

引文格式:

陈建坤, 何凯, 方海涛. 具有壁面自适应能力的磁吸附爬壁机器人设计 [J]. 集成技术, 2022, 11(4): 19-30.

Chen JK, He K, Fang HT. Design of magnetic adsorption wall-climbing robot with adaptive ability to wall [J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(4): 19-30.

具有壁面自适应能力的磁吸附爬壁机器人设计

陈建坤^{1,2} 何 凯^{1*} 方海涛¹

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 为解决爬壁机器人在船舶货舱清洗过程中多壁面过渡的问题, 该文设计了一种具有壁面自适应能力的磁吸附爬壁机器人, 其包括磁吸附机构、自适应清洗机构和行走机构。该文首先通过建立机器人壁面过渡时的力学模型, 得到机器人磁吸附力的分布特点, 并据此设计出一种弧形磁吸附机构。然后利用 ANSYS Maxwell 3D 软件对该机构磁吸附力的分布进行优化, 以满足壁面过渡的需要; 此外, 还在机器人前端设计了一种自适应清洗机构, 通过对该机构的结构原理进行分析和实验, 验证了清洗机构也具有壁面过渡能力。最后通过模拟船舶货舱壁面的实际特点, 对机器人样机进行壁面过渡综合实验, 完成了机器人舱底过渡行走实验和舱顶过渡行走实验, 验证了该机器人的壁面自适应和舱内行走的能力。

关键词 爬壁机器人; 磁吸附; 壁面过渡; 船舱清洗; 磁力仿真

中图分类号 TP 242.2 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20211228001

Design of Magnetic Adsorption Wall-Climbing Robot with Adaptive Ability to Wall

CHEN Jiankun^{1,2} HE Kai^{1*} FANG Haitao¹

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

*Corresponding Author: kai.he@siat.ac.cn

Abstract In order to solve the difficulty of multi-wall transition in the cleaning process of ship cargo hold, a magnetic adsorption wall-climbing robot with adaptive ability to wall is designed in this paper, which includes magnetic adsorption mechanism, adaptive cleaning mechanism and walking mechanism. Firstly, a mechanical model of the robot in the process of wall transition is established to obtain the distribution

收稿日期: 2021-12-28 修回日期: 2022-01-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1309403)

作者简介: 陈建坤, 硕士研究生, 研究方向为爬壁机器人和永磁吸附技术; 何凯(通讯作者), 教授级高级工程师, 研究方向为精密制造与自动化技术, E-mail: kai.he@siat.ac.cn; 方海涛, 高级工程师, 机电系统自动化和嵌入式实时 Linux 应用。

characteristics of magnetic adsorption force and a magnetic adsorption mechanism is designed. Secondly, ANSYS Maxwell 3D software is used to optimize the distribution of magnetic adsorption force of the mechanism to meet the needs of wall transition. An adaptive cleaning mechanism is designed in the head of the robot, and the wall transition ability of the cleaning mechanism is verified by experiments. Finally, the robot prototype is tested according to the actual characteristics of cargo hold wall. Experiments show that the wall-climbing robot can complete the transition process between the bilge and the roof of the cargo hold, which verifies the robot's ability to adapt to the wall and walk in the cabin.

Keywords wall-climbing robot; magnetic adsorption; wall transition; cargo hold cleaning; magnetic simulation

Funding This work is supported by National Key R&D Program of China (2018YFB1309403)

1 引 言

长期航行的船舶, 由于经常处于恶劣的水上环境, 其货舱表面会大面积腐蚀掉漆生锈, 这些锈蚀会对货舱内的货物产生污染^[1], 因此, 当货船停靠码头更换装载货物时, 特别是当装载货物为粮食等干净货物时, 每次都需要对货舱进行大规模清洗, 清洗的任务量较大^[2]。目前, 货舱清洗主要的操作方式为工人手持清洗工具进行高空作业清洗, 这种方式危险系数大; 此外, 多数船厂为保证清洗的质量和效果, 大量使用化学品, 据统计, 一个船厂每年用于清洗货舱的化学品可达 30 万吨^[3], 造成了严重的环境污染。为改善当前货舱清洗的状况, 解决方法之一一是研制用于舱内清洗的爬壁机器人^[4], 以此来实现自动化清洗作业。

目前, 在船舶清洗领域, 爬壁机器人主要分为两种: 履带式和轮式^[5]。履带式爬壁机器人由于具有良好的壁面适应性和高负载能力等优点, 被广泛应用于船舶上大型表面的清洗作业中^[6]。丁问司等^[7]研制了一款永磁吸附式船舶爬壁机器人, 该履带机器人设计有辅助吸附和从动浮动功能的永磁万向轮机构, 极大地提高

了机器人的负载和越障能力, 但该机器人存在转向不灵活的缺点。王明强等^[8]设计了一款多履带全向爬壁机器人, 解决了履带式机器人转向效率低的问题, 其利用 4 条履带和履带上的单向轮实现了机器人精准转动, 但该机器人重量较大, 在进行船舶现场作业时, 安装拆卸维护较困难。针对现有爬壁机器人曲面适应困难的问题, Wang 等^[9]为现有的履带式磁吸附爬壁机器人的行走机构设计了两个四自由度的铰接机构, 使机器人可在更小曲率的壁面上行走, 曲面适应性较好。但是, 当增加了多自由度的铰接机构后, 给机器人壁面行走的控制增添了困难, 难以实现对机器人位置的精确控制。与履带式爬壁机器人相比, 轮式爬壁机器人有着重量轻、运动灵活、安装维护方便等优势。宋伟等^[10]研制了一款磁吸附爬壁机器人, 通过优化磁吸附组件提高了轮式爬壁机器人的磁质比和负载能力, 但目前该机器人仅适用在船舶均匀壁面上行走, 曲面行走或者越障能力不足。姜爱民等^[11]研制的一种双关节轮式机器人具有壁面过渡能力, 可以跨越壁面上大型障碍物, 但其控制难度高, 难以达到工业上要求的控制稳定性能。为了提高轮式爬壁机器人的壁

面适应性, 姜勇等^[12]设计了一种两轮过渡爬壁机器人, 该爬壁机器人采用两足轮式混合运动机构, 能够在两个具有一定夹角甚至垂直的壁面之间移动, 但该机器人负载能力不足, 无法搭载船用清洗设备完成船舶壁面的清洗作业。

船舶货舱内部壁面多为交叉壁面, 交叉壁面之间存在过渡角, 这就要求爬壁机器人具有壁面过渡能力。本文根据轮式磁吸附爬壁机器人行走灵活的优势, 优化了现有的磁吸附机构, 同时提高了清洗机构对壁面的适应能力, 设计出一种壁面自适应爬壁机器人, 并通过实验验证了该机器人在船舱壁面上运动的可行性, 实现了船舶货舱的绿色、高效、安全清洗。

2 爬壁机器人整机设计

散货船舱内部壁面不均匀, 且各个舱壁之间成一定角度, 最小夹角可达 120° ^[13]。图 1 为散货船舱内部结构, 其主要包括底边舱斜板、舷侧竖板、顶边舱斜板、舱口围板和舷侧肋板等结构。船舶外壁表面分布一致, 但货舱内部各个壁面结构较为复杂, 各壁面连续性较低, 这给利用机器人实现货舱内自动化清洗带来了挑战。针对该问题, 本文研制了一种可搭载清洗设备完成货舱内多壁面的过渡行走过程的爬壁机器人, 主要包括从底边舱斜板过渡到舷侧竖板, 从舷侧竖板

过渡到顶边舱斜板。通过机器人在货舱内多壁面的过渡行走, 可使单个机器人最大程度地完成舱内大面积壁面的清洗。

本文设计的壁面自适应爬壁机器人的整机结构如图 2 所示, 其包括行走机构、前后端磁吸附机构、自适应清洗机构和控制箱。机器人的行走机构(分为左右两个行走机构)利用电机和减速器所产生的强大驱动力带动橡胶轮转动, 来完成机器人行走, 机器人的转向则是利用左右两个行走机构的速度差来完成的。在该机器人结构中有一种特殊的弧形磁吸附机构, 安装于两个行走机构内侧, 通过该弧形磁吸附机构的磁吸附力可完成多角度壁面的过渡。同时, 该磁吸附力还保障了机器人的安全, 避免机器人在行走过程中出现打滑和倾覆现象。本文设计的爬壁机器人的前端搭载了一种壁面自适应清洗机构, 该机构可利用高压水来清洗舱内壁面上的锈斑等附着物, 且搭载了真空回收管对清洗后的废水回收处理。清洗机构上搭载的高压水管和真空回收管被束缚在管子固定器上, 提高了机器人运动的稳定性。整个机构有一定的柔顺性, 当遇到过渡面时, 可沿着壁面夹角过渡到另一个面。机器人的控制箱安装在整机的后端, 里面安装有无线通信装置, 可远程遥控操作机器人。

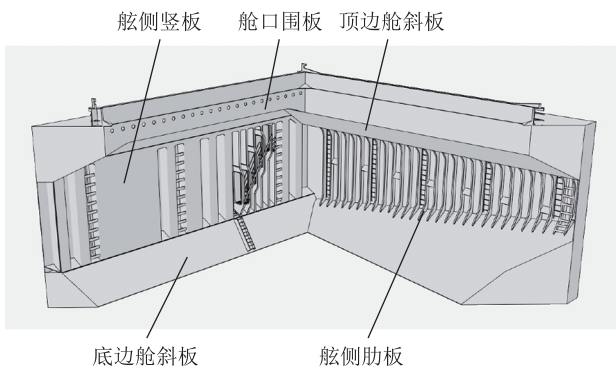


图 1 散货船舱内部结构图

Fig. 1 Structure of cargo hold

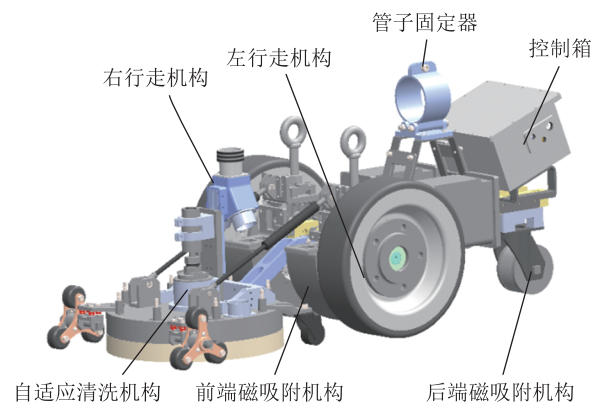


图 2 机器人结构示意图

Fig. 2 Structure of the robot

3 磁吸附机构设计与仿真

3.1 壁面过渡力学模型

为保证轮式爬壁机器人具有壁面过渡能力,需要调整磁吸附机构的磁力分布,特别是前端磁吸附机构。当机器人进行壁面过渡时,需要对前端过渡面有一个足够大的磁吸附力,使其获得的摩擦驱动力能够保证其完成壁面过渡。本研究的首要目标是确定该磁吸附力的力学关系,所以在机器人壁面过渡时,对其进行受力分析,分析结果如图3所示。其中, F_{mag1} 是机器人对前端壁面磁吸附力, F_{mag2} 是机器人前端磁吸附结构对底部接触面的磁吸附力, F_{mag3} 是机器人后端磁吸附结构对底部接触面的磁吸附力, F_{f1} 、 F_{f2} 、 F_{f3} 是机器人轮子与壁面接触处的摩擦力, F_{N1} 、 F_{N2} 、 F_{N3} 是机器人轮子与壁面接触处的支持力, G 为机器人的重力。

假设货舱内部壁面间的最大倾角为 60° , 当机器人从舱底过渡到底边舱斜板时, F_{mag1} 需要足够大, 使其提供的摩擦力 F_{f1} 可驱动机器人过渡到另一个面, 此时, 需要满足的力学关系沿 x 轴方向为:

$$2F_{mag1} \sin 60^\circ + 2F_{f1} \cos 60^\circ + 2F_{f2} \geq 2F_{N1} \sin 60^\circ + F_{f3} \quad (1)$$

沿 y 轴方向为:

$$2F_{N2} + 2F_{f1} \sin 60^\circ + F_{N3} \geq 2F_{mag1} \cos 60^\circ + 2F_{mag2} + G + F_{mag3} \quad (2)$$

由过渡的临界情况可知 $F_{N2} = 0$, 且 $F_{mag1} \approx F_{N1}$ 、 $F_{mag3} \approx F_{N3}$, 若轮子与壁面的摩擦系数为 0.7, 根据公式(1)和公式(2)可得到如下关系:

$$1.2F_{mag1} \geq 2F_{mag2} + G \quad (3)$$

3.2 磁吸附机构设计

根据公式(3)中 F_{mag1} 和 F_{mag2} 之间的关系可知, 前端磁吸附机构对前端过渡面的磁吸附力要远大于对底部接触面的磁吸附力, 且在整个壁面过渡过程中, 该力学关系稳定不变, 因此, 本文设计了一种弧形磁吸附机构, 分别安装于左右行走机构内侧, 以满足磁吸附力关系, 如图4所示。

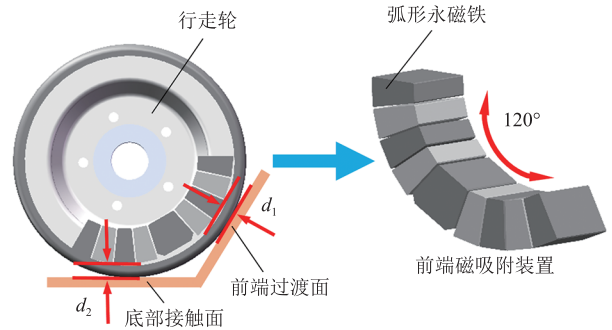


图4 前端磁吸附机构

Fig. 4 Magnetic adsorption mechanism in front

该弧形磁吸附机构由 9 块钕铁硼永磁体排列组成。为使磁吸附力达到最优, 即提高磁吸

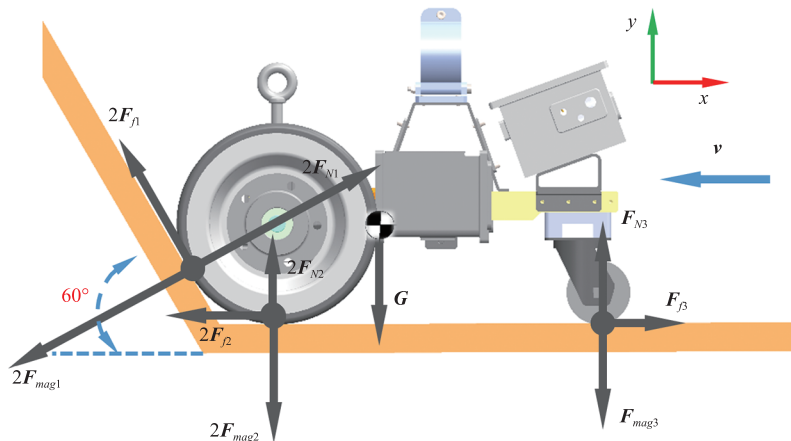


图3 机器人壁面过渡受力情况

Fig. 3 Mechanical model of robot wall transition

附力和磁铁质量的比值(磁质比), 本研究利用 Halbach 阵列的特点^[14], 将磁通密度集中于壁面接触端, 极大地提高了磁能利用率。此外, 该磁铁呈弧形结构, 弧度设计为 120° , 这样在壁面过渡过程中, 该机构始终会对接触面有磁吸附力, 不会发生失去磁力导致机器人坠落的情况。磁吸附力会随着磁体与壁面距离的增大而衰减, 为了使机器人获得过渡能力, 即满足公式(3)中磁吸附力的关系, 需要确定该弧形磁铁与前端过渡面的距离 d_1 和底部接触面的距离 d_2 的大小。当 $d_1 < d_2$ 时, 在过渡过程中, 整个弧形磁吸附机构上的磁吸附力从上到下是递减的。

3.3 磁吸附机构仿真

根据 Halbach 阵列磁铁充磁方向的特点, 本文列举了两种不同排列形式的磁铁阵列, 并对两

种排列形式在 $d_2=8\text{ mm}$ 时的磁吸附力进行了仿真分析。仿真分析结果如图 5 所示, 其中, 图 5(a) 为磁铁底部横向充磁的排列形式, 图 5(b) 为磁铁底部竖向充磁的排列形式。通过仿真结果可知, 第一种排列形式在壁面处的磁通密度大于第二种排列形式的磁通密度, 两种排列形式对壁面的磁吸附力 $F_{m1}=3\ 587\text{ N}$ 、 $F_{m2}=3\ 242\text{ N}$ 。综上所述, 第一种排列形式的磁能利用率大, 磁吸附性能更好, 因此, 本文设计的前端磁吸附机构中磁铁的充磁方向选用第一种磁铁阵列。

为确定磁吸附机构的吸附力与壁面间距 d_1 和 d_2 的关系, 将横向充磁的磁吸附机构的吸附力进行仿真, 得到 $F_{mag1}-d_1$ 和 $F_{mag2}-d_2$ 两种关系曲线, 如图 6 所示。

根据机器人防倾覆和防打滑的力学模型^[15],

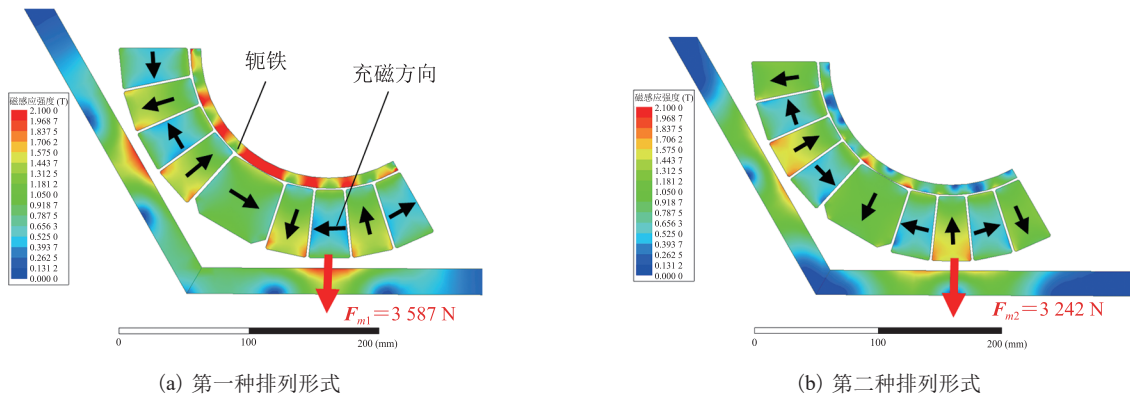


图 5 两种 Halbach 阵列的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of two Halbach arrays

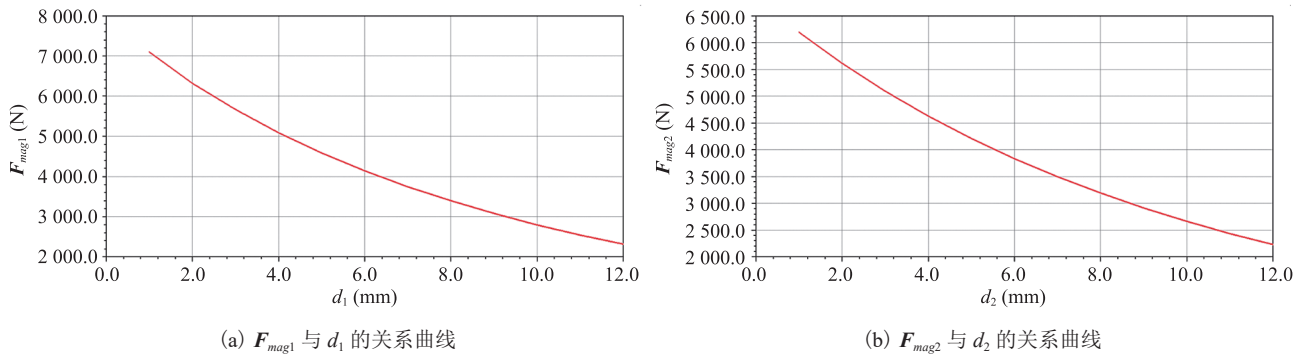


图 6 磁吸附力 (F_{mag1} , F_{mag2}) 与壁面距离 (d_1 , d_2) 的关系

Fig. 6 The relationship between magnetic adsorption force (F_{mag1} , F_{mag2}) and wall distance (d_1 , d_2)

假设机器人重 100 kg, 那么机器人对底部接触面的磁吸附力需满足 $F_{mag2} \geq 3\ 000\ \text{N}$ 。为保证机器人具有一定的越障能力, 特别是具有跨越 6 mm 高焊缝的能力, 磁吸附机构与壁面间需保持一定的间距, 故取 $d_2 = 8.5\ \text{mm}$, 由图 6 中曲线 (b) 可得此时 $F_{mag2} = 3\ 000\ \text{N}$ 。再根据公式 (3) 可知, 机器人对前端过渡面的磁吸附力需满足 $F_{mag1} \geq 5\ 834\ \text{N}$, 为了满足这个关系, 根据曲线 (a), 取 $d_1 = 2.5\ \text{mm}$, 可得 $F_{mag1} = 5\ 987\ \text{N}$ 。综上可得, 该前端磁吸附机构相对于壁面的安装位置为 $d_1 = 2.5\ \text{mm}$, $d_2 = 8.5\ \text{mm}$ 。

4 自适应清洗机构设计

磁吸附机构的设计使得机器人本体具有了壁面过渡能力, 但在实际工作过程中, 机器人需要搭载清洗机构才能完成壁面清洗作业, 因此, 清洗机构同样需要具备壁面过渡能力。目前, 船舶清洗爬壁机器人主要采用清洗盘式的清洗机构, 它搭载高压清洗装置和真空回收装置, 具有清洗和回收的双重功能^[16]。在清洗盘式结构的基础上, 本文设计的清洗机构增加一种三轮过渡机

构, 该机构由 3 个麦克纳姆轮各成 120° 对称分布构成, 可使清洗盘完成一定夹角壁面的过渡。清洗机构的末端通过转臂与机器人本体相连接, 转臂可以绕着连接处转轴转动, 自适应清洗机构壁面过渡的主要实现原理如图 7 所示。

当清洗机构到达过渡面时, 在水平推力 F_p 的作用下, 三轮过渡机构中与过渡面接触的麦克纳姆轮会与过渡面紧密接触, 另外两个麦克纳姆轮会绕着接触轮转动, 然后最上面的轮子经转动后会与过渡面接触。在整个壁面过渡过程中, 三轮过渡机构带动清洗盘转动了一定角度, 使得推力 F_p 产生了一个沿过渡面方向的分力, 在该力的作用下, 整个清洗机构开始沿过渡面移动, 最终完成壁面过渡。

为验证三轮过渡机构的可行性, 本文搭建了该机构的简易模型, 并进行了壁面过渡实验, 如图 8 所示。实验过程中, 通过给该简易模型施加一个沿行走壁面的推力, 使其向过渡面运动。实验发现, 三轮过渡机构可以完成过渡壁面处的转动、抬升和沿过渡面行走等动作, 因此, 将该三轮过渡机构搭载在清洗机构上, 可使清洗机构具有一定的壁面自适应能力。

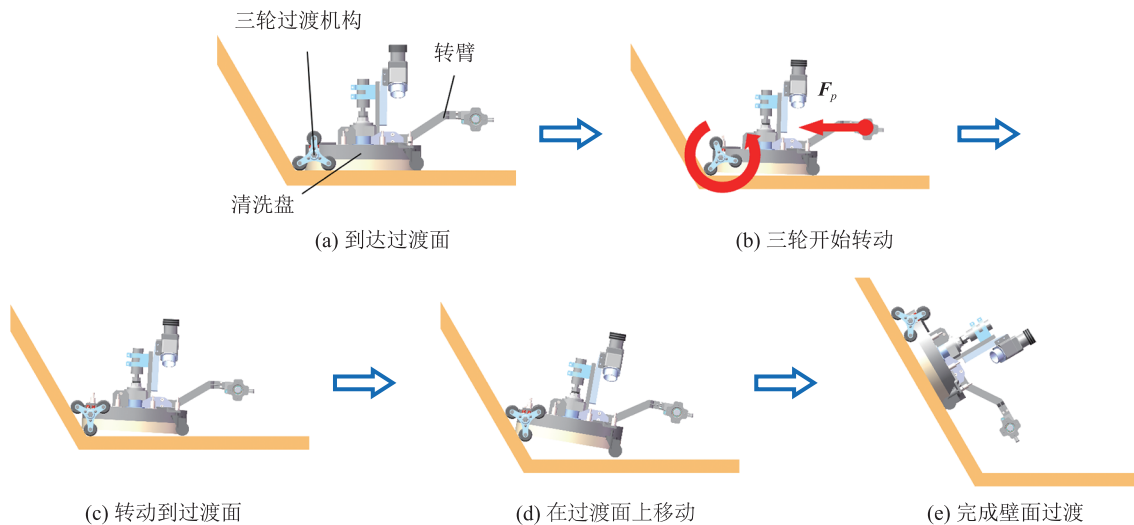


图 7 自适应清洗机构壁面过渡过程

Fig. 7 The wall transition process of adaptive cleaning mechanism

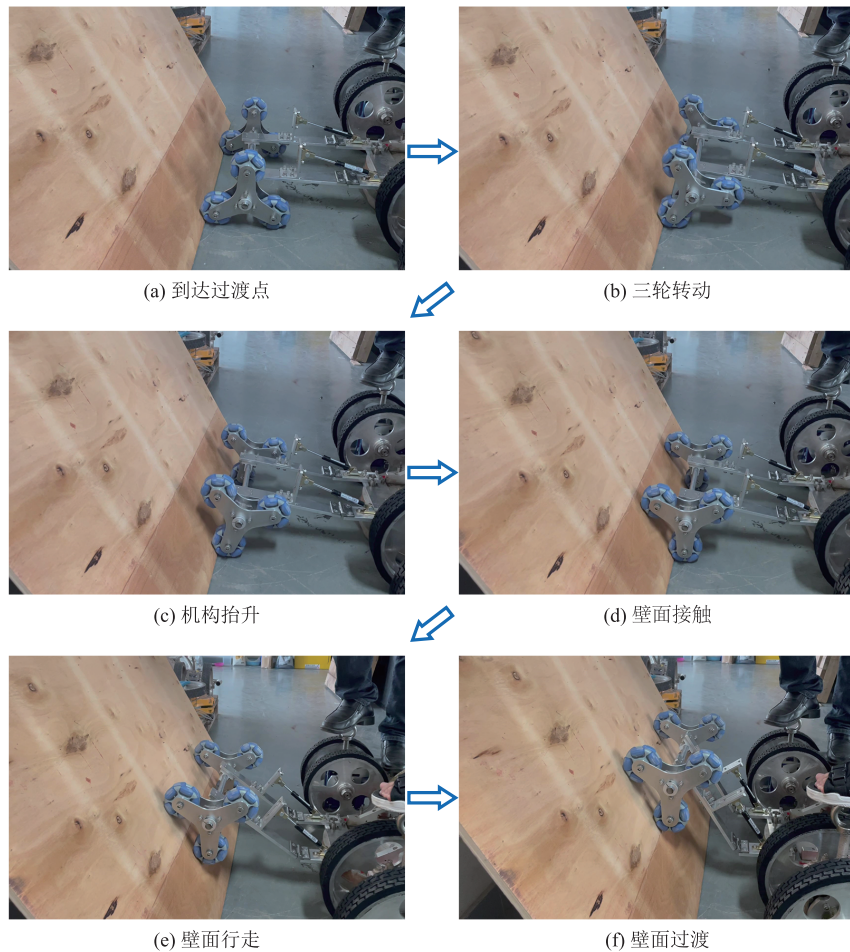


图 8 三轮过渡机构实验

Fig. 8 The three-wheel mechanism transition experiment

5 样机实验及结果分析

5.1 样机实验

将机器人各个模块进行装配后得到的样机如图 9 所示, 其包括自适应清洗机构、磁吸附机构、行走机构等。为验证该样机的壁面过渡能力及其在船舶货舱内行走的稳定性, 本文通过模拟货舱内的环境, 进行了相关实验, 包括底边舱行走实验、顶边舱行走实验。

(1) 底边舱行走实验

为模拟货舱底部的实际情况, 本文搭建了一个 120° 壁面夹角的实验平台, 使机器人沿着此壁面进行过渡测试, 如图 10 所示。机器人从底

边舱斜板以 2 m/min 的恒定速度行驶, 当遇到前端过渡面时, 搭载三轮过渡机构的清洗盘会沿着前端过渡面慢慢移动。在移动过程中, 整个清洗机构相对于机器人本体向着过渡面方向转动。当清洗盘完全贴合过渡面时, 机器人前轮刚好运动到过渡面处。此时, 磁吸附机构作用于过渡面和行走底面, 在磁吸附力的作用下, 机器人脱离底边舱斜板开始沿着竖直过渡面行走。当后轮运动到过渡面时, 机器人完成了从底边舱斜板运动到舷侧竖板的过程。

(2) 顶边舱行走实验

货舱内顶边舱斜面和舱顶面之间的夹角最大为 120° , 为验证本文研制的爬壁机器人具有从顶

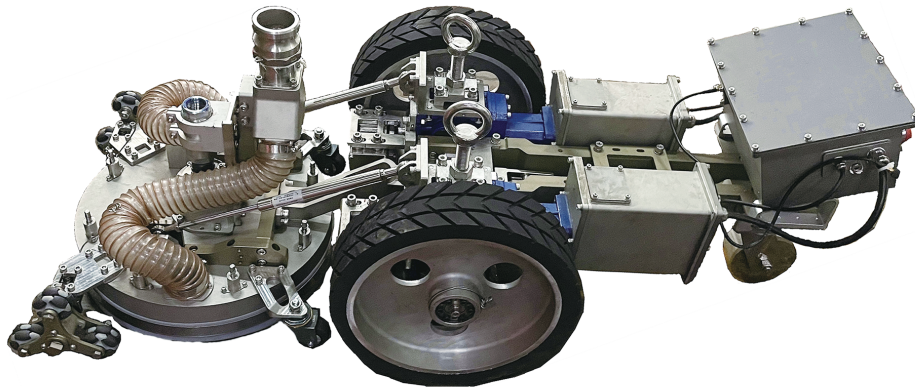


图9 机器人样机

Fig. 9 Robot prototype



(a) 运动到过渡点



(b) 三轮机构转动



(c) 清洗盘转动



(d) 清洗盘抬升



(e) 前轮接触过渡点



(f) 前轮过渡



(g) 后轮过渡点接触



(h) 后轮过渡

图10 底边舱行走实验

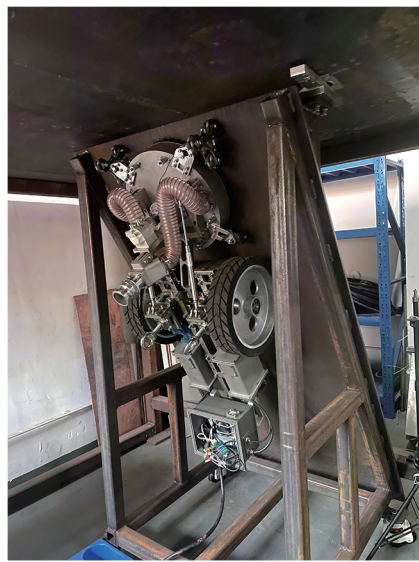
Fig. 10 Cargo bottom walking experiment

边舱斜面到舱顶面的过渡能力, 本实验搭建了两块夹角为 120° 的钢板, 对货舱顶部的壁面特点进行模拟仿真, 机器人的顶边舱行走实验过程如图 11 所示。实验过程中, 机器人从顶边舱斜板开始运动, 当自适应清洗机构运动到顶部过渡面时, 过渡面会给清洗机构一个反作用力, 此时连接机器人本体和清洗机构的伸缩推杆开始作用, 伸缩推杆给清洗机构一个沿壁面法线方向的推力, 避免清洗机构在壁面反作用力和自身重力的作用下倾覆。由图 11 可知, 当清洗机构过渡到舱顶壁面后, 整个机器人的前轮行走机构也在磁吸附机构的作用下完成了过渡动作。在整个顶边舱行走实验过程中, 机器人行走稳定, 未发生倾

覆和脱落的情况。

5.2 结果分析

针对现有爬壁机器人在船舶货舱内无法完成多壁面过渡的问题, 本文研制了一种壁面自适应爬壁机器人, 通过仿真分析和样机实验, 验证了该爬壁机器人具有一定的壁面过渡能力。本文建立了两个实验平台——舱底实验平台和舱顶实验平台, 搭建的过渡壁面夹角为 120° , 通过壁面行走实验, 结果表明磁吸附机构可以提供过渡所需的磁吸附力, 且清洗机构中的三轮过渡机构能够完成转动、抬升和过渡等动作。综上所述, 本文研制的爬壁机器人整机可以完成从舱底面到舱顶面的行走过程, 满足货舱清洗的需求。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

图 11 顶边舱行走实验

Fig. 11 Cargo top walking experiment

本文还对国内外相关的磁吸附爬壁机器人进行了讨论,发现有大量研究对爬壁机器人的壁面过渡能力进行了仿真分析和样机试验。与王洋等^[17]研制的自适应曲率立面的分体柔性爬壁机器人相比,本文研制的爬壁机器人不仅可以适应一定曲率的凹面和凸面,而且可以适应一定夹角的壁面,作业和应用场景更加广泛。Eto 等^[18]设计的壁面自适应轮式爬壁机器人可以攀爬多角度壁面,但是与本文设计的机器人相比,该机器人磁吸附能力弱,无法搭载重量大的清洗机构。Tche 等^[19]针对垂直面过渡和曲面行走设计了一种磁轮式爬壁机器人——利用前后两个磁轮和辅助轮的支撑作用完成壁面过渡,该机器人的主要功能是实现各种不规则壁面的表面检测,但无法应用于货舱壁面的清洗作业,且两轮的结构稳定性较差。本文设计的磁吸附机构采用了 Halbach 阵列,与现有的甲型磁路和乙型磁路的磁铁排列^[20]相比,该磁铁排列形式的磁能利用率更高。刘峰等^[21]将 Halbach 阵列应用于履带式爬壁机器人的永磁吸附单元,基于传统的 Halbach 永磁体阵列,该研究在弱磁侧加入轭铁,有效地减少了弱磁侧的磁场泄漏。此外,刘峰等^[21]还研究了磁体阵列的宽度、高度、厚度以及轭铁的高度对吸附力和吸附效率的影响,这为本文机器人磁吸附机构的优化提供了参考,但该永磁吸附单元只在行走底面上产生磁吸附力,无法满足壁面过渡对吸附力的要求。鉴于轮式机器人应用该磁铁阵列可很大程度减少机器人自重,安磊等^[22]设计的轮式爬壁机器人采用了一种弧形磁吸附机构,本文在该磁力机构的基础上,增加了 Halbach 阵列的充磁方向并优化了磁力分布,为机器人的稳定行走提供了充足的磁吸附力,同时保证了机器人能够完成最小 120° 夹角壁面的过渡。

本文研制的壁面自适应爬壁机器人具有货舱清洗和除锈双重功能,该机器人行走稳定,且可搭载真空回收装置防止清洗后的废水污染环境,

真正实现了高效、安全、绿色的清洗作业。但是,该机器人目前在应用上存在一定的局限性。首先,该机器人的壁面过渡夹角最小为 120° ,无法适应更小的壁面夹角甚至垂直面;其次,该机器人主要适应的行走壁面为凹面,当在角度过小的凸面行走时,容易失去磁力导致设备脱落。后期将对机器人的磁吸附机构进一步优化,解决机器人垂直面过渡的难点,并增强机器人清洗机构的强度,提高清洗作业的效率。

6 结 论

本文通过磁力仿真分析和样机实验,对货舱清洗机器人的壁面过渡特点进行研究,设计了一种弧形磁吸附机构和自适应清洗机构。针对一般的磁吸附机构吸附力不足的缺点,本文利用 ANSYS Maxwell 3D 仿真软件进行了磁力的仿真优化,优化了磁吸附机构周围的磁通量分布,使得磁吸附机构对壁面的磁吸附力满足壁面过渡的力学关系。在解决机器人本体的过渡问题后,又针对壁面清洗机构的壁面过渡,设计了一种三轮过渡机构,将该机构安装于清洗盘上,可实现壁面清洗机构对倾斜壁面有一定的自适应能力。

目前,针对爬壁机器人在船舶货舱内部多壁面过渡的问题,本文进行了相关实验,并得到了合适的解决方案,但是未进行机器人在作业现场长时间工作的实验,不能得出机器人可在作业现场进行连续工作的结论。当机器人进行清洗作业时,会产生大量的水雾,这对机器人的防水性提出了挑战。此外,本文研制的爬壁机器人主要针对舱底面、舷侧面和舱顶面大范围壁面的清洗,对于肋板侧面和货舱内的狭小区域的清洗问题还未解决,后续将会对多种壁面清洗机构进行研究,将该机构搭载在机器人上,实现多机器人协同作业,可极大提高货舱的清洗效率,真正实现船舶行业的自动化清洗作业。

参 考 文 献

- [1] 宋晓暖. 散货船货舱清洗设备设计研究 [J]. 机械工程师, 2021, (6): 50-51+55.
Song XY. Research on the cleaning equipment design for bulk carrier cargo hold [J]. Mechanical Engineer, 2021, (6): 50-51+55.
- [2] 居先航, 戴祥祥. 散粮船备舱操作研究 [J]. 珠江水运, 2017, (17): 59-60.
Ju XH, Dai XX. Study on the operation of bulk grain ship [J]. Pearl River Water Transport, 2017, (17): 59-60.
- [3] 曹凤富. 船舶货舱不锈钢舱壁特性和养护要点 [J]. 船舶物资与市场, 2019, (5): 44-45.
Cao FF. Properties and maintenance of stainless steel walls in cargo holds [J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2019, (5): 44-45.
- [4] Huang HC, Li DH, Zhao X, et al. Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection in shipbuilding [J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 224-230.
- [5] 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 ZY, Gong YJ, Wang ZW, et al. Large wall climbing robots for boarding ship rust removal cleaner [J]. ROBOT, 2010, 32(4): 560-567.
- [6] 吴善强, 程楠, 金超, 等. 磁吸附爬壁机器人履带模块运动仿真与实验 [J]. 制造业自动化, 2016, 38(4): 127-130.
Wu SQ, Cheng N, Jin C, et al. Kinematics simulation and experiment on track module of wall climbing robot with magnetic track [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(4): 127-130.
- [7] 丁问司, 汪兴潮, 唐昌滔. 永磁吸附履带式船舶爬壁机器人结构设计 [J]. 机床与液压, 2016, 44(6): 6-11.
Ding WS, Wang XC, Tang CT. Structural design of permanent-magnet adsorption tracked ship wall-climbing robot [J]. Hydromechanics Engineering, 2016, 44(6): 6-11.
- [8] 王明强, 陈锦, 方海峰, 等. 新型多履带全向爬壁机器人结构设计 [J]. 机械设计与制造, 2021, (5): 208-211+216.
Wang MQ, Chen J, Fang HF, et al. Structural design of a new multi-crawler omni-directional wall-climbing robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, (5): 208-211+216.
- [9] Wang Y, Zhang XJ, Zhang ML, et al. Self-compliant track-type wall-climbing robot for variable curvature facade [J]. IEEE Access, 2022, 10: 51951-51963.
- [10] 宋伟, 姜红建, 王滔, 等. 爬壁机器人磁吸附组件优化设计与试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(10): 1837-1844.
Song W, Jiang HJ, Wang T, et al. Optimization design and experimental research on magnetic components for wall-climbing robot [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(10): 1837-1844.
- [11] 姜爱民, 战强, 张印. 一种新型磁吸附爬壁机器人的研制 [J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(4): 146-148+161.
Jiang AM, Zhan Q, Zhang Y. Development of new magnetic adhesion wall climbing robot [J]. Machine Building and Automation, 2018, 47(4): 146-148+161.
- [12] Jiang Y, Yue ZS, Dong WG, et al. Gait planning of concave transition for a wall-climbing robot [C] // Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Information and Automation, 2014: 1284-1288.
- [13] 姜树卫, 黄海燕, 李永正. 1.2 万 t 散货船舱段强度有限元分析 [J]. 船海工程, 2008, 37(5): 21-23.
Jiang SW, Huang HY, Li YZ. FE analysis of structural strength for the cargo holds of 12000 DWT bulk carrier [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(5): 21-23.
- [14] 沈青青, 张晋, 李根. 基于 Halbach 阵列爬壁机器人磁吸附单元的优化设计 [J]. 轻工机械, 2014, 32(5): 17-21+26.
Shen QQ, Zhang J, Li G. Optimized design of magnetic adsorption unit for wall-climbing robots based on Halbach array [J]. Light Industry Machinery, 2014, 32(5): 17-21+26.
- [15] 衣正尧, 弓永军, 王祖温, 等. 新型除锈爬壁机器

- 人附壁建模与仿真 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(2): 211-216.
- Yi ZY, Gong YJ, Wang ZW, et al. Wall-attachment model and its simulation on a new wall-climbing robot for rust removal [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(2): 211-216.
- [16] 陈光明, 黄旋. 基于高压水射流的船体清洗机器人关键技术分析 [J]. 流体机械, 2019, 47(9): 56-62.
- Chen GM, Huang X. Analysis on key technologies of ship hull cleaning robot based on high pressure water jet [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(9): 56-62.
- [17] 王洋, 张小俊, 张明路, 等. 可自适应变曲率立面的分体柔性爬壁机器人设计与分析 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 49-58.
- Wang Y, Zhang XJ, Zhang ML, et al. Design and analysis of split-flexible wall-climbing robot with adaptive variable curvature façade [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 49-58.
- [18] Eto H, Asada HH. Development of a wheeled wall-climbing robot with a shape-adaptive magnetic adhesion mechanism [C] // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2020: 9329-9335.
- [19] Tche F, Fischer W, Caprari G, et al. Magnebike: a magnetic wheeled robot with high mobility for inspecting complex-shaped structures [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(5): 453-476.
- [20] Cai JN, He K, Fang HT, et al. The design of permanent-magnetic wheeled wall-climbing robot [C] // Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Information and Automation, 2017: 604-608.
- [21] 刘峰, 钟舜聪, 伏喜斌, 等. 基于 Halbach 阵列的爬壁机器人磁吸附研究 [J]. 机电工程, 2020, 37(10): 1251-1256.
- Liu F, Zhong SC, Fu XB, et al. Study on magnetic adsorption based on Halbach array for wall-climbing robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(10): 1251-1256.
- [22] 安磊, 张春光, 褚帅, 等. 基于 Halbach 阵列爬壁机器人永磁吸附装置有限元分析 [J]. 机械研究与应用, 2020, 33(4): 30-33.
- An L, Zhang CG, Chu S, et al. Finite element analysis of permanent magnet adsorption device of wall-climbing robot based on Halbach array [J]. Mechanical Research and Application, 2020, 33(4): 30-33.