

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.022

基于 Halbach 阵列的爬壁机器人磁吸附研究^{*}

刘 峰¹, 钟舜聪^{1,3*}, 伏喜斌², 陈 曼¹, 徐宗煌¹, 黄学斌²

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;

2. 厦门市特种设备检测院, 福建 厦门 361000; 3. 上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘要:针对永磁吸附履带式爬壁机器人吸附效率低的问题,设计了基于 Halbach 阵列的新型永磁吸附单元,并对其吸附特性进行了研究。采用 Ansoft Maxwell 软件对磁吸附单元进行了有限元模拟仿真,研究了 Halbach 永磁体阵列在单侧汇聚磁感线的特性,并设计了吸附力实验验证了有限元模拟的准确性;基于传统的 Halbach 永磁体阵列,在弱磁侧加入轭铁,有效减少了弱磁侧的磁场泄漏;采用 Ansoft Maxwell 软件中的参数化扫描功能,对吸附模块的关键结构尺寸进行了分析,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;为使吸附效率最大化,在上述分析基础上选取了最优尺寸。研究结果表明:优化后的吸附单元单位重量吸附力提升了 60%,达到 1 413 N/kg,磁吸附效率得到了显著提高,为爬壁机器人的设计优化提供了依据。

关键词:爬壁机器人;磁吸附;Halbach 阵列;Ansoft Maxwell;有限元仿真

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1251-06

Study on magnetic adsorption based on Halbach array for wall-climbing robot

LIU Feng¹, ZHONG Shun-cong^{1,3}, FU Xi-bin²,
CHEN Man¹, XU Zong-huang¹, HUANG Xue-bin²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China;

3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problem of low adsorption efficiency of the permanent magnetic tracked wall-climbing robot, a new type of permanent magnet adsorption unit based on Halbach array was designed, and its adsorption characteristics were studied. The finite element simulation of the magnetic adsorption unit was conducted by Ansoft Maxwell software. The characteristics that the magnetic induction lines converge on one side of the Halbach permanent magnet array were studied. An experiment was designed to verify the simulation. Based on traditional Halbach permanent magnet array, a yoke was added on the weak magnetic side to prevent the leaking of magnetic field. The parametric scanning function of Ansoft Maxwell software was used to analyze the key structural dimensions of the adsorption module independently. The influence of the width, height, thickness of the magnet array and the height of the yoke on the adsorption force and efficiency was studied. The optimal sizes were chosen based on the above analysis to maximize the adsorption efficiency. The results indicated that the optimized average adsorption capacity per unit weight increased by 60% to 1 413 N/kg, magnetic adsorption efficiency was increased significantly. It provides a basis for the design and optimization of wall climbing robot.

Key words: wall-climbing robot; magnetic adsorption; Halbach array; Ansoft Maxwell; finite element simulation

收稿日期:2020-01-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675103);机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助(MSV-2018-07);上海市自然科学基金(18ZR1414200);福建省科技计划项目(2019I0004);福建省市场监督管理局科技项目(FJMS2019044)

作者简介:刘峰(1995-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事特种设备检测自动化方面的研究。E-mail:liufengme@foxmail.com

通信联系人:钟舜聪,男,教授,博士生导师。E-mail:sczhong@fzu.edu.cn

0 引 言

爬壁机器人是特种机器人领域的研究热点,不仅能够在地面上移动,还可以在倾斜或垂直的壁面上运动并完成预定的工作和任务^[1-2]。针对大型油罐、船舶等铁磁性表面的清洁、检测等工作,往往使用磁吸附爬壁机器人进行操作,永磁吸附因其具有结构紧凑、吸附力大、无需消耗能量等优点,被广泛应用在该类爬壁机器人上。目前研究较多的磁吸附爬壁机器人是永磁吸附履带式爬壁机器人。对比非接触式磁吸附爬壁机器人,这种爬壁机器人将永磁体嵌入在履带中,具有吸附面积大、吸附稳定、壁面适应性好等优点。

为最大限度发挥磁性材料性能,提高吸附效率,需要对吸附装置的磁路进行优化设计^[3]。桂仲成等^[4]设计了一种非接触式的吸附单元,吸附单元由一块轭铁和若干块永磁体组成,轭铁用于引导磁感线,能够提供较强的吸附力;但该结构存在质量较大的轭铁,导致吸附效率较低。胡绍杰^[5]、黄忠等人^[6]采用两块永磁体加轭铁的组合方式设计了磁吸附单元,中间加入了隔磁材料增加吸附效率,并将吸附单元整合进履带中,使吸附更加稳定;但还是存在吸附力较弱的问题。陈勇^[7]、沈青青等人^[8]将 Halbach 永磁阵列运用到非接触式磁吸附爬壁机器人中,磁能利用率较前面的吸附单元有较大提高;但非接触式爬壁机器人对壁面形状适应能力较差,只适合小型轻载爬壁机器人。闫晨飞等人^[9]研究了一种变磁化方向磁体组合的永磁吸附装置,该装置由若干个磁化方向不同的永磁体紧密排列而成,这些永磁体的磁化方向首尾相连构成了环形;相较采用 Halbach 阵列排布的永磁吸附单元,吸附力得到了进一步提高,但由于该装置的磁体磁化方向较多,导致结构复杂、加工困难。

结合接触式永磁履带爬壁机器人的优点和 Halbach 磁能利用率大的特点,笔者设计新型的履带式爬壁机器人永磁吸附单元,采用 Ansoft Maxwell 对吸附单元磁感应强度和吸附力进行模拟仿真计算,分析不同结构参数对磁吸附性能的影响,并优化其结构,提升吸附效率。

1 磁吸附单元结构设计

Halbach 永磁体阵列最早由美国的 Klaus Halbach 教授提出,现被广泛应用在电机设计中,它是指将不同充磁方向的永磁体按照一定规律排列,能够在磁体的一侧汇聚磁力线,使该侧表现出强磁性,另一侧为弱磁性^[10]。

笔者设计了新型的磁吸附单元,如图 1 所示。

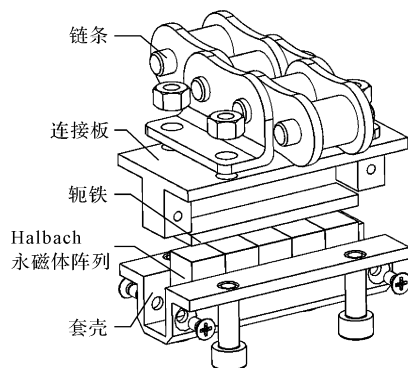


图 1 新型磁吸附单元

图 1 中,新型的磁吸附单元由连接板、轭铁、Halbach 永磁体阵列和套壳等结构组成,其中的 Halbach 永磁体阵列和轭铁组成吸附模块,产生吸附力。磁吸附单元固定在链节上,各个链节连接磁吸附单元形成磁吸附履带后提供爬壁机器人所需的吸附力。由于磁铁属于脆性材料,抗冲击性能较差,故采用铝制的连接板和套壳保护内部的永磁体阵列,避免磁体和吸附壁面直接接触,减少运动过程对磁体的冲击。在传统 Halbach 阵列的基础上,在弱磁侧加入了轭铁,能够引导弱磁侧的磁感线,减少磁场外泄,进一步增大强磁侧磁性。

永磁材料采用稀土永磁材料钕铁硼(NdFeB)。钕铁硼具有矫顽力 H_c 大、剩磁 B_r 大、磁滞回线所包围的面积大的特点,表现出较强的磁性,且磁性较为稳定。选用 NdFeB 系列中的 N35 作为永磁材料。

NdFeBN35 性能参数^[11]如表 1 所示。

表 1 NdFeB N35 性能参数

性能参数	单位	数值
剩磁 B_r	T	1.17 ~ 1.23
矫顽力 H_{cb}	kA/m	851 ~ 955
内禀矫顽力 H_{cj}	kA/m	>955
最大磁能积 $(BH)_{max}$	kJ/m ³	264 ~ 288

轭铁主要起引导磁感线的作用,故应具有较高的饱和磁感应强度、较大的磁导率和较小的矫顽力,本研究选取 Q235 钢作为轭铁材料。

2 吸附力有限元模拟及实验验证

2.1 有限元模拟仿真

铝的相对磁导率和空气近似相等,故在进行有限元模拟时,笔者将磁吸附单元外部起保护和固定作用的铝套壳等结构省略,建立了吸附力分析模型,如图 2 所示。

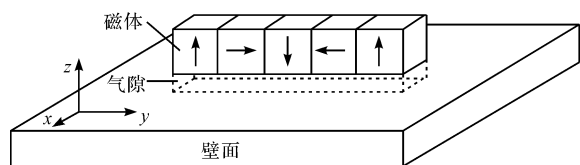


图 2 吸附力分析模型

图 2 中,吸附力分析模型内的永磁体阵列由 5 个正方体磁体组成,按照 Halbach 阵列进行排列,各磁体的磁化方向从左至右依次沿 $+z$ 、 $+y$ 、 $-z$ 、 $-y$ 和 $+z$ 方向,尺寸均为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。磁体阵列和壁面之间存在一定高度的空气间隙,厚度为 2 mm 。壁面材料为 Q235 钢,尺寸为 $60\text{ mm} \times 140\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。

笔者使用 Ansoft Maxwell 创建三维模型,添加材料参数,设置边界条件和计算方法,对该模型进行磁路仿真,得到中间截面的有限元模拟结果图,如图 3 所示。

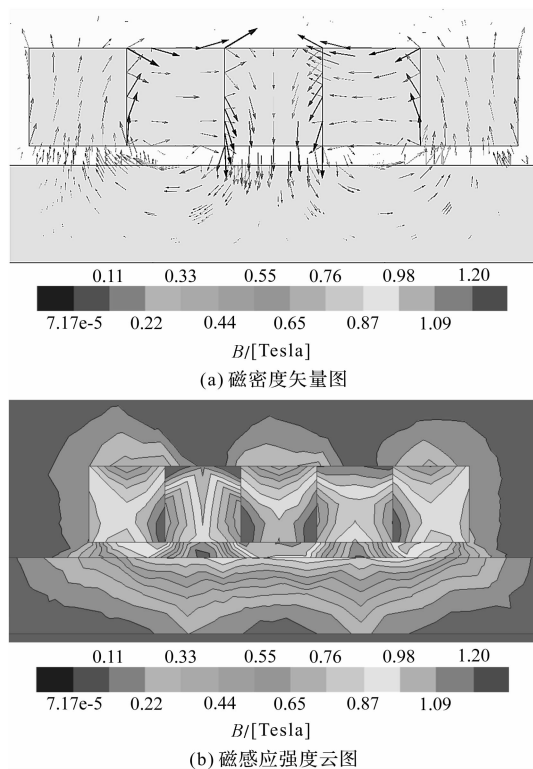


图 3 中间截面的有限元模拟结果图

由图 3 可以看出:(1)磁化方向垂直于壁面的磁体产生的磁感线,通过空气气隙进入壁面再回到磁体,产生吸附力;磁化方向平行于壁面的磁体主要起到引导磁感线向平行壁面方向汇聚的作用,使磁感线在靠近壁面一侧形成回路,从而加大强磁侧的吸附力;

(2)空气气隙和壁面中的磁感应强度相对于弱磁侧较强,但弱磁侧附近的空气中仍存在一定的磁场泄漏。为解决这一问题,在传统的 Halbach 阵列基础上加入轭铁,引导磁感线,减少磁场泄漏。其中,轭铁尺寸为 $50\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

对新的模型进行有限元仿真,得到加入轭铁后的磁感应强度云图,如图 4 所示。

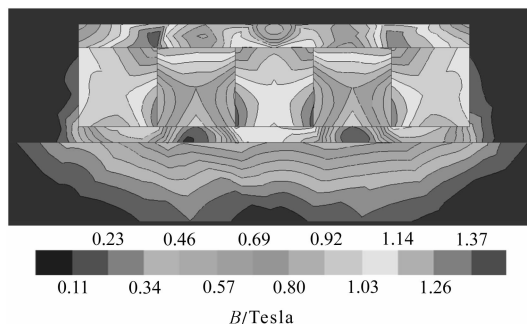


图 4 加入轭铁后的磁感应强度云图

从图 4 中可以看出,在轭铁的引导下,Halbach 阵列上部的漏磁场经过轭铁引导,重新进入磁体中,弱磁侧的磁场泄漏明显减少。

2.2 实验验证

为验证有限元模拟的正确性,笔者设计了磁吸附力测量实验,如图 5 所示。

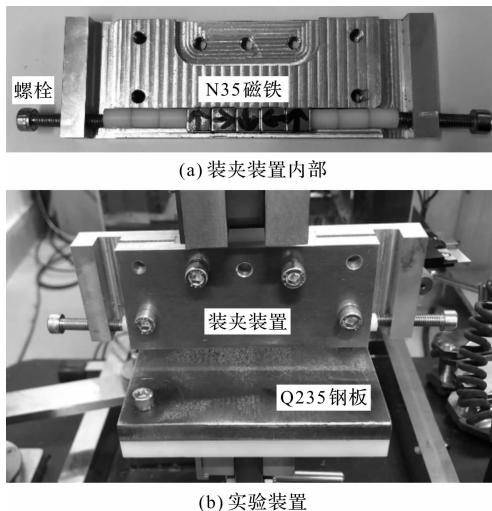


图 5 磁吸附力测量实验

在图 5 中,为避免磁体因存在间隙而产生实验误差,在磁体装夹装置侧边加入了螺栓,从永磁体阵列两边夹紧,使磁体紧密接触;将实验装置安装在拉力机上,改变气隙厚度大小,测量不同气隙厚度下的吸附力大小。

通过改变气隙厚度,计算吸附力大小,吸附力的模拟及实验结果如图 6 所示。

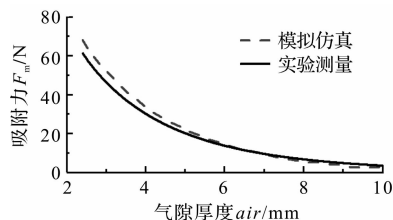


图 6 吸附力模拟及实验结果

从图 6 可以看出:(1)模拟仿真和实验中测量的吸附力随着空气气隙厚度的增大都呈现递减的趋势,并且减小的趋势逐渐减缓;两组数据基本吻合,有较好的一致性,能够验证有限元模拟的准确性;

(2)在气隙厚度较小时,模拟结果略大于实验测量数值,存在一定偏差,主要原因可能是实验采用的永磁体不是标准的立方体,存在圆角,会降低吸附力;同时,由于外部固定装置的加工和装配原因,实验过程中不能保证吸附单元内永磁体阵列底面和壁面完全平行;

(3)当气隙厚度大于 7 mm 时,此时吸附力较小,均在 10 N 以下,且实验测量数值略大于模拟结果,其原因可能是在进行吸附力实验时,当吸附距离增大到一定数值后,磁体产生的吸附力较小,拉力机上臂提升过程中产生的振动,使实验测量数据与模拟结果间产生较大偏差。

3 磁吸附单元结构参数分析

笔者提出的新型吸附结构单元中,吸附单元及尺寸参数如图 7 所示。

图 7 中,吸附单元由外部的固定结构和内部的吸附模块组成,其中,吸附模块包含了 Halbach 永磁体阵列和轭铁, Halbach 永磁体阵列为对称结构。吸附单元的吸附力主要由其中的吸附模块提供。

为探究吸附模块各结构尺寸对吸附力和吸附效率的影响,笔者采用控制变量法,在保证其他尺寸不变的情况下,对某一尺寸进行分析,探究其大小对吸附力的影响情况。

各尺寸初始值如表 2 所示。

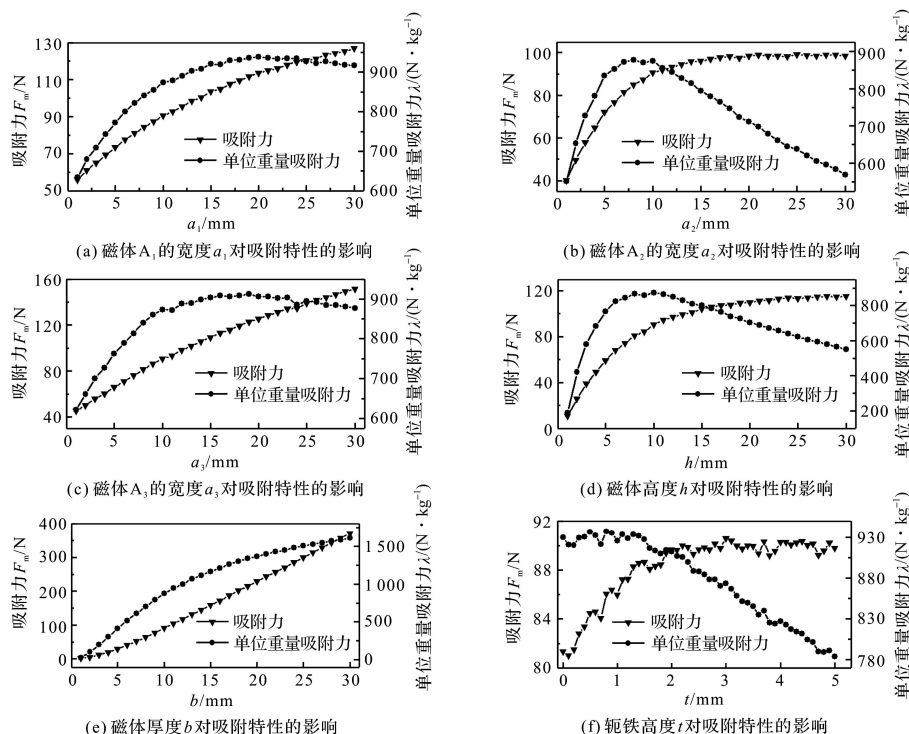


图 8 参数化扫描分析结果

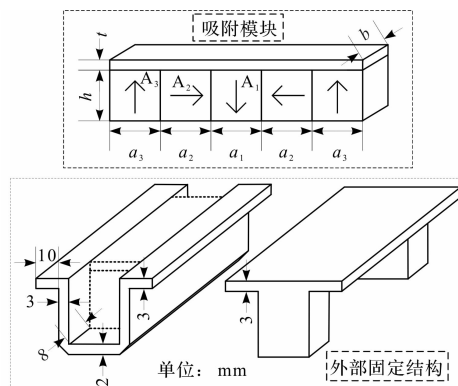


图 7 吸附单元及尺寸参数

a_1 —磁体 A_1 的宽度; a_2 —磁体 A_2 的宽度; a_3 —磁体 A_3 的宽度; h —磁体的高度; b —磁体的厚度; t —轭铁的高度

表 2 各尺寸初始值

尺寸	a_1	a_2	a_3	h	b	t
初始值/mm	10	10	10	10	10	3

吸附单元优化设计的目标是使吸附单元的吸附效率最大,其优化准则即是在一定的空气气隙厚度下,使吸附单元单位重量产生的吸附力最大化。

定义单位重量吸附力 λ 为:

$$\lambda = \frac{F_m}{G} \quad (1)$$

式中: λ —单位重量吸附力, N/kg; F_m —吸附单元在一定气隙厚度下产生的吸附力, N; G —吸附单元重量, kg。

为使吸附效率最大,则 λ 应取得最大值。

笔者采用 Ansoft Maxwell 中的参数化扫描模块,对吸附模块各个结构尺寸进行参数化扫描分析,结果如图 8 所示。

如图 8(a)所示,在磁体 A_1 的宽度 a_1 由 0 开始变大到 30 mm 过程中,吸附力随之增大,近似呈线性关系,吸附力 F_m 由 55 N 增长至 120 N。单位重量吸附力 λ 在磁体 A_1 的宽度 $a_1 = 20$ mm 时到达最大值为 939 N/kg,然后呈缓慢下降趋势。由此可知,磁体 A_1 的宽度对吸附力大小影响较大,但单位重量吸附力存在最大值。结果表明:磁化方向垂直于吸附壁面的磁体,其主要作用是产生吸附力,其宽度对吸附力和吸附效率影响较大,宽度越大,提供的吸附力越大,但宽度超过一定的值后,吸附效率增长较慢或缓慢下降。

如图 8(b)所示,在磁体 A_2 的宽度 a_2 从 0 变化到 10 mm 的过程中,吸附力从 40 N 变为 95 N,随后保持不变。单位重量吸附力 λ 在 $a_2 = 6$ mm 时到达峰值,并随着 a_2 继续增大而急剧下降。由此可见,磁体 A_2 的宽度 a_2 存在一个临界值,超过此值后吸附力趋于最大值,单位重量吸附力则会迅速下降。可以得出结论:磁化方向平行于吸附壁面的磁体的主要作用是引导磁感线转向平行壁面方向,当其宽度增大到某一临界值后,引导的磁感线趋于饱和,宽度继续增大后对吸附力大小影响较小,反而导致单位重量吸附力变小,吸附效率下降。

如图 8(c)所示,随着磁体 A_3 的宽度 a_3 增大,吸附力近似呈线性关系增长,单位重量吸附力达到最大值后缓慢下降。其对吸附力和单位重量吸附力的影响与磁体 A_1 类似,作为磁化方向垂直于吸附壁面的磁体,主要作用是产生吸附力,其宽度越大,吸附力越大,吸附效率越高。

如图 8(d)所示,随着磁体高度 h 的增加,吸附力在 $h = 13$ mm 后增长速率开始放缓,吸附力趋于最大值,单位重量吸附力 λ 在 $h = 10$ mm 时达到最大值 873 N/kg,而后逐渐下降。由此可见,磁体高度也存在一个临界值,超过此值后,进入壁面的磁感线数量趋于饱和,导致吸附力趋于某一最大值,单位重量吸附力随着磁体高度 h 的增大、吸附单元重量的增加,会逐渐减小,吸附效率降低。

如图 8(e)所示,随着磁体厚度 b 的增加,吸附力和单位重量吸附力都呈上升趋势,但单位重量吸附力的上升速率逐渐放缓。磁体厚度 b 对吸附力 F_m 和单位重量吸附力 λ 的影响都较大,与吸附力近似成正比关系。

如图 8(f)所示,随着轭铁高度 t 的增大,吸附力缓慢增加, t 达到 2 mm 后,吸附力逐渐稳定在 90 N 附近,单位重量吸附力逐渐减小。可以看出,轭铁高度 t 增大到一定数值后,导通的磁感线饱和,吸附力达到最

大值,且和其他参数相比,轭铁高度 t 对吸附力的提升贡献较小,故轭铁高度 t 的值不能太大,否则影响吸附效率。

为使吸附效率最大,针对上述各结构外形尺寸分析结果,笔者选取最优的尺寸,代入到有限元模型中,分析其在空气隙厚度为 2 mm 的情况下吸附力 F_m 和单位重量吸附力 λ 的大小。

优化前后各尺寸及计算结果如表 3 所示。

表 3 优化前后各尺寸及计算结果

参数及结果	优化前	优化后
a_1/mm	10	18
a_2/mm	10	8
a_3/mm	10	22
h/mm	10	8
b/mm	10	20
t/mm	3	1.4
吸附力 F_m/N	91	275
单位重量吸附力 $\lambda/(\text{N} \cdot \text{kg}^{-1})$	881	1 413

表 3 结果显示:优化后单位重量吸附力值由 881 N/kg 提升至 1 413 N/kg,提升率为 60.45%,吸附效率得到了较大提高。

4 结束语

针对履带式磁吸附爬壁机器人,笔者设计了新型的磁吸附单元,采用 Halbach 永磁阵列排布永磁体,配合轭铁减少磁泄漏,增大了吸附力。对磁吸附单元中吸附模块的多个结构尺寸参数进行分析,得出以下结论:

(1) 磁化方向垂直于吸附壁面的磁体主要起产生吸附力的作用,其宽度对吸附力和吸附效率均有较大贡献;

(2) 磁化方向平行于吸附壁面的磁体主要起引导磁感线的作用,其宽度超过某一值后,引导的磁感线趋于饱和,吸附力趋于最大值,继续增大其宽度会导致吸附效率下降;

(3) 磁体阵列的厚度越大,其吸附力和吸附效率也越大。磁体高度大于一定的值后,吸附力增长缓慢,吸附效率下降。轭铁对吸附力有较小提升。

结合以上结论,笔者针对吸附效率进行了结构优化,模拟结果显示,磁吸附效率得到了较大提高。

参考文献 (References):

- [1] 闫久江,赵西振,左 干,等.爬壁机器人研究现状与技术应用分析[J].机械研究与应用,2015,28(3):52-54,58.
- [2] 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(9):6-10.

- [3] OKAMOTO Y, MATSUBAYASHI Y, WAKAO S, et al. Material-density-based topology optimization with magnetic nonlinearity by means of stabilized sequential linear programming: SLPSTAB[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2015, 51(3):14.
- [4] 桂仲成,陈 强,孙振国,等.爬壁机器人永磁吸附装置的优化设计[J].电工技术学报,2006(11):40-46.
- [5] 胡绍杰,彭如恕,何 凯,等.履带式爬壁机器人磁吸附单元优化设计与实验研究[J].机械与电子,2018,36(1):69-74.
- [6] 黄 忠,刘 泉,王 茂.基于 Ansoft 的爬壁机器人吸附装置分析及设计[J].机械工程师,2015(12):108-110.
- [7] 陈 勇,王昌明,包建东.新型爬壁机器人磁吸附单元优化设计[J].兵工学报,2012,33(12):1539-1544.
- [8] 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.
- [9] 闫晨飞,孙振国,张文增,等.变磁化方向单元组合式永磁吸附装置优化设计[J].电工技术学报,2016,31(3):188-194.
- [10] LI Y B, YANG Z X, CHEN W, et al. Halbach array-based design and simulation of disc coreless permanent-magnet integrated starter generator[J]. **IOP Conference Series Earth and Environmental Science**, 2017, 93(1): 012058.
- [11] 周寿增,董清飞.超强永磁体:稀土铁系永磁材料[M].北京:冶金工业出版社,2004.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

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 Feng, ZHONG Shun-cong, FU Xi-bin, 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.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1239 页)

- [6] 农业部渔业渔政管理局.中国渔业年鉴[M].北京:中国农业出版社,2018.
- [7] 忻华忠.嵊泗贻贝加工企业内部质量可溯体系[J].中国渔业质量与标准,2013,3(3):88-92.
- [8] 沈 建.我国贝类加工现状与发展前景[J].中国水产,2008(3):73-75.
- [9] 段伟文.贻贝的加工利用研究进展[J].渔业现代化,2013,40(3):51-55.
- [10] 罗海忠.浙江省嵊泗县贻贝产业可持续发展之思索[J].中国水产,2016(12):29-33.
- [11] 杨 炬.新型贻贝加工设备设计研究[J].机械工程师,2016(2):95-97.
- [12] 孟庆良.贻贝养殖与加工技术[J].齐鲁渔业,2005,22(9):6-7.
- [13] 汪之和.我国水产品加工科技现存的问题与发展方向[J].渔业现代化,2005(4):8-9.
- [14] 邹 旻.机械设计基础实验及机构创新设计[M].北京,北京大学出版社,2012.
- [15] 邹慧君.机械运动方案设计手册[M].上海:上海交通大学出版社,2004.
- [16] 吴宗泽.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [17] 孙晓明.基于 ANSYS 对离心风机叶轮弯曲变形分析与研究[J].科技创新与应用,2019(9):13-15.
- [18] 王璐璐.基于 SolidWorks Simulation 的烧结机台车体应力分析[J].矿业工程,2017,15(2):33-34.
- [19] 刘雨亭.农机发动机叶片复杂零件的有限元仿真分析[J].农机纵横,2019(9):49-50.
- [20] 邢 坤,程武山.多功能智能轮椅背部支起机构优化设计[J].轻工机械,2019,37(5):94-98.
- [21] 任继文.ANSYS18.0 机械与结构有限元分析实例教程[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [22] 李大磊.基于 Simulation 的新型破碎机专用减速器箱体模态分析[J].矿山机械,2011,39(8):125-127.

[编辑:冯黎雅]