

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.005

# 基于 Halbach 阵列的爬壁机器人磁轮特性研究

邹洪森<sup>1</sup>, 刘志远<sup>1</sup>, 赵欣洋<sup>1</sup>, 徐天书<sup>1</sup>, 李研彪<sup>2</sup>, 曾 晰<sup>2</sup>, 郑倩倩<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司检修公司, 宁夏 银川 750000;  
2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:**针对磁吸附式爬壁机器人存在负载能力差、稳定性不高等缺点,课题组提出了一种基于 Halbach 阵列的磁轮吸附式爬壁清洁机器人,用于壁面清扫。采用修正的傅立叶级数形式推导出 Halbach 永磁阵列磁场解析模型;通过 ANSYS 仿真得出了磁轮磁通分布模型。随后进行了磁吸附力试验,结果表明:Halbach 阵列与普通对向极磁环对比, Halbach 阵列的吸附距离对其吸附力的影响较弱;同时,其吸附力是普通对向极磁环吸附力的 2 倍多。Halbach 阵列的磁轮吸附方法可提升机器人爬行负载能力及稳定性。

**关 键 词:**爬壁机器人; Halbach 阵列; 磁轮; 修正的傅立叶级数; 磁通分布模型; ANSYS  
中图分类号: TP242.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)01-0028-05

## Characteristic Analysis of Wall-Climbing Robot Magnet-Wheel Based on Halbach Array

ZOU Hongsen<sup>1</sup>, LIU Zhiyuan<sup>1</sup>, ZHAO Xinyang<sup>1</sup>,  
XU Tianshu<sup>1</sup>, LI Yanbiao<sup>2</sup>, ZENG Xi<sup>2</sup>, ZHENG Qianqian<sup>2</sup>

(1. State Grid Ningxia Overhauling Company, Yinchuan 750000, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at problems of poor load capacity and low stability of magnetic adsorption wall-climbing robot, a wall-climbing robot based on Halbach array magnet-wheel was presented for cleaning process to converter valve box. Calculation model of Halbach array magnet-wheel was obtained by modified Fourier series. Magnetic flow distribution model of magnetic wheel was shown by ANSYS simulation. The magnetic adsorption force test was carried out subsequently. Experimental results showed that the adsorption distance of Halbach array had a weak influence on its adsorption force comparing with that of normal magnet-wheel; which the magnetic absorbability of Halbach array magnet-wheel was more than twice that of normal magnet-wheel. This design could improve the load capacity and stability of wall-climbing robot.

**Keywords:** wall-climbing robot; Halbach array; magnet-wheel; modified Fourier series; magnetic flow distribution model; ANSYS

换流阀是直流输电工程的核心设备,其作用是将三相交流电压连接到直流端,得到期望的直流电压并实现对功率的控制。换流阀大厅是放置换流阀的封闭建筑,其内壁累积的灰尘若不及时清理会扩散到空气中,从而对换流阀的正常运行和使用寿命产生影响。

目前,壁面的清洁工作由人工完成,需购买专业升降机器,效率低、危险性高且浪费了大量的人力和物力。近年来智能化特种机器人得到了迅速发展,爬壁清洁机器人就是其中重要组成部分。爬壁清洁机器人主要特点是实现在垂直壁面上攀爬行进,并完成诸如检测、清

收稿日期:2018-07-20;修回日期:2018-11-15

基金项目:国家自然科学基金(51405444);浙江省自然科学基金(LY18E050023)。

第一作者简介:邹洪森(1982),男,湖北宜昌人,硕士,国网宁夏电网有限公司检修公司高级工程师,主要研究方向为电力行业用特种机器人。E-mail:14130474@qq.com

洁等工作<sup>[1-2]</sup>。

磁吸附方式作为机器人爬行过程中的主要形式,目前正被运用于多种特殊场合。日本应用技术研究所开发研制出一款采用2套车轮单元的轮式磁吸附爬壁机器人<sup>[3]</sup>。该款机器人的2套车轮单元中,每套车轮单元包含4个永磁车轮,驱动电机安装于2套车轮单元内,实现机器人的行走攀爬。该机器人的主要特征是行进速度快但负载能力差。西班牙工业自动化研究所开发出基于磁吸附的六足式爬壁机器人 REST-1<sup>[4,5]</sup>,每个足底都安装了电磁体以实现对接面的吸附,电磁体吸附力的交替通断使机器人实现攀爬行走。该机器人负载能力强,但结构中缺少失电保护措施。西班牙拉科鲁尼亚大学研制出适用于船舶的喷丸爬壁机器人<sup>[6]</sup>。该机器人由2个可相对运动的模块组成,每个模块的下方均布4条腿结构,每条腿底部设有永磁铁。2个模块之间的相对移动可使机器人实现行进攀爬,2个模块之间的相对转动可使机器人补偿船体曲度带来的影响并实现一定程度的避障。机构上的执行器件采用气缸驱动,从而减轻了机器人整体质量。该机器人结构简单,但负载能力弱,稳定性不高。

针对上述磁吸附式爬壁机器人的缺陷与不足,课题组提出了一种基于 Halbach 阵列的磁吸附爬壁机器人,通过对磁轮的优化增强机器人的磁吸附力,提升了爬行可靠性,并对其动态特性进行了分析。

## 1 磁吸附机器人的设计

大厅壁面清洁机器人整体结构主要由机架板、吸附模块、驱动模块、导向模块、避障模块、清洁模块、控制箱和卷线盒等组成,图1为机器人的三维建模效果图。

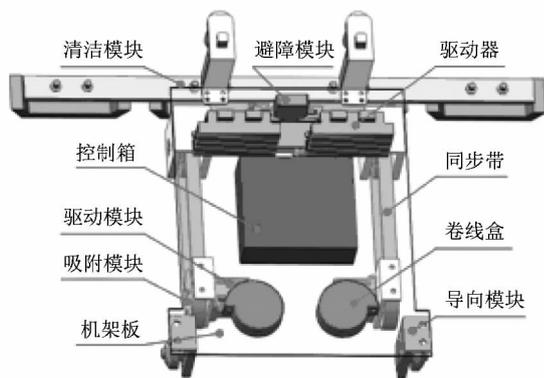


图1 清洗机器人三维建模效果图

Figure 1 3D modeling effect diagram of cleaning robot

机器人的所有模块均安装在机架板上。其中,吸附模块主要采用磁轮和同步带相结合的方式,同步带

与彩钢板凹槽接触,磁轮提供吸附力;驱动模块采用自带刹车的步进电机,该步进电机需有足够大的扭矩以驱动机器人攀爬行进;导向模块采用机械式导向,其作用主要是保证机器人行进时保持直线行驶;避障模块采用鱼眼摄像装置,经环境感知、环境建模和路径规划后实现有效避障;清洁模块置于机器人前方,由电动推杆实现清洁头的上下运动。

图2为磁轮结构图,该磁轮是机器人吸附模块的主要部件,主要由前端盖、后端盖、中心轴套、内环、磁块、同步带轮和紧固件组成。

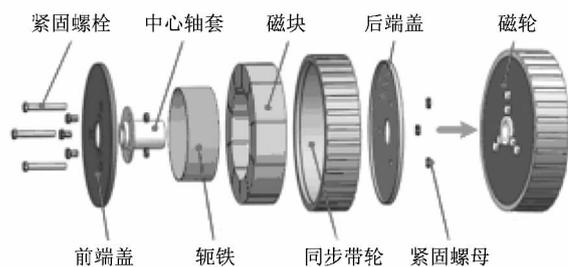


图2 基于 Halbach 阵列磁轮结构图

Figure 2 Magnet-wheel structure diagram based on Halbach array

其中,单个磁块呈扇形状,10个磁块首尾连接组成一个磁环,充磁采用圆柱 Halbach 阵列式,以使磁力线尽可能多地穿过彩钢板壁面,增强吸附力。前后端盖、内环和紧固件将磁环固定,避免磁块运动过程中受到损伤。轴套固定在前端盖上,其内孔可与电机轴或减速器轴相连。为增加磁轮与内壁的接触面积,磁轮外围加装了同步带轮,同步带轮及同步带的使用,使磁轮与壁面的线接触变为了2条带的面接触,吸附可靠性大大提高。磁轮结构尺寸中,磁环外径为90 mm,磁轮的外径为102 mm,同步带选用L型(节距为9.525 mm,齿高为1.91 mm,厚度为3.6 mm)。

## 2 磁轮磁吸附力分析

Halbach 阵列是美国学者 Klaus Halbach 在利用各种永磁铁结构产生的磁场做电子加速实验的时候,发现的一种特殊的永磁铁结构,并对其进行了逐步完善<sup>[7-8]</sup>。它将不同磁化方向——径向与切向的永磁体按照一定的顺序交错排列,使得阵列的一侧磁场显著增强而另一侧则有大幅减弱,叠加和抵消作用十分明显,从而得到工程上较理想的正弦分布磁场<sup>[9]</sup>。图3为直线形式的 Halbach 磁场分布图,显示了最终磁力线的合成效果。

磁轮中产生磁吸附力的部件为磁环,这与圆柱型

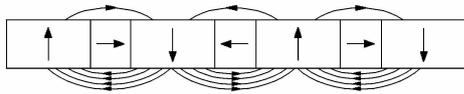


图3 直线 Halbach 磁场分布图

Figure 3 Magnetic field distribution of Halbach array  
Halbach 阵列相对应。圆柱型阵列中,按照加强磁场位置可分为内部加强型和外部加强型;按加工方式可分为整体充磁式和拼装式。根据磁轮与壁面的吸附条件,本磁环采用外部加强形式进行拼装,以使永磁材料使用量较小时,磁力达到机器人的攀爬要求。图4为外部加强型圆柱 Halbach 阵列和磁场分布示意图。

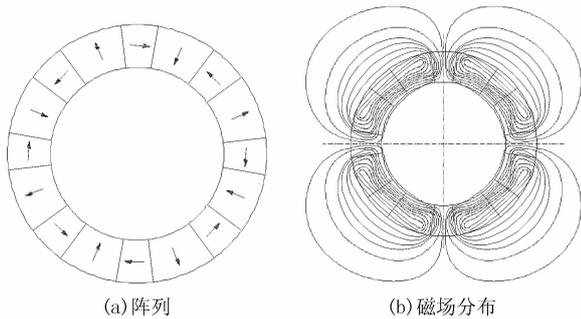


图4 外部加强型圆柱 Halbach 阵列和磁场分布图

Figure 4 External reinforced cylindrical diagram of Halbach array and magnetic field distribution diagram

在对永磁阵列空间磁场解析计算时,采用修正的傅立叶级数形式推导出 Halbach 永磁阵列磁场解析模型<sup>[10]</sup>,永磁磁场近似于稳静磁场,麦克斯韦方程组为:

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (2)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为闭合面任意处的磁感应强度; $\nabla$ 为纳布拉算符,表示磁场场3个自由度方向上一阶偏微分矢量和; $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{J}$ 为自由电流密度。

磁感应强度与磁场强度之间的转化关系为:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}). \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为磁性材料的磁化强度; $\mu_0$ 为磁导率。

因为永磁磁场矢量旋度的散度恒等于0,由此,则可定义矢量磁动势  $\mathbf{A}$  为:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (4)$$

由此可得:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}. \quad (5)$$

在恒定磁场中,由库伦规范  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ ,则

$$\nabla \times \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{A}. \quad (6)$$

根据式(1)~(3)可得泊松方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0(\mathbf{J} + \nabla \times \mathbf{M}). \quad (7)$$

笛卡尔坐标系( $x$ - $y$ - $z$ )中,磁矢势沿  $y$  轴方向的标量泊松方程为:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)A_{yn} = -\mu_0[\nabla \times \mathbf{M}_n]_y. \quad (8)$$

式中: $A_{yn}$ 为矢量磁动势沿着  $y$  方向的傅立叶级数; $\mathbf{M}_n$ 为  $\mathbf{M}$  的第  $n$  阶傅立叶成分。

永磁阵列沿水平方向  $x$  和竖直方向  $z$  的磁化成分用傅立叶系数表示:

$$\mathbf{M} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [M_{xn} e^{-jk_n x} \mathbf{i}_x + M_{zn} e^{-jk_n x} \mathbf{i}_z]. \quad (9)$$

式中: $M_{xn} = \frac{1}{l} \int_0^l M_x e^{jk_n x} dx$  为磁化强度沿  $x$  方向的傅立叶级数; $M_{zn} = \frac{1}{l} \int_0^l M_z e^{jk_n x} dx$  为磁化强度沿  $z$  方向的傅立叶级数; $l$ 为直线永磁阵列伪周期; $k_n = 2\pi n/l$ 为第  $n$  次谐波的空间波数。

由式(4)~(9)可得矢量磁动势

$$\mathbf{A} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{yn} \mathbf{i}_y = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{yn} e^{-jk_n x} \mathbf{i}_y. \quad (10)$$

由上述公式,结合参考文献[11],可得永磁阵列中强磁场一侧  $z$  处的磁场分布傅立叶级数:

$$B_{xn} = \left(-\frac{\mu_0}{2} M_{xn} - \frac{j\mu_0 \gamma_n}{2K_n} M_{zn}\right) (1 - e^{-\gamma_n}) e^{\gamma_n z}; \quad (11)$$

$$B_{zn} = \left(-\frac{\mu_0}{2} M_{zn} - \frac{j\mu_0 \gamma_n}{2K_n} M_{xn}\right) (1 - e^{-\gamma_n}) e^{\gamma_n z}. \quad (12)$$

磁通密度表示为:

$$\mathbf{B} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [B_{xn} e^{-jk_n x} \mathbf{i}_x + B_{zn} e^{-jk_n x} \mathbf{i}_z]. \quad (13)$$

### 3 仿真与试验分析

通过 ANSYS 对基于 Halbach 阵列的磁轮进行吸附力仿真,磁轮的永磁材料采用高性能的稀土永磁材料钕铁硼 N35。相关参数如表1所示。

表1 仿真参数表

Table 1 Parameter table of simulation

| 剩磁感应强度/MT     | 矫顽力/(kA·m <sup>-1</sup> ) | 内禀矫顽力/(kA·m <sup>-1</sup> ) | 最大磁能积/(kJ·m <sup>-3</sup> ) |
|---------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 170 ~ 1 220 | ≥868                      | ≥955                        | 263 ~ 287                   |

ANSYS 的仿真如图5所示。

利用拉压试验机传感器对 Halbach 阵列磁环进行测试,探究了壁面与 Halbach 阵列磁环距离和磁轮单元的吸附力之间的关系,以及研究旋转角度对吸附力的影响。试验机如图6所示。

经试验和仿真分析可获得对比结果,如图7和图8所示。

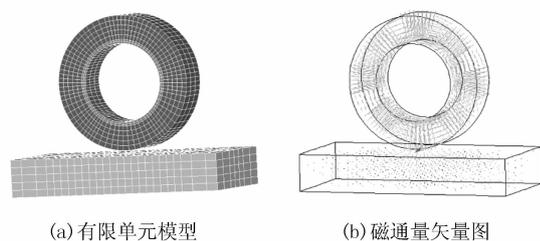


图5 几何与有限元模型

Figure 5 Geometrical model and finite-element model



图6 拉压试验机

Figure 6 Tension and compression tester

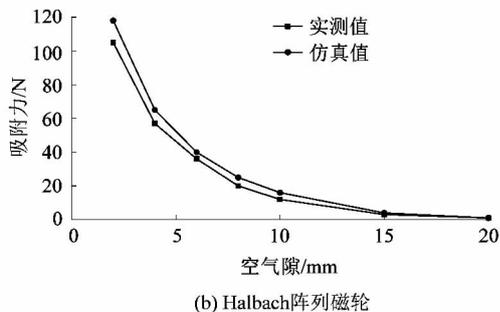
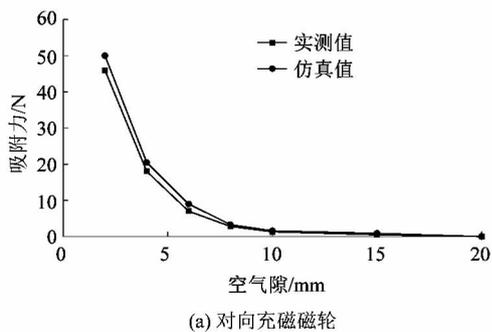


图7 吸附力随距离的变化

Figure 7 Change of adsorption force with distance

从仿真和实验中可以得出: Halbach 阵列与普通对向极磁环对比, Halbach 阵列的吸附距离对其吸附力的影响较弱;同时可以发现,其吸附力是普通对向极磁环吸附力的 2 倍多。而该种磁吸附爬行方式将可进一步提升爬壁机器人的负载能力和稳定性。

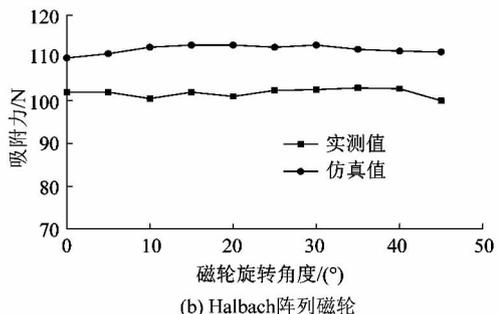
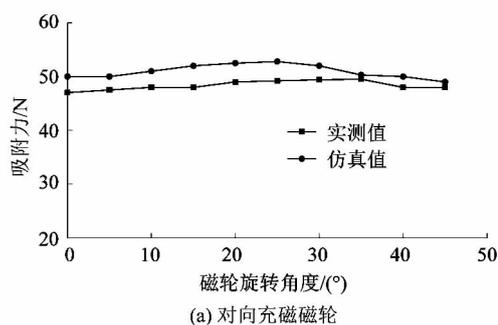


图8 旋转角度对吸附力的影响

Figure 8 Influence of rotation angle on adsorption force

### 4 结语

课题组对换流阀厅壁面难以高效清洁的问题展开研究,设计了基于 Halbach 阵列磁轮的爬壁机器人;并着重对优化后的磁轮特性进行了深入分析,采用修正的傅立叶级数形式推导出 Halbach 永磁阵列磁场解析模型,得出了磁通密度计算公式。并采用 ANSYS 进行了仿真分析,给出了磁通分布模型。随后采用拉伸试验台对 Halbach 阵列磁轮进行了磁吸附力试验分析,得出 Halbach 阵列与普通对向极磁环对比,其吸附距离对其吸附力的影响较弱,同时可以发现,其吸附力是普通对向极磁环吸附力的 2 倍多。这样的设计有利于提升爬壁机器人的稳定性和负载能力。

### 参考文献:

- [1] 叶宇峰,夏立,项智,等. 爬壁打磨机器人轻量化设计研究[J]. 机电工程,2017,34(2):119-124.
- [2] 韩猛,赵峰,桑迪,等. 一种核管道机器人结构与驱动力分析[J]. 机电工程,2017,34(7):696-701.
- [3] HIROSE S, TSUTSUMITAKE H. Disk rover: a wall-climbing robot using permanent [ C ]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Raleigh, NC, USA: IEEE, 1992: 2074-2079.
- [4] GRIECO J C, PRIETO M, ARMADA M, et al. A six-legged climbing robot for high payloads [ C ]//IEEE International Conference on Control Applications. Trieste, Italy: IEEE, 1998: 446-450.

(下转第 42 页)