

文章编号: 1001- 2486(2009) 05- 0070- 05

轨道- 线圈复合型电磁炮交叉作用研究*

刘彦鹏, 杨丽佳, 刘振祥, 欧阳建明
(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研究了轨道- 线圈复合型电磁炮的驱动力、轨道- 线圈交叉作用及其对系统性能的影响, 提出了改进型的四轨复合炮。理论分析与数值计算表明: 在普通的双轨复合炮中, 交叉作用会使弹丸与炮管间存在较大的横向压力, 导致弹丸运动不稳定及产生摩擦阻力, 而四轨复合炮基本消除了交叉作用的不利影响, 系统性能显著优于双轨复合炮。

关键词: 轨道炮; 线圈炮; 复合型电磁炮; 轨道- 线圈交叉作用
中图分类号: O441 **文献标识码:** A

Study on the Cross Interaction of Rail-coil Combined Electromagnetic Gun

LIU Yan-peng, YANG Li-jia, LIU Zhen-xiang, OUYANG Jian-ming
(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The drive force, the rail-coil cross interaction and the system performance of the rail-coil combined electromagnetic gun have been researched, and an improved structure with four rails distributed symmetrically has been proposed. The theoretical analysis and numerical computation of the structure show that the rail-coil cross interaction brings considerable transverse pressure and motion instability to the normal two-rail combined EM gun, while the four-rail combined EM gun successfully eliminates the negative effect of the cross interaction and obtains much better performance.

Key words: railgun; coilgun; combined electromagnetic gun; rail-coil cross interaction

电磁炮是利用磁力使弹丸加速的新概念武器, 轨道炮和线圈炮是它的两种基本类型。轨道炮一般由两条平行导轨和电枢组成一个电流回路, 利用导轨激发的磁场对电枢内电流的安培力使弹丸加速, 需要较大的电流, 烧蚀现象比较严重^[1], 适合将质量较小的弹丸加速至高速。线圈炮则利用驱动线圈磁场对筒形弹丸上环形电流的磁力作用工作, 通常采用多级加速, 适于发射大质量载荷^[2]。

近年来, 一些学者提出了轨道- 线圈复合型电磁炮^[3-4], 利用轨道炮和线圈炮两种加速机制共同作用, 使较重的弹丸获得相对较高的出口速度。复合炮的大体结构如图 1(只画出了单级驱动线圈)所示, 导轨和驱动线圈固定, 弹丸由连在一起的两部分组成。其中铝块是轨道炮单独存在时的弹丸(也可采用其它良导体材料制作), 与左右两条导轨组成复合炮的轨道炮部分。弹丸线圈是线圈炮单独存在时的弹丸, 与驱动线圈一起组成线圈炮部分。目前, 国内外对复合炮的研究较少, 已有的文献倾向于把它当作轨道炮和线圈炮的简单相加, 而未对复合后出现的新问题进行分析^[3-5]。为了对复合炮有全面的认识, 改进它可能存在的不足, 提高复合炮的性能, 本文对复合炮的机理进行研究, 着重分析复合情况下由轨道炮和线圈炮相互作用带来的新机制, 并设法解决复合炮存在的新问题。

1 普通双轨复合炮弹丸所受各项作用分析

如图 1, 以驱动线圈中心为原点, 弹丸运动方向为 x 轴正向建立坐标系, 则线圈炮部分关于 x 轴是对称的, 以 x 轴为对称轴建立柱坐标系是方便的。图中“右边”指面朝弹丸运动方向时右侧, 左边导轨

* 收稿日期: 2009- 02- 11
基金项目: 国防科技大学校基金资助项目(CX06- 02- 01)
作者简介: 刘彦鹏(1983-), 男, 博士生。

虽未画出,但可判断出左边导轨内电流沿 x 轴正向。用 e 加下标表示各方向的单位矢量。

弹丸所受磁场力可按安培力公式计算,即

$$\mathbf{F}_m = \int_{\Omega_p} \mathbf{j} \times \mathbf{B}_0 dV \quad (1)$$

其中 Ω_p 表示弹丸所占空间区域, \mathbf{j} 表示电流密度,因弹丸自身的磁场对它只有内力作用,积分为 0,故 \mathbf{B}_0 指弹丸所处外场的磁感应强度,此处即导轨和驱动线圈激发的磁场。导轨激发的磁感应强度用 \mathbf{B}_{r0} 表示,在炮管内主要沿 z 轴负向;驱动线圈的磁感应强度用 $\mathbf{B}_{\rho 0}$ 表示,它关于 x 轴对称,设其轴向分量为 $B_x e_x$,径向分量为 $B_{\rho} e_{\rho}$,则

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_{r0} + \mathbf{B}_{\rho 0} = \mathbf{B}_{r0} + B_x e_x + B_{\rho} e_{\rho} \quad (2)$$

1.1 弹丸所受的驱动力

弹丸所受驱动力为铝块和弹丸线圈所受磁场力沿 x 轴分量之和,即

$$\mathbf{F}_{mx} e_x = \int_{\Omega_r} \mathbf{j}_r \times \mathbf{B}_{r0} dV + \int_{\Omega_c} \mathbf{j}_c \times B_{\rho} e_{\rho} dV \quad (3)$$

\mathbf{j}_r 为铝块内的电流密度, \mathbf{j}_c 为弹丸线圈内电流密度, Ω_r , Ω_c 分别是铝块和弹丸线圈所占空间区域。式(3)右边第一项是轨道炮单独存在时弹丸的驱动力,记为 \mathbf{F}_{ra} ;第二项是驱动线圈磁场的径向分量对弹丸线圈的作用,正是线圈炮单独存在时弹丸的驱动力,记为 \mathbf{F}_{ca} 。可见复合炮弹丸所受的驱动力是轨道炮与线圈炮驱动力的总和,即 $\mathbf{F}_{mx} e_x = \mathbf{F}_{ra} + \mathbf{F}_{ca}$ 。

1.2 轨道-线圈交叉作用分析

除了驱动力外,复合炮还存在驱动线圈的磁场对铝块的磁场力作用和导轨磁场对弹丸线圈的磁场力作用,它们是由轨道炮和线圈炮复合引起的,统称为轨道-线圈交叉作用。

驱动线圈磁场的轴向分量对铝块的作用力沿 e_z 方向,记此力为 \mathbf{F}_{rz} ,则

$$\mathbf{F}_{rz} = \int_{\Omega_r} \mathbf{j}_r \times B_x e_x dV \quad (4)$$

驱动线圈磁场的径向分量对铝块内电流的作用力积分为零,但力矩不为零,记此力矩为 $M_{r\rho}$,则

$$\mathbf{M}_{r\rho} = \int_{\Omega_r} \mathbf{r} \times \mathbf{j}_r \times B_{\rho} e_{\rho} dV \quad (5)$$

\mathbf{r} 为空间位置矢量。两条导轨激发的磁场对弹丸线圈内电流的作用力密度在弹丸线圈上半部分沿 x 轴负向,在弹丸线圈下半部分沿 x 轴正向,积分求和为零,但它的力矩 M_{qr} 也不为零

$$\mathbf{M}_{qr} = \int_{\Omega_c} \mathbf{r} \times \mathbf{j}_c \times \mathbf{B}_{r0} dV \quad (6)$$

各项作用的方向如图 2 所示。 \mathbf{F}_{rz} 作用是使弹丸压在炮管内壁。力矩 $M_{r\rho}$ 和 M_{qr} 方向相同,且不能采取方法使它们方向相反而部分相消,它们使弹丸绕 y 轴旋转,即在炮管内“翻跟斗”,由于炮管的限制,会导致弹丸两头压在炮管内壁。可见,轨道-线圈交叉作用会使弹丸与炮管间存在较大的横向压力,不仅导致弹丸受到摩擦阻力作用,还对弹丸运动的稳定性带来了不利影响。

然而,已有的复合炮文献都只对“弹丸驱动力为轨道炮与线圈炮的推力之和”作了说明,而未对轨道-线圈交叉作用加以分析^[3-5],文献[4-5]采用电感梯度法分析弹丸受力,直接因轨道炮回路和线圈炮回路的互感为零而忽略交叉作用。其实,弹丸位于炮管正中时,轨道炮回路与线圈炮回路之间的互感虽然为零,但沿 z 方向的互感梯度并不等于零,而取最大值。

2 改进型的四轨复合炮

为了消除轨道-线圈交叉作用的不利影响,本文提出一种四条导轨的轨道-线圈复合型电磁炮,简

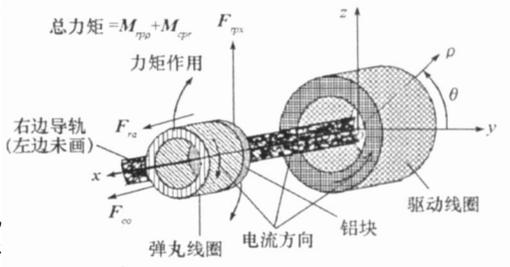


图1 复合炮的大体结构及双轨复合炮的各项作用
Fig.1 General structure of the combined EM gun and Interactions in two-rail combined EM gun

称四轨复合炮。它的设计思想是:采用对称分布的多对导轨,使轨道-线圈交叉作用在弹丸不同区域方向相反,求和互相抵消,从而使弹丸整体不受横向力和力矩作用。

2.1 四轨复合炮的结构

四轨复合炮的结构如图2所示。四条导轨在炮管圆周内对称分布,弹丸仍由圆柱形铝块和弹丸线圈组成,只是为了方便划分电流回路,用一块绝缘板将铝块分成两半。两对导轨形成两个轨道炮回路,上下回路的电流方向相反。四条导轨和驱动线圈共同作用,推动弹丸加速前进。

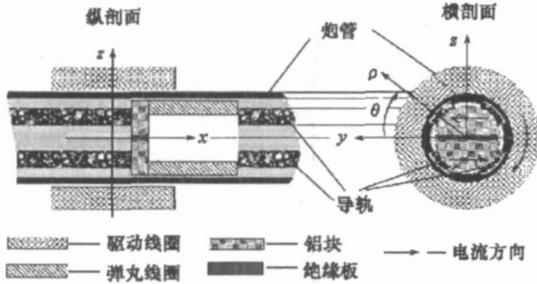


图2 四轨复合炮结构图

Fig. 2 Structure of four-rail combined EM gun

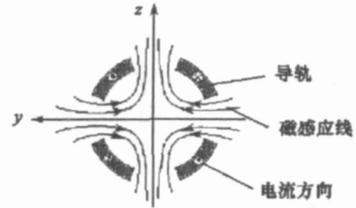


图3 四条导轨的磁感应线

Fig. 3 Flux density of four rails

2.2 四轨复合炮的交叉作用分析

坐标系的建立同前,各项作用仍按式(3)~(6)计算,只是 B_{r0} 由四条导轨共同激发。先来看交叉作用的力 F_{rx} 。在下半圆柱铝块内,其力密度沿 z 轴正向,而在上半圆柱铝块内,其力密度沿 z 轴负向,由体系的对称性可知 $F_{rx} = 0$ 。

驱动线圈磁场的径向分量对铝块的作用在铝块上下区域方向相同,且沿 x 轴,对弹丸不再有力矩作用,而是加速或阻碍弹丸运动,记此力为 F_{rp} ,则

$$F_{rp} = \int_{\varphi_r} \mathbf{j}_{rp} \times B_{\rho} \mathbf{e}_{\rho} dV \quad (7)$$

因此,四轨复合炮弹丸沿方向 x 总驱动力

$$F_{mx} \mathbf{e}_x = F_{ra} + F_{co} + F_{rp} \quad (8)$$

四条导轨的磁感线如图3所示,炮管内 B_{r0} 不仅有 z 方向分量,还有 y 方向的分量,并具有一定的对称性,可以看出, $\mathbf{j}_{cp} \times B_{r0}$ 在下边两条导轨间和上边两条导轨间都沿 x 轴正向,而在左边导轨间和右边导轨间却沿 x 轴负向,合力与合力矩都为零,只是对弹丸线圈产生了扭曲力作用。

可见,四轨复合炮使轨道-线圈交叉作用在弹丸不同区域间互相抵消,若弹丸运动过程中始终位于炮管正中,理论上弹丸不会受到非炮管方向的作用力和力矩。因此,四轨复合炮不会有轨道-线圈交叉作用引起的炮管压力,基本消除了交叉作用对弹丸运动的不利影响。

3 复合炮弹丸所受各项作用的计算

3.1 复合炮的结构参数

如图4所示, l 、 r 、 h 分别表示线圈的长度、内半径、厚度, R_0 为弹丸外半径, p 为铝块的厚度, i 为四轨复合炮铝块中间绝缘板的厚度,导轨起始端的横坐标为 a ,弹丸质量为 m_p ,以弹丸尾部的横坐标来表示弹丸的位置 x_p 。部分结构参数的取值见表1。线圈采用直径为 2.1mm 的漆包线绕制,驱动线圈绕 10 层,每层 40 匝;弹丸线圈绕 3 层,每层 38 圈。双轨复合炮每条导轨圆弧所对应的圆心角为 $\pi/3$,四轨复合

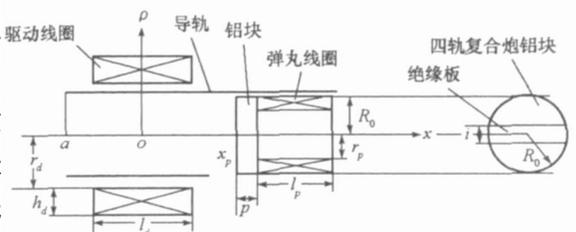


图4 复合炮结构参量

Fig. 4 Structure parameters

炮的相应值为 $\pi/4$, 在炮管圆周内的分布分别如图 1 和图 3 所示, 导轨的厚度都为 1mm。

表 1 复合炮结构参数的取值

Tab. 1 The value of structure parameters

l_d	r_d	h_d	l_p	r_p	R_0	p	i	a	m_p
84mm	15mm	20 1mm	79.8mm	7.26mm	13mm	10.5mm	8mm	-10cm	250g

设弹丸线圈与驱动线圈串联(电刷换向), 电流大小为 I_{co} , 各条导轨的电流大小都为 I_{ra} , 导轨和铝块内电流近似均匀分布。线圈的电流只能沿漆包线的环境方向, 由毕奥-萨伐尔定律可得导轨和驱动线圈磁场在炮管内的分布。有了外场的磁感应强度分布和弹丸内的电流分布后, 利用计算机程序进行数值积分即可算出弹丸所受的各项作用的大小。

3.2 计算结果

数值计算选取弹丸位置范围为 $[-49.35\text{mm}, 120.75\text{mm}]$, 也就是弹丸被导轨和驱动线圈复合加速的区间。取各条导轨的电流为 50kA, 线圈的电流为 1.0kA, 计算结果如下。

如图 5, 双轨复合炮的 z 方向磁场力较大, 而四轨复合炮的则几乎为零。四轨复合炮中沿 x 轴的力 $F_{\rho\rho}$ 由负变为正, 对弹丸的驱动力有一定的影响。由图 6 可见, 四轨复合炮交叉作用的力矩也为零。交叉作用的结果是引起弹丸与炮管间的压力, 进而产生摩擦力阻碍弹丸加速。由平衡原理可确定压力的大小, 如图 7 所示。四轨复合炮有两个电流方向相反的轨道炮回路, 其驱动力的轨道炮项约是双轨复合炮的 1.66 倍, 再加上摩擦力的影响, 双轨复合炮的加速力显著小于四轨复合炮。

可见, 四轨复合炮有效地消除了轨道-线圈交叉作用的不利影响。与之相比, 双轨复合炮不仅加速力低, 而且较大的炮管压力导致系统运行的不稳定因素增加, 如弹丸在运动过程中发生抖动, 炮管、导轨、弹丸表面产生磨损或划伤, 在高速电磁发射中甚至会破坏导轨、弹丸及炮管。

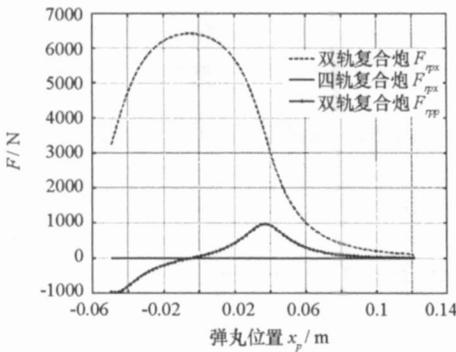


图 5 复合炮交叉作用的力
Fig. 5 The forces of cross interaction

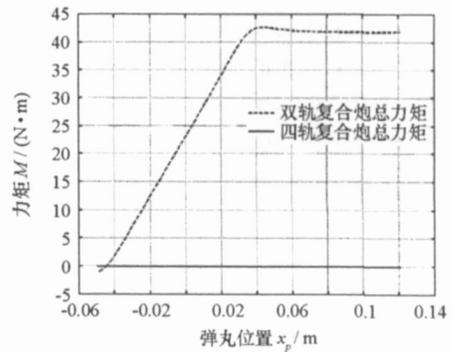


图 6 复合炮交叉作用的力矩
Fig. 6 The moments of cross interaction

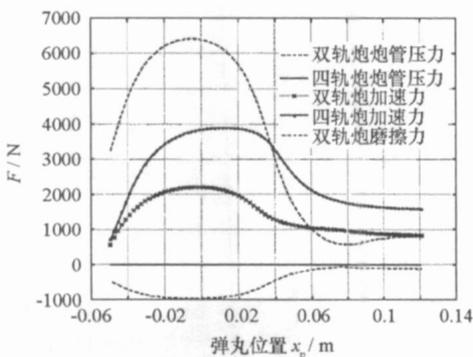


图 7 压力、摩擦力及弹丸加速力
Fig. 7 The pressure, the friction, and the accelerating force

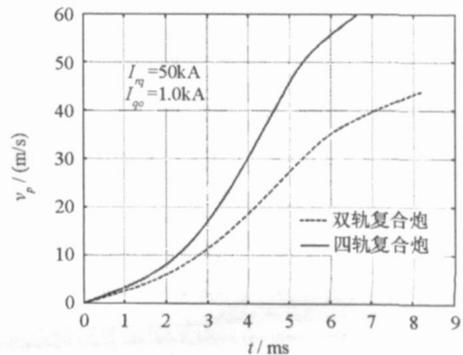


图 8 弹丸速度 VS. 时间
Fig. 8 The velocity of the projectile VS. Time

设弹丸初始时刻位于 -0.04935m 处,在磁场作用下加速运动,到达 0.12075m 处时为末时刻,则由加速力曲线可模拟恒电流条件下复合炮的发射过程。图8为初速为零的弹丸速度曲线,四轨复合炮的发射效果明显优于双轨复合炮。末了时,弹丸距驱动线圈较远,相当于轨道炮单独加速,各曲线都趋于直线,而四轨复合炮的斜率高于双轨复合炮。弹丸最终获得的动能及来源见表2,四轨复合炮的交叉作用 $F_{p\rho}$ 对动能的贡献为正,总动能也显著大于双轨复合炮,其能量利用率为双轨复合炮的1.5倍。可见,除了结构稍复杂外,四轨复合炮的各方面性能均显著优于双轨炮。

表2 各项作用对弹丸动能的贡献

Tab.2 Contribution of each force to the kinetic energy of projectile

	轨道炮项	线圈炮项	摩擦力项	$F_{p\rho}$ 项	总动能
双轨复合炮	156.5J	170.2J	-85.6J	0	241.1J
四轨复合炮	260.9J	170.2J	0	18.4J	449.5J

4 结论

本文对轨道-线圈复合炮的机理进行了研究,理论分析和数值计算得到的主要结论如下:

(1) 轨道-线圈复合炮存在轨道-线圈交叉作用;

(2) 对于普通的双轨复合炮,交叉作用的力和力矩不仅使弹丸与炮管间存在较大的横向压力,导致弹丸运动不稳定,而且还引起摩擦力,阻碍弹丸加速;

(3) 提出了改进型的四轨复合炮,不仅基本消除了交叉作用的不利影响,且在相同电流条件下四条导轨提供了更大的驱动力,弹丸获得的动能显著高于双轨复合炮。

参考文献:

- [1] Cooper K P, Jones H N, Meger R A. Analysis of Railgun Barrel Material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 120-125.
- [2] Aubuchont M S, Lockner T R, Turman B N. Results from Sandia National Laboratories/Lockheed Martin Electromagnetic Missile Launcher(EMML) [C]// 15th IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, USA, 2005.
- [3] Bamada S, Musolino A, Raugi M, et al. Analysis of the Performance of a Combined Coil-rail Launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 103-107.
- [4] Yang S, Wang Y, Cui S, et al. A Novel Type Rail-coil Hybrid Electromagnetic Launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 103-107.
- [5] 张朝伟,李治源,程树康,等.一种轨道-线圈混合发射器的原理与性能分析[J]. 微特电机, 2005(10): 24-26.