

新型双层 Halbach 永磁单元建模与仿真研究

袁亚强, 王战中, 赵 童

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对有效提高爬壁机器人磁吸附单元吸附能力的问题,基于磁体同极对接和传统 Halbach 永磁体阵列吸附单元,提出并设计了一种新型双层 Halbach 永磁体阵列吸附单元。首先,运用 Ansoft Maxwell 软件对建立的吸附单元模型进行分析,得到其磁力线和磁感应强度更集中分布在工作间隙中。其次,对磁吸附单元构成模块的相关结构尺寸进行优化分析并得到优化后的结构尺寸。最后,用优化后的吸附单元与传统 Halbach 磁吸附单元进行仿真比较分析。仿真结果表明,在相同尺寸条件下,新型双层 Halbach 永磁体阵列吸附单元的磁吸附力提高了 50.25%,为磁力吸附爬壁机器人磁吸附单元设计提供了方向。

关键词:爬壁机器人;磁吸附单元;Ansoft Maxwell;双层 Halbach

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)04-0095-08

0 引言

随着特种机器人的技术不断发展,爬壁机器人因其自身不仅可以在水平壁面上工作,也可以在倾斜或垂直壁面上工作,故其应用领域越来越广泛。在风力发电柱维护、大型油罐检测、船舶清洁等任务中,经常采用磁吸附爬壁机器人进行相关作业。

吸附能力是爬壁机器人最基本的也是最重要的因素。根据吸附方式的不同,可以将爬壁机器人分为磁吸附、真空吸附、仿生吸附等类型。其中磁吸附爬壁机器人应用较为广泛,磁吸附又分为电磁吸附和永磁吸附 2 种方式。而永磁吸附由于吸附力大,吸附稳定,所以能更好地适应各种工作状况,应用也较为广泛。钟华等^[1]通过实验及分析得到同极对接的磁体产生的磁场强度是单个磁体产生的 2 倍。薛珊等^[2]设计了一种同极对接阵列磁体,在对接磁铁间和两侧放置导磁轭铁,用于引导磁感线,在结构的上侧放置隔磁材料,减少上侧漏磁,从而提高吸附效率。桂仲成等^[3]对传统乙型磁路进行了设计和优化,通过对磁体各尺寸的分析 and 优化得到最优磁路,并根据应用环境设计了吸附单元的最优布局。陈勇等^[4]、沈青青等^[5]为减少传统的 Halbach 阵列磁路的漏磁现象,在磁路结构中加入软铁,并通过改变吸附装置与吸附壁面的角度控制磁吸附力的大小。闫晨飞等^[6]提出了一种变磁化方向的永磁吸附结构,相较之前的磁吸附力得到了有效提高。但是该装置由不同磁化方向的磁体紧密组合而成,结构复杂,制作困难。赵童等^[7]对相同磁体数量不同布局方式进行研究,得到了最佳布局方式和理想工作间隙。

结合之前永磁吸附的研究,提出一种新型双层 Halbach 永磁阵列吸附单元,并采用 Ansoft Maxwell 软件对吸附单元的磁场强度和吸附力进行仿真分析。通过分析不同结构尺寸对吸附性能的影响,进而对磁吸附单元进行优化,提高磁吸附性能。

1 磁吸附单元的磁路设计

美国学者 Klaus Halbach 于 1979 年提出了一种新的磁体排列结构,即 Halbach 结构,该结构通过不同充磁方向的永磁体进行排列,以使得磁力线在一侧进行加强,另一侧进行削弱。其原理如图 1 所示。

收稿日期:2021-02-19 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210023

作者简介:袁亚强(1993—),男,硕士研究生,研究方向为数字化制造及机器人技术。E-mail:1586995843@qq.com

袁亚强,王战中,赵童.新型双层 Halbach 永磁单元建模与仿真研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):95-102.

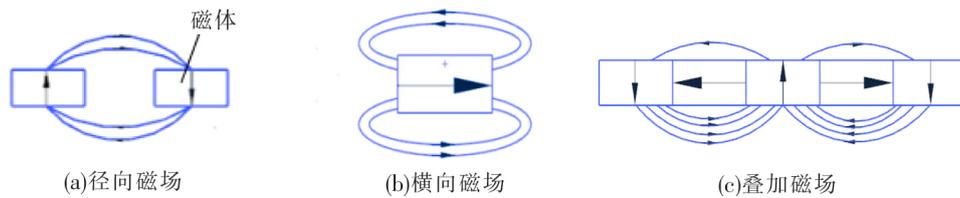


图 1 Halbach 阵列原理图

如图 2 所示,为了更好地产生聚磁效应和减少 Halbach 结构的漏磁问题,陈勇等^[4]、沈青青等^[5]在传统 Halbach 结构中增添软铁以引导磁力线,有效减少了弱磁侧的漏磁问题,并且使强磁侧和壁面之间的气隙磁通密度呈周期变化。

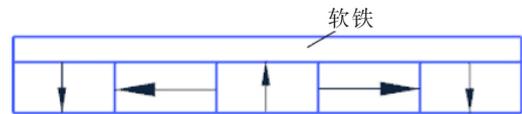


图 2 改进 Halbach 阵列图

本文所提出的新型双层吸附单元如图 3 所示,箭头代表充磁方向。上层为一对同极对接的磁体,中间为竖直向上充磁的磁体。下层由直线型 Halbach 永磁阵列组成。下层的 Halbach 永磁体产生聚磁和弱磁磁路,上层同极对接的磁体引导磁力线,减少漏磁,增大磁吸附性能。其中 H 为上层磁体厚度, T 为下层磁体厚度, A_1 为竖直向下充磁的磁体长度, A_2 为水平方向充磁的磁体长度, A_3 为竖直向上充磁的磁体长度。

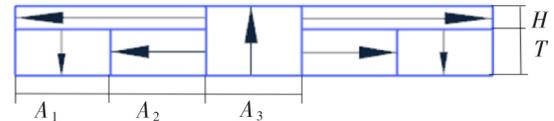


图 3 新型双层 Halbach 永磁阵列图

吸附装置中的永磁体材料采用稀土永磁材料钕铁硼(NdFeB)。选用系列中的 N35 作为永磁材料,其性能参数^[8]如表 1 所示。

表 1 NdFeB N35 性能参数

参数	剩磁 B_r/T	矫顽力 $H_c/(kA \cdot m^{-1})$	内禀矫顽力 $H_j/(kA \cdot m^{-1})$	最大磁能积 $BH_{max}/(kJ \cdot m^{-3})$	居里温度/ $^{\circ}C$
范围	1.17~1.23	851~955	>955	264~288	340

2 吸附单元磁吸附力计算

2.1 数学模型建立

二维静态磁场的麦克斯韦方程组^[9]为

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, H 为磁场强度; J 为电流密度; B 为磁感应强度。由于此属于静磁场问题,故式(1)可简化为

$$\begin{cases} \nabla \times H = 0 \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于场量 B 、 H 之间的关系由介质的特性决定,由于吸附装置中介质是各向同性的,故有: $B = \mu H$, 其中, μ 为介质的磁导率。

因为 $\nabla \times H = J$, 所以必须引入矢量磁位 A , 一般它是空间坐标和时间坐标的函数, 包含 3 个空间分量。引入矢量磁化后, 依然满足麦克斯韦方程组, 需要 A 和 B 之间满足^[10]: $B = \nabla \times A$ 。

根据库伦规范有

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可以得到

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = 0 \quad (4)$$

在整个求解域中应满足方程

$$\begin{cases} O: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \\ S: \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s^+} - \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right)_{s^-} = 0 \\ L_1: \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{L_1^-} - \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{L_1^+} = 0 \\ L_2: A = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, O 为整个有效域; S 为永磁束缚电流 J 的界限; L_1 为不同介质的交界线; L_2 为磁力线的边界。

2.2 吸附单元吸附力计算

当工作间隙 L_g (如图 4 所示) 较小时, 将吸附单元与壁面之间的气隙沿长度方向均分为 n 份, 每份所产生的磁吸附力 F_i [4] 为

$$F_i = \frac{B_i^2 S_i}{2\mu} \quad (6)$$

式中, B_i 为每份磁感应强度; S_i 为每份气隙面积。

则磁吸附单元所产生的磁吸附力 F 为

$$F = \sum_1^n F_i = \sum_1^n \frac{B_i^2 S_i}{2\mu} = \frac{B_g^2 S_g}{2\mu} \quad (7)$$

式中, B_g 为气隙磁感应强度; S_g 为工作间隙总面积。

而气隙磁感应强度由磁通连续原理和安倍原理 [11] 可得

$$B_g^2 = \mu (B_m H_m) \frac{V_m}{V_g} \frac{1}{\sigma f} \quad (8)$$

式中, $B_m H_m$ 为磁能积; V_m 为永磁体体积; V_g 为气隙体积; σ 为漏磁系数; f 为磁路的磁阻系数。

由式(6)~式(8)得

$$F = \frac{\mu (B_m H_m) V_m}{L_g} \frac{1}{\sigma f} \quad (9)$$

由式(7)可知, 气隙磁感应强度和气隙面积对磁吸附力有重要影响。而永磁体体积、空隙体积、漏磁系数、磁阻系数、磁能积对气隙磁感应强度具有重要影响, 且这些值受结构的尺寸影响。因此, 改变结构尺寸对磁吸附力具有重要影响。

3 有限元分析及参数优化

3.1 有限元模型建立及分析

如图 4 所示, 利用 Ansoft Maxwell 软件建立二维静态磁场模型。其中取上层磁体厚度 $H=5$ mm, 下层磁体厚度 $T=10$ mm, $A_1=A_2=A_3=10$ mm, 工作间隙 $L_g=5$ mm。

磁吸附单元有限元分析中涉及的材料有永磁体、吸附壁面、气隙。永磁铁选用汝铁硼 N35, 相对磁导率为 1.099 778 5; 工作间隙为空气, 相对磁导率为 1; 吸附壁面采用纯铁, 相对磁导率为 4 000。

在保证相同结构参数的前提下, 对传统 Halbach

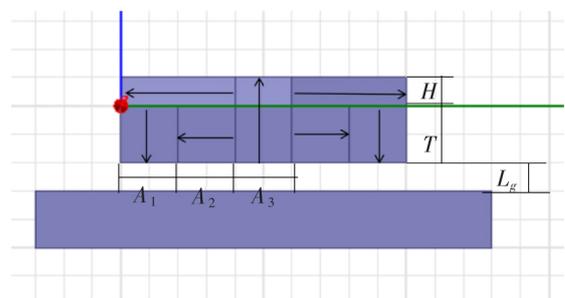


图 4 有限元结构模型

永磁阵列模型和新结构模型进行对比分析。图 5(a)、图 5(b) 分别为 2 种磁路模型的磁力线分布图。由图可知, 传统模型利用软铁减少了弱磁侧漏磁, 但未改变其端部漏磁。新型磁路模型下层用 Halbach 磁路结构产生强磁侧和弱磁侧, 上层通过同极对接的磁体产生双倍磁场强度并且对磁力线进行引导, 使得更多的磁力线通过上层磁铁引导后聚集到工作间隙中, 从而减少漏磁现象, 很好地改善了端部漏磁问题。图 5(c)、图 5(d) 分别为 2 种磁路产生的磁吸附力, 传统磁吸附力为 5 278.4 N, 新型磁路模型的磁吸附力

为 7 184.7 N, 磁吸附力提高 36%, 提高了其磁力吸附能力。

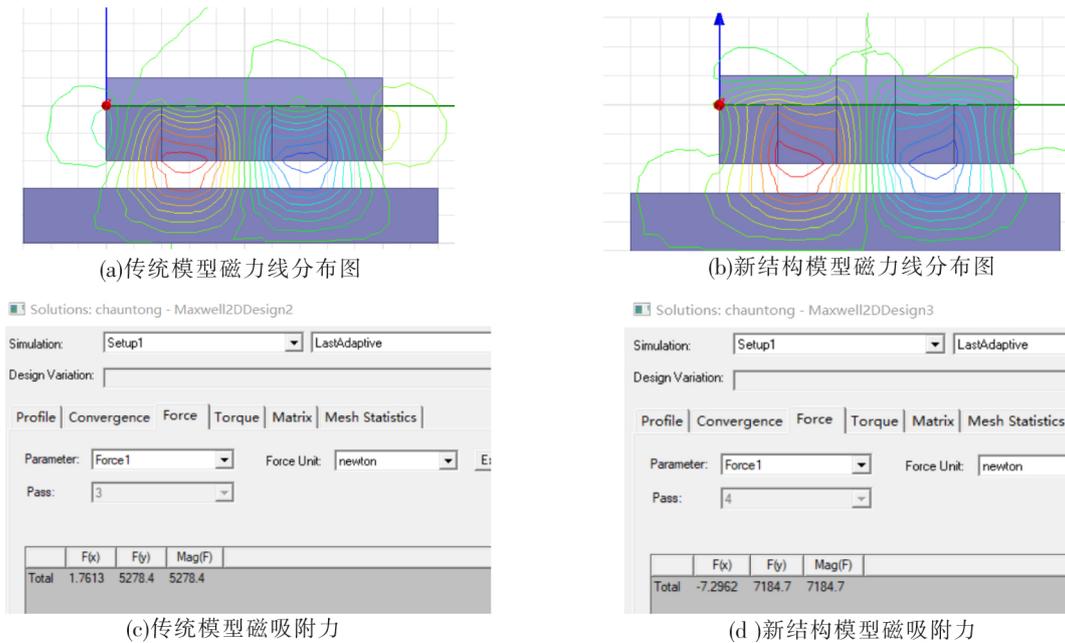


图 5 2 种模型对比图

3.2 吸附单元的结构参数分析

通过控制单一变量的方法, 研究吸附单元结构各尺寸对磁吸附力大小的影响。

3.2.1 上层磁铁厚度 H 对磁吸附力的影响

取 $T=10\text{ mm}$, $A_1=A_2=A_3=10\text{ mm}$, 通过改变 H 的大小研究磁吸附力大小的变化。 H 的变化范围取 $1\sim 30\text{ mm}$, 步长为 1 mm 。将仿真计算的数据导入到 Origin 软件进行处理, 得到磁吸附力随 H 变化的曲线(图中黑色方块连线), 如图 6 所示。由图 6 可知随着上层磁铁厚度 H 的增加磁吸附力 F 也随之增大。上层磁铁厚度 H 从 1 mm 逐渐增加到 15 mm 时, 磁吸附力迅速增加; 而 H 从 15 mm 增加到 30 mm 时, 虽然磁吸附力 F 也逐渐增加, 但是变化比较平缓。 H 从 15 mm 增加到 30 mm , 厚度增加了 50% , 而磁吸附力从 $9\ 709.2\text{ N}$ 增加到 $11\ 428\text{ N}$ 仅增加了 17.7% 左右, 即永磁体的利用率不高。原因是因为随着 H 的逐渐增加, 上层同极对接磁体产生的磁力线有一部分不能通过下层磁路传到工作间隙中。虽然 H 增加, 但下层所产生的磁力线不变, 故上层磁路参与引导下层磁力线的磁铁体积会逐渐增加, 将所有磁力线引导后, 新增的上层磁体不再参与引导, 造成了磁力浪费。故在满足磁吸附要求的前提下, 上层磁体厚度不应过大。下层磁铁厚度 $T=10\text{ mm}$ 时, 上层磁体厚度 H 取 $5\sim 10\text{ mm}$ 之间, 磁吸附力效率较高。综合考虑, 上层磁铁厚度与下层磁铁厚度的比值 H/T 应在 $0.5\sim 1$ 之间为宜。

根据仿真计算的数据, 利用 Origin 软件对其进行拟合, 得到拟合曲线(见图 6)和数值解析表达式(10)。从拟合曲线中可以看出当 $H>30\text{ mm}$ 时, 磁吸附力虽然随着 H 的增加而增大, 但增加幅度较小, 与上述磁吸附力变化曲线一致。其数值解析表达式为

$$F=13\ 822.619-\frac{8\ 357.482}{1+\left(\frac{H}{14.517}\right)^{1.247}} \quad (10)$$

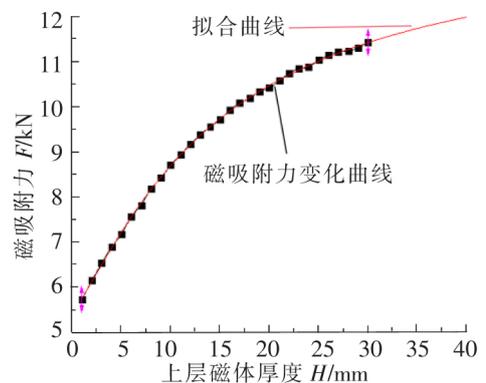


图 6 磁吸附力随 H 变化曲线与拟合曲线

3.2.2 下层磁铁厚度 T 对磁吸附力的影响

取 $H=5\text{ mm}$, $A_1=A_2=A_3=10\text{ mm}$, 通过改变 T 的大小研究磁吸附力大小的变化。 T 的变化范围为 $1\sim 30\text{ mm}$, 步长为 1 mm 。将仿真计算的数据在 Origin 软件中绘制成曲线图(图中黑色方块连线), 如图 7 所示。随着 T 逐渐增加, 磁吸附力 F 也逐渐增大, 在 $1\sim 12\text{ mm}$ 之间吸附力 F 变化较大, 而在 $12\sim 30\text{ mm}$ 之间吸附力 F 变化比较平缓, 且在 $20\sim 30\text{ mm}$ 之间磁吸附力基本保持不变。当 T 从 10 mm 变化到 20 mm 时, 磁吸附力 F 从 $7\ 158\text{ N}$ 变化到 $9\ 089\text{ N}$, 磁铁体积增加一倍, 但磁吸附力仅提高了 26.9% 。随着 T 逐渐增加, 吸附力 F 增加较为缓慢, 是因为工作间隙中的磁通逐渐饱和。当气隙磁通达到饱和状态时, 增加 T 对磁吸附力影响较小, 且会造成磁浪费和增加装置质量。故 T 的取值范围应在 $8\sim 12\text{ mm}$ 之间。

根据仿真计算的数据, 利用 Origin 软件对其进行拟合, 得到拟合曲线(见图 7)和数值解析表达式(11)。从拟合曲线中可以看出, 当 $T>30\text{ mm}$ 时, 随着 T 的逐渐增大, 磁吸附力基本保持不变, 此时 T 对磁吸附力影响较小。其数值解析表达式为

$$F=10\ 076.498-8\ 560.954\times(0.895)^T \quad (11)$$

3.2.3 磁体长度 A_3 对磁吸附力的影响

为研究 A_3 对吸附力 F 的影响, 保持 $H=5\text{ mm}$, $T=10\text{ mm}$, $A_1=A_2=10\text{ mm}$ 不变, A_3 取 $1\sim 30\text{ mm}$, 步长为 1 mm , 研究吸附力 F 的变化。将仿真计算的数据导入到 Origin 软件进行处理, 得到吸附力随 A_3 变化的曲线(图中黑色方块连线), 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 吸附力 F 随着 A_3 的增加逐渐增大。在 $1\sim 15\text{ mm}$ 之间吸附力 F 变化较大, 而在 $15\sim 30\text{ mm}$ 之间吸附力 F 变化较小。这是因为竖直向上充磁的磁体所产生的磁力线是通过左右水平充磁的磁体、向下充磁的磁体、气隙、工作壁面形成闭合磁路, 当 A_3 逐渐增加时, 两侧磁铁和气隙之间的磁力线达到饱和状态, 再增加 A_3 , 磁吸附力 F 变化不明显。为提高磁吸附效率, 在磁体长度 $A_1=A_2=10\text{ mm}$ 时, A_3 应取 $10\sim 15\text{ mm}$ 之间。即 $A_3/(A_1+A_2)$ 应在 $0.5\sim 0.75$ 之间。

利用同样的方法, 在 Origin 软件中得到拟合曲线(见图 8)和数值解析表达式(12)。从拟合曲线中可以看出当 $A_3>30\text{ mm}$ 时, 磁吸附力虽然随着 A_3 的增加而增大, 但变化比较平缓。其表达式为

$$F=11\ 838.532-99\ 343.966\times(0.931)^{A_3} \quad (12)$$

3.2.4 磁体长度 A_1 、 A_2 对磁吸附力的影响

取 $H=5\text{ mm}$, $T=10\text{ mm}$, $A_3=14\text{ mm}$, 并保持 A_1+A_2 的总值为 20 mm , 研究 A_1 、 A_2 在 $0\sim 20\text{ mm}$ 之间以 1 mm 作等距变化过程中磁吸附力 F 的变化情况。按照上述方法在 Origin 软件中绘制出磁吸附力随 A_1 、 A_2 变化的曲线(图中方块连线), 如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 随着 A_1 、 A_2 的变化, 磁吸附力 F 也随之变化。在 A_1 从 0 增加到 6 mm , A_2 从 20 mm 减少到 14

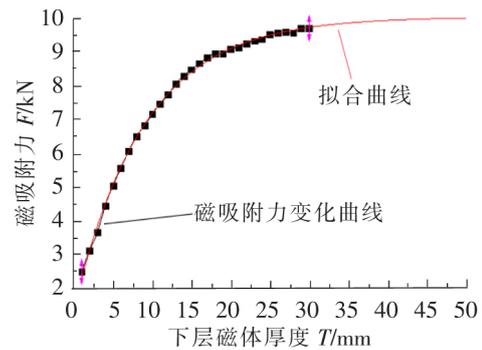


图 7 磁吸附力随 T 变化曲线与拟合曲线

增加, 且会造成磁浪费和增加装置质量。故 T 的取值范围应在 $8\sim 12\text{ mm}$ 之间。

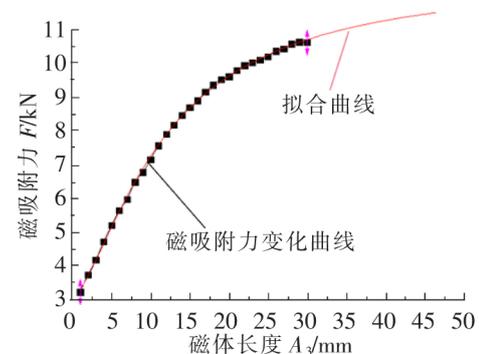


图 8 磁吸附力随 A_3 变化曲线与拟合曲线

再增加 A_3 , 磁吸附力 F 变化不明显。为提高磁吸附效率, 在磁体长度 $A_1=A_2=10\text{ mm}$ 时, A_3 应取 $10\sim 15\text{ mm}$ 之间。即 $A_3/(A_1+A_2)$ 应在 $0.5\sim 0.75$ 之间。

利用同样的方法, 在 Origin 软件中得到拟合曲线(见图 8)和数值解析表达式(12)。从拟合曲线中可以看出当 $A_3>30\text{ mm}$ 时, 磁吸附力虽然随着 A_3 的增加而增大, 但变化比较平缓。其表达式为

$$F=11\ 838.532-99\ 343.966\times(0.931)^{A_3} \quad (12)$$

3.2.4 磁体长度 A_1 、 A_2 对磁吸附力的影响

取 $H=5\text{ mm}$, $T=10\text{ mm}$, $A_3=14\text{ mm}$, 并保持 A_1+A_2 的总值为 20 mm , 研究 A_1 、 A_2 在 $0\sim 20\text{ mm}$ 之间以 1 mm 作等距变化过程中磁吸附力 F 的变化情况。按照上述方法在 Origin 软件中绘制出磁吸附力随 A_1 、 A_2 变化的曲线(图中方块连线), 如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 随着 A_1 、 A_2 的变化, 磁吸附力 F 也随之变化。在 A_1 从 0 增加到 6 mm , A_2 从 20 mm 减少到 14

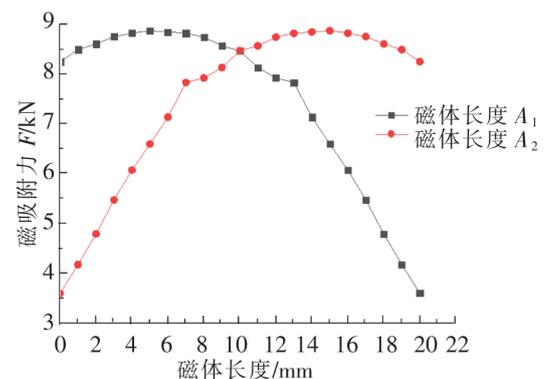


图 9 磁体长度 A_1 、 A_2 对磁吸附力的影响

mm 时,磁吸附力 F 随之增大; A_1 和 A_2 继续变化,磁吸附力 F 逐渐减小。当 A_1 从 0 逐渐增加时,竖直向下充磁的磁体将上层磁体产生的磁力线进行引导,使之汇聚到工作间隙中,但是在 A_1 逐渐增加的过程中, A_2 逐渐减小,而随着 A_2 的减小,下层 Halbach 阵列磁路所产生的的强磁和弱磁现象减弱,故导致整个吸附单元的吸附力逐渐减小。分析 $A_1 = 5$ mm, $A_2 = 15$ mm 时磁吸附力达到最大。即 $A_1 : A_2$ 为 1 : 3 时,整个吸附单元的吸附力最大。

由于 A_1 、 A_2 对磁吸附力变化影响曲线对称,故只对 A_1 进行 4 次多项式曲线拟合。其拟合曲线如图 10 所示,其数值解析表达式为

$$F = 8\,294.306 + 158.077A_1 - 1.501A_1^2 - 1.678A_1^3 + 0.038A_1^4 \quad (13)$$

3.2.5 工作间隙长度 L_g 对磁吸附力的影响

基于以上分析,取 $H = 5$ mm, $T = 10$ mm, $A_1 = 4.5$ mm, $A_2 = 13.5$ mm, $A_3 = 14$ mm,在此基础上研究工作间隙对磁吸附力大小的影响。取工作间隙范围为 0~30 mm,步长为 1 mm。按照同样的方法将仿真数据在 Origin 软件中绘制成磁吸附力随 L_g 变化的曲线(图中黑色方块连线),如图 11 所示。从图 11 可以看出,随着气隙的不断增大,磁吸附力逐渐降低。气隙在 0~3 mm 时吸附力急速下降,在 3~10 mm 时气隙对吸附力的影响趋于稳定,当气隙长度为 15 mm 时,吸附力近乎为 0。由图 11 可知,气隙长度是影响吸附力的重要因素,故在设计吸附单元时要充分考虑气隙对吸附力的影响。

按照上述方法,在 Origin 软件中得到拟合曲线(见图 11)和数值解析表达式(14)。从拟合曲线中可以看出,当 $L_g > 20$ mm 时,磁吸附力接近于 0。其表达式为

$$F = 0.131 + 6.088e^{-\frac{L_g}{0.785}} + 13.008e^{-\frac{L_g}{2.72}} + 14.667e^{-\frac{L_g}{5.435}} \quad (14)$$

3.3 结构尺寸优化分析

在研究吸附单元各结构尺寸对磁吸附力大小影响的基础上和保证吸附单元的体积不变的前提下,为了得到最优的结构参数,对吸附单元各结构尺寸设定变量范围。对上层磁体厚度 H (4~10 mm)、下层磁体厚度 T (8~12 mm)、下层磁体长度 $A_1 + A_2$ (16~23 mm)、 A_3 (8~17 mm),即磁体总厚度(12~22 mm),磁体总长度(40~63 mm),进行优化分析,得到磁吸附力变化曲线,如图 12 所示。从图 12 可以看出,通过保持体积不变,对吸附单元的结构尺寸进行优化分析,当磁体总长为 58 mm,磁体总厚度为 12.9 mm,即 $H = 4.3$ mm, $T = 8.6$ mm, $A_1 = 5.6$ mm, $A_2 = 16.7$ mm, $A_3 = 13.4$ mm 时,吸附力达到最大为 8 363.1 N。

基于上述优化结果对磁体总长为 58 mm,磁体总厚度为 12.9 mm(即 $A_1 = 5.6$ mm, $A_2 = 16.7$ mm, $A_3 = 13.4$ mm, $H = 4.3$ mm, $T = 8.6$ mm)的新型磁路结构和传统 Halbach 磁路结构在 Ansoft Maxwell 软件中进行分析比较,得到如图 13(a)、图 13(b)所示的传统磁路和新型磁路的磁力线和磁感应强度分布图。从图 13 可以看出,新型磁路结构的磁力线和磁感应强度

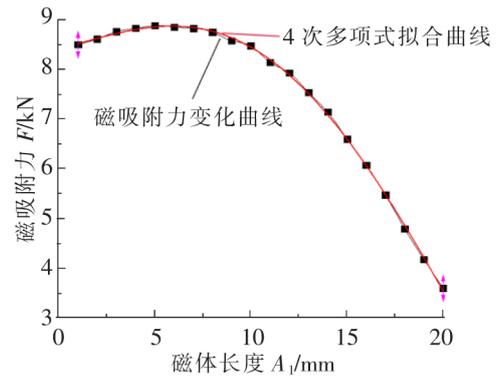


图 10 磁吸附力随 A_1 变化曲线与拟合曲线

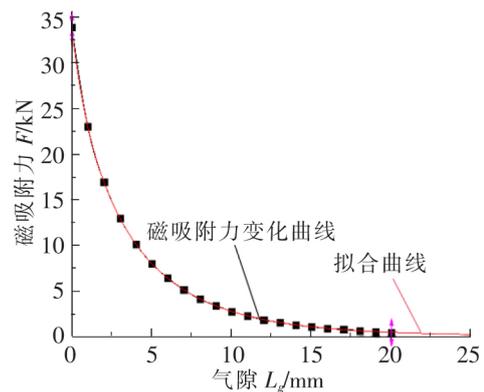


图 11 磁吸附力随 L_g 变化曲线与拟合曲线

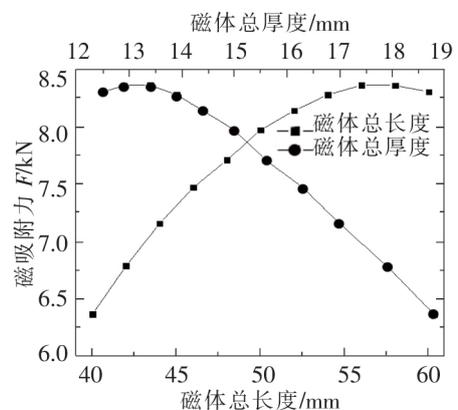


图 12 结构参数对吸附单元磁吸附力的影响

度更加集中在工作间隙中,能够明显提高磁吸附能力。

图 13(c)、图 13(d)为气隙 5 mm 时传统 Halbach 磁路模型和新型双层 Halbach 模型的磁吸附力。由图 13 可知,传统 Halbach 磁路模型磁吸附力为 5 566.3 N,新型磁路模型的磁吸附力为 8 363.1 N,磁吸附力提高了 2 796.8 N,提高率为 50.25%。

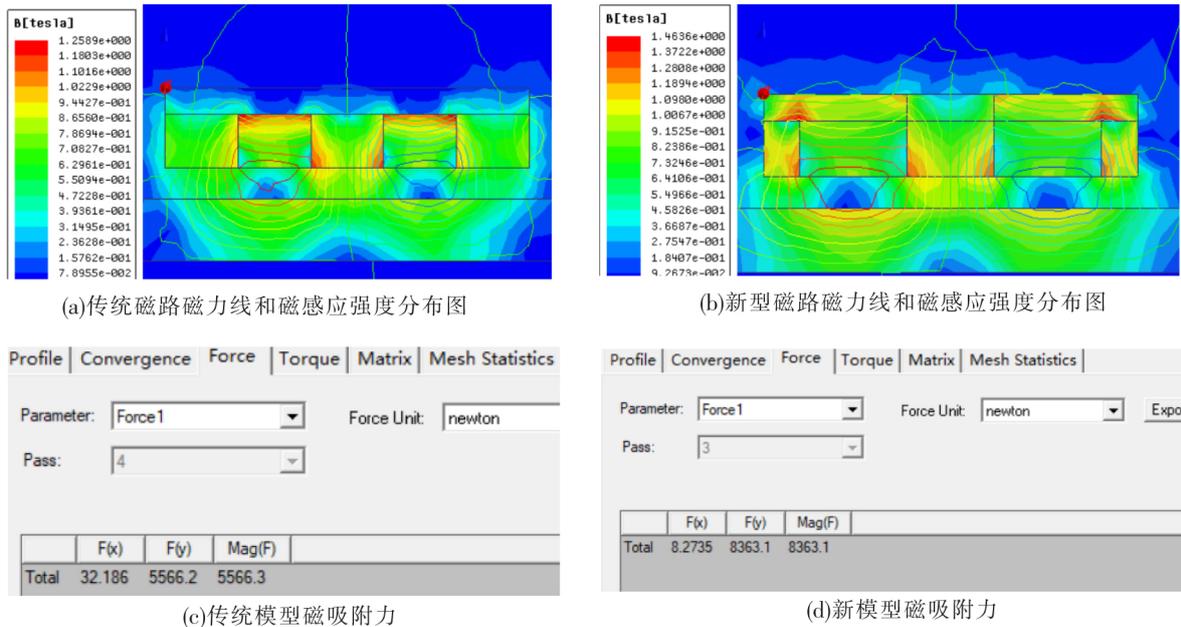


图 13 新型磁路和传统 Halbach 磁路仿真分析对比图

4 结论

(1)为提高磁力吸附爬壁机器人的磁吸附能力,提出了一种新型双层 Halbach 磁路模型,比传统 Halbach 磁路模型磁吸附能力提高了 50.25%。

(2)运用 Ansoft Maxwell 软件对提出的新模型进行了二维静态磁场仿真分析,得到吸附单元的磁场分布并计算了磁吸附力大小,为吸附单元的设计提供了依据。

(3)通过新型磁路模型各结构尺寸对磁吸附力影响的仿真分析,得到了上下层磁体厚度、磁体长度以及气隙对磁吸附力大小具有重要影响。上下双层磁体厚度比在 0.5~1 之间,下层磁路竖直向上充磁磁体和下层其余磁体的长度比在 0.5~0.75 之间,下层磁路中聚磁磁体长度比为 1:3 时,磁吸附能力达到最大。

参 考 文 献

- [1]钟华,白武帅,侯志坚,等.通过永磁体同极相对提高磁场强度的研究[J].中国现代教育装备,2014(3):67-69.
- [2]薛珊,冯志强,徐龙,等.基于 ANSYS 的爬壁机器人永磁吸附单元研究[J].制造业自动化,2016,38(8):22-25.
- [3]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.
- [4]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.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]赵童,王战中,孙国翔.磁力爬柱机器人磁吸附力分析与仿真研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2020,33(4):69-74.
- [8]袁硕,刘天羽.基于 Ansoft 的电力机器人永磁吸附单元有限元分析[J].电机与控制应用,2018,45(2):71-74,127.
- [9]邹洪森,刘志远,赵欣洋,等.基于 Halbach 阵列的爬壁机器人磁轮特性研究[J].轻工机械,2019,37(1):28-31,42.
- [10]赵博. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [11]林其壬,赵佑民.磁路设计原理[M]北京:机械工业出版社,1987:301.

Study on Modeling and Simulation of New Double-layer Halbach Permanent Magnet Adsorption Unit

Yuan Yaqiang, Wang Zhanzhong, Zhao Tong

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Targeting on the problem of effectively improving the adsorption capacity of the magnetic adsorption unit of the wall-climbing robot, and based on the magnets connected with the same poles and the traditional Halbach permanent magnet array adsorption unit, a new type of magnetic adsorption unit with double-layer Halbach permanent magnet array was proposed and designed. Firstly, the adsorption unit model was analyzed with Ansoft Maxwell software, and the result showed that the magnetic field lines and magnetic induction intensity are more concentrated in the working gap. Secondly, optimum analysis of the structural sizes of the modules were carried out, and the optimized structural sizes were obtained. Finally, the optimized adsorption unit was compared with the traditional Halbach adsorption unit by stimulating. The simulation results show that, with the same sizes, the magnetic adsorption force of the new double-layer Halbach permanent magnet array adsorption unit is increased by 50.25%, which provides a direction for the design of the magnetic adsorption unit of the wall-climbing robot.

Key words: wall-climbing robot; magnetic adsorption unit; Ansoft Maxwell; double-layer Halbach