

# 麦克纳姆履带式爬壁机器人 磁吸附单元结构与仿真

李振洋, 王战中, 袁亚强

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**为了解决履带式磁吸附爬壁机器人负载能力和运动灵活性之间的矛盾问题,结合 Halbach 永磁铁阵列的优势与麦克纳姆轮的灵活性,提出麦克纳姆履带式爬壁机器人的概念,并设计了安装于履带链节上且磁吸附力可调的新型磁吸附单元。首先,介绍磁吸附单元的结构和原理;然后,运用 Ansoft Maxwell 软件对磁吸附单元进行仿真,通过与传统 Halbach 磁吸附单元对比分析,结果表明,麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元结构在脱离工作表面时最大最小磁吸附力比值大,使得磁吸附单元便于与壁面脱离;最后,运用 ADAMS 软件进行磁吸附单元动力学仿真,得到该过程磁吸附力变化曲线图和驱动电机输出扭矩变化曲线图。仿真结果验证了采用麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元的履带式爬壁机器人运动更平稳,灵活性更高,电机消耗功率更少。

**关键词:**麦克纳姆履带;Halbach 磁吸附单元;动力学仿真

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)02-0120-07

## 0 引言

随着磁力爬壁机器人技术不断的发展,爬壁机器人的种类越来越多,其可以在各种倾斜角度的导电壁面上运动,能代替人类在高空、危险、极限情况完成一些特定作业,如今已广泛应用于风力发电机塔筒表面清洁维护、大型储油罐检测、船体清洁等工作中<sup>[1]</sup>。

磁力爬壁机器人在作业时通常要携带清洗装置、检测仪器、维修设备等,所以要求其具有一定的负载能力。然而磁力爬壁机器人的负载能力越强就要求磁吸附装置提供的磁吸附力越大,但是磁吸附力是影响爬壁机器人运动灵活性的重要因素之一。传统履带式磁吸附爬壁机器人的磁吸附单元安装在履带链节上,相对于链节的方位是固定的,当移动到履带链节与工作壁面脱离时,磁吸附单元会产生一个磁力阻力矩影响爬壁机器人的运动平稳性,增加驱动电机的功率消耗。针对此问题,王军波等<sup>[2]</sup>和张俊强等<sup>[3]</sup>设计出一种适用于履带式爬壁机器人的磁吸附力可调的磁吸附单元,通过改变磁极方向调节磁吸附力大小,一定程度上能够减小履带脱离工作壁面时的阻力矩,但是由于采用传统履带和传统磁路,爬壁机器人运动灵活性差且磁吸附装置产生的磁吸附力较小。

为了进一步提高单位体积永磁铁产生的磁吸附力,又能有效减小履带与工作壁面脱离时的磁力阻力矩,同时提高爬壁机器人的运动灵活性,提出一种基于麦克纳姆轮原理的履带式爬壁机器人,并对其磁力吸附单元的结构和磁力调节方式进行详细研究与仿真分析。

## 1 麦克纳姆履带式磁吸附爬壁机器人

### 1.1 麦克纳姆履带式磁吸附爬壁机器人结构

麦克纳姆轮式爬壁机器人是一种全向移动爬壁机器人,具有较高的运动灵活性,但其负载能力较小;

收稿日期:2022-04-04 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20220085

作者简介:李振洋(1997—),男,硕士研究生,研究方向为数字化制造及机器人技术。E-mail:244581137@qq.com

李振洋,王战中,袁亚强.麦克纳姆履带式爬壁机器人磁吸附单元结构与仿真[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):120-126.

履带式爬壁机器人具有较高的负载能力和运动平稳性,但其运动灵活性较低。为提高爬壁机器人运动灵活性、平稳性和负载能力,提出一种麦克纳姆履带式磁吸附爬壁机器人,结构如图 1 所示。

机器人的移动模块由 4 条麦克纳姆履带组成,履带每个链节上都装有磁吸附单元,履带内侧装有导轨,在履带链节脱离工作壁面过程中,导轨上的导槽能够调整履带链节磁吸附单元的方向,进而调低磁吸附力,降低磁力阻力矩。麦克纳姆履带分为 A、B 型 2 种,A 型履带辊子轴线与链轮轴线夹角为  $45^\circ$ ,B 型履带辊子轴线与链轮轴线夹角为  $135^\circ$ ,机器人对角的 2 条麦克纳姆履带为相同类型的履带。通过控制每条麦克纳姆履带的转向实现爬壁机器人的全向移动。

通过在 SolidWorks 软件中对机器人各个零部件赋予材料属性可知机器人本体自重约为 80 kg。设计的爬壁机器人主要用于风力发电塔筒表面的清洁和维护工作,机器人工作时需要携带清刷装置和维护设备,其负载能力应大于 50 kg。通过计算可知,爬壁机器人稳定在垂直壁面运动时需要磁吸附力为 3 200 N,麦克纳姆履带式爬壁机器人一共有 40 个磁吸附单元产生磁吸附力,每个磁吸附单元产生的磁吸附力应大于 80 N。

### 1.2 履带链节磁吸附单元结构及原理

Halbach 阵列是一种新型永磁排列方式,将永磁铁水平和垂直交替排列,平行磁场和径向磁场叠加使得一侧磁场强度大幅增强而另一侧明显减弱<sup>[4-5]</sup>。利用这一原理设计出一款适合履带链节安装的带摆杆回转轴的磁吸附单元结构,如图 2 所示。将由 5 块永磁铁构成直线型 Halbach 的阵列,通过转轴安装在链节上,链节下端装有 2 个麦克纳姆轮辊子且辊子直接与导磁壁面接触,使永磁铁与导磁壁面之间具有一定的工作间隙,以保证永磁铁旋转时不与导磁壁面碰撞。

图 3 所示为导轨结构示意图,导轨导槽有直线段、圆弧段和过渡段。当履带转动时,履带链节磁吸附单元中的摆杆沿导轨导槽移动,经过导槽过渡段时,导轨导槽和磁吸附单元的摆杆相互作用会使得磁吸附单元旋转  $180^\circ$ 。假设麦克纳姆履带爬壁机器人向左方行驶,随着履带的转动,履带链节磁吸附单元经过左侧导槽过渡段时,由于摆杆与导槽的作用磁吸附单元正向旋转  $180^\circ$ ,履带链节磁吸附单元强磁面对导磁壁面处于吸附状态,提高了磁场的利用率;当履带链节磁吸附单元经过右侧导槽过渡段时,履带链节磁吸附单元反向旋转  $180^\circ$ ,此时履带链节磁吸附单元弱磁面对导磁壁面,磁吸附力很小,履带链节脱离导磁壁面时需要很小的电机扭矩。

## 2 磁吸附力数学模型的建立

永磁铁是一种无缘磁介质,它的磁化状态用磁化强度  $M$  来表示,大小与矫顽力  $H_c$  相等。当磁介质均匀磁化后,有

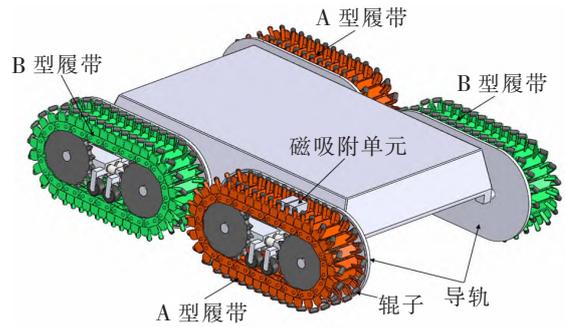


图 1 麦克纳姆履带式爬壁机器人结构

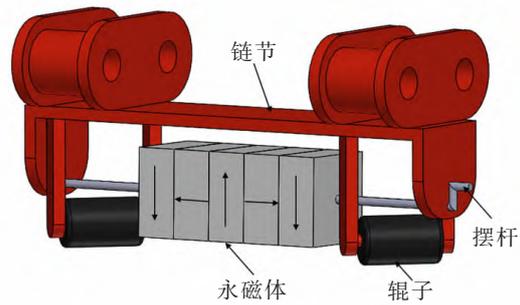


图 2 磁吸附单元结构图

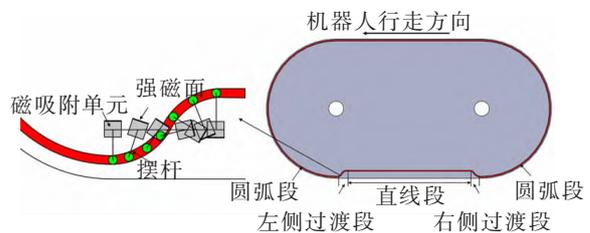


图 3 导轨结构图

$$\begin{cases} J_{sm} = M \times n \\ H = (B / u_0) - H_C \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $J_{sm}$  为磁化面电流密度;  $H$  为磁场强度;  $u_0$  为真空磁导率,  $u_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m;  $n$  为面电流的外法线方向。

将永磁体产生的磁场简化为二维静态磁场, 其麦克韦斯方程为

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

式中,  $H$  为磁场强度;  $J$  为电流密度;  $B$  为磁感应强度。

由方程(2)中  $\nabla H = J$  引入矢量磁位  $A$ , 因为引入矢量磁位后仍然满足麦克韦斯方程组, 所以应满足  $B = \nabla A$ , 由此可得泊松方程式

$$\nabla^2 = -\mu J \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为相对磁导率。

根据求解域的初始条件和边界条件可得

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \\ L_1: \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s+} - \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s-} = j \\ L_2: \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s+} = \left( \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{s-} \\ L_3: A = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\Omega$  为整个有效域;  $L_1$  为永磁体表面等效束缚面电流存在的界限;  $L_2$  为不同物质的交界线;  $L_3$  为场域边界线;  $n$  为不同物质交界面的法线方向;  $\mu$  为材料相对磁导率。

为分析单个履带链节磁吸附单元的磁吸附力, 建立履带链节磁吸附单元的磁场分析物理模型, 如图 4 所示, 当磁吸附间隙(链节磁吸附单元到导磁壁面之间的距离)  $\delta$  较小时, 将磁吸附间隙  $\delta$  沿水平方向均分为  $n$  份, 每份长度的永磁铁产生的磁吸附力为<sup>[6]</sup>

$$F_i = \frac{B_i^2 S_i}{2\mu} = \frac{B_i^2 S \cos \alpha}{2\mu n} \quad (5)$$

式中,  $B_i$  为每一等份磁感应强度;  $S_i$  为每一等份气隙有效受力面积;  $S$  为磁吸附单元的底面积;  $\alpha$  为磁吸附单元与导磁壁面之间的夹角。

则磁吸附单元对导磁壁面所产生的磁吸附力为

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{B_i^2 S \cos \alpha}{2\mu n} \quad (6)$$

### 3 Ansoft Maxwell 求解和结果分析

#### 3.1 有限元模型的建立

使用 Ansoft Maxwell 软件建立履带链节磁吸附单元的磁场有限元结构模型, 如图 5 所示, 根据所设计麦克纳姆履带式爬壁机器人的链节磁吸附单元的结构尺寸和辊子参数确定一下参数: 磁吸附间隙  $b = 6$  mm; 永磁铁厚度  $H = 22$  mm; 永磁体宽度  $l = 10$  mm。根据履带链节位置的不同, 磁吸附单元有 2 种状态, 当履带链节和导磁工作壁面接触时, 链节磁吸附单元的强磁面面对导磁工作表面如图 5(a) 所示; 当履

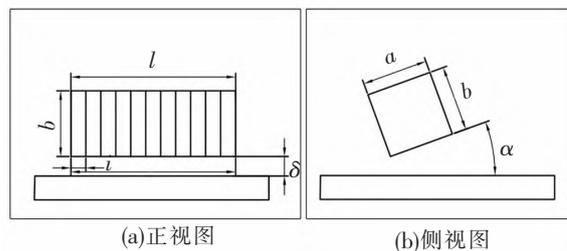


图 4 磁场模型

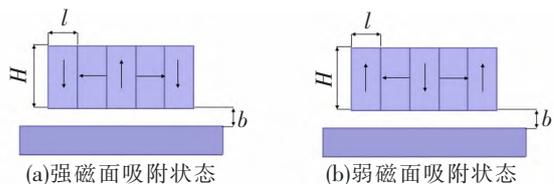


图 5 磁场有限元结构模型

带链节和导磁工作壁面快脱离时,链节磁吸附单元的弱磁面面对导磁工作表面(履带链节磁吸附单元旋转  $180^\circ$ ),如图 5(b)所示。

### 3.2 有限元模型求解与结果分析

磁吸附单元中的永磁铁采用稀土永磁材料钕铁硼(NdFeB)系列中的 N35,其内禀矫顽力较大而且具有较好的抗老化退磁性能,能够保证磁吸附单元长期稳定地工作,其性能参数如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 NdFeB-N35 永磁材料性能参数

性能参数	剩余磁感应强度 $B_r / T$	矫顽力 $H_{cb} / (kA \cdot m^{-1})$	内禀矫顽力 $H_{cj} / (kA \cdot m^{-1})$	最大磁积能 $BH_{max} / (kJ \cdot m^{-3})$	温度系数 $B/K^{-1}$	居里温度/ $^\circ C$	回复磁导率 $\mu_{rec}$
数值	1.17~1.23	851~955	>955	264~288	-0.001 1	340	1.056

对模型赋予材料属性,其相对磁导率是 1.099 778 5,磁吸附间隙空气相对磁导率为 1,导磁壁面材料为纯铁,相对磁导率为 4 000。

在结构参数相同的条件下,分别对图 5 中 2 种状态进行仿真求解,然后进行对比分析。图 6(a)、图 6(b)分别为 2 种磁路状态的磁力线分布图。由图 6 可知,链节磁吸附单元强磁面吸附时磁力线大部分穿过导磁壁面,产生的磁吸附力为 88.602 N;磁吸附单元弱磁面吸附时,磁力线极少部分穿过导磁壁面,产生的磁吸附力为 5.453 4 N。可以算出,单个链节磁吸附单元最大磁吸附力与最小磁吸附力之比约为 16 倍;而传统履带式磁吸附爬壁机器人的 Halbach 阵列磁吸附单元总是强磁面面对导磁工作壁面,履带链节面和脱离导磁工作壁面时的磁吸附力几乎相等,比值约为 1。

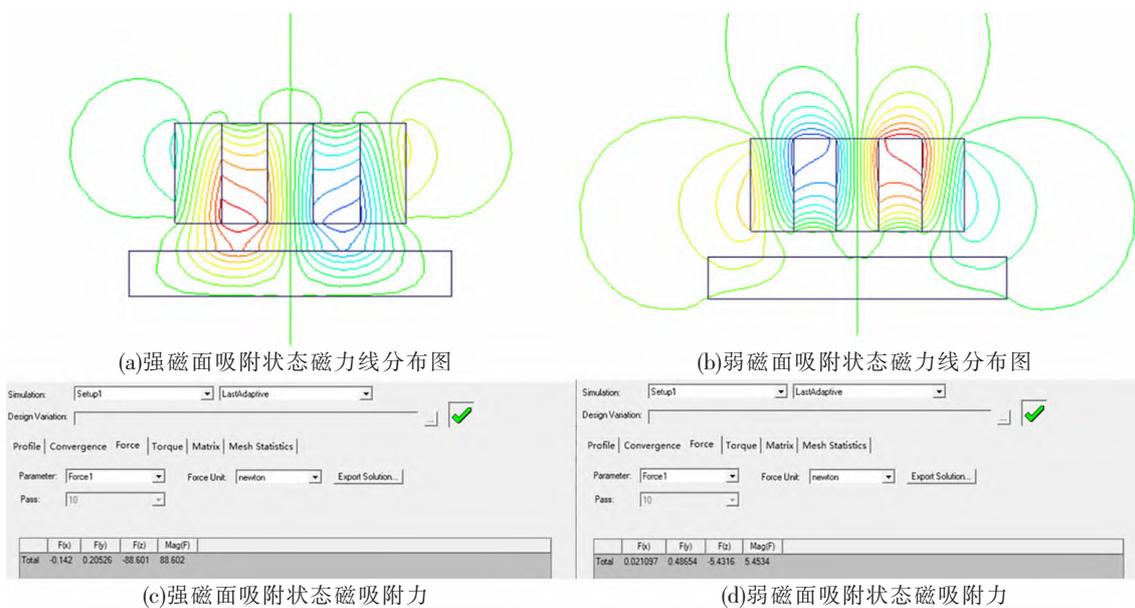


图 6 2 种模型对比图

## 4 磁吸附单元运动分析与仿真

### 4.1 磁吸附单元运动分析

履带式爬壁机器人运动过程中,随着履带的转动,爬壁机器人前行方向履带后端的磁吸附单元脱离导磁工作壁面时,会产生一个磁力阻力矩,影响爬壁机器人的运动平稳性和功耗的多少。麦克纳姆履带式爬壁机器人的履带链节磁吸附单元在脱离导磁工作壁面前,通过导轨导槽和摆杆的作用,使得磁吸附单元绕自身轴线转过  $180^\circ$ ,弱磁面面对导磁工作壁面,大大降低磁力阻力矩,有利于爬壁机器人运动平稳和降低功耗;而传统履带式磁吸附爬壁机器人 Halbach 阵列磁吸附单元总是强磁面面对导磁工作壁面,磁吸附单元脱离导磁工作壁面时,磁力阻力矩几乎不会减小,从而影响爬壁机器人的运动平稳性并且且

耗还高。

随着履带的转动,在磁吸附单元脱离导磁工作壁面过程中,磁吸附单元与导磁工作壁面之间的夹角  $\alpha$  也在不断从  $0^\circ$  开始增大。图 7 绘制了  $\alpha$  取 6 种不同角度值的情况,便于磁吸附力的计算与仿真。

利用 Ansoft Maxwell 仿真计算可得传统履带式 Halbach 磁吸附单元和麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元在不同  $\alpha$  角条件下对导磁壁面产生的磁吸附力,结果如表 2 所示。

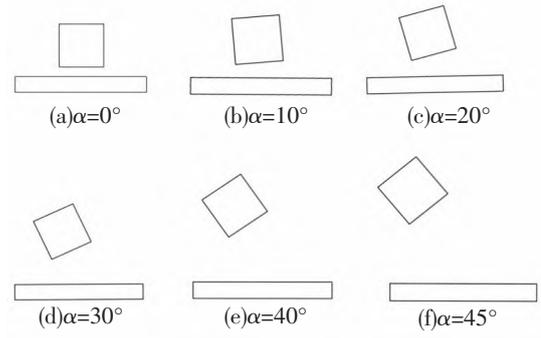


图 7 磁吸附单元运动模型

表 2 2 种磁吸附单元磁吸附力对比

角度 $\alpha/(\circ)$	传统履带式 Halbach 磁吸附单元磁吸附力/N	麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元磁吸附力/N
0	88.600 0	5.453 4
5	75.845 0	4.930 8
10	59.499 0	4.103 1
15	40.930 0	3.377 9
20	23.605 0	2.405 0
25	10.687 0	1.639 6
30	4.427 6	1.033 7
35	1.611 0	0.619 5
40	0.584 3	0.369 0
45	0.200 0	0.156 7

#### 4.2 磁吸附单元运动仿真

利用动力学仿真软件 ADAMS 对磁吸附单元脱离导磁壁面过程进行仿真。将磁吸附单元简化为 1 个长方体,在长方体上方 125 mm(履带链轮回转中心高度)处建立 1 个转动副,磁吸附单元绕其旋转,仿真模型如图 8 所示。在磁吸附单元质心处添加 1 个竖直向下的力,由于磁吸附力是随转角非线性变化的,所以采用 SPLINE 函数定义力。将表 2 中传统履带式 Halbach 磁吸附单元产生的磁吸附力数据导入 ADAMS 中创建 SPLINE\_1 函数,将麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元产生的磁吸附力数据导入创建 SPLINE\_2,使用 SPLINE\_1 和 SPLINE\_2 函数分别对力进行修改。在转动副上添加 1 个驱动模拟爬壁机器人的驱动,电机速度为 76 d/s,仿真时间设定为 0.6 s,仿真步长设定为 0.01,然后进行磁吸附单元的运动仿真。

如图 9 所示,传统履带式 Halbach 磁吸附单元对导磁壁面所产生的最大吸附力为 88.6 N,当其随着链轮转动远离导磁壁面时,对导磁壁面产生的磁吸附力逐渐减小;麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元脱离导磁壁面时,对导磁壁面产生的最大磁吸附力为 5.4 N,脱离导磁壁面过程中磁吸附力变化很小。麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元比传统履带式 Halbach 磁吸附单元在脱离导磁壁面产生的磁吸力更小,因此磁力阻力矩也相对更小些,使得履带链节更容

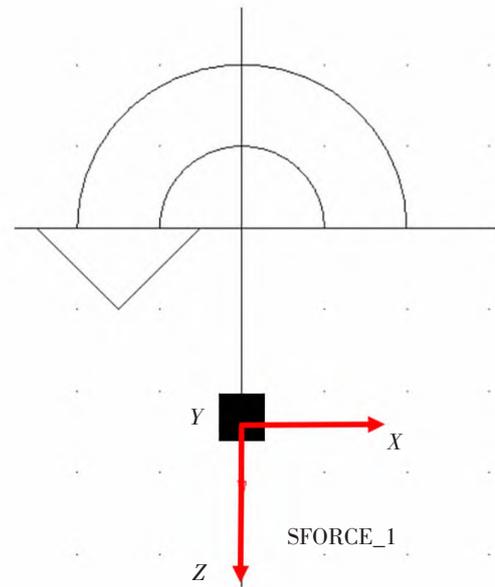


图 8 磁吸附单元运动仿真模型

易脱离导磁壁面。图 10 所示为 2 种磁吸附单元脱离导磁壁面过程中驱动电机扭矩变化曲线图,可以看出,传统履带式 Halbach 磁吸附单元在脱离导磁壁面时扭矩变化较大,最大的扭矩为  $1\ 250\ \text{N}\cdot\text{mm}$ ;而麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元扭矩变化曲线趋近于 1 条直线,扭矩变化平稳,最大扭矩  $98\ \text{N}\cdot\text{mm}$ ,因此麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元在脱离导磁壁面时所需要的驱动电机扭矩更小,比传统 Halbach 磁吸附单元运动更平稳。图 11 所示为 2 种磁吸附单元脱离导磁壁面过程中的功耗曲线,从图 11 可以看出,从  $0\sim 0.18\ \text{s}$ ,2 种磁吸附单元的功耗都在逐渐增大,从  $0.18\sim 0.6\ \text{s}$ ,2 种磁吸附单元的功耗都在逐渐降低,但是传统履带式 Halbach 磁吸附单元的最大功耗为  $1\ 600\ (\text{N}\cdot\text{mm})/\text{s}$ ,而麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元的最大功耗只有  $100\ (\text{N}\cdot\text{mm})/\text{s}$ 。可见,在履带链节脱离导磁壁面过程中,麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元的功耗更小。

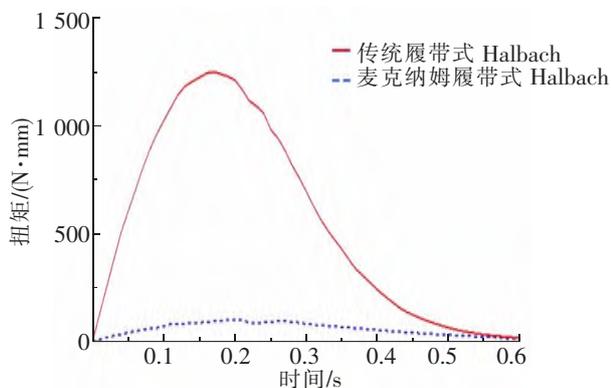


图 10 2 种磁吸附单元驱动电机扭矩曲线图

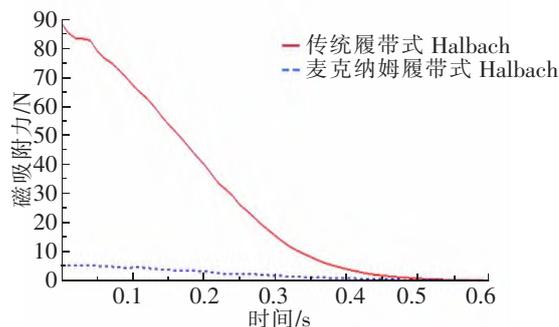


图 9 2 种磁吸附单元磁吸附力变化曲线图

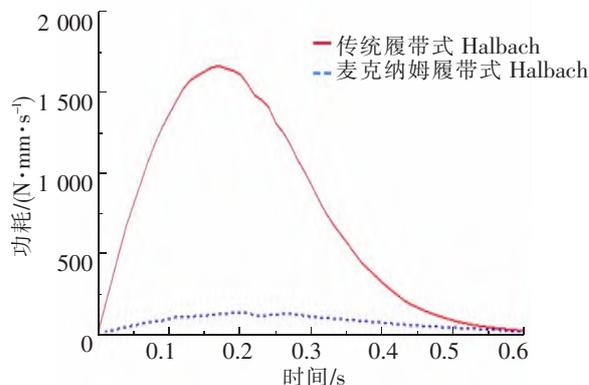


图 11 2 种磁吸附单元驱动电机功耗曲线图

## 5 结论

(1) 结合麦克纳姆轮的运动灵活性、履带爬壁机器人的强负载能力和永磁铁 Halbach 阵列磁场强度的分布,提出麦克纳姆履带式爬壁机器人的结构并着重对履带链节磁吸附单元进行分析。

(2) 采用有限元法对麦克纳姆履带式爬壁机器人的履带链节磁吸附单元磁吸附力建模并计算。计算结果表明,在履带链节脱离导磁工作壁面过程中,麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元的磁力阻力矩很小,便于提高爬壁机器人的运动平稳性。

(3) 运用 ADAMS 软件分别对麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元和传统履带式 Halbach 磁吸附单元脱离导磁壁面过程进行运动仿真,仿真结果验证了麦克纳姆履带式 Halbach 磁吸附单元运动更加平稳、灵活性更高、耗能更少。

## 参 考 文 献

- [1] 闫久江,西振,左干,等. 爬壁机器人研究现状与技术应用分析[J]. 机械研究与应用,2015,28(3):52-54.
- [2] 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.
- [3] 张俊强,张华,万伟民. 履带式爬壁机器人磁吸附单元的磁场及运动分析[J]. 机器人,2006(2):219-223.
- [4] Moon G L, Sung Q L, Dae G G. Analysis of Halbach magnet array and its application to linear motor[J]. Mechatronics, 2004, 14: 115-128.
- [5] Yves Perriard. Optimization design of a segmented Halbach permanent-magnet motor using an analytical model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(7): 2955-2959.

[6]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.

[7]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.

## Structure Design and Simulation of Magnetic Adsorption Unit of Mecanum Tracked Wall-Climbing Robot

Li Zhenyang, Wang Zhanzhong, Yuan Yaqiang

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

**Abstract:** In order to solve the contradiction problem between the load capacity and motion flexibility of the tracked magnetic adsorption wall climbing robot, combined with the advantages of Halbach permanent magnet array and the flexibility of mecanum wheel, the concept of mecanum tracked wall climbing robot was proposed, and a new kind of magnetic adsorption unit installed on the track link with adjustable magnetic adsorption force was designed. Firstly, the structure and principle of the new kind of magnetic adsorption unit were introduced, and then the magnetic adsorption unit was simulated with Ansoft Maxwell software. Compared with the traditional Halbach magnetic adsorption unit, the analysis results showed that the maximum and minimum magnetic adsorption force ratio of the Mecanum crawler Halbach magnetic adsorption unit structure was large when it was separated from the working surface, which made the magnetic adsorption unit easy to separate from the wall. Finally, the dynamic simulation of the magnetic adsorption unit was carried out by using ADAMS software, the variation curve of magnetic adsorption force and output torque of driving motor were obtained. The simulation results verify that the tracked wall climbing robot with mecanum tracked Halbach magnetic adsorption unit has more stable movement, higher flexibility and less motor power consumption.

**Key words:** Mecanum track; Halbach magnetic adsorption unit; dynamics simulation