

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.005

基于 Halbach 阵列爬壁机器人 磁吸附单元的优化设计

沈青青, 张 晋, 李 根

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要:针对爬壁机器人磁吸附单元磁能利用率低的问题,通过对 Halbach 永磁阵列结构参数的研究分析,建立了磁吸附单元的优化设计目标(最大吸附力与吸附单元质量比)和约束条件。基于实验数据验证了有限元模型和方法,结合 Isight 软件和仿真分析进行了磁吸附单元的优化。结果表明, Halbach 永磁阵列中,水平磁化永磁体主要起引导磁力线的作用,垂直磁化永磁体产生通过壁面的垂直磁力线,形成磁吸附力;磁吸附单元优化后的最大吸附力与吸附单元重量比可达 1 156,磁能利用率大幅度提高。

关 键 词:爬壁机器人; Halbach 永磁阵列; Isight 软件; 吸附单元

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2014)05-0017-06

Optimized Design of Magnetic Adsorption Unit for Wall-Climbing Robots Based on Halbach Array

SHEN Qingqing, ZHANG Jin, LI Gen

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at magnetic adsorption unit for wall-climbing robots low utilization of magnetic energy, the paper studied the structural parameters of Halbach permanent magnet array. An optimization goal (ratio of the maximum adsorption force and adsorption unit weight) and constraints of the magnetic adsorption unit were established. The finite element models and methods was verified by based on experimental data. The magnetic adsorption unit was optimized by combining Isight software and finite element analysis. The simulation results show: in the Halbach permanent magnet array, the horizontally magnetized permanent magnet mainly guides the magnetic field lines, the perpendicular magnetized permanent magnet mainly produces the magnetic field lines which go through the wall and form a magnetic adsorption force; the ratio of the maximum adsorption force and adsorption unit weight is up to 1156, the magnetic energy efficiency greatly improved.

Key words: wall-climbing robots; halbach permanent magnet array; Isight; adsorption unit

吸附单元作为爬壁机器人的核心组件,对爬壁机器人在壁面上的安全爬行起着至关重要的作用。

国内外众多学者对此进行了大量的研究。桂仲成等设计了一款非接触式吸附单元,该吸附单元由若干永磁体按照一定方式进行耦合,能够提供较强的吸附力,但磁能利用率不高,结构体积大^[1-2]。袁夫彩等设计了一种直接镶嵌磁铁在履带上的恒磁力吸附单元,该吸附单元与壁面接触,磁力恒定,但存在驱动阻力

大、磁铁脱离瞬间吸附力波动导致的瞬间振动等问题^[3]。为此,有研究者开始研究变磁力吸附单元,通过转动中间圆柱体永磁体磁极来调节磁力大小,具有吸附和短路两种状态,但存在制造繁琐、安装困难、且无法应用于轮式爬壁机器人^[4-6]。陈勇等将 Halbach 永磁阵列运用到爬壁机器人吸附单元^[7],磁能利用率较前面几种吸附单元有所提高,但并未对结构进行优化。

收稿日期:2014-02-23;修回日期:2014-04-09

作者简介:沈青青(1988),男,浙江嵊州人,硕士研究生,主要研究方向为机械结构优化设计。E-mail:770569625@qq.com

因此,本文针对磁吸附单元磁能利用率进行优化分析研究。基于 Halbach 永磁阵列,建立了优化目标,运用有限元法对 Halbach 磁吸附单元的磁感应强度和吸附力进行了定量分析,并采用多岛遗传算法对该结构参数进行了优化。

1 吸附单元的基本结构

磁吸附爬壁机器人采用非接触式的吸附方式(见图 1),即指磁吸附单元安装在移动机器人的两侧,在吸附装置和壁面之间预留一定的工作气隙,气隙大小可由升降装置进行调节。

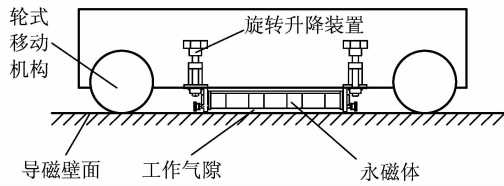


图 1 爬壁机器人原理示意图

Figure 1 Schematic of climbing robot

直线型 Halbach 永磁阵列,如图 2 所示,箭头方向代表磁化方向,水平磁化磁体和垂直磁化磁体之间紧密贴合,一旦出现空气间隙,将会降低 Halbach 永磁阵列的磁通密度,减弱聚磁效应^[8]。

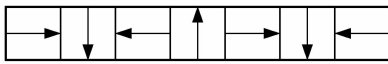


图 2 直线型 Halbach 永磁阵列

Figure 2 Linear Halbach permanent magnet array

实际使用中,为了更好地产生聚磁效应以及克服 Halbach 阵列端部效应带来的漏磁问题,在直线型 Halbach 阵列的两端和弱侧磁场一侧增加适量软铁,如图 3。在爬壁机器人工作结束时,通过旋转吸附单元使该侧朝向壁面,便于爬壁机器人与壁面脱离。

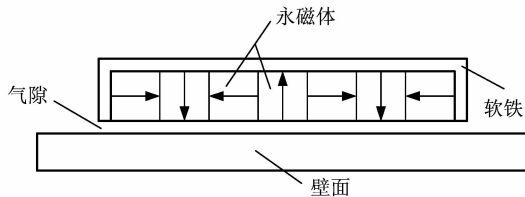


图 3 Halbach 永磁阵列吸附单元

Figure 3 Halbach permanent magnet array adsorption unit

2 磁吸附有限元分析及实验验证

2.1 静态电磁场的求解

三维静态磁场分析有限元方程和边界条件可由磁

场麦克斯韦方程组^[9-10]导出。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{1}{\mu} (\nabla^2 A)_x = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) - \frac{1}{\mu} (\nabla^2 A)_y = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \right) \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) - \frac{1}{\mu} (\nabla^2 A)_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中,} \begin{cases} (\nabla^2 A)_x = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \\ (\nabla^2 A)_y = \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} \\ (\nabla^2 A)_z = \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, A_x, A_y, A_z, B_x, B_y 和 B_z 分别为磁场强度和磁感应强度在 x, y 及 z 方向上的分量。

吸附单元优化设计要求计算作用于吸附单元上的吸附力。根据 Maxwell 张力方法,当闭合面 S 处于均匀且各向同性的介质中时,作用在磁体上的合力 F 可用张力张量 T 的面积分来计算,即

$$F = \oint_S T dS = \oint_S \left[\frac{1}{\mu} (B \cdot n) B - \frac{1}{2\mu} B^2 n \right] dS \quad (3)$$

式中:

S ——包围永磁体的空气介质闭合面;

n ——面积 dS 的外法线方向的单位矢量;

B ——闭合面 S 上的磁感应强度;

μ ——空气的磁导率。

2.2 磁吸附力测试和有限元仿真对比

为验证有限元法仿真结果的正确性,设计了如图 4 所示的磁吸附力测试实验装置,吸附单元取 7 块立方形 ($10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) 永磁体按照 Halbach 永磁阵列进行排列,软铁厚度 3 mm ,长度为 70 mm ,宽度为 10 mm 。试验时,把吸附单元固定到拉伸试验台,置于水平放置的钢板之上,基于力传感器测量垂直方向作用力。

吸附单元静态磁场分析涉及材料有永磁体、壁面、软铁以及空气。表征材料特性的主要参数有:磁导率、矫顽力矢量、 $B-H$ 曲线等。

永磁材料采用高性能稀土材料钕铁硼,牌号为 N35,磁性能具体参数见表 1。通过简化,可得回复磁导率 $\mu_{\text{rec}} = 1.06$ 。

软铁材料采用 Q235 钢,考虑到该材料的非线性,采用 $B-H$ 曲线^[11]如图 5 所示。

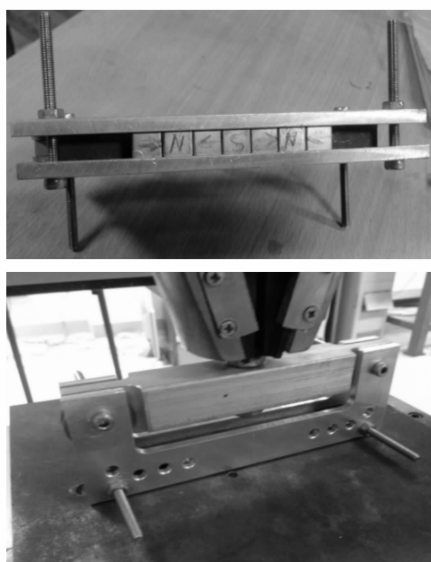


图4 实验模型装置

Figure 4 Experimental model device

表1 NdFeB N35 性能参数

Table 1 NdFeB N35 Performance Parameters

牌号	剩磁感应 强度/mT	矫顽力/ ($\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$)	内禀矫顽力/ ($\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$)	最大磁能积/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
N35	1 170 ~ 1 220	≥ 868	≥ 955	263 ~ 287

考虑到机器人工作时,所处壁面的有效截面积与厚度足够大,因此在计算中简化为线性材料,相对磁导率 μ_{rec} 为2 000。空气和气隙相对磁导率 $\mu_{\text{rec}} = 1.0$ 。

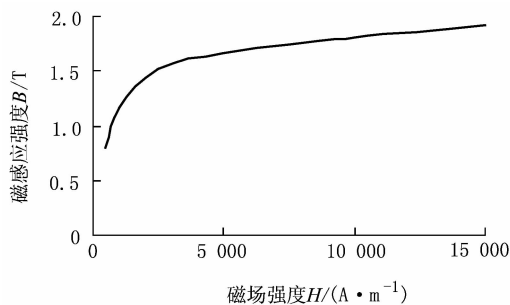


图5 Q235 磁化曲线

Figure 5 Q235 Magnetization curve

运用 ANSYS 有限元求解,建立如图6所示的单元模型,考虑到和实验模型对比的一致性,仿真单元模型中省去了两侧软铁。图7是吸附单元和壁面磁通密度矢量图,由图可知,吸附单元上表面由于软铁的存在,引导了磁力线的走势,上表面近乎呈零磁场状态,下表面和壁面之间的气隙磁通密度分布呈周期变化,垂直磁化的永磁体承担了提供吸附力的角色,水平磁化的永磁体起引导磁力线的角色。图8是磁吸力计算值和

实测值的对比。结果表明,计算值与实测值走势相同且数值相近,具有较好的一致性。实测值略小于计算值,有一定的偏差(最大偏差值为11.4%)。

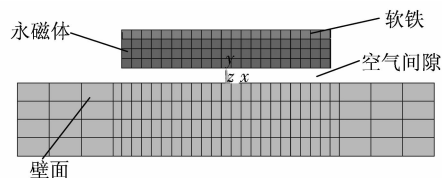


图6 吸附单元的有限元模型(隐去空气单元)

Figure 6 Finite element model of adsorption unit (air unit Faded)

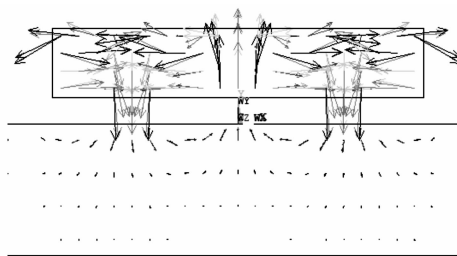


图7 吸附单元和壁面磁通密度矢量图

Figure 7 Magnetic flux density vector graphic of adsorption unit and wall

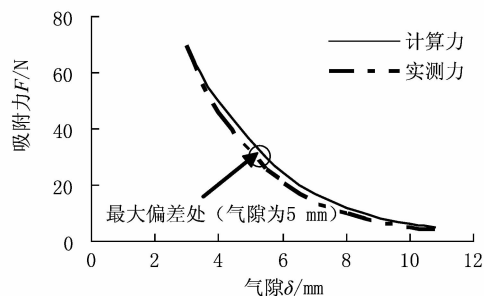


图8 有限元计算值和实验实测值

Figure 8 FEM value and experimental measured value

为了探讨实测值与计算值差异的原因,建立了考虑两永磁体存在空气间隙的仿真模型,如图9所示(其中横坐标为相对气隙宽度,气隙与永磁体宽度之比)。图10为永磁体和壁面间隙5 mm情况下,吸附单元吸附力随永磁体间气隙宽度的变化曲线。由图可知,吸附单元的吸附力随着气隙间距的增大而减小,在相对气隙5%时,吸附力为理想状态下的98%。

图11为考虑偏转某角度的仿真模型。图12为永磁体和壁面间隙5 mm情况下,吸附单元吸附力随偏转角的变化曲线。由图可知,吸附单元的吸附力随着角度的增大而增大,在角度 2° 时,吸附力为理想状态

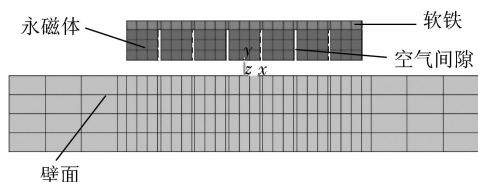


图9 吸附单元的有限元模型

Figure 9 Finite element model of adsorption unit

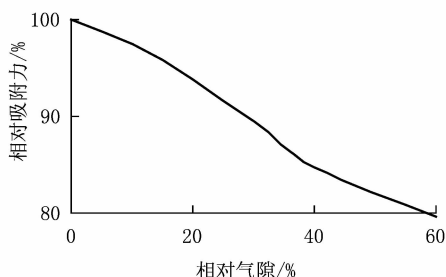


图10 空气间隙和吸附力关系

Figure 10 Relationship between air gap and adsorption force under 103%. And using the magnetic force calculation empirical formula^[12] to verify the simulation results. Magnetic force empirical formula

$$F_r = \frac{F_h}{1 + s^3}$$

式中:

F_r ——吸附单元在气隙为 s 下产生的吸附力/N;

F_h ——吸附单元在气隙为 0 时产生的吸附力/N。

当吸附单元偏转角度 α 后,吸附单元可以通过积分的方式近似算出 F_r' ,如图13所示,故偏转角度 α 后吸附力为

$$F_r' = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{S+\tan(\pi-\frac{\alpha\pi}{180})x}^{S+h+\tan(\pi-\frac{\alpha\pi}{180})x} \frac{F_h}{1+y^3} dy dx$$

L 为吸附单元长度, S 为间隙, h 为吸附单元高。

偏差百分比为

$$\eta = \frac{F_r'}{F_r} \times 100\%$$

其中

$$F_r = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_S^{S+h} \frac{F_h}{1+y^3} dy dx$$

将吸附单元参数代入公式并通过 MATLAB 计算得 η 值为 102%,与仿真结果相似。

另外,实际模型尺寸受加工精度的影响,实际材料参数会产生波动,都会对仿真结果和实验结果造成偏差。

图14为考虑两侧有软铁的仿真模型。图15为永磁体和壁面间隙 5 mm 情况下,吸附单元和壁面的磁

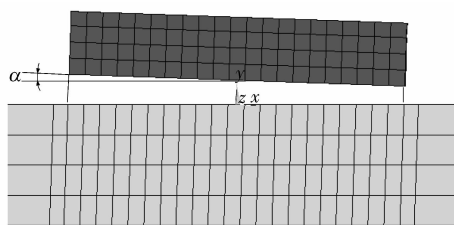


图11 吸附单元有角度偏差时有限元模型

Figure 11 Finite element model of adsorption unit with angular deviation

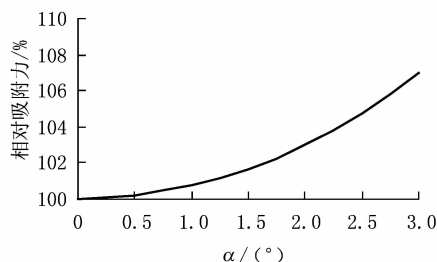


图12 吸附单元吸附力随偏转角的变化曲线

Figure 12 Adsorption force curve varies with the angle of deflection

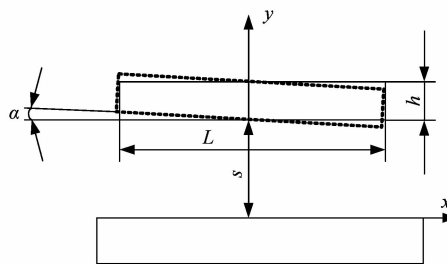


图13 吸附单元偏转示意图

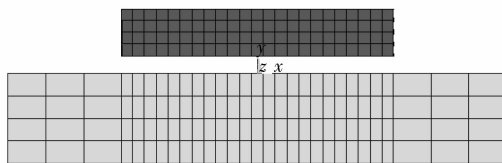
Figure 13 Adsorption unit deflection schematic
通密度矢量图,对比图6可知,两侧软铁改善了直线型 Halbach 永磁阵列的端部效应问题。两者磁力相差 1%。

图14 吸附单元的有限元模型(两侧有软铁)

Figure 14 Finite element model of adsorption unit (both sides with a soft iron)

3 吸附单元的结构参数优化

3.1 结构参数及约束条件

为保证吸附单元的紧凑性及设计结果的可行性,同时将永磁体的磁能利用率最大化。提出了在规定工

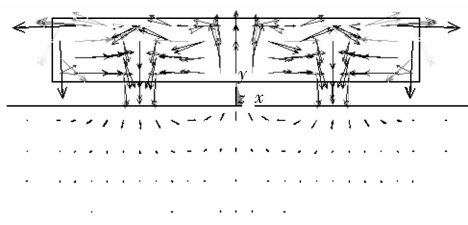


图 15 吸附单元和壁面磁通密度矢量图

Figure 15 Magnetic flux density vector graphic of Adsorption unit and wall

作气隙下吸附单元的优化目标是:吸附单元提供的吸附力与吸附单元自量比值 λ 最大,定义

$$\lambda = \frac{F_p}{G_p} \Big|_{\delta=\bar{\delta}}$$

式中:

F_p ——吸附单元在规定气隙($\delta=\bar{\delta}$)下的吸附力/N;

G_p ——吸附单元的自身质量/kg。

吸附单元设计参数为 $\mathbf{d} = \{a_1, a_2, h, b, t_1, t_2\}$, a_1 为水平磁化磁体长度, a_2 为垂直磁化磁体长度, h 为永磁体高度, b 为永磁体、软铁宽度, t_1 为两侧软铁厚度, t_2 为上侧软铁厚度长度。如图 16 所示。针对某特定的爬壁机器人,考虑永磁体下表面与壁面的工作气隙为 5 mm 情况下单个磁吸附单元的最小吸附力为 450 N,以满足爬壁机器人负载 15 kg。

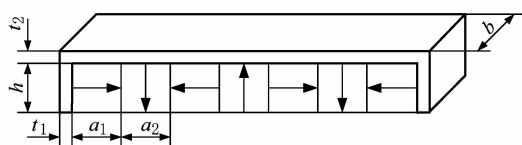


图 16 吸附单元的几何参数

Figure 16 Adsorption unit's geometric parameters

特定爬壁机器人的吸附单元优化模型可以表示为

$$\begin{cases} \text{find } \mathbf{d} = \{a_1, a_2, h, b, t_1, t_2\} \\ \lambda = f(\mathbf{d}) \\ \text{Max} f(\mathbf{d}) \\ \text{约束条件:} \\ 10 \text{ mm} \leq a_{1,2} \leq 30 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \leq h \leq 30 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \leq b \leq 40 \text{ mm} \\ 1 \text{ mm} \leq t_{1,2} \leq 3 \text{ mm} \\ F_p \geq 450 \text{ N} \end{cases}$$

3.2 优化结果分析

利用 ANSYS-APDL 的参数技术与相关命令创建

参数化分析文件,用于优化循环分析,运用 Isight 软件批处理方法进行优化设计。

Isight 软件提供的多岛遗传优化算法,模仿生物进化过程中的遗传繁殖机制,对优化问题空间个体进行编码,然后对编码后的个体种群进行遗传操作(如:选择、交叉、变异等),通过迭代获得新种群,并从中寻找含有最优解或较优解的组合。故采用多岛遗传算法对优化目标函数经过 10 次迭代优化,得到最佳设计序列与初始值对比如表 2 所示,优化结果如表 3 所示。

表 2 参量优化前后对比

Table 2 Parameters comparison before and after optimized

参量	a_1 / mm	a_2 / mm	h / mm	b / mm	t_1 / mm	t_2 / mm
优化前	20.000	20.000	20.000	30.000	3.000	3.000
优化后	11.973	24.204	12.159	39.998	1.004	1.213
优化后取整	12.000	24.000	12.000	40.000	1.000	1.000

表 3 结果优化前后对比

Table 3 Results comparison before and after optimized

结果	吸附力 F_p /N	自身质量 G_p /kg	λ
优化前	654	0.790	828
优化后	576	0.498	1 156
优化后取整	572	0.499	1 146

图 17 为优化后的仿真模型。图 18 为优化后永磁体和壁面间隙 5 mm 情况下,吸附单元和壁面的磁通密度矢量图。

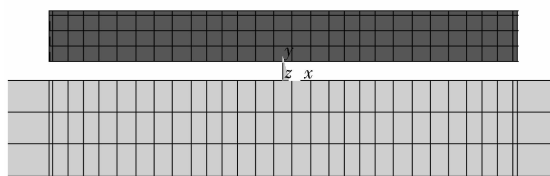


图 17 优化后吸附单元的有限元模型

Figure 17 Finite element model of adsorption unit after optimized

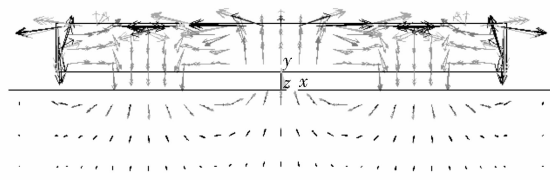


图 18 吸附单元和壁面磁通密度矢量图

Figure 18 Magnetic flux density vector graphic of adsorption unit and wall

(下转第 26 页)