

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.017

一种导弹电磁线圈弹射器方案设计与仿真分析

王小召, 肖林楠, 吉继昌, 谢立中

(湖北江山重工有限责任公司, 湖北 襄阳 441005)

摘要: 为解决电磁线圈弹射器弹射大质量载荷时存在的机械应力大和磁场强等问题, 提出一种导弹电磁线圈弹射器方案。以某型导弹为弹射目标, 建立弹射器系统模型进行仿真分析。结果表明: 该方案能通过增加驱动线圈的放电次数, 使弹射器在较短的加速距离上, 以较小的加速力使导弹稳定加速, 获得高初速度。

关键词: 电磁线圈; 弹射器; 电磁弹射; 导弹

中图分类号: TJ768; TM89 **文献标志码:** A

Design and Simulation Analysis of a Missile Electromagnetic Coil Ejector

Wang Xiaozhao, Xiao Linnan, Ji Jichang, Xie Lizhong

(Hubei Jiangshan Heavy Industry Co., Ltd., Xiangyang 441005, China)

Abstract: Aiming at the problems of large mechanical stress and strong magnetic field when the electromagnetic coil ejector ejects large load, proposes a missile electromagnetic coil ejector scheme. Taking a certain type of missile as the target, the ejection system model is established for simulation analysis. The results show that this solution can increase the number of discharges of the driver coil, so that the ejector can accelerate the missile stably and with a small acceleration force at a short distance, and obtain a high initial velocity.

Keywords: electromagnetic coil; ejector; electromagnetic ejection; missile

0 引言

与传统的发射方式相比, 导弹电磁弹射器具有反应时间短、安全环保、易于隐蔽和发射筒可多次重复使用等优点, 符合未来战争对装备作战效能、生存能力和效费比的要求^[1]。

同步感应电磁线圈弹射器具有安全性好、可控性好、适用性广和响应速度快等优点^[2-3], 更适合导弹这类低速、大质量载荷的弹射, 但也存在由大电流、大机械应力和强磁场干扰等带来的诸多问题^[4-5]: 发射过程中电流可能达到几兆安培, 导致驱动线圈和电枢同时受到机械力、电磁力和热应力的轴向和径向作用, 受力分布不均; 馈电开关需耐受高压电流且精确可控; 由于导弹本身属于高精尖武器, 电磁发射产生的强磁场会对导弹的控制系统、发控系统以及电子元器件产生影响甚至破坏。

要解决以上问题, 一是研究新材料, 二是采取合理的结构方案。对后者而言, 在既定的技术指标下, 减小放电电流和电磁力的根本途径是增加电枢的加速次数以延长加速距离。增加加速次数的途径有 2 种: 1) 增加驱动线圈的级数; 2) 增加电枢的个数, 在每个电枢经过驱动线圈时都被加速, 以增

加驱动线圈的放电次数。

增加驱动线圈级数必然导致弹射器长度增大或驱动线圈间距离缩小。弹射器长度的增大会增加弹射器体积及质量, 增加工程难度和降低武器的机动性能。驱动线圈级间距的缩小会增大驱动线圈磁场的级间耦合, 影响加速性能, 降低发射效率。反之, 级间距离的增大会减弱耦合, 此时可将多级感应线圈炮简化为多个单级感应线圈炮的简单串联, 从而简化计算和分析^[6-7]。

笔者通过增加电枢来增加驱动线圈放电次数的方式实现导弹的电磁弹射, 给出了弹射器结构方案, 并针对其特点设计馈电电路方案; 利用有限元分析软件建立系统仿真模型, 通过仿真计算验证了方案的可行性。

1 弹射器方案

1.1 组成结构

如图 1 所示, 弹射器方案采用 2 个电枢, 主要由储能电源(电容器组)、同步触发控制电路、放电开关、驱动线圈、弹托、电枢 1 及电枢 2 和适配器等组成。弹托、电枢 1 和电枢 2 由结构件联结为一体, 在电磁力作用下一起推动导弹加速运动。

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-08-26

作者简介: 王小召(1987—), 男, 山东人, 硕士, 助理工程师, 从事火箭导弹发射技术研究。E-mail: 772405789@qq.com。

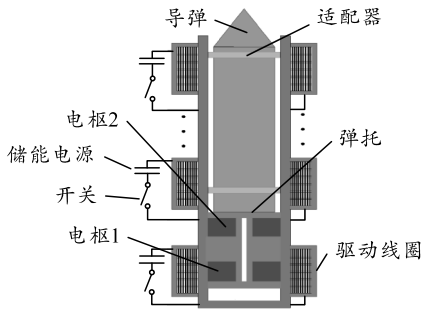


图 1 电磁线圈弹射器结构

由于导弹质量大，需要的加速力大，驱动线圈采用机械强度较高的扁铜带双饼绕制方式线圈^[8-9]，电枢采用实体结构电枢。

1.2 工作工程

电磁弹射器的每级驱动线圈都有独立的脉冲功率源馈电，工作过程如图 2 所示。

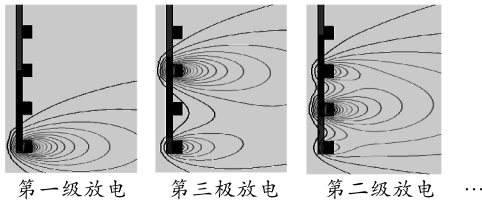


图 2 电磁线圈弹射器工作过程

当第一级驱动线圈馈电回路闭合时，电枢 1 产

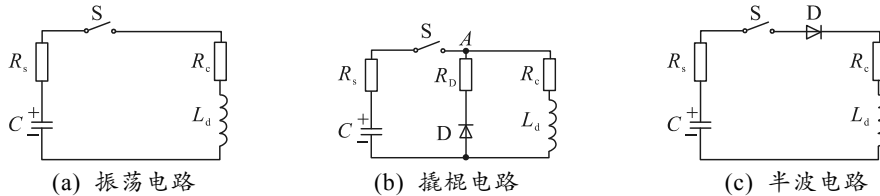


图 3 弹射器馈电电路原理

利用相同的建模参数，分别对上述 3 种电路进行仿真计算，得到放电电流、电磁力、位移和速度的变化曲线如图 4—7 所示。

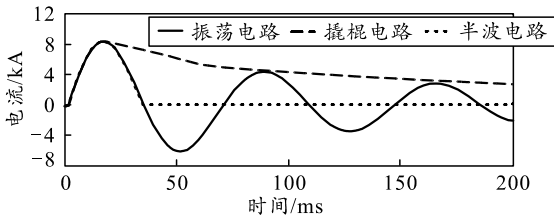


图 4 驱动线圈电流变化

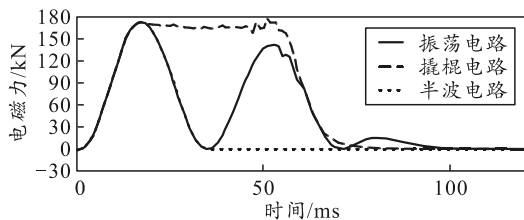


图 5 发射组件电磁力变化

生感应电流，感应电流和磁场相互作用产生电磁力推动导弹向上加速。电枢 1 加速完毕，还未进入下一级驱动线圈时，电枢 2 到达对应驱动线圈的最佳触发位置^[10]，此时该驱动线圈对应的馈电回路放电，电枢 2 推动导弹加速。两电枢交替工作，即可在驱动线圈级间距离较大的条件下，在较短的加速距离上将导弹加速至指标初速度。

2 馈电电路方案

与传统单电枢弹射器不同，该方案的驱动线圈需放电 2 次，即某级驱动线圈放电使电枢 1 加速离开后，电枢 2 会在一段时间后进入该驱动线圈。若电枢 2 进入时，该驱动线圈中存在残余电流，则会产生反向力而导致电枢减速。因而必须设计相应的馈电电路，既可保证电枢 1 在当前驱动线圈能够充分加速，又可保证在电枢 2 进入时该驱动线圈中无电流残余。

2.1 馈电电路对比分析

如图 3 所示，馈电电路主要有振荡电路、撬棍电路和半波电路^[11]3 种。其中： L_d 为驱动线圈电感； R_s 、 R_c 和 R_D 分别为系统电阻、驱动线圈电阻和撬棍电阻。

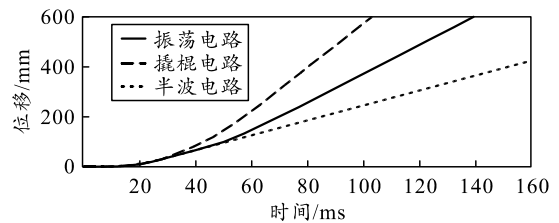


图 6 发射组件位移变化

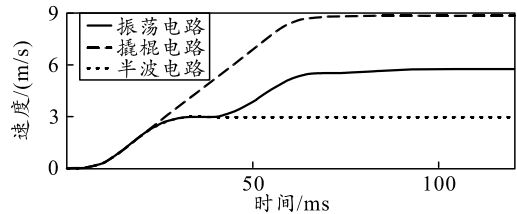


图 7 初速 0 m/s 时发射组件速度变化

由图 5 可知，3 种馈电电路对应的电磁力减为零的时间分别为 100、77 和 35 ms。电枢离开驱动线圈磁场作用范围时，发射组件位移为 370 mm。

由图 6 可知,3 种馈电电路所对应的时间分别为 100、77 和 142 ms。

结合图 4、图 5 分析可知:

1) 振荡电路对应的发射组件所受电磁力的衰减是由于电枢位置变化和馈电电流衰减的双重作用,而从图 4 所示馈电电流的衰减程度来看,主要因素还是电枢位置的变化;

2) 撬棍电路对应的发射组件所受电磁力的衰减主要是电枢位置的变化导致;

3) 对于半波电路,在 35 ms 时电枢尚未离开驱动线圈磁场的作用范围,馈电电流已衰减为零,导致电磁力衰减为零,有限的加速空间和电容储能都未被充分利用。

图 7 给出了电枢入口速度为 0 时 3 种馈电电路对应的发射组件的速度变化。由图可见:撬棍电路发射效率最高,振荡电路次之,半波电路最低。

半波电路的优点是电流衰减速度快,对驱动线圈再次放电的影响小,但低速时其发射效率较低。随着电枢入口速度的不断增加,电枢经过驱动线圈的时间也将越来越短,被加速的时间也会越来越接近半波电路的放电时间甚至更短,上述差别也将变得不明显甚至无差别。图 8 给出了 3 种馈电电路所对应的电枢入口速度为 15 m/s 时发射组件速度变化。由图可知:在电枢入口速度为 15 m/s 时,3 种电路对应的发射组件速度变化曲线一致,表明在电枢入口速度达到一定程度后,馈电电流的衰减速度不再是影响驱动线圈加速性能的关键因素。

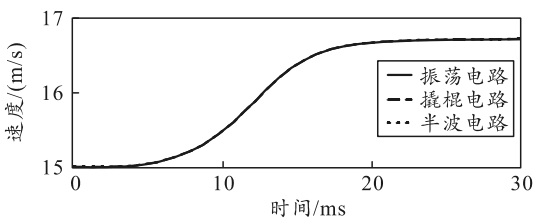


图 8 初速 15 m/s 时发射组件速度变化

2.2 馈电电路方案设计

为使弹射器能够发挥良好的性能,需设计既可满足文中方案的要求,又可提高发射效率的馈电电路方案。由前面分析可知:馈电电路应在对应的驱动线圈上使电枢充分加速且残余电流不影响后续电枢的工作,同时能提高发射效率。

撬棍电路的馈电电流持续时间长,在电枢入口速度较低时发射效率较高,但电流持续时间过长会对后续电枢的工作产生不利影响,需根据电枢入口

速度缩短电流持续时间。设置不同的撬棍电阻阻值,对撬棍电路进行仿真计算,得到电流变化曲线如图 9 所示。

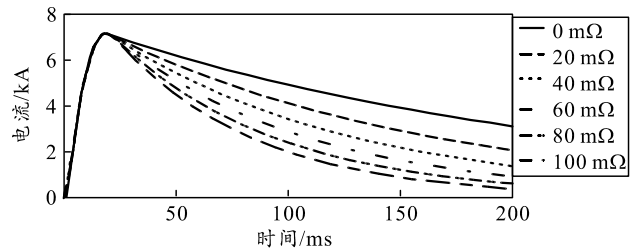


图 9 不同撬棍电阻阻值下撬棍电路电流变化

由图可以看出:随着撬棍电阻阻值的增大,馈电电流峰值保持不变,衰减速度加快。该方式虽可提高电流衰减速度,但仍有电流残余且以热能的形式消耗掉,不利于提高发射效率和弹射器寿命。

根据 2.1 节分析,对于第一级驱动线圈,在一次发射过程中仅需馈电 1 次,残余电流不影响后续工作,采用撬棍电路馈电,以适应电枢入口对馈电电流持续时间的要求,提高发射效率。对于其他驱动线圈,笔者提出通过控制振荡电路开关的开合使振荡电路工作在半波电路模式的馈电方案,即在驱动线圈电流下降为 0,电容反向充电完成后断开开关,使电容器不能再次向驱动线圈放电,产生和半波电路一样的电流波形,剩余能量存储进电容器。待到下次发射任务,对电容器反向充电后再闭合开关,产生反向馈电电流,形成与振荡电路后半周期一样的电流波形。变化过程如图 10 所示,既能满足电枢入口速度较高时对电流衰减速度的要求,又能提高能量利用率和减少电容器充放电次数。

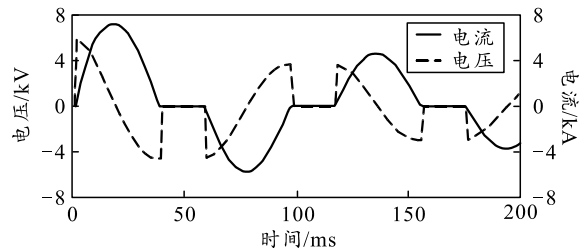


图 10 电压和电流变化

3 仿真分析

3.1 仿真模型及初始条件

以某型导弹发射要求为性能指标设计弹射器,弹射总质量为 1 000 kg,导弹初速度为 40 m/s。优化后的弹射器结构参数如表 1 所示。

根据表中的结构参数,建立 12 级驱动线圈弹射器仿真模型,划分有限元网格如图 11 所示。

表 1 弹射器结构参数

| 部件 | 参数 | 数值 |
|------|--------------------------|-----|
| 驱动线圈 | 内径/mm | 330 |
| | 外径/mm | 400 |
| | 长度/mm | 110 |
| | 间距/mm | 150 |
| | 匝数 | 120 |
| 电枢 | 内径/mm | 60 |
| | 外径/mm | 300 |
| | 长度/mm | 220 |
| 导磁壳体 | 边缘厚度 a /mm | 60 |
| | 边缘宽度 b /mm | 35 |
| | 侧面厚度 c /mm | 60 |
| | 内侧高度 h /mm | 110 |
| 电路参数 | 电容 C /mF | 4 |
| | 充电电压 U_c /kV | 10 |
| | 驱动线圈电阻 R_c /m Ω | 40 |
| | 系统电阻 R_s /m Ω | 20 |

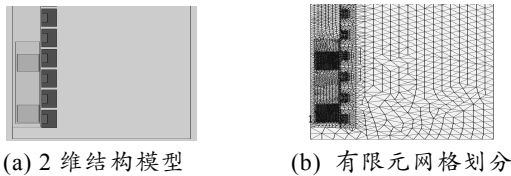


图 11 有限元仿真模型及网格划分(部分)

驱动线圈使用铜线绕制,电枢为空心铝圆筒,导磁构件为文献[12]所述的铁素体制成的导磁壳体。其中:铜的电导率为 5.8×10^7 S/m;铝的电导率为 3.8×10^7 S/m;铁素体的相对磁导率为 1 000,电导率为 0.01 S/m。

驱动线圈的激励源设置为外部电路,第一级驱动线圈馈电电路模型如图 12 所示,S1 为压控开关,V1 为脉冲电压源,可通过调整 V1 的脉冲宽度实现对 S1 闭合时间的控制。第一级以后的驱动线圈采用 2.2 节提出的方案馈电,模型如图 13 所示。

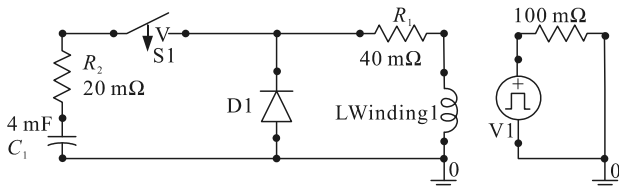


图 12 第一级驱动线圈馈电电路模型

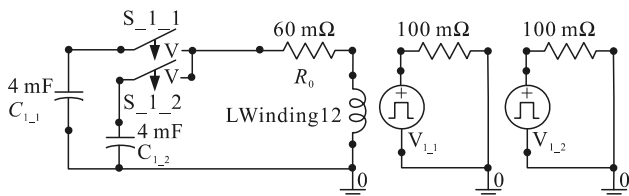


图 13 驱动线圈馈电电路模型

3.2 仿真结果及分析

利用 3.1 节建立的仿真模型,设置发射组件质量为 1 000 kg,负载为 -10 kN,进行仿真计算,得

到发射组件所受电磁力和速度随时间的变化曲线如图 14—16 所示。

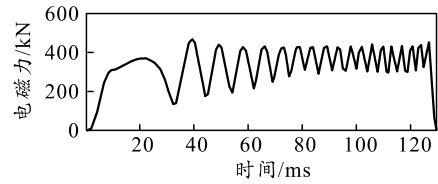


图 14 发射组件所受电磁力曲线

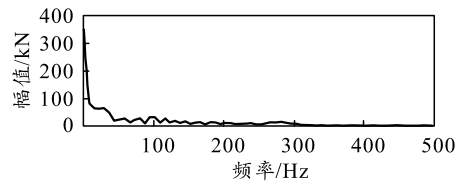


图 15 发射组件所受电磁力频谱

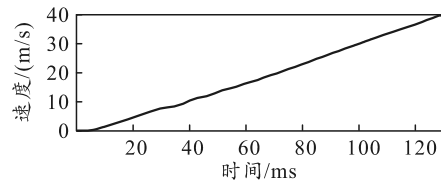


图 16 发射组件速度变化

由图 14 可以看出:12 级驱动线圈共放电 19 次,总体上看发射组件所受电磁力波动性较小,连续性较好。初始阶段,发射组件速度较小,后续电枢到达最佳触发位置的时间晚,导致电磁力出现较大波动。电磁力波动随速度增加而逐渐减小。

对图 14 所示的电磁力曲线进行快速傅里叶变换,得到其频谱如图 15 所示。由图可知:电磁力频带很窄且常值为 309 kN,与峰值较为接近,说明电磁力的能量相对集中,大幅度振动频率较少,对导弹的破坏性小,弹射器内弹道性能良好。

由图 16 可知,发射组件加速较为平稳。发射组件初速度达到 41.41 m/s,弹射器发射效率为 22.56%。

4 结束语

针对电磁线圈弹射器发射大载荷时存在的应力大和磁场强等问题,笔者提出使用 2 个电枢的导弹电磁线圈弹射器方案,并根据方案特点提出相应的馈电方案。利用有限元计算软件进行仿真分析,结果表明:1) 采用 2 个电枢,可以增加驱动线圈的放电次数,从而减小电枢受力,使得弹射器能在较短的加速距离上,以较小的加速力使导弹稳定加速,获得高初速度;2) 有利于增加驱动线圈的级间距以减少级间耦合,提高发射效率,降低方案设计中计算和分析的难度。