

两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动特性对比研究

温建民¹, 罗 成²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 为克服单边永磁涡流制动法向力, 提升制动性能, 研究了两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动特性。利用电磁理论建立空间磁场方程, 推导出两种系统各自的制动力解析表达式, 并搭建相应的有限元模型验证其解析解的正确性。对比了两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动方案的制动力, 得到低速段时方案 1 制动力接近方案 2 制动力的 2 倍。最后, 分析了永磁体长度、高度、气隙、导体板电导率及厚度对方案 1 制动性能的影响。分析结果表明: 为取得最大制动效率, 永磁体长高比应为 1.2; 为避免产生影响系统稳定运行的法向力, 上下部气隙应相等; 导体板电导率变化不影响最大制动力, 但其对应的速度会随其的增大而减小; 导体板厚度的变化会同时改变最大制动力及其对应的速度。

关键词: 双边 Halbach 阵列; 涡流制动; 解析计算; 制动力分析

中图分类号: TM153.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)02-0036-05

doi: 10.12177/emca.2022.163

Comparison Research on Characteristics of Two Double-sided Halbach Arrays Permanent Magnet Eddy Current Braking

WEN Jianmin¹, LUO Cheng²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

2. School of Electrical Engineering, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to overcome the normal force of the single-sided permanent magnet eddy current braking and improve the braking performance, the characteristics of two double-sided Halbach arrays permanent magnet eddy current braking are studied. The space magnetic field equations are established by using electromagnetic theory, and the analytical expressions of the two systems braking force are derived. And the corresponding finite element model is built to verify the correctness of the analytical solutions. The braking forces of the two double-sided Halbach arrays permanent magnet eddy current braking systems are compared, and the braking force of the scheme 1 is close to twice of that of the scheme 2 at low speed. Finally, the influence of the permanent magnet length, permanent magnet height, air gap, conductor plate conductivity and thickness on the braking performance of scheme 1 is analyzed. The results show that the ratio of length to height of permanent magnet should be 1.2 to obtain the maximum braking efficiency. To avoid the normal force affecting the stable operation of the system, the upper and lower air gaps should be equal. The change of conductor plate conductivity does not affect the maximum braking force, but its corresponding speed will decrease with conductor plate conductivity increase. The change of conductor plate thickness will change the maximum braking force and its corresponding speed at the same time.

Key words: double-sided Halbach array; eddy current braking; analytical calculation; braking force analysis

收稿日期: 2022-10-19; 收到修改稿日期: 2022-11-14

作者简介: 温建民(1966—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向为电气工程及自动化。

罗 成(1987—), 男, 博士, 实验师, 研究方向为电动悬浮。

0 引言

永磁涡流制动通过电磁感应原理,利用永磁体与导体间的相对运动,在导体中感生涡流,从而获得所需的制动力。其具有无接触磨耗、结构简单、噪声小、无断电失效、无线圈能耗等优点,目前已在轨道交通、升降装置等领域得到应用^[1-3]。

对于永磁涡流制动技术已有相关研究。Jang 等^[4]和 Sainjargal 等^[5]计算对比了水平磁化、垂向磁化、Halbach 阵列三种单边永磁涡流制动系统的制动力,证明了 Halbach 阵列永磁涡流制动具有更好的制动能力。王江波等^[6]、Jang 等^[7]和苑一祥等^[8]利用麦克斯韦方程组建立磁场方程,结合磁场边界条件求得单边 Halbach 阵列永磁涡流制动系统磁场及制动力解析解。但单边磁场源除产生制动力外,还会产生影响系统稳定运行的法向力^[9]。因此,肖尧等^[10]通过有限元仿真对比了双边 Halbach 阵列及常规双边永磁涡流制动性能,发现双边 Halbach 阵列永磁涡流制动在高速时具有更好的制动性能。Chen 等^[11]通过计算发现双边 Halbach 阵列竖向磁化方向相同时,产生的涡流制动力在 100 km/h 的速度范围内比阵列竖向磁化方向相反时大得多。但其解析计算公式未考虑阵列磁场边端效应及气隙谐波的影响,计算结果误差较大。而陈殷^[12]则利用解析法重点研究了双边 Halbach 阵列竖向磁化方向相反时的永磁涡流制动在高速磁浮中的制动性能。但其制动力在低速时远小于双边 Halbach 阵列竖向磁化方向相同时的涡流制动力。

基于以上研究,本文对两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动系统方案进行研究。首先建立系统解析模型,推导出系统涡流制动力。然后搭建有限元模型,对制动力解析结果进行验证,并利用制动力解析式对比了两种系统方案的制动能力。最后分析系统参数对方案 1 制动性能的影响。

1 解析计算

两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动示意图如图 1 所示。图中, l 、 h 分别为永磁体长度与高度, l_1 、 l_2 分别为 Halbach 阵列及导体板长度。

1.1 方案 1 制动力计算

如图 1(a) 所示,首先求解双边 Halbach 阵列

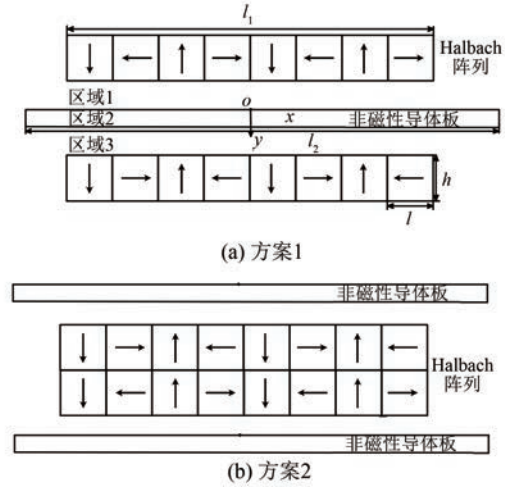


图 1 两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动示意图

在空间中产生的源磁场。根据文献[13],利用面电流法,将单块永磁体产生的磁场等效为两侧面电流在空间中产生的磁场叠加,进而求得双边 Halbach 阵列产生的源磁场。求解的双边 Halbach 阵列源磁场已考虑气隙谐波及端部效应,故对其进行傅里叶分解^[14]:

$$\begin{cases} B_{sx}(x, y) = B_{sx}^I(x, y) + B_{sx}^{II}(x, y) = \\ \sum_{q=-Q}^Q [S_x^I e^{j\xi x} e^{-|\xi| y} + S_x^{II} e^{j\xi x} e^{|\xi| (y-d)}] \\ B_{sy}(x, y) = B_{sy}^I(x, y) + B_{sy}^{II}(x, y) = \\ \sum_{q=-Q}^Q [S_y^I e^{j\xi x} e^{-|\xi| y} + S_y^{II} e^{j\xi x} e^{|\xi| (y-d)}] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $B_{sx}^I(x, y)$ 、 $B_{sy}^I(x, y)$ 分别为上边 Halbach 阵列和 $B_{sx}^{II}(x, y)$ 、 $B_{sy}^{II}(x, y)$ 分别为下边 Halbach 阵列经傅里叶分解后的源磁场 x 、 y 分量; Q 为谐波次数; $\xi = 2\pi q/l_2$; S_x^I 、 S_y^I 为上、下边阵列傅里叶系数,且:

$$\begin{cases} S_x^I = \frac{1}{l_2} \int_{-l_2/2}^{l_2/2} B_{sx}^I(x, 0) e^{-j\xi x} dx \\ S_y^I = \frac{1}{l_2} \int_{-l_2/2}^{l_2/2} B_{sy}^I(x, 0) e^{-j\xi x} dx \\ S_x^{II} = \frac{1}{l_2} \int_{-l_2/2}^{l_2/2} B_{sx}^{II}(x, d) e^{-j\xi x} dx \\ S_y^{II} = \frac{1}{l_2} \int_{-l_2/2}^{l_2/2} B_{sy}^{II}(x, d) e^{-j\xi x} dx \end{cases} \quad (2)$$

式中: $B_{sx}^I(x, 0)$ 、 $B_{sy}^I(x, 0)$ 分别为上边 Halbach 阵列在导体板上表面产生的源磁场 x 、 y 分量; $B_{sx}^{II}(x, 0)$ 、 $B_{sy}^{II}(x, 0)$ 分别为下边 Halbach 阵列在导体板

下表面产生的源磁场 x 、 y 分量,其可根据参考文献[13-14]求得。

当双边 Halbach 阵列与导体板间以速度 v_x 相对运动时,利用麦克斯韦方程组可得矢量磁位 A 方程为^[15]

$$\nabla^2 A + k_i^2 A = -\mu_0 J_s \quad (3)$$

式中: k_i 为传播函数; J_s 为导体板中的感生涡流,且:

$$\begin{cases} J_s = -\gamma_2 v_x B_{sy}(x, y) \\ k_i^2 = -j\omega\mu_0(\gamma_i + j\omega\varepsilon_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: γ_2 为导体板电导率; ω 为角频率($\omega = -\xi v$); γ_i 分别为气隙($i=1,3$)和导体板($i=2$)的电导率; μ_0 、 ε_0 分别为真空磁导率及真空介电常数。

由于在二维模型中感应涡流仅包含 z 方向分量。故根据式(4)的矢量方程得到各区域标量方程为

$$\nabla^2 A_{iz} + k_i^2 A_{iz} = \begin{cases} -\mu_0 J_s & i=2 \\ 0 & i=1,3 \end{cases} \quad (5)$$

根据文献[14],矢量磁位方程(5)的通解可利用分离变量法及磁场边界条件求得。将求得的感生涡流磁场与双边 Halbach 源磁场求和,可得系统磁场为

$$\begin{cases} B_{ix}(x, y) = B_{sx}(x, y) + \frac{\partial A_{iz}}{\partial y} = \\ \sum_{q=-Q}^{q=Q} \tilde{B}_{ix}(y) e^{j\xi x} \\ B_{iy}(x, y) = B_{sy}(x, y) - \frac{\partial A_{iz}}{\partial x} = \\ \sum_{q=-Q}^{q=Q} \tilde{B}_{iy}(y) e^{j\xi x} \end{cases} \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

根据麦克斯韦张量法,可求得制动力解析式为^[16-18]

$$F_x = \frac{-w_2 l_2}{\mu_0} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{q=-Q}^Q [\tilde{B}_{1x}(0) \tilde{B}_{1y}^*(0) + \tilde{B}_{3x}(d) \tilde{B}_{3y}^*(d)] \right\} \quad (7)$$

式中: w_2 为导体板横向宽度。

1.2 方案2制动力计算

如图1(b)所示,方案2为中间双边 Halbach 阵列与两侧导体板间做相对切割运动,在两侧导体板感生涡流产生所需的制动力。为简化运算,

忽略背靠背 Halbach 阵列磁场的相互耦合,将其等效为两个单边永磁涡流制动。因此,根据麦克斯韦张量法可求得方案2制动力解析式为^[16-18]

$$F'_x = \frac{-2w_2 l_2}{\mu_0} \cdot$$

$$\operatorname{Re} \left\{ \sum_{q=-Q}^Q [\tilde{B}'_{1x}(0) \tilde{B}'_{1y}^*(0) + \tilde{B}'_{3x}(d) \tilde{B}'_{3y}^*(d)] \right\} \quad (8)$$

式中: $\tilde{B}'_{1x}(0)$ 、 $\tilde{B}'_{1y}(0)$ 、 $\tilde{B}'_{3x}(d)$ 、 $\tilde{B}'_{1y}(d)$ 分别为单边 Halbach 阵列与导体板相对运动切割时,在导体板上、下表面产生的各次正弦 x 、 y 分量磁场最大值,其可通过去除方案1的下部 Halbach 阵列后,根据式(1)~式(6)求得。

2 有限元验证

根据表1所示的有限元模型参数,利用 Ansys Maxwell 软件分别搭建方案1、方案2双边 Halbach 阵列永磁涡流制动有限元模型,并对推导的制动力解析解进行验证,得到两种方案的磁感应强度如图2所示。

表1 模型参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
永磁体剩磁 B_r /T	1.25	导体板横向宽度 w_2 /mm	200
永磁体长度 l /mm	100	导体板长度 l_2 /mm	1 600
永磁体高度 h /mm	100	导体板厚度 d /mm	20
极对数 p	2	导体板电导率 γ_2 /($S \cdot m^{-1}$)	3.8×10^7
阵列长度 l_1 /mm	800	上、下边气隙 g_1 、 g_2 /mm	30

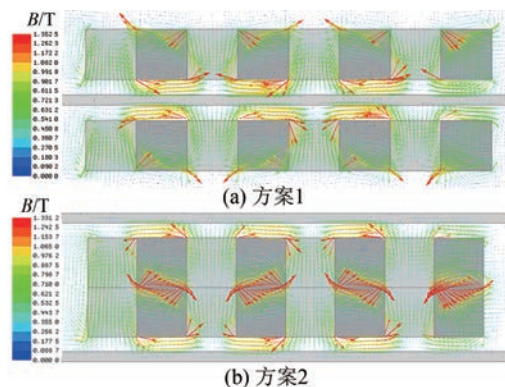


图2 磁感应强度($v_x = 100$ km/h)

从图2(b)可以看出,方案2中背靠背 Halbach 阵列磁场存在明显的相互耦合。

不同速度下,制动力解析模型与有限元模型

计算结果对比如图 3 所示。由图 3 可见,方案 1 制动力解析解与有限元计算结果十分吻合,其计算平均相对误差仅为 0.87%。而由于解析计算忽略了背靠背 Halbach 阵列磁场耦合效应,方案 2 解析计算结果比有限元计算结果大,二者平均相对误差为 7.21%。且方案 1 为上、下阵列磁场叠加,方案 2 为两个单边 Halbach 永磁涡流制动力的叠加,故低速段方案 1 制动力接近方案 2 制动力的 2 倍,而随着速度的提高,由于集肤效应,二者制动力趋于相近。

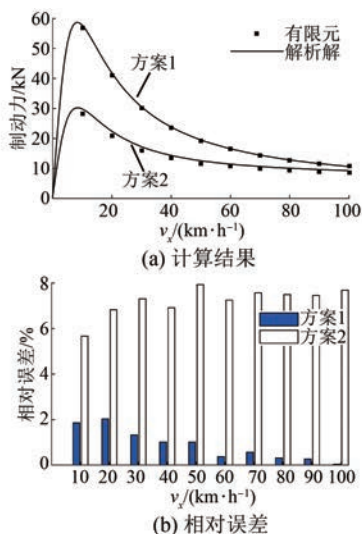


图 3 制动力解析模型与有限元模型计算结果对比

3 参数分析

影响永磁涡流制动性能的参数主要有永磁体尺寸、气隙、导体板电导率及厚度。考虑到永磁体尺寸的变化会影响其体积和质量,因此除了考虑其对制动力的影响外,本文还选取最大制动力与永磁阵列体积比作为分析目标。在分析气隙及导体板参数对制动性能的影响时,由于永磁阵列参数不变,仅分析其对制动力的影响。由第 2 节分析可知,方案 1 的制动能力在低速段明显优于方案 2,故本节仅分析方案 1 参数对其制动力的影响。除了分析参数的变化外,其他参数如表 1 所示。

3.1 永磁体长度及高度

永磁体长度和高度变化对制动力的影响分别如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可见,制动力随着永磁体长度或高度的增加而增大,但增大幅度在

逐渐减小。且永磁体长度或高度的变化不影响取得最大制动力时的速度($v = 8$ km/h)。选取最大制动力 $F_{x\max}$ 与双边 Halbach 阵列体积 V_m 之比,分析其随永磁体长度和高度的变化曲线,如图 6、图 7 所示。

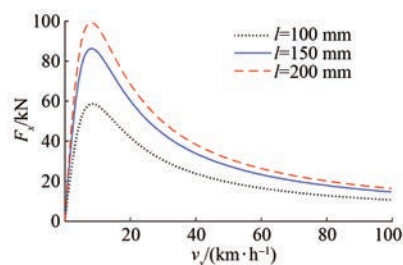


图 4 永磁体长度变化对制动力的影响

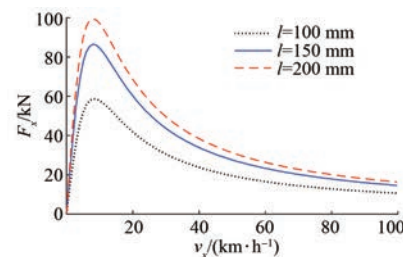


图 5 永磁体高度变化对制动力的影响

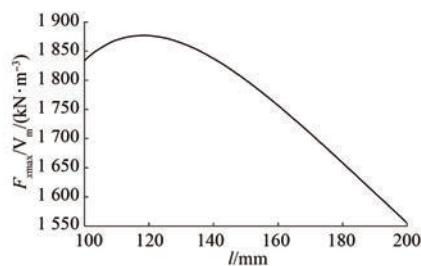


图 6 $F_{x\max}/V_m$ 随永磁体长度的变化曲线($h = 100$ mm)

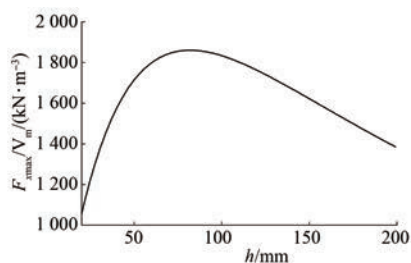


图 7 $F_{x\max}/V_m$ 随永磁体高度的变化曲线($l = 100$ mm)

由图 6、图 7 可见,随着永磁长度或高度的增大, $F_{x\max}/V_m$ 先增后减,其基本在永磁体长度与高度比 $l/h = 1.2$ 时取得最大值。因此,为取得最大制动效率,永磁体长高比应取 1.2。

3.2 气隙

制动力及法向力随气隙变化的曲线如图 8 所示。其中,系统法向力 F_y 可根据麦克斯韦张量法求得^[16-18]。

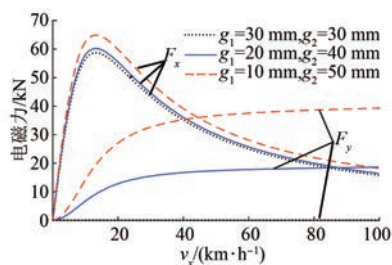


图 8 气隙变化对制动力的影响

由图 8 可见,单边气隙的减小,可适当增大制动力,但法向力也随之迅速增大。法向力的产生会影响系统的稳定运行,因此上、下部气隙应相等。

3.3 导体板电导率及厚度

导体板电导率和厚度变化对制动力的影响如图 9、图 10 所示。

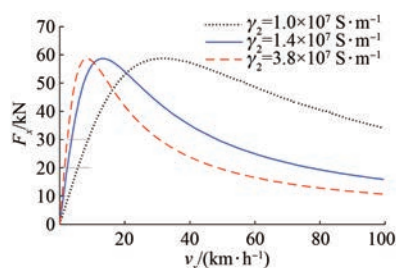


图 9 导体板电导率变化对制动力的影响

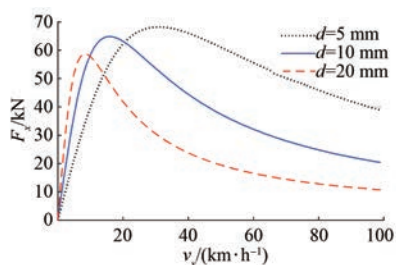


图 10 导体板厚度变化对制动力的影响

由图 9、图 10 可见,导体板电导率的变化不影响最大制动力,但会改变最大制动力的速度。电导率越大,最大制动力对应的速度就越小。导体板厚度的减小会增大制动力及其对应的速度。

4 结 语

本文推导了两种双边 Halbach 阵列永磁涡流

制动方案制动力的解析解。对比分析了两种制动方案的制动力,得到低速段时方案 1 制动力接近方案 2 制动力的 2 倍。分析了永磁体尺寸、气隙、导体板参数对方案 1 制动性能的影响,得到以下结论。

(1) 制动力随着永磁体长度或高度的增加而增大,但增大幅度逐渐减小,且永磁体尺寸的变化不影响取得最大制动力时的速度。为取得最大制动效率,永磁体长高比应取 1.2。

(2) 气隙的减小可适当增大制动力,但法向力也随之迅速增大。法向力的产生会影响系统的稳定运行,因此上、下部气隙应相等。

(3) 导体板电导率增大,最大制动力不变,但其对应的速度减小。导体板厚度的减小会增大制动力及其对应的速度。

(4) 本文研究的两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动,克服了单边永磁涡流制动法向力,提升了制动性能,对需要大制动力及稳定运行要求高的轨道交通和机械装置,具有较高的实用价值。

【参考文献】

- [1] 唐永春,叶云岳. 永磁涡流制动的有限元分析与设计[J]. 微电机, 2006, 39(3): 34.
- [2] 朱粤. 无接触式永磁涡流高空防坠制动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [3] 韩亚鹏, 张敏, 马卫华, 等. 永磁涡流制动与电磁涡流制动热力学特性对比分析[J]. 机车电传动, 2020(3): 63.
- [4] JANG S M, LEE S H. Comparison of three types of permanent magnet linear eddy-current brakes according to magnetization pattern [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3004.
- [5] SAINJARGAL S, BYUN J K. Analysis and case study of permanent magnet arrays for eddy current brake systems with a new performance index [J]. Journal of Magnetism, 2013, 18(3): 276.
- [6] 王江波, 李耀华, 严陆光. 直线 Halbach 磁体用于磁浮列车涡流制动的研究[J]. 电气传动, 2010, 40(5): 8.
- [7] JANG S M, LEE S H, JEONG S S. Characteristic analysis of eddy-current brake system using the linear halbach array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(5): 2994.

(下转第 55 页)