Artificial Intelligence and Robotics Research 人工智能与机器人研究, 2020, 9(4), 261-271
Published Online November 2020 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/airr
https://doi.org/10.12677/airr.2020.94030

船用爬壁机器人的研究现状

韩力春，王黎明，尹　洋*

海军工程大学，湖北　武汉
Email: m15942932126@163.com, icesoar@163.com, *reeyan@163.com

收稿日期：2020年11月6日；录用日期：2020年11月20日；发布日期：2020年11月27日

摘　要

随着科技、经济、军事的发展，取代人工作业的船用爬壁机器人不断更新迭代，本文以吸附方式、移动方式、驱动方式等作为主要类别来介绍各种船舶爬壁机器人，从磁吸附出发，结合其他吸附方式，分析各类爬壁机器人的性能特点以及存在的问题，并总结当前爬壁机器人所存在的技术难题，进而对爬壁机器人的未来发展做出展望。

关键词

吸附方式，磁吸附，特点，展望

Research Status of Marine Wall-Climbing Robot

Lichun Han, Liming Wang, Yang Yin*

Naval Engineering University, Wuhan Hubei
Email: m15942932126@163.com, icesoar@163.com, *reeyan@163.com

Received: Nov. 6th, 2020; accepted: Nov. 20th, 2020; published: Nov. 27th, 2020

Abstract

With the development of science and technology, economy and military, the Marine wall-climbing robot which replaces manual operation is constantly updated and iterated. In this paper, various kinds of ship wall climbing robots are introduced by means of adsorption, movement and drive. Based on magnetic adsorption and other adsorption methods, the performance characteristics and existing problems of various kinds of wall-climbing robots are analyzed. And we summarize the technical problems existing in the current wall climbing robot. Then, the future development of the wall-climbing robot is prospected.

*通讯作者。

文章引用: 韩力春, 王黎明, 尹洋. 船用爬壁机器人的研究现状[J]. 人工智能与机器人研究, 2020, 9(4): 261-271.
DOI: 10.12677/airr.2020.94030

Keywords

Adsorption Mode, Magnetic Adsorption, Characteristic, Prospect

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

近几年来，经济全球化快速发展的同时，国际间海洋争端仍然存在，船只数量只增不减，但是船只经过长时间行驶和停泊，船体[1]表面会长满藤壶、藻类等海洋生物[2]，有研究显示，粘附了海洋生物[3]的船只航行时，其速度将下降 10%以上，耗油量将上升 40%，造成严重经济损失的同时降低了安全性[4]，为此，各国和各研究机构不断跟进与创新，取代人工作业的船用爬壁机器人不断更新迭代，发展出了不同吸附方式、不同移动方式、不同驱动方式等各类船用爬壁机器人，主要应用于大型商用船只和军用船只等，通过其吸附机构，吸附在船体表面，并在驱动机构的驱动下，通过移动机构在船体表面进行清洗、打磨、除锈[5]等作业。

按照吸附方式、移动方式和驱动方式可将爬壁机器人大致分为三类[6]，各自特点如下：

吸附方式分为磁吸附(包括永磁和电磁吸附)、负压吸附(包括真空吸附等)、仿生足式吸附(包括攀援式吸附、干粘附式方式、振动吸附)、推力吸附(包括旋翼吸附)等。磁吸附的吸附力大，但要求壁面为导磁材料，且能耗高，负压吸附适用面广，但为了保证密封性，对壁面的光滑性要求非常高，仿生足式吸附是较为新颖的吸附方式，应用前景广阔，但实际应用还有差距，推力吸附对壁面要求不高，但是成本高。

移动方式有履带式、轮式和足式。履带式移动机构着地面积大，负载能力强，但是体积和质量大，且控制转向难度大。轮式移动机构移动速度快，但其对壁面的平整度要求比履带式更高。足式机移动机构最突出的优点越强，能够适应较为复杂的壁面情况，但缺点就是控制难度最大。

驱动方式分为电气驱动、液压驱动、气压驱动等。电气驱动无需能量转换，直接向机器人各机构提供电能，节省空间、效率高、调速快，应用广泛，但由其产生的吸附力大小有限，若要获得大吸附力，则要提高成本。液压驱动通过液压泵将机械能转换为液体的压力能，通过液压执行元件把液体的压力能转换为机械能，进而驱动机器人的各机构，因此其能提供较大的推力，使吸附机构具有较大的吸附力，但液压驱动机构里的油液黏度会因温度降低而变的粘稠，降低工作效率，由于油液需要防泄漏，会需要对应的防漏装置，造成机器人体积加大，工作效率大打折扣，因此液压驱动很少应用于爬壁机器人。气压驱动和液压驱动类似，将工作介质换为气体，空气来源方便，用后直接排出，无污染，空气黏度小，气体在传输中摩擦力较小，故可集中供气和远距离输送，但工作稳定性性差，且存在排气噪声。

2. 国内外研究现状

从吸附方式这一方面来看船用爬壁机器人的发展，缘起于日本的负压吸附，之后，推力吸附、磁吸附、仿生足式吸附等相继兴起，磁吸附虽然晚于负压吸附，但由于其吸附力强，控制较为简单，目前应用最为广泛，其中又属永磁吸附应用最广。

2.1. 负压吸附式爬壁机器人

根世界上第一台壁面机器人样机就采用负压吸附，日本大阪府立大学的西亮讲师于 1966 年所研发，

通过涵道风扇抽走吸盘内的空气达到负压吸附的目的，其又于 1975 年、1982 年分别研制了轮式和步足式负压壁面机器人[7]。随着负压技术的发展，在国内，重庆大学 FESTO 实验室于 2018 年研制出 FFROBOT-III [8]，如图 1 所示，相比于之前的 FFROBOT-I 和 FFROBOT-II，采用真空多吸盘吸附，其移动平台由 H 型并联机构改用为十字型机构，水平和竖直方向由各自的电机单独驱动，控制独立互不影响，不存在电机的同步问题，同时十字型移动平台改善了移动空间，在保证步距略微增大的情况下，框架尺寸反而大幅度减小，有效减少了框架带来的自重。腿部采用对称平行结构，气动肌腱置于两平行腿中间，使气动肌腱收缩平面与四边形的抬腿平面在同一平面，避免腿部抬腿时会受到侧向扭矩，而且大大增强腿部刚度和强度。由于采用足式的移动方式，该机器人具有良好的越障能力，但吸盘其对壁面的适应性较差，遇到凹凸不平整壁面，吸盘难以完全封闭，会导致吸附力减弱，使机器人发生脱离壁面的风险。

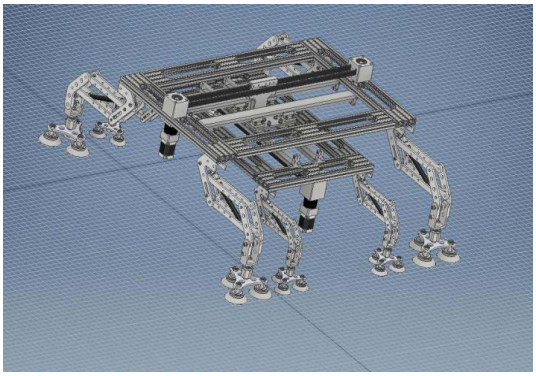

Figure 1. FFROBOT-III robot
图 1. FFROBOT-III 机器人

2.2. 推力吸附式爬壁机器人

推力吸附即为正压吸附，一般在壁面机器人机身设有两个高速螺旋桨，一个用于产生向上的推力，另一个用于产生垂直壁面方向的推力，使其紧贴于壁面，越障能力强，对壁面的要求不高，但是受外界风力影响，占用爬壁机器人空间大，限制了作业形式。1995 年，日本大阪府立大学的西亮讲师率先研究出这样的推力吸附式壁面机器人[9]，之后，2013 年韩国首尔大学研制出 ROPE RIDE [10]，如图 2 所示，

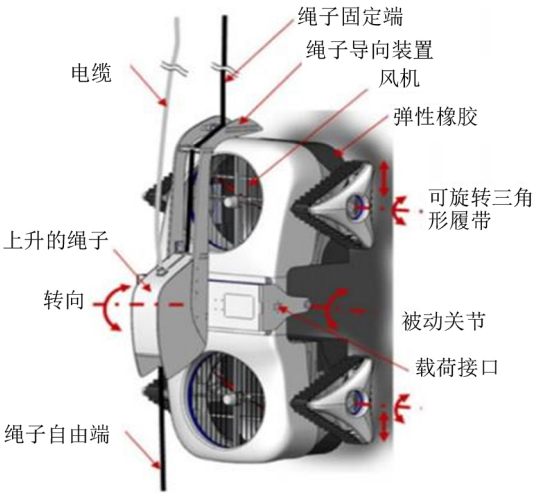

Figure 2. ROPE RIDE wall climbing robot
图 2. ROPE RIDE 爬壁机器人

采用履带移动方式，在负载 20 公斤的情况下，爬墙速度可达 15 m/min。国内对推力吸附爬壁机器人的研究较晚，但近几年的发展较快，北京石油化工学院的杨梅强于 2015 年研制出水下推力吸附式爬壁机器人样机，主要用于对水下结构物进行观察和检测。

2.3. 永磁吸附式爬壁机器人

2.3.1. 履带式永磁吸附爬壁机器人

永磁吸附相比于电磁吸附控制简单，在早期，研究机构一般全部采用永磁吸附，随着不断深入发展，逐渐开始研究电磁吸附。

国外研究爬壁机器人早于国内，加拿大的 Magnetic Crawler [11]研究出履带式磁吸附壁面机器人，如图 1 所示。机器人两侧履带上镶嵌永磁体，是磁吸附式壁面机器人吸附力最强的一种吸附方式，其可以在 30 m 的水下环境安全吸附于壁面进行移动，履带式移动的吸附能力强，但灵活性差且转向困难。现如今，履带式永磁吸附爬壁机器人可搭载多种部件进行作业，2018 年法国南特中央科学实验室的 Olivier Kermorgant 针对焊接任务，研制出用于造船工业自主焊接的磁力攀爬机器人[12]，具备了机器人沿着直线进行焊接的控制算法，如图 4 所示，该机器人的主要传感器是一个二维激光扫描仪，提供船体表面的信息，并用于执行多项任务，能够携带 100 公斤的有效载荷(包括自身重量)。

Figure 3. Tracked magnetic adsorption wall robot
图 3. 履带式磁吸附壁面机器人

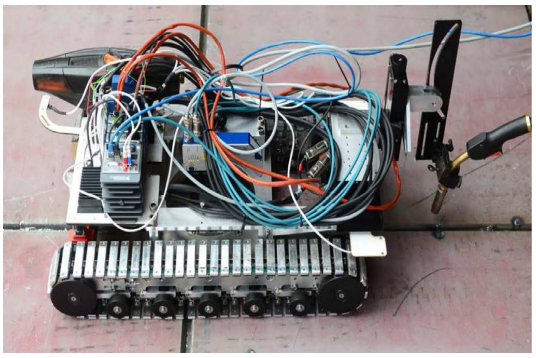

Figure 4. Magnetic climbing robot with autonomous welding
图 4. 自主焊接的磁力攀爬机器人

以上爬壁机器人的永磁本身不可调磁力大小，根据永磁体性质，若改变永磁体和壁面间的距离，就可以改变磁力大小，从而实现技术进步。江苏科技大学的陈锦于 2019 年研究了一款永磁可调吸附的船用

多履带全向移动爬壁机器人，如图 5 所示，机器人通过自身陀螺仪监测在铁磁壁面上的倾角，并将倾角信号传递至控制系统，控制滚珠丝杠伸缩 Halbach 方型阵列永磁吸附单元，来实时增减永磁体与船舶外壁面的吸附距离，从而获得合适的吸附力[13]。这实现了永磁力也可以调节，是永磁吸附实现变磁力可调的一大技术突破。

Figure 5. Marine multi-track omnidirectional moving wall-climbing robot
图 5. 船用多履带全向移动爬壁机器人

2.3.2. 轮式永磁吸附爬壁机器人

履带式爬壁机器人主要存在转向性能差，运动不灵活等问题，除了履带式，还有轮式爬壁机器人，轮式所带来大最大优点就是运动灵活，行进速度提高，而轮式永磁吸附式爬壁机器人可分为两种：

一是直接采用磁轮，永磁体直接安装在轮子表面，磁轮同时充当移动机构和吸附机构。国内的洛阳圣瑞智能公司主要研制磁吸附爬壁机器人，其除锈机器人[14]如图 6 所示，该壁面机器人主要用于大型船舶表面除锈，相比于之前的高压水流除锈，其增加了喷丸/砂机除锈，考虑到磁轮磁吸力较小，采用绳索悬吊的方式平衡其重力，防止其下滑、脱离，确保作业的安全性。

Figure 6. Derusting robot of Luoyan
图 6. 洛阳圣瑞智能公司的除锈机器人

二是轮子无吸附力，只是作为移动机构，吸附机构依然采用永磁体，将永磁体安装在两个轮子中间的车体底部，与壁面有一定的距离。此类机器人运动非常灵活，但随之带来的是抗倾覆能力较弱。地中海岛国塞浦路斯的 COMBIJET 公司研制的 RJE-1000 船舶清洗机器人，如图 7，机器人总重量仅为 54 kg，

行进速度 5~20 m/min，其采用永磁间隙吸附的方式，将永磁体放置在一对驱动轮的中间，使用传动带传动，巧妙地解决了打磨铁屑残渣粘贴永磁体的问题，但这也易导致了永磁间隙过大，大大降低了吸附机构的可靠性[15]。在国内，中船重工 716 所在武昌船舶公司自动化激光除锈除漆试验中获得成功，研制的机器人如图 8，使国内船舶涂装机器人系统有了成熟产品，为船舶智能制造业发展提供保障。其吸附方式采用永磁间隙吸附，相对永磁履带吸附方式，这种吸附方式使得整个机器人结构更加简单，大大减轻本体重量[16]。此外，国内的浙江大学海洋学院海洋电子与智能系统研究所朱世强教授团队于 2018 年研制的除锈机器人，如图 9 所示[17]，北京史河科技有限公司于 2017 年研制的 MW-SR-01 摆臂式船舶除锈机器人[18] (如图 10)。

Figure 7. RJE-1000 ship cleaning robot
图 7. RJE-1000 船舶清洗机器人

Figure 8. 716 wall-climbing robots
图 8. 716 所爬壁机器人

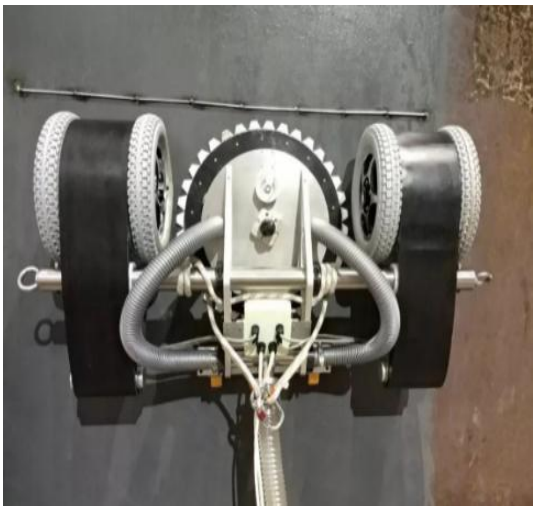

Figure 9. Derusting robot
图 9. 除锈机器人

Figure 10. MW-SR-01 swinging arm ship derusting robot
图 10. MW-SR-01 摆臂式船舶除锈机器人

2.4. 电磁吸附式爬壁机器人

永磁吸附的磁力大小本身不可以调节，使爬壁机器人的吸附力单一，工作形式单一，在平整壁面和越障时的吸附力大小相同，不能按所需进行合理分配磁力大小，对此情况，电磁吸附被引入，其最初应用在足式爬壁机器人中，随着电磁技术的成熟，逐步应用于履带式爬壁机器人中，突破了永磁体为主导的磁吸附爬壁机器人技术领域。

在国内，海军工程大学于 2019 年研究出国内首台基于精确控制电磁吸附的船用爬壁机器人，如图 11 所示，将电磁铁安装在机体两侧的履带上，每个吸附单元单独控制，再由总控制器控制每个吸附单元，精确控制磁力大小，使其适用于多种工作方式，并且在越障时可以提供比平整壁面所需的更大吸附力，大大提高了其运行的安全性，但是由于每个吸附单元都需要单独控制，也增加了控制难度。南京林业大学机械电子工程学院的洪晓玮、陈勇于 2020 年也研制出新型电磁吸附式爬壁机器人，如图 12 所示，可用于大型钢结构壁面巡检作业，能够通过电磁吸附单元的轮流通断电实现机器人机动性与吸附性的统一，总重量 6.7 kg，移动速度最大可达 5 cm/s，可携带负载重量 3 kg [19]。

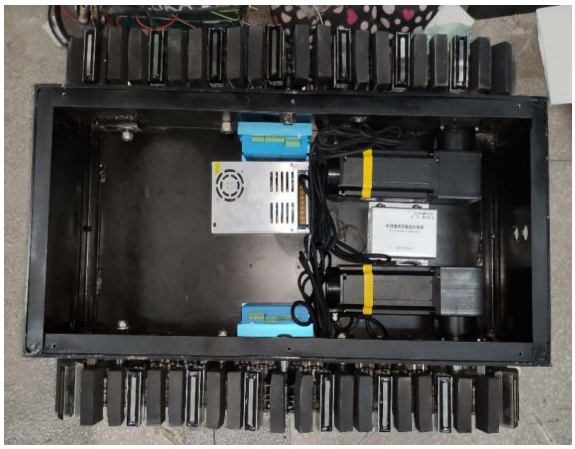

Figure 11. Marine wall-climbing robot based on precise control of electromagnetic adsorption
图 11. 基于精确控制电磁吸附的船用爬壁机器人

Figure 12. A new electromagnetic adsorption wall-climbing robot
图 12. 新型电磁吸附式爬壁机器人

2.5. 仿生足式爬壁机器人

此类爬壁机器人负载能力小，一般很少用于船舶表面除锈等作业，多用于检测作业，近些年来蓬勃发展，有诸多研究机构深有研究。随着 3D 打印技术的发展，2017 年，韩国蔚山国家科学技术研究所(UNIST)的研究人员利用 3D 打印技术开发出仿壁虎机器人 UNIclimb [20]，如图 13 所示，机身连接有四条腿，腿的尾部是具有粘附垫的四只脚掌，身体和腿、腿和脚掌之间安装有伺服电机，机器人由这些电机驱动，并通过三角步态在负表面上实现稳定粘附运动，移动速度为 1 mm/s 采用的 3D 打印技术对其有利有弊，有利的一面，是其表面覆盖的 SiO_2-F 纳米粒子带来了防水性能，有弊的一面是其结构强度低，负载能力不强，且对工作环境要求相对较高。此外韩国的岭南大学和汉阳大学合作研发出可操纵干胶联动式爬壁机器人[21]，如图 14 所示，将干粘法和平板弹性体相结合，并设计了一种连接主动内框架和被动内框架的并联四杆机构，通过并联四杆机构旋转实现步行运动，可在垂直平面进行移动作业，移动速度达 13.3 m/s，相比于 UNIclimb 有很大提高，但是其步行运动和转向运动存在耦合问题。

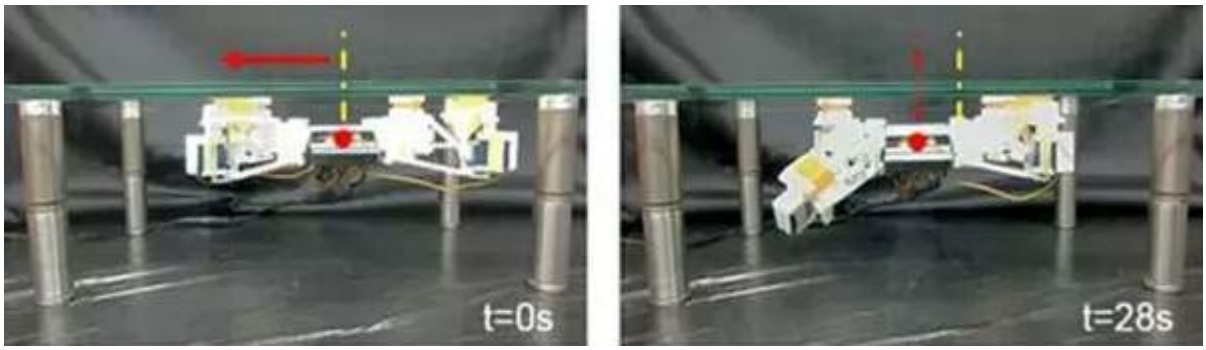

Figure 13. Biomimetic climbing robot
图 13. 仿生爬壁机器人

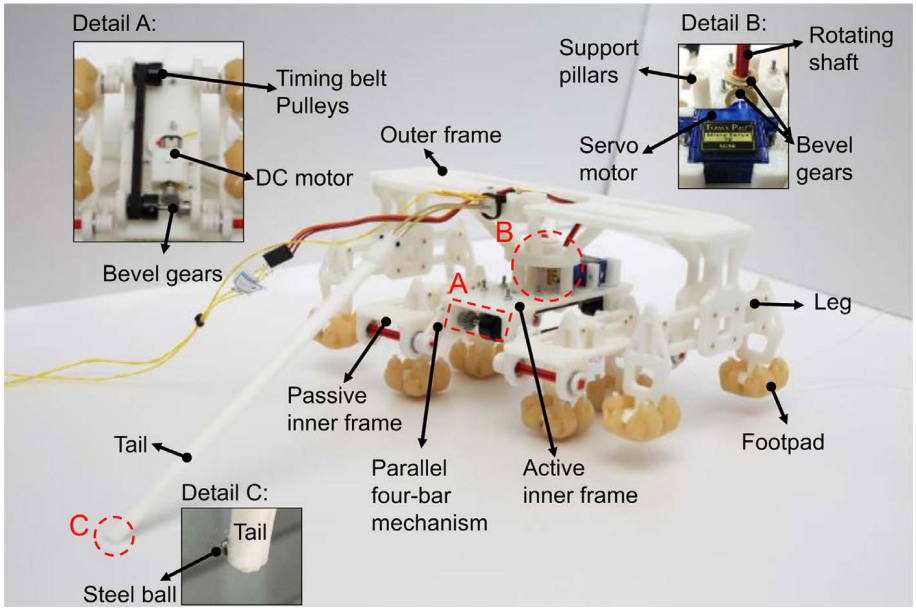

Figure 14. Steerable dry-adhesive linkage-type wall-climbing robot
图 14. 可操纵干胶联动式爬壁机器人

3. 船用爬壁机器人存在的技术难题

通过以上论述，可知爬壁机器人的研究随着科技的进步而取得了很大的发展，但现有技术的限制，使其实际应用还并不广泛，在以下三方面还有技术难点等待突破。

1) 吸附方式

船用爬壁机器人一般工作于垂直壁面或与地面成一定角度的壁面，这就要求吸附机构能够提供足够大的吸附力，使爬壁机器人能安全吸附于壁面的同时也能正常实施作业，但依照上面的讨论可知，目前这几种吸附方式各有利弊，均不能达到在工程中广泛应用的要求，磁吸附要求壁面具有导磁性，负压吸附要求壁面不能有较大的凸起或凹槽，尽量不能漏气，而仿生足式吸附能够提供的吸附力本身就很小，不能携带过重的设备，负载能力有限，不能完成除锈等大型作业。

2) 移动方式

船用爬壁机器人在壁面上作业时，移动方式在一定程度上决定着作业效率，而船体壁面一般会存在凸起和沟槽等，并不平整，这就要求船用爬壁机器人具有一定的越障能力，在这三种移动方式里，属足

式的越障能力最强，在遇到障碍时，足式机器人会控制其每条腿逐一跨越障碍，进而整体跨越障碍，但这以牺牲移动速度为代价。相比于足式，履带式和轮式机器人移动速度快，但越障能力差。这就造成了移动速度和越障能力不统一的问题，即移动方式和吸附方式二者之间的耦合问题。

3) 驱动方式

目前，在实际工程中，多采用电气驱动，为了保证船用爬壁机器人能够稳定作业，一般以有线方式供能，再加上作业机构所需的输送管等，也是相当一部分重量，有线也不方便机器人作业，容易发生缠绕等，甚至会造成机器人掉落等危险。当然也有采用无线供电，机器人自身可装有电池，包括镍氢电池、锂电池、燃料电池等，或者微型内燃机，但这会加重机器人自身重量，对其吸附能力有了更高的要求，对于大型船只，壁面面积大，爬壁机器人本身携带的电源可能会具有功能不足的情况。

4. 船用爬壁机器人的未来发展趋势

首先，吸附技术作为船用爬壁机器人的一个关键技术问题，决定了其运行的可靠性和稳定性问题，经过上诉讨论，在工程应用过程中，当前很多吸附技术仍然有不足，国内外研究机构都对此投入了大量精力，虽然未能彻底解决这一技术问题，但也取得了很多科研成果。随着高分子材料不断进步，与壁虎脚趾类似的材料将被研制出，再通过物理改进和精密加工，未来的仿生足式爬壁机器人将具有更大的载重量，随着新材料的发现，以及仿生技术和控制技术的发展，吸附技术这一关键问题也将得以解决。

其次，针对有线供能的方式，未来将会大力发展无线供能，随着国内对新能源技术的重视，未来电池能量密度增加，电池体积小，续航能力长，使机器人本身重量变轻，拓宽机器人运行的空间，作业面积更广，推动有线供能船用爬壁机器人向着无线工作方案发展，小型化、轻型化、无线供能、无线控制将是未来的发展方向。

最后，作为一种代替人工作业的船用爬壁机器人，其实际工程应用并未得到大力推广，并且作业内容有限，主要是清洗、喷涂、检测、除锈等。移动方式和吸附方式间的耦合问题将会得到解决，随着传感技术和人工智能的发展，将会给爬壁机器人带来自主决策能力，控制简单方便、智能化，工作稳定，使船用爬壁机器人广泛应用于实际工程中，推动爬壁机器人行业的发展。

参考文献

[1] Li, Y.P., Yi, Z.Y., Lin, Y., *et al*. (2017) Control System Basic Design of Wall Climbing Robot for Hull Plate Spraying in Dock. In: 2017 2*nd International Conference on Electrical*, *Control and Automation Engineering*, Science and Engineering Research Center, Xiamen, 196-200. https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291359

[2] 文金迎, 孟飞, 赵阳, 等. 微结构可降解高分子仿生防污材料研究综述[J]. 内江科技, 2017, 40(2): 70-71.

[3] 李健, 洪术华, 沈金平. 复合材料在海洋船舶中的应用[J]. 机电设备, 2019, 56(4): 57-59.

[4] 张欢, 杨季雨, 赵丽娟, 等. 石墨烯在舰船材料防腐中的应用及展望[J]. 中国舰船研究, 2018, 14(S1): 82-91.

[5] Berg, F. (2016) Flexible Container Painting System with Power & Free Conveyor. *IST International Surface Technology*, **9**, 42-43.

[6] 程思敏, 陈韦宇, 丛培杰. 爬壁机器人的研究现状[J]. 机电工程技术, 2019, 48(9): 6-10.

[7] 何炜华, 王馨悦, 邓彦松. 吸盘负压式四足爬壁机器人设计与仿真[J]. 机器人技术与应用, 2017(3): 43-45.

[8] 潘荣照. 新型爬壁机器人的优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[9] Tanaka, Y., Nozaki, K. and Ioi, K. (2017) Motion Control of a Wall Climbing Robot with Coaxial Propeller Thruster. 2017 2*nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering*, Singapore, 1-3 September 2017, 360-361. https://doi.org/10.1109/ICITE.2017.8056939

[10] Seo, K., Cho, S. and Kim, T. (2013) Design and Stability Analysis of a Novel Wall-Climbing Robotic Platform (ROPE RIDE). *Mechanism and Machine Theory*, **70**, 189-208. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.07.012

[11] La, H.M., Dinh, T.H., Pham, N.H., Ha, Q.P. and Pham, A.Q. (2018) Automated Robotic Monitoring and Inspection of

Steel Structures and Bridges. *Robotica*, **37**, 947-967. https://doi.org/10.1017/S0263574717000601

[12] Kermorgant, O. (2018) A Magnetic Climbing Robot to Perform Autonomous Welding in the Shipbuilding Industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **53**, 178-186. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.04.008

[13] 陈锦. 用多履带全向移动爬壁机器人结构设计及优化[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.

[14] Srrobot Company (2019) Rust Removal Robot. http://www.srrobot.net/pro/1.html

[15] Combjet (2019) RJE-1000 Hydro-Blasting Robot. https://www.combijet.com/en/view-product-detail/5/0/59/rje-1000-hydro-blasting-robot

[16] 环球网科技. 爬壁机器人助力船舶智能制造[J]. 船舶工程, 2018, 41(10): 15.

[17] Fan, J.C., Yang, C.J. and Chen, Y.H. (2018) An Underwater Robot with Self-Adaption Mechanism for Cleaning Steel Pipes with Variable Diameters. *Industrial Robot*, **45**, 193-205. https://doi.org/10.1108/IR-09-2017-0168

[18] 史河科技. 摆臂式船舶除锈机器人[EB/OL]. http://www.robotplusplus.com/product/14.html, 2019-09-18.

[19] 洪晓玮, 陈勇. 一种新型电磁吸附式爬壁机器人的研制[J]. 机械科学与技术, 2020, 38(12): 1-7.

[20] Ko, H., Yi, H. and Jeong, H.E. (2017) Wall and Ceiling Climbing Quadruped Robot with Superior Water Repellency Manufactured Using 3D Printing (UNIclimb). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology*, **4**, 273-280. https://doi.org/10.1007/s40684-017-0033-y

[21] Liu, Y.H., Lim, B., Lee, J.W., Park, J., Kim, T. and Seo, T. (2020) Steerable Dry-Adhesive Linkage-Type Wall-Climbing Robot. *Mechanism and Machine Theory*, **153**, Article ID: 103987. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103987