

基于 Ansoft 的电力机器人永磁吸附单元有限元分析*

袁 硕, 刘天羽

(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 为满足爬壁机器人在狭窄的发电机定子气隙中能可靠地运行, 设计了一种基于 Halbach 阵列的永磁吸附单元。使用 Ansoft Maxwell 软件建立二维磁场模型, 采用有限元分析法对新型吸附单元的磁场进行分析, 得到了其磁力线与磁感应强度的分布; 通过与传统永磁吸附单元磁场的比较, 得出新型吸附单元具有永磁磁能利用率高、单边磁场的特点, 验证了新型吸附单元在发电机定子气隙中吸附的可靠性; 并分析了结构参数的变化对吸附性能的影响, 为吸附单元结构设计提供了参考数据。

关键词: Ansoft; 爬壁机器人; 永磁吸附单元; 有限元分析

中图分类号: TP 24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0071-04

Finite Element Analysis of Permanent Magnet Adsorption Unit for Electric Robot Based on Ansoft*

YUAN Shuo, LIU Tianyu

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to meet the flexible and reliable operation of the wall climbing robot in the narrow dual magnetic wall, a permanent magnetic adhesion element based on Halbach array was designed. A two-dimensional physical model be founded by Ansoft Maxwell software, analyzed by the way of finite element analysis, obtained the distribution of magnetic field and magnetic induction intensity, and analyze the effect of structure parameters on adsorption properties. By comparing with the traditional permanent magnetic adhesion element of magnetic field, the new permanent magnetic adhesion element with the highly permanent magnet utilization rate and unilateral magnetic field, it could be flexible and reliable walking in generator stator gap. The influence of structural parameters on the adsorption performance was analyzed by using the method of parameter variation. It provided reference data for the design of permanent magnetic adhesion element.

Key words: Ansoft; wall climbing robot; permanent magnetic adhesion element; finite element analysis

0 引 言

爬壁机器人技术结合了吸附、移动和作业三大功能, 能够实现在垂直等壁面环境下灵活移动作业, 是一种新型的特种作业机器人。特种作业机器人可以代替人工从事危险系数高的工作, 尤其在电力设备的故障检测及维护作业中有不可限

量的潜在价值, 势必成为研究的热点。电力爬壁机器人可以高效地检测出发电机定子膛内故障, 解决了人工检测周期长、检测效率低、工作强度大等问题。

吸附功能是爬壁机器人最基础的功能, 也是最关键的技术, 吸附性能的优劣直接影响爬壁机器人工作性能。根据吸附方式不同, 爬壁机器人

* 基金项目: 上海市自然科学基金项目(15ZR1417300, 14ZR1417200); 上海市教委创新基金项目(14YZ157, 15ZZ106)

作者简介: 袁 硕(1991—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为风电机组、电力设备故障诊断。

刘天羽(1978—), 男, 教授, 研究方向为风电机组、电力设备故障诊断, 智能控制、模式识别。

主要分为真空吸附、磁吸附、仿真吸附等类型^[1]。磁吸附爬壁机器人应用较为广泛,其磁吸附技术主要有电磁吸附和永磁吸附。相比于其他吸附方式,永磁吸附在导磁性好的铁磁壁面环境有很好的适用性,具有吸附力大、吸附可靠性高及不受壁面平整度的影响等特点,是磁吸附爬壁机器人吸附方式中最常用的吸附技术^[2-3]。

本文设计了一种基于 Halbach 阵列的永磁吸附单元,并运用有限元分析法建立其磁场模型,得出其磁场分布,并分析吸附单元结构参数、吸附气隙对吸附力大小的影响;与传统磁路的磁场进行对比,验证了新型吸附单元的吸附力有较好的提升,更能适应发电机定子气隙的作业环境。

1 磁吸附单元的磁路设计

美国学者 Klaus Halbach 教授于 1979 年提出一种新的磁体排列结构 Halbach 阵列^[4],其目的是提高磁能利用率。Halbach 阵列是一种将不同磁化方向的永磁体按照正弦规律排列的聚磁结构,使磁力线在磁体一侧汇集,另一侧削弱,获得单边强磁,并减少端部漏磁^[5]。为了适应发电机定子气隙作业环境,本文在基于 Halbach 阵列的基础上提出一种永磁吸附单元,吸附机构主要由永磁材料和轭铁(软磁材料)组成,不但降低了非接触面的磁力,还提高了爬壁机器人与定子间气隙磁密。

如图 1(a)和图 1(b)所示,传统型采用垂直充磁方式,各永磁体之间由隔磁材料隔开,通过上

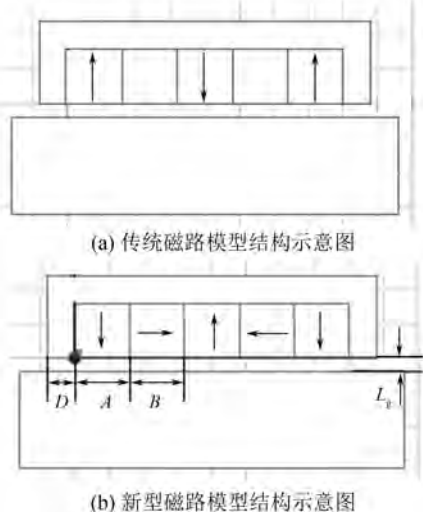


图1 传统磁路与新型磁路结构示意图

部的导磁材料引导磁力线分布。新型单元采用水平与垂直结合的充磁方式,上部及端部使用导磁材料,引导磁力线分布,减少结构的漏磁。其中, A 为垂直充磁永磁磁体的长度, B 为水平充磁永磁磁体的长度, D 为端部轭铁的厚度, L_g 为吸附单元与导磁壁面间气隙长度。

2 磁场有限元分析

2.1 建立有限元数学模型

本文所研究的爬壁机器人移动速度慢,吸附单元永磁体充磁方向为水平或垂直,可以看作二维静态磁场,其 Maxwell 微分方程为^[6]

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

在静态磁场中,引入矢量磁势 A ,矢量旋转度的散度恒为 0, A 满足:

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

磁感应强度与磁场强度的关系为

$$B = \mu H \quad (3)$$

由式(1)~式(3),可得

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J$$

转化得:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) - \frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (4)$$

根据库伦规范,有

$$\nabla \times A = 0 \quad (5)$$

由式(4)、式(5)得

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (6)$$

式中: J ——电流密度;

μ ——相对磁导率。

其边界条件为

$$\begin{cases} O: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \\ S: \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s+} - \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s-} = J \\ L_1: \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{L-} = \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{L+} \\ L_2: A = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: O ——整个有效场域;

S ——存在束缚电流 J 的永磁体表面;

L_1 ——不同介质的交界线;

L_2 ——磁力线的边界。

2.2 吸附力的计算

在磁力线垂直穿过的表面,磁吸附力大小公式为^[7]

$$F = \frac{B_g^2 S_g}{2\mu_0} \tag{8}$$

式中: B_g ——气隙磁感应强度;

S_g ——工作气隙的总面积。

根据安培环路定律和磁通连续原理,可求出气隙磁感应强度为

$$B_g^2 = \frac{\mu_0 (B_m H_m) V_m}{V_g} \frac{1}{\sigma f} \tag{9}$$

其中,永磁体体积 $V_m = S_m L_m$,气隙体积 $V_g = S_g L_g$ 。

由式(8)、式(9)可知,吸附力大小主要与永磁体的体积 V_m 、永磁体磁能积 $B_m H_m$ 、气隙长度 L_g 、磁阻系数 f 和漏磁系数 σ 有关。吸附力随永磁体体

积增大而增大,随气隙增大而减小,故可以通过调整永磁体体积、气隙长度来调整吸附力的大小。

2.3 吸附单元各结构的尺寸及材料属性设定

运用 Ansoft 软件系统材料管理器对二维模型结构进行材料属性的定义。永磁吸附单元需要定义材料属性的结构有永磁体、轭铁、隔磁材料、吸附壁面及气隙介质。吸附单元吸附力的源头是永磁体,永磁体的磁性性能决定了永磁体在单位质量下的吸附力大小。本文研究的磁吸附单元永磁材料选取 FdFeB-N35,并采用 X 、 Y 平面坐标表示各永磁铁充磁方向,相对磁导率 $\mu_r = 1.099\ 778\ 5$,永磁材料性能参数如表 1 所示;轭铁材料采用 DW465-50,其 BH 曲线如图 2 所示;隔磁材料采用黄铜 copper,相对磁导率 μ_r 略小于 1.0;吸附壁面采用钢铁 steel-1008;气隙介质为空气,相对磁导率 $\mu_r = 1.0$ 。

表 1 钕铁硼 N35 的主要性能参数

剩余磁感应强度 B_r/mT	矫顽力 $H_{ch}/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	内禀矫顽力 $H_{cj}/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	最大磁积能 $BH_{\max}/(\text{KJ}\cdot\text{m}^{-3})$	最高工作温度 $/^\circ\text{C}$	回复磁导率 μ_{rec}	密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1 170~1 230	851~955	≥ 955	263~287	80	1.05~1.10	7.3×10^3

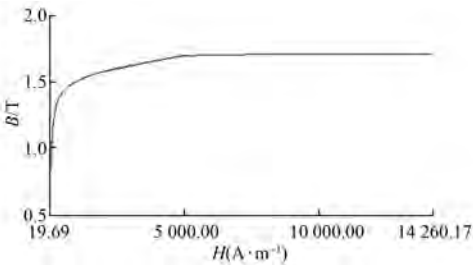
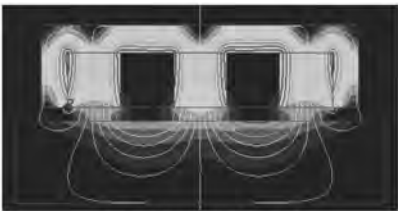


图 2 DW465-50BH 曲线

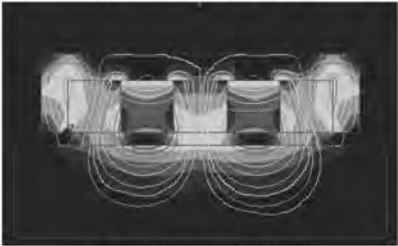
2.4 磁场分布

对两种磁路类型的吸附单元作同等分析,获取传统磁路与新型磁路的磁力线分布图,如图 3 所示。对比图 3(a)和图 3(b)中两种磁路的磁力线分布可知,新型磁路可以有效地减少吸附单元顶部的漏磁,磁场单边性较强,且端部效应也较传统型磁场弱;传统型磁路磁力线经过上部轭铁产生聚磁,但还是有较大的漏磁;新型磁路的磁力线主要集中在工作气隙内,减少了漏磁,永磁磁能利用率高。对比磁感应强度分布情况,新型磁路在钢铁壁面产生的磁感应强度比传统型的分布更加均匀、密度大,保证了吸附力均匀分布,提高了运行

时吸附可靠性。



(a) 传统磁路磁力线分布



(b) 新型磁路磁力线分布

图 3 传统、新型磁路磁力线分布

3 结构参数的影响及优化

3.1 垂直充磁磁体长度 A 对吸附力的影响

通过观察图 3(b)可知,水平充磁的永磁体在磁路中的主要作用是引导磁力线走向,实现单边

磁场;垂直充磁的永磁体产生的垂直方向磁力线主要聚集于工作气隙,并与工作导磁壁面形成闭合回路,获取较大吸附力。因爬壁机器人工作环境狭窄,吸附单元高度受限,所以在对永磁体体积大小优化取值时,主要优化垂直充磁的永磁体的长度,而水平充磁的永磁体的长度可取适当值。

通过改变单一变量,求取变量在不同数值下对吸附力的影响。利用 Ansoft Maxwell 获取吸附力在不同磁体长度下的数值,绘制吸附力大小随磁体长度变化的关系图,如图 4 所示。

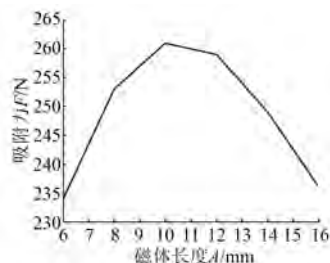


图4 吸附力 F 随磁体长度 A 变化的关系图

通过观察图 4 可知,磁体长度为 6~10 mm 时,吸附力随磁体长度的增加而增大;当磁体长度超过 10 mm 时,吸附力随磁体长度的增加而减小。

3.2 吸附结构端部轭铁对吸附力的影响

吸附单元有两部分轭铁结构:端部轭铁和弱磁侧轭铁。端部轭铁不仅增大了吸附单元与导磁壁面的接触面积,更能很好地引导磁力线穿过轭铁聚集于接触面气隙中;弱磁侧轭铁的主要作用为引导磁力线走向,减少漏磁,优化单边磁场。参数取值 $A=B=10$ mm, $L_g=1$ mm;端部轭铁厚度 D 取值范围 1~7 mm,吸附力变化结果如表 2 所示,变化关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,吸附力随端部轭铁厚度的增大而增大,轭铁厚度 D 在 1~4 mm 时,轭铁厚度变化对吸附力影响较大。

表 2 端部轭铁不同厚度下的吸附力变化

轭铁厚度 d /mm	1	2	3	4	5	6	7	8
吸附力 F /N	176	205	236	266	285	297	306	312

3.3 气隙长度 L_g 对吸附力的影响

电力检测爬壁机器人可携带多种可拆卸故障检测模块,在进行电力设备故障检测时根据具体故障安装检测模块,导致所需吸附力不同。为防止吸附力过大导致爬壁机器人灵活性差;或吸附

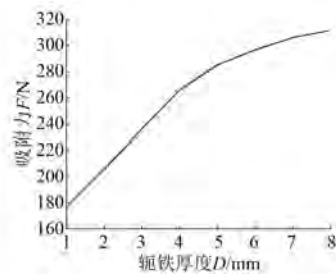


图5 端部轭铁与吸附力关系曲线

力过小导致吸附力不可靠、爬壁机器人脱离壁面等状况发生,可以利用调整吸附单元与壁面气隙长度的方法调节吸附力大小,从而获取最佳吸附力。图 6 所示为永磁吸附单元吸附力与气隙大小的关系曲线,取 $A=B=10$ mm, $D=4$ mm,计算气隙 L_g 取值范围为在 1~10 mm 时吸附力与气隙的关系曲线,如图 6 所示。

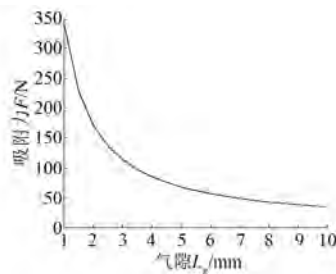


图6 吸附力 F 于气隙 L_g 的关系曲线

由图 6 可知,气隙 L_g 的变化对吸附力 F 的大小较大的影响,吸附力 F 随气隙 L_g 的增大而减小。气隙 L_g 在 1~3 mm 时对吸附力影响较大,吸附力 F 急剧下降;在 3~10 mm 时,气隙 L_g 对吸附力 F 变化影响减小,吸附力变化平稳。结合本文研究爬壁机器人工作环境,气隙 L_g 可取 2 mm 作为参考值。

4 结 语

(1) 新型磁路在气隙中产生的磁感应强度比传统型的分布更加均匀,保证了吸附力均匀分布,提高了运行时吸附可靠性。新型吸附单元减少了端部漏磁,实现了单边磁场,避免了在发电机定子气隙工作时双边受力的情况,提高了爬壁机器人运行的灵活性。

(2) 通过 Ansoft Maxwell 建立吸附单元的二维模型,有限元仿真分析得出了吸附单元的磁力

(下转第 127 页)

- conversion system with stator parameters varying [C] // Control and Decision Conference (CCDC) 2011 Chinese IEEE, 2011; 133-138.
- [12] SEKER M, ZERGEROGLU E, TATLICIOGLU E. Robust backstepping control of variable speed wind turbines with permanent magnet synchronous generators [C] // Control Applications (CCA), 2012 IEEE International Conference on, IEEE, 2012; 1068-1073.
- [13] BOSSOUFI B, KARIM M, LAGRIQUI A, et al. Observer backstepping control of DFIG-generators for wind turbines variable - speed: FPGA - based implementation [J]. Renewable Energy, 2015 (81): 903-917.
- [14] 廖茜, 邱晓燕, 江润洲, 等. 风电机组变桨距的反推滑模控制 [J]. 电气传动, 2015, 45(2): 45-49.
- [15] 孙丹, 熊平化, 方扬, 等. 基于反推算法的双馈感应风力发电机直接功率控制 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 110-116.
- [16] REDDAKI M, BERDAI A, GOUNMRA A, et al. Integral backstepping control based maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG [C] // 2nd International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2016, IEEE International Conference on, IEEE, 2016; 84-88.
- [17] 王家军, 王建中, 马国进. 感应电动机系统的变结构反推控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 35-38.
- [18] ZAAFOURI A, REGAYA C B, AZZA H B, et al. DSP-based adaptive backstepping using the tracking errors for high-performance sensorless speed control of induction motor drive [J]. Isa Transactions, 2016 (60): 333-347.
- [19] 胡剑波, 李飞, 魏高乐, 等. 不确定系统反推滑模变结构理论及其应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 519-526.
- [20] 付兰芳, 孙鹤旭, 王华君, 等. 基于永磁双转子电机调速的新型风力发电系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 25-29.
- [21] 包广清, 郭风堂. 基于电磁耦合器调速的同步发电机控制研究 [J]. 微特电机, 2017, 45(5): 75-79.
- [22] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统 (第3版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [23] 王家军, 赵光宙, 齐冬莲. 反推式控制在永磁同步电动机速度跟踪控制中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 95-98.
- [24] IOV F, HANSEN A D, SORENSEN P, et al. Wind Turbine Blockset in MATLAB/Simulink [D]. Denmark: Aalborg University, 2004.

收稿日期: 2017-05-17

(上接第74页)

线分布和磁场分布。通过研究磁场分布可知, 垂直充磁的永磁体长度及两端部轭铁的厚度对吸附单元的吸附力影响较大, 并分析了端部轭铁的厚度、垂直充磁永磁体的长度及气隙长度对吸附单元吸附性能的影响, 为设计爬壁机器人的永磁吸附单元提供了依据。

【参考文献】

- [1] 桂仲成. 爬壁机器人能源工业应用与发展 [J]. 机器人技术与应用, 2015(1): 25-32.
- [2] 倪健康. 爬壁机器人设计及其吸附装置优化 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [3] 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 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, 43(2): 214-217, 226.
- [4] 陈勇, 王昌明, 包建东. Halbach 型永磁吸附机构的有限元分析及优化 [J]. 高技术通讯, 2013, 23(5): 484-490.
- [5] 潘柏松, 张晋, 魏凯, 等. 基于 Halbach 阵列爬壁机器人永磁轮吸附单元的设计与优化 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43(4): 393-397.
- [6] 金建铭. 电磁场有限元方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [7] 赵剑坤, 叶家玮. 基于有限元分析的永磁吸附单元设计优化 [J]. 机械设计与制造, 2009(3): 47-49.

收稿日期: 2017-04-26