

根据过往调试经验可知,机器人吐出量、枪距、枪速、喷涂电压等因素对清漆膜厚有直接影响,下面针对以上因素具体分析。

1) 机器人吐出量

吐出量又称作喷涂流量,指单位时间内通过计量单元输送给雾化装置的涂料量,是决定车身膜厚最关键的因素之一。色漆机器人吐出量主要用来调整漆膜的色相,与漆膜外观效果(长短波)关联性较低。为了改善漆膜外观,本文特指清漆机器人的吐出量。生产现场规定清漆机器人吐出量上限为 600 mL/min,当前实际设定 480 mL/min,结合吐出量上限要求和设备磨损情

况综合确认后,计划将清漆喷涂机器人吐出量提升为 550 mL/min。

2) 喷涂枪距

枪距是指车身待喷涂表面离机器人旋杯之间的距离,汽车涂装外板枪距范围一般设置为 200~300 mm。合理的枪距选择影响上漆率,从而影响漆膜厚度。枪距太小容易高压报警和增大撞枪风险,当前设定外板枪距为 250 mm,考虑适当减小到 220 mm 开展验证。

3) 枪速

为了满足喷涂节拍需求,已将现行枪速由 400 mm/s 提升至 550 mm/s,此处不再赘述。

4) 喷涂电压

在高压静电喷涂中,一般旋杯为负极,车身为正极。两个电极之间的电压大小直接影响上漆率和膜厚。当电压较低时,涂料粒子的上漆率相对较低;电压较高时,边角部位容易出现起泡和积漆流挂,在汽车喷涂中的电压一般在 40~80 kV 之间。为避免静电效应,通常折角区域的电压设置为 40~50 kV。当前大部分区域电压设置为 65~70 kV,局部设置为 50 kV(如机盖边缘

位置防止起泡)。为了提升膜厚,计划将原来的电压提升至 70~75 kV。

根据上述膜厚的关联因素,设计多组正交验证,优化后整体膜厚提升约 15%,大部分测量点位膜厚处于

管控偏上限。膜厚均一性有所提升,膜厚的极差值(最大膜厚与最小膜厚之间的差值)从 15 μm 缩小至 12 μm ,局部膜厚仍存在进一步改善空间。膜厚整体提升的具体方案和优化前后的效果确认如表 3 所列。

表 3 外观品质优化对策和效果验证

项目	吐出量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	枪距/cm	电压/kV	左侧平均膜厚/ μm	右侧平均膜厚/ μm	发盖平均膜厚/ μm	膜厚极差/ μm
适宜范围	≤ 600	20~30	40~80	40~60	40~60	40~60	≤ 20
改善前	480	25	65~70	47.1	48.8	43.5	15
改善后	550	22	70~75	53.5	55.2	52.8	12

2.3.2 优化局部膜厚

在喷涂过程中,涂料经旋杯雾化后到达车身表面时,在离心作用和静电作用下,涂料分子在各个方向上的运动速率不同,导致漆膜最终在车身表面的厚度不均匀,局部膜厚需要改善优化。局部膜厚偏离较大的位置,通常叠枪率出现异常(过大造成膜厚偏厚,过小造成膜厚偏薄)。

喷涂叠枪率指在喷涂过程中,相邻两次喷涂区域重叠的比例。这个比例的设置,对于获得良好的喷涂质量至关重要,特别是车身表面漆膜的均一性。为了最大程度实现良好的膜厚均一性,需要合理调整喷涂叠枪率。影响叠枪率的关键因素主要有折距和喷幅。

1) 折距

机器人喷涂折距通常又称喷涂轨迹间距,指两条相邻轨迹间的距离,是机器人喷涂路径中的重要参数。喷涂轨迹间距的设定需要综合考虑多方面因素,比如喷涂材料、漆膜的厚度要求、喷涂设备的性能等。合适的折距可以保证涂层的均一性,避免出现厚薄不均的现象,同时有利于提升喷涂效率。

2) 喷幅

雾化器的成形空气一般也称为整形空气,它从旋杯后侧均匀分布的小孔中喷出,用来调整油漆喷幅的大小,并将漆雾推向被涂物,防止漆雾飞散和返流。通常成形空气量越大,漆雾形成的有效喷涂区域越窄(喷幅越小),反之喷幅越大。喷幅的大小直接造成叠枪率的差异,最终影响局部的膜厚。因此通过调整成形空气,可以有效控制局部区域的膜厚。

叠枪率、喷幅、折距三者之间的关系如图 7 所示。

由图 7 可知,叠枪率=(喷幅-折距)/喷幅。按照“膜厚偏下限的区域叠枪率提升,膜厚偏上限的区域叠枪率降低”的原则,将局部位置的叠枪率进行优化。最终清漆膜厚的极差由 12 μm 降至 8 μm ,膜厚均一性提升超 30%。

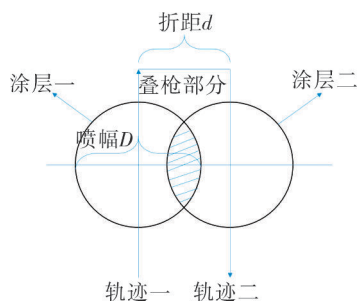


图 7 叠枪率、喷幅、折距关系示意

通过提升 E 车型清漆整体膜厚,漆膜外观效果得到显著改善;利用优化叠枪率,E 车型清漆膜厚均一性实现大幅提升,最终达成漆膜外观品质要求。

3 结语

中大型乘用车涂装喷涂尚存在喷涂受限制和外观不达标等诸多困扰。为了解决喷涂课题,顺利实现量产,当前各主机厂通常采用手工补漆和降低生产节拍等手段进行优化改善,但存在品质稳定性差和产能损失等局限。为了寻找更符合生产现场要求的对策,本文开展了一系列分析验证,最终发现在不影响品质和产能情况下,可以采用调整喷涂参数、轨迹、叠枪率等组合措施进行改善,以满足喷涂节拍要求和品质要求。

参考文献:

- [1] 陶洋,姜磊,晏飞.安川喷涂机器人仿形制作及其参数设定[J].电镀与涂饰,2021(10):737-742.
- [2] 范波.机器人喷涂技术在汽车涂装中的应用研究[J].汽车工艺材料,2023(2):80-82.
- [3] 李欣,邹波,易炜.涂装机器人仿形规划与车身外观工艺调试[J].汽车材料与涂装,2019(5):158-160.
- [4] 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):53-59.
- [5] 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):141-143.