

## Halbach 型永磁吸附机构的有限元分析及优化<sup>①</sup>

陈 勇<sup>②</sup> 王昌明 包建东

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

**摘 要** 为了利用 Halbach 阵列磁场单边性的特点,以进一步提高 Halbach 型永磁吸附机构的磁吸附性能和降低其自身重量,设计了一种基于 Halbach 阵列的新型永磁吸附机构并对其进行了研究。运用有限元法建立了该永磁吸附机构磁场的二维有限元数学模型,导出了磁感应强度和磁吸附力的有限元计算表达式。运用改变参数法分析了结构参数对磁吸附性能的影响,采用遗传算法对结构参数进行了优化,并通过磁吸附力的实验测量验证了 Halbach 型永磁吸附机构磁性能的优越及优化结果的正确性。

**关键词** 永磁吸附机构, Halbach 阵列, 有限元分析, 磁场计算, 遗传算法

### 0 引 言

永磁机构主要由永磁体构成,制造该永磁体时需消耗一定的能量,但永磁机构在长期使用过程中不再另外消耗能量,且具有工作可靠、结构简单、效率高等优点,因而永磁机构在很多场合逐渐作为设备的核心部件之一代替了电磁机构<sup>[1]</sup>。众所周知,电磁机构所产生的电磁吸力依赖于通电线圈的安匝数,因而不可避免地带来耗电大、自重大、高温寿命短、有不安全隐患、附属设备多、价格高及维修量大等一系列缺点。永磁吸附机构是永磁机构中十分重要的一类,其对铁磁材料对象的吸附能力优于真空吸附、电磁吸附等其它吸附方式,因而有着广阔的应用前景。永磁吸附机构主要应用于永磁吸盘、磁性夹具、起重装置等<sup>[2-4]</sup>。目前由于各类钢铁壁面爬壁机器人的广泛应用,作为其主要核心附壁机构的永磁吸附单元引起了许多学者的深入研究<sup>[5-8]</sup>。

永磁体是磁吸附机构的磁力源,磁路设计的优劣直接影响到机构的吸附性能。传统变磁力永磁吸附机构的磁路为保证有效磁通路径和避免磁饱和效应需要大量的软铁作为磁轭,这使得机构自身重量较大,不仅增加了成本,而且影响到作为其它设备特别是爬壁机器人的负载能力<sup>[8]</sup>。Halbach 永磁阵列

是一种新型永磁体排列方式,它改变了传统单一的水平或垂直永磁排列方式,使得阵列一边的磁场显著增强而另一边显著减弱,且很容易得到在空间较理想正弦分布的磁场<sup>[9]</sup>。Halbach 阵列的“磁单极子”特性在永磁电机中得以使用,不仅使其具有磁自屏蔽特性,也可以大大减少电机的质量和体积(无需背铁引导磁路),这将有助于提高电机的动态特性<sup>[10]</sup>。同样,这种磁场分布特性也适合于作为永磁吸附机构的变磁力磁路结构,但由于有限长度及分段组合使其存在弱磁侧磁场非零和端部效应漏磁较大的问题,需要加以改进后使用。针对上述问题,本文提出了一种 Halbach 型永磁吸附机构,并运用有限元法建立了其磁场模型,导出了其磁场分布和磁吸附力的数学模型,分析了不同结构参数对磁吸附性能的影响,采用遗传算法对结构参数进行了优化,通过实验测量予以验证,为进一步研究永磁吸附机构提供了理论和实验依据。

### 1 Halbach 型永磁吸附机构原理

在设计永磁吸附机构时应该满足以下要求:  
(1)具有变磁力的磁路结构,增加工作时最大吸附力,减少卸载时最小吸附力;(2)合理设计磁路以减少漏磁,提高永磁利用率;(3)减少机构的重量。基

① 国家自然科学基金(51175267)资助项目。

② 男,1982年生,博士生,讲师;研究方向:爬壁机器人,机器人新型机构,永磁吸附机构和人工智能测试与故障诊断技术;联系人, E-mail: chen\_y\_2735033@163.com  
(收稿日期:2012-07-22)

于上述要求,永磁吸附机构的基本结构由直线型 Halbach 永磁阵列和适量软铁组成。如图 1 所示,垂直磁化和水平磁化的永磁体长度分别为  $a$ 、 $b$ ,厚度为  $d$ ,宽度为  $w$ ,并按箭头代表的磁化方向排列。建立如图直角坐标系,坐标原点  $o$  与  $o'$  重合,该 5 模块直线型 Halbach 阵列的  $-y$  一侧为强磁侧,  $+y$  一侧为弱磁侧。为改进弱磁侧磁场非零和阵列两端的端部效应,减少漏磁,阵列的这两个部分放置了少量软铁作为磁轭以改善磁路。另外,在机构两端沿中轴线方向安置中心旋转轴,由控制电机驱动,可以改变机构强磁侧与导磁工件接触的相对位置,从而通过改变气隙磁场强度来改变磁吸附力。当强磁侧与导磁工件正面接触时产生最大吸附力,为“吸附”状态;相反地,当弱磁侧与导磁工件接触时产生最小吸附力,为“卸载”状态。

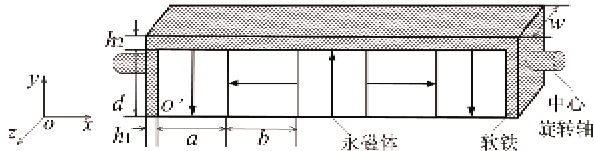


图 1 Halbach 型永磁吸附机构示意图

## 2 磁场的有限元分析

本文运用有限元方法分析新型永磁吸附机构的磁场分布情况和磁吸附性能。与传统的磁路算法相比,有限元方法能处理磁路算法必须使用的一些假设,而且更能从物理本质上反映电磁场的分布规律,且磁性材料的非线性磁导率、漏磁、边缘效应等都能被精确分析<sup>[11]</sup>。

### 2.1 有限元数学模型的建立

在建立其磁场有限元模型时进行一定的假设以简化计算过程:(1)研究的主要目的是分析磁场分布、漏磁等与时间没有关系的磁场特性,磁场为静磁场;(2)假定永磁材料各向同性,忽略磁滞效应,采用平均磁化曲线;(3)将三维的永磁吸附系统简化成二维平面问题进行研究;(4)取无限远处空间的磁势为参考磁势,即零磁势;(5)假定软铁厚度适宜,不存在磁饱和效应。

#### (1) 磁场的有限元数学模型

为了减少计算的复杂程度,根据永磁吸附机构的对称性,建立其二维模型,宽度设为常数。其二维静态磁场分析的有限元控制方程和边界条件可由磁场的 Maxwell 方程组导出。在除去各种边界的整个

求解域,如永磁体、空气、软铁、导磁壁面应满足如下方程:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r)) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为矢量磁势,其定义为  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 。  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_r$  为材料的相对磁导率;  $\mathbf{B}_r$  为剩余磁感应强度。

方程(1)需满足的边界条件为

$$\begin{cases} L_1: \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} \right)_{L_1^+} - \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} \right)_{L_1^-} = \mathbf{J}_0 \\ L_2: \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} \right)_{L_2^+} = \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} \right)_{L_2^-} \\ \Gamma_1: \mathbf{A} = 0 \\ \Gamma_2: \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $L_1$  为有永磁束缚电流  $\mathbf{J}_0$  存在的界限;  $L_2$  为不同介质间的交界线;  $\Gamma_1$  是与磁力线重合的边界;  $\Gamma_2$  是对称边界(磁力线垂直通过该边界);  $\mathbf{n}$  为边界法线方向。

对应的变分问题为

$$\begin{cases} J[\mathbf{A}] = \iint_D \left\{ \frac{1}{2\mu} \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right)^2 \right] - \mathbf{J}_0 \cdot \mathbf{A} \right\} dx dy \\ = \min \\ \mathbf{A}|_{L_i} = \mathbf{A}_i(x, y) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

经离散后得出有限元方程

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{A}\} = \{\mathbf{P}\} \quad (4)$$

式中  $\{\mathbf{A}\}$  为磁势矩阵,  $[\mathbf{K}]$  为系数矩阵,其各元素为

$$\begin{cases} K_{ij} = \sum_{\sigma=1}^N K_{ij}^{\sigma} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n_0) \\ K_{rs}^{\sigma} = K_{sr}^{\sigma} = \frac{1}{4\Delta\mu_0} (b_r b_s + c_r c_s) \quad (r, s = i, j, m) \\ b_i = y_j - y_m, c_i = x_m - x_j \\ b_j = y_m - y_i, c_j = x_i - x_m \\ b_m = y_i - y_j, c_m = x_j - x_i \\ \Delta = (b_i c_j - b_j c_i) / 2 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$ ,  $(x_m, y_m)$  为三角形单元剖分的顶点坐标,  $\Delta$  为单元的面积。  $\{\mathbf{P}\}$  离散矩阵各元素为

$$\begin{cases} P_i = \sum_{\sigma=1}^N P_i^{\sigma} \quad (i = 1, 2, \dots, n_0) \\ P_l^{\sigma} = \mathbf{J}_0 \Delta / 3 \quad (l = i, j, m) \end{cases} \quad (6)$$

由此可得各离散点的矢量磁势  $\mathbf{A}_i$ , 则磁感应强度为

$$\begin{cases} B_{cx} = (b_i A_i + b_j A_j + b_m A_m) / 2\Delta \\ B_{cy} = (c_i A_i + c_j A_j + c_m A_m) / 2\Delta \\ B_c = \sqrt{B_{cx}^2 + B_{cy}^2} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 磁吸附力的计算

有限元法计算吸附力时,假设气隙  $\delta$  较小,将磁吸附机构与导磁壁面之间的气隙平均分成  $n$  等份,忽略气隙处边缘效应,每等份的磁感应强度  $B_c$  可由式(7)求得。则根据能量守恒原理,采用虚位移法可得磁吸附单元与导磁壁面之间的磁吸附力为

$$F = \sum_{e=1}^{N_0} F_e = \sum_{e=1}^{N_0} \frac{B_e^2 S_e}{2\mu_0} = 10^5 \sum_{e=1}^{N_0} \left( \frac{B_e}{0.4965} \right)^2 S_e \quad (8)$$

式中,  $F_e$  为每个等份网格产生的磁吸附力,  $S_e$  为每个等份网格气隙的有效截面积。

2.2 ANSYS 有限元求解过程和结果分析

本文采用 ANSYS 10.0 有限元软件进行分析求解,它提供了完整的电磁场分析模块,可以用来分析电磁领域多方面的问题,如磁通密度、涡流、能量损耗等。

(1) 创建物理环境

设置菜单过滤。选择分析模块,创建磁场的物理环境,在过滤图形用户界面中的“Electromagnetic”栏选取“Magnetic-Nodal”,以得到简化的图形用户界面。

定义单元类型及其选项(KEYOPT 选项)。采用二维磁实体矢量 PLANE53 单元分析永磁阵列磁场,采用耦合实体 PLANE13 单元分析磁轭铁磁化磁场,采用 INFIN9 单元分析远场磁场。

(2) 前处理过程

建模。采用参数化建模方式便于以后的修改和优化设计。建模采用积木式法,首先输入关键点,由关键点连成线,由线构成面。对于轴对称、形状和结构相似的面可以通过与其对称面复制生成。取初始结构参数  $a = b = d = 8\text{mm}$ ,  $h_1 = h_2 = 3\text{mm}$  建模。

材料属性的设置。吸附机构静态磁场分析涉及的材料有永磁体、磁轭、导磁壁面以及空气。

永磁材料选用 NdFeB-33M,其性能参数见表 1。永磁体在  $x, y$  方向的矫顽力矢量  $MGXX, MGY Y$  由永磁体的磁化方向和材料的矫顽力  $H_{co}$  决定,  $z$  方向的矫顽力矢量  $MGZZ = 0$ 。

磁轭材料可采用电工纯铁或叠合的电工硅钢片,但这两种材料的价格都较高,将使永磁吸附机构的成本增高。本设计中采用低碳钢作为磁轭材料,

表 1 NdFeB 33M 性能参数

$B_r$ (T)	$H_{ob}$ (kA/m)	$H_{cj}$ (kA/m)	$BH_{max}$ (kJ/m)	$\mu_{res}$
1.14 - 1.17	$\geq 852$	$\geq 1114$	255	1.05 - 1.09

不仅价格低廉,而且有良好的导磁性能、加工性能和机械强度。磁轭与吸附导磁壁面的相对磁导率分别设为 5000 和 3000。空气和气隙的相对磁导率均为 1.0。

网格划分是有限元计算过程中重要的一步,它直接影响计算的精度。网格划分越密,求解精度就越高,但耗费计算时间也相对越多。二维模型网格剖分单元采用三角形,在气隙处加密得到比较满意的需求精度,共划分 1046 个网格单元。

施加边界条件和载荷。通过指定磁矢量位定义磁力线平行、周期性边界条件,使用远场单元定义无穷远处无限边界条件。此外,为进行磁场吸附力计算,定义虚位移力标志 MDVI。

(3) 求解和结果分析

对新型永磁吸附机构进行有限元模型计算求解,对其各种磁性能加以后续处理,分析结果。

磁力线分布。磁力线是描述磁源空间磁场的一个重要指标,该线任一点的切线方向与该点磁感强度方向一致,即它在该点的切线方向代表了磁感强度的方向。求解得机构处于“吸附”状态时磁力线分布如图 2 所示。同一条磁力线上各点磁感强度是不相同的,它对磁场的描述是以单位截面积通过磁力线的条数来表达。由图 2 可知:气隙中磁力线分布比较均匀,使得对表面的吸附更加可靠;机构两端的漏磁由磁轭引导至气隙中,增强了气隙磁场;弱磁侧磁力线在磁轭中分布,减少了漏磁,使该侧与导磁壁面接触时易于卸载;空间漏磁场较少。

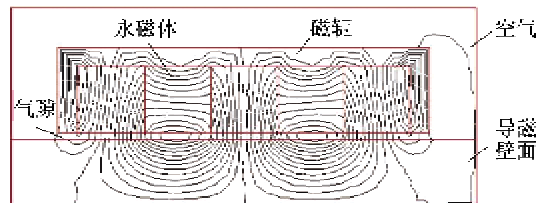


图 2 吸附机构二维磁力线图

磁感强度分布。如前所述,理想的 Halbach 阵列的磁场空间分布为较理想的正弦分布,但由于实际无法制作连续磁化的阵列,常常以分段磁化的磁块组合在一起,呈一种近似理想阵列。机构两侧

磁感应强度在表面的分布值可以由式(7)计算得到并分别作图3、图4。由图3可知,受谐波影响,5段Halbach阵列的在“吸附”状态时强磁侧磁场为近似正弦分布,且产生吸附力的主要是沿 $y$ 方向的磁感应强度 $B_y$ ;由图4可知,沿 $y$ 方向的磁感应强度 $B_y$ 与图3的对应值相比非常小,且亦受谐波影响呈近似余弦分布。若定义气隙磁感应强度均值为

$$\langle B \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N B_i}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2} \quad (9)$$

则图3和图4的磁感应强度均值比 $\langle B \rangle_1 / \langle B \rangle_2 = 0.8942 / 0.0026 = 343.92$ ,该比值越大,说明两种状态相互转换得越明显,具有变磁场作用的磁性能越好。

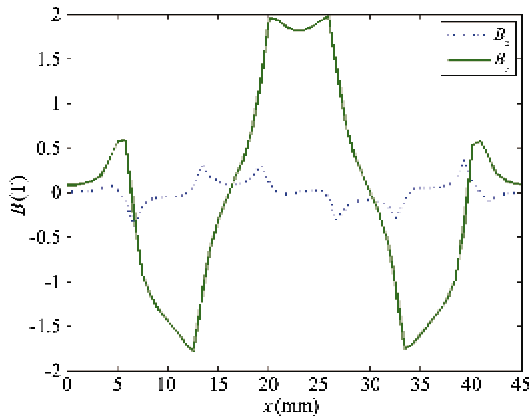


图3 “吸附”状态时气隙磁场分布曲线

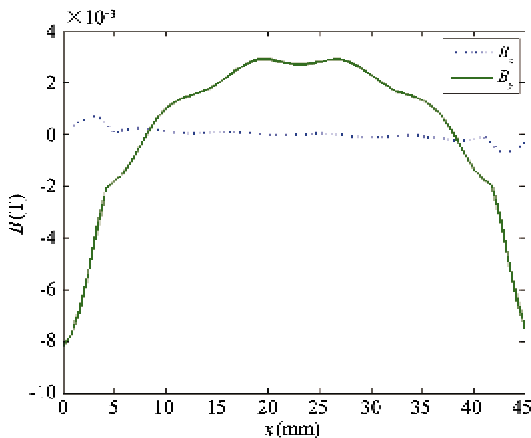


图4 “卸载”状态时气隙磁场分布曲线

磁吸附力计算。定义永磁吸附机构处于“吸附”状态时产生的最大吸附力为 $F_{\max}$ ;相同气隙下,永磁吸附机构处于“卸载”状态时产生的最小吸附力为 $F_{\min}$ ;单位宽度最大、最小吸附力分别为 $\bar{F}_{\max}$ 和 $\bar{F}_{\min}$ 。在气隙长度 $\delta = 1 \text{ mm}$ 、机构宽度为 $8 \text{ mm}$ 时

运用式(8)求解得两种状态下的磁吸附力, $F_{\max} = 276.98 \text{ N}$ , $F_{\min} = 0.04 \text{ N}$ ,即机构吸附时负载大,且卸载容易。

### 3 结构参数的影响及优化

#### 3.1 结构参数对磁性能的影响

为了进一步提高永磁吸附机构的磁吸附性能,不同的结构参数对磁性能的影响是值得研究的。单位体积提供的最大吸附力是衡量磁吸附机构磁性能优劣的重要指标之一<sup>[11]</sup>,定义如下:

$$F_v = \frac{F_{\max}}{V_m} = \frac{\bar{F}_{\max}}{(ma + nb)d} \quad (10)$$

其中 $m$ 、 $n$ 分别为垂直和水平磁化磁体的数目, $V_m$ 为永磁体体积。 $F_v$ 的值越大,则单位体积永磁体提供的最大吸附力越大,即永磁利用率较高。

##### (1) 水平磁化磁体长度 $b$ 对磁性能的影响

通过改变有限元参数化模型的参数值,可以得到不同情况下的数值计算结果。为了研究 $b$ 对磁性能的影响,固定 $a$ 、 $d$ 为初始值,当 $b \in [2, 20]$ (单位:mm)范围变化时, $F_v$ 与 $b$ 的关系如图5所示。由图可知,随着 $b$ 的增大, $F_v$ 先增加然后减小,当 $b = 5.5 \text{ mm}$ 时, $F_v$ 达到最大值 $0.109 \text{ N/mm}^3$ 。

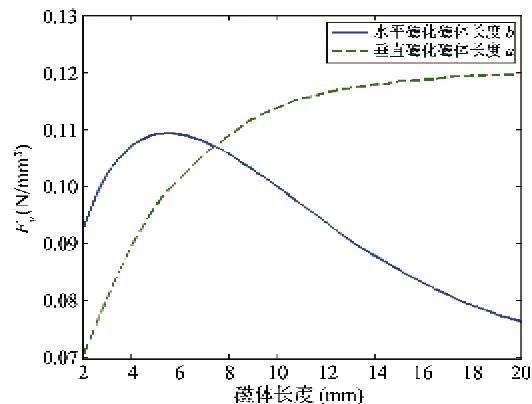


图5  $F_v$ 与 $b$ 、 $a$ 的关系曲线

##### (2) 垂直磁化磁体长度 $a$ 对磁性能的影响

为了研究 $a$ 对磁性能的影响,固定 $b$ 、 $d$ 为初始值,当 $a \in [2, 20]$ (单位:mm)范围变化时, $F_v$ 与 $a$ 的关系亦如图5所示。由图可知,在 $a \leq 10$ 时, $F_v$ 随 $a$ 的增加而迅速增大;在 $a \geq 10$ 时, $F_v$ 随 $a$ 的增加而增大趋势变缓。此时 $a$ 的增加主要使永磁体体积变大,即机构的自重增加较多而吸附力却增加较少,因此, $a$ 的值在 $10 \text{ mm}$ 附近可得到较好的吸附性

能。

(3) 磁体高度  $d$  对磁性能的影响

同样固定  $a, b$  为初始值, 当  $d \in [3, 12]$  (单位: mm) 范围变化时,  $F_v, F_{\max}$  与  $d$  的关系如图 6 所示。由图可知,  $F_v$  随  $d$  的增加而减小, 因此, 为提高磁性磁体高度不应过大; 另一方面,  $F_{\max}$  随  $d$  的减小而减小, 为满足吸附可靠性磁体高度不应过小。综合上述分析, 为达到如上  $F_v$  最大值  $0.109 \text{ N/mm}^3$ ,  $d$  值在  $7 \sim 8 \text{ mm}$  之间可以得到较好的吸附性能。

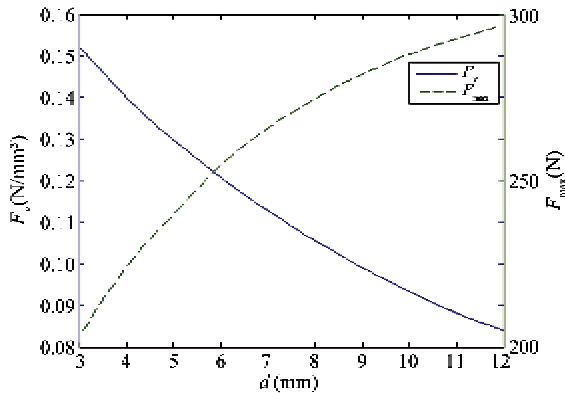


图 6  $F_v, F_{\max}$  与  $d$  的关系曲线

3.2 结构参数的优化

以上为提高磁吸附性能而对结构参数影响所做的分析结果是基于改变某一具体参数且固定其它参数得到的, 有一定的片面性。为了提高磁吸附性能, 需综合考虑结构参数之间的相互影响, 进一步得到精确的优化结构参数, 运用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 进行优化。磁吸附性能具有多参数、非线性和多峰值分布的特点, 所以采用传统优化算法求解, 往往不容易找到全局最优解, 导致算法失效。为此, 遗传算法的高鲁棒性和有效性为解决此问题提供了一种有效的途径。遗传算法是一种基于生物进化原理构想出来的搜索最优解的仿生算法。它具有全局优化性、通用性、并行处理性和扩展性等优点<sup>[12]</sup>, 在多目标、多峰值、且伴随参数耦合的优化问题中取得了较好的效果。

如前所述, 优化目标之一是使单位体积提供的最大吸附力最大。此外, 吸附/卸载吸附力比值  $\lambda_F$  越大, 则磁吸附与卸载性能越好, 因而使  $\lambda_F$  最大, 也作为优化目标。

取  $x = [a \ b \ d]$  为设计变量 (单位: mm)。取  $\bar{F}_{\max}(x), \bar{F}_{\min}(x)$  (单位: N/m) 和  $V_m(x)$  (单位:  $\text{mm}^3$ )

为状态变量, 并作为优化约束条件, 则优化问题可以表述为

$$\begin{cases} \min f_1(x) = \frac{V_m(x)}{F_{\max}(x)} = \frac{(ma + nb)d}{\bar{F}_{\max}(x)} \\ \min f_2(x) = \frac{F_{\min}(x)}{F_{\max}(x)} = \frac{\bar{F}_{\min}(x)}{\bar{F}_{\max}(x)} \\ s. t. \quad h(x) = 0 \\ g_1(x) \leq 0, g_2(x) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中  $h(x) = V_m(x) - V_m, g_1(x) = \bar{F}_{\max} - \bar{F}_{\max}(x), g_2(x) = \bar{F}_{\min}(x) - \bar{F}_{\min}$ 。式 (11) 是一个多目标优化模型, 为了解决该多目标优化问题将其通过线性加权法转化为单目标函数, 即将式 (11) 中两个子目标函数  $f_1(x), f_2(x)$  分别进行优化, 得到相应的最优解  $f_1^*$  和  $f_2^*$ , 然后以两者的倒数作为权系数, 建立综合单目标优化函数:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^2 \omega_i f_i(x) \quad (12)$$

其中,  $\omega_i$  为子目标函数  $f_i(x)$  的权系数,  $\omega_i = 1/f_i^*(x)$ 。

在运用遗传算法求解时, 必须确定适应度函数。适应度函数是用来评价群体中个体适应性能好坏的标准, 其值越大表明个体的适应性能越好, 遗传到下一代的概率也就越大。采用界限构造法, 设计适应度函数:

$$F(x) = \begin{cases} \varepsilon_{\max} - f(x), & f(x) < \varepsilon_{\max} \\ 0, & f(x) \geq \varepsilon_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\varepsilon_{\max}$  为当前所有代目标函数的最大值。

由于遗传算法不能直接解决带约束的优化问题, 因此需要将约束优化转化为无约束优化, 最常用的转化方法是惩罚函数法, 针对式 (13) 中的约束条件, 构造如下惩罚函数:

$$\begin{cases} v(x) = r^{(\tau)} \sum_{i=1}^2 g_i(x) \\ \mu(x) = \frac{1}{\sqrt{r^{(\tau)}}} h^2(x) \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $r^{(\tau)}$  为惩罚因子, 按内点法选取  $r^{(\tau)} \rightarrow 0$ , 取初值  $r^{(0)} = 0, \tau$  为当前遗传代数。将已知参数代入模型式 (11) 中, 优化前后设计参数见表 2。

由表 2 可知, 设计变量均优于初始参数值, 优化结果与前述单独参数影响分析基本一致, 进一步提高了磁吸附性能, 因此, 所得结果是合理的。

表 2 吸附机构设计参数

设计参数	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$\bar{F}_{\max}$ (N/m)	$\bar{F}_{\min}$ (N/m)	$F_p$ / (N/mm <sup>2</sup> )	$\bar{F}_{\max}/\bar{F}_{\min}$
优化前	8.0	8.0	8.0	34622.5	5.0	0.108	6924.5
优化后	10.37	5.5	7.5	35985.0	3.4	0.113	10583.8

## 4 实验结果及分析

为进一步验证优化计算结果,分别试制结构参数初始和优化后的两种 Halbach 型永磁吸附机构样机(宽度均为 8mm),并与传统用于爬壁机器人的 H 型永磁吸附单元进行比较,其结构尺寸使用文献[5]中优化后的参数:圆柱形永磁体半径  $R = 5\text{mm}$ ,隔磁间距  $D = 5\text{mm}$ ,轭铁宽  $W = 20\text{mm}$ ,高  $h = 16\text{mm}$ 。为便于比较,取相同体积的永磁体,则取 H 型机构长度  $L' = 32.24\text{mm}$ 。用称重法分别测量吸附机构与钢板气隙长度为 1~11mm 时最大磁吸附力,每隔 1mm 进行测量(实验装置如图 7 所示)。吸附机构在“吸附”和“卸载”状态时所能提供的最大吸附力随气隙长度的变化关系如图 8 所示。

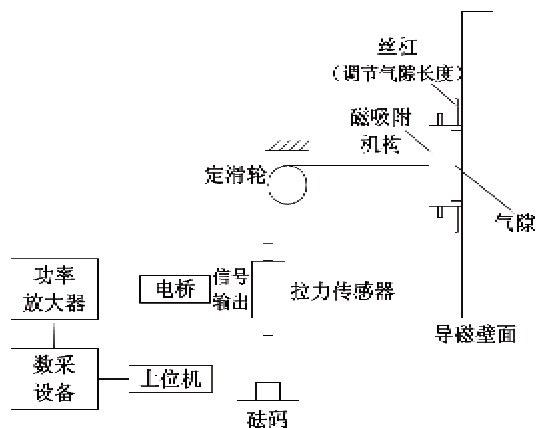
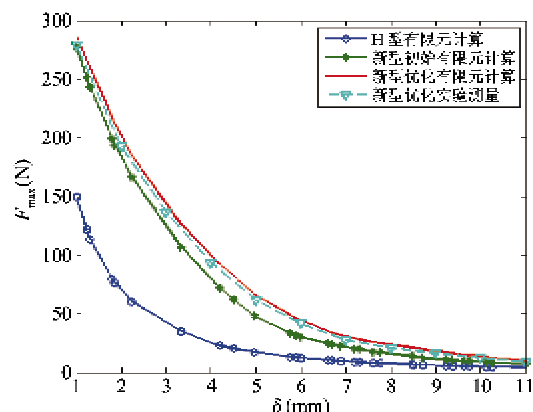


图 7 最大吸附力测量实验装置示意图

图 8  $F_{\max}$  与  $\delta$  的关系曲线比较

由图 8 可知,优化计算结果和实验测量结果基本一致,说明了优化结果的正确性,且在相同永磁体用量和相同气隙长度下,比传统 H 型机构所能提供的最大吸附力高,即磁性能更优。有限元计算值与实验测量值存在一定的偏差,主要原因为二维有限元建模时忽略了机构宽度方向的漏磁以及受实际尺寸加工精度的影响。

## 5 结论

(1) 本文基于有限元方法设计了一种 Halbach 型永磁吸附机构。它不同于传统的永磁机构,磁体按一定的方向排列组成,将阵列强磁侧和弱磁侧作为主要工作面分别用于产生“吸附”状态和“卸载”状态,通过旋转磁极产生变磁力,并用少量软铁作为磁轭置于阵列弱磁侧和两端,克服了阵列分段和有限长度带来的弱磁非零和端部漏磁效应,增加了气隙磁场强度,提高了磁吸附性能。

(2) 运用有限元法建立了新型永磁吸附机构磁场的二维数学模型,导出了磁感应强度和磁吸附力的计算表达式,并得到了其磁力线分布、磁感应强度分布和磁吸附力大小。通过分析可知,产生磁吸附力主要是沿  $y$  方向的磁感应强度  $B_y$ ,且受谐波影响,强磁侧和弱磁侧的磁感应强度分别呈近似正弦和余弦分布,两者的磁感应强度均值比达 343.92。

(3) 运用改变参数法分析了结构参数对磁吸附性能的影响,采用遗传算法对结构参数进行了优化,并通过与传统磁吸附机构和实验测量值的比较,验证了 Halbach 型永磁吸附机构磁性能的优越性和优化结果的正确性。

## 参考文献

- [1] 夏平畴. 永磁机构. 北京:北京工业大学出版,2000. 10-22
- [2] Coey J M D. Permanent magnet applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 248: 441-456
- [3] 彭加栢,秦泗吉,孔晓华等. 电永磁夹紧方法及其影响因素. *塑性工程学报*, 2011, 18(2): 18-23
- [4] 丁宁. 起重永磁吊的磁路设计原则. *长春大学学报*, 2000, 10(1): 10-13

- [ 5 ] 王军波, 陈强, 孙振国. 爬壁机器人变磁力吸附单元的优化设计. *清华大学学报*, 2003, 43(2): 214-217
- [ 6 ] 桂仲成, 陈强, 孙振国. 爬壁机器人永磁吸附装置的优化设计. *电工技术学报*, 2006, 21(11): 40-46
- [ 7 ] Shen W M, Gu J, Shen Y J. Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*, Niagara Falls, Canada, 2005. 2078-2083
- [ 8 ] Chu B, Jung K, Han C S, et al. A survey of climbing robots: locomotion and adhesion. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2010, 11(4): 633-647
- [ 9 ] Bjørk R, Bahl C R H, Smith A, et al. Comparison of adjustable permanent magnetic field sources. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322: 3664-3671
- [ 10 ] Fazil M, Rajagopal K R. Nonlinear dynamic modeling of a single-phase permanent-magnet brushless DC motor using 2-D static finite-element results. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(4): 781-785
- [ 11 ] Guo F, Tang Y, Ren L, et al. Structural parameter optimization design for Halbach permanent maglev rail. *Physica C*, 2010, 470: 1787-1790
- [ 12 ] 钱艳婷, 王鹏涛. 基于遗传算法的多目标优化方法. *天津理工大学学报*, 2010, 26(3): 20-22

## Finite element analysis and optimization for Halbach array-based permanent magnetic adhesion devices

Chen Yong, Wang Changming, Bao Jiandong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

### Abstract

A novel permanent magnetic adhesion device based on Halbach array was designed and studied to utilize the advantage of one-side magnetic field characteristics of Halbach arrays to improve the magnetic adhesion performance of Halbach permanent magnetic adhesion devices and reduce their weight. The two dimensional mathematic model for the magnetic field of the permanent magnetic adhesion device was established by using the finite element method, and the finite element calculation expressions of the magnetic flux density and the magnetic force were derived. The influences of configuration parameters on the magnetic adhesion performance were analysed by using the parameter variation method. The optimization of configuration parameters of the device was done by using genetic algorithms, and the results and their correctness were proved by the magnetic force measurement.

**Key words:** permanent magnetic adhesion device, Halbach array, finite element analysis, magnetic field calculation, genetic algorithms