

轨道交通车辆多磨头协同打磨技术研究

钟志豪, 李健仪, 杨德要, 李显扬, 许雅雯
(中车广东轨道交通车辆有限公司, 广东 江门 529100)

摘要: 综述了各大品牌机器人的性能特点和现有技术, 为机器人的应用性研究提供参考价值, 从高铁车身自动化打磨现阶段研究核心关键出发, 介绍了影响自动化打磨的问题点和对应的研究现状, 在此基础上提出多磨头可移动工作系统, 解决了现阶段机器人灵活性差、单一磨头打磨效率低等问题, 最后基于库卡机器人搭载试验平台进行试验, 进一步验证了方案的可行性。结果表明: 该系统在高铁车身打磨过程中有效地提高了打磨效率和打磨设备的兼容性。最后基于现阶段已有技术对未来改进方向做出总结, 为后续研究人员提供参考价值。

关键词: 高铁; 多磨头; 自动化打磨; 打磨效率

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)04-0041-04

Research on Collaborative Grinding Technology of Multiple Grinding Heads for Rail Transit Vehicles

ZHONG Zhi-hao, LI Jian-yi, YANG De-yao, LI Xian-yang, XU Ya-wen
(CRRC Guangdong Co., Ltd., Jiangmen 529100, Guangdong, China)

Abstract: This paper introduces the problems affecting automatic grinding and the corresponding research status from the core key of the current research of high-speed rail body automatic grinding, and on this basis, a multi-grinding head movable working system is proposed, which solves the problems of poor flexibility of the robot at this stage and low grinding efficiency of a single grinding head, and finally conducts experiments based on the experimental platform of KUKA robot to further verify the feasibility of the scheme. The experimental results show that the system can effectively improve the grinding efficiency and the compatibility of grinding equipment in the process of high-speed rail body grinding. Finally, based on the existing technologies at this stage, this paper summarizes the future improvement directions and provides reference value for subsequent researchers.

Key words: high-speed rail; multi-grinding head; automatic grinding; grinding efficiency

0 引言

随着科技的进步、越来越多的涂装作业工序由机器人所取代^[1], 特别是在汽车制造行业, 整个涂装生产线已经全部实现自动化^[2-3]。其中打磨工序是涂装过程重要工步之一, 但在轨道交通行业, 受诸多因素影响(如车体部件过大、部分区域形状复杂等), 自动化程度

不高^[4]。此外, 随着城市轨道交通的快速发展, 人们对轨道交通车辆的外观和舒适度要求也越来越高。为了满足这一需求, 自动化打磨技术逐渐成为研究的热点。国内外学者对高铁焊缝、腻子、漆面等不同基材表面已经开展了大量研究^[5], 但对于全面推广自动化全车身打磨仍存在瓶颈, 以至于现在绝大多数生产车间中还是以人工打磨为主。而人工打磨存在较大弊端, 主要体现在效率低、品质不稳定、难以集尘导致环境污染、易产生尘肺病、从业人员稀缺、人工成本较高等; 其中从业人员稀缺是现有绝大多数企业单位所面临的问题, 对于这种对立形势下, 如何降低人工成本、保障现场员

收稿日期: 2025-01-23

作者简介: 钟志豪(1997—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事轨道交通车辆表面处理、涂装及粘接技术工艺工作。E-mail: 1079313722@qq.com。

工工作环境、减少用人数量、提高用工质量是涂装生产线面临的问题^[6],因此实现高铁自动化打磨全面推广的研究具有较高经济价值和现实意义^[7]。对于自动化打磨而言,现有的解决方案大多是采用工业机器人进行轨迹规划从而实现自动打磨,现全球对机器人的应用研究最具代表的是瑞士的 ABB、德国的库卡(KUKA)、发那科(FANUC)和日本的安川电机(YASKAWA),其机器人技术各有特点。对于一些复杂的工件,打磨工具与工件之间的接触力太小,会导致打磨不到位,接触力太大又会损伤工件,所以传统的机器人难以通过示教器编程或者离线编程的方式完成恒定力输出的工作需求。

本文详细论述了四大品牌机器人各自的特点以及存在的问题,并对恒力控制的研究现状进行分析,同时结合轨道交通车辆车身自动打磨系统所存在的问题,提出了可移动式多磨头机器人协同作业的方案,最后通过多个样件及地铁车身打磨试验进一步验证了该方案的可行性。

1 机器人技术研究现状

ABB 机器人公司是全球领先的机器人技术和自动化解决方案的提供商之一,在 ABB 机器人的技术核心中其核心领域是运动控制系统,该系统强调机器人运动过程的整体性,以六轴机器人而言,单轴运动的速度和精度并不是最佳的,但当六轴联动控制时精度很高,所以 ABB 机器人能够轻易实现运动速度、周期时间、可程序设计等机器人性能。此外,ABB 机器人还具有较强大的技术支持,其控制柜中还附带有软件,该软件具有 3D 模拟功能和在线调试功能,且控制柜与外部设备的连接具有各种通用接口,但相比其他机器人而言价格较高,且货期较长。

库卡机器人的负载能力较高,其适用于重型工业应用,如焊接、搬运和装配等,库卡机器人的重复定位精度较高,可有效保证生产的质量和稳定性,且其配备有多种安全功能可以确保人机协作的安全性。此外,库卡机器人还可以根据客户需求进行定制,具有较强的兼容性。但库卡机器人的操作界面较为复杂,需要对操作员进行专业培训才能进行操作。

安川机器人具有良好的运行速度,在重型工业领域应用较为广泛,其外形采用紧凑设计,适用于狭窄空间和有限空间的环境应用,如包装、检测等过程。安川机器人在行业的应用较为广泛,可以为客户提供更多的参考经验。但价格方面安川机器人也相对较高,可能会增加用户成本。

发那科机器人拥有先进的伺服技术和控制系统,同时具有较高的精度和稳定性。发那科机器人在机械

结构设计上也较为稳定,可以保持长时间的生产运行和高效的作业能力。发那科机器人的操作较为直观,可以快速上手操作,方便客户进行编程和维护。但发那科机器人负载能力较小,不适用于重型工业领域。

工业机器人普遍存在对非标准件定位困难、兼容性差等问题。往往一个环节就需要一套自动化设备,容易造成较大资源浪费;对此众多学者在视觉引导方向上开展了大量研究。燕硕等^[8]提出了基于神经网络的机器视觉抓取系统,通过 YOLOV5 神经网络模型开发视觉识别系统,同时获取物体定位点坐标,提出了机器人六点手眼标定原理,为机器人视觉引导提供参考价值。吴立华等^[9]提出了利用基于 HED 融合算法的全局图像边缘稳定识别,然后基于全局路径边缘进行引导,实现了对大跨度中厚板的边缘打磨。

2 机器人打磨存在问题分析

2.1 恒力控制打磨工艺参数

对于复杂工件输出力控制也是关键技术之一。对复杂曲面打磨,机器人难以通过示教编程或者离线编程方式确保打磨过程的打磨力恒定,对此在初期阶段,国内外学者普遍采用机械结构,通过调节机械参数来实现对力和位移的控制,但这种控制方式相对简单,且精度低。随着电子技术发展,传感器和执行器引入到控制系统中,通过各种优化算法有效提高了系统控制精度。

SRINIVASAN L 等^[10]提出一种基于阻抗控制的迭代学习控制器,实现了在机器人抛光工艺中的轮廓跟踪和输出力控制。黄婷等^[11]提出基于模糊控制的 PD 算法应用,在主动柔顺装置上有效地提高了控制系统的稳定性和精度。在打磨效率方面对于大面积的平面打磨时单一磨头效率较低,在打磨过程中也难以对机器人的打磨状态进行监控。而主动柔顺力位控制器的完善为轨道交通车辆车身的全自动化打磨提供了强有力的现实基础。对于轨道交通车辆车身的曲面结构,力位控制器可以有效确保打磨的均匀性,同时可有效提升打磨质量。

2.2 编程效率

自动打磨机器人采用的示教器编程简单,无需环境模型,随时可以修正机械手臂的位置误差,但编程效率较低,且程序验证要求较高,需依靠操作人员的编程经验,操作过程中容易发生故障,如撞机或者伤人。由于轨道交通车辆车体部件大,部分区域形状复杂等原因,示教器编程已难以满足编程要求。因此本文提出的自动打磨机器人配有 Robot Ideas 专业版机器人工业离线编程软件,只需在软件中进行虚拟场景建设,模型搭建完后对轨道车辆车体模型外表面进行轨迹设

计,能生成较复杂的轨迹路径。此外,该软件搭配了仿真模拟验证功能,编辑完成的程序通过仿真模拟验证,提前预知即将发生的干涉及奇异点等动作姿态问题,可及时修正,简化了调试和验证的工作,减少了现场占用机器人的时间,缩短了编程工作周期,有效地提高了编程效率。

2.3 多磨头打磨效率

对于大面积的平面打磨,单一磨头打磨路径较单一,打磨后会出现明显的磨盘边的打磨痕迹,需进行多次与原轨迹错位打磨来消除打磨痕迹,打磨效率较低,因此本文提出多磨头协同作业方式,在机械臂末端加装3个气动打磨装置和一个力位执行器,其设有刚性连接件,如图1所示。



图1 刚性连接多磨头结构

经试验验证,图1所示结构在面对平面打磨时大大提升了打磨效率,打磨质量也能够满足工业需求。铝合金样板腻子打磨前后状态如图2所示。

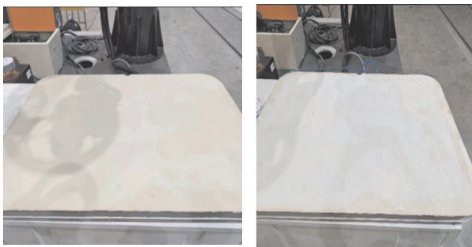


图2 铝合金样板腻子打磨前(左)后(右)状态

使用多磨头自动打磨机器人对铝合金样板腻子涂层进行打磨,试验中在力控设置为20 N恒力下,路径规划范围内的腻子表面打磨效果一致性较好,表面光滑、均匀、平整、无漏磨以及无明显磨印,基本满足工艺要求。但对于多个复杂曲面的车体部件,此结构在试验中存在以下几个问题:

1)在进行曲面打磨时,由于三磨头间采用刚性连接导致在曲面打磨时磨头接触面过小,打磨过程中会造成资源浪费。

2)三磨头在增加平面打磨效率的同时也增大了工具作业体积,导致在需要进行狭窄面打磨时机器人的

位姿状态难以计算。

3)3个磨削工具间无法实现单独控制,在规定区域进行作业时手动示教或者离线编程过程比较困难。

针对以上问题,对设备进行改进,如图3所示,多磨头打磨机构采用三套力位执行器,每套设备间可以单独控制,打磨工具和力控设备间的连接装置采用转向机构,以便在曲面打磨时每个磨头可以实现实时曲面贴合,且3个磨头均采用独立集尘装置,不仅提高了打磨效率,并且有效提高了集尘的效率。此磨头结构可以通过控制力控执行器对每个磨头运动状态进行单独控制以满足现场打磨需求。



图3 改造后的多磨头打磨机构

2.4 工作站改造

针对于单个机器人作业区间有限、无法实现整车打磨等问题,若采用地轨结构固定机器人^[2],可以加大机器人的作业空间,但整体设备可移动性差,对此本文提出可移动式工作站与机器人结合,有效增强机器人的灵活性和不同工作环节的适应性。

如图4所示,此系统采用库卡的六轴机械臂搭配大负载可移动式工作站,可以便携移动至不同工作车间进行作业。该设备可以有效实现多段式工作模式,但其定位过程仍无法脱离人工,后续可搭载带有高精度自动导航的AGV可以实现自动定位等功能,但现阶段AGV的精度仍无法达到工作要求。



图4 三磨头打磨系统整体工装实物

2.5 地铁车身自动打磨验证

基于铝合金试验样板腻子涂层自动打磨的工艺参数(打磨压力为20 N,磨盘转速为9 000 r/min,打磨运行速度为0.1 m/s,重叠面距离200 mm,砂纸目数为80

目,初始加速时间 3 s,末端减速时间 1 s,轨迹逼近距离为 50 mm,打磨次数 2 遍),对地铁车身进行打磨,如图 5 所示。打磨后地铁车身腻子涂层表面光滑、均匀、平整、无漏磨以及无明显磨印,基本满足工艺要求。



图 5 三磨头机构现车打磨过程

为进一步验证腻子涂层打磨质量,对地铁车身依次进行中涂漆喷涂以及一遍面漆喷涂,观察涂层表面是否存在明显打磨印,图 6 为地铁车身喷涂完面漆后的表面状态,通过光照并在一定角度上近距离观察涂层表面,在曲面区域能看到轻微的打磨痕迹,这是由于中途和面漆均采用人工打磨,且人工打磨无法全面覆盖三磨头自动打磨机设备打磨的痕迹。若油漆涂层均采用三磨头自动打磨机设备进行打磨,且采用横竖交错的方式进行逐级打磨,打磨效果将会更显著,打磨痕迹的问题也会有所改善。



图 6 地铁车辆喷涂完面漆状态

2.6 砂纸自动更换系统

自动打磨系统在打磨过程中最大的耗材为砂纸,在自动化设备中若采用人工更换砂纸将降低工作效率,而且还会增加人员危险系数。因此在此自动打磨系统中搭配了一套砂纸自动更换设备,不仅有效提高了系统自动化程度,同时增加了耗材用量稳定性,节约成本。

3 结语

自动化高铁全车身打磨的实际应用虽然才刚刚起步,但市场前景广阔。打磨技术将随着先进制造理念的不断渗透而发展进步^[13],其高效性、智能性、安全性等方面必将广泛应用在各个打磨领域,但要实现更高层次的智能化应从以下方面进行改进。

1)视觉识别:机器人在系统中仅仅起到执行器的

作用,并不能完全取代人,如果将视觉识别和机器人相结合,对于绝大多数非标准件就可以使用通用化设备去处理,可大幅度节省生产成本。

2)状态监控:在现有技术中难以对突发状况进行紧急处理,在后续研究中可以在系统中搭载对应的高精度传感器,实时监控机器人的打磨工作状态以进行对应处理,同时应提高打磨偏差检测设备信号采集和数据处理精度,进而实现精准打磨^[14]。

3)自动导航:本文采用移动式工作站对地铁车身进行不同环节的作业,打破了行业壁垒,但此技术的研究才刚刚起步,定位精度方面无法完全脱离人工控制,后续随着自动导航技术的成熟可以将该环节用带激光雷达的自动导航工作站取代。

参考文献:

- [1] 彭军,薛春珍,杨育农.自动喷涂设备及涂装技术的发展和应[J].现代涂料与涂装,2020(2):41-43.
- [2] 罗博,魏桦,杜超一,等.汽车车身自动喷漆装置技术方案分析[J].工艺装备,2022(8):146-149.
- [3] 申力军.自动化喷涂机械在汽车面漆涂装生产中的应用[J].现代涂料与涂装,1999(2):19-21.
- [4] 杨德要,钟志豪,李健仪,等.串联复合式自动喷涂技术在轨道交通行业的应用[J].现代涂料与涂装,2024(11):41-44.
- [5] 邓聪.民用飞机表面涂层机器人打磨工艺研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2022.
- [6] 李保亮,代可,曹志岩,等.涂装车间自动化率的提升及发展方向[J].现代涂料与涂装,2021(1):39-42.
- [7] 刘久月,马立新,刘海旭,等.基于机器人的白车身焊接自动打磨技术研究[J].汽车工艺与材料,2023(4):12-17.
- [8] 燕硕,李建松,唐昌松.基于神经网络的工业机器人视觉抓取系统设计[J].计算机测量与控制,2024(4):201-209.
- [9] 吴立华,申启访,黄冠成,等.大跨度中厚板边缘视觉识别与打磨引导研究[J].机电工程技术,2023(11):165-169.
- [10] SRINIVASAN L, SREEKANTH K, DHANYA M M, et al. An adaptive framework for robotic polishing based on impedance control [J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2021,112(1-2):401-417.
- [11] 黄婷,孙立宁,王振华,等.基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法[J].机器人,2017(6):776-785.
- [12] 张新艳,郭鹏,余建波.应用深度强化学习的压边力优化控制[J].哈尔滨工业大学学报,2020(7):20.
- [13] 樊文刚,刘月明,李建勇.高速铁路钢轨打磨技术的发展现状与展望[J].机械工程学报,2018(22):184-193.
- [14] 赵冠闯,丁军君.钢轨打磨偏差研究进展与展望[J].铁路采购与物流,2021(12):98-100.