

# 一种坞内船体外板喷涂新方法研究

林 焰<sup>1,2</sup>, 衣正尧<sup>\*1,3</sup>, 李玉平<sup>3</sup>, 纪卓尚<sup>1</sup>, 裴 斐<sup>1</sup>, 李 冰<sup>1</sup>

- (1. 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 大连中远川崎船舶工程有限公司, 辽宁 大连 116052)

**摘要:** 以某船厂实际工艺为案例, 分析了船舶岸壁坞内外板喷涂作业现状, 探讨了基于国内外爬壁机器人技术的坞内船体外板喷涂的成套设计策略构想, 包括成套系统设计、爬壁机器人设计、可行性设计思想。最后, 应用某船厂实际算例, 对参数指标、机器人本体设计、射流及漆雾回收设计、自动控制及轨迹规划设计、防坠防刮碰安全设计等方面进行了新方法研讨。研究表明, 此种坞内船体外板喷涂新方法研究可行。

**关键词:** 坞内船体外板喷涂; 爬壁机器人; 船体大直面; 艙框架曲面; 工艺分析; 轨迹控制

**中图分类号:** U671.918 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201801007

## 0 引言

智能制造已成为船舶建造发展的重要方向。由于船体部件的大结构、大表面、大空间的特性, 在一些高空作业环境下, 采用爬壁智能设备代替人工作业存在一定的先进性<sup>[1-2]</sup>。船舶的坞内外板喷涂是整个船舶涂装的末道, 由于工人操作高架车, 手持喷枪作业, 作业高度达 40 m, 统计存在如下风险: (1) 工人长期站在高架车上高空眩晕作业, 存在坠落风险, 曾有坠亡安全事件发生。 (2) 曾有高架车碰撞外板的安全事件发生。 (3) 曾有工人手持高压喷枪误伤人体的安全事件发生。 (4) 为保证作业轨迹均匀, 工人一旦上车作业, 要 4~5 h 不下车, 存在不能按时饮水排泄等生理危害。 (5) 工人手持喷枪近距离喷涂作业, 防海生物等毒性漆品的扩散漆雾对工人和船坞及海水污染严重。上述风险的存在, 亟须研究一种坞内船体外板喷涂施工的新方法来取代人工作业, 实现安全用工和解决环境污染。

工业和信息化部在 2016 年 8 月的《智能制造

工程实施指南(2016—2020)》中明确提出船体外板涂装、环缝涂装等技术领域为智能制造成套装备集成创新重点。因此, 随着智能制造理念在造船领域的不断深入, 基于机器人技术对坞内外板喷涂施工的新方法研究十分必要。

爬壁机器人采用电磁、永磁、真空、仿生黏着等附壁技术, 能够搭载清洗设备等, 在竖直或倾斜壁面上进行极限作业, 以降低危险行业的用工安全和用工成本。目前, 国外在核工业、石化、电力、建筑等领域有小型爬壁机器人的应用<sup>[3-4]</sup>, 而涉及造船施工的大型爬壁机器人, 特别是船体外板坞内作业领域的应用和研究还较少。近几年, 美、日、德、韩等机器人强国及老牌和新兴造船大国逐步深入该领域的研究, 主要有日本 Urakami 技术研究所、韩国 Daegu Mechatronics & Materials Institute 等<sup>[5-8]</sup>。国内近年来主要有大连海事大学、华南理工大学等开展了船舶外板除锈爬壁机器人的研究, 而在船舶外板喷涂的爬壁机器人应用领域, 仅哈尔滨工业大学等针对大钢制表面做

收稿日期: 2017-05-06; 修回日期: 2017-11-25。

基金项目: 工业和信息化部高技术船舶科研计划资助项目(工信部联装[2014]498号); 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室专项经费资助项目(S15205); 海洋可再生能源专项资金资助项目(QDME2013ZB01); 广东省科技计划资助项目(2016B090918092)。

作者简介: 林 焰(1964-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: linyanly@dlut.edu.cn; 衣正尧\*(1983-), 男, 博士, 在站博士后, E-mail: yizhengyao@163.com。

过爬壁机器人样机基础概念研究<sup>[9]</sup>,其坞内涂装工艺基础研究与当今总段造船工艺要求的紧密结合还存在一定差距。

针对上述难点,本文提出一种基于爬壁机器人技术的坞内船体外板喷涂施工新方法,应用成套设计理论和算例分析,在概念设计阶段进行探讨。

## 1 坞内外板涂装作业现状分析

### 1.1 典型船厂人工作业分析

以大连某船厂为例,涂装建造过程分为车间钢板、分段等防锈底漆涂装、坞内焊缝等补涂、坞内船体外板防污漆涂装、甲板与舾装件的码头涂装等工艺阶段,一般船体外板的涂装无质量问题或长期水下停泊问题则无需二次进坞。船坞内的涂装施工,主要是喷涂船体外板最外层表面漆,包括两舷外板约 90% 的大直面表面、艙框架复杂大曲率约 10% 的复杂曲面。具体作业区域为直底部、水线部、干舷部的外表面,如图 1(a) 所示,总体表面共涂两种漆,其中 A、B 部分各为一色,A 为防暴晒环氧防污涂料,B 为防海生物环氧防污涂料,而且 B 区需要防海生物生长,毒性更为强烈。

某 VLCC 喷涂方法为每组 3 个工人 1 台高架车,1 人在坞底拌料供料,高压无气喷涂加压到 15 MPa,1 人开高架车 40 m 高空驾驶,1 人在高空手持喷枪保持与外板 200~500 mm 喷距,如图 1(b) 所示。喷枪沿船板以 1 m/s 速度左右喷涂,随

高架车上下运动,喷涂轨迹呈之字形,如图 1(c) 所示,最终在船体外板表面均匀建立与底漆接触良好的 150  $\mu\text{m}$  防污漆膜。作业特点:(1) 艙跨距长、船底至甲板空间高、喷涂面积大、艙框架曲面复杂。(2) 存在粉尘、漆雾、漆毒、噪音等对人和环境的危害和污染。(3) 存在高空坠落、碰撞、刮碰船板等人机作业风险。

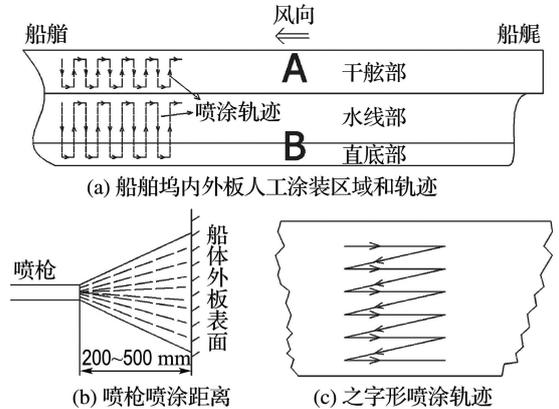


图 1 船舶坞内外板喷涂人工作业现状

Fig. 1 Ship shell plate artificial spraying status in dock

### 1.2 设计指标分析

设计技术指标:以上述 VLCC 为例,在坞内进行图 1(a) 所示 A、B 两部分喷涂,实际人工作业数据如表 1 所示,人工喷涂作业效率约 44  $\text{m}^2/\text{h}$ 。可见喷涂作业面积大,人力投入多,占坞时间长,作业效率较低。

表 1 某 VLCC 坞内外板喷涂实际人工作业数据

Tab. 1 VLCC artificial spraying data of ship shell plate in dock

项目	喷涂面积/ $\text{m}^2$	高架车数/台	人数/人	完成时间/d	完成工时/h	效率/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$
干舷部	6 282	6	18	1	144	43.6
水线和直底部	16 837	8	24	2	384	43.8
总计	23 119	14	42	3	528	—

设计机器人往复喷枪覆盖横截面距离 1 m,非重叠区横截面距离 0.8 m,机器人行进速度为 0.12 m/s,设换枪变轨迹效率折损系数 0.5,则机器人效率约为 180  $\text{m}^2/\text{h}$ 。机器人单机每小时效率指标是人工的 3~4 倍。设计的基本技术要求:以 VLCC 为例,船体表面约 24 000  $\text{m}^2$ ,艙跨距长 200~300 m,船底水线至船顶甲板高 2~40 m。要求能够完成该大表面大垂直面、大曲率大曲面、大跨距、大高度下,全覆盖、无碾压、均匀涂装,无流挂、无

漆雾污染、解放工人高空风险和漆毒危害的作业。

## 2 成套设计策略分析

### 2.1 成套系统设计

基于船厂需求和解决涂装冲突的成套创新系统设计,首先要解决基本问题,根据船厂的目前实际作业情况,采用爬壁机器人功能对应模拟,即首先要解决人的高空作业、人的近距离喷涂危害,机器人附壁、运动、喷涂等代替人工作业的基本问

题<sup>[10-11]</sup>,因此,基础性的成套系统设计,在保障喷枪搭载、油漆供料、自动控制3个基本功能前提下,可分为3个子系统:(1)爬壁机器人搭载的喷涂执行机构系统;(2)液压远程高空供料喷涂系统;(3)远程自动控制系统.基础性成套系统设计如图2所示.

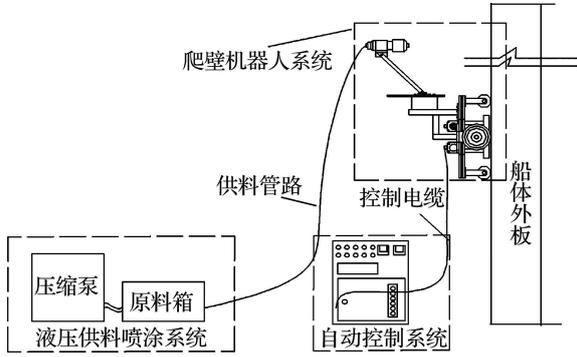


图2 典型坞内船体外板喷涂爬壁机器人成套原理

Fig. 2 Complete sets principle of wall climbing robot for typical ship shell plate spraying in dock

根据成套系统设计的功能原理,坞内船体外板喷涂爬壁机器人成套设备的任务属性可表示为

$$\mathbf{T} = (\mathbf{H} \quad \mathbf{R} \quad \mathbf{C} \quad \mathbf{S}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{T}$ 表示成套系统设计的工作任务集, $\mathbf{H}$ 表示船体的工作任务集, $\mathbf{R}$ 表示机器人本体的工作任务集, $\mathbf{C}$ 表示控制系统的工作任务集, $\mathbf{S}$ 表示供料系统的工作任务集.

根据任务内容详细分解,船体的工作任务集如式(2),机器人本体的工作任务集如式(3),控制系统的工作任务集如式(4),供料系统的工作任务集如式(5):

$$\mathbf{H} = (h_1 \quad h_2 \quad h_3) \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = (r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4) \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = (c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5) \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = (s_1 \quad s_2 \quad s_3) \quad (5)$$

式中: $h_1$ 表示船艏部分, $h_2$ 表示船艉部分, $h_3$ 表示船体两舷部分; $r_1$ 表示机器人吸附功能, $r_2$ 表示机器人驱动功能, $r_3$ 表示机器人运动功能, $r_4$ 表示机器人控制功能; $c_1$ 表示机器人本体控制功能, $c_2$ 表示船体全站视觉控制功能, $c_3$ 表示供料系统的泵控制功能, $c_4$ 表示喷枪控制功能, $c_5$ 表示全系统综合控制功能; $s_1$ 表示自动兑料功能, $s_2$

表示自动拌料功能, $s_3$ 表示自动驳料功能.则成套系统设计的任务分析矩阵可表示为

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{R} \\ \mathbf{C} \\ \mathbf{S} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & r_4 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 \\ s_1 & s_2 & s_3 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

而在上述3个子系统中,爬壁机器人技术的完善和有效应用,是成套系统设计的关键和首要任务.

大型爬壁机器人在坞内外板喷涂施工的难点主要有<sup>[12-13]</sup>:(1)所搭载的船体工件处理工具,诸如打磨、除锈、喷涂等执行机构大、负载大,导致吸附力大、驱动力大,而吸附力、驱动力大,又造成了吸附机构、驱动元件及其本体重量大,整机尺寸大、重量大.(2)机器人外形大、本体重、结构复杂,造成船舶船艏等复杂曲面附壁能力差,运动性能差、不灵活,复杂曲面的吸附、越障问题突出.(3)船体外板表面积大、船底至甲板纵向高度高、船艏横向跨距大,造成机器人在大空间作业的全线智能控制、安全防护、供电供气供料及其后处理工作困难.

## 2.2 爬壁机器人设计

### (1) 爬壁机器人的基本功能设计

爬壁机器人吸附方式、驱动方式、行走方式的选型是其3个基本要素,结合这3个基本要素,成套系统中的爬壁机器人基本功能设计为永磁间隙吸附、电机驱动、轮式行走.该基本功能设计可分解为永磁吸附力选型及布置设计、电机驱动力选型及布置设计、轮式行走运动选型及布置设计、框架本体高强度小型轻量化设计.

### (2) 爬壁机器人的功能拓展设计

完成满足基本要求的爬壁机器人基础性设计后,需进一步进行系统的功能拓展,结合船厂船坞目前的实际状况,提升环境和人员的防护能力,要为机器人系统增加漆雾回收、安全防坠、轨迹规划、检测监测等系列功能系统.

### (3) 机器人本体的设计难点

负载大则要求机器人吸附力大、驱动转矩大,然而,机器人吸附力大会造成机器人行走和转弯困难,也会导致吸附元件重量加大,同时,驱动转矩大则会导致所选的驱动元件重量加大.而且,磁吸附力大还会带来运动、吊装、保养、防坠、框架等系列技术问题.爬壁机器人的设计难点逻辑关系如图3所示.

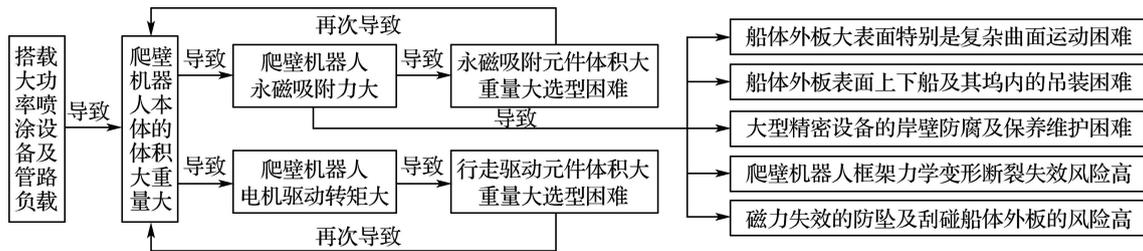


图 3 坞内船体喷涂爬壁机器人设计难点逻辑关系图

Fig. 3 Design difficulties logic diagram of wall climbing robot for ship shell plate spraying in dock

### 2.3 可行性设计思想

船厂需要环境友好、高效高质的坞内喷涂机器人,这要求机器人搭载能力大、本体机构及智能化复杂程度增加、坞内紧凑空间机器人的作业灵

便性能更好,这带来坞内作业空间、人机交互、环境环保、涂层高质量、施工高效率等各方面挑战。根据上述分析,建立应用爬壁机器人的坞内船体喷涂施工设计流程图,如图 4 所示。

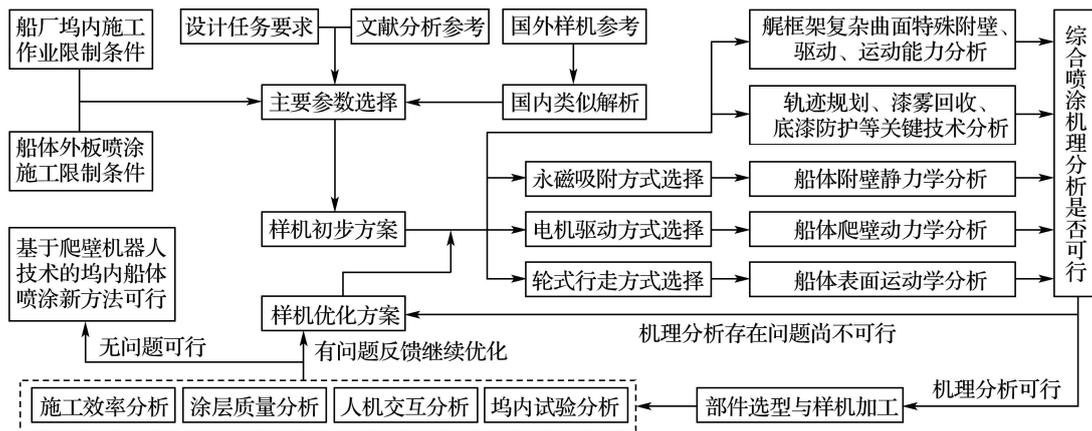


图 4 应用爬壁机器人的坞内船体喷涂作业设计流程图

Fig. 4 Design flow chart for ship shell plate spraying in dock using wall climbing robot

## 3 案例设计探讨分析

本课题组跟踪船厂工艺,以大连某船厂 VLCC 坞内船体外板喷涂施工为作业案例目标,提出一种基于爬壁机器人搭载的拖涂式往复滑台喷涂模拟系统方案概念设计,包括紧凑船坞空间作业、大量油漆供料、漆雾回收、漆膜检测、轨迹规划、全站视觉检测、上下船体、保养维护、安全防坠、全覆盖无碾压、轨迹爬壁拖涂等。

在算例方案的设计中,充分考虑并联动船下的坞内空间限制、艤框架球鼻艏特殊曲面的适应性、艤艏大跨距的油漆供料自动伴随能力、艤艏大跨距爬壁自适应防坠性能,从智能化角度拓展到基于爬壁机器人搭载的船体两舷多机联动全站视觉、基于爬壁机器人搭载的多机轨迹全覆盖无碾

压对接、基于爬壁机器人喷涂的遍历轨迹、爬壁机器人最低点灵便下船。

### 3.1 设计参数指标

根据船厂工艺分析及应用爬壁机器人成套设计可行性分析,设计参数指标如表 2 所示。

### 3.2 机器人本体设计

分别建立爬壁搭载的机器人系统模型,并将机器人模型映射到实船三维模型中,来模拟机器人船坞内工作环境<sup>[14-17]</sup>,如图 5 所示。

### 3.3 关键系统分析

3.3.1 喷漆射流及漆雾回收系统分析 爬壁机器人代替人工,尽管可以解放人工高架作业和远离漆雾点作业,但是油漆散射的毒性漆雾仍然会对船坞大气造成污染,而且漆雾长期漫射会附着在机器人本体上,造成机器人本体机械结构的黏

表2 一种基于爬壁机器人技术的坞内船体喷涂施工方案设计参数

Tab.2 Design parameters of wall climbing robot based ship shell plate spraying in dock

爬壁机器人主机项目	参数	爬壁机器人辅机项目	参数
最大工作高度/m	40	供料系统压力/MPa	27
最小工作高度/m	2	真空回收压力/MPa	-0.06
最大工作跨度/m	300	防护罩质量/kg	<1.5
机器人本体质量/kg	<60	防护罩半径/mm	150
机器人行进速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.12	喷嘴往复滑台水平移动速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1
喷嘴往复滑台水平移动距离/m	1.1	喷嘴控制阀出口压力可调范围/MPa	15~25
机器人驱动轮距离(外围)/m	<0.8	喷嘴距离船舶外板可调节高度/mm	200~500
往复喷枪覆盖横截面距离/m	1	机器人换枪变轨迹效率折损系数	0.5
非重叠区横截面距离/m	0.8	机器人效率/(m <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	约180
本体外形尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	1 120×800×600	单船并联作业机器人/台	4

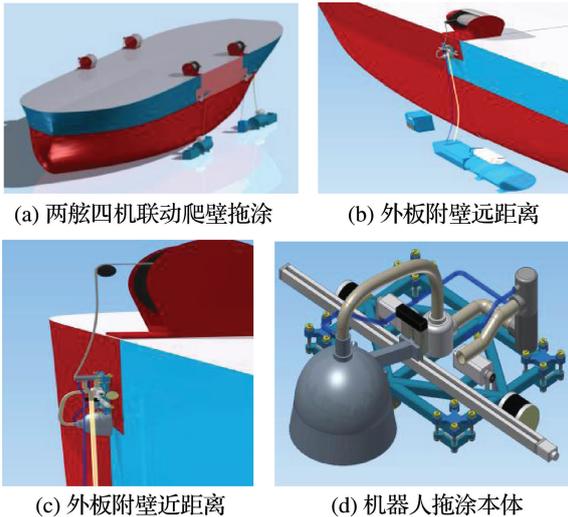


图5 三维概念设计系统模型

Fig.5 3D concept design system model

着,特别影响喷涂往复丝杠及驱动行走轮等运动部件的运动特性。

技术设计特点:(1)在喷嘴处设置防护罩。防护罩设计为圆形,以防止受瞬时大风外力荷载;采用树脂材料降低重量;内置防护膜根据表面附着的漆雾量更换,防止涂料长时附着防护罩内表面;罩体安装在喷嘴左右横移丝杠滑台上,随喷嘴左右横移大跨度喷涂运动。(2)喷嘴距离及喷涂控制。喷嘴布置在防护罩中心,根据工艺要求在与船舶外板表面200~500 mm内自动可调,以保证喷涂质量。(3)拖带管路防弯矩和缠绕。采用自由圆周旋转连接器使拖带管路始终保持顺沿船舶外板表面自由向下,防止拖带管路弯矩和缠绕,避免机器人运动造成管路弯翘力矩和缠绕,避免管路弯

翘与已涂的表面接触,造成已涂漆膜的破坏。(4)漆雾真空回收。在地面布置真空回收泵组和废料回收箱将漆雾回收;同时,避免低温回收漆雾附着管壁或堵塞回收管,在机器人本体上布置加热器,使漆雾保持高温便于流动。(5)人机交互操作。操作者首先开动爬壁机器人搭载作业,机器人喷涂过程中,开动真空回收泵,进行实时漆雾回收。机器人开动时,当机器人受远程遥控进入喷涂区域后,喷嘴才可以开枪喷射,由喷射控制阀受人工远程操作。

3.3.2 轨迹规划及自动控制系统分析 机器人的控制系统主要由本体控制单元、供料系统控制单元、漆雾回收控制单元、检测监测单元组成,采用全站式远程视觉自主规划控制,彻底解放人工作业需要的实时跟机状态。通过便携式综合控制台,显示预施工船型基本参数、船型外板喷涂面积、干舷喷涂面积、水线面积、直底面积,规划出拟喷涂时间、拟喷涂的主尺度、作业高度、作业宽度,并实时显示喷枪与钢板的距离、角度,往复丝杠水平角度,通过陀螺仪检测机器人本体水平状态,以控制机器人平行姿态调整。同时,实时显示机器人本体水平调整状态、往复滑台水平位置调整状态、机器人本体自动行进挡位。人工开枪一键启动,行进视觉探测器自主视觉规划母船型作业,在母船型的作业轨迹规划中开启视觉记忆功能,在留用船型上可以快速自主规划作业。

喷涂轨迹的全船表面遍历作业是智能控制的集中体现,轨迹的严格规划与巡线依赖于自动控制。要构建机器人效率最大化作业轨迹,尽量避免

单机蛇形往复喷涂的重叠,同时避免单机蛇形往复的漏涂,以及避免机器人在最高及最低作业点转向时碾压已涂层及漏涂,特别是在双机对接会合的对接区域,既能够保证人工补涂区域最小化,又能够保证两台机均在最低点的直底部结束喷涂作业,以便爬壁吸附机器人安全方便下船。

3.3.3 防坠防刮碰安全系统分析 传统防坠系统采用安全绳索,但是船体外板艏艉跨距长达200~300 m,机器人从船艏工作到船艉,距离跨度大,防坠安全系统需要人为在甲板上跟踪拆装,且机器人坠落时虽然可防止直接掉落地面,但是在船体外侧的晃动容易划碰喷船板底漆。设计跟踪式安全绳绞缆防护器,搭建长跨距胀紧悬挂钢丝绳,支架定位可根据实际情况焊接在近似艏艉护栏处。防护器在该钢丝绳上自动寻找机器人位置,并始终跟踪机器人伴随行走作业。设计激光定位探测器和自动检测控制系统,基于三角判定原理始终保持防护器与机器人沿船体外板表面垂直,使安全绳始终处于垂直最短状态,防止因安全绳过长造成机器人坠落摆动或撞击船体。柔性收紧功能的安全绳实时收紧,且随着机器人作业的高度变化,机器人一旦失效坠落,机械式棘轮重力冲击拉力限位器立即启动收紧安全绳,实施对爬壁作业体定位保护。横向跟踪式安全绳绞缆防护器和纵向柔性收紧的悬挂安全绳的配合实施,使机器人在哪一点吸附失效坠落就在哪一点定位锁住,既不会沿船舶外板表面摇摆,也不会撞击船体外板,更不会沿垂直方向进一步下落。

## 4 结 论

(1)船舶外板坞内涂装的工艺自动化程度低,喷涂作业面积大,人力投入多,占坞时间长,作业效率较低。具有大表面、大跨距、高空作业、漆雾污染、复杂钢制曲面,坞内空间紧凑等喷涂特点的船舶外板涂装,亟须应用爬壁机器人技术进行解决。

(2)爬壁机器人在船坞内取代人工涂装仍然存在着一一定的制约,全覆盖、无碾压、安全防坠、漆雾回收、膜厚控制、复杂曲面轨迹规划等多功能作业技术问题还有待于深入研究。

(3)成套系统设计需从船厂用户角度出发,紧密联系现场工艺,对现场实际工艺需求进行分解,建立成套设计思想的任务流,重点解决爬壁机器

人技术的应用。

(4)算例设计中,紧密与现场工艺指标相结合,建立了三维概念设计系统模型,重点分析了喷漆射流与真空回收、轨迹规划与自动控制、防坠防刮碰安全等子系统,提出了相应的解决方案。

## 参 考 文 献:

- [1] DONG Weiguang, WANG Hongguang, LIU Aihua, *et al.* Design and analysis of a novel wall-climbing robot mechanism [J]. **Advanced Engineering Forum**, 2012, **2-3**:346-351.
- [2] AKINFIEV T, ARMADA M, NABULSI S. Climbing cleaning robot for vertical surfaces [J]. **Industrial Robot**, 2009, **36**(4):352-357.
- [3] IBORRA A, PASTOR J A, ALONSO D, *et al.* A cost-effective robotic solution for the cleaning of ships' hulls [J]. **Robotica**, 2010, **28**(3):453-464.
- [4] SOUTO D, FAINA A, DEIBE A. A robot for the unsupervised grit-blasting of ship hulls [J]. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, 2012, **9**:82.
- [5] CHOC S, KIM J D, LEE S G. A study on automated mobile painting robot with permanent magnet wheels for outer plate of ship [C] // **2013 44th International Symposium on Robotics, ISR 2013**. Seoul: IEEE Computer Society, 2013:1-4.
- [6] ZARGIEL K A, COOGAN J S, SWAIN G W. Diatom community structure on commercially available ship hull coatings [J]. **Biofouling**, 2011, **27**(9):955-965.
- [7] ORTIZ F, ALONSO D, ÁLVAREZ B. A reference control architecture for service robots implemented on a climbing vehicle [J]. **Lecture Notes in Computer Science**, 2005, **3555**:13-24.
- [8] HAN S C, KIM J H, KIM J H. Design and experiment of automatic painting robot using permanent magnet mobile robot in ship cargo tank [J]. **Journal of the Korea Academia Industrial**, 2011, **12**(12):5450-5456.
- [9] 衣正尧,弓永军,王祖温,等. 用于搭载船舶除锈清洗器的大型爬壁机器人[J]. **机器人**, 2010, **32**(4):560-567.  
YI Zhengyao, GONG Yongjun, WANG Zuwen, *et al.* Large wall climbing robots for boarding ship rust removal cleaner [J]. **Robot**, 2010, **32**(4):560-567. (in Chinese)
- [10] EICH M, VOGELE T. Design and control of a

lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection [C] // **2011 19th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2011**. Corfu: IEEE Computer Society, 2011:1200-1205.

[11] 衣正尧,弓永军,王祖温,等. 新型船舶壁面除锈爬壁机器人动力学建模与分析[J]. 机械工程学报, 2010, **46**(15):23-30.

YI Zhengyao, GONG Yongjun, WANG Zuwen, *et al.* Dynamic modeling and analysis on a new type wall-climbing robot for ship wall rust removal [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2010, **46**(15): 23-30. (in Chinese)

[12] CHU B, JUNG K, HAN C S, *et al.* A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion [J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 2010, **11**(4):633-647.

[13] SAN-MILLAN A. Design of a teleoperated wall climbing robot for oil tank inspection [C] // **2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2015 — Conference Proceedings**. Torremolinos: IEEE, 2015:255-261.

[14] 林 焰,衣正尧,李玉平,等. 船舶外板拖涂式机器人的供料及漆雾回收防护罩系统及其作业方法: 201621225785.3 [P]. 2017-04-17.

LIN Yan, YI Zhengyao, LI Yuping, *et al.* The feeding and paint mist recycle shield system of hull

shell plate dragging painting wall climbing robot and working method: 201621225785.3 [P]. 2017-04-17. (in Chinese)

[15] 林 焰,衣正尧,李玉平,等. 船体外板爬壁作业体跟踪式安全绳绞缆防护器系统及其定位防护使用方法: 201621225877.1 [P]. 2017-04-27.

LIN Yan, YI Zhengyao, LI Yuping, *et al.* The tracing type safety rope protector system of hull shell plate dragging painting wall climbing robot and location protection working method: 201621225877.1 [P]. 2017-04-27. (in Chinese)

[16] 林 焰,衣正尧,李玉平,等. 一种船舶外板双机爬壁拖涂全覆盖无碾压轨迹作业方法: 201611003965.1 [P]. 2016-11-15.

LIN Yan, YI Zhengyao, LI Yuping, *et al.* Double wall climbing drag coating full coverage no rolling track working method of hull shell plate dragging painting wall climbing robot: 201611003965.1 [P]. 2016-11-15. (in Chinese)

[17] 林 焰,衣正尧,李玉平,等. 船舶外板爬壁拖涂式机器人及其作业方法: 201621225810.8 [P]. 2016-04-17.

LIN Yan, YI Zhengyao, LI Yuping, *et al.* Hull shell plate dragging painting wall climbing robot and working method: 201621225810.8 [P]. 2016-04-17. (in Chinese)

## Research on new method for ship shell plate spraying in dock

LIN Yan<sup>1,2</sup>, YI Zhengyao<sup>\*1,3</sup>, LI Yuping<sup>3</sup>, JI Zhuoshang<sup>1</sup>, PEI Fei<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1</sup>

( 1. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
3. Dalian COSCO KHI Ship Engineering Co., Ltd., Dalian 116052, China )

**Abstract:** Starting with comparative analysis of domestic and foreign wall climbing robot technology in dock, and the case based on a shipyard, the present situation of ship shell plate spraying in dock is analyzed in detail. Then the package design strategies of ship shell plate spraying in dock using wall climbing robot including package design principle, design principle of wall climbing robot, and feasible design idea are discussed. Finally, a new method for ship shell plate spraying in dock like parameter index, robot body design, jet and paint mist recovery, automatic control and trajectory planning, anti-falling and anti-scratching safety design are researched based on shipyard case. The research shows that the new method for ship shell plate spraying in dock is feasible.

**Key words:** ship shell plate spraying in dock; wall climbing robot; hull large vertical face; stern frame curved surface; process analysis; trajectory control