

文章编号:1001-2486(2011)05-0069-04

## 电磁弹射过程中涡流引入阻力的分析\*

吴峻,赵宏涛,罗宏浩

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**永磁直线电机能够满足电磁弹射系统短距内高加速与快制动的应用要求,但是永磁直线电机的快速运动可能引入明显的涡流效应,在电机加速度段,涡流效应引入涡流阻力,削弱了系统的弹射能力,另一方面,在电机的制动段,涡流效应引入的阻力可以帮助系统实现快速制动。针对电磁弹射系统所采用的定子开槽、集中绕组、动磁式永磁直线电机,仿真分析了动子加速过程中铝支撑套引入的涡流阻力的特性,提出用定子铁心半闭槽结构和空心支撑套结构等措施降低这种涡流阻力,验证了措施的有效性;在制动段采用实心定子铁心结构来增强涡流制动力以实现快速制动,建立了涡流损耗的简化多项式,仿真结果表明采用涡流制动、反接制动混合制动的方式可以有效提升弹射平台的制动性能。

**关键词:**电磁弹射;永磁直线电机;涡流;加速;制动

**中图分类号:**TM351;TM359 **文献标识码:**A

## Analysis of Eddy Current Force in Electromagnetic Aircraft Launch System

WU Jun, ZHAO Hong-tao, LUO Hong-hao

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Permanent magnet linear motors are fit for the application of quick acceleration and braking within short distance in electromagnetic aircraft launch systems, but eddy current is likely to be induced by its quick moving. In the acceleration stage, the resistance force deduced by the eddy current can reduce the launch ability of system. On the other side, the force deduced by the eddy current can improve the braking ability in brake stage. This study analyzed the eddy current force in a kind of linear motor with open slot, concentrated winding, and moving permanent magnet. In the acceleration area, the eddy current resistance force deduced by the aluminum sleeve of the permanent magnet mover was analyzed. A method to weaken this resistance force by half open slot and hollow sleeve structure was proposed, and the feasibility was proven. In brake area, a solid stator structure was proposed to take the place of a laminated stator structure, which can increase the eddy current braking force and shorten the braking time. A simplified function has also been formulated for the eddy loss. Simulation results indicate that a hybrid braking technique combining eddy current braking and plug braking can improve the braking ability efficiently.

**Key words:** electromagnetic aircraft launch system; permanent magnet linear motor; eddy current; acceleration; braking

电磁弹射器是利用电磁力将飞机在短距离内推进至起飞速度的装备,与现有的蒸汽弹射器相比,它效率高、结构紧凑、维护方便、弹射全程可控,是弹射起飞的发展方向,电磁弹射器由直线电机、储能装置、电力变换装置和控制系统四部分组成,直线电机是最重要的组成部分<sup>[1-2]</sup>。

直线电机必须能够提供大推力,帮助飞机在较短的距离内达到起飞速度,然后迅速制动,以避免与弹射器的末端冲撞。永磁直线电机具有结构紧凑、功率密度高、输出推力大的特点,能够满足电磁弹射器的要求<sup>[3]</sup>,适用于无人机的弹射。但

是,与一般永磁电机一样,当永磁直线电机高速运行时,必须考虑涡流带来的影响<sup>[4]</sup>。目前针对永磁直线电机的研究主要集中于其推力波动的抑制<sup>[5-6]</sup>,而考虑其涡流效应的文章少见报道。

本文的电磁弹射系统采用动磁式直线永磁无刷直流电机(LPMBLDCM,如图1),定子铁心为开槽结构,电机采用短距集中绕组,永磁体在外支撑套保护下既作为LPMBLDCM的动子,也是弹射物体的搭载平台,该结构的电机制作简单、易于控制、成本较低,采用一定的设计策略后输出推力波

\* 收稿日期:2011-01-06

基金项目:“十一五”科技支撑计划项目(11504XF005)

作者简介:吴峻(1973—),男,副教授,博士。

动可以大幅度降低,能够满足无人机电磁弹射的要求<sup>[7]</sup>。表1为该电机的有关结构尺寸。

电机为动磁式结构,永磁体平台运行于高速状态时,若不采取一定措施,必然会引入较大的涡流阻力,利用涡流阻力可以帮助平台实现快速制动,但是涡流阻力对电机加速影响较大,讨论分析弹射过程中的涡流阻力的影响,并提出手段来实现加速段减小涡流效应、制动段增强涡流效应是本文的研究目的。

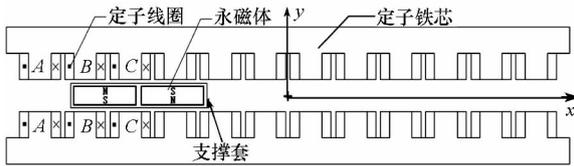


图1 永磁直线电机的二维模型  
Fig.1 2D model for the LPMBLDCM

表1 永磁直线电机的结构参数

Tab.1 Structure parameters for the LPMBLDCM

动子 尺寸	极距	60mm
	极宽	45mm
	极厚	10mm
定子 尺寸	齿距	40mm
	齿宽	20mm
	齿高	20mm
气隙		6mm
深度		0.5m

### 1 加速过程中涡流阻力的分析与消除

动磁式永磁直线电机中的磁体与电机定子相互作用产生大推力,同时,磁体与电机定子之间也存在着较大法向吸力,由于磁体也是无人机弹射的搭载平台,因此在永磁体外增加支撑套来保证动磁体具备足够刚度和强度<sup>[8]</sup>,为了使弹射器动子质量要尽可能小,选用铝材作为支撑套材料。由于支撑套处于运动变化的强磁场环境中,铝材具有良好的电导率,在气隙磁场的时、空谐波作用下,容易在支撑套上形成涡流,因此需要分析气隙磁场谐波在铝支撑套上生成的涡流阻力影响。

#### 1.1 铝支撑套引入涡流阻力的仿真分析

图2为电机静态时的磁通分布,由于电机是开槽结构,气隙磁通主要集中在定子齿面附近区域,电机高速运动时,磁通“跳跃”式前进,与平台速度不同步,因而会在铝支撑套内生成涡流,涡流对平台的影响表现为阻力,阻力*f*可以通过涡流损耗换算得到

$$f = -\frac{P_e}{v_x} \tag{1}$$

其中, $P_e$ 是铝板的涡流损耗, $v_x$ 是动子前进的速度。

$P_e$ 是电流密度*J*的函数,此处只考虑*J*的*z*向分量,可将 $P_e$ 用 $J_z$ 表示为<sup>[9]</sup>

$$P_e = \frac{h}{\sigma} \int_S J_z^2 ds \tag{2}$$

式中, $\sigma$ 是铝的电导率, $h$ 是铝套的深度,积分区域为整个铝套的*x-y*截面。

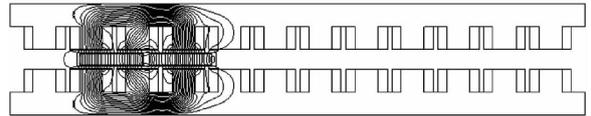


图2 开槽结构下的磁场分布  
Fig.2 LPMBLDCM flux distribution with open slot

利用有限元分析软件 Maxwell2D 仿真分析四个齿槽行程铝套内的  $J_z$ ,结合式(1)、式(2)计算得到引入铝支撑套后导致的涡流阻力如图3所示,仿真计算条件为:假设只存在空间谐波磁场,未施加定子电流,动子保持恒速  $v_x = 10\text{m/s}$ ,支撑套为实心铝板。

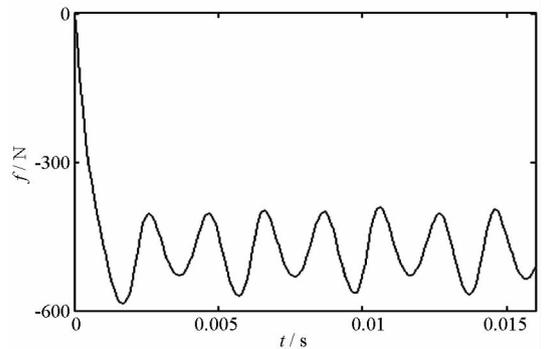


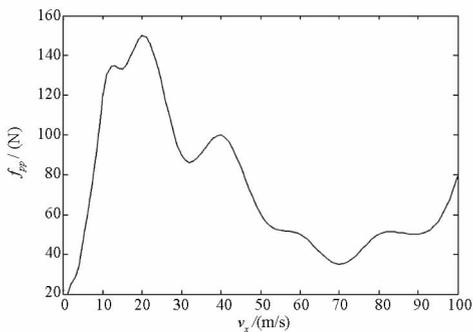
图3 涡流阻力*f*曲线  
Fig.3 Curve of the eddy current resistance force *f*

根据图3可知,涡流阻力随齿槽波动,并维持较大的直流偏量,因此可以利用波动峰峰值 $f_{pp}$ 和稳态均值 $f_{avg}$ 来衡量涡流阻力的基本情况,图4给出了 $f_{pp}$ 与 $f_{avg}$ 随 $v_x$ 变化的曲线,该结果是通过20个点插值得到的绝对值。从图中可以看到,不管是阻力均值还是阻力波动都在 $v_x = 20\text{m/s}$ 左右时达到最大,随后由于趋肤效应影响, $f_{pp}$ 和 $f_{avg}$ 均有所下降。 $f_{avg}$ 在很大的速度范围内保持较高值, $f_{pp}$ 则在低速时存在一定波动,易引起电机震荡。因此,铝支撑套引入的涡流阻力*f*对电机的平稳快速运行有较大影响,需要采取措施削弱这种影响。

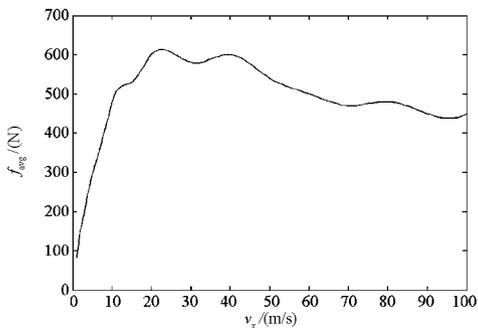
#### 1.2 铝支撑引入的涡流阻力消除方法

改变电机定子的开槽结构为半闭槽结构,使电机气隙磁场分布均匀,削弱电机运行过程中磁

通的跳动变化,削弱磁场变化在铝支撑套上形成



(a)  $f_{pp}$  随动子速度变化的情况

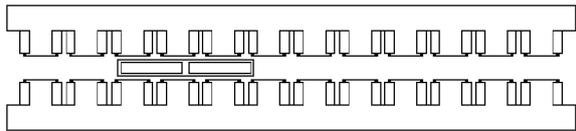


(b)  $f_{avg}$  随动子速度变化的情况

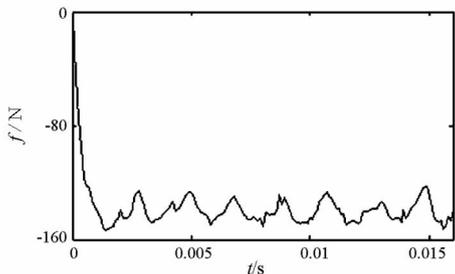
图 4  $f$  随动子速度变化的情况

Fig. 4 Curve of  $f$  v. s. velocity of the mover

的涡流强度,降低涡流阻力。图 5(a)是半闭槽结构示意图,图 5(b)是采用半闭槽结构后的涡流阻力  $f$  在  $v_x = 10\text{m/s}$  时 4 个齿槽行程内的变化曲线。仿真计算条件为:假设只存在空间谐波磁场,未施加定子电流,动子保持恒速  $v_x = 10\text{m/s}$ ,支撑套为实心铝板。与图 3 相比,半闭槽结构电机中表现出的涡流阻力大幅降低,但该措施对削弱涡流阻力还不够。



(a) 半闭槽结构



(b) 半闭槽结构涡流阻力

图 5 半闭槽结构及其导致的涡流阻力

Fig. 5 Half open slot stator structure and the resultant eddy current resistance force

另一方面,将铝支撑套做成空心支架结构显然也可以降低涡流效应。图 6 是采用空心支撑套后的涡流阻力  $f$  在  $v_x = 10\text{m/s}$  时 4 个齿槽行程内的变化曲线,可见涡流阻力有了大幅削弱。

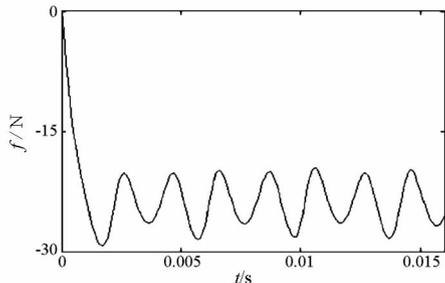


图 6 采用空心支撑套后的涡流阻力  
Fig. 6 Eddy current resistance force with hollow sleeve structure

铝支撑套做成空心支架结构的设计措施在实验样机上得到了验证。对比验证实验设计如下:定子绕组逆变器前端的直流母线施加 130V 的电压,对比铝支撑套空心的永磁体动子和铝支撑套实心的永磁体动子所能达到的末速度,前者比后者提高了一倍多。实验结果说明,铝支撑套中的涡流是真实存在的,且其对推力的影响十分可观,通过将铝支撑套做成空心支架结构可以削弱这种涡流阻力。

## 2 制动过程中涡流制动力的分析与仿真

电磁弹射器的弹射平台在与飞机分离后必须迅速制动,可以通过将电机制动段铁心改为非叠片的实心结构,增加定子铁心的涡流效应,提升涡流制动力。

如图 7 所示,在满足相应条件的前提下<sup>[10]</sup>,处于行波磁场中的金属板产生的涡流损耗表示为

$$P_e = \frac{qp^3}{2\sqrt{2}\sigma\mu_r} (K_z e^{-qb})^2 \quad (3)$$

式中,  $P_e$  是金属板的涡流损耗,  $p$  定义为  $\tau/\delta$ ,  $q$  定义为  $\pi/\tau$ ,  $\tau$  是行波磁场等效极距,  $\delta$  是金属板集肤深度,  $\sigma$  是金属板的电导率,  $\mu_r$  是金属板的相对磁导率,  $K_z$  是行波磁场等效电流片的线密度,  $b$  是电流片到金属板的距离。

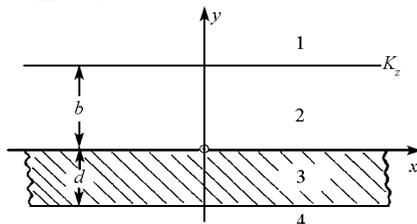


图 7 磁场中的厚金属板

Fig. 7 Thick metal board in magnetic field

无人机弹射起飞速度为 40m/s,可满足文献 [10]及式(3)中所述条件,因而可用式(3)和式(1)计算涡流损耗及涡流制动力。因为电机定子铁心并非面积无限大的金属板,含有纵横交错的齿槽,直接计算的难度非常大,所以需要式(3)简化。

由于定子铁心集肤深度为

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (4)$$

其中,  $\omega$  为运动的永磁体动子的等效电流源频率,在此即磁极变化频率,  $\mu$  是金属板的磁导率。

因为铁心的磁导率、电导率以及动子极距为常数,将式(4)带入式(3)可知涡流损耗  $P_e$  仅仅为  $\omega$  的 3/2 次方函数,而  $\omega$  与动子速度  $v$  成正比,是  $v$  的 3/2 次方函数,因此可以建立涡流损耗的近似方程:

$$P_e^2 = a_3 v^3 + a_2 v^2 + a_1 v^1 + a_0 \quad (5)$$

与式(3)相比,式(5)大大简化,只需通过 4 组有限元分析结果就可得出多项式的 4 个系数,确定制动段的涡流损耗方程,以此获得涡流制动力的大小。表 2 是四组不同速度设定下有限元的计算结果。

表 2 用于计算多项式系数的数据

Tab. 2 Data for polynomial fit

动子速度(m/s)	0	2	5	10
涡流损耗(W)	0	1800	9000	26000

根据表 2 的数据进行曲线拟合,分别得到:  $a_3 = 0.5405e6, a_2 = 0.8689e6, a_1 = -2.3685e6, a_0 = 0$ 。据此计算任意速度下的涡流损耗值,并通过式(1)求得相应的涡流制动力。图 8 为有限元计算结果与方程计算结果的对比,两者结果比较吻合,验证了简化方程的准确性。由图 8 可知,当动子

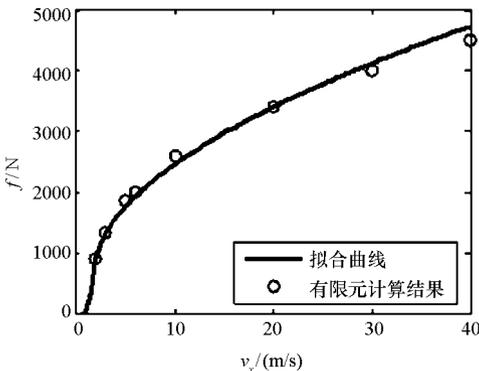


图 8 简化方程计算结果与有限元计算结果对比  
Fig. 8 Simplified function results v. s. finite element analysis results

速度大于 3m/s 时,通过非叠片实心铁心的涡流将会产生较大的制动力。当电机速度低于 3m/s 时,涡流制动力迅速下降,此时需要采取其它的辅助制动方式。

图 9 为利用式(5)和 SIMULINK 仿真工具对涡流制动、反接制动以及两者结合的混合制动方式下电机动子的制动曲线进行了仿真计算的结果。图 9 表明,高速下涡流制动的效果明显优于反接制动方式,并且在不需要增加制动电流的情况下,采用涡流反接混合制动方式可以大大缩短动子制动距离。

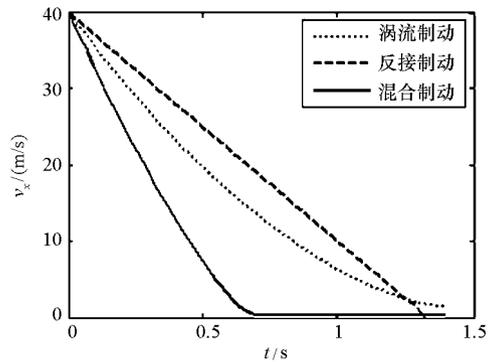


图 9 三种制动方式的对比  
Fig. 9 Contrast among eddy current braking, plug braking and hybrid braking

### 3 结论

(1)开槽结构、集中绕组、动磁式永磁直线电机结构简单、制造成本低、容易维护,但由于气隙磁场分布不均匀,运行时磁场与动子运动不同步,导致在动磁体的铝支撑套内形成涡流,在电机加速过程中形成较大的涡流阻力。涡流阻力随齿槽波动和速度变化,通过设计定子铁心半闭槽结构和空心铝支撑架结构可以有效削弱这类涡流阻力。

(2)电磁弹射器需要对动子平台迅速实施制动,在制动段利用非叠片实心定子铁心可以增强涡流制动力来实现快速制动,通过对涡流制动力的分析,建立了涡流制动力多项式简化模型,并且仿真结果表明,涡流制动在高速制动段明显优于反接制动,采用涡流制动、反接制动混合的制动方式可以大大提升系统的制动性能。

(下转第 96 页)

复杂关联关系及生成相应的直观专题结构也是需要进一步研究的主要方面。

## 参考文献:

- [1] Allan J, Carbonell J. Topic Detection and Tracking Pilot Study: Final Report [C]//Proceedings of DRAPA Broadcast News Transcription and Understanding Workshop, San Francisco, CA, 1998; 194-218.
- [2] Nallapati R, Feng A, Peng F, et al. Event Threading within News Topic [C]//Proceedings of the 13th ACM international conference on Information and Knowledge Management, Washington, USA, 2004; 446-453.
- [3] Ide I, Mo H, Katayama N, et al. Threading News Video Topics [C]//Proceedings of the 5th ACM SIGMM International Workshop on Multimedia Information Retrieval, California, USA, 2003; 239-246.
- [4] Ide I, Mo H, Katayama N, et al. Topic Threading for Structuring a Large-scale News Video Archive [C]//Image and Video Retrieval: Third International Conference, Dublin, Ireland, 2004; 123-131.
- [5] Katayama N, Mo H, Ide I, et al. Mining Large-scale Broadcast Video Archives Towards Inter-video Structuring [C]//Pacific Rim Conf. Multimedia. Tokyo, Japan, 2004; 489-496.
- [6] Ide I, Mo H, Katayama N, et al. Exploiting Topic Thread Structures in a News Video Archive for the Semi-automatic Generation of Video Summaries [C]//2006 IEEE International

- Conference on Multimedia and Expo, Toronto, Canada. 2006; 1473-1476.
- [7] Ide I, Kinoshita T, Takahashi T. MediaWalker: A Video Archive Explorer Based on Time-series Semantic Structure [C]//Proceeding of the 15th International Conference. Multimedia. Augsburg, Germany, 2007; 162-163.
- [8] 文军, 吴玲达, 曾璞, 等. 新闻视频数据库基于故事单元的“多线程”管理技术研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 116-121.
- [9] Zhang D Q, Chang S F. Detecting Image Near-duplicate by Stochastic Attributed Relational Graph Matching with Learning [C]//Proc. ACM Multimedia Conf. 2004; 877-884.
- [10] Ke Y, Suktharankar R, Huston L. Efficient near-duplicate Detection and Sub-image retrieval [C]//Proc. ACM Multimedia Conf. 2004; 869-876.
- [11] Ngo C W, Zhao W L, Jiang Y G. Fast Tracking of Near-Duplicate Keyframes in Broadcast Domain with Transitivity Propagation [C]//Proc. ACM Conf. Multimedia, 2006; 845-854.
- [12] 文军, 吴玲达, 曾璞, 等. 新闻视频中基于“场景词汇”的故事单元相似度分析[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(6): 121-125.
- [13] Zhang Y, Callan J, Minka T. Novelty and Redundancy Detection in Adaptive Filtering [C]//Proc. ACM SIGIR, 2002; 81-88.

(上接第72页)

## 参考文献:

- [1] Bushway R R. Electromagnetic Aircraft Launch System Development Considerations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 52-54.
- [2] Doyle M R, Samuel D J, Conway T, et al. Electromagnetic Aircraft Launch System-EMALS [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 528-533.
- [3] Patterson D, Monti A, et al. Design and Simulation of a Permanent-Magnet Electromagnetic Aircraft Launcher [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 566-575.
- [4] Zhu Z Q, Ng K, Howe D. Design and Analysis of High-Speed Brushless Permanent Magnet Motors [C]//EMD'97, UK, 1997; 381-385.
- [5] 王兴华, 励庆孚, 石山. 永磁电机磁阻转矩的抑制方法[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(6): 576-579.

- [6] Bianchi N, Bolognani S, Cappello A D F, Back E M F. Improvement and Force Ripple Reduction in PM Linear Motor Drives [C]//35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004; 3372-3377.
- [7] 罗宏浩, 吴峻, 常文森. 新型电磁弹射器的动态性能仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2285-2288.
- [8] 刘磊. 高速无刷永磁电机的磁场分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [9] 朱仙福, 张秀荣. 高速列车轨道涡流制动的制动力分析与计算[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版), 1996, 17(4): 1-8.
- [10] Stoll R, Hammond P. Calculation of the Magnetic Field of Rotating Machines Part 4: Approximate Determination of the Field and the Losses Associated with Eddy Currents in Conducting Surfaces [J]. Proc. IEE. 1965, 112(11): 2083-2094.