

轮式水冷壁爬壁机器人磁吸附性能研究

唐彬¹, 肖林俊浩², 刘祥军², 沈润杰^{2,3*}

¹上海电力股份有限公司吴泾热电厂, 上海

²同济大学电子与信息工程学院, 上海

³同济大学中德学院, 上海

收稿日期: 2021年12月24日; 录用日期: 2022年1月22日; 发布日期: 2022年2月7日

摘要

火电站锅炉炉膛需要定期进行检修, 传统的检修方式是搭建脚手架人工操作, 十分危险, 利用轮式水冷壁爬壁机器人来实现清理检修等工作可大大降低检修难度。水冷壁壁面是由钢管外径构成的不规则表面, 采用永磁吸附装置进行吸附, 为了保证水冷壁爬壁机器人在移动过程中的安全可靠, 本文利用有限元方法, 建立爬壁机器人磁力仿真模型, 以磁吸附力的最小值作为载荷设计原则, 通过优化磁性轮结构, 降低爬壁机器人在水冷壁管不同位置时的磁力波动, 提高水冷壁爬壁机器人的吸附安全系数。应用于火电站锅炉炉膛壁面检修工作, 效果良好。

关键词

炉膛检修, 爬壁机器人, 磁吸附, 磁力仿真

Research on Magnetic Adsorption Performance of Wheeled Water Wall Climbing Robot

Bin Tang¹, Linjunhao Xiao², Xiangjun Liu², Runjie Shen^{2,3*}

¹Wujing Thermal Power Plant of Shanghai Electric Power Co., Ltd., Shanghai

²College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai

³Chinesisch Deutsches Hochschulkolleg, Tongji University, Shanghai

Received: Dec. 24th, 2021; accepted: Jan. 22nd, 2022; published: Feb. 7th, 2022

Abstract

The boiler furnace of thermal power station needs regular maintenance. The traditional main-

*通讯作者。

tenance method is to build scaffold for manual operation, which is very dangerous. The cleaning and maintenance by using wheeled water wall climbing robot can greatly reduce the maintenance difficulty. The wall surface of the water wall is an irregular surface composed of the outer diameter of the steel pipe, which is adsorbed by the permanent magnet adsorption device. In order to ensure the safety and reliability of the water wall climbing robot in the moving process, this paper uses the finite element method to establish the magnetic simulation model of the wall climbing robot, takes the minimum value of the magnetic adsorption force as the load design principle, and optimizes the magnetic wheel structure, reduce the magnetic fluctuation of the wall climbing robot at different positions of the water wall tube, and improve the adsorption safety factor of the wall climbing robot. It has been applied to the maintenance of furnace wall of boiler in thermal power plant, and the effect is good.

Keywords

Furnace Maintenance, Wall Climbing Robot, Magnetic Adsorption, Magnetic Simulation

Copyright © 2022 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

对于水冷壁爬壁机器人而言, 吸附性能既是爬壁机器人能够搭载其他测量器件的充分条件, 又是保证机器人在复杂表面移动的的必要因素。永磁吸附装置广泛应用于爬壁机器人, 目前常用的磁吸附装置包括磁性履带、磁性轮以及磁吸盘等[1]。大多数磁吸附装置采用基于 Halbach 永磁阵列结构的设计, 为了更好地产生聚磁效应, 文献[2]设计了一款磁力吸附组件, 克服 Halbach 阵列端部效应带来的漏磁问题以及方便磁吸附单元的安装, 在直线型 Halbach 阵列的两端和弱磁场强度一边增加了适量软铁, 使得阵列一边磁场显著增强另一边显著减弱, 容易得到在空间中较理想正弦分布的磁场; 文献[3]介绍了一种可变磁力的结构, 吸附单元的外形受永磁体形状和与履带连接关系的限制, 根据履带联接链节的尺寸和具体应用情况设计了变磁力吸附单元的结构; 文献[4] [5]讨论了不同的磁铁结构磁吸附力情况, 通过计算不同气隙高度时磁能密度值情况研究出磁能利用率更高的结构, 对比了几种不同磁路设计提出了改进型磁吸盘结构。本文结合文献以及实际应用场景, 设计了一种基于磁性轮永磁吸附的爬壁机器人, 结合文献[6]分析了爬壁机器人在壁面的受力情况及爬壁机器人实现安全可靠爬行需满足的条件, 结合文献[7] [8] [9] [10]对影响磁性轮磁吸附力的主要因素进行分析, 以最小磁吸附力大于机器人载荷为设计原则, 通过仿真分析优化磁性轮结构, 降低爬壁机器人在水冷壁管不同位置时的磁力波动, 在实际水冷壁壁面进行测试, 实现了稳定的吸附和爬行。

2. 爬壁机器人受力分析

本文设计的轮式水冷壁爬壁机器人如图 1, 包含轮式小车和机械臂两部分, 其中磁吸附结构采用四组磁性轮对称安装在小车两侧, 由直流电机进行驱动, 车身使用铝合金材料, 减轻整体重量又能保证强度, 减少腐蚀, 提升负载量, 爬壁机器人参数如表 1 所示。

水冷壁为排管焊接结构, 为保证爬壁机器人在水冷壁壁面爬行过程中安全可靠稳定, 建立爬行过程中需要满足的边界条件如下: 1) 爬壁机器人能够沿壁面行走而不产生滑移; 2) 爬壁机器人能够沿壁面行走而不发生倾覆。基于以上边界条件, 讨论爬壁机器人垂直运动和水平运动的受力情况。

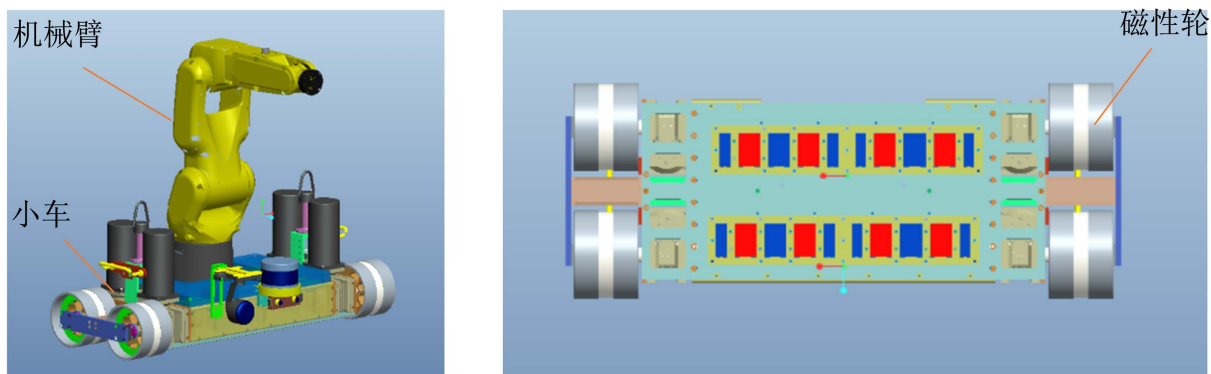


Figure 1. Structure of the wall climbing robot

图 1. 爬壁机器人结构

Table 1. Parameter table of wall climbing robot

表 1. 爬壁机器人参数表

名称	符号及数值	备注
摩擦系数	$\mu = 0.4 \sim 0.6$	吸附轮与水冷壁管(取保守值0.4)
爬壁小车本体 + 负载重	$G_1 = 1300 \text{ N}$	本体自重80 kg + 负载50 kg
机械臂自重	$G_2 = 250 \text{ N}$	机械臂自重25 kg
轮间距	$b = 230 \text{ mm}$	根据人孔门的宽度设计
小车重心高	$m = 170 \text{ mm}$	按设备工作时的最高重心
机械臂重心高	$n = 370 \text{ mm}$	按机械臂工作的最高重心

爬壁机器人吸附在水冷壁上进行垂直运动，处于静止状态时受力分析如图 2 所示，图中使用的标识对应表 1 中的符号，其中 F_m 为磁力模块总吸附力， f_1 、 F_1 表示前轮摩擦力和支持力， f_2 、 F_2 表示后轮摩擦力和支持力。

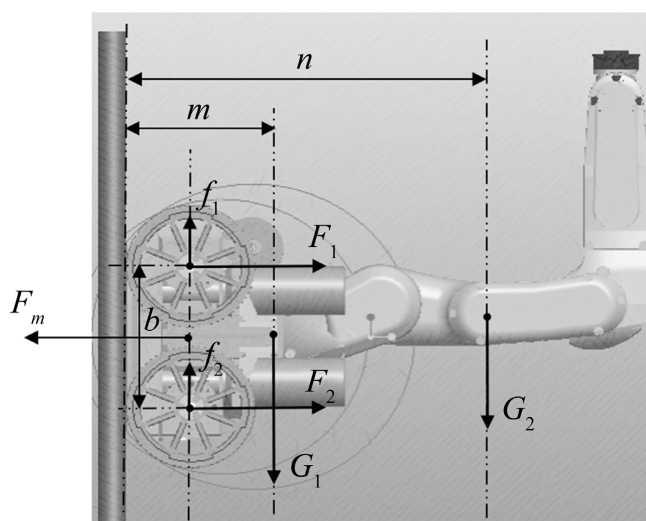


Figure 2. Force analysis of vertical motion of wheeled wall climbing robot

图 2. 轮式爬壁机器人垂直运动受力分析

所有磁力模块吸力为前轮与后轮支持力之和

$$F_m = F_1 + F_2 \quad (1)$$

总静摩擦力为前轮与后轮摩擦力之和，同时满足摩擦力公式

$$f = f_1 + f_2 = \mu F_m \quad (2)$$

为满足爬壁机器人不出现滑移条件，总静摩擦力需要大于总重

$$f \geq G_1 + G_2 \quad (3)$$

为满足爬壁机器人不发生倾覆的条件，由力矩公式可得

$$\frac{b}{2} F_m \geq mG_1 + nG_2 \quad (4)$$

由式(1)(2)(3)(4)联立可以计算得到磁吸附力，带入表 1 中的机器人参数可得

$$\begin{cases} F_m \geq \frac{G_1 + G_2}{\mu} = 3875 \text{ N} \\ F_m \geq \frac{2(mG_1 + nG_2)}{b} = 2726 \text{ N} \end{cases} \quad (5)$$

轮式爬壁机器人在水冷壁管道上水平运动时受力分析如图 3 所示，其中 w 表示车身横向长度。

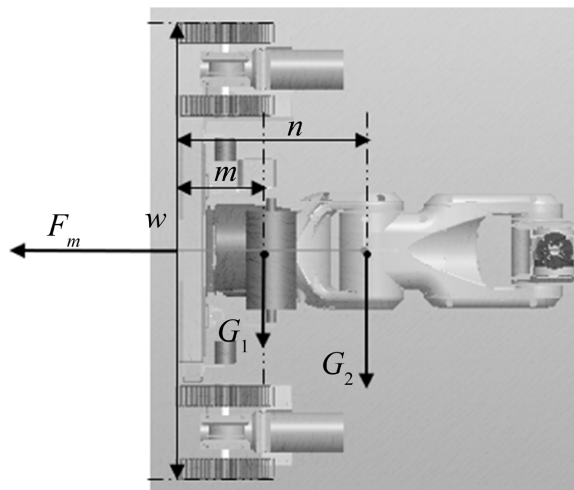


Figure 3. Force analysis of horizontal motion of wheeled wall climbing robot

图 3. 轮式爬壁机器人水平运动受力分析

显然不出现滑移的条件同公式(3)，而水平运动时不发生倾覆的条件则变为

$$\frac{w}{2} F_m \geq mG_1 + nG_2 \quad (6)$$

由于车身长度 w 远大于轮间距 b ，因此 F_m 满足公式(4)则一定满足公式(6)。综上，要保证爬壁机器人在水冷壁面爬行时安全稳定，需要满足磁吸附力 F_m 大于 3875 N，由于机器人为四轮驱动，每个磁性轮提供的磁力应当大于 968.75 N，下文也将以该值为设计原则进行磁性轮结构优化仿真。

3. 磁性轮磁力仿真

磁力仿真实验使用的材料如表 2。

Table 2. Material list of simulation experiment
表 2. 仿真实验材料表

部件	材料	备注
永磁体	钕铁硼NdFe35	剩磁 $Br = 1.17 \sim 1.21 \text{ T}$ ，矫顽力 $Hc \geq 868 \text{ KA/m}$ ，仿真时取保守数据， Br 取 1.17 T ， Hc 取 -868 KA/m 。磁铁尺寸 $66 \times 46 \times 12.3 \text{ mm}$ ，中间 $\phi 8.4$ 沉头孔。
软铁	工业纯铁DT7	用作轭铁
水冷壁管	碳钢G20	$\Phi 44.5 \times 5.5$

影响磁性轮磁吸附力的主要因素包括：

1) 车轮轮径，轮径大，机器人重心离壁面越大，倾覆力矩也越大，有坠落风险，但轮径过小在水冷壁管上的投影面积小，由于水冷壁管厚度 5 mm ，容易磁饱和，通过磁的面积小则磁力小。难以支撑机器人；

2) 车轮宽度，在非磁饱和情况下磁力总体与磁铁体积正相关，车轮越宽可以获得更大磁吸附力，但质量会增大同时转向摩擦力也越大，降低灵活性，但车轮过窄又导致吸附面较小磁力不足，由于水冷壁管壁面不平整，需要保证车轮宽度至少横跨两跟水冷壁管；

3) 轭铁厚度，轭铁的作用是聚集磁力线，在一定程度上可以增加磁力，太薄容易磁饱和，太厚则会增大车轮质量；

4) 气隙，气隙可以防止磁路饱和，但需要更大的磁场强度来得到同等磁感应强度，选择合适的气隙参数才能避免磁饱和的同时不影响磁感应强度。

实验使用的磁性轮模型如图 4，为左右对称结构，磁铁位于中间部分，车轮两侧由轭铁包裹，其中 Q_3 表示外轮轮径，气隙由 $(Q_3 - Q_2)/2$ 计算可得， Q_1 表示内轮轮径， W_1 为车轮两侧宽度， W_2 为中间磁铁部分宽度， E_1 表示车轮两侧轭铁厚度， E_2 表示中间靠近磁铁部分轭铁厚度。

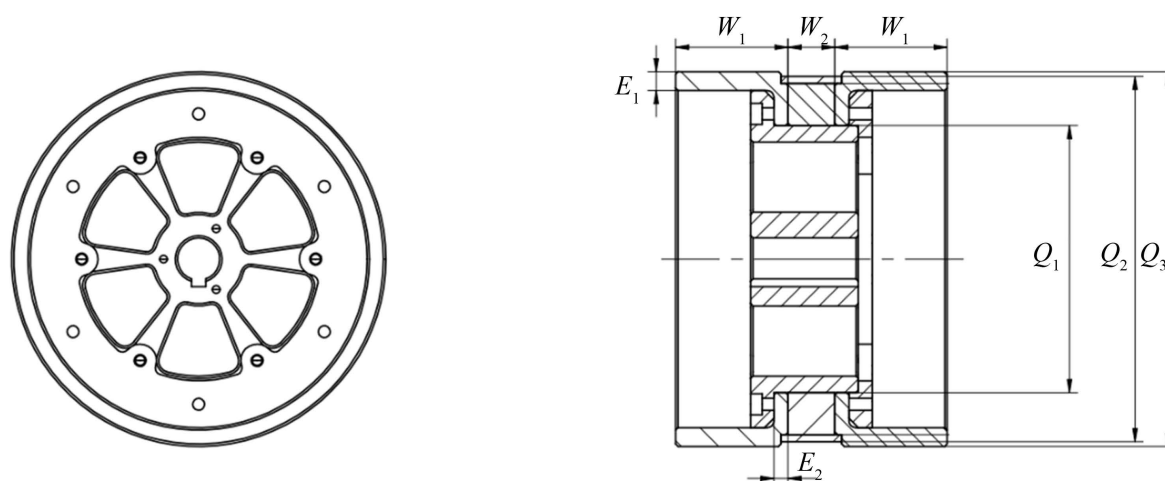


Figure 4. Magnetic wheel model
图 4. 磁性轮模型

使用 Ansoft Maxwell 软件对磁性轮参数进行仿真分析，由图 5 可以看出，靠近磁铁的轭铁部分比两侧的轭铁磁感应强度低，这是由于中间部分轭铁是轴向传导磁力，与磁铁接触面积大，两侧部分轭铁是

径向传导到水冷壁管，只有接触水冷壁管的那部分有磁力线，实际接触面积较小，容易发生磁饱和，在经过仿真后发现当 E_2 取 6 mm 时不会磁饱和，后续实验将固定 E_2 为 6 mm，而 E_1 的取值则至少为 6 mm。

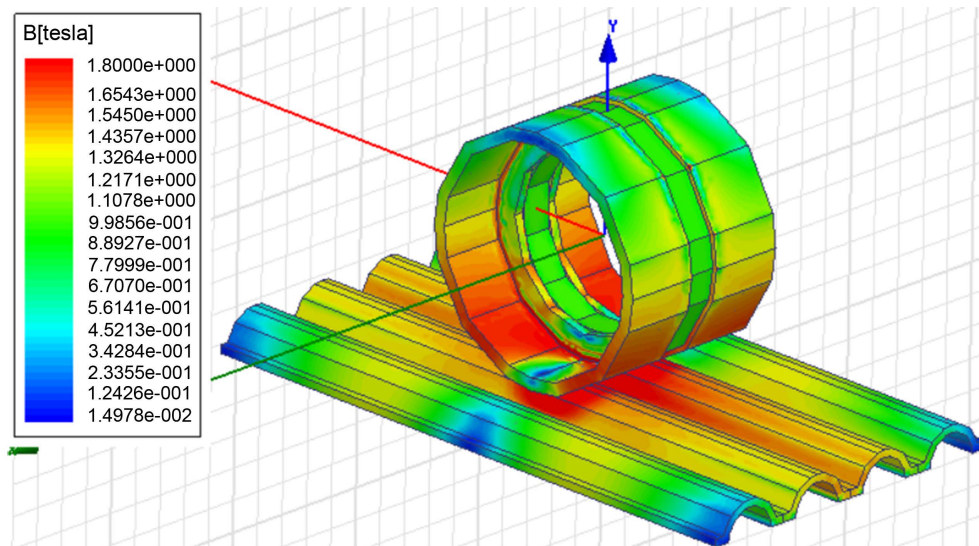


Figure 5. Magnetic force simulation of magnetic wheel
图 5. 磁性轮磁力仿真

固定轮径为 $Q_1 = \text{Ø}120$ ， $Q_2 = \text{Ø}154$ ， $Q_3 = \text{Ø}160$ 对不同宽度的磁性轮进行仿真实验，观察磁力随轭铁厚度 E_1 的变化情况，绘制成曲线如图 6，其中 968.75 N 是上文受力分析得出的最小吸附力。

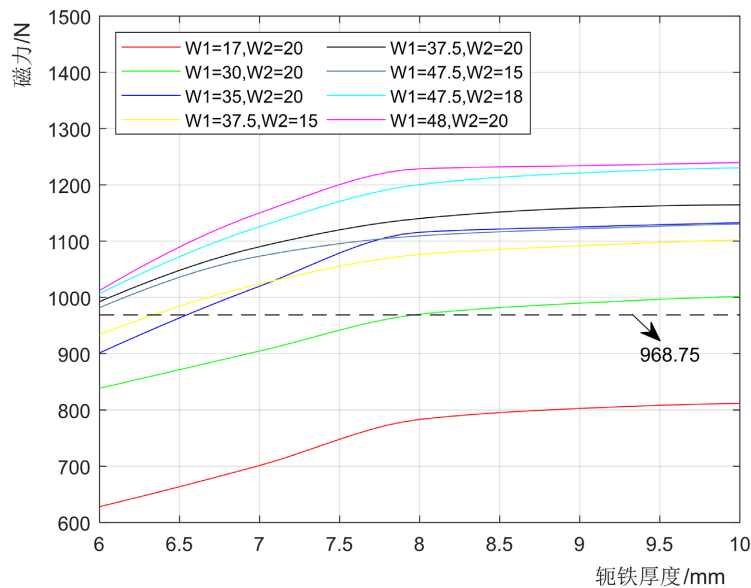


Figure 6. Variation of magnetic adsorption force with wheel width and yoke thickness
图 6. 磁吸附力随轮宽、轭厚参数变化规律图

从图中可以看出，当两侧轭铁的厚度由 6 mm 变化到 8 mm 时，磁吸附力随着轭厚的增加而增大；当轭厚超过 8 mm 后，其磁吸附力变化趋势减弱，考虑永磁吸附装置的优化准则，选取两侧轭铁的厚度为 8 mm。同时可以看出，固定 $E_1 = 8$ mm，随着磁铁宽度 W_2 的增加磁力会有部分提升但不明显，取 W_2 为 20

mm、 W_1 大于 35 mm 即可提供大于 968.75 N 的磁力，两侧宽度 W_1 的增加对磁力的提升有显著效果，当 W_1 增加到 48 mm 以上磁力提升趋势变缓，综合考虑以后确定 $W_1 = 48$ mm， $W_2 = 20$ mm。

固定 $E_1 = 8$ mm， $E_2 = 6$ mm， $W_1 = 48$ mm， $W_2 = 20$ mm 取不同轮径磁性轮进行磁力仿真比较，数据记录于表 3，可知 $Q_1 = \varnothing 114$ ， $Q_2 = \varnothing 156$ ， $Q_3 = \varnothing 160$ 时磁力最大。

Table 3. Variation of magnetic adsorption force with wheel diameter parameters

表 3. 磁吸附力随轮径参数变化表

Q_1	Q_2	Q_3	磁力/N
70	94	100	563.16
120	154	160	1228.6
114	154	160	1303.2
114	156	160	1341.7

4. 实验论证

经过仿真分析对磁性轮结构参数进行优化，最终选用 $Q_1 = \varnothing 114$ ， $Q_2 = \varnothing 156$ ， $Q_3 = \varnothing 160$ ， $E_1 = 8$ mm， $E_2 = 6$ mm， $W_1 = 48$ mm， $W_2 = 20$ mm 规格参数制作出磁性轮实体安装在爬壁机器人上，在单管直径 44.5 mm，管厚 5.5 mm 的水冷壁壁面上搭载重量 25 kg 的机械臂进行实验，如图 7 所示垂直运动和水平运动均未发生滑移和倾覆现象。使用分辨率为 0.1 N 的拉力传感器沿平行于壁面的方向向下拉爬壁机器人拉力达到 860 N 方可使前轮离开水冷壁，向上拉爬壁机器人，拉力达到 4000 N 机器人后轮离开水冷壁，可判断其搭载能力超过 80 kg。爬壁机器人吸附在壁面上处于静止状态施加重物，重物质量达到 80 kg 时依然不发生滑移和倾覆情况，吸附性能优越，设计出的爬壁机器人安全可靠。



Figure 7. The wall climbing robot moves on the water wall vertically (left) and horizontally (right)

图 7. 爬壁机器人在水冷壁上垂直运动(左)水平运动(右)

5. 结论

为了实现一款能够搭载机械臂等设备进入炉膛进行检修工作的爬壁机器人，本文对机器人受力、磁性轮结构参数进行了研究，分析了影响磁力的相关因素，利用有限元方法建立磁性轮模型，通过仿真计算分析相关因素对磁力大小的影响，研究发现轭铁厚度在一定范围内对磁吸附力有明显增强作用，超过

范围则影响变弱,磁性轮轮面宽度和磁铁宽度对磁吸附力有明显影响,选择合适的宽度配置能使磁性轮获得更好的磁吸附特性,磁性轮内外轮轮径同样影响磁吸附能力,合适的气隙可以保证磁性轮不发生磁饱和且磁感应强度最大化,本文提出的仿真对比实验方法可以有效地完成爬壁机器人磁吸附结构设计,经由仿真实验获得最合理的磁性轮结构参数,加工出对应的工件安装在爬壁机器人上,经过实际水冷壁爬行验证了本文设计的磁吸附结构足够稳定可靠,搭载 30 kg 以内的设备在水冷壁上进行全方位爬行,无滑落倾覆情况,可以安全可靠地进行炉膛检修工作,具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] 张华胜. 水冷壁爬壁机器人运动控制研究[D]: [硕士学位论文]. 常州: 常州大学, 2021.
<https://doi.org/10.27739/d.cnki.gjsgv.2021.000119>
- [2] Stevens, M., Liu, P., Niessink, T., Mentink, A., Abelmann, L. and Terstappen, L. (2021) Optimal Halbach Configuration for Flow-through Immunomagnetic CTC Enrichment. *Diagnostics*, **11**, Article No. 1020.
<https://doi.org/10.3390/diagnostics11061020>
- [3] 陈锦. 船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.
<https://doi.org/10.27171/d.cnki.ghdcc.2019.000143>
- [4] Fan, S.H., Wang, L.M. and Zhao, Y.H. (2018) Analysis and Design of Magnetic Adsorption Unit for Tracked Ship Derusting Robot. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **452**, Article ID: 042136.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/452/4/042136>
- [5] 郭登辉, 陈原. 管道攀爬机器人非接触变磁隙式永磁吸附机构的设计与吸附性能优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(14): 1659-1668.
- [6] 张学剑, 刘春惠, 俞竹青. 锅炉水冷壁磨损检测机器人的研究与开发[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 1-4+7.
<https://doi.org/10.13952/j.cnki.jofmdr.2018.0001>
- [7] Nguyen, S. and La, H.M. (2021) A Climbing Robot for Steel Bridge Inspection. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, **102**, 75. <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01266-1>
- [8] Xu, F.Y., Dai, S.Y., Jiang, Q.S. and Wang, X.S. (2021) Developing a Climbing Robot for Repairing Cables of Cable-Stayed Bridges. *Automation in Construction*, **129**, Article ID: 103807.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103807>
- [9] 郑勇峰, 刘昊学. 自适应轮足式爬壁机器人设计与分析[J]. 机械设计, 2021, 38(9): 105-112.
<https://doi.org/10.13841/j.cnki.jxsi.2021.09.017>
- [10] 常生, 刘玉良, 许明乐, 王忠超. 船舶脱硫塔壁面盐巴清理机器人的设计与受力和仿真分析[J]. 机械工程师, 2021(9): 17-19.