

串联复合式自动喷涂技术在轨道交通行业的应用

杨德要, 钟志豪, 李健仪, 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: 从整体布局方式、喷涂机器人的本体结构、自动输调漆系统、外部拓展轴、三维操作平台、中央控制室、三维仿真编程及验证、喷涂工艺参数等方面详细介绍了轨道交通车辆的串联复合式自动喷涂系统, 并论述了串联复合式自动喷涂系统在使用效率、喷涂覆盖率、生产保障能力等方面的优势。同时, 通过对比分析手动喷涂和自动喷涂的实际效果, 对串联复合式自动喷涂系统存在的问题提出了优化方向。

关键词: 喷涂; 自动喷涂机器人; 喷烘漆房; 串联复合式; 喷涂系统; 编程

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2024)11-0041-04

The Application of Series-Parallel Composite Automatic Spraying Technology in the Rail Transit Industry

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

Abstract: This article provides a detailed introduction to the series-parallel composite automatic spraying system for rail transit vehicles from various aspects, including overall layout, the main structure of the spraying robot, automatic paint supply and mixing system, external extension axes, three-dimensional operation platform, central control room, three-dimensional simulation programming and verification, and spraying process parameters. It also discusses the advantages of the series-parallel composite automatic spraying system in terms of usage efficiency, spraying coverage, and production assurance capabilities. Additionally, by comparing and analyzing the actual effects of manual and automatic spraying, the article proposes optimization directions for the existing issues in the series-parallel composite automatic spraying system.

Key words: spraying; automatic spraying robot; spraying and baking paint booth; series-parallel composite; spraying system; programming

0 引言

随着技术的进步, 越来越多的喷涂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]。在轨道交通行业, 受限于多种因素的影响(如车体部件过大, 部分区域形状复杂等), 自动化程度不高。目前, 主要以人工喷涂为主, 仍属于劳动密集型间歇式作业^[4]。随着生活水平的不断

提高, 大家对健康的关注度也今非昔比。如喷涂这种职业健康危害比较大的工作, 从事的人员已越来越少, 未来油漆工从业人数将会更少, 而涂装又是现代工业不可或缺的一环, 因此必须通过提高自动化程度来解决人员不足问题, 由机器人代替人员进行喷涂作业^[5]。

近年来, 随着人们对环保和职业健康的重视, 轨道交通行业越来越多的主机厂采用自动喷涂机器人来进行水性漆的喷涂^[6-8], 在保障施工人员职业健康的同时, 也推动了行业自动化进程。但目前, 行业内大都采用一个喷烘漆房配一套喷涂机器人, 且喷涂机器人分布在漆房两侧, 通过垂直的升降装置和水平移动装置完成垂直方向和水平方向的移动^[9]。此种布局方式可

收稿日期: 2024-07-15

作者简介: 杨德要(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 欧洲粘接工程师(EAE), 主要从事轨道交通车辆表面处理、涂装及粘接技术研究工作。E-mail: gnyangdeyao@163.com。

实现车体大部分外表面的喷涂,但无法实现底架涂层的喷涂。同时,由于喷涂机器人需与车辆在漆房内一同经历喷涂、流平、烘干等作业过程,对喷涂机器人而言流平、烘干过程是无效等待,这也导致了喷涂机器人使用效率不高。本项目将基于行业现状,同时从公司实际情况出发,开发出一种高效的轨道交通车辆自动喷涂系统。

1 自动喷涂系统布局方式

与行业内已有的自动喷涂方案对比,本项目基于公司实际需要,创造性地采用了串联布局的方式。即用一套自动喷涂机器人将两个独立控制的喷烘漆房串联组成一体,两个喷烘漆房中部设置机器人准备区。整个区域通过地面导轨贯穿两个喷烘漆房及机器人准备区,两个机器人可通过地面导轨在任意区域活动,并进行不同的工作。此种布局方式可实现机器人工作效率的倍增,即其中一个喷烘漆房完成喷涂作业并进入涂层的流平晾干及烘干工序后,机器人可自行运行到另一个喷烘漆房进行下一辆车的喷涂作业,充分利用流

平、烘干的时间进行其他车辆的喷涂作业,整个过程机器人无等待浪费的情况。

2 自动喷涂机器人本体结构

机器人系统采用4台6轴机器人协同作业,漆房两侧各布置2台,采用串联复合的方式进行使用,按垂直方向分部。复合式机器人系统由2台小型6轴机器人和2台大型6轴机器人共计4台机器人构成,并分成2套复合式机器人布置在喷烘漆房两侧。每套复合式机器人为由1个臂展为1450 mm、负载10 kg的小型6轴机器人与1个臂展为2812 mm、负载300 kg的大型6轴机器人复合而成的一个多自由度的12轴机器人。复合式机器人为中空手腕结构,方便气动回路和传感线缆的安装。通过此种复合方式极大地提高了机器人的灵活度,可实现车顶、侧墙、端墙及底架的全覆盖,如图1所示,即车辆外表面喷涂覆盖率为100%。同时,也可以通过空调井、车门及车窗等区域进入车内部并对内表面进行喷涂,内表面喷涂覆盖率可达到75%以上。

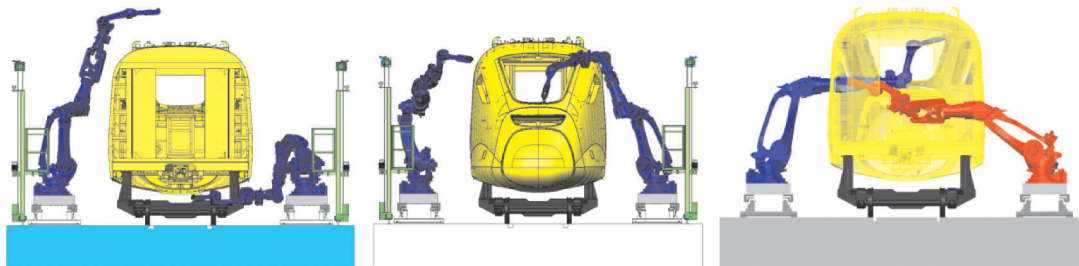


图1 喷涂可达性仿真验证

3 自动输调漆系统

自动供漆系统包含主剂、固化剂、去离子水、清洗剂等4套供漆装置,同时含有精密计量齿轮泵、伺服电机、压力变送器、气动阀门、电气比例阀、动态混合器、回流阀、空气自动喷枪等部件,具备自动调备和输送功能。油漆主剂、固化剂、去离子水通过计量齿轮泵按照预先设置的比例将涂料输送到动态混合器,经过充分搅拌均匀后经SATA自动空气喷枪喷出。喷涂过程中电气比例阀会按照预先设置的参数调整压缩空气流量和压力对其喷枪的扇幅和雾化情况进行调整,同时压力变送器检测单元会实时检测系统压力状态,确保其正常工作。喷涂工作结束后回路阀开启,涂料、固化剂及去离子水会单独回流至对应的容器内。与此同时,清洗剂阀门打开并进行管道清洗和喷枪冲洗。

4 外部拓展轴

外部拓展轴即为整个喷涂系统的地面导轨,由滚柱型精密导轨构成,具有负载大、精度高的特点,能有

效支撑机器人的所有负载。地面导轨整体呈现H型结构,上部两侧布置有精密斜齿条,在伺服电机及编码器的共同作用下可实现机器人高精度移动,精度可达 ± 0.2 mm,如图2所示。地面导轨下部呈中空结构,并延伸至喷烘漆房外部。当喷烘漆房开启烘干作业时,温差会导致地面导轨下方内部空间产生一定的压差,从而促使外部冷空气流入地面导轨内形成对流,并达到整体降温的目的。有效降低热膨胀而引起的轨道精度下降,确保机器人位置的准确。

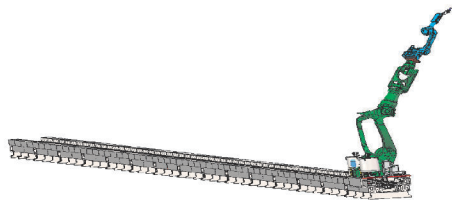


图2 机器人外部拓展轴

5 三维操作平台

为满足人工局部找补的需要,每个漆房需配2台三维操作平台,喷漆室内两侧各1台,供车辆表面(包括车顶、两个侧面及两个端面共5个面)人工喷漆时操作者使用。三维操作平台可沿车辆两侧轨道移动、升降及横向伸缩。每侧单台操作平台可完成车辆一侧及端墙的作业(按车辆侧墙长度25 m)。考虑到喷烘漆房原有配置以及自动喷涂系统的整体布局结构,三维操作平台可直接通过改造原有三维小车加以实现。三维小车上配有隔膜泵、空气喷枪及涂料桶存放台,可以满足人工喷涂的需要。

6 中央控制室

中央控制室设置在两个喷烘漆房中间区域,与机器人准备区并行,控制室内设置A、B两个喷烘漆房的中央控制面板及复合式机器人系统的中央控制台。复合式机器人系统的中央控制台可对门系统及复合式机器人进行控制,对喷涂过程的主要工艺参数进行设置、调整及监控。一次完整的标准作业流程包含测距、填充、喷涂、回待机位(机器人准备区)、清洗等工序。通过安装在喷烘漆房内两对角的视频监控单元,可实时感知机器人运行状态和车辆喷涂效果,并将影像资料投放在控制室的显示大屏幕上。

7 三维仿真编程及离线验证

自动喷涂程序主要在三维编程软件中进行,首先需建立喷涂工位的三维模型,即完成喷涂机器人、外部拓展轴、喷烘漆房、机器人准备区、三维操作台、标准轨道等三维模型的绘制及相对坐标的确立。喷涂工位的三维模型建立并验证完成后,批量生产过程无需再调整,仅需调整喷涂车辆的三维图纸。根据不同项目的具体喷涂要求,将对应车辆的三维图纸导入编程软件,根据喷烘漆房与车辆的实际位置调整车体三维的X、Y、Z轴距来进行编程模型定位。编程前预先对车体模型的车顶、侧墙和端墙划定喷涂区域,再按路径顺序依次进行编程,每个喷涂区域建立一个子程序。根据对称关系先对车体一侧进行编程,待车辆整侧子程序编制完成后,根据喷涂路径按顺利进行子程序的合成,并对每个子程序进行排序备注。再利用软件中的“程序变换”功能,将已完成的程序以XZ面镜像得到另一侧机器人的喷涂程序,随后可对整车程序进行仿真验证,如图3所示。

8 喷涂工艺参数

本串联复合式自动喷涂机器人涉及的关键工艺参数主要有喷涂速度、喷涂流量、雾化压力、幅宽压力、枪距、喷涂黏度、喷涂重叠面积等,各工艺参数间并不是孤立的,而是相互影响的。本项目通过正交试验和单因

素试验相结合的方式测试得到:喷涂速度为300 mm/s、喷涂流量为400 mL/min、雾化压力为0.4 MPa、幅宽压力为0.4 MPa、枪距为250 mm、喷涂黏度为28 s、重叠面积为1/2时能获得良好的涂层外观效果。值得一提的是,通常人工喷涂水性漆时会采用“湿碰湿”两遍成型的方式,两遍间预留表干时间,而自动喷涂一般采用一遍成型的工艺,因此在设定喷涂黏度和喷涂重叠面积时需验证充分,既需要保证喷涂过程油漆不流坠,还要保证喷涂后的漆膜质量,确保漆膜厚度、饱满度等满足标准。

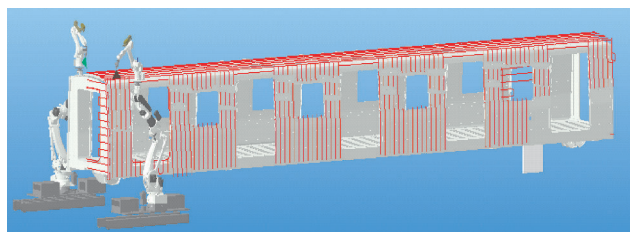


图3 离线编程及仿真验证

9 串联复合式自动喷涂系统技术优势

9.1 自动喷涂机器人使用效率倍增

通过采用整体串联布局的方式,可充分利用油漆流平、烘干的时间让复合式自动喷涂机器人进入另一个喷烘漆房进行喷涂作业。行业内现有的自动喷涂方案均是一个喷烘漆房配置两台自动喷涂机器人,自动喷涂机器人每次完成喷涂作业后均需闲置在喷烘漆房内随车辆一同完成油漆流平晾干(至少0.5 h)、烘干(至少2 h)作业等内容,喷涂过程存在2.5 h以上的等待浪费。而采用整体串联布局方式时,复合式机器人在A喷烘漆房完成喷涂作业后,通过地面轨道进入B漆房立即进行下一辆车的作业。通过此种方式,可以实现复合式机器人的连续喷涂作业,即仅需2台机器人完成原来4台机器人的工作任务,效率提升1倍以上,成本降低50%以上(节省2台喷涂机器、1套控制系统、2套输供漆系统、2套全自动喷枪以及设备维护保养成本)。

9.2 车辆外表面喷涂覆盖率达到100%

现有的轨道交通车辆自动喷涂系统仅能对车顶、侧墙及端墙进行喷涂,但无法对底架表面进行喷涂。但本项目中采用大、小两个6轴机器人复合使用的方式,有效增加了整体自由度,加上外部拓展轴,自由度达到13个,而现有的自动喷涂机器人加上外部拓展轴仅8个自由度,即灵活性上提升62.5%。通过此种复合使用方式,可以有效对车顶、侧墙、端墙及底架全面喷涂,即车辆外表面喷涂覆盖率达到100%。

9.3 喷涂系统的生产保障能力显著提升

本项目方案中设置了专门的机器人准备区,准备区与喷涂作业区是独立分开的,互不干涉影响,且整个喷涂系统具备自动和人工喷涂两种作业模式。因此,当喷涂机器人或系统出现故障时,可将喷涂机器人移到准备区进行故障的排查和修复,同时两个喷烘漆房可采用人工喷涂的方式进行正常生产,即生产过程不中断,也不影响喷涂机器人的维护保养。而现有轨道交通

车辆自动喷涂系统没有设置专门的机器人准备区,一旦出现故障则会出现生产中断的风险,即使可以采用紧急人工喷涂,喷涂机器人维修就会中断(维修作业与喷涂作业不可同步进行,存在安全隐患),进而影响后续的生产。

10 手动喷涂与自动喷涂作业效果对比

本自动喷涂项目效果评价主要以自动喷涂与原有传统手动喷涂方式进行对比,具体如表 1 所列。

表 1 手动喷涂与自动喷涂效果对比

项点	人工喷涂	自动喷涂
安全性	人工手动喷涂涉及车顶作业,存在高空坠落和高压风伤害等安全隐患	自动喷涂过程操作人员在控制室内作业,无人员在漆房内,不存在安全隐患
职业健康	人工手动喷涂过程,作业人员长期在含有 VOC 的环境中,容易引起呼吸疾病	自动喷涂无需人员在漆房内,极大满足了职业健康的需求
膜厚均一性	受人工手法影响,膜厚波动较大	因喷涂参数稳定,整车膜厚较为均一
喷涂质量稳定性	人工喷涂因人员流动、技能差异等客观问题,质量稳定性相对较差	自动喷涂可以全过程监控工艺参数,程序一旦验证合格,后续基本无异常,质量稳定性高
操作人员	4 人/辆车	1 人/辆车
喷涂范围	整车全覆盖	整车全覆盖
喷涂效率	4 人同时作业约 60 min/辆车	1 人操作约 60 min/辆车
作业强度	作业过程需手握喷枪约 60 min 以上,劳动强度较大	自动喷涂过程无需人工喷涂,仅找补时需 10 min 作业时间,劳动强度低
编程难度	无需编程	需进行三维仿真编程,完成 4 台机器人路径规划和信号设计,难度高
一次交检合格率	人工喷涂因多种不稳定因素的存在,一次交检合格率 90% 以上	自动喷涂因过程工艺参数可稳定控制,一次交检合格率 98% 以上
投资费用	仅需投资喷烘漆房及制冷除湿设备,一次性投入成本相对较低	需投资喷烘漆房及制冷除湿设备的同时,增加自动喷涂系统的投资,一次性投入成本较高

11 存在的问题及优化方向

11.1 操作难度大

本自动喷涂项目使用的是复合式机器人,即通过组合大、小两个机器人以实现自由度的提高,这是本项目的一大创新点,但同时也是一个难点。因为是两个机器人复合,在通信和控制方面暂时无法做到一体化控制,需同时使用两个示教器操作机器人,操作难度大。复合式机器人的 12 个轴无法做到整体控制,需在大小机器人之间不断接收和反馈信号来完成协同作业。未来,需升级优化复合式自动喷涂机器人的控制系统,实现 12 个轴的一体化控制,降低操作难度。

11.2 编程难度大

因为本项目自动喷涂系统采用 4 台机器人,且大、小机器人复合后暂无法实现一体化控制,故而需进行 4 个机器人的程序编制,较其他主机厂自动喷涂设备多了一倍的工作量。另外,编程软件方面也存在奇异点识别不清的问题,无法高效地在编程阶段提示技术人

员奇异点的存在。后期,需通过软件升级和控制技术的优化来降低编程工作量,同时通过软件仿真验证精准识别出程序中的奇异点,提示技术人员及时修正,避免在现车验证时出现此类情况。

11.3 喷涂效率略低

通过以上对比分析可知,当前自动喷涂与人工喷涂所使用的时间相同,虽然能满足现场生产,但在作业效率上并未凸显出优势。在提高机器人喷涂效率上仍需进一步提升,通过优化喷涂路径,缩短每个子程序的衔接路径和空跑路径等方式进一步缩短喷涂时间。另外,可尝试使用更大口径的枪嘴进行喷涂试验,以期提升喷涂效率。

12 结语

未来轨道交通行业喷涂过程必然会被自动喷涂机器人所主导,行业内也将涌现更多的智慧涂装工厂。本自动喷涂技术方案为轨道交通行业喷涂过程提供了一种高使用率、大覆盖面、全自动化的解(下转第 56 页)