

基于交错式线圈布局的 连续脉冲磁行波电磁发射基础研究

郭芳, 唐跃进, 任丽, 李敬东

(华中科技大学超导电力科学技术研究中心, 湖北省 武汉市 430074)

Basic Research in Continuous Pulsed Magnetic Traveling Wave Electromagnetic Launch Based on Interlaced Coil Layout

GUO Fang, TANG Yuejin, REN Li, LI Jingdong

(R&D Center of Applied Superconductivity, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The each stage power excitation of multi-stage reconnection gun must be synchronized with the position of projectile. When the speed is low, the position of projectile changes slowly. It leads to the interval of two adjoining power excitation longer and not easy to quickly startup. In view of this situation, this paper presented a continuous pulsed magnetic traveling wave launch based on interlaced coil layout. The continuous pulsed magnetic traveling wave from temporal and spatial could increase the force time of projectile and shorten the interval of excitation. Then the speed and efficiency would be increased. The effects of launch were simulated in this article, and the vertical force generated by the layout was dealt with. Simulation shows that compared with the reconnection gun, continuous pulsed magnetic traveling propulsion can provide a higher launch speed and launch efficiency, and the time of launch is shortened.

KEY WORDS: electromagnetic launch; continuous pulsed magnetic traveling wave; reconnection gun; interlaced coil layout

摘要: 多级重接炮各级电源的激励需与发射体位置同步。在低速下, 发射体位置变化较慢, 导致相邻两级电源激励间隔时间较长, 难以快速启动。针对该情况, 提出一种基于交错式线圈布局的连续脉冲磁行波电磁发射方法, 利用在时间和空间上连续的脉冲磁行波, 增加发射体的受力时间, 并且缩短各级激励间隔时间, 从而提高发射速度和发射效率。通过仿真, 计算了该种发射方式的发射效果, 探讨了由于驱动线圈交错布局产生的垂直力的处理方法。仿真显示, 与重接炮相比, 基于交错式线圈布局的连续脉冲磁行波电磁发射能提供更高的发射速度和发射效率, 并且缩短了发射用时。

关键词: 电磁发射; 连续脉冲磁行波; 重接炮; 交错式线圈

0 引言

电磁发射是指利用电磁能量推进物体的一种发射技术^[1-2]。因结构和工作原理不同, 电磁发射装置可分为轨道式、线圈式和重接式3种形式^[3-4]。线圈式电磁发射器(线圈炮)早期称为“同轴发射器”或“行波加速器”等^[5-6]。重接式电磁发射器(重接炮)是一种特殊的感应型的线圈式电磁发射器, 综合了线圈炮能发射大质量弹丸的特点以及轨道炮超高速发射弹丸的优势, 同时克服了轨道炮产生的材料烧蚀和磨损的缺点^[7-8], 具有较好的应用前景。为提高发射速度, 重接炮应由多级驱动线圈组成, 常用电容器组作为电源激励各级线圈, 以产生磁行波。各级电源的激励与发射体的位置同步, 在磁行波激励时刻提供驱动力^[9-10]。低速下, 发射体的位置变化较慢, 相邻两级电源激励间隔时间较长, 产生的磁行波是不连续的, 并且在激励电流的下降阶段受到阻力, 难以快速启动。针对这种情况, 本文提出一种基于交错式线圈布局的连续脉冲磁行波电磁发射方法, 采用位置交错的驱动线圈产生在时间和空间上连续的脉冲磁行波, 使发射体一直跟随磁场行波的运动, 增加受力时间, 并且缩短相邻两级电源激励的时间间隔, 达到快速将发射体加速至高速的目的。

1 连续脉冲磁行波推进

脉冲磁行波推进实际上是多个驱动线圈作用的综合效果, 各线圈对发射体感应板(板状实心导体)的电磁作用相互影响, 造成了驱动力的增强或减

弱。因此，对于脉冲磁行波推进的发射效果，可以从分析单个线圈对感应板的推进作用着手。图1是一个驱动线圈的电磁发射简易模型。其中， h 为驱动线圈的高度； a_1 、 a_2 分别为内外半径。设定感应板的长度略长于驱动线圈的长度，其运动方向为 x 轴正方向。图1所示结构与主动式电磁装甲的拦截弹发射模型^[11-12]相似，两者的区别在于：电磁装甲中发射体与驱动线圈同轴放置，发射体主要受到沿驱动线圈轴向(z 方向)的作用力，沿 z 轴运动；本文所讨论的电磁发射，主要考虑发射体沿驱动线圈径向(x 方向)的运动情况，在运动过程中，发射体与驱动线圈的轴线距离是不断变化的。

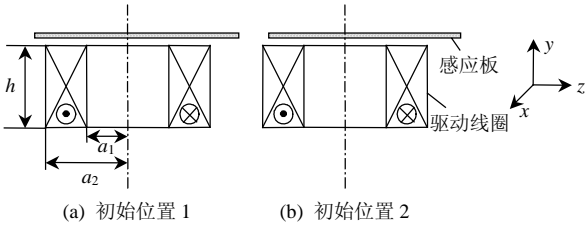


图1 单个驱动线圈的电磁发射简易模型
Fig. 1 A simple electromagnetic launch model of single driven coil

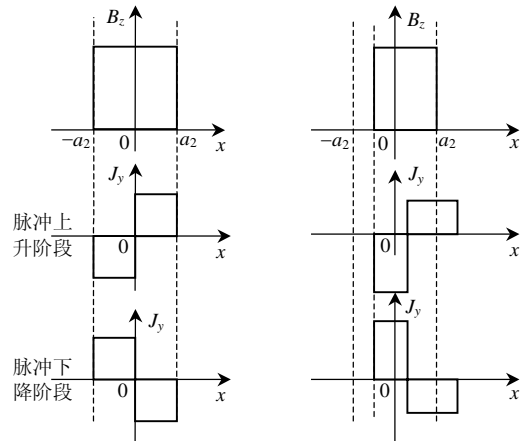
若感应板的发射初始位置如图1(a)所示，感应板的尾部处于线圈1外部。当线圈1中通入方波电流激励时，在电流上升阶段，感应板内的磁通增加，感应板所产生的感应电流试图阻止磁通增加；在电流下降阶段，感应板内的磁通减少，感应电压反向。因此，整个过程中感应板内磁场 z 方向分量(B_z)和涡流 Y 方向分量(J_y)的分布可定性的表示成图2(a)所示，其中 x 轴的0点取在线圈1的中心。可见，感应板内的磁场沿线圈1的中心呈偶对称分布，而感应电流沿线圈1的中心呈奇对称分布。根据左手定可知，感应板受到的电磁推力为

$$F_x = -\int_s J_y(x)B_z(x)ds \quad (1)$$

因此，当感应板的发射初始位置如图1(a)所示时，感应板受到的沿 x 轴的电磁推力为0。

若感应板的发射初始位置如图1(b)所示，感应板的尾部处于线圈1内部。当线圈1中通入方波电流激励时，感应板内的涡流分布将向右移动，并且靠近端部的区域涡流较大，其定性分布可表示成图2(b)所示。由式(1)可知，在激励电流的脉冲上升阶段， $F_x > 0$ ；在激励电流的脉冲下降阶段， $F_x < 0$ 。

上述讨论说明，对于一个驱动线圈的电磁发射结构，感应板的初始位置对发射效果影响很大，为了使感应板受到较强的推力，应在感应板处于最佳



(a) 感应板尾部处于线圈外部 (b) 感应板尾部处于线圈内部

图2 单个线圈激励时，感应板内的涡流和磁场
Fig. 2 Magnetic field and eddy current distribution in the inductive board when one coil drive

发射位置^[13-14]时触发电源激励。

在低速下，重接炮的感应板位置变化较慢，相邻两级电源激励间隔时间较长，产生的磁行波不连续，各级之间相互影响较小，近似于多个单线圈驱动简单累加的结果。因此，重接炮的每级电源激励需与感应板的位置同步，在激励时刻提供推力，并且在激励电流的下降沿，提供阻力。连续磁行波发射正是要利用各驱动线圈的相互影响，消除电源激励与感应板位置同步的要求，同时消除激励电流下降沿提供的阻力，从而提高发射速度和发射效率。

图3所示是交错式线圈布局的基本结构，设定 x 轴正方向为发射体的运动方向。当感应板处于线圈1的最佳发射位置时，线圈1通入激励电流。间隔 t_1 时间，当线圈1中的激励电流还在持续时，线圈2通入激励电流，如图4所示，其中 i_1 表示线圈1中的激励电流， i_2 表示线圈2中的激励电流。整个过程中，若忽略感应板在短时间内的位移，感应板内的磁场和涡流分布可定性表示成图5所示。

在 i_1 的上升阶段，感应板的尾部处于线圈1的内部， $F_x > 0$ 。在 i_2 的上升阶段，线圈1和线圈2同

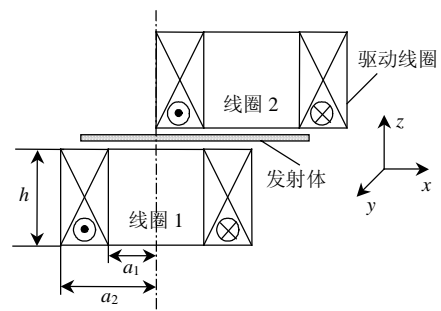


图3 交错式线圈布局
Fig. 3 Layout structure of interlaced coil

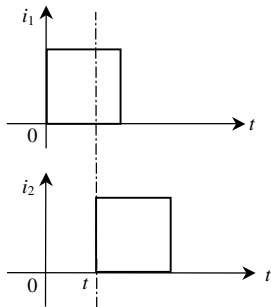


图 4 连续磁行波推进线圈激励时刻

Fig. 4 Excitation time of continuous pulsed magnetic traveling wave propulsion

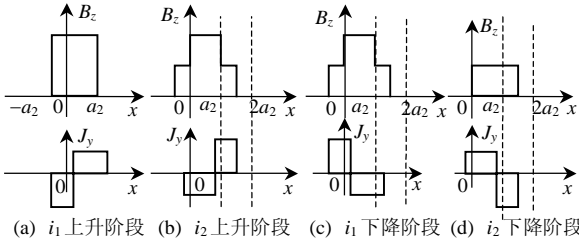


图 5 连续磁行波推进感应板内的磁场和涡流分布

Fig. 5 Magnetic field and eddy current in the inductive board of continuous pulsed magnetic traveling wave launch

时提供磁场，在线圈 1 和线圈 2 的重叠区域，磁场增强，如图 5(b)所示，由式(1)可知 $F_x > 0$ 。在 i_1 的下降阶段，感应板内的涡流反向，同时在线圈 1 和线圈 2 的重叠区域，磁场增强，导致 $F_x > 0$ 。最后在 i_2 的下降阶段，由于感应板的前端在线圈 2 的内部，与图 2(a)所示相对位置正好相反，而且感应板内的涡流方向也相反，因此， $F_x > 0$ 。可见，在连续磁行波发射的全过程中，犹如感应板的位置随着磁场一起运动，每次激励都提供推力，激励时刻不需与感应板的位置同步，缩减了各级激励直接的间隔时间，并且使各激励在脉冲下降阶段，也提供推力，充分利用了激励电流的各个阶段，提高效率。

2 仿真分析

2.1 连续脉冲磁行波驱动的发射效果

图 6 所示是多个线圈驱动连续脉冲磁行波推进线圈结构。感应板的长度覆盖 6 个线圈的区域，当线圈 1~6 通入激励电流时，感应板都受到推力。在 Ansoft 软件中依图 6 建立有限元仿真模型，采用 6 个线圈依次通电产生脉冲磁行波。驱动线圈的结构参数根据实验室现有的实验模型线圈设定。线圈和感应板的具体结构参数如表 1 所示，发射体初始速度为 0，发射体重量为 0.3kg。各线圈的驱动电流 I 与通电时间 t 的关系如图 7 所示，感应板受到的推力 F_x 随时间 t 的变化如图 8 所示，其中 $I_i(i=1\sim6)$ 表

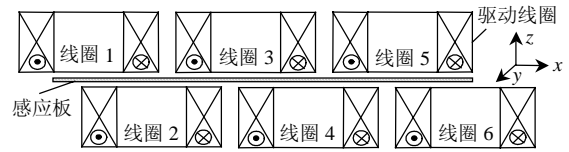


图 6 多线圈驱动交错式线圈布局

Fig. 6 Multi-coil drive with interlaced coil layout

表 1 驱动线圈与感应板结构参数

Tab. 1 Structure parameters of coil and inductive board

线圈		感应板	
类型	矩形线圈	类型	矩形实心平板
材料	铜	材料	铝
长/mm	40	长/mm	140
宽/mm	50	宽/mm	40
高/mm	20	厚/mm	2
匝数	20	—	—
导线截面/mm ²	8	—	—

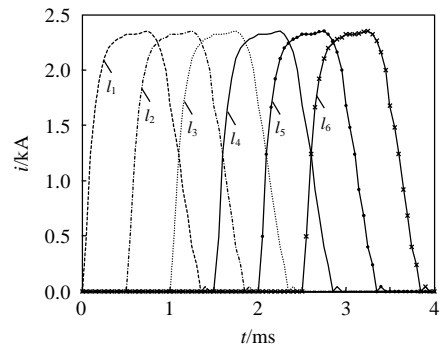


图 7 各线圈通入电流的时刻及波形

Fig. 7 Excitation time and waveform of coil current

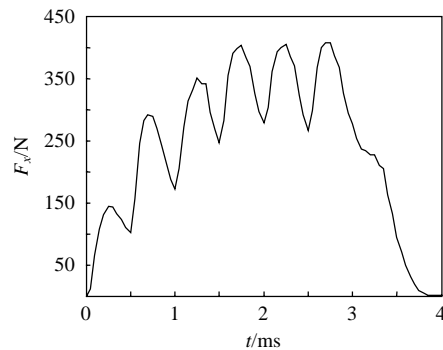


图 8 连续脉冲磁行波推进感应板受到的推力变化

Fig. 8 Propulsion on inductive board of continuous pulsed magnetic traveling wave launch

示线圈 i 的激励电流。 $I_{i-2}(i=3\sim6)$ 的下降阶段与 I_i 的上升阶段重合，因此，感应板受到的推力有 7 次上升，前 6 次对应 6 个线圈的激励时刻，最后一次对应 I_6 的下降阶段。在 4ms 内，感应板受到持续的推力，一直加速运动。4ms 后，感应板的速度 v 为 3.18m/s，90ms 后飞出轨道。

整个过程中，感应板上的涡流损耗 W_P 为 45.8861J，平均加速度为

$$a = 3.18 / 0.09(\text{m/s}^2) = 35.3(\text{m/s}^2)$$

驱动线圈上的电阻损耗为

$$W_R = \sum \int I_i^2 R_i dt$$

式中 $R_i(i=1\sim6)$ 分别为各线圈的电阻, 可由线圈结构参数算出。可得线圈的电阻损耗 W_R 为 215.8557J, 发射装置的效率:

$$\eta = \frac{mv^2 / 2}{mv^2 / 2 + W_p + W_R} = 0.58\%$$

2.2 垂直力的处理

连续脉冲磁行波推进其原理实质上是直线感应电机推进。与单边直线感应电机相同, 由于驱动线圈的布局不对称, 发射体即转子既受到沿运动方向(x 方向)的推力, 还受到垂直于运动方向(z 方向)的力, 在直线感应电机中通常称为垂直力^[15]。

垂直力的存在, 可能造成发射体在飞行过程中不能保持非接触的状态, 与驱动线圈碰撞而失去运动。为防止上述情况的发生, 结合本实验室对高温超导磁悬浮电磁发射^[16]的相关研究, 可制作成如图 9(a)所示的双驱动线圈高温超导磁悬浮电磁发射装置, 图 9(b)和图 9(c)分别给出了左右驱动线圈的布局情况。当左右两边的驱动线圈同时通入图 7 所示的激励电流时, 在 0.5ms 时刻, 左右两边感应板上的磁场分布如图 10 所示。其中, x 轴的 0 点取在感应板的端部, y 轴的 0 点取在驱动线圈的中心, z

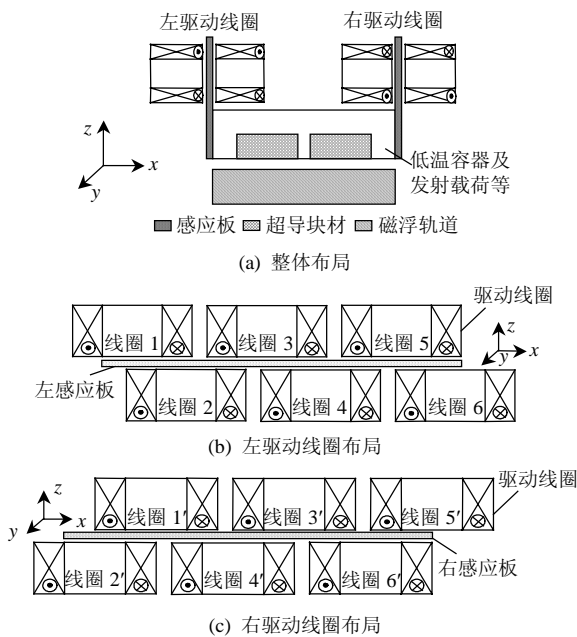
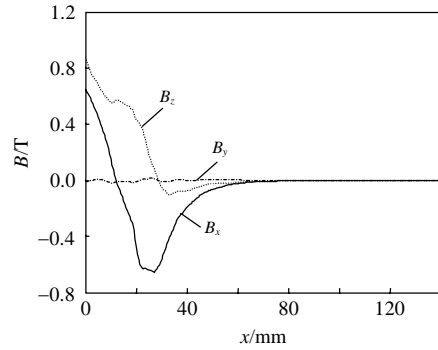
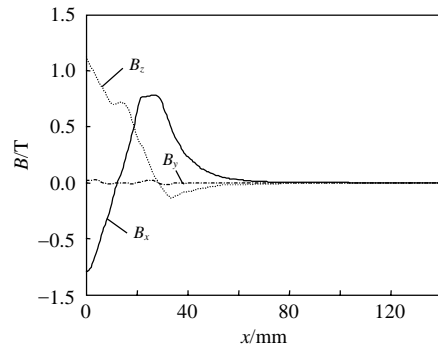


图 9 高温超导磁悬浮连续脉冲磁行波电磁发射装置布局

Fig. 9 Layout of high-temperature superconducting magnetic levitation continuous pulsed magnetic traveling wave launcher



(a) 左感应板



(b) 右感应板

图 10 感应板上的磁场分布

Fig. 10 Magnetic field distribution on inductive board

轴的 0 点取在感应板的外表面(靠近线圈 1 或线圈 1' 这侧的表面)。从图 10 可以看出, 在左右两块感应板上, 磁场的 z 方向分量大小相等、方向相同, 而磁场的 x 方向分量大小相等、方向相反。因此, 采用双边驱动线圈的结构, 可以使发射体受到的推力变为单边驱动线圈推力的 2 倍, 并且垂直力的合力为 0, 图 11 所示是发射体受力的仿真结果。

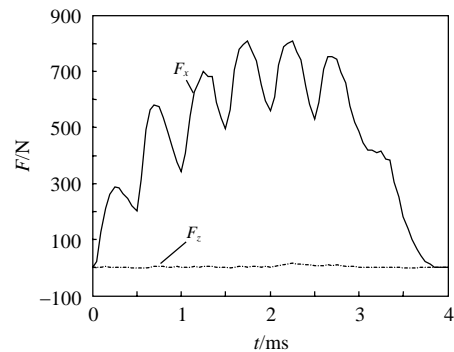


图 11 发射体受力

Fig. 11 Force on projectile

另外由于高温超导体与永磁轨道的自稳定悬浮^[17-18]特性, 当发射体受到外界干扰, 或双边驱动不完全对称造成发射体在 z 方向受力不为 0 时, 发射体依然能在磁浮轨道的导向力作用下沿着轨道方向运动, 不会出现偏移轨道而与驱动线圈发生碰撞的现象。

3 与重接炮的比较

由于连续脉冲磁行波推进的发射体其感应板需覆盖多个线圈的区域，而重接炮中，发射体的感应板只需覆盖一个线圈的区域。对于感应板长度可以调节的发射体，可以比较相同驱动线圈数量下，同样电流幅值及电流波形驱动下，连续脉冲磁行波推进和重接炮的发射效果。为简化分析，以单边驱动线圈为例进行讨论。

根据表 1 所示的线圈尺寸，在有限元软件 Ansoft 中建立三级重接炮的仿真模型，可以得到感应板受到的推力 F_x 随时间 t 的变化如图 12 所示。每级驱动感应板需运动的位移为 45 mm，发射体重量为 0.3 kg。经过 84.5 ms，三级驱动后发射体被加速到 2.42 m/s，116.2 ms 后飞出轨道。整个过程中装置的发射效率为 0.36%。表 2 所示是两种发射方式的发射效果比较。可见，连续磁行波发射较重接炮发射有更高的发射速度和发射效率，并且还缩短了发射用时。

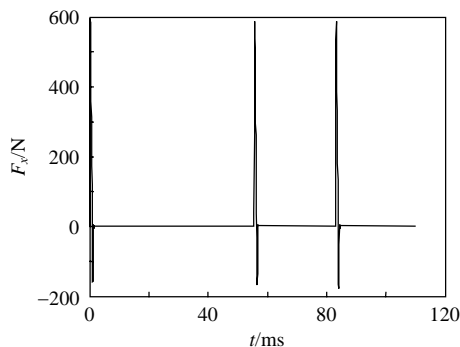


图 12 三级重接炮发射全过程中发射体受到的推力变化
Fig. 12 Variation of the force on inductive board during the whole process of three-stage reconnection gun launch

表 2 发射效果比较

Tab. 2 Comparison of two types launch

参数	连续脉冲磁行波	重接炮
线圈数量	6	6
出口速度/(m/s)	3.18	2.42
发射用时/ms	90	116.2
效率/%	0.58	0.36

比较图 8 和 12 可以发现，重接炮中，感应板受到的瞬时推力较大，约为交错式线圈结构中第 1 个线圈单独驱动时的 4 倍。这是由于重接炮采用上下 2 个线圈同时驱动，产生的磁场和涡流均是后者的 2 倍。但是整个发射过程中，感应板受到推力的时间较短，仅在每级激励的脉冲上升阶段受到推力，在脉冲下降阶段受到阻力。感应板在大部分时

间和距离上都处于匀速运动状态，驱动线圈处于等待激励状态。而基于交错式线圈结构的连续脉冲磁行波推进缩短了各线圈激励的间隔时间，使感应板在较长一段时间内受到持续的受力，并且充分利用激励电流的每个阶段，使激励电流的下降阶段仍然提供推力，提高了发射速度和发射效率，并且缩短了发射时间。

4 结论

重接炮虽然能提供更大的瞬时推力，但感应板受力时间较短，级间等待较长，并且先加速后减速，发射过程启动较慢。基于交错式线圈布局的连续脉冲磁行波推进改变了磁行波的形态，产生了在时间和空间上连续的脉冲磁行波，使各线圈的激励时刻不必与发射体感应板的位置同步，缩短了激励间隔时间，同时增加了发射体的受力时间，并且充分利用激励电流的各个脉冲阶段。因此，提高了发射速度、发射加速度以及发射效率。另外，还可增加连续磁行波发射的级数，采用多重连续磁行波推进，进一步提高发射速度。对于恒转差频率控制方法^[19-20]在降低垂直力方面的应用、激励电流的脉冲衔接、多级发射的位置检测及控制，特别是高速下的线圈设计及控制办法等，还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 赵纯, 邹积岩, 何俊佳, 等. 多级重接炮的数值仿真与优化物理设计[J]. 兵工学报, 2008, 29(6): 645-650.
Zhao Cun, Zou Jiyan, He Junjia, et al. Numerical simulation and optimized physical design of a multi-stage reconnection gun[J]. Acta Armamentaria, 2008, 29(6): 645-650.
- [2] 马大为. 弹道学研究内容特点和趋势的评述[J]. 兵工学报, 1993, 14(1): 58-65.
Ma Dawei. A review of research programs, characteristics and trends on modern ballistics[J]. Acta Armamentaria, 1993, 14(1): 58-65.
- [3] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 10-11.
Wang Yin, Xiao Feng. Principle of electric gun[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 10-11.
- [4] Weldon W F. A taxonomy of electromagnetic launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(1): 591-592.
- [5] 王莹. 行波电磁发射器[J]. 电工电能新技术, 1988(2): 28-36.
Wang Yin. Travelling wave electromagnetic launcher[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1988(2): 28-36.
- [6] Elliott D G. Traveling-wave synchronous coil gun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 647-649.
- [7] 李立毅, 程树康, 刘宝廷. 直线电磁发射技术的发展现状及前景[J]. 微电机, 1999, 32(2): 26-30.
Li Liyi, Cheng Shukang, Liu Baoyan. Status and foreground of development of technique of linear electromagnetic launch [J]. Micromotors, 1999, 32(2): 26-30.

- [8] 孟金友. 电磁炮的发展现状及其应用前景[J]. 现代兵器, 1995(5): 12-14.
Meng Jinyou. The development present status and application prospect of electromagnetic gun[J]. Modern Weaponry, 1995(5): 12-14.
- [9] Cowan M, Widner M M, Cnare E C, et al. Exploratory development of the reconnection launcher 1986-90[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(1): 563-567.
- [10] 李小鹏, 李立毅, 程树康, 等. 重接式电磁发射技术的现状及应用前景[J]. 微电机, 2002, 35(4): 39-41.
Li Xiaopeng, Li Liyi, Cheng Shukang, et al. Status and foreground of technique of reconnection electromagnetic launch [J]. Micromotors, 2002, 35(4): 39-41.
- [11] 吴战胜. 对电磁发射拦截系统发射线圈和拦截弹的研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2007.
Wu Zhansheng. Research of coils and interception projectile for electromagnetic launch interceptor system[D]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering Institute, 2007.
- [12] 王成学, 曹延杰, 邹本贵. 主动电磁装甲拦截弹发射过程研究[J]. 光电与控制, 2009, 16(8): 93-96.
Wang Chengxue, Cao Yanjie, Zou Bengui. Research on launching process of interception projectile in active electromagnetic armor [J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16(8): 93-96.
- [13] 赵纯. 三级重接式电磁发射系统的仿真与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
Zhao Chun. Simulation and experimental researches on the three-stage reconnection electromagnetic launch system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [14] Guo Fang, Tang Yuejin, Chen Nan, et al. Pulse magnetic traveling wave propulsion system simulation analysis for electromagnetic launcher[C]//2008 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 2008.
- [15] 龙暇令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 8-9.
Long Xialing. The theory and electromagnetic design method of linear induction motor[M]. Beijing: Science Press, 2006: 8-9.
- [16] Guo F, Tang Y, Li J, et al. A novel permanent magnetic rail for HTS levitation propulsion system[J]. Physica C: Superconductivity, 2009, 469(15-20): 1825-1828.
- [17] Wang X R, Song H H, Ren Z Y, et al. Levitation force and guidance force of YBaCuO bulk in applied field[J]. Physica C, 2003(386): 536-539.
- [18] Wang Jiasu, Wang Suyu, Zeng Youwen, et al. The first man-loading high temperature superconducting Maglev test vehicle in the world [J]. Physica C, 2002(378-381): 809-814.
- [19] 连级三. 磁浮列车原理及技术特征[J]. 电力机车技术, 2001, 24(3): 23-26.
Jisan Lian. Principle and technology characteristic of maglev vehicle[J]. Technology for Electric Locomotives, 2001, 24(3): 23-26.
- [20] 刘少克. 磁浮列车用感应直线电机控制方法研究[C]//全国直线电机学术年会, 哈尔滨, 2006.
Shaoke Liu. Research of control method of linear motor used by maglev train[C]//Academic Annual National Linear Motor, Harbin, 2006.



郭芳

收稿日期: 2010-07-12.

作者简介:

郭芳(1983), 女, 博士研究生, 主要从事高温超导磁悬浮电磁发射方面的研究, guofang19830119@163.com。

(责任编辑 王剑乔)