

# 城市轨道交通车体表面油漆检修 机器人技术可行性研究

张凤丽 郑 立 丁朝奉

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

**摘 要** [目的] 由于城市轨道交通车辆在大修过程中对车体表面油漆进行清洁、打磨和抛光时的作业时间较长,而人工操作打磨机抛光时因打磨力分布不均易造成漆面损伤,降低了车体表面检修质量。而采用机器人打磨可缩短车体打磨作业时间且技术成熟,性能稳定,并能够满足绝大部分生产需求。因此,有必要对城市轨道交通车辆车体表面油漆检修机器人技术进行可行性研究。[方法] 依据车体侧墙结构参数适配机器人构型,通过机器人代替现有人工打磨作业;在机器人末端安装力传感器夹持打磨工具进行作业,将力传感器采集数据作为输出并反馈至机器人运动关节坐标,以确保车体表面抛光打磨力基本稳定;通过仿真计算机器人工作空间并依据车体结构加装机器人外轴,可满足实际作业需要。[结果及结论] 机器人技术运用至城市轨道交通车辆车体表面油漆质量检修工艺能够符合城市轨道交通车辆车体侧墙结构特征;在减少作业人数、满足现场车体侧墙打磨区域全覆盖需求的同时,通过引入力传感器的打磨工具,预计可提升车体表面打磨、抛光质量,满足现场工艺稳定性要求,并提升产线自动化率。

**关键词** 城市轨道交通车辆; 机器人技术; 表面质量; 路径规划

中图分类号 U270.6<sup>+</sup>7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.027

## Feasibility Study of Robot Technology for Vehicle Carbody Surface Paint Maintenance in Urban Rail Transit

ZHANG Fengli, ZHENG Li, DING Chaofeng

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

**Abstract** [Objective] In the maintenance process of urban rail transit vehicles, the cleaning, grinding and polishing of the vehicle carbody surface paint often require a long time when done manually. Moreover, manual polishing operations can lead to uneven distribution of polishing force, resulting in paint damage and reduced maintenance quality. The use of robotic polishing can shorten the operation time and is technically mature, stable in performance, and capable of meeting the majority of production needs. Therefore, it is necessary to study the

feasibility of robot technology for surface paint maintenance on urban rail transit vehicle carbody. [Method] Based on the structural parameters of the vehicle side wall, robot configurations are adapted to replace manual polishing operations. Force sensors are installed at the end of the robot to hold the polishing tool for operation. The data collected by force sensors are used as output and fed back to the robot motion joint coordinates to ensure the basic stability of polishing force during carbody surface polishing. Simulation is used to calculate the robot workspace, and additional robot outer axes are installed based on the vehicle structure to meet actual operational needs. [Result & Conclusion] The application of robot technology in the quality maintenance process of surface paint on urban rail transit vehicle carbodies can meet the structural characteristics of the vehicle side wall. By reducing the number of operators and meeting the full coverage requirement of the vehicle side wall polishing area on-site, the introduction of force sensors in the polishing tool is expected to enhance the quality of carbody surface polishing and meet the stability requirements of on-site processes, thereby increasing the automation rate of the production line.

**Key words** urban rail transit vehicle; robot technology; surface quality; path planning

城市轨道交通车辆在架修或大修过程中,需对车体表面油漆进行清洁、打磨及抛光等作业,由于车辆运营线路不同,环境温、湿度差异及日常维护管理要求提升,导致需在架大修期间对未检修车辆车体表面油漆进行专项检查。目前,车体表面油漆检修主要采用人工作业方式对车体表面进行全覆盖打磨,以去除车辆表面的污渍、黄斑和划痕等。上述方法的优点在于现场可操作性强,能够针对不同车型油漆缺陷区域进行处理,满足实际生产需求。但同时也存在以下难点:①车体表面检修作业量较大,作业耗时较长,人力成本较高;②人工手持操作打磨工具过程中,因打磨力度不同易对打磨表面造成损害,增大后续车体表面检修作业量及作业

难度;③作业环境复杂,检修质量主要依靠人工经验判别,工艺稳定性较差。

目前,机器人在地铁小半径曲线钢轨打磨<sup>[1]</sup>、航空发动机叶片打磨<sup>[2]</sup>、管道内部焊珠磨削<sup>[3]</sup>等方面的研究成果较为丰富。打磨机器人技术主要应用于小平面对小曲面打磨及抛光工艺<sup>[4-5]</sup>。同时,基于打磨机器人的路径智能优化算法的相关研究和打磨机器人构型分析、磨削工艺与仿真<sup>[6]</sup>及机器人本体奇异性评价与综合方法研究<sup>[7]</sup>等内容研究同样较为丰富。

综合上述分析结果,考虑采用机器人手持装有力传感器的打磨工具建立打磨机器人工作站,来代替人工对车体表面进行打磨、抛光工艺,并根据车体结构合理规划机器人打磨路径,缩短车体打磨作业时间。

## 1 机器人技术基础

### 1.1 ABB(安巴赫-布朗)机器人技术

ABB 机器人技术成熟,性能稳定,能够满足绝大部分生产需求,且具备多种不同工况的成熟解决方案。ABB 机器人主要优点如下<sup>[8]</sup>:①超长的无故障运行时间,设备稳定性较好,能够满足较高工艺稳定性要求的工况;②具备动态优化控制系统,各关节运行速度可调,运行速度稳定,末端运行精度高;③具备关节保护指令,能防止生产过程中因各种原因造成关节轴干涉或碰撞,造成设备损坏,影响使用精度。

### 1.2 RobotStudio 仿真软件

ABB 机器人的 RobotStudio 仿真软件主要包括如下功能<sup>[8]</sup>:①RobotStudio 仿真软件能够根据不同使用场景需要,在仿真环境中建立机器人工作站模型,并配置机器人工作站相关设备,包括机器人末端工具、机器人系统、控制柜、防护栏等,也可以在仿真环境里编写机器人程序与配置信号等;②RobotStudio 仿真软件能够根据不同使用环境在仿真软件内选择不同的机器人型号进行仿真,也可以通过外部三维建模软件建立好模型后导入到仿真环境中,且能进行可达性检测,在短时间内便可完成工作单元的布置、验证和优化;③可在 RobotStudio 仿真软件环境中创建具体工作站模型,完整验证后可将机器人工作站系统备份到实际生产场地工作站内。

## 2 机器人工作空间

### 2.1 机器人选型

部分城市轨道交通车辆车体侧墙表面高度尺寸约为 2 300 mm,因此在车体竖直方向上至少需有 2 300 mm 作业范围;考虑到机器人自身存在奇异性且机器人末端负载,故考虑选用型号为 IRB 4600 型机器人作为打磨机器人,其主要参数如表 1 所示。

表 1 IRB 4600 型机器人技术参数

Tab. 1 Technical parameters of IRB 4600 robot

项点	参数
到达距离/mm	2 550
手臂载荷/kg	20
轴 1 旋转角度范围/(°)	-180 ~ 180
轴 2 旋转角度范围/(°)	-90 ~ 150
轴 3 旋转角度范围/(°)	-180 ~ 175
轴 4 旋转角度范围/(°)	-400 ~ 400
轴 5 旋转角度范围/(°)	-120 ~ 120
轴 6 旋转角度范围/(°)	-400 ~ 400

由表 1 所示可知:该机器人参数可满足车体竖直方向上的作业要求;考虑到机器人末端需安装负载(力传感器、打磨设备及送清洁剂设备),需对安装末端工具的机器人实际工作空间进行计算。

### 2.2 机器人工作空间建模

采用 D-H 模型方法,则 IRB 4600 型机器人连杆参数如表 2 所示。

表 2 IRB 4600 型机器人连杆参数

Tab. 2 IRB 4600 robot linkage parameters

连杆轴编号	$a_{i-1}/(^{\circ})$	$\sigma_{i-1}/(^{\circ})$	$d_i/\text{mm}$	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	495	0
2	175	-90	0	-90
3	900	0	0	0
4	175	-90	960	0
5	0	90	0	0
6	0	-90	$135+t$	-180

注: $a_{i-1}$ 为沿  $x_i$  轴从  $z_{i-1}$  到  $z_i$  距离的连杆长度; $i$  为连杆轴序号; $\sigma_{i-1}$ 为绕  $x_i$  轴使  $z_{i-1}$  与  $z_i$  重合的转角的扭角; $d_i$ 为相邻连杆距离的连杆偏距; $\theta_i$ 为相邻连杆角度的关节角度; $t$ 为机器人末端工具沿 6 轴轴线的长度;考虑设备安装,机器人  $t$  值可暂定为 365 mm。

定义机器人坐标系,并将机器人工具坐标变换至机器人坐标。上述方法主要通过坐标变换实现,即前一项坐标系可通过旋转、平移等方式与当前坐

标系重合,可得:

$${}^{i-1}_i T = \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, d_i) \text{Rot}(x_i, \alpha_i) \quad (1)$$

其中, Rot 指坐标系旋转函数, Trans 指坐标系平移函数。结合表 2 的 IRB 4600 型机器人连杆参数,可依次得出轴 1 至轴 6 的变换矩阵,可得:

$$\begin{cases} {}^1_0 T = \begin{bmatrix} \cos(n_1) & 0 & -\sin(n_1) & 0 \\ \sin(n_1) & 0 & \cos(n_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 495 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^6_5 T = \begin{bmatrix} \cos(n_6) & -\sin(n_6) & 0 & 0 \\ \sin(n_6) & \cos(n_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

将计算结果依次相乘,可将 6 轴坐标系变换为机器人坐标系,可得:

$${}^6_0 T = {}^1_0 T {}^2_1 T {}^3_2 T {}^4_3 T {}^5_4 T {}^6_5 T \quad (3)$$

将计算结果依据表 1 中各轴旋转角度范围进行仿真计算,由此可得打磨机器人工作空间如图 1 所示。

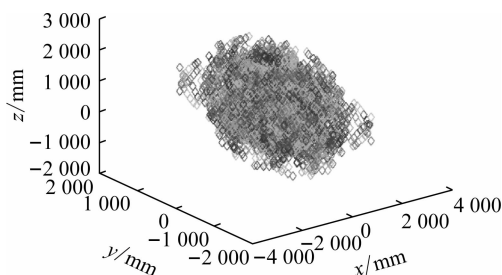


图 1 打磨机器人工作空间

Fig. 1 Grinding robot workspace

由图 1 可知:打磨机器人竖直方向作业空间跨度约为 5 000 mm,考虑城市轨道交通车辆侧墙表面结构,机器人沿  $z$  方向至少需具备 2 300 mm 跨度的所在平面区域进行打磨作业,而沿  $x$  向的需 500 mm 的跨度,沿  $y$  向的至少需 25 000 mm 的跨度。结合图 1 分析可知,需在机器人 6 自由度外增加沿车体纵向的外轴,外轴工作长度至少需为 25 000 mm。

### 3 机器人工作站建模

#### 3.1 机器人模型创建

根据前文分析结果,在 RobotStudio 仿真软件环境下创建机器人模型,打磨工作站须选用 IRB 4600 型机器人模型。根据该型号机器人特征选择并导

入机器人控制系统,在控制系统内添加机器人第 7 轴,以弥补车体纵向打磨所需工作空间。机器人系统配置完成后,需在机器人末端安装力传感器及打磨设备,以方便后续进行机器人系统工具坐标系、工件坐标系创建。机器人模型照片如图 2 所示。

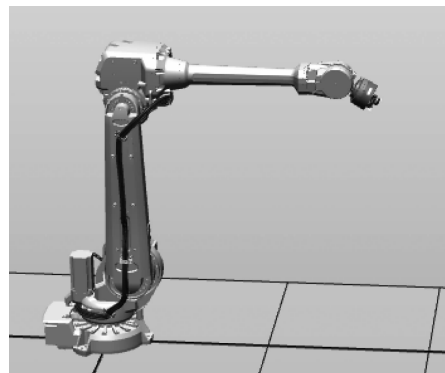


图 2 机器人模型照片

Fig. 2 Photo of robot model

建立工作站模型,创建机器人外轴移动模型并导入车体模型。依据图 1 所示布置机器人与车体相对位置,在不干涉机器人及车辆转运前提下尽量相互靠近,根据需要布置现场设备。打磨机器人工作站模型图片如图 3 所示。

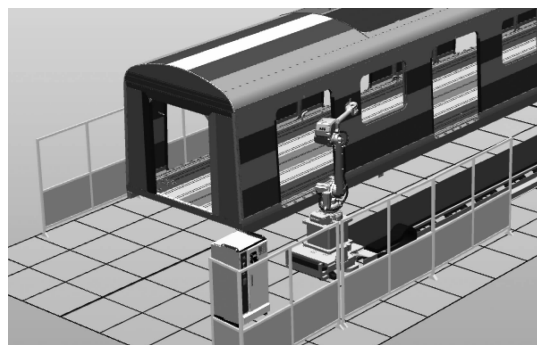


图 3 打磨机器人工作站模型图片

Fig. 3 Diagram of grinding robot workstation model

#### 3.2 机器人打磨路径规划

现场主要采用工人手持打磨工具在一定区域内进行打磨抛光作业,待指定区域打磨完成后,再移动至下一区域进行重复操作。在打磨过程中,主要通过操作打磨工具在车体侧墙表面水平方向呈弓字型移动,并根据经验合理控制打磨工具打磨力度及移动速度,并对黄斑、划痕等较明显缺陷区域重点进行打磨作业。

考虑车体侧墙表面全覆盖打磨要求,需合理规划机器人打磨路径,结合打磨工具使用要求,设定

打磨路径间距为 100 mm, 均匀分布打磨路径, 如图 4 所示。

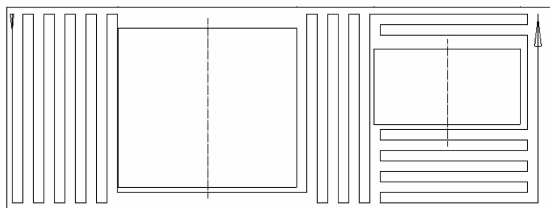


图4 机器人打磨路径示意图

Fig. 4 Diagram of grinding robot path

由图 4 可知: 打磨机器人路径优点在于可较大范围覆盖车体侧墙表面, 且路径具备一定规律, 机器人路径编程较为容易; 通过在车体表面示教设定 3 点即可完成车体侧墙表面打磨任务, 示教过程简单, 且现场调试难度较小; 在车门上、下边框区域因路径限制, 较难打磨到位, 需在机器人路径算法中单独添加指令完成车体侧墙全表面打磨; 机器人对未在路径算法上的区域进行示教时, 调试难度较大且坐标点数量较多, 其打磨连续性较差。

依据上文分析, 对机器人打磨路径进行优化, 如图 5 所示。

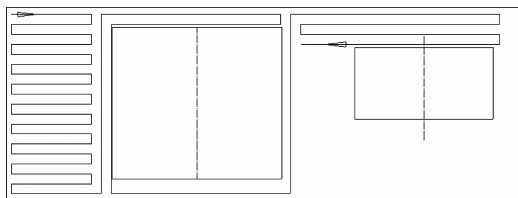


图5 机器人打磨路径优化

Fig. 5 Optimization of grinding robot path

结合现场操作经验, 采用水平纵向打磨方式依次对车体表面进行扫描时较符合技术要求; 保持打磨间距不变, 规划基于水平方向的打磨路径, 并包络车门区域, 可实现车体侧墙表面全覆盖。但此种路径变化形式较多, 虽可覆盖车体表面区域, 但机器人编程难度较大。在实际路径算法规划中, 可将实际车体区域划分为相同模块, 对每个模块内的打磨路径进行规划, 最后将模块路径进行循环加载并将坐标点偏移一定数值即可。

#### 4 工作站仿真分析

选定车体局部区域进行工作站系统仿真, 模拟机器人打磨路径, 以重定位方式操作机器人, 以不同姿态记录同一点坐标值, 用于设定机器人工具坐

标, 以车体端墙角为车体坐标原点, 建立打磨机器人车体工件坐标系。

对车体局部进行机器人打磨路径编程, 以力传感器输出信号, 作为机器人末端沿车体  $x$  向位移的反馈量, 控制机器人打磨力均匀分布, 在车体倾斜面打磨作业时, 需调整 5 轴旋转角度。

#### 5 结语

采用机器人技术建立打磨机器人工作站, 来代替人工对城市轨道交通车辆车体表面进行打磨、抛光等工艺; 分析了机器人工作空间并搭建车体表面油漆检修机器人工作站, 规划了机器人打磨路径, 方案主要结论如下:

- 1) 采用机器人技术可代替人工完成车体表面检修作业内容, 提升产线自动化率;
- 2) 通过增加机器人外轴可实现城市轨道交通车辆车体表面油漆打磨要求;
- 3) 采用力传感器可减小因打磨力分布不均对打磨表面造成损害, 提升工艺稳定性。

#### 参考文献

- [1] 林凤涛, 胡伟豪, 王瑞涛, 等. 地铁小半径曲线钢轨型面打磨技术及评价[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 21.  
LIN Fengtao, HU Weihao, WANG Ruitao, et al. Grinding technology and evaluation of rail profile of metro small radius curve [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 21.
- [2] HUANG Z, KE X, CHENG S H, et al. Kinematics analysis of abrasive belt grinding robot for aero-engine blade and its simulation [J]. Advanced Materials Research, 2014, 889/890: 1165.
- [3] XU Z L, LU S, YANG J, et al. A wheel-type in-pipe robot for grinding weld beads [J]. Advances in Manufacturing, 2017, 5(2): 182.
- [4] WANG T, XIN Z, MIAO H, et al. Optimal trajectory planning of grinding robot based on improved whale optimization algorithm [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 3424313.
- [5] 党选举, 林智武. 面向打磨机器人的基于串联结构的双卡尔曼滤波算法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 220.  
DANG Xuanju, LIN Zhiwu. A series structure-based dual Kalman filtering algorithm for grinding robots [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 220.
- [6] TIAN H, MA L, ZHU X, et al. Grinding method, trajectory planning and simulation of a 3 DOF knee grinding robot [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2019, 18(1): 150.
- [7] 赵新华, 冯建峰, 刘凉, 等. 同类异构打磨机器人奇异性评价与综合方法研究[J]. 机械设计, 2023, 40(5): 58.

(下转第 143 页)



2) 列车在小曲线区段的振动水平高于直线区段,存在 300 ~ 450 Hz 的振动主频,而直线区段的振动主频集中在 50 ~ 100 Hz 的低频段。

3) 该型列车的弹性车轮存在 340.37 Hz 的模态频率,列车在小曲线区段时该频率成分显现,导致车轮与钢轨的耦合共振。

4) 建议该线在运维中配备轨道的固态润滑装置,并对曲线区段的波磨进行打磨处理,以实现轮轨摩擦系数的降低和车轮运维环境的提升。

## 参考文献

- [1] 付加平,崔玉辉,李稳,等. 弹性车轮踏面裂纹产生机理研究及解决措施探讨[J]. 铁道车辆, 2023, 61(3): 143.  
FU Jiaping, CUI Yuhui, LI Wen, et al. Study on mechanism of elastic wheel tread crack generation and discussion on solution measures[J]. Rolling Stock, 2023, 61(3): 143.
- [2] 王星欢,何远鹏,张皓迪,等. 压剪复合型弹性车轮对市域桥梁结构噪声的影响[J]. 铁道学报, 2023, 45(5): 128.  
WANG Xinghuan, HE Yuanpeng, ZHANG Haodi, et al. Effect of press-shear resilient wheels on noise radiated from suburban box-girder bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(5): 128.
- [3] 王佳诺,王奇,韩健,等. 考虑弹性轮对的车辆-轨道耦合动力学建模及减振特性研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 235.  
WANG Jianuo, WANG Qi, HAN Jian, et al. Study on dynamic modeling and damping characteristics of vehicle-track coupling considering resilient wheelset[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 235.
- [4] 刘智,陈刚,朱逸伦,等. 考虑踏面制动热应力的不同磨耗弹性车轮强度校核[J]. 润滑与密封, 2023, 48(4): 163.  
LIU Zhi, CHEN Gang, ZHU Yilun, et al. Elastic wheel strength assessment considering the thermal stress of tread braking[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(4): 163.
- [5] 吴坤,周信,钟硕乔,等. 弹性车轮地铁车辆过曲线性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 190.  
WU Kun, ZHOU Xin, ZHONG Shuoqiao, et al. Performance analysis of metro vehicle with resilient wheels passing through curved track[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 190.
- [6] 侯传伦,杨新文,戚援,等. 轨道交通弹性车轮轮箍承载特性研究[J]. 机车电传动, 2023(2): 71.  
HOU Chuanlun, YANG Xinwen, QI Yuan, et al. Study on tyre load-bearing characteristics of resilient wheel for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2): 71.
- [7] 郭奇睿,祁孟孟,周信,等. 弹性车轮对地铁直线段轨道减振特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 395.  
GUO Qirui, QI Mengyu, ZHOU Xin, et al. Research on vibration reduction characteristics of straight section of metro track with damping wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 395.
- [8] 施璐,胡活力,李稳,等. 弹性车轮迟滞机理研究与解决方案探讨[J]. 机车电传动, 2022(4): 111.  
SHI Lu, HU Huoli, LI Wen, et al. Research on mechanism of resilient wheel sluggish movement and discussion on relevant solution[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(4): 111.
- [9] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法: 理论、方法、工程应用及程序设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
WU Qingxi. Structural reliability analysis and stochastic finite element method: theory, method, engineering application and program design[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [10] 姜东,钱慧,朱锐,等. 基于整体式初始位移的柔性结构低频模态试验方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 313.  
JIANG Dong, QIAN Hui, ZHU Rui, et al. Low frequency modal test method for flexible structure based on integral initial displacement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 313.

• 收稿日期:2023-12-01 修回日期:2024-01-26 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-12-01 Revised:2024-01-26 Published:2024-05-10  
• 通信作者:王日艺,正高级工程师,19825025229@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 137 页)

- ZHAO Xinhua, FENG Jianfeng, LIU Liang, et al. Singularity evaluation and synthesis of isomeric grinding robot[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(5): 58.
- [8] 罗羽泉. 面向 6R 工业机器人等离子加工轨迹规划[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.  
LUO Yuxiao. Track planning for 6R industrial robot in plasma machining[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,

2019.

• 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10  
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10  
• 通信作者:张凤丽,高级工程师,angelfengli@126.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license