



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.13

钢轨多图形自动堆焊设备

王景磊¹, 张金殿¹, 牛 铭¹, 冯伟波², 张庆知¹

1. 常州中车瑞泰装备科技有限公司, 江苏 常州 213011

2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司, 江苏 常州 213011

摘 要: 随着我国地铁线路和铁路运行里程的爆发式增长, 钢轨表面磨损情况日益增多。解决钢轨磨损的传统方案有着成本高、效率低下等诸多缺点, 为此开发设计了一种多图形自动堆焊设备来实现钢轨修复。该系统提供了人机交互界面 HMI, 操作简单; 采用 CAN 总线技术由 PLC 同时控制焊接设备和伺服电机, 基于多图形算法由伺服电机带动三坐标滑台上的焊枪进行复杂图形行走运动, 从而实现钢轨的摆动自动堆焊修复; 多图形焊接功能解决了钢轨复杂图形堆焊, 尤其是三角道岔的堆焊, 并满足了钢轨电弧补焊技术条件的相关要求; 同时设备采用模块化、轻量化设计, 各个模块在简易平板小车上可以快速拆卸组装。实验应用证明, 该设备能够适应复杂及恶劣工况、上下道方便, 同时实现了钢轨的高效率、高质量、高经济效益的堆焊修复。

关键词: 钢轨修复; 自动堆焊; 多图形焊接; CAN 总线

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0108-08

Rail Multi-graphic Automatic Surfacing Equipment

WANG Jinglei¹, ZHANG Jindian¹, NIU Ming¹, FENG Weibo², ZHANG Qingzhi¹

1. Changzhou CRRC Ruitai Equipment Technology Co., Ltd., Changzhou 213011, China

2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China

Abstract: With the explosive growth of subway lines and railway mileage in my country, the surface wear of rails is increasing. Traditional solutions to rail wear have many disadvantages such as high cost and low efficiency. For this reason, a multi-graphic automatic surfacing equipment has been developed and designed to repair rails. The system provides a human-machine interface HMI, which is easy to operate. The CAN bus technology is used to control the welding equipment and servo motor by PLC at the same time. Based on the multi-graphic algorithm, the servo motor drives the welding gun on the three-coordinate slide to perform complex graphic movement, thereby realizing the swing automatic surfacing repair of the rail. The multi-graphic welding function solves the complex graphics welding of the rail, especially the surfacing requirements of the triangular turnout, and meets the related requirements of the arc welding technical conditions of the rail. Meanwhile, the equipment adopts a modular and lightweight design, and each module could be quickly assembled or dismantled on a simple flat trolley. The equipment can adapt to complex and harsh working conditions, is convenient for on and off the track, and at the same time realizes high-efficiency, high-quality and high-economic-benefit surfacing repair of the rail.

Keywords: repair rails; automatic surfacing; multi-graphic welding; CAN bus

引用格式: 王景磊, 张金殿, 牛铭, 等. 钢轨多图形自动堆焊设备[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 108-115.

Citation: WANG Jinglei, ZHANG Jindian, NIU Ming, et al. Rail Multi-graphic Automatic Surfacing Equipment[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 108-115.

收稿日期: 2025-03-12 修回日期: 2025-11-24

作者简介: 王景磊(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事轨道交通智能维护装备电气研发。E-mail: 1139998789@qq.com。

0 引言

钢轨是铁路运输的核心组成部件,直接承受列车载荷并引导列车的运行方向,同时其光滑表面还起到减震作用,最终确保列车能够安全平稳的运行^[1-2]。随着车速的提高和轴重的增加,钢轨磨损,尤其道岔轨尖的磨损问题日益严重。钢轨磨损会增加列车行驶时的噪音和震动,影响乘坐舒适性;提高列车运行阻力,降低列车运行速度和铁路系统效率;甚至增加列车脱轨风险,严重影响列车运行安全^[3-4]。针对此问题目前传统的解决方案有两种:直接更换钢轨和人工堆焊修复。直接更换钢轨的费用极高,不利于我国铁路系统降低在役钢轨的维修费用,是实现铁路可持续发展的巨大障碍。堆焊修复是将具有一定使用性能的合金材料借助一定的热源手段熔覆在母体材料的表面,以赋予基体特殊使用性能或使零件恢复原有形状尺寸的工艺方法^[5-6]。传统的人工堆焊修复虽然可以恢复钢轨表面形状,改善甚至恢复线路状况,保证行车安全。有延长钢轨使用期限,节约大量养护费用,提高经济效益等诸多优点^[7]。但是受限于天窗期(多在夜间且时间短)以及焊工等因素影响,钢轨人工堆焊也存在着劳动强度高,焊接效率低下,焊接质量得不到保证等缺点。

随着路局养护设备机械化和自动化的普及,以上的钢轨修复方案已不能满足需求。本研究设计开发了一种钢轨的多图形自动堆焊小车,该设备不仅成本低廉操作简单方便还实现了钢轨堆焊修复的自动化,提高了堆焊效率、保证了堆焊质量稳定、大大降低钢轨维护成本。

1 方案设计

钢轨多图形自动堆焊设备系统组成如图1所示,包括:高压交流380 V电焊机、焊枪系统和24 V低压直流自动送丝机、三坐标滑台、PLC的电控柜、HMI触摸屏、小车平台。为了设备的轻量化及上下道组装方便,堆焊小车自身不带动力电源。钢轨堆焊时需由轻卡将堆焊小车运送到指定线路。然后再到轨道上将堆焊小车拼接组装成形,轻卡上的

380 V发电机组给小车提供动力电源。焊机的工作电压为16~28 V,焊接方式为不需要预热的自保药芯焊^[8]。三坐标滑台代表水平 $X/Y/Z$ 方向,分别由3个步进电机通过丝杠机构进行闭环控制。 X 方向为钢轨纵向,主要进行焊缝的焊接和返程运动, Y 方向为钢轨横向,主要进行焊缝节距和摆幅运动, Z 方向垂直于钢轨平面,焊枪固定在滑台 Z 轴方向,由其控制焊枪的升降。为了各个模块拆卸组装方便,系统采用抗干扰能力强的2线制CAN总线替代多线束IO进行通信,其负责PLC、HMI、电焊机、步进电机之间的通信。触摸屏HMI负责图形和焊接等参数的指令交互。PLC作为主控单元,不仅生成图形轨迹算法,还根据轨迹算法控制电焊机、送丝机、步进电机的动作时序,同时还负责与HMI人机界面的参数交互。

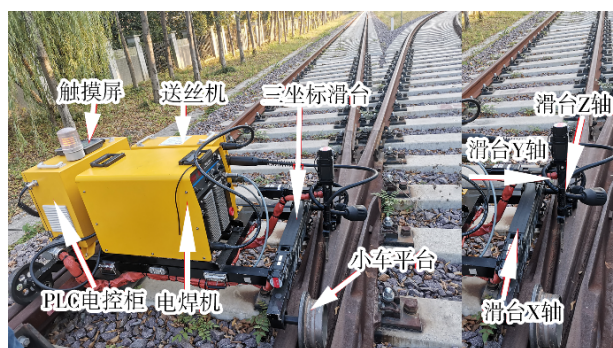


图1 钢轨多图形自动堆焊设备

Fig. 1 Rail multi-graphic automatic surfacing equipment

堆焊过程:首先把磨损区域打磨成一定的形状。然后作业人员操作触摸屏HMI,通过PLC控制焊接小车运行到指定焊接区域,控制三坐标滑台 $X/Y/Z$ 方向的步进电机动作,调整焊枪到图形的起焊点。焊接前先在触摸屏上输入图形参数以及电压电流等焊接参数,以便PLC内部根据算法生成图形的焊接轨迹。开始焊接时PLC首先控制焊机起弧、送丝机构送丝, $X/Y/Z$ 轴电机分别读取当前焊缝的焊接轨迹、摆幅、焊枪升降高度等参数,然后滑台 X 轴沿当前焊缝轨迹移动、与此同时 Y 轴带动焊枪以设定的摆幅往复摆动。到达焊缝终点时 X 轴停止运动,为了焊缝平直度, Y 轴进行最后一次摆动幅度为1/2摆幅,以使焊枪停在焊缝中间位置收弧停弧,停止送丝后 Z 轴正向运动抬高焊枪,然后 Y 轴移动一个焊缝节距,当前焊缝的焊接完成,最后判断是否

完成堆焊。如有未焊接焊缝, X轴电机读取当前焊缝的返程轨迹, 并按照返程轨迹带动焊枪快速返回下一条焊缝起点。Z轴反向运动降低焊枪位置, 电机读取下一条焊缝的轨迹参数并进行下一条焊缝的焊接。如此往复直至图形焊接完成。

2 工序实现

工艺顺序: 根据中华人民共和国铁道行业标准《钢轨电弧补焊技术条件》的要求: 钢轨堆焊时应从轨头顶面内侧依次向外堆焊, 施焊方向为沿钢轨纵向与列车运行方向相反^[9]。因此焊接设备应具备正反向焊接和长短边起焊的功能, 每道焊缝的后退节距方向都是由轨内侧指向轨外侧。当焊接轨道的上下行车线路时, 可以调整焊接方向以匹配列车行车方向的相反方向, 然后根据焊接区域轨内侧边长与轨外侧边长的大小, 对生成的焊缝轨迹按长短进行重新排序。轨内侧为短边时, 进行短边起焊; 轨内侧为长边时, 进行长边起焊。《高锰钢辙叉电弧补焊技术条件》: 推荐多段焊接, 并且规定每段的焊接长度不应超过 100 mm^[10]。由于钢轨宽度尺寸偏小, 我们可以把任意的磨损区域近似看成有 2 条边平行与钢轨纵向的四边形, 而这样的四边形总可以由若干个直角三角形、直角梯形、等腰三角形、等腰梯形、方形分段构成。焊接设备的多图形焊接功能满足了以上多图形的钢轨堆焊, 以修复各种磨损形状复杂钢轨。图 2 为在双线铁路的上行线路上道岔处分段多图形焊接的焊接工序: 堆焊区域划分为 3

段: 依次为高度为 h 的直角梯形、正方形、直角三角形, 焊接方向与上行车方向相反, a、b、c 为 3 个图形的起焊点; 其依次代表短边起焊、短边起焊、长边起焊。

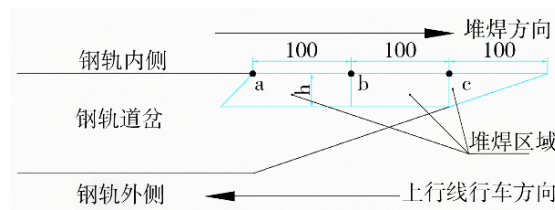


图 2 钢轨多图形堆焊工序

Fig. 2 Rail multi-graphic surfacing process

3 系统程序设计

3.1 CAN通信程序设计

PLC 通过 CANopen 的 CIA301/CIA402 协议以绝对位置模式控制三坐标滑台的步进电机运动。通信波特率为 250 kb/s。报文解析的字节排列方式按照低字节在低地址, 高字节在高地址的小端格式。报文数字采用 16 进制表示。由于钢轨堆焊系统的数据传输量比较大, 因此我们主要使用生产者消费者模式的 PDO 通信, PDO 一次可以传输 8 个字节, 其高效率低延时特性可以减少 CAN 总线上的报文数量, 避免总线堵塞^[11]。但是 PDO 使用前需要通过客户服务器模式的 SDO 通信进行初始化配置。SDO 为对象字典索引的寻址方式, 一次最多只能传输 4 个字节。文中 SDO 客户端为 PLC 主控单元, 服务器为电机。

表 1 SDO 通信格式

Table 1 SDO communication Format

端口	COB-ID	Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7
客户端	600h+ID	命令码	IndexL	IndexH	SubIndex		报文内容(小端格式)		
服务器	580h+ID	命令码	IndexL	IndexH	SubIndex		报文内容(小端格式)		

SDO 的通信格式如表 1 所示。命令码、对象的索引高字节 IndexH、索引低字节 IndexL 和子索引 SubIndex 分别占用了前 4 个字节, 后四个字节为报文内容, 对象字典索引地址解析为索引高字节+索引低字节+子索引。SDO 写入对象字典时, 客户端报文命令码: 2Fh、2Bh、27h、23h、22h, 其定义写入报文内容的实际长度分别为 1 个、2 个、3 个、4 个和任

意个字节。服务器的响应报文命令码为 60h, 并且响应报文内容全部为 0 时代表写入成功。SDO 读取对象字典时, 客户端报文命令码为 40h 并且报文内容为 0。服务器响应报文命令码: 4Fh、4Bh、47h、43h、42h, 其定义了读取报文内容的实际长度分别为 1 个、2 个、3 个、4 个和任意个字节。通信过程中如果有错误, 服务器命令码为 80h, 报文内容为错误

码^[12]。SDO 可以通过写 PDO 的通信对象和映射对象来完成 PDO 的初始化配置。表 2 为对象字典里 PDO 的 id、通信对象索引和映射对象索引的对应关系。

表 3 为 SDO 对 PDO 的配置流程: (1)写通信对象 180002h, 设置通信模式; (2)写通信对象 180005h, 设置通信周期; (3)写入映射对象 1A0000h, 清零 PDO 先前的映射条目, 重新配置 PDO; (4)将要映射的对象字典索引地址及对象长度写入映射对象 1A0001h; (5)将映射的对象数目写入映射对象 1A0000h, RPDO 完成配置并激活^[13]。

PDO 分为 RPDO 和 TPDO 两种报文, 文中 PLC

和电机互为生产者和消费者。RPDO 为从 PLC 发送给电机的报文, TPDO 为从电机发送给 PLC 的报文。X/Y/Z 三个步进电机的 id 分别为 1、2、3。根据电机的目标位置、速度等参数的对象字典索引及其字节长度, 按照表 3 流程, 每个电机配置了发送周期为 50 ms 的 RPDO1、RPDO2、RPDO3、TPDO1、TPDO2、TPDO3 六条报文, 其报文解析见表 4。RPDO1、RPDO2、RPDO3 分别映射了电机的 4 字节长度的加速度值和减速度值、目标位置和目标速度, 以及 2 字节长度的控制字和运行模式的发送, TPDO1、TPDO2、TPDO3 分别映射了加速度和减速度值、绝对位置和速度、状态字和运行模式的反馈。

表 2 PDO 字典对象映射

Table 2 PDO object dictionary mapping

PDO 类型	RPDO1	RPDO2	RPDO3	RPDO4	TPDO1	TPDO2	TPDO3	TPDO4
COB-ID	200h+id	300h+id	400h+id	500h+id	180h+id	280h+id	380h+id	480h+id
通信对象	1400h	1401h	1402h	1403h	1800h	1801h	1802h	1803h
映射对象	1600h	1601h	1602h	1603h	1A00h	1A01h	1A02h	1A03h

表 3 PDO 配置流程

Table 3 PDO configuration process

步骤	COB-ID	byte0	byte1	byte2	byte3	byte4	byte5	byte6	byte7
1	600h+ID	2Fh	00h	18h	02h	通信模式	00h	00h	00h
2	600h+ID	2Bh	00h	18h	05h	通信周期	00h	00h	00h
3	600h+ID	2Fh	00h	1Ah	00h	映射清零	00h	00h	00h
4	600h+ID	23h	00h	1Ah	01h	对象长度	对象 subIndex	对象 indexL	对象 indexH
6	600h+ID	23h	00h	1Ah	00h	映射数目	00h	00h	00h

表 4 电机 PDO 报文解析

Table 4 Motor PDO message analysis

PDO 类	报文 id	byte0	byte1	byte2	byte3	byte4	byte5	byte6	byte7
RPDO1	200h+id	加速度(索引 608300h)					减速度(索引 608400h)		
RPDO2	300h+id	目标位置(索引 607A00h)					目标速度(索引 608100h)		
RPDO3	400h+id	控制字(索引 604000h)		运行模式(索引 606000h)					
TPDO1	180h+id	加速度(索引 608300h)					减速度(索引 608400h)		
TPDO2	280h+id	目标位置(索引 607A00h)					目标速度(索引 608100h)		
TPDO3	380h+id	状态字(索引 6041000h)		运行模式(索引 606000h)					

基于 PDO 通信的步进电机位置模式的通信程序设计如图 3 所示。

(1)首先 PLC 发送报文 ID 为 0, 长度为 2 个字节, 内容为 01, 00。以启动所有电机 TPDO 周期报文, 同时 PLC 周期发送所有电机的 RPDO 报文。PLC 通过各电机的报文 ID 设置每个电机 RPDO1 和 RPDO2 中的加速度、减速度、目标位置、目标速度的对象值, 检查 PLC 设置报文 RPDO1、RPDO2 是否分

别与各电机反馈报文 TPDO1、TPDO2 中的值相等, 不相等则返回重新设置, 相等说明对应参数设置成功。

(2)然后设置 RPDO3 中的电机参数值。首先 RPDO3 中的运动模式设置为 01 位置模式, 检查 TPDO3 的运动模式是否为 01 设置值。否的话重新设置 RPDO3 的位置模式。

(3)接着 RPDO3 中的控制字为 0Fh 电机使能,

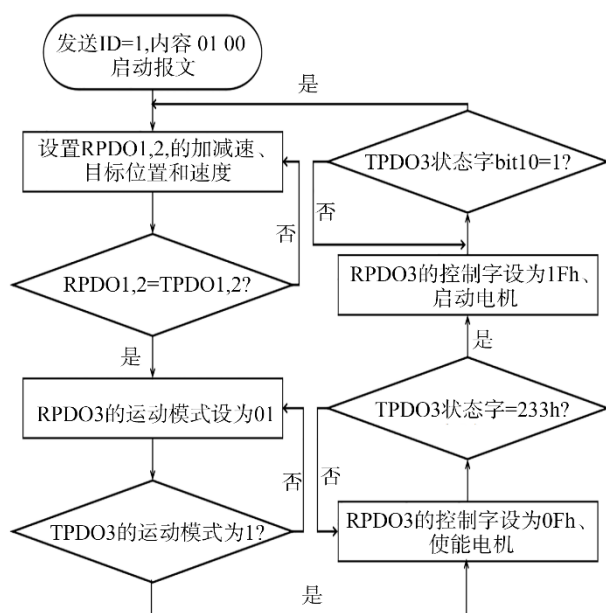


图3 电机通信程序

Fig. 3 Motor communication program

检查 TPDO3 中的状态字是否表示电机使能状态的 0233h, 否的话重新设置 RPDO3 控制字为 0Fh 使能电机。

(4) 设置 RPDO3 中的控制字为 1Fh 启动电机运行, 最后时刻监测 TPDO3 的状态字的 bit10 位是否置 1, 是的话说明目标位置运动到位, 接着返回程序开始处循环等待下一次运动。

3.2 多图形焊接走程序序设计

触摸屏采用威纶通触摸屏, 图 4 为上位机软件 EasyBuilder Pro 编写的焊接图形参数界面^[14], 可以在界面中选择等腰梯形、直角三角形、方形等常用图形, 然后输入高度、轨内边长、轨外边长等图形尺寸信息, 来生成具体的焊接图形。焊接过程中三坐标滑台走程序序如图 5 所示。

(1) 预备焊接, 系统将焊缝计数器清零, 并根据触摸屏的图形参数由 PLC 的轨迹算法生成对应图形的焊缝数量 N , 焊缝焊接行程长度数组变量 w_i , 焊缝返回行程长度数组变量 b_i , 焊缝节距 w_p 、摆幅 f_i 、摆动行程变量 b_f 等参数。

(2) 根据图形轨内侧边长与轨外侧边长的大小关系, 判断是否短边起焊, 短边起焊时 w_i, b_i 数组中的绝对值由小到大排列, 否则逆序排列; 然后判别焊接方向, 正向焊接时 w_i 中的值为正否则为负, b_i 中



图4 HMI 焊接图形界面

Fig. 4 HMI Welding graphical interface

的值为负否则为正。

(3) 准备完毕后开始焊接, Z 轴下降一定高度 h , Z 轴到位后, 把焊缝焊接行程到位标志位 i , 摆动结束标志位 h , 摆动计数器 K 清零, 焊机起弧, 送丝起焊。焊缝计数 n 加 1, X 轴带动焊枪开始进行长度为 $w_i[n]$ 的第 n 条焊缝的焊接。同时 Y 轴电机带动焊枪按照 b_f 的值完成往复摆动, 进行摆动堆焊, 每次摆动 K 计数加 1, 而且每次摆动前判断计数器 K 的奇偶, 偶数时 b_f 为正, 焊枪正向摆动, 否则 b_f 为负, 焊枪反向摆动。

(4) 判断 X/Y 轴是否运动到位, X 轴的焊缝焊接行程到位停止时焊缝到位标志位 i 置 1, 摆动行程 b_f 设置为一半的摆幅 $f_i/2$ 以便使 Y 轴最后一次摆动回到焊缝中间位置, 在中间位置收弧填弧坑。 Y 轴每次摆动到位都会首先判断焊缝到位标志位 i 是否为 1, i 不为 1 说明焊缝长度还未走完, X 轴还在沿焊缝轨迹运动, 此时程序直接跳转到 Y 轴摆动循环入口处继续 Y 轴的循环摆动; i 为 1 说明焊缝长度走完, X 轴停止运动。

(5) 判断摆动结束标志位 h 是否为 1, h 不为 1 说明此次摆动为该条焊缝的倒数第二次摆动, 需要把 h 置 1 后跳转到摆动循环入口, 进行最后一次摆动, 使焊枪摆回中位。 h 为 1 说明此次摆动为最后一次摆动, 焊枪已经停在了焊缝宽度中位, 程序进入收弧填弧坑阶段。

(6) 收弧结束后 Z 轴带动焊枪抬升一定高度 h , 当前焊缝焊接结束, 然后判断焊缝计数 n 是否大于焊缝总数 N 。是的话说明图形堆焊完成, 否的话 Y 轴电机带动焊枪后退节距 w_p 长度, Y 轴运动到位后,

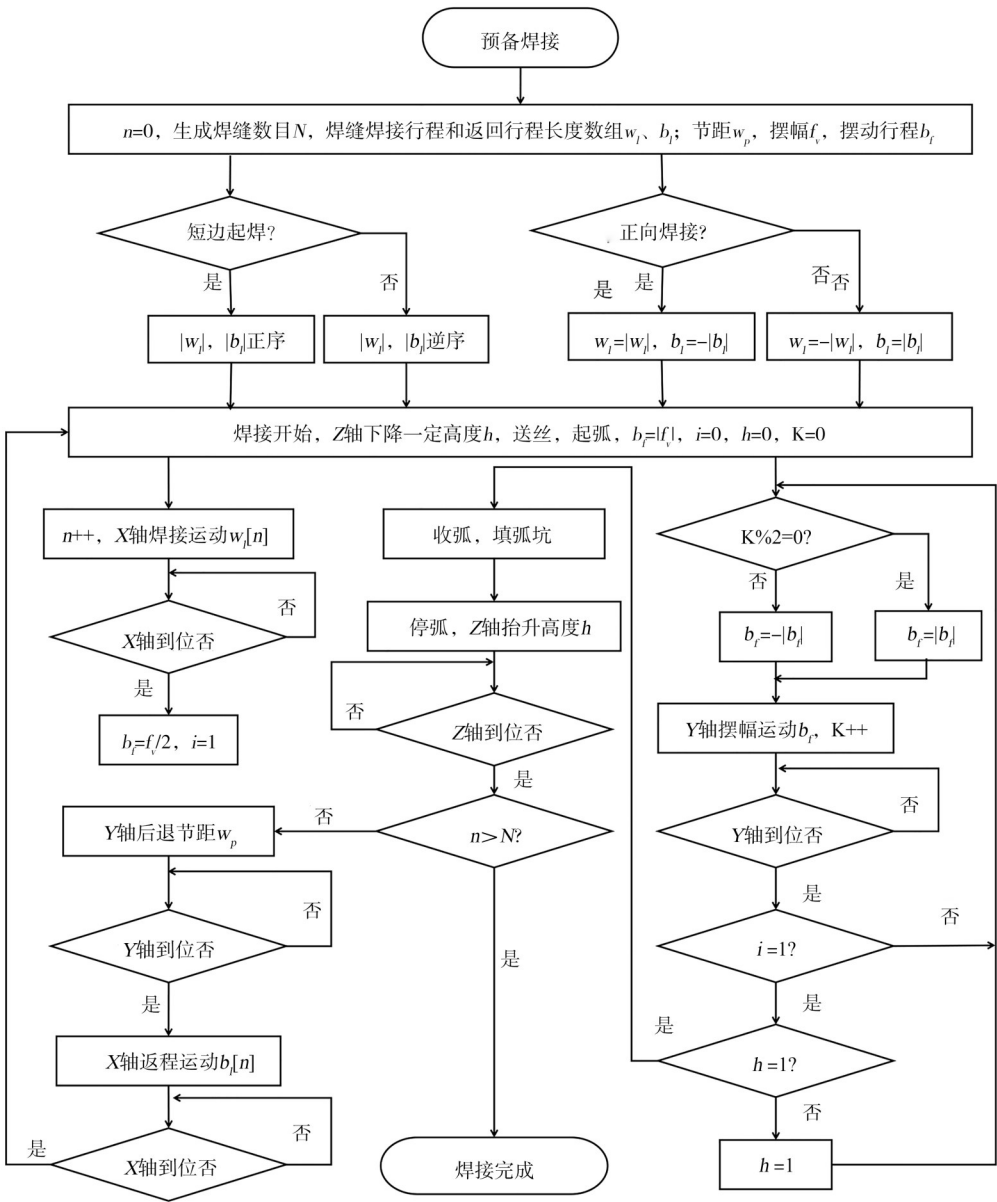


图 5 焊接走程序

Fig. 5 Welding procedure

X 轴按照该条焊缝的返回行程长度 $b_i[n]$ 的快速返回到下一条焊缝的起点, X 轴返回到位后, 程序跳转到焊缝循环焊接入口处, 进行下一条焊缝的焊接, 往复循环焊缝堆焊程序直至图形堆焊完成。

4 实验及应用

4.1 实验

以 59R2 型 U75V 槽型轨为例, 实验条件为直径 2.0 的 JCTD-32 焊丝, 焊接电流 180 A, 焊接电压 19 V,

焊接速度 40 cm/min 的情况下的焊接取样结果性能测试数据如表 5 所示。焊接区域的硬度、抗拉强度、延伸率等指标均满足国标 TBT1631—2002《钢轨电弧补焊技术条件》中的焊接要求, 对比母材 U75V, 其抗拉性能接近母材, 甚至硬度和延伸率还优于母材。因此多图形堆焊小车的焊接质量和焊接性能完全能够满足钢轨堆焊修复的要求。

4.2 应用

目前该设备已在沈阳浑南有轨电车有限公司和香港地铁进行了批量应用 (见图 6), 取得了很好

表5 焊接取样性能数据

Table 5 Welding sampling performance data

对象	抗拉强度 /MPa	布氏硬度 /HB	延伸率 /%
堆焊熔覆区	885	320	15
母材	≥980	290	12
TB/T 1631—2002 标准	≥700	300~350	≥15

的效果,相比于手工堆焊,焊接速度提升了3倍以上,焊接综合效率提升了2倍以上。该设备运输组装方便,相邻两个作业点之间的时间开销小于10分钟,一个夜间窗口可以完成地铁及城轨整条线路的钢轨堆焊修复。焊接过程稳定,焊缝行程良好,焊接质量稳定,效果好,相比于直接更换钢轨,其节约了大量成本,创造了很好的经济效益。



图6 钢轨多图形堆焊现场作业

Fig. 6 Rail multi-graphic surfacing on-site operation

5 结论

钢轨多图形自动堆焊技术实现了对钢轨实际磨损的各种不规范边界的多图形自动化堆焊,解决了人工堆焊效率低、堆焊质量一致性差的问题。基于钢轨多图形自动堆焊技术的堆焊小车机构简单轻便、成本低廉、模块化组装、便于天窗期上下道。未来该设备还可以借助人工智能技术的视觉图形算法实现钢轨磨损区域图形的自动识别与测量^[15],进一步提高设备的自动化程度及工作效率,同时该设备还可以作为钢轨打磨车的组装模块,实现钢轨磨损检测、打磨、堆焊修复的一体化作业。

参考文献:

- [1] 舒康. 风沙环境下钢轨材料滚动磨损与损伤机制研究[D]. 成都:西南交通大学,2022.

KANG S. Research on Rolling Wear and Damage Mechanism of Rail Materials in Windblown Sand Environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

- [2] 王平. 基于试验数据的钢轨滚动接触磨损预测[D]. 成都:西南交通大学,2012.

WANG P. Wear Prediction of Rolling Contact of Rail Steel Based on Experiment Data[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

- [3] 刘翀原,刘智春. 我国铁路重载运输发展研究[J]. 武汉工程大学学报,2013,35(7):9-10.

LIU C Y, LIU Z C. Review on the Heavy-Duty Transport Development in Our Country[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(7): 9-10.

- [4] 赵波涛,朱龙,沈红平. 我国铁路重载运输发展现状与趋势探讨[J]. 中国航务周刊,2024(08):57-59.

ZHAO B T, ZHU L, SHEN H P. Current Situation and Trend of Heavy-Haul Railway Transportation in My Country[J]. China Shipping Gazette, 2024(08): 57-59.

- [5] 邹茜,王兴瑞. 堆焊修复技术的发展与应用[J]. 科技展望,2015,25(15):139-139.

ZOU Q, WANG X R. Development and Application of Cladding Repair Technology[J]. Science and Technology, 2015, 25(15): 139-139.

- [6] 黄河,曾欣,刘良,等. 易损机械零件堆焊修复技术及其应用[J]. 设备管理与维修,2016(12):39-40.

HUANG H, ZENG X, LIU L, et al. Surfacing Welding Repair Technology and Its Application for Vulnerable Mechanical Parts[J]. Plant Maintenance Engineering, 2016(12): 39-40.

- [7] 高琦. 钢轨表面堆焊修复新技术[J]. 电焊机,2012,42(05):71-76.

GAO Q. New Technology for Repairing Rail Surface by Surfacing Welding[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(05): 71-76.

- [8] 朱藤辉,陈辉,王建刚,等. 自保护药芯焊丝双丝堆焊修复钢轨技术研究[J]. 电焊机,2010,40(12):67-71.

ZHU T H, CHEN H, WANG J G, et al. Research on the Technology of Surfacing-Repaired Rail by Double-Flux-Cored Wire[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(12): 67-71.

- [9] TB/T 1631—2002. 钢轨电弧焊补技术条件[S].

- [10] TB/T 3083—2003. 高锰钢辙叉电弧焊补技术条件[S].

- [11] 施磊. 基于CANopen的伺服控制系统研究与设计[D]. 杭州:浙江工业大学,2016.

SHI L. Research and Design of Servo Control Systems

- Based on CANopen[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [12] 钱城. CANopen DS402 协议在运动控制器中的实现技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
- QIAN C. Research on The Implementation of CANopen DS402 Protocol in Motion Controller[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.
- [13] 程亮和. 基于 CANopen DS402 协议的电机伺服系统开发[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- CHENG L H. Development of Motor Servo System Based on CANopen DS402 Protocol [D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [14] 许清媛, 古福城. 西门子、威纶通两种触摸屏设计的异同探讨[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(04): 159-163.
- XU Q Y, GU F C. Analysis of the HMI Design Differences Between Siemens and Weinview[J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(04): 159-163.
- [15] 华长权, 寇东华, 付石林, 等. 几种钢轨磨损检测方法和仪器的对比分析[J]. 中国铁路, 2013(04): 67-70.
- HUA C Q, KOU D H, FU S L, et al. Comparative Analysis of Several Rail Wear Detection Methods and Instruments[J]. China Railway, 2013(04): 67-70.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 107 页

- 工艺出版社, 2013.
- [9] 郑倩倩, 宋纪煜, 孙彬彬, 等. VVER-1000 核电机组主管道焊接施工工艺优化[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 106-113
- ZHENG Q Q, SONG J Y, SUN B B, et al. Optimization of the welding construction process for the main pipeline of VVER-1000 nuclear power unit [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 106-113..
- [10] 石琳, 古敏, 鲁果昌, 等. 焊接预热和后热的理论基础及实际应用[J]. 石油和化工设备, 2015, 18(2): 48-52.
- SHI L, GU M, LU G C, et al. Theoretical basis and practical application of welding preheating and postheating[J]. Petro & Chemical Equipment, 2015, 18(2): 48-52.
- [11] 刘小户, 田军. 消应力热处理温度对 16MND5 钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 工程技术研究, 2016, 18(6): 6-7.
- LIU X H, TIAN J. Effect of Stress Relief Heat Treatment Temperature on Microstructure and Properties of 16MND5 Weld joint [J]. Metallurgical Collections, 2016, 18(6): 6-7.
- [12] 金晶. 含裂纹、气孔及多次重熔焊缝的焊接接头疲劳性能研究[J]. 电焊机, 2015, 44(01): 89-94.
- JIN J. Research on fatigue properties of welded joints containing cracks, holes and multiple remelting weld [J]. Electric Welding Machine, 2015, 44(01): 89-94.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>