

# 自动焊接小车结构与运动学仿真

苑留堂

(南京合信自动化有限公司, 江苏 南京 210007)

**摘要** 船体合拢焊接是船体制造的关键工序, 其焊接成型需由多层多道焊接完成, 传统人工焊接模式存在焊缝质量不稳定、效率低下、劳动强度大等问题, 难以适配规模化生产需求。本文基于船体合拢焊接工艺特性, 先分析其功能需求, 再完成自动焊接小车整体结构设计及关键子系统选型, 构建工作站运动学模型并开展仿真分析。研究表明, 所设计的自动焊接小车通过合理的结构布局与精准的运动控制, 可实现船体合拢焊缝自动多层多道焊接作业, 显著提升焊缝质量一致性与焊接效率, 为船舶行业自动化焊接提供技术支撑。

**关键词** 多层多道焊; 自动焊接小车; 仿真分析

中图分类号: TG43; TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.003

## 0 引言

随着船舶订单承接量急剧增大, 对各个造船企业的产能需求越来越高, 对各船厂的生产率提出了极大的挑战。而大部分船舶企业的焊接工作仍然是手工完成, 使得很多焊接人员不得不加班加点, 这样一来不但给操作人员带来了极大的工作负荷, 也间接影响了焊接过程质量。自动化焊接设备的研发, 有效补充了焊接操作人员的不足。自动化焊接设备焊接稳定性高, 避免了人工操作的不稳定因素, 使得焊接缺陷、报废率大大降低, 有效地避免了材料、能源的浪费以及返工、返修的时间成本, 显著提高企业的市场竞争力<sup>[1]</sup>。

## 1 自动焊接小车需求分析

### 1.1 船体合拢焊接工艺分析

船体大合拢焊缝就是各分段或总段在船台上进行合拢后形成的焊缝, 当前在船体合拢时采用人工焊接<sup>[2]</sup>。船体采用中厚钢板焊接成型, 合拢焊缝是多层多道焊接焊缝, 其焊接成型质量直接影响到船体结构强度。该焊缝在焊接工艺中进行了严格要求, 作业时减少接缝的内应力, 防止气孔、咬边、夹渣、未焊透、裂缝等缺陷的产生, 确保大合拢基准线不偏移, 船体合拢焊缝焊后不引起船体变形<sup>[3]</sup>。船体合拢焊缝焊接工艺要求: 焊接方法选用熔化极气体保护焊 (MAG 焊), 保护气体采用 Ar+CO<sub>2</sub> 混合气体 (比例 80:20); 多层多道焊接; 焊枪摆动角度: -90° ~ 90°; 焊接速度保持在 300 ~ 400 mm/min; 焊接电流控制在 280 ~ 320 A。

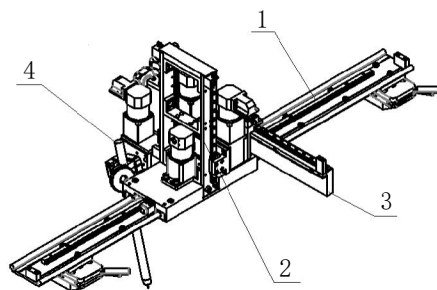
### 1.2 船体合拢焊接小车设计需求

船体合拢自动焊接小车基本技术要求: X 向运动范围: 0 ~ 8 500 mm; Y 向运动范围: 0 ~ 320 mm; Z 向运动范围: 0 ~ 190 mm; 焊枪旋转角度: -90° ~ 90°; 适应坡口: 对接单 V 型; 焊接形式: 多层多道自动焊接。为了实现多层多道焊接, 需要进行焊接小车底架组件设计、上下移动组件设计、水平移动组件设计、焊枪夹持设计及摆动组件设计。

## 2 自动焊接小车结构设计

### 2.1 机械结构设计

该自动焊接小车设计总体三维模型如图 1 所示。



1. 底架组件; 2. 上下移动组件;  
3. 水平移动组件; 4. 焊枪夹持及摆动组件

图 1 自动焊接小车示意图

### 2.2 底架组件

底架组件主要用于焊接小车的承载以及滑动, 底架组件由磁性开关、齿轮齿条、行走电机以及导轨滑

作者简介: 苑留堂 (1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械工程。

块组成。底架采用双导轨进行准确导向, 齿轮齿条与直流无刷电机进行精确步距控制, 整个齿条与导轨安装座的固定方式非常便携, 采用多支点磁铁吸附形式固定, 以便吸附在钢板上行走进行重直角焊缝的焊接。

该自动焊接小车的移动行走是由行走电机驱动齿轮齿条来完成的, 其中行走电机减速机的选型如下。

### 2.2.1 机械结构参数

机械机构参数如表1所示。

表1 行走电机减速机机械结构参数

机械结构参数	参数值
负载质量	$M=20 \text{ kg}$
负载运动速度	$V_0=18 \text{ m/min}$
齿轮模数	$m=1.5$
齿数	$z=15$
齿轮质量	$m_0=0.05 \text{ kg}$
启动加速度	$a=0.5 \text{ m/s}^2$
重力加速度	$g=9.8 \text{ m/s}^2$
$\pi$	$\pi=3.1416$
摩擦系数	$\mu=0.1$

### 2.2.2 电机减速机选型

选定直流无刷电机型号为: M3640-S24; 参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=20$ , 机械效率 $\eta=0.9$ ; 折算到电机轴上的转矩 $T=0.018 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机的额定转矩 } 0.027 \text{ Nm}$ , 该电机选型满足使用要求。

### 2.3 上下移动组件

上下移动组件可用于调节焊接小车焊枪以及水平移动组件的高度。上下移动组件由直流无刷电机、齿轮齿条、导轨滑块以及架体等组成。直流无刷电机带动齿轮齿条啮合, 经导轨滑块准确的实现机构的上下移动功能。

直流无刷电机的参数如下: (1) 机械结构参数: 负载质量 $M=18 \text{ kg}$ , 负载运动速度 $V_0=1.8 \text{ m/min}$ 。(2) 电机减速机选型: 选定直流无刷电机型号为: M3640-S24; 参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=400$ , 机械效率 $\eta=0.9$ , 安全系数 $S=2$ 。折算到电机轴上的转矩 $T=0.0236 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机的额定转矩 } 0.027 \text{ Nm}$ , 该电机选型满足使用要求。

### 2.4 水平移动组件

水平移动组件由水平移栽电机、水平导轨滑块、齿轮齿条等组成。直流电机带动齿轮齿条啮合, 通过导轨滑块的准确导向进行水平移栽, 可以设定焊枪夹

持组件的高度, 从而达到自动焊接小车的多层多道横焊的效果。

水平移栽电机的参数如下: (1) 机械结构参数: 负载质量 $M=11 \text{ kg}$ , 负载运动速度 $V_0=18 \text{ m/min}$ ; (2) 电机减速机选型: 选定直流无刷电机型号为: M3640-S24。参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=40$ , 机械效率 $\eta=0.9$ , 安全系数 $S=2$ ; 折算到电机轴上的转矩 $T=0.021 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机的额定转矩 } 0.027 \text{ Nm}$ , 该电机选型满足使用要求。

### 2.5 焊枪夹持及摆动组件

焊枪夹持组件由直流无刷电机驱动夹持组件进行需要角度的旋转调整, 夹持组件夹紧或松开调整焊枪, 使得焊枪以最佳的姿态进行焊接。

电机减速机的参数如下: (1) 机械结构参数: 负载质量 $M=2 \text{ kg}$ , 摆动速度 $v=6 \sim 5000 \text{ mm/min}$ ; (2) 电机减速机选型: 选定直流无刷电机型号为: M3640-S24。参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=1000$ , 机械效率 $\eta=0.9$ , 安全系数 $S=2$ 。其中, 传动比 $i=40$ , 机械效率 $\eta=0.9$ , 安全系数 $S=2$ 。折算到电机轴上的转矩 $T=0.009 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机额定转矩 } 0.027 \text{ Nm}$ 。该电机选型满足使用要求。

该焊接小车在进行多层多道焊接时, 焊枪需实时调整焊接位置, 即焊枪需能实现前后与左右方向行走, 且位置移动的精确性需有一定保证, 设计中采用了高精度直流无刷电机配合两级减速实现高减速比传动, 一级为行星减速, 二级为带自锁的蜗轮蜗杆减速, 传动精度提高, 该种形式的行走驱动方式稳定可靠。

## 3 自动焊接小车运动学仿真

### 3.1 运动学仿真

#### 3.1.1 自动焊接小车运动学的建立

1. 模型层次划分及关系建立。根据装配好的自动焊接小车三维模型, 将设计模型按照仿真思维进行结构重构。将底层组建、上下移动件、水平移动件、焊枪夹持件、摆动件等进行模型重组, 并定义其层级关系。按照由底层到顶层的规划进行模型层次关联。

2. 运动副的建立。此焊接小车中存在两种运动副, 移动运动副及转动运动副。对于两个有相对转动的轴需要建立旋转副, 选择两个轴各自的回转轴线, 保证两个轴的轴线重合, 定义其转动关系及范围。当两个零件相对平移滑动时需要建立移动副, 选择两个零件平移相交的边线, 再选择与边线相连的两个面, 进行驱动长度的确定。

### 3.1.2 运动学仿真

当所有运动副的连接关系建立后,可以通过运动学仿真模块以及位姿姿态设置功能进行焊接小车的各个运动关节的运动学仿真,验证其在规划的运动行程中是否发生零件脱节、干涉等现象发生,通过运动学中设置的焊接小车旋转角度和移动范围,可以验证其可达性等性能。

当小车的运动学仿真建立完毕后,通过焊接小车的功能需求定义,配置不同的焊枪,实现焊接小车的动态仿真整体效果,可以清晰地显示不同运动模块的划分、机构的关联关系。通过以上的仿真设置,可以实现焊接小车空载状态下全部行程的仿真操作,通过每个自由度的调节,运动副参数的调整,可以实现全范围下的焊接小车动作示意,使得三维建模软件中的静态的模型成为可以自由运转的设备动态模型。

### 3.1.3 焊接过程仿真验证

通过焊接环境布局,自动焊接小车运动学设置,焊接工艺参数设置等,完成自动焊接小车的焊接过程仿真基础布置。然后结合焊接小车焊接过程,建立对应的智能组建以及过程操作,将这些焊接过程操作进行联动,以实现完整的焊接过程仿真。

## 3.2 仿真运动轨迹范围可视化

在自动化焊接小车仿真规划中,切合实际生产的运动轨迹能够更加有效、正确地指导自动化小车的作业,通过对自动焊接小车的仿真,着重观察自动焊接小车的可达性<sup>[4]</sup>。

设计规划中的 X 方向可以沿导轨方向一直运行,直至设定的导轨长度尺寸,针对特殊大型焊接件,可以通过延长导轨长度以实现一次性焊接成型。对于自动焊接小车在 Y 方向的可达性,可以通过伺服电机以及螺杆进行调节,焊接小车在 Z 方向的驱动范围直接决定了焊枪对于焊缝的直接可达性,可以通过螺杆进行上下调节焊枪的高度,以及转动夹持机构进行焊枪角度的调整。

仿真结果如下: X 向运动范围: 0 ~ 8 500 mm; Y 向运动范围: 0 ~ 320 mm; Z 向运动范围: 0 ~ 190 mm; 焊枪旋转角度:  $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

通过运动学仿真,可以验证小车的运动范围满足要求,与理论设计值吻合,满足多层多道自动焊接小车运行所需尺寸范围。

### 3.3 干涉检查及分析

在自动化焊接小车的装配过程仿真以及焊接作业仿真中,其可达性、可行性、合理性的判别标准主要

取决于焊接小车装配及作业过程中的干涉检查结果。通常的干涉检查分为两类:一类为静态干涉检查,另一类为动态干涉检查。静态干涉检查主要用于判断机械结构的可装配性,是否发生空间重用等现象,可以有效发现零件设计不合理现象<sup>[5]</sup>。

动态干涉检查包括对自动化焊接小车工作状态的过程检查,如果在自动化焊接小车焊接过程中,存在焊枪与工件、车间生产资源等其他物品发生干涉,则干涉零件会高亮(默认红色)显示并且停止仿真运动。

通过对机构干涉情况的分析,对相关零件、部件设计结构进行调整,或者对安装工艺进行优化等,确保机构能够正常有效的运行。

当发生焊枪无法按照工艺设定的焊缝进行有效焊接的时候,根据软件中设计的报警装置,可以使得焊接小车停止焊接运动并反馈显示出焊枪距离工件的间隙尺寸,使工作人员能够更便捷有效地进行焊接工作的调整。

## 4 结束语

本文主要结合船体大合拢横焊缝焊接需求,对船体合拢自动焊接小车进行结构与仿真。该自动焊接小车可实现多层多道焊缝的自动化焊接,设计中采用了直流无刷电机、高精度行星减速机实现其动力驱动,性能稳定。应用仿真软件 Process Simulate 进行自动化焊接小车的仿真环境构建,实现自动焊接小车的三维装配仿真,验证其装配序列干涉性。继而通过各个运动轴的运动副设置,对设计的机械机构进行运动学仿真,对其进行可视化仿真验证,并关联其相关的三维零件、装配资源等模型,进行焊接工艺参数设置,实现焊接过程仿真验证,完成三维装配过程的可视化输出。完成了自动化焊接设备的虚拟现实应用技术的突破,为实现智能数字化工厂提供坚实的支撑。

## 参考文献:

- [1] 李宪政.国内焊接机器人应用的快速发展及认识误区[J].焊接,2019(04):5-15,65.
- [2] 张沈.船体分段吊装作业典型运动过程分析及仿真研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [3] 郑志军.船体分段装配过程的现场可视化应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [4] 张帆.船体分段吊装工艺设计系统关键技术研究与应用[D].大连:大连理工大学,2022.
- [5] 徐振宇.动态任务需求下船体分段制造的物流集成调度研究[D].上海:上海海事大学,2023.