

管道列车超高速驱动技术研究

贺国琪

(中铁第一勘察设计院集团有限公司电化处,陕西 西安 710043)

摘要:以板状重接式电磁驱动为研究对象,通过多级重接式电磁驱动运动方程的推导和多单元瞬态场有限元模型的仿真,提出一种可用于管道列车超高速运行的驱动方案,通过模拟仿真,讨论了不同电磁驱动结构对驱动力等重要参数的影响,并分析了多级系统的动态特性。结果表明:带铁质材料空气隙小的模型效果较优,带铁环的结构减小了线圈间的磁场耦合;低速时受反力影响较大,反力效应与驱动板内涡流方向有关;高速时要达到最佳效果,需要考虑线圈最大电感梯度位置、驱动板速度与电流上升时间三者的关系;管道列车可应用多级重接式电磁驱动原理,采用多单元并行触发,多级连续驱动的方案实现连续加速至超高速的目标。

关键词:管道列车;重接式电磁驱动;运动方程;瞬态场仿真;超高速

中图分类号:U273.94

文献标志码:A

Research on Superspeed Drive Technology for Pipeline Train

HE Guo-qi

(Electrical Design Office, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The plate reconnection drive is taken as the research object to derive the motion equation of multi-stage reconnection electromagnetic drive and simulate the finite element model of multi-unit transient field, so as to propose a superspeed driving scheme of pipeline train. The influence of different electromagnetic structures on the important parameters such as force and dynamic characteristics of the system is discussed and analyzed by simulation. The results show that the performance of the model with iron material and small air gap is better. The structure with iron ring can reduce the magnetic field coupling among coils. The opposite force of projectile is larger at low speed, and the effect of opposite force is related to the change of eddy current in projectile. In order to achieve the best effect at high speed, the relation among the maximum coil inductance gradient position, the speed of projectile and the rise time of current need to be considered. The pipeline train can continuously accelerate to the superspeed by the scheme of multi-unit parallel trigger and multi-stage continuous drive according to the principle of multi-stage reconnection electromagnetic drive.

Key words: pipeline train; reconnection electromagnetic drive; motion equation; transient field simulation; superspeed

目前,最具代表性的地面高速交通工具具有高速列车和磁浮列车,当时速超过 400 km/h 时,常压下

空气阻力将占总阻力的 80% 以上,进入不经济运行速度段,且存在严重的气动噪声,因此,地表稠密的

大气成为了制约地面高速交通的关键因素. 要掌握未来交通科技的制高点, 实现地面交通运行时速 500 km/h 的超高速梦想, 不可避免的要采用管道运输技术^[1-3]. 目前传统的高速驱动方式以直线同步电机(LSM)较优, 其速度与电机极距 t 和供电频率 f 有关, 对整个磁悬浮系统而言, 气隙的大小决定了技术所能达到的最高运行速度. 瑞士和德国磁悬浮列车, 为了获得合适的气隙, 电机极距分别选取 231 mm 和 258 mm, 因现有大功率逆变器最高输出频率的限制, 电机定子最大频率约 300 Hz, 最高速度仅 550 km/h. 日本 MLX 采用低温超导电动悬浮, 悬浮气隙较大, 直线同步电机定子无铁心, 极距 1 350 mm, 当电机定子频率为 72 Hz 时, 速度可达 700 km/h, 因电机短路阻抗和供电电压等因素的限制, 这成为日本工程师所追求的理想速度.

鉴于管道列车超高速驱动技术研究甚少, 本文以电磁发射领域中较为新颖的重接式电磁发射技术为研究对象, 分析其用于管道列车超高速驱动系统的可行性, 采用重接式电磁驱动技术的管道列车概念模型(见图 1), 重接式电磁驱动单元由同轴线圈和驱动板组成, 驱动板位于车体上作为重接式驱动的反应板, 为管道列车提供动力源.

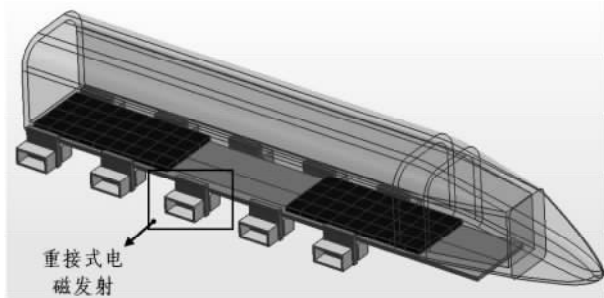


图 1 管道列车概念模型

Fig. 1 Pipeline train conceptual model

多级重接式电磁关系复杂, 需要考虑耦合磁场对驱动板加速过程的影响, 本文首先推导多级重接式电磁驱动的运动方程, 分析受力过程和能量利用关系, 通过有限元瞬态场多级仿真模型的分析, 研究不同构造的驱动板的运动特性, 得到瞬态场中多级重接式电磁驱动的运动规律和电磁关系, 以寻求管道列车超高速下合理的驱动方案.

1 多级驱动原理

重接式电磁驱动有多种形式, 但基本原理相同^[4]. 如图 2a 为箱型线圈和驱动板构成的单级重接式驱动结构示意图. 驱动板位于两同轴线圈之间, 两

线圈通入相同方向的脉冲电流^[4]. 脉冲电流可分为几种形式, 如半波型、振荡型和慢衰减型^[5-7]. 图 2b 为多级重接式驱动结构示意图, 多级重接式驱动系统是单级重接式单元的有序组合, 理论上可以连续加速物体获得超高速. 单级重接式电磁驱动电磁关系简单, 不存在各级间线圈磁场耦合和驱动板涡流磁场与线圈磁场的耦合问题, 但受电源容量和驱动板质量限制, 单级出口速度不会很高. 要达到高速目标就要采用多级连续驱动方式, 但多级系统电磁关系复杂, 需要考虑耦合磁场对驱动板加速过程的影响.

文献多对铝制材料驱动板进行研究. 在高频脉冲电流激励下, 铝制驱动板表面会感应产生涡流, 涡流产生的磁场将阻止线圈磁场穿过铝板. 当驱动板位于两同轴线圈之间偏离中心轴位置时, 线圈磁场与涡流磁场的相互挤压将会产生一个驱动力 F_1 , 当驱动板尾部与线圈边沿有间隙时, 线圈磁场将会在间隙中发生重接, 导致线圈内大部分磁场通过此间隙, 磁场与感应涡流满足安培定理, 产生一个驱动力 F_2 . 因此, 重接式电磁驱动力实质是磁场挤压力与安培力共同作用的结果, 即 $F = F_1 + F_2$.

如驱动板经第 1 级加速进入第 2 级时, 受力并不是简单重复第 1 级过程, 而要考虑驱动板携带涡流磁场进入第 2 级对加速性质的影响, 以及第 1 级线圈剩余电流产生的磁场对第 2 级线圈的影响和前级线圈感应产生的电流磁场对后级加速的影响. 主要表现在驱动板与线圈的互感 M_{10}, M_{20}, M_{30} , 以及各线圈间互感 M_{12}, M_{23} . 如图 3 所示, 脉冲电源采用慢衰减的反并联二极管电路. 不是简单重复第 1 级过程, 而要考虑驱动板携带涡流磁场进入第 2 级对加速性质的影响, 以及第 1 级线圈剩余电流产生的磁场对第 2 级线圈的影响和前级线圈感应产生的电流磁场对后级加速的影响. 主要表现在驱动板与线圈的互感 M_{10}, M_{20}, M_{30} , 以及各线圈间互感 M_{12}, M_{23} . 如图 3 所示, 脉冲电源采用慢衰减的反并联二极管电路.

当各级驱动线圈之间的距离越小时, 耦合磁场的影响越强, 使多级重接式驱动过程越加复杂. 当线圈级间距离足够大时, 可以认为驱动板携带的涡流已经在两级之间运动过程中衰减为零, 此时多级加速过程可以认为是单级加速的简单叠加, 但这种情况下驱动板达指定速度时, 加速距离增加, 降低了系统效率.

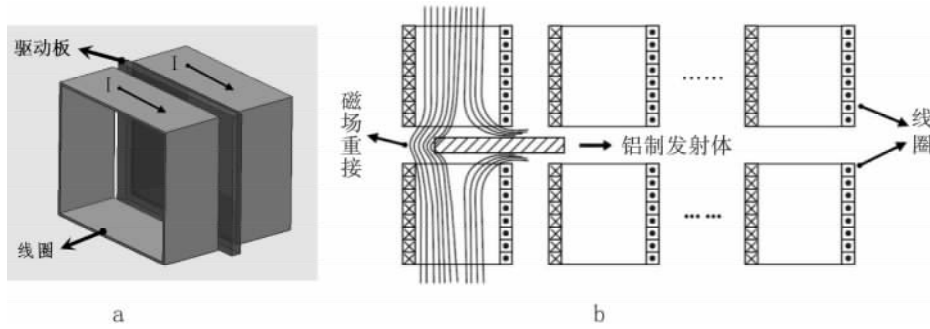


图 2 重接式电磁驱动结构示意图

Fig. 2 RED structure

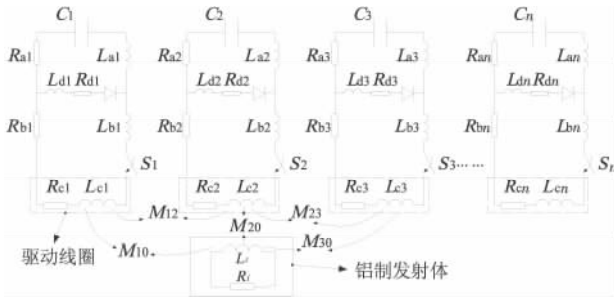


图 3 多因素耦合关系图

Fig. 3 The coupling relation graph of multiple factors

因此研究驱动线圈紧凑型的重接式驱动更加重要. 如图 3 所示, 以第 k 级加速为研究对象, 基于网口电流法有电路方程:

$$(R_{ak} + R_{dk})i_{1k}(t) + (L_{ak} + L_{dk})\frac{di_{1k}(t)}{dt} - R_{bk}i_{2k}(t) - L_{bk}\frac{di_{2k}(t)}{dt} = u(t), \quad (1)$$

$$-(R_{bk} + R_{dk})i_{2k}(t) - (L_{bk} + L_{dk})\frac{di_{2k}(t)}{dt} + R_{dk}i_{1k}(t) + L_{dk}\frac{di_{1k}(t)}{dt} = u_{ck}(t). \quad (2)$$

其中: i_{1k}, i_{2k} 为网口电流分量, k 取 $1, 2, 3, \dots, n$; $u(t)$ 为电容电压; $u_{ck}(t)$ 为第 k 级驱动线圈电压.

对于 n 级重接式驱动装置, 驱动板位于第 k 级且前 $k-1$ 级线圈电流未衰减到零, 后 $n-k$ 级线圈均感应产生电流, 考虑线圈电感和驱动板等效电感随时间的变化, 忽略各级线圈间互感和驱动板与各级线圈互感随时间的变化, 认为互感在驱动板运动过程中是常数. 此时驱动线圈电压方程为

$$R_{ck}i_{2k}(t) - \frac{d[L_{ck}[x(t)]i_{2k}(t)]}{dt} + \sum_{j=1}^n M_{jk}\frac{di_{2k}(t)}{dt} + M_{kf}\frac{di_f(t)}{dt} = u_{ck}(t). \quad (3)$$

其中: R_{ck} 为第 k 级线圈电阻; L_{ck} 为第 k 级线圈电感; M_{jk} 为第 k 级线圈与除 k 级以外各级线圈间的互感; M_{kf} 为驱动板与第 k 级线圈的互感.

驱动板产生的涡流磁场要与驱动线圈相互作用, 驱动板涡流方程为

$$R_f i_f(t) + \frac{d[L_f[x(t)]i_f(t)]}{dt} + \sum_{i=1}^n M_{if}\frac{di_i(t)}{dt} = 0. \quad (4)$$

其中: M_{if} 为驱动板与各级线圈间的互感.

由电路方程可知, 多级重接式驱动耦合了各级线圈电感和驱动板的等效电感, 导致实际加速过程复杂. 以 n 级重接式驱动为研究对象, 忽略线路电感储能, 假设某时刻, 驱动板经 m ($m < n$) 级线圈加速获得速度 $V(t)$, 整个系统的总能量为

$$W(t) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} C_i u_i^2(t) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} L_i [x(t)] i_i^2(t) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n M_{ij} i_i(t) i_j(t) + \sum_{i=1}^n M_{if} i_f(t) i_i(t) + \frac{1}{2} L_f [x(t)] i_f^2(t) + \frac{1}{2} m V^2(t). \quad (5)$$

其中: C_i 为各级电容量; $u_i(t)$ 为各级电容剩余电压; $L_i[x(t)]$ 为各级线圈电感; $i_i(t)$ 和 $i_j(t)$ 为各级线圈剩余电流; M_{ij} 为各级线圈间互感; M_{if} 为驱动板与各级线圈互感; $i_f(t)$ 为驱动板涡流; $L_f[x(t)]$ 为驱动板等效电感; m 为驱动板质量.

系统总能量的瞬时变化量可认为是系统电阻的功率损耗. 对式(5)求导得

$$\frac{dW(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m C_i u_i(t) \frac{du_i(t)}{dt} + \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{2} \frac{dL_i[x(t)]}{dt} i_i^2(t) + L_i[x(t)] i_i(t) \frac{di_i(t)}{dt} \right] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n M_{ij} \left[\frac{di_j(t)}{dt} i_i(t) + i_j(t) \frac{di_i(t)}{dt} \right] + \sum_{i=1}^n M_{if} \left[\frac{di_f(t)}{dt} i_i(t) + i_f(t) \frac{di_i(t)}{dt} \right] + \frac{1}{2} \frac{dL_f[x(t)]}{dt} i_f^2(t) + L_f[x(t)] i_f(t) \frac{di_f(t)}{dt} + m V(t) \frac{dV(t)}{dt}. \quad (6)$$

设每级电路和线圈的总电阻为 R_i , 驱动板等效电阻为 R_f , 电路简化后如图 4 所示.

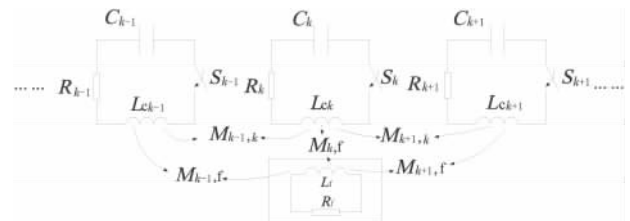


图 4 多级重接式电磁驱动简化图

Fig. 4 Multi-stage RED simplified graph

由回路电压方程可得

$$-\sum_{i=1}^n R_i i_i(t) = -\sum_{i=1}^m u_i(t) + \sum_{i=1}^n \frac{d[L_i[x(t)]i_i(t)]}{dt} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n M_{ij} \frac{di_j(t)}{dt} + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n M_{ij} \frac{di_j(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n M_{if} \frac{di_f(t)}{dt}, -R_f i_f(t) = \sum_{i=1}^n M_{if} \frac{di_i(t)}{dt} + \frac{d[L_f[x(t)]i_f(t)]}{dt} \quad (8)$$

式(7)~(8)两边分别乘以 $i_i(t), i_f(t)$, 展开得

$$-\sum_{i=1}^n R_i i_i^2(t) = -\sum_{i=1}^m u_i(t) i_i(t) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{dL_i[x(t)]}{dt} i_i^2(t) + L_i[x(t)] \frac{di_i(t)}{dt} i_i(t) \right] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n M_{ij} \frac{di_j(t)}{dt} i_i(t) + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n M_{ij} \frac{di_j(t)}{dt} i_j(t) + \sum_{i=1}^n M_{if} \frac{di_f(t)}{dt} i_i(t), \quad (9)$$

$$-R_f i_f^2(t) = \sum_{i=1}^n M_{if} \frac{di_i(t)}{dt} i_f(t) + \frac{dL_f[x(t)]}{dt} i_f^2(t) + L_f[x(t)] \frac{di_f(t)}{dt} i_f(t). \quad (10)$$

将电路关系 $\sum_{i=1}^m C_i \frac{du_i(t)}{dt} = -\sum_{i=1}^m i_i(t)$ 带入式(6)中, 分别减去式(9)~(10), 得

$$mV(t) \frac{dV(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} L_i[x(t)] \frac{di_i^2(t)}{dt} + \frac{1}{2} L_f[x(t)] \frac{di_f^2(t)}{dt}, \quad (11)$$

由式 $\alpha = \frac{dV(t)}{dt}, \frac{dL_i[x(t)]}{dt} = \frac{dL_i[x(t)]}{dx(t)} \frac{dx(t)}{dt}$ 得

$$F = \alpha m = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} L_i[x(t)] \frac{di_i^2(t)}{dx(t)} + \frac{1}{2} L_f[x(t)] \frac{di_f^2(t)}{dx(t)}. \quad (12)$$

其中: $\frac{dL_i[x(t)]}{dx(t)}, \frac{dL_f[x(t)]}{dx(t)}$ 分别表征线圈电感和驱动板等效电感随驱动板距离的变化量, 即电感梯度.

考虑驱动板经 m 级加速后, 前 h 级线圈电流已经衰减为零, 而后 $n \sim g$ 级线圈未感应产生电流, 可得多级重接式电磁驱动的运动方程为

$$F = \sum_{i=h+1}^{m-1} \frac{1}{2} \frac{dL_i[x(t)]}{dx(t)} i_i^2(t) + \frac{1}{2} \frac{dL_m[x(t)]}{dx(t)} i_m^2(t) + \sum_{i=m+1}^{n-g-1} \frac{1}{2} \frac{dL_i[x(t)]}{dx(t)} i_i^2(t) + \frac{1}{2} \frac{dL_f[x(t)]}{dx(t)} i_f^2(t). \quad (13)$$

式(13)认为运动过程中互感为常数时的结果, 加入互感随驱动板位置变化的公式如下:

$$F = \sum_{i=h+1}^{m-1} \frac{1}{2} \frac{dL_i[x(t)]}{dx(t)} i_i^2(t) + \frac{1}{2} \frac{dL_m[x(t)]}{dx(t)} i_m^2(t) - \sum_{\substack{i=h+1 \\ i \neq j}}^{n-g-1} \sum_{\substack{j=h+1 \\ j \neq i}}^{n-g-1} \frac{dM_{ij}[x(t)]}{dx(t)} i_i(t) i_j(t) + \sum_{i=m+1}^{n-g-1} \frac{1}{2} \frac{dL_i[x(t)]}{dx(t)} i_i^2(t) - \sum_{i=h+1}^{n-g-1} \frac{dM_{if}[x(t)]}{dx(t)} i_i(t) i_f(t) + \frac{1}{2} \frac{dL_f[x(t)]}{dx(t)} i_f^2(t). \quad (14)$$

式(14)反映了多级系统中驱动板的受力特性, 表明多级系统的力能指标与各级线圈电流和电感梯

度、驱动板涡流和电感梯度以及互感梯度有关. 将其写成矩阵的形式得

$$F = [i_1(t) \dots i_h(t) \dots i_{n-g}(t) \dots i_n(t)] \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \frac{dL_{i_1}[x(t)]}{dx(t)} & \frac{dM_{i_1 i_2}[x(t)]}{dx(t)} & \dots & \frac{dM_{i_1 i_n}[x(t)]}{dx(t)} \\ \frac{dM_{i_2 i_1}[x(t)]}{dx(t)} & \frac{1}{2} \frac{dL_{i_2}[x(t)]}{dx(t)} & \dots & \frac{dM_{i_2 i_n}[x(t)]}{dx(t)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dM_{i_n i_1}[x(t)]}{dx(t)} & \frac{dM_{i_n i_2}[x(t)]}{dx(t)} & \dots & \frac{1}{2} \frac{dL_{i_n}[x(t)]}{dx(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ \vdots \\ i_h(t) \\ \vdots \\ i_{n-g}(t) \\ \vdots \\ i_n(t) \end{bmatrix} + [i_1(t) \dots i_h(t) \dots i_{n-g}(t) \dots i_n(t)] \begin{bmatrix} \frac{dM_{f i_1}[x(t)]}{dx(t)} \\ \vdots \\ \frac{dM_{f i_n}[x(t)]}{dx(t)} \end{bmatrix} i_f(t) + \frac{1}{2} \frac{dL_f[x(t)]}{dx(t)} i_f^2(t). \quad (15)$$

其中: 驱动线圈电流矩阵中的元素随发射级数的提高而变化, 前级线圈电流衰减到零或后级线圈未感应产生电流时, 将不对驱动过程产生影响. 如果驱动板感应涡流 $i_f(t)$ 方向在某阶段发生变化, 线圈电流方向不变, 此时两电流同向, 则驱动板与线圈互感部分将会产生部分负方向的驱动力. 而相对本级驱动过程, 前级或后级线圈通入同方向电流时也将产生部分制动力.

2 结构分析

重接式电磁驱动是通过磁场为媒介将电能转换成机械能, 而此转换过程中会存在磁场扩散、漏磁等磁能的消耗, 降低了转换效率. 如何有效的利用瞬态磁场传递的能量, 需要对重接式电磁驱动的结构进行分析, 如图5所示, 4种不同结构的重接式电磁驱动装置.

图5a为文献[8-10]普遍讨论的重接式电磁驱动装置, 驱动线圈通入脉冲电流产生瞬时磁场, 在空间中形成磁场的闭合回路, 而空气的磁阻大, 且线圈外部磁场呈现扩散状, 磁能损耗增加. 对于多级重接式电磁驱动, 磁场的扩散使得前后线圈感应产生电流, 影响了加速性能^[11-14]. 图5b、图5c在线圈周围增加了铁质材料, 主要作用是提供瞬时磁场闭合路径, 减小磁扩散. 铁质材料磁阻小, 减小了磁能损耗, 使瞬时磁场的大部分能量集中在空气隙处, 增加驱动板能量利用率. 图5d结构与普遍讨论的重接式电磁驱动结构相似, 但驱动板为相同大小的永磁材料.

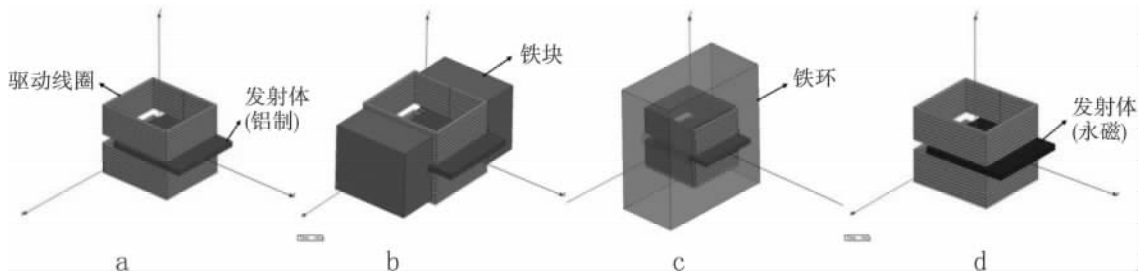


图 5 不同结构的重接式电磁驱动装置

Fig. 5 The different structure of RED

在 Maxwell3D 瞬态场中建立两级重接式驱动的有限元仿真模型, 设置第 2 级线圈目的是观察不同结构下第 1 级线圈磁场对其影响. 4 种结构仿真参数均相同, 电容器容量为 $1\ 000\ \mu\text{F}$, 电容器组初始电压为 $2\ 000\ \text{V}$, 驱动板质量为 $330\ \text{g}$. 仿真结果如图 6 和图 7 所示.

由图 6 可知驱动线圈周围增加铁质材料后, 相同规模的重接式电磁驱动装置单级出口速度显著增加, 呈现出随磁场回路中空气隙的减小而增加, 仿真得图 7a, b, c 曲线稳定后的速度分别为 $5.5\ \text{m/s}$, $6.3\ \text{m/s}$, $8.5\ \text{m/s}$. 由磁路定理知, 磁场能量集中于磁阻较大的空气隙中, 气隙的减小使驱动板和磁场的能量交换更加充分, 使驱动板所受驱动力增加. 如图 7a~c 所示, 驱动板所受最大驱动力分别为 $3.35\ \text{kN}$, $3.5\ \text{kN}$, $4.25\ \text{kN}$, 且由于铁磁材料路径的存在, 使得瞬态磁场不在空间发散, 前级线圈感应产生的电流减小, 减小了前级线圈感应电流产生的磁场重接引起的驱动板制动的可能性.

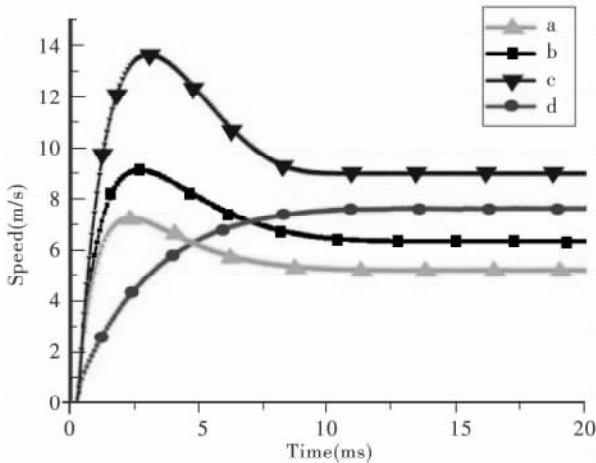


图 6 不同结构时驱动板出口速度曲线

Fig. 6 Projectile velocity curves of different structures

图 7a, b, c 的速度曲线均有一段时间在下降, 可知此时受到反力的作用. 不同结构中驱动板受反力的大小也不同, 随空气隙的减小有增加的趋势. 驱动板受瞬态磁场变化的影响, 电磁感应产生的涡流方向会发生变化. 在运动过程中感应涡流方向在某一时刻变化, 由式(14)可知, 驱动板与线圈互感部分此时将提供反力. 以图 7c 为例, 取运动过程中 3 个时刻, 得驱动板涡流变化如图 8 所示, 其中涡流大小随时间逐渐衰减.

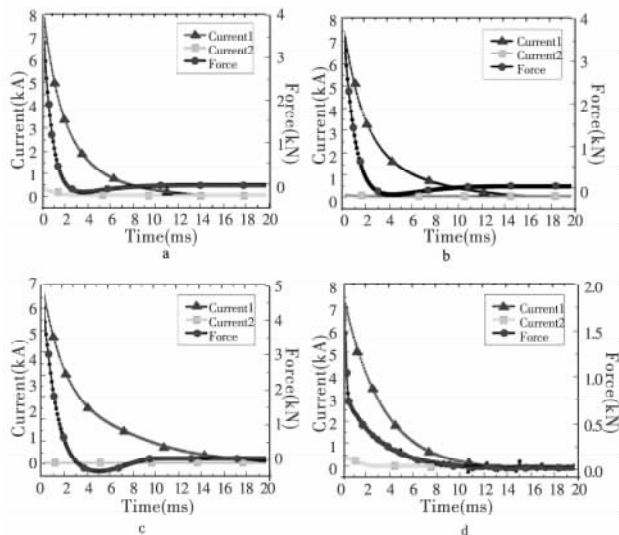


图 7 不同结构时驱动板受力与线圈电流波形

Fig. 7 Projectile force and coil current of different structures

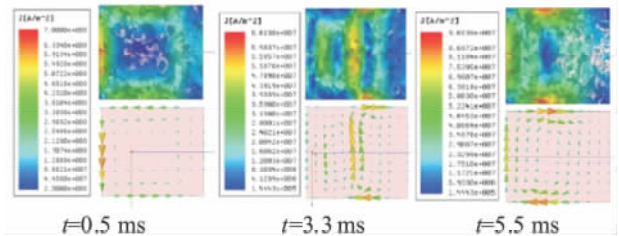


图 8 驱动板内涡流变化情况

Fig. 8 The change of projectile eddy current

与图 7c 对比可知, $t=0.5\ \text{ms}$ 时, 驱动板受驱动力. 瞬态磁场方向垂直纸面向里, 如图 8 所示, 驱动板涡流方向此时为逆时针, 涡流感应产生的磁场将阻止线圈磁场穿过驱动板内部, 大部分磁场将集中在驱动板尾部与线圈的间隙处, 且此时驱动板尾部的电流密度大. 由安培力定律, 线圈磁场与驱动板涡

流作用产生使驱动板运动的驱动力。 $t=3.3\text{ ms}$ 时,驱动板受力接近零,涡流方向开始发生变化。 $t=5.5\text{ ms}$ 时,驱动板受制动力,涡流方向变为顺时针,但线圈磁场方向不会发生变化,磁场大部分将会穿过驱动板内部而形成闭合回路,即磁场拉住驱动板阻止其运动。由安培力定律可知,驱动板尾部的涡流与磁场作用将产生阻止其运动的制动力。此时涡流与线圈电流同向,由式(15)所示,线圈与驱动板之间负互感梯度部分提供制动力。当线圈周围设置铁质材料,增加了瞬时磁场的利用率,使得驱动过程利用的磁场能量增加,致使驱动板感应产生的涡流幅值增大,所受制动力增加。

图7d驱动板为永磁体,驱动力是由磁场的相互挤压而产生。驱动板需放置于两同轴线圈之间偏离中心轴靠运动方向一侧,驱动板尾部距线圈有一定间隙。此情况产生的最大驱动力仅为 1.5 kN ,但加速过程不会产生制动力,单级出口速度要高于图7a。永磁驱动板表面不会产生涡流,不存在涡流反向产生制动力的阶段,即认为式(15)中驱动板涡流为零。

通过不同结构重接式电磁驱动装置的瞬态场有限元仿真,知在驱动线圈周围设置铁质材料,可显著提高驱动板单级出口速度,减小前级线圈感应电流,增加系统瞬态磁场能量的利用率,更适用于线圈紧凑型的重接式驱动装置。而驱动板为永磁体的情况则证明重接式电磁驱动铝制驱动板受力不仅是安培力的作用,还有磁场相互挤压的作用。驱动板运动过程中受反力的原因是驱动板涡流反向与瞬时磁场相互作用的结果。

3 多级瞬态场分析

以图5c为研究对象,通过Maxwell3D瞬态场进行有限元仿真计算,讨论此结构在多级系统中的运动特性,以及在高速情况时加速过程中的问题,并给出解决方案。

3.1 仿真模型

建立图5c的三级仿真模型,如图9所示。驱动线圈长 127 mm 、宽 112 mm 、高 49 mm ,10匝,截面积为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,两个线圈同轴相对放置间距 18 mm ,三组驱动线圈间距均为 10 mm 。铝制驱动板长 130 mm 、宽 118 mm 、厚 8 mm 。

以三级重接式电磁驱动为基础,通过设置驱动板初始速度值,可模拟任何速度段驱动板的运动性质。

3.2 仿真结果

驱动板初始速度为 $V_0=0\text{ m/s}$ 时,三级驱动结果如图10所示,反应了驱动板沿运动方向上的速度和受力情况和三级驱动线圈电流的变化。

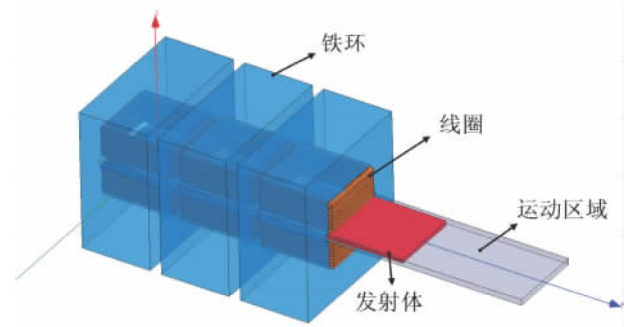


图9 重接式电磁驱动的三级仿真模型

Fig. 9 Three-level simulation model of RED

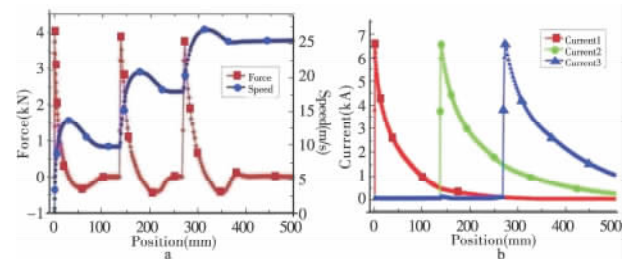


图10 $V_0=0\text{ m/s}$ 时三级重接式驱动仿真结果

Fig. 10 Three-level RED simulation result when $V_0=0\text{ m/s}$

低速阶段驱动板可以在该级线圈驱动电流衰减到较小值时进入到下一级驱动单元。同时后级驱动线圈感应电流小,在驱动板头部产生制动作用的磁场将很小。如图10所示可知,驱动板所受最大制动力随级数的增加有增大的趋势。制动力主要是因为驱动板感应涡流方向发生变化,导致线圈磁力线完全穿过驱动板而产生的,即式(15)中线圈与驱动板互感部分提供制动力。当级数越高时驱动板的速度就越大,因此驱动板在驱动线圈内的运动时间减小。反方向感应涡流衰减的程度较小,且此时线圈内剩余磁场强度较大,因此将受到较大的制动力,但这种情况下,制动力的持续时间小,因此图中反映的速度衰减量随级数的增加而减小。图11中驱动板所受最大驱动力随驱动级数的增加而减小,由式(14)知,不考虑驱动板涡流作用时,要获得最大驱动力,需满足驱动板运动到线圈最大电感梯度位置时,驱动电流正好达峰值处。当驱动板经第1级加速后获得一个速度值,进入第2级时,最佳加速位置应该较第1级向后。以满足线圈电流达峰值时,驱动板位于第2级驱动线圈电感梯度最大位置。多级驱动的最佳触发位置应逐渐向后设置,但又要考虑驱动板长度和

线圈电流上升时间的综合影响。

分析高速阶段多级驱动的运动特性,当初速度 $V_0=200\text{ m/s}$, 500 m/s 时的仿真结果如图 11、图 12 所示。

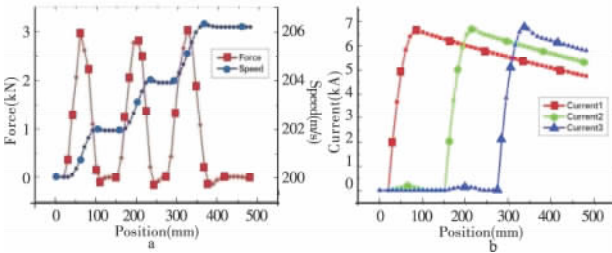


图 11 $V_0=200\text{ m/s}$ 时三级重接式驱动仿真结果

Fig. 11 Three-level RED simulation result when $V_0=200\text{ m/s}$

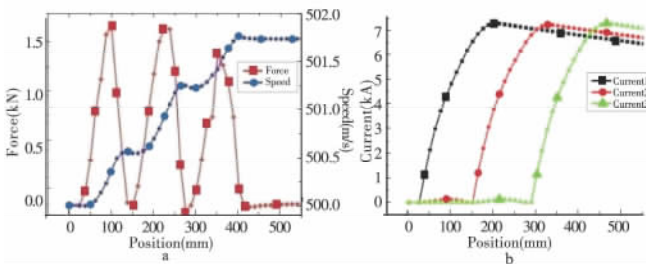


图 12 $V_0=500\text{ m/s}$ 时三级重接式驱动仿真结果

Fig. 12 Three-level RED simulation result when $V_0=500\text{ m/s}$

假设图 10 中低速阶段的起始触发位置为 0 mm , 驱动板运动方向为正方向。高速阶段时,图 11、图 12 的初始触发位置分别设为 -10 mm , -25 mm , 同时保证驱动板头部在该级驱动线圈外部。如图 11、图 12 所示,驱动板所受制动力明显减小。高速阶段驱动板进入下一级合适触发位置时,有 3 种情况:

1)如图 11 所示,驱动板在第 2 级触发时,第 1 级线圈剩余电流较大且处于刚进入衰减阶段,此时线圈磁场从增加变成减小,引起驱动板涡流的方向开始发生变化。由于第 1 级线圈电流刚进入衰减阶段驱动板产生的反方向涡流较小,因此产生的制动力较小。而第 3 级线圈同时也感应产生电流,感应磁场会在驱动板头部发生重接产生制动力。由于驱动线圈周围设置了铁环,使前级线圈感应产生的电流较小,产生的制动作用也较小。

2)如图 12 所示,驱动板在第 2 级触发时,第 1 级线圈电流较大且处于上升阶段,此时不存在因线圈磁场减小而引起的驱动板涡流方向变化的现象。但驱动板可等效成一电感量,当其运动离开线圈时,第 1 级线圈磁场相对于驱动板仍然是在减小,此时也将产生反方向涡流,产生的制动力较小。

3)如果设置驱动板初始速度更高,那么驱动板进入第 2 级合适位置触发时,有可能第 1 级驱动线圈电流处于上升阶段且幅值较小。第 2 级触发时,第 1 级线圈电流没有达到峰值处,即第 1 级触发过程没有充分利用脉冲能量,驱动板受力和速度增量将显著减小。

综合分析可知,多级重接式电磁驱动中要想获得最佳单级驱动效率,需要满足当驱动板处于本级最大电感梯度位置时,驱动电流正好达峰值,同时,后级线圈剩余电流要大,确保驱动板反向涡流较少,减小驱动板所受的制动力。这就要求驱动板有足够的速度,而驱动板速度更高时就会发生第 3)中情况,使系统效率降低。

如图 10~图 12 所示,随驱动板速度提高,单级速度增量将逐渐减小。因为驱动板受力位置仅为其尾部处于线圈内部的阶段,同时受脉冲电流持续时间的影响。低速时驱动板速度增量如式(16)所示。

$$\Delta V_1 = \frac{F_1 t_1 - F_2 t_2}{m}, \quad (16)$$

$$t = t_1 + t_2. \quad (17)$$

其中: F_1, F_2 分别为低速阶段驱动板受驱动力和制动力的平均值; t_1, t_2 为驱动板受驱动力和制动力的时间; t 为脉冲电流持续时间; m 为驱动板质量。

高速阶段驱动板速度增量可认为是单级驱动时间 t_3 和驱动板所受驱动力 F_3 共同作用的结果。

$$\Delta V_2 = \frac{F_3 t_3}{m}. \quad (18)$$

在理想情况下,合理设置每级驱动线圈中驱动板的触发位置,使电流达到峰值时驱动板正好位于电感梯度较大值处。此时低速和高速阶段均可获得最大驱动力。但高速阶段驱动力的持续时间 t_3 较低速阶段持续时间 t 小得多,且为避免驱动板前端发生磁场重接产生制动力,仿真中驱动板的触发位置并不是最佳,加速过程驱动力没有达到最大值。因此仿真中速度增量随级数的升高而减小。但低速阶段还需考虑驱动板受反力的时间,因此驱动板的速度增量也是多因素共同作用。

4 结论

1)多级重接式电磁驱动的一般运动方程耦合了各级线圈电流与电感梯度、线圈间互感梯度、驱动板与线圈间的互感梯度和驱动板涡流与其等效电感梯度的综合作用,反映了驱动板在多级系统中的受力情况。

2)相同电路参数不同结构下仿真说明:驱动板受力是磁场相互挤压和安培力共同作用的结果;线圈周围加入铁磁材料,减小线圈磁场闭合路径中的空气隙,可以提高驱动板出口速度,同时减小了前级线圈的感应电流,抑制了驱动板头部处发生磁场重接产生制动力。

3)不同初速度(0 m/s,200 m/s和500 m/s)下的三级重接式电磁驱动瞬态场仿真说明:反力的产生与驱动板内涡流方向发生变化有关,线圈电流的减小和驱动板离开线圈时都会使驱动板涡流反向。高速阶段为达到最佳驱动效果,需要考虑线圈最大电感梯度位置、驱动板速度与电流上升时间三者的关系。

4)仿真结果表明:应用多级重接式电磁驱动技术,采用多单元并行触发,多级连续驱动的方式,并结合合理的触发方案,可实现将管道列车连续加速至超高速的目标。

参考文献:

- [1] 张耀平. 中国铁路跨越式发展的机会窗口[J]. 西南交通大学学报:社会科学版,2006,7(1):138-140.
- [2] 沈志云. 关于我国发展真空管道高速交通的思考[J]. 西南交通大学学报,2005,40(2):133-137.
- [3] 沈志云. 对磁悬浮高速列车技术认识的两个错误观点[J]. 交通运输工程学报,2004,4(1):1-2.
- [4] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [5] Widner M M. WARP-10: a numerical simulation model

for the cylindrical reconnection launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1991,27(1):634-638.

- [6] Berning P R, Hummer C R, Hollandsworth C E. A coil gun based plate launch system[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1999,35(1):136-141.
- [7] Singh H, Hummer C R. Advanced semi-conductor switches for EM launchers[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2001,37(1):394-397.
- [8] Cowan M, Cnare E C, Duggin B W, et al. The reconnection gun[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1986,22(6):1429-1433.
- [9] Cowan Jr, Barry M, Marder, et al. Segmented rail linear induction motor: United States, US5552649A[P]. 1994.
- [10] 赵纯,邹积岩,何俊佳,等. 多级重接式电磁发射的电磁分析与有限元仿真[J]. 高电压技术,2008,34(8):78-82.
- [11] 朱英伟,严仲明,李海涛,等. 触发放电位置对重接型线圈推进器加速性能影响的仿真分析[J]. 高电压技术,2011,37(10):2548-2553.
- [12] 廖敏夫,邹继斌,邹积岩,等. 基于重接原理的三级电磁发射系统[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(1):90-94.
- [13] 韩鑫,黎荣,张海柱,等. 高速列车动力系统选型设计方法研究[J]. 兰州交通大学学报,2015,34(1):98-103.
- [14] 李炎,周鸣镝,张健. 铁路隧道列车活塞风的简化计算方法[J]. 兰州交通大学学报,2014,33(4):179-182.

(责任编辑:顾桂梅)