

# 汽车漆面缺陷自动打磨抛光工艺研究

史 吏<sup>1</sup>, 王 欢<sup>1</sup>, 王羿皓<sup>2</sup>, 王岳森<sup>1</sup>, 刘 远<sup>2</sup>, 胡建勇<sup>2</sup>, 魏 星<sup>1</sup>, 张 为<sup>1</sup>

(1.一汽-大众汽车有限公司, 长春 130011; 2.禹奕智能科技(杭州)有限公司, 杭州 310056)

**摘要:** 提出了一种汽车漆面缺陷自动打磨抛光的工艺研究及测试方法, 介绍了一种应用到汽车涂装装饰线上的基于工业机器人的打磨抛光自动化系统, 通过机器人程序控制前端打磨装备的工艺参数来实现自动磨抛对于漆面缺陷的修复。工艺试验分为前期板材试验和实际产线上连续测试两个步骤, 通过控制打磨抛光的正压力、砂纸/抛光垫转速和行进速度等工艺参数, 测试漆面材料粗糙度和膜厚等指标来评估工艺质量。研究结果表明此方法可以实现汽车漆面缺陷机器人自动磨抛的工艺参数配方的制定。

**关键词:** 机器人自动化; 打磨抛光; 工艺参数

**中图分类号:** TQ639      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-9548(2025)03-0034-04

## Research and Application of Automatic Car Paint Sanding and Polishing Process

SHI Li<sup>1</sup>, WANG Huan<sup>1</sup>, WANG Yi-hao<sup>2</sup>, WANG Yue-miao<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>2</sup>, HU Jian-yong<sup>2</sup>, WEI Xing<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>

(1.FAW-Volkswagen Automobile Co., Ltd., Changchun 130011, China;

2.Yuyi Intelligence Technology (Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 310056, China)

**Abstract:** A method is proposed to research and test the process parameters for automatic car paint sanding and polishing process. A robot system for automatic sanding and polishing system is introduced to the finishing line of car paint workshop, in which the process control is realized through the control of sanding/polishing tool system by robot programs. The test procedure is divided into two phases: material test in lab and continuous test on production line. The parameters including pressure force on surface, rotation speed of the tool and feedrate of the robot are controlled in the tests and the quality results are evaluated by the finished surface roughness and paint layer thickness. The test results demonstrate that this method can realize the construction of process database for car paint defect automatic repair process.

**Key words:** robotic automation; sanding and polishing; process parameters

## 0 引言

未来汽车产业转型升级将是汽车产品和汽车制造两个体系协同实现智能化的过程, 新一代汽车产品对汽车制造的柔性、效率、质量提出更高的要求, 数字化、自动化制造是必然趋势。而汽车制造四大工艺中, 涂装工艺已实现全自动化喷涂, 而线尾的车身漆面质量检测与缺陷修复依然主要依赖人工作业, 不仅阻碍涂装工艺实现无人化、数字化智能生产, 而且人工作业效率

低, 易受劳动强度、责任心、不良情绪等主观因素影响, 工人长期重复性疲劳工作状态下极易造成漏检、修复质量波动等问题, 已成为全球汽车制造业面临的重大技术难题。

自 2020 年起, 受劳动力成本不断上涨的影响, 国外汽车生产厂商率先关注油漆表面缺陷自动检测与修复问题, 并纷纷与视觉检测和自动磨抛设备厂商合作<sup>[1]</sup>, 例如: 3M 公司联合视觉检测设备厂商 Micro-Epsilon 公司在德国雷根斯堡宝马工厂、西班牙公司 Procon 联合视觉检测设备厂商 EINES 实现了漆面缺陷自动检测和磨抛修复的投产, 另外, 西班牙视觉检测设备厂商 Autis 联合磨抛设备供应商菲洛博迪在西班牙福

收稿日期: 2024-01-22

作者简介: 史吏(1988—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事汽车涂装生产管理工作。E-mail: 247740572@qq.com。

特工厂搭建了场内测试工位,进行视觉检测和打磨抛光测试。

在国内,2023年一汽大众集团与易思维科技有限公司和禹奕智能科技(杭州)有限公司联合研发的汽车漆面缺陷自动识别与磨抛修复系统,完成了国内首台套落地,率先在一汽大众长春工厂的奥迪 A6 涂装生产线上投入使用。本文基于此系统,探究车身漆面缺陷打磨抛光的工艺参数对于修复质量的影响机制,提出了将车身漆面缺陷修复过程由人工向自动化进行工艺转变的试验方法,根据产线上实际工艺质量的结果数据评估了自动磨抛工艺参数的设计与优化策略,为涂装智能化修复过程提供了理论和试验依据。

### 1 系统组成及自动工艺流程介绍

汽车缺陷自动检测及修复系统由两个机器人工位组成,如图 1 所示。车身首先经过自动检测工位,机器人视觉检测系统对车身表面进行扫描,获取缺陷所在位置、类型、尺寸及三维形貌。完成检测后,车身由自动化运输系统传送到下游的自动打磨抛光工位。

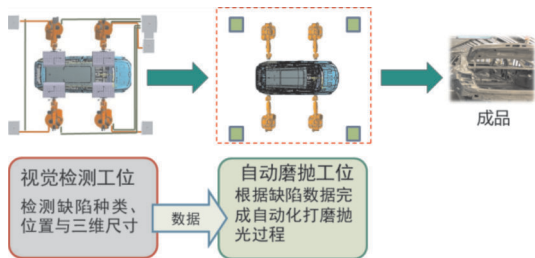


图 1 漆面缺陷视觉检测及自动打磨抛光系统

机器人自动磨抛工作站,一般设计要求需要包含打磨抛光等工序步骤功能及相关自动化更换物料的功能<sup>[2]</sup>。此解决方案的自动打磨抛光系统包括 4 台六轴机器人及其前端的自动打磨抛光工具系统、工控机及规划控制软件、耗材自动更换系统、气液供给系统、工位 PLC 及自动化系统、车身机械传送系统,如图 2 所示。工控机上的软件系统通过网络数据传输从视觉检测的上位机数据库中获得当前车身上的缺陷信息,通过基于人工智能的轨迹自动生成算法产生无碰撞的机器人打磨抛光运动轨迹,配以工艺参数生成机器人程序,发送给 4 台机器人,机器人在磨抛运动过程中发送指令给前端工具,驱动电机旋转带动砂纸和抛光垫,执行满足工艺质量要求的打磨抛光动作,完成漆面缺陷的自动修复过程<sup>[3-4]</sup>。

图 3 是机器人前端安装的打磨工具的示意。力输出控制由禹奕公司研发的 FCD 柔性恒力控制装置完成,FCD 由定端和动端组成,定端安装在机器人六轴法兰上,依靠伺服气缸驱动连杆,对动端施加压力或者

拉力实现精准打磨力控制<sup>[5]</sup>;电主轴或伺服电机通过连接结构安装在动端上,能够精准控制旋转速度,而砂纸通过托盘安装在电主轴或电机转轴上,以旋转或偏心旋转方式对汽车漆面进行打磨。

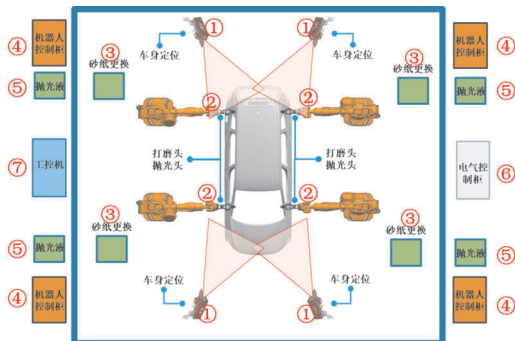


图 2 机器人自动磨抛工位系统

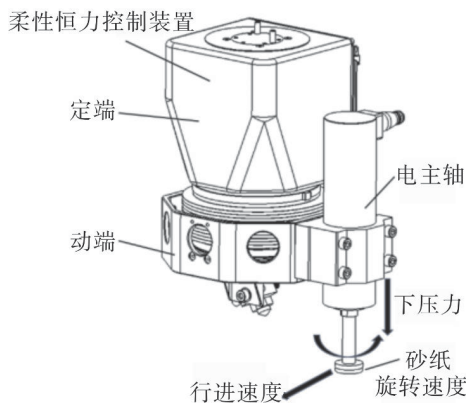


图 3 打磨工具系统示意

在自动打磨抛光过程中,可以控制的工具参数包括:机器人驱动打磨抛光工具在车身表面的行进速度、由工具系统中的恒力输出控制系统施加到车身表面的正压力、电机驱动砂纸和抛光垫在漆面的旋转速度等。这些物理量以及磨抛工具在漆面上的打磨抛光轨迹,构成了磨抛工艺参数。而如何针对不同类型、不同尺寸和不同部位的缺陷,实施合适的工艺参数,是保证打磨抛光质量的关键。

### 2 工艺方法研究

#### 2.1 磨抛工艺质量要求

所需处理范围内的缺陷达到 90%的合格率。合格的标准是缺陷去除干净、橘皮与周围正常漆面保持一致、无打磨痕、砂纸道、打磨印,无抛光痕、抛光影。表面粗糙度  $R_a$  与周边相差不超过  $0.005 \mu\text{m}$ 。

#### 2.2 试验材料与设备

磨抛耗材:打磨砂纸采用背粘式,目数为 3 000 目,直径为 32 mm;湿打磨介质采用 95%异丙醇;抛光膏采用大众抛光膏;抛光垫采用 90 mm 大众抛光垫。

测量仪器:粗糙度仪以及厚度测量仪。

### 2.3 试验方法

生产前测试阶段,将进行过喷漆处理的样板固定在固定台上,通过改变磨抛压力、电主轴转速以及磨抛循环次数等工艺参数,探究不同的工艺参数对漆面膜厚去除量以及表面粗糙度的影响,最终找出能够满足磨抛质量要求的工艺参数窗口<sup>[5-6]</sup>。

修饰线测试阶段,将磨抛机器人投入生产,观察并记录在一定时间范围内,车身各个部位的磨抛质量合格率,以此为标准检验现有工艺参数调节范围的合理性,并为工艺优化提供方向,最终找出最优的工艺参数。

### 2.4 磨抛工艺步骤

磨抛机器人在对车身上的缺陷进行磨抛时按照以下顺序:1)机器人带动磨抛装置中的打磨机头接近缺陷,打磨机头上喷液阀会先对缺陷位置喷异丙醇,对打磨过程起到冷却作用,接下来打磨电主轴转动带动砂纸对缺陷进行打磨;2)打磨结束后,喷液阀会对打磨后

的区域喷异丙醇,起清洁作用,接下来用打磨机头上的擦拭装置对打磨后的区域进行擦拭;3)打磨擦拭结束后,机器人会带动磨抛装置转换姿态以抛光机头接近缺陷,抛光机头上喷液阀会先对打磨后区域喷抛光液,接下来抛光电主轴转动带动抛光垫对打磨后区域进行抛光;4)抛光结束后,喷液阀会对抛光后的区域喷异丙醇,起清洁作用,接下来用抛光机头上的擦拭装置对抛光后的区域进行擦拭。至此一次磨抛动作全部完成,机器人带动磨抛装置回到原始位置。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 人工磨抛处理结果

机器人自动磨抛系统是在轨迹上模仿人工磨抛的手法,质量上不低于人工处理的结果,继而不断优化的工业技术,因此需要先对人工磨抛后漆面效果进行试验测量。在平板样件以及车门样件上分别取了3个点进行人工打磨抛光,对磨抛后的区域进行漆面厚度去除量以及表面粗糙度的测量,结果如表1所列。

表1 不同试件手工磨抛结果

试件	平均膜厚/ $\mu\text{m}$		平均膜厚去除量/ $\mu\text{m}$	平均表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$		平均表面粗糙度变化/ $Ra/\mu\text{m}$
	打磨前	打磨后		初始	抛光后	
车门试件	276	256	20	0.012	0.013	0.001
平板试件	286	269	17	0.012	0.012	0

### 3.2 循环次数工艺试验

在打磨砂纸为3000目、打磨力10N、打磨时间10s、打磨转速3000r/min、行进速度为500mm/min、

抛光时间为20s、抛光转速为5000r/min的条件下,探究打磨循环次数对漆面膜厚和表面粗糙度的影响,以确定打磨循环的工艺范围,结果如图4所示。

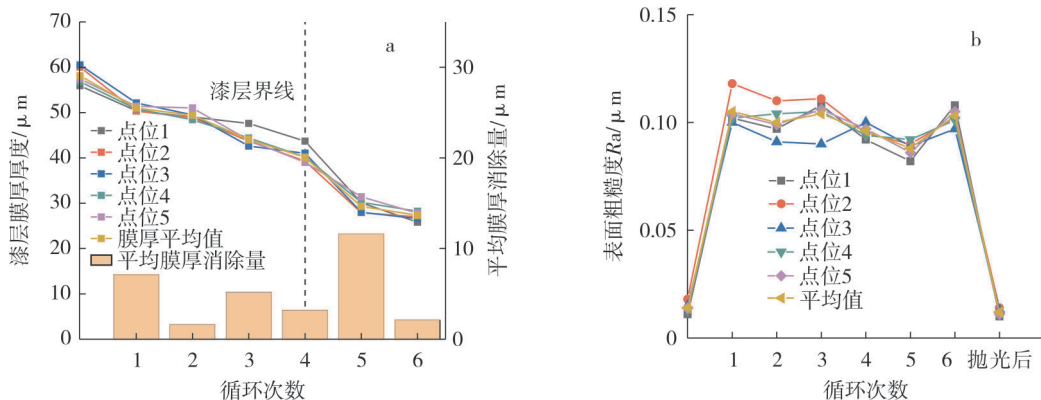


图4 不同循环次数对磨抛效果的影响

根据图4a可知,在其他条件一定时,漆层膜厚厚度会随着打磨循环次数的增大而减小。当打磨的循环次数为4时,清漆层基本已经被完全去除,继续打磨会出现磨穿的情况,因此,机器人磨抛系统在实际打磨时,工艺参数循环次数的设定值应 $\leq 3$ 次。并且,在对每一层漆层进行打磨时,第一次循环打磨的膜厚消除

量最大,而随着循环次数的增加,膜厚消除量减小。根据图4b可知,在其他条件一定时,打磨后漆面的表面粗糙程度会随着打磨循环次数的增大先增大后减小,但 $Ra$ 始终会大于 $0.09\mu\text{m}$ 。并且,在其他条件不变的情况下,只改变打磨的循环次数,并不会影响抛光后漆面的表面粗糙度。

### 3.3 打磨力工艺试验

在打磨砂纸为 3 000 目、打磨时间 10 s、打磨转速 3 000 r/min、行进速度为 500 mm/min、循环次数为 1 次等保持不变的条件下,探究打磨力对漆面膜厚的影响程度,以确定打磨力的工艺范围,结果如图 5 所示。

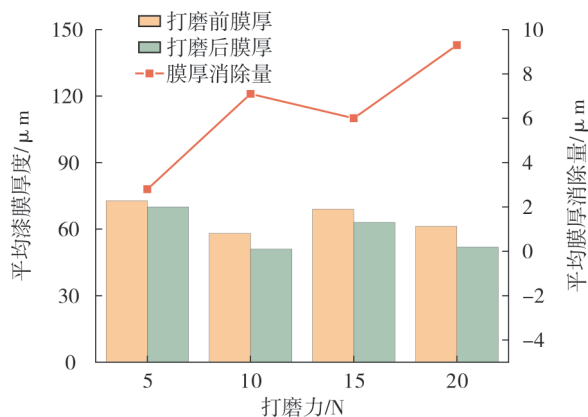


图 5 不同打磨力对漆面膜厚的影响

根据图 5 可知,在其他条件一定时,随着打磨力的增大,平均膜厚消除量先增大后减小,再增大,当打磨力为 5 N 时,平均膜厚消除量最小,为 2.8 μm;而当打磨力为 20 N 时,平均膜厚消除量最大,为 9.3 μm。为了保证在打磨循环次数 ≤ 3 次时,不会存在磨穿清漆层的可能,因此工艺参数打磨力的设定值应 ≤ 15 N。

### 3.4 打磨转速工艺试验

在打磨砂纸为 3 000 目、打磨力为 10 N、打磨时间 10 s、行进速度为 500 mm/min、循环次数为 1 次等保持不变的条件下,探究打磨转速对漆面膜厚的影响程度,以确定打磨转速的工艺范围,结果如图 6 所示。

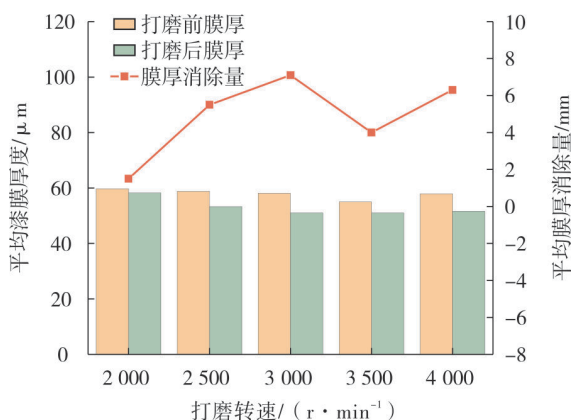


图 6 不同打磨转速对漆面膜厚的影响

根据图 6 可知,在其他条件一定时,随着打磨转速的增大,平均膜厚消除量先增大后减小,再增大,当打磨转速为 3 000 r/min 时,平均膜厚消除量最大,为 7.1 μm;而当打磨转速为 2 000 r/min 时,平均膜厚消除量

最小,为 1.5 μm。为了保证机器人自动打磨系统在打磨时能有一定的膜厚消除量,减少磨不净情况的出现,因此工艺参数打磨转速的设定值应 ≥ 2 500 r/min。

### 3.5 实际生产测试

生产测试将机器人自动磨抛系统结合试验所得工艺参数应用于一汽大众漆面修饰线上,将需要磨抛的车身分成多个部位,再对每个部位细分多个分区,车身通过视觉检测并将缺陷信息传递给机器人后,机器人将根据缺陷信息自动调用缺陷所在数据库内分类中设定的工艺参数对缺陷进行磨抛,最后由人工对磨抛后的结果进行判定并记录。

机器人自动打磨抛光系统能够对车身的前盖、翼子板、前门、后门、侧围以及后盖上的缺陷进行磨抛;能够处理的缺陷类别主要为脏点、纤维和缩孔,尺寸范围最大为 2.2 mm。通过长时间的跟踪测试记录与工艺参数调整,可达到工艺质量要求。

## 4 结语

机器人自动磨抛系统,通过前期工艺测试、实际产线连续测试和工艺参数不断优化,可以满足一定车身范围内、一定尺寸范围内和特定类型缺陷的自动修复过程,证明了通过先验工艺数据、实际生产中的缺陷和工艺质量结果的大数据迭代优化,完成对缺陷的磨抛质量结果预测,并基于此在自动修复过程中,通过软件工艺数据库自动为各缺陷配置合适的工艺参数,通过机器人轨迹规划和前端工具的精准工艺控制,完成缺陷的在线自动修复过程。

未来可以提升的工作包括:通过优化工具前端结构,扩大车身上的可处理范围;通过耗材与机器人动作轨迹的优化,提高处理节拍;通过进一步研究耗材磨抛机理与磨抛动作的有机结合,提高对于大缺陷的处理能力和质量合格率。

### 参考文献:

- [1] 万国扬,王国峰,李福东,等.基于视觉定位与轨迹规划的机器人打磨工作站[J].计算机集成制造系统,2021(1):118-127.
- [2] 练琛,易伟阁,黎昶,等.基于工业机器人的打磨工作站设计[J].数字技术与应用,2021(4):13-15.
- [3] 刘远,胡建勇,何宗亮,等.汽车漆面缺陷机器人自动磨抛修复工位:CN2021226892814[P].2021-11-5.
- [4] 李建轩.高铁白车身体机器人打磨工艺优化与离线编程研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [5] 郭万金,于苏扬,赵伍端,等.机器人主动柔顺恒力打磨控制方法[J].东北大学学报:自然科学版,2023(1):89-99.
- [6] 彭海萍,毛晓军,杨学军,等.某型机车电机转子去应力圆弧槽修磨工艺优化[J].环境技术,2021(4):138-141.