

电磁发射超高速一体化弹丸*

马伟明, 鲁军勇, 李湘平

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:超高速一体化弹丸作为电磁能武器的发射对象,存在与传统火炮发射弹丸不同的诸多科学难题。对近年来国内外在电磁发射一体化弹丸研究方面取得的理论、试验研究成果进行了总结,并分析了目前面临的基础理论和关键技术问题,以及针对这些问题提出的解决思路,旨在为电磁发射一体化弹丸的后续研究提供一些参考。

关键词:电磁发射;一体化弹丸;研究现状

中图分类号:TJ41 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)04-001-10

Electromagnetic launch hypervelocity integrated projectile

MA Weiming, LU Junyong, LI Xiangping

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Regarded as the launch object of EM (electromagnetic) energy weapon, the hypervelocity ILP (integrated launch projectile) has a lot of scientific problems different from those caused from traditional artillery. The theoretical and experimental results of EM launch ILP at home and aboard in recent years were summarized, and the basic theory and key technologies faced right now were analyzed. In addition, the solutions to these problems are put forward to provide some references to the subsequent research on EM launch ILP.

Keywords: electromagnetic launch; integrated launch projectile; research status

为适应以信息化和纵深精确打击为核心的现代化战争需求,弹药发射也正朝着远程化、精确化和高效能的方向发展。传统火炮由于受到火药气体滞止声速的限制,炮口初速已达到化学能武器的极限^[1],不能满足海军未来海上作战需求。电磁发射弹丸应运而生,成为未来海军舰炮发展的趋势^[2]。

电磁发射一体化弹丸主要由电枢、弹体和弹托组成,如图1所示。图中 I 表示电流; B 表示磁场; V 表示弹丸的运动速度。发射时,利用导轨及电枢取代传统的身管和药筒、利用磁场力推动代替传统火炮的气体介质推动,弹丸速度可超越化学能武器的极限,使弹丸具有传统火炮发射无法企及的射程、着速和威力,近年来成为各军事强国竞相追逐的发展利器。然而电磁发射炮弹与传统火药发射炮弹的膛内、炮口、外弹道的环境存在巨大差别,毁伤机理也发生了根本性改变,因而,无法简单套用传统弹药的分析方法。并且电磁发射弹丸的研制涉及多学

科、多系统的集成融合,致使电磁发射一体化弹丸的研究面临理论分析体系不足、技术解决途径匮乏等问题。

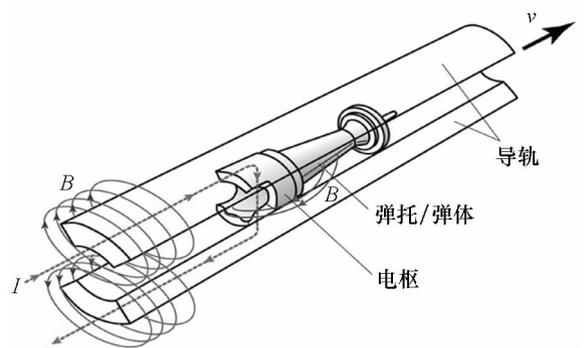


图1 电磁发射一体化弹丸工作原理及组成
Fig.1 Schematic diagram of working principle and composition of EM launch ILP

为给电磁发射一体化弹丸的研究提供指导,本文介绍了目前电磁发射一体化弹丸研究方面具有代表性的研究成果以及面临的问题,并给出了下一步研究建议。

* 收稿日期:2018-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877214,51607187)

作者简介:马伟明(1960—),男,江苏扬中人,院士,博士,博士生导师,E-mail:maweimin@public.wh.hb.cn;

鲁军勇(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jylu@xinhuanet.com

1 研究现状

1.1 理论研究

1.1.1 内弹道多物理场耦合模型研究

电磁发射弹丸内部运行环境表现为电磁 - 结构 - 热 - 气动 - 运动的双向耦合,如图 2 所示,其研究难度较大且具有重要的理论和实用研究价值,成为国内外学者的研究重点和热点。美国得克萨斯大学的先进技术研究所 (Institute for Advanced Technology, IAT) 从耦合控制方程出发,通过自编代码,完成了一款三维电磁 - 结构耦合分析软件,即 EMAP3D^[3]; Shatoff 等基于 ANSYS 内核编写了 HERB 代码,通过移动自由度的方式实现了运动 - 电磁的双向耦合^[4]; Rodger 等开发的 MEGA 代码^[5]可实现电磁 - 结构 - 热耦合。

国内 Lin 等基于混合有限元和边界元的方法,编写了运动电磁场仿真代码,并结合 Ls-dyna 软件实现了运动 - 电磁 - 结构的耦合^[6]; Tan 等采用棱边元方法实现了运动 - 电磁场的耦合^[7]。此外,文献[8 - 9]均公开发表了其在电磁发射弹丸内膛多物理场耦合仿真模型方面的研究成果。

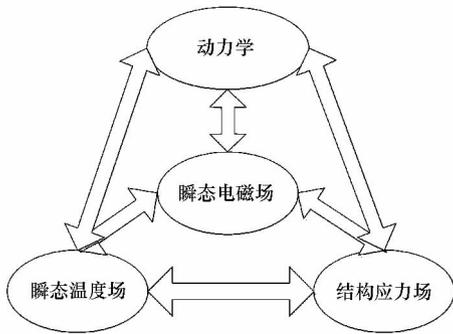


图 2 电磁发射弹丸内弹道多物理场耦合过程

Fig. 2 Coupling progress of interior ballistic multiphysics of EM launch projectile

综上,目前国内外在电磁发射弹丸内弹道多物理场耦合模型方面的研究取得了一定的成果,但还未出现一款软件或代码能实现对这些物理场的双向紧耦合,尤其是对于高速、高温滑动电接触下的枢轨接触状态缺乏有效的分析方法和手段,导致内弹道的机理尚未得到清晰的揭示。

1.1.2 弹托分离仿真模型研究

弹托分离过程是弹体、弹托以及其他附属组件之间相互气动甚至机械干扰的过程,导致分离过程对弹体飞行稳定性和作战效能影响较大^[10],如图 3 所示。文献[11 - 12]通过假定弹托迎风面受力均匀且等于来流动压,并将弹托上的感应涡流等效为一定匝数且以一定时间常数呈指数衰

减的电流环,建立了电磁发射一体化弹丸金属弹托出炮口后的电磁力和气动力理论计算模型。文献[13]基于时频分析和涡流分析方法,获得了弹托上电磁力随弹托分离位置的关系,建立了基于动网格技术电磁发射一体化弹丸弹托分离仿真模型,提高了模型的通用性。

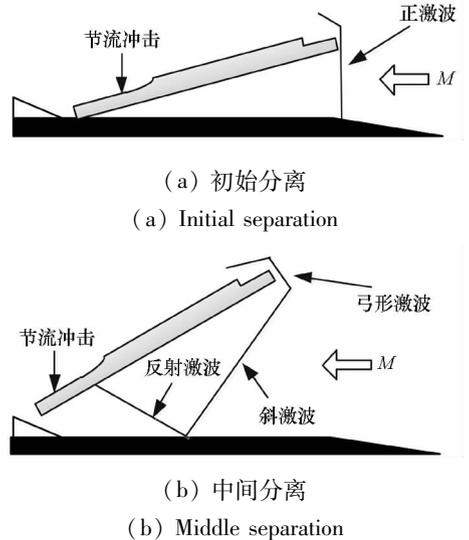


图 3 弹托分离干扰示意图

Fig. 3 Schematic diagram of disturbance of sabot discard

1.1.3 外弹道模型研究

Satopathy 和 McNab 等建立了 8 MJ 电磁发射弹丸的计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模型,并获得了该弹丸在不同马赫数下的气动系数^[14]。ISL 的 Hundertmark 等通过建立电磁发射弹丸外弹道模型,并结合气动力以及气动热模型,仿真得到了 5 kg 电磁发射弹丸以射角 2° ~ 80° 射击时的飞行弹道轨迹,如图 4 所示,并对不同射角下弹丸表面的气动热进行了仿真分析,仿真结果表明该 5 kg 电磁发射弹丸最大射程和最大射高分别为 500 km 和 260 km^[15]。洛克希德·马丁公司的 Skurdal 等构想了一种可连续发射的电磁发射装置,并对其发射弹丸在不同射击条件下的弹道轨迹进行了对比^[16]。

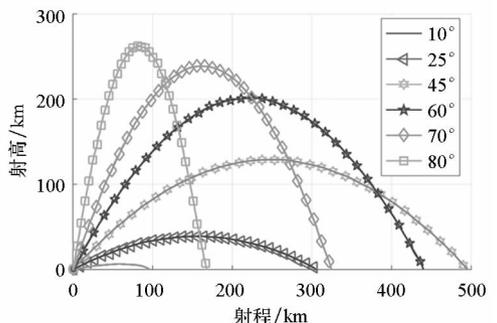


图 4 不同射角下的飞行弹道

Fig. 4 Flight trajectories for the different launch angles

国内尚晓兵^[17]根据电磁发射弹丸在外弹道飞行的特点,建立电磁发射弹丸刚体六自由度模型,考虑在具体外弹道参数条件下,利用相应的仿真模型对电磁发射弹丸外弹道进行仿真,但其未考虑环境因素以及弹体热烧蚀对弹丸飞行外弹道的影响。谢杨柳等^[18]在建立的六自由度电磁发射弹丸外弹道数学模型的基础上,分析各种因素和变量对弹着点位置偏移和概率误差的影响,并重点研究了烧蚀现象对外弹道特性的影响。

1.2 一体化弹丸设计

1.2.1 电枢设计

根据电枢工作形态的不同,可将电枢分为固体电枢、等离子电枢和混合电枢三种类型^[1],从工程应用出发,固体电枢被认为是发展前景最好的一种电枢形态。

国外在固体电枢的设计技术方面进行了大量的探索^[19-21],设计出了C形固体电枢、马鞍形固体电枢和蓄池式电枢等不同形状的电枢,通过不断优化电枢材料和结构,用以改善枢轨接触性能,减少电枢表面材料的熔化,达到保护轨道并提高其使用寿命的目的。国内在电枢的设计上起步较晚,2014年,冯登等研究了C形电枢结构参数变化对初始接触特性的影响,设计了最优化的过盈配合方案,并进行了动态发射试验验证^[22]。2016年,李白等提出了一种多因素作用下的C形固体电枢优化设计方法,为电枢的最优化参数选择提供了依据^[23]。

1.2.2 弹丸设计

国外非常重视一体化弹丸的研制工作,美国在电磁发射弹丸的研制方面起步较早、投入较大,先后有GA公司和BAE系统公司两大团队进行该技术的攻关工作^[24],美国得克萨斯大学的先进科学技术研究所参与了其中的理论分析工作^[25],并设计了惰性弹进行验证,如图5所示。美国海军于2013年底,授予BAE系统公司3360万美元的第一期研制合同,用于研制适用于电磁发射等多种发射平台的高超声速制导弹药,从2015年开始进行炮口动能32 MJ电磁发射弹丸试验,出口速度可达7.4马赫,射程预计可达100海里,并计划于2025年在DDGX驱逐舰装备舰载电磁能武器^[26]。

国内到目前为止鲜有一体化弹丸设计的公开报道,2018年,Li等系统地总结了其团队多年来在电磁发射领域的研究进展,并给出了其团队设计的一体化弹丸模型及其试验情况^[27],如图6所示。

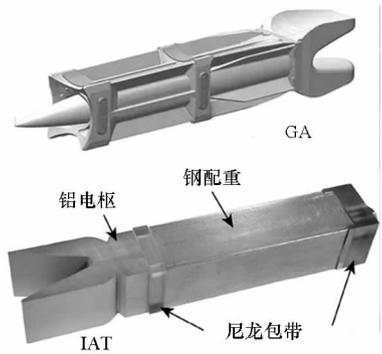


图5 美国研制的一体化弹丸

Fig. 5 The ILP development by United States

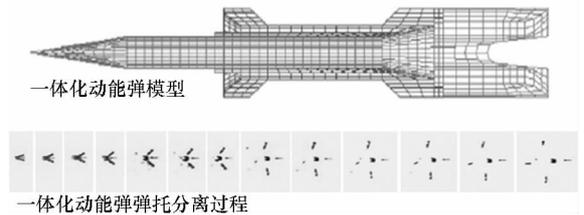


图6 国内团队设计的一体化弹丸

Fig. 6 The designed ILP at home

综上,目前国外已经进行了一体化弹丸的动态发射试验,突破了器件抗30 000g过载技术和气动热防护技术,但未突破器件的小型化、抗磁冲击以及弹炮匹配设计等技术,因此一体化制导弹丸的研制尚无成功的报道。国内前期受电磁发射装置发展的限制,一体化弹丸的研制进展较为缓慢。Li及其团队虽成功进行了一体化动能弹的发射试验,但其发射能级较低^[27]。鲁军勇及其团队在相关技术取得突破后,在某些方面取得了较快进展,对电磁发射一体化弹丸的磁场分布^[28-29]、弹托分离特性^[13]、内弹道动力学分析^[30-31]等方面进行了较为深入的研究。

1.3 试验研究

1.3.1 火炮发射试验研究

由于电磁发射技术是一项新兴技术,仍然存在一定的风险,因此在进行电磁发射实弹之前一般采用传统火炮发射验证弹丸的设计。美国海军利用火炮发射平台进行了大量的电磁发射用一体化弹丸的试验研究工作,先后进行了弹丸接口方式验证试验、弹丸结构强度验证试验、弹托分离验证试验以及弹丸飞行稳定性验证试验,如图7所示。

1.3.2 毁伤效能试验研究

电磁发射一体化弹丸发射初速极高,主要依靠其高速动能进行毁伤,目前美国海军已通过电磁发射或火炮发射一体化动能实现了对钢板靶、



图 7 火炮发射一体化弹丸试验

Fig. 7 Artillery launch ILP experiment

钢筋混凝土、车辆以及弹道导弹的毁伤,初步验证了一体化动能弹的毁伤效能,为一体化制导弹丸的毁伤效能研究奠定了基础。

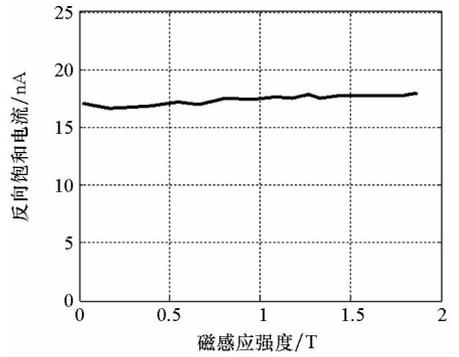
1.3.3 弹载器件抗强磁场试验研究

2005 年,美国陆军武器研究发展中心 (Army armament Research and Development Engineering Center, ARDEC) 利用 22 mm × 44 mm 口径发射装置进行了电子手表、保险丝、机电引信等典型电子器件的抗强磁场性能考核试验。测试结果表明:在电枢位置峰值磁场达 4 T 以上的磁场环境中,器件均完好无损,可正常工作;2009 年,意大利比萨大学的 Ciolini 等进行了电磁发射弹丸静态通电实验,将电子元器件置于该磁场环境中,实验后,大部分电子元件在炮口强电磁环境下受到破坏而失效^[32]。

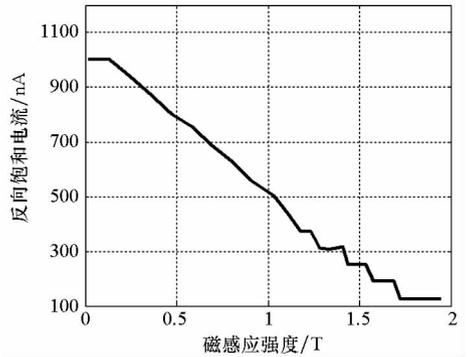
此外,ISL 利用“PEGASUS”电磁发射器,进行了一系列电子器件抗强磁场试验,验证了发射电磁环境对电子设备的影响。其中 Ciolini 等组织了两个试验,试验结果表明:电子腕表在峰值为 4.1 T 磁场环境下有明显损坏,DDR2 - RAM 内存条在峰值为 10 T 的磁场环境下明显损坏。

Hundertmark 等在弹上安装商业用低功耗无线收发模块,并进行了一系列发射实验以验证电磁发射环境下无线传输数据的可行性^[33]。实验结果初步证明了在低能级电磁发射过程中,弹载低功耗无线传输设备用以传输传感器数据是可行的。目前未见大电流、高初速实验结果的公开报道。

国内兰州大学的张国宾等针对强磁场(包括恒磁场、脉冲磁场和交变磁场)对基本元器件、敏感器件、典型电子线路工作状态的影响(其中包括二极管、三极管、CMOS、电阻、电容、磁敏元件等),进行了试验研究和理论分析两方面的工作^[34],但其研究的磁场强度范围在 2.5 T 以下,与电磁发射弹丸弹载器件的最大工作磁场强度相差较大,如图 8 所示。



(a) Si 基二极管
(a) Si based diode



(b) Ge 基二极管
(b) Ge based diode

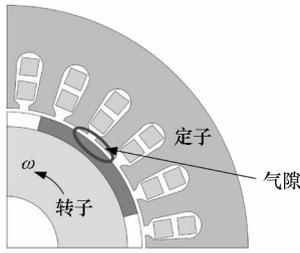
图 8 恒定磁场对二极管反向饱和电流的影响
Fig. 8 Effect of constant magnetic field on reverse saturation current of diode

2 面临的问题

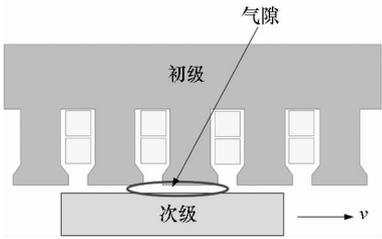
2.1 基础理论

2.1.1 多物理场强耦合分析

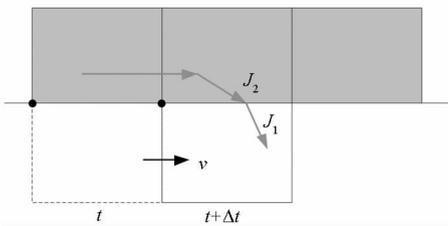
由于电磁轨道发射带来的滑动电接触问题与常规的旋转电机和直线电机的运动问题存在显著的差异,如图 9 所示,而现有的商业有限元软件尚不具备动态发射工况下的电磁场仿真能力,因此电磁发射弹丸动态发射过程的电磁场数值模拟一直是国内外学者研究的重点和热点之一。对于高速运动带来的麦克斯韦方程组求解问题,存在以下难点:①高速将使方程的 Peclet 数(用于衡量对流项在方程中主导程度的无量纲参数,与速度成正比)增大,使控制方程离散后形成的方程组矩阵性态变差,导致数值解出现物理上并不存在的“伪振荡”^[35];②电磁场与运动场时间尺度上的差异性也导致了时间步长的确定难度较大,导轨和电枢之间的相对运动带来的网格变形或畸变问题使得求解处理的难度较大。



(a) 旋转电机转动问题
(a) Problem of rotary motor



(b) 直线电机运动问题
(b) Problem of linear motor



(c) 电磁轨道发射滑动电接触问题
(c) Sliding electric contact problem of EM rail launch

图9 三种典型电机运动过程

Fig. 9 Motion process of three typical electric machines

2.1.2 高能级炮口拉弧研究

电磁发射一体化弹丸出膛后,由于电流回路断开,在导轨两端形成高压击穿空气,产生特有的高温高压高速电弧,进而引起炮口流场、磁场的变化,对弹体姿态和弹托分离过程造成一定影响,如图10所示。因此,需要建立弹托、弹体的电弧-气动耦合模型,分析炮口弧对弹托分离过程以及弹丸出膛后姿态和速度的影响,为电磁发射弹丸的外弹道设计提供依据。



图10 电磁发射装置炮口拉弧
Fig. 10 Muzzle arc of EM launcher

此外,炮口电弧转移过程很短,导致炮口磁场

变化剧烈,会在弹丸金属部分形成较强的感应电压和电场,从而对弹载器件性能造成影响^[36]。因此,需要分析炮口拉弧引起的弹上磁场分布特性的变化,为弹载器件的布局和设计提供依据。目前国内外在空气电弧方面的研究较多,但对高能级炮口拉弧方面的研究报道几乎没有,更没有针对炮口拉弧对电磁发射弹丸的弹载器件布局和外弹道设计的影响进行分析。

2.1.3 大空域、宽速域气动仿真

相比于传统炮弹,电磁发射弹丸最远射程可达200 km以上,最大射高可达100 km以上,整个飞行过程伴随复杂的流动现象并伴随剧烈变化的温升,如图11所示(10°低弹道时飞行时间短,图中仅有0~75 s以内的数据)。目前标准大气仅覆盖了30 km以下的大气密度,使得远程弹道的仿真面临空气密度参数无法精确获得的问题。

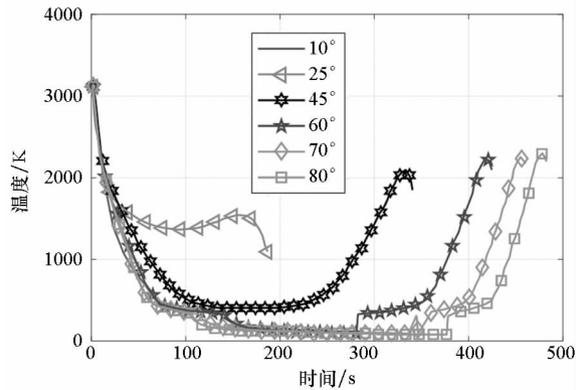


图11 不同射角下驻点处表面温度

Fig. 11 Surface temperature at the stagnation point for the different launching angles

此外,电磁发射弹丸炮口初速在6马赫左右,零海拔高动压导致炮弹飞出时温度快速增加,引起化学反应和辐射等现象,薄激波层、强黏性干扰等流动现象都对气动特性产生较大的影响,使得远程弹道的仿真面临气动系数无法精确获得的问题。因此,若要精确仿真得到电磁发射弹丸的飞行外弹道,一方面需要扩大高空大气密度数据表范围,另一方面需要提高气动系数仿真精度。

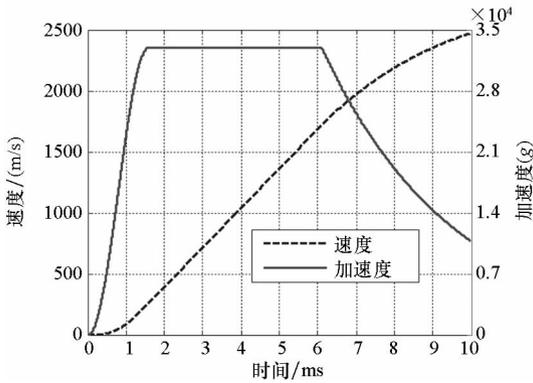
2.2 关键技术

2.2.1 弹载器件抗高过载、强磁场技术

弹载器件抗过载能力取决于其结构和灌封工艺。2015年,胡陈君设计了一种嵌入式一体化微惯性测量组合结构,通过了峰值10 349.08g,持续时间0.08 ms的过载验证^[37];2016年,蒋鹏通过结构设计和灌封处理,设计了一款抗过载能力10 552g,持续时间6 ms的微惯性测量单元^[38],但

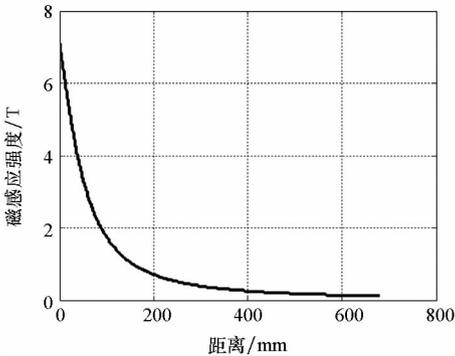
距离电磁轨道发射弹丸的 30 000g 过载需求仍有很大差距^[28]。

随着弹丸技术的进一步发展,器件抗强磁场能力已成为制约制导器件应用于电磁发射弹丸的一项重要考核指标,图 12 所示为弹丸在膛内承受的过载以及磁场变化曲线。国外针对电子元器件的抗强磁场性能进行了初步研究,但实验过程中磁场环境与实际发射相差甚远,实验结果不足以指导电磁发射弹载器件的研制。而国内对电磁发射弹丸内部的磁场环境的研究尚处于仿真分析阶段,未针对真实电磁发射磁场环境模拟技术以及真实电磁发射磁场环境下的弹载器件的磁屏蔽设计进行深入研究。



(a) 弹丸膛内运动曲线

(a) Motion curve of projectile in the bore



(b) 弹丸中轴线磁感应强度

(b) Magnetic induction intensity at central line of projectile

图 12 弹载器件的内膛环境

Fig. 12 In-bore environment of onboard devices

针对上述现状,文献[39-40]在已有脉冲功率电源的基础上设计并搭建了能够模拟电磁发射弹丸膛内磁场分布特性的线圈式磁场发生器,具备了开展一体化弹丸弹载器件抗强磁场性能考核试验及其相关磁屏蔽设计验证的条件,如图 13 所示。

2.2.2 高效毁伤战斗部技术

目前战斗部的设计主要有两种:①动能战斗



指标名称	指标实现
中心磁感应强度	>8 T
磁场变化率	>2800 T/s
持续时间	>6 ms@5 T

图 13 磁场发生器实物图及其指标

Fig. 13 Photograph and index of the magnetic generator

部,仅依靠弹体的动能进行毁伤;②杀爆战斗部,通过引信引爆装药战斗部,起爆装药,形成破片,对目标进行毁伤。电磁发射一体化弹丸具有初速大、体积小、质量轻的特点,且两者之间存在一定的矛盾关系,即在能级一定的前提下,初速越大必然导致弹丸的体积和重量减小。并且,一体化弹丸战斗部一般采用截锥形结构,其内部空间利用率进一步降低。因此若要对目标的毁伤效能最大化,需要从结构、材料、杀伤元抛撒方式等方面对战斗部进行高效设计,充分利用电磁发射弹丸存速大的优势。

2.2.3 弹丸出口扰动抑制技术

传统火炮的炮口扰动主要是由于身管变形以及弹炮间隙带来的弹炮碰撞造成的^[41]。电磁发射一体化弹丸采用电枢取代了火药筒,电枢与导轨过盈配合,但由于发射过程中电枢会发生软化,因此弹炮之间的碰撞相比传统火炮要强烈。受重力影响,电磁发射装置存在初始挠度,且电枢运动处存在对接触导轨的电磁扩张力,致使导轨形变进一步增大,如图 14 所示。此外,电磁发射弹丸出膛虽然没有火药燃气的后效推进过程,但会受到炮口高速、高温、高压拉弧的扰动。

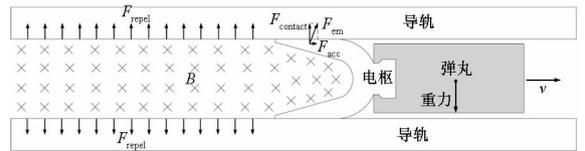


图 14 电磁发射弹丸膛内受力分布

Fig. 14 In-bore force distribution of EM launch projectile

为了减小电磁发射弹丸的出口扰动,首先要建立电磁发射弹丸出口扰动模型,但电磁发射弹丸的炮口扰动来源与传统火炮存在本质的区别,这导致无法直接借用传统火炮的炮口扰动结论或分析方法分析电磁发射弹丸的炮口扰动。其次,理论上通过减小弹炮间隙可以起到限制弹丸膛内振动的作用,但由于电磁发射过程中,身管内壁受到高温高压的等离子体电弧的作用产生烧蚀和变形,并与电枢之间产生摩擦磨损,导致内膛尺寸发生变化^[42],从而使得弹炮匹配难度很大。

因此,若要准确抑制电磁发射弹丸的出口扰动,首先需要摸清导轨的烧蚀和磨损机理,其次选择合适的表面涂层技术减小导轨的磨损,最后建立考虑电枢、弹体和导轨动态受力的内弹道动力学仿真模型,分析影响弹丸出口扰动的主要因素,制定相应的改进措施。

2.2.4 制导控制技术

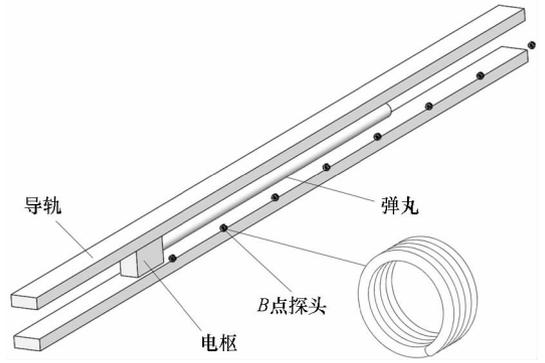
电磁发射弹丸在飞行过程中,短时间内跨越了从高空到低空、从高超声速到超声速的剧变过程,炮弹的飞行速度、高度等参数变化剧烈,制导弹的运动方程表现出强烈的多变量耦合和非线性,大气密度偏差大造成气动参数偏差大等特点,这些不确定性给控制律的设计带来了扰动。同时,由于电磁发射一体化弹丸速度快、体积小,对弹丸的跟踪精度提出了更高的要求。因此,为了实现电磁发射弹丸的精确制导和控制,首先要提高弹丸本身的定位精度,其次选择鲁棒性更强的控制算法。

2.3 测量方法

2.3.1 弹丸内膛运动状态测量

传统火炮的弹丸内膛运动状态测量方法主要包括多普勒雷达、光学杠杆等^[43-44],如图15(a)所示。电磁发射弹丸在发射过程中膛内存在等离子体弧光,且在弹丸前方存在高温高压正激波,导致膛内铝屑被扬起,这些特有的现象导致传统的弹丸内膛运动状态测量方法不能被直接应用于电磁发射弹丸的内膛运动状态测量。

目前应用比较成熟的弹丸内膛道测量方法主要采用B点探头^[45-46],但现有的B点探头仅适用于弹丸速度的测量,远没有达到测量弹丸内膛运动姿态的要求,如图15(b)所示。因此,针对内膛测量方法的缺陷,结合电磁发射弹丸特有的膛内运行环境,寻求一种更为有效的弹丸内膛运动状态测量方法十分必要,如在身管两侧对称布



(b) B点探头测量膛内速度原理

(b) Principle of measuring in-bore velocity B-dot probe

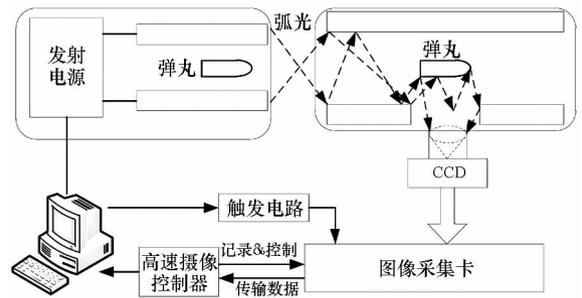
图15 弹丸内膛运动状态测量方法

Fig. 15 Method for measuring the in-bore motion state of projectile

置三维磁探头,利用磁场差分方法测量电枢在膛内的运动状态。

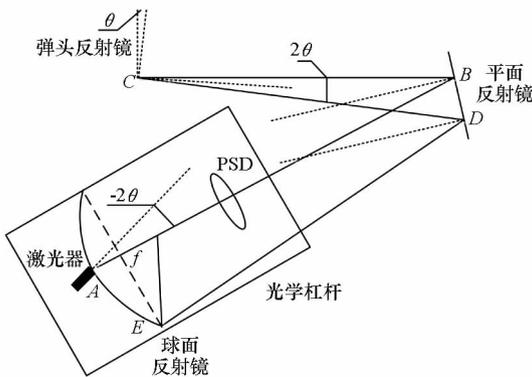
2.3.2 弹丸中间弹道测量

弹丸中间弹道测量方法主要有多普勒雷达、高速摄像、X光机等^[47],如图16所示。由于弹丸出膛瞬间炮口开始拉弧,且拉弧随着弹丸的运动而迅速膨胀,并夹杂着膛内扬起的铝屑等杂质,对



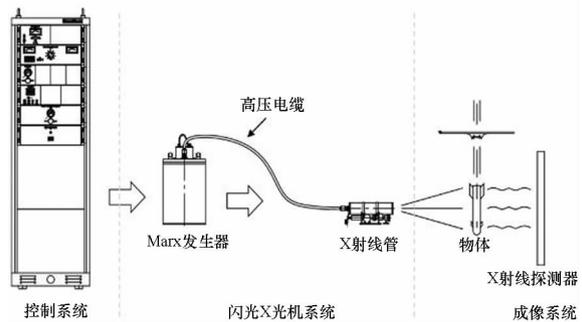
(a) 高速摄像采集系统

(a) High speed camera acquisition system



(a) 光学杠杆测量膛内振动原理

(a) Principle of measuring in-bore vibration by optical level



(b) X光机采集系统

(b) X-ray machine acquisition system

图16 弹丸中间弹道测量方法

Fig. 16 Method for measuring the intermediate ballistic of projectile

高速摄像采集以及多普勒雷达的测量带来了很大的干扰。X 光机不受弧光的影响,但其成本巨大,且拍摄效率不高,获得的数据信息量较少。因此,需要克服电磁发射弹丸中间弹道环境带来的测量干扰,或寻求一种新的中间弹道观测手段。

2.3.3 弹丸外弹道测量

弹丸外弹道测量方法主要有便携式高速摄像机、红外摄像机、双目视觉系统和雷达等。其中光测方法用于视距内的外弹道测量,超视距外弹道测量主要采用毫米波雷达,但由于电磁发射一体化弹丸体积小,反射面积很小,飞行速度极高,射程可达 200 km,对雷达探测系统的探测精度、工作频率以及雷达波辐射功率都提出了很高的要求。因此,需要通过发展新体系、新体制、新频段、新处理技术,提高雷达灵敏度,增加探测距离,提高对高超声速目标的跟踪稳定性,改善对远程小尺寸目标的分辨率^[48]。

3 解决思路

1) 提升理论认知水平,完善理论分析体系。电磁发射一体化弹丸研究涉及电磁学、热学、流体动力学和结构力学等多学科的交叉融合,并且是集储能电源、发射装置、总体控制系统、检测系统及材料设计为一体的复杂大系统。因此在研制过程中会遇到很多理论不好解释和工程难以克服的问题,这就要求研究人员从多学科的角度去分析问题,提升理论认知水平,在认知的过程中不断总结,形成电磁发射一体化弹丸研究理论体系,为后续的研究提供借鉴。

2) 提高技术实现能力,完备技术实现方法。电磁发射弹丸的概念从诞生起到现在已有百年历史,但到目前为止仍然没有相关武器列装,除了缺乏完整的理论研究体系外,更多的是技术方面的实现较为困难。对于一种新型武器的技术实现方法,不能照搬传统的方法,而需要大胆创新,努力提高其技术实现能力,同时要多种方法、多种技术同时推进,完备电磁发射弹丸的技术实现方法,加快推进电磁发射弹丸的研制进度。

3) 立足现有技术储备,着眼未来科技突破。任何新型武器从出现到应用都是一个从无到有,从起步到成熟的过程,其研制过程必然会历经曲折,有些关键技术的突破在短期内甚至无法完成,这就要求研究人员要以发展的眼光看待当前面临的困难。一方面要认识到电磁发射一体化弹丸在短期内难以实现列装,因为其应用还需要相关配套系统的建设以及作战理论的更新。另一方面,

要充分利用已有的技术储备,稳步推进电磁发射弹丸的研制,同时不要局限于现有的技术储备,要积极牵引相关行业领域的关键技术攻关,相信在不远的未来,科技难关的突破都指日可待。

参考文献 (References)

- [1] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995: 1-15.
WANG Ying, XIAO Feng. The principle of electrical gun[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 1-15. (in Chinese)
- [2] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [3] Hsieh K T, Kim B K. Implementing tri-potential approach in EMAP3D [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1): 166-169.
- [4] Shatoff H, Pearson D A, Kull A E. Simulation of dynamic armature motion in a railgun with coupling of electromagnetic, thermal and structural effects using shifted finite element fields[C]//Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference, 2005: 253-256.
- [5] Rodger D, Lai H C. A comparison of formulations for 3D finite element modeling of electromagnetic launchers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 135-138.
- [6] Lin Q H, Li B M. Numerical simulation of interior ballistic process of railgun based on the multi-field coupled model[J]. Defence Technology, 2016, 12: 101-105.
- [7] Tan S, Lu J Y. A new finite-element method to deal with motion problem of electromagnetic rail launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1374-1379.
- [8] Wang G H, Xie L, He Y, et al. Moving mesh FE/BE hybrid simulation of electromagnetic field evolution for railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(8): 1424-1428.
- [9] 张洋,白保东,谢德馨. 三维瞬态涡流-电路-运动系统耦合问题的新解法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 139-144.
ZHANG Yang, BAI Baodong, XIE Dexin. New method to solve 3D transient electromagnetic field-circuit-motion coupling problem [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 139-144. (in Chinese)
- [10] Schmidt E M, Shear D D. Aerodynamic interference during sabot discard [J]. AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, 1978, 15(3): 162-167.
- [11] Erengil M E, Zielinski A E. Effect of electromagnetic launch on armature/sabot discard [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 67-72.
- [12] Zielinski A E, Weinacht P, Bennett J. Electromagnetic and aeromechanical analysis of sabot discard for railgun projectiles[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(2): 257-264.
- [13] Li X P, Lu J Y, Feng J H. Simulation of sabot discard for electromagnetic launch integrated projectile [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(7): 2636-

- 2641.
- [14] Satapathy S S, McNab I R, Erengil M E, et al. Design of an 8-MJ integrated launch package [C]//Proceedings of 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2005: 405-410.
- [15] Hundertmark S, Lancelle D. A scenario for a future European shipboard railgun [C]//Proceedings of 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2014: 1-4.
- [16] Skurdal B D, Gaigler R L. Multimission electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 458-461.
- [17] 尚晓兵. 电磁轨道炮外弹道射击精度分析与评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
SHANG Xiaobing. Research on firing accuracy analysis and evaluation techniques of electromagnetic railgun exterior ballistic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] Xie Y L, Ma P, Yang M. Modeling and simulation of exterior trajectory of electromagnetic railgun [J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 46-50.
- [19] McNab I R, Crawford M T, Satapathy S S, et al. IAT armature development [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 442-451.
- [20] Price J H, Fuicher C W G, Ingram M W, et al. Design and testing of solid armatures for large-bore railguns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(1): 467-473.
- [21] Zowarka R C, Yun H D, Alexander A. Railgun solid armature scaling model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 169-173.
- [22] 冯登, 夏胜国, 陈立学, 等. 基于过盈配合的C形电枢轨道初始接触特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1077-1083.
FENG Deng, XIA Shengguo, CHEN Lixue, et al. Characteristics analysis of the initial contact between C-shaped armature and rail based on interference fit[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1077-1083. (in Chinese)
- [23] 李白, 鲁军勇, 谭赛, 等. 一种多因素作用下的C形固体电枢优化设计方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2870-2875.
LI Bai, LU Junyong, TAN Sai, et al. An optimal method under the effect of a multi-factor for C-shaped solid armature[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2870-2875. (in Chinese)
- [24] Tadjdeh Y. Navy's electromagnetic railgun project progressing (UPDATED) [EB/OL]. [2018-12-01]. <http://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2017/6/15/navys-electromagnetic-railgun-project-progressing>.
- [25] Fair H D. Progress in electromagnetic launch science and technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 93-98.
- [26] O'Rourke R. Navy lasers, railgun, and hypervelocity projectile; background and issues for congress [R]. USA: Congressional Research Service Washington United States, 2017.
- [27] Li B M, Lin Q H. Analysis and discussion on launching mechanism and tactical electromagnetic railgun technology[J]. Defence Technology, 2018, 14: 484-495.
- [28] 李湘平, 鲁军勇, 李玉, 等. 电磁发射弹丸膛内磁场分布特性的三维数值分析[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(8): 34-40.
- LI Xiangping, LU Junyong, LI Yu, et al. 3-D numerical analysis of distribution characteristics of electromagnetic launcher projectile in-bore magnetic field [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(8): 34-40. (in Chinese)
- [29] 李湘平, 鲁军勇, 李玉, 等. 基于解析法的电磁发射弹丸膛内磁场分布特性分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2205-2211.
LI Xiangping, LU Junyong, LI Yu, et al. Analysis of distribution characteristics of in-bore magnetic field of electromagnetically launched projectile based on analytical method [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12): 2205-2211. (in Chinese)
- [30] Du P P, Lu J Y, Li K. Dynamic response of electromagnetic rail launcher due to projectile motion [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5): 2166-2171.
- [31] 鲁军勇, 杜佩佩, 冯军红, 等. 电磁轨道发射器临界速度仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 1862-1869.
LU Junyong, DU Peipei, FENG Junhong, et al. Simulation study on critical velocity of electromagnetic railgun launcher [J]. Proceedings of CSEE, 2019, 39(7): 1862-1869. (in Chinese)
- [32] Ciolini R, Schneider M, Tellini B. The use of electronic components in railgun projectiles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 578-583.
- [33] Hundertmark S, Kauffmann T, Vincent G. Experimental investigation of a UHF radio link to a railgun projectile [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(9): 2232-2236.
- [34] 张国宾. 强磁场对典型电子器件影响机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
ZHANG Guobin. Investigation of the influence of intense magnetic field on electric devices [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese)
- [35] 张惠娟. 运动电磁系统涡流场有限元研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2000.
ZHANG Huijuan. The study of the moving conductor eddy current problems by the finite element method [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [36] Mallic K J. Phenomenological electromagnetic modeling of laminated-containment launchers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 359-363.
- [37] 胡陈君. 弹载小型抗高过载微惯性测量系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2015.
HU Chenjun. Design of micro inertial measurement system for miniature projectile-based equipment against high overload [D]. Taiyuan: North University of China, 2015. (in Chinese)
- [38] 蒋腾. 抗高过载微惯性测量单元设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
JIANG Peng. Design and analysis of micro inertial measurement unit against high overload [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [39] 戴宇峰, 鲁军勇, 张晓, 等. 脉冲功率电源连续发射水冷模拟负载[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 6-11.
DAI Yufeng, LU Junyong, ZHANG Xiao, et al. Water-cooling simulated resistance for continuously launching pulsed power supply [J]. Journal of National University of Defense

Technology, 2016, 38(6): 6 - 11. (in Chinese)

[40] 朱博峰, 鲁军勇, 王杰. 轻小型脉冲电源驱动的电磁发射系统建模[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(z1): 100 - 104.
ZHU Bofeng, LU Junyong, WANG Jie. Modeling of electromagnetic launch system driven by CPA[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(z1): 100 - 104. (in Chinese)

[41] 邓辉咏, 马吉胜, 刘海平. 弹丸前定心部间隙对炮口扰动规律仿真研究[J]. 科技通报, 2013, 29(1): 93 - 97.
DENG Huiyong, MA Jisheng, LIU Haiping. Research on muzzle disturbance considering backlash between projectile foreside and rifle[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(1): 93 - 97. (in Chinese)

[42] 邱刚, 刘贵民. 4340 钢表面热喷涂 Mo 涂层的制备与力学性能研究[J]. 信息系统工程, 2018(1): 112 - 114.
QIU Gang, LIU Guimin. Research on preparation and mechanical properties of coating comprised of Mo sprayed thermally on surface of 4340 steel[J]. Information Systems Engineering, 2018(1): 112 - 114. (in Chinese)

[43] 程诚, 宋盛义, 关永超, 等. 多普勒雷达测量电磁轨道炮内弹道速度[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 77 - 80.
CHENG Cheng, SONG Shengyi, GUAN Yongchao, et al. Electromagnetic railgun in-bore velocity measurement with microwave Doppler radar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 77 - 80. (in Chinese)

[44] 陆文广, 芮筱亭, 顾金良, 等. 弹丸膛内姿态与纵向运动测试与分析[J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 149 - 153.
LU Wenguang, RUI Xiaoting, GU Jinliang, et al. Test and analysis of attitude and movement of projectile in bore[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(1): 149 - 153. (in Chinese)

[45] 李玉, 李湘平, 武晓康. 基于磁探针阵列的电磁发射内膛速度拟合方法[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(z1): 31 - 34.
LI Yu, LI Xiangping, WU Xiaokang. In-bore velocity fitting algorithm for electromagnetic launch using magnetic probe array[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(z1): 31 - 34. (in Chinese)

[46] Li X P, Lu J Y, Feng J H, et al. Modeling for the calculation of interior ballistic velocity of electromagnetic rail launch projectile[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 807 - 813.

[47] 杨培艳. 基于图像处理的电磁轨道炮弹道研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
YANG Peiyan. Research of electromagnetic railgun ballistic based on image processing [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012. (in Chinese)

[48] 王建明. 面向下一代战争的雷达系统与技术[J]. 现代雷达, 2017, 39(12): 1 - 11.
WANG Jianming. Radar systems and radar technologies for next generation of warfare [J]. Modern Radar, 2017, 39(12): 1 - 11. (in Chinese)