

大载荷电磁线圈发射器相似条件研究

王 旻¹, 曹延杰², 邹本贵², 黄 达³

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001;

3. 75709 部队, 湖北 鄂州 436000)

摘要: 建立了大载荷电磁线圈发射器的数学模型, 结合相似原理推导了原型发射器与缩比模型各动态特性参数间的相似关系。根据实验条件确定了原型与缩比模型的相似比例系数并建立了 EMCLHL 缩比模型, 通过仿真计算得到的结果证明了原型和缩比模型动态特性规律呈比例关系, 且满足模型设计条件中各物理量的相似比例关系, 相似模型条件是成立的。

关键词: 大载荷; 电磁线圈; 动态特性; 相似理论; 缩比

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)08-0068-06

Research on Launcher Similar Conditions with Large Load Electromagnetic Coil

WANG Min¹, CAO Yanjie², ZOU Bengui², HUANG Da³

(1. Graduate Management Team of Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai, 264001, China;

2. Command Department of Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai, 264001, China;

3. Unit 75709, Hubei Ezhou 436000, China)

Abstract: In this paper a mathematical model of the large loads electromagnetic coil launcher is established. Based on the similar principle, the similar relationship of the dynamic characteristic parameters between the original size launcher model and the reduced scale model is derived. According to the experimental conditions the physical parameters of the prototype and the model are determined. And the prototype and the model are researched by simulation. The simulated results show that the similar reduced scale model of the large loads electromagnetic coil launcher is rational.

Key words: heavy loads; electromagnetic coil; dynamic characteristic; similar theory; reduced scale

0 引言

大载荷电磁线圈发射器(electromagnetic coil launcher for heavy loads, EMCLHL)力学结构合理, 在相同电流条件下推力大、效率高, 通过调整驱动线圈的结构尺寸以及改变驱动线圈级数的方式以满足不同发射载荷的要求, 可用来发射大体积大质量的物体, 特别适用于舰载导弹的垂直发射等国防领域, 有着巨大的应用前景^[1-4]。EMCLHL 发射过程属于毫秒量级的瞬时高压放电过程, 通过数学建模和仿真计算可以对其复杂系统特性有所了解, 但要进行更深入的研究则必须结合可靠的实验测量结果^[5-7]。然而

采用全尺寸实验装置直接进行原型实验, 规模巨大易受到实验场地限制, 准备工作繁杂且操作控制困难, 单次实验耗费昂贵, 实验重复一致性无法满足要求, 实验结果精度不高, 从而限制了 EMCLHL 的工程化应用。

为推进 EMCLHL 的发展, 克服这些局限性, 一种替代的方法是采用小尺寸实验模型进行仿真研究和实验验证^[8-9]。从相似理论的角度出发, 这种“模型”是与物理系统密切有关的装置, 可根据实际条件和需要对它仿真和实验结果的分析, 从而对物理系统即“原型”中相对应的物理量进行预测。原型的缩比模型通常按一定比例关系设计, 需要原型和缩比模型之间满足某种关系, 这种关系即为模型相似条件。再利用相似原理推得模型与原型之间的比例关

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-03-07

基金项目: 海军航空工程学院青年研究基金(HYQN201120)资助项目。

Project Supported by Naval Aeronautical and Astronautical University Youth Research Fund(HYQN201120).

系, 将模型的仿真和实验结果根据这一比例关系反推至全尺寸原型的系统动态特性上^[10]。因此, 文中首先建立了 EMCLHL 原型系统的数学模型, 针对发射过程中各关键物理量的求解, 结合相似原理推导了原型与缩比模型之间的相似关系, 并根据限制条件确定了相似比例系数, 得到了 EMCLHL 缩比模型结构参数和初始条件, 最后通过 Maxwell2D 软件仿真计算了原型和缩比模型的各级放电回路电流、电枢受力、速度及位移随时间变化的规律, 仿真结果表明, 比例关系存在且满足相似条件中各物理量的相似比例关系, 从而证明了 EMCLHL 相似模型设计条件成立。

1 EMCLHL 数学模型建立

1.1 EMCLHL 电磁场方程

EMCLHL 发射装置主要由发射筒、驱动线圈、发射组件(包括电枢和有效载荷)部件等组成, 见图 1。其工作原理是通过驱动线圈中的电磁场与电枢中感应的涡流磁场耦合作用, 产生电磁力推动电枢从而实现发射组件的运动, 基于这个工作过程可以建立 EMCLHL 的数学模型, 主要包括电磁场方程、等效电路方程、动力学方程及运动学方程^[11]。为了简化 EMCLHL 数学模型的建立过程, 作如下假设^[12]:

- 1) 忽略位移电流的影响;
- 2) 忽略因电磁力作用引起驱动线圈和电枢的变形, 以及发射过程中驱动线圈和电枢的热损失;
- 3) 驱动线圈放电回路中的电流均匀分布。

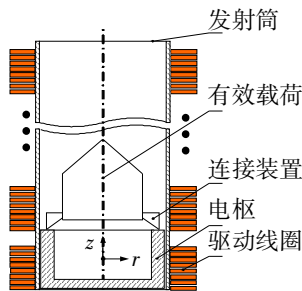


图 1 EMCLHL 发射装置结构图

Fig. 1 Structure of the EMCLHL launcher

根据麦克斯韦方程组及涡流场的似恒条件, EMCLHL 瞬态电磁场方程如下^[13-14]:

$$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{J}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \rho_e^{-1} [\mathbf{E} + \nu \times \mathbf{B}] \text{ 或 } \mathbf{J} = \sigma [\mathbf{E} + \nu \times \mathbf{B}]. \quad (3)$$

从式(1)-(3)可得到磁扩散方程

$$\nabla \times [\rho_e \cdot (\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0})] - \nabla \times [\nu \times \mathbf{B}] = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (4)$$

能量平衡方程为

$$\nabla \cdot \kappa \cdot \nabla T - c_v \nu \cdot \nabla T = c_v \frac{\partial T}{\partial t} - \mathbf{J} \cdot \rho_e \cdot \mathbf{J}. \quad (5)$$

动量方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \rho_m \mathbf{a} = \rho_m \frac{\partial^2 \mathbf{s}}{\partial t^2}. \quad (6)$$

式(1)-(6)中: $\mathbf{B}$ 是磁感应强度; $\mathbf{J}$ 是电流密度; ρ_e 是电阻率张量; μ_0 是真空磁导率; t 是时间; ν 是电枢速度; $\mathbf{E}$ 是电场强度; $\mathbf{S}$ 是应力张量; ρ_m 是质量密度; c_v 是单位体积的比热; κ 是热导率张量; T 是温度; $\mathbf{a}$ 是电枢的加速度; $\mathbf{s}$ 是在运动方向上的距离。

1.2 EMCLHL 电路方程

n 级 EMCLHL 发射过程中各级驱动线圈顺序触发^[14]。某一时刻 t , 第 m 级 ($m=1, 2, \dots, n$) 放电回路导通给驱动线圈馈以脉冲电流, 此时第 m 级前级各驱动线圈的放电回路均处于导通状态。等效电路见图 2。图 2 中: $C_1, C_2, \dots, C_n$ 表示各级电容器组的电容量; $K_1, K_2, \dots, K_n$ 是导通各级放电回路的触发开关; $L_1, L_2, \dots, L_n$ 为各放电回路固有电感; $R_1, R_2, \dots, R_n$ 是各放电回路固有电阻, 包括电容器组、触发开关和连接导线等的电阻; $R_{d1}, R_{d2}, \dots, R_{dn}$ 是各级驱动线圈电阻; $L_{d1}, L_{d2}, \dots, L_{dn}$ 是各驱动线圈电感; $i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn}$ 是各级放电回路中的电流; R_p 和 L_p 分别为电枢的电阻和电感; i_{pm} 是电枢中的涡流。

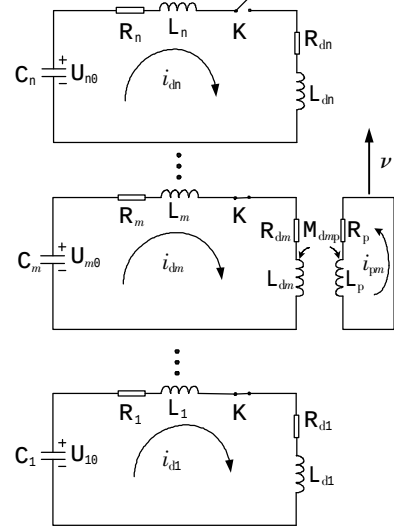


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

由基尔霍夫定律, 可建立 EMCLHL 等效电路方程:

$$(L_{dm} + L_m) \frac{di_{dm}(t)}{dt} + (R_{dm} + R_m) i_{dm}(t) - M_{dmp} \frac{di_{pm}(t)}{dt} - \nu \frac{dM_{dmp}}{dz} i_{pm}(t) = U_m; \quad (7)$$

$$L_p \frac{di_{pm}(t)}{dt} + R_p i_{pm}(t) - M_{dmp} \frac{di_{dm}(t)}{dt} - \nu \frac{dM_{dmp}}{dz} i_{dm}(t) = 0; \quad (8)$$

$$U_m = U_{m0} - \frac{1}{C_m} \int_0^t i_{dm}(t) dt. \quad (9)$$

式(7)-(9)中: U_{m0} 和 C_m 表示第 m 级线圈对应电容器组的初始充电电压和电容量; M_{dmp} 为第 m 级发射线圈与电枢之间的互感。

驱动线圈和圆筒电枢可等效为等截面积的均匀长直导体,则电阻计算公式可以表示为

$$R = \frac{\rho l_0}{A} \quad (10)$$

式(10)中: ρ 为电阻率; l_0 为导线长度; A 为导线截面积。在不考虑导体温升和趋肤效应的前提下,这些量是恒定的,则可以认为电阻是恒定值。

以线圈平均直径 D 作标准量,分别对其径向厚度和轴向长度进行归一化处理,可以得到线圈的形状参数,记为 u, ν ^[15],则自感的计算式表示为

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} n_c^2 D T(u, \nu) \quad (11)$$

应用纽曼公式,则互感的计算公式为

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} n_1 n_2 \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 dl_2}{r} \quad (12)$$

式(12)中: dl_1 和 dl_2 分别为电枢和驱动线圈的等效长度元; r 为距离矢量。

1.3 EMCLHL 动力学方程及运动学方程

对于第 m 级发射线圈,由于发射组件的运动方向为 z 方向,该方向上驱动线圈和电枢的自感项磁能不变化,存在驱动线圈和电枢之间的互感项磁能的变化。若不计其他能量损失, t 时刻沿 z 方向作用在电枢上的电磁力 $F_z(t)$ 为

$$F_z(t) = \frac{\partial W_m}{\partial z} = \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) \quad (13)$$

电枢垂直向上运动,因此运动方向上除了电磁力 $F_z(t)$ 作用外,还受到发射组件自身重力作用, t 时刻电枢的加速度 $a(t)$ 为

$$a(t) = \frac{F(t)}{m_p} = \frac{F_z(t) - m_p g}{m_p} = \frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \quad (14)$$

式(14)中: m_p 为发射组件的质量; g 为重力加速度。

t 时刻发射组件的速度 $\nu(t)$ 为

$$\nu(t) = \int_0^t a(t) dt = \int_0^t \left[\frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \right] dt \quad (15)$$

t 时刻电枢沿 z 方向的位移 $z(t)$ 为

$$z(t) = \int_0^t \nu(t) dt = \int_0^t \int_0^t a(t) dt = \int_0^t \int_0^t \left[\frac{1}{m_p} \frac{M_{dmp}}{L_p} \frac{\partial M_{dmp}}{\partial z} i_{dm}^2(t) - g \right] dt dt \quad (16)$$

2 EMCLHL 相似系统推导

相似第一定理“相似系统(相似现象)的相似指标等于 1 或者相似判断依据相等”是判定相似关系

的充要条件^[16]。为了能够使模型表现出原型的主要现象和物理本质,并能从模型上预测原型的结果,必须使模型与原型保持几何相似、动力相似和运动相似等相似性要求。两个系统的现象相似,其对应物理量互成比例,因此文中首先引入了几何缩比因子 ε 。它是计算动力学相似系数和动力学相似系数的基础,由它推导质量因子等其他缩比因子,从而确定相似条件^[17-18]。

假设由 x 表示原型中的物理量, x' 表示缩比模型中的物理量,则有

$$x' = \varepsilon x \quad (17)$$

分别代入式(1)-(16),同时引入时间缩比因子 τ

$$t' = \tau t \quad (18)$$

则哈密尔顿算子和偏微分的缩比关系分别表示为

$$\nabla' = \frac{\nabla}{\varepsilon}, \frac{\partial'}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \frac{\partial}{\partial t} \quad (19)$$

引入每单位体积比热的缩比因子 χ , 温度缩比因子 η , 由式(4)可得:

$$\rho_e' = \frac{\varepsilon^2}{\tau} \rho_e, \nu' = \frac{\varepsilon}{\tau} \nu; \quad (20)$$

$$c_v' = \chi c_v, T' = \eta T \quad (21)$$

代入式(5)得

$$\kappa' = \frac{\chi \varepsilon^2}{\tau} \kappa, J' = \frac{\sqrt{\chi \eta}}{\varepsilon} J, i' = \sqrt{\chi \eta} \varepsilon i \quad (22)$$

把式(22)代入式(1)得

$$B' = \sqrt{\chi \eta} B \quad (23)$$

由动量方程(6)得

$$\rho_m' = \frac{\tau \chi \eta}{\varepsilon^2} \rho_m, S' = \chi \eta S \quad (24)$$

式(24)中,质量密度 ρ_m 为发射组件的平均质量密度。

加速度、速度和位移的缩比公式分别为

$$a' = \frac{\varepsilon}{\tau^2} a, \nu' = \frac{\varepsilon}{\tau} \nu, S' = \varepsilon S \quad (25)$$

整个发射载荷的质量 m 缩比公式为

$$m' = \varepsilon^3 \chi \eta m \quad (26)$$

根据实验室现有条件和材料等特性的实际情况,确定缩比模型与原型材料密度相同,即 $\rho_e' = \rho_e$, 由式(20)可推出

$$\tau = \varepsilon^2, \nu' = \frac{\varepsilon}{\tau} \nu = \frac{\nu}{\varepsilon} \quad (27)$$

材料的比热和温度相同,即 $\chi=1$ 和 $\eta=1$, 由式(22)可得

$$\kappa' = \kappa, J' = \frac{J}{\varepsilon}, i' = \varepsilon i \quad (28)$$

则各物理量用几何缩比因子 ε 表示的缩比公式为

$$t'=\varepsilon^2 t, B'=B, a'=\frac{a}{\varepsilon^3}, \nu'=\frac{\nu}{\varepsilon}, S'=\varepsilon S, m'=\varepsilon^3 m. \quad (29)$$

由系统机电模型的电路方程(7)-(12)及相应缩比模型电路方程, 可进一步推出电路中物理量的缩比式为:

$$U'=U, C'=\varepsilon C; \quad (30)$$

$$R'=\frac{\rho' l_0'}{A'}=\frac{\rho \cdot (\varepsilon^2 l_0)}{\varepsilon^2 A}=\frac{\rho l_0}{A}=R; \quad (31)$$

$$L'=\frac{\mu_0'}{4\pi} n_c'^2 D' T'(u, \nu)=\frac{\mu_0}{4\pi} (\varepsilon n_c)^2 (\varepsilon D) T(u, \nu)=\varepsilon^3 \frac{\mu_0}{4\pi} n_c^2 D T(u, \nu)=\varepsilon^3 L; \quad (32)$$

$$M'=\frac{\mu_0'}{4\pi} n_1' n_2' \int_{l_2} \int_{l_1} \frac{dl_1' dl_2'}{r'}=\frac{\mu_0}{4\pi} (\varepsilon n_1) (\varepsilon n_2)$$

$$\int_{l_2} \int_{l_1} \frac{d(\varepsilon l_1) d(\varepsilon l_2)}{\varepsilon r}=\varepsilon^3 \frac{\mu_0}{4\pi} n_1 n_2 \int_{l_2} \int_{l_1} \frac{dl_1 dl_2}{r}=\varepsilon^3 M. \quad (33)$$

原型和缩比模型发射过程中关键物理量之间的关系通过几何缩比因子 ε 进行了表示, 满足了 EMCLHL 系统原型与模型的相似性要求, 相似关系成立。在推导模型设计条件时, 必须注意到几何缩比因子 ε 的选择不是任意的。首先要根据原型要求的实验范围、实验场地大小、模型制作和量测条件选择 ε ; 然后根据原型和模型材料特性选择相似系数 τ 、 χ 、 η ; 最后根据对发射情况的受力分析, 满足对发射起主要作用的各物理量相似, 确定其他比例系数。

3 EMCLHL 缩比模型仿真验证

3.1 缩比模型的物理参数确定

为验证相似条件的正确性, 以某 3 级 EMCLHL 发射装置为例, 对 EMCLHL 原型和缩比模型进行仿真分析, 得出各物理量的相似比例关系。根据发射组件质量 600 kg, 发射筒直径 900 mm, 出口速度 10 m/s 的发射要求设计了原型的结构参数。参考现有实验条件, 确定原型与缩比模型的几何缩比因子 $\varepsilon=1/10$, 得到 EMCLHL 原型和缩比模型的结构参数见表 1。为保证实验安全保持电压不变, 限定原型和缩比模型的电压比是 1:1, 则驱动线圈的匝数比为 10:1, 根据自感计算式(11), 驱动线圈的自感与线圈内径成正比, 与线圈的匝数的平方成正比, 而函数 $T(u, \nu)$ 只与线圈的形状参数 u, ν 有关, 与线圈的尺寸无关。原型和缩比模型的结构几何相似, 那么驱动线圈缩比模型与原型的自感之比为 1 000:1。根据简单欠阻尼 RLC 串联电路的幅频特性, 电路的时间常数与电感和电容乘积的平方根成正比, 则缩比模型与原型的电路时间常数之比刚好为 $\sqrt{1\ 000 \times 10^{-3}}:1=100:1$,

这与式(27)是一致的。原型和缩比模型的材料特性参数相同, 见表 2。

表 1 EMCLHL 原型与模型结构参数与电路参数

Tab. 1 Structure and circuit parameters of the EMCLHL prototype and scale model

部件	参数	原型数值	模型数值
驱动线圈	线圈外径 a_1/mm	1 100.00	110.00
	线圈厚度 a_2/mm	100.00	10.00
	线圈高度 b_1/mm	900.00	90.00
	第 1, 2 级间距 s_{12}/mm	150.00	15.00
	第 2, 3 级间距 s_{23}/mm	150.00	15.00
	第 2 级触发时刻/ms	120.00	1.20
	第 3 级触发时刻/ms	200.00	2.00
电枢	线圈匝数 n_2	400.00	40.00
	电枢外径 a_3/mm	860.00	86.00
	电枢厚度 a_4/mm	60.00	6.00
	电枢高度 b_2/mm	750.00	75.00
	发射组件质量 m_p/kg	600.00	0.60
外置电路	电容器电压 U/kV	3.80	3.80
	电容 C/mF	13.00	1.30
	回路电阻 R/Ω	0.04	0.04

表 2 EMCLHL 材料特性参数

Tab. 2 Material parameters of the EMCLHL

材料参数	铜	绝缘材料	铝合金
相对磁导率	1.00	1.00	1.00
电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	1.70×10^{-8}	—	2.80×10^{-8}
比热容/ $(\text{kg} \cdot \text{K}^{-1})$	390.00	1 260.00	902.00
导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	383.00	469.00	237.00
弹性模量/GPa	119.00	85.50	71.00
泊松比 μ	0.32	0.30	0.33
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8 900.00	3 650.00	2 700.00

3.2 仿真结果分析

文中采用 Maxwell2D 软件对 3 级 EMCLHL 进行二维有限元仿真, 该方法能方便准确的求解发射过程中磁场、电场及运动场的耦合过程^[4]。在 Maxwell2D 软件中建立 3 级 EMCLHL 的结构模型和控制电路模型见图 3, 电枢初始速度设为 0 m/s。

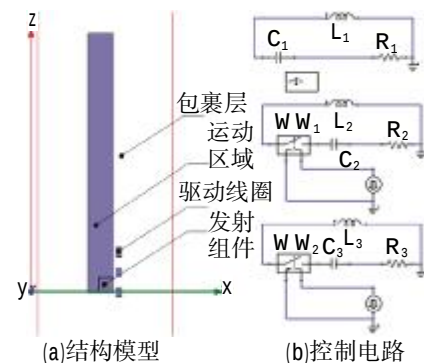


图 3 3 级 EMCLHL 结构和电路图

Fig. 3 Structural and circuit diagram of three-stage EMCLHL

图 4-9 给出了系统主要动态特性:回路电流、电枢所受电磁力和发射组件的速度和位移,可以看出原型与缩比模型电枢受力、速度和位移以及各级驱动线圈的电流都明显呈现一定的相似关系。原型电枢的 3 个受力峰值为:73.4、51.7、45.9 kN。缩比模型电枢在时间对应点上的 3 个受力峰值为:70.5、42.8、41.3 kN,近似与 1:1 的关系;原型电枢的出口

速度为 10.7 m/s,缩比模型的速度为 106 m/s,近似于 1:10 的关系;原型电枢的位移为 2.73 m,缩比模型对应时间点的位移为 0.275 m,近似于 10:1 的关系。这与式(27)-(30)所推导的比例关系基本相同,EMCLHL 相似模型中各动态特性参数的相似系数相互关联,且可以表示为几何缩比因子的函数,证明文中推导的 EMCLHL 缩比模型设计条件是成立的。

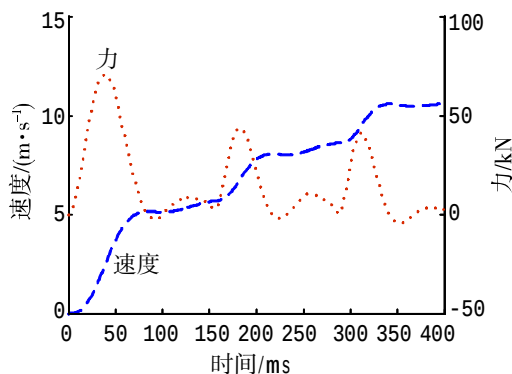


图 4 原型电枢受力和速度

Fig. 4 Force and velocity of prototype

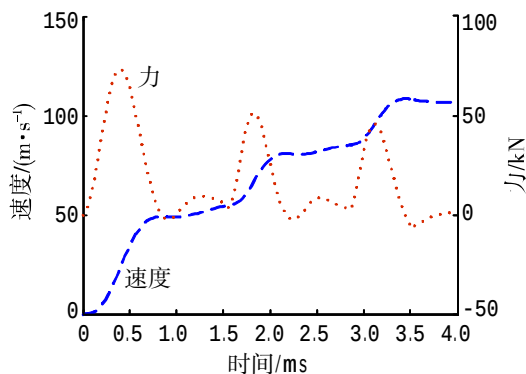


图 5 缩比模型电枢受力和速度

Fig. 5 Force and velocity of scale model

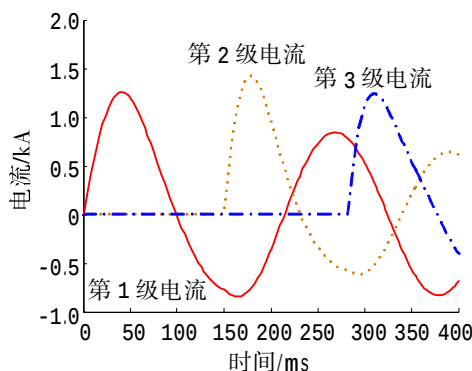


图 6 原型各级驱动线圈电流

Fig. 6 Current in each coil of prototype

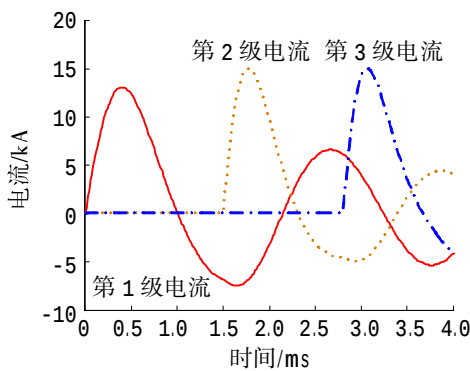


图 7 缩比模型各级驱动线圈电流

Fig. 7 Current in each coil of scale model

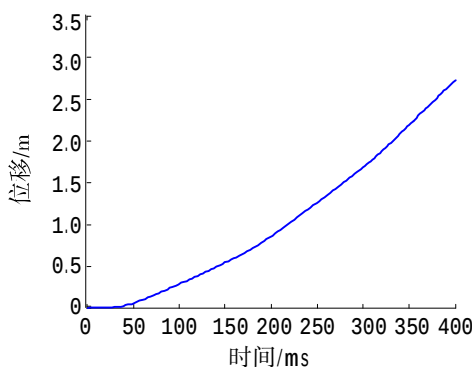


图 8 原型电枢位移

Fig. 8 Moving position of armature prototype

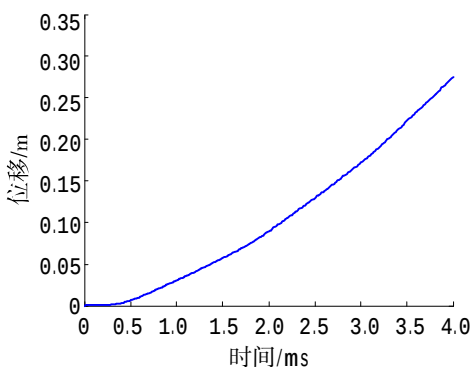


图 9 缩比模型电枢位移

Fig. 9 Moving position of armature scale model

4 结语

文中建立了 EMCLHL 的数学模型,结合相似理论推导了 EMCLHL 原型和缩比模型的相似条件,得到了原型与缩比模型各关键物理量间的相似关系,

并根据实验条件确定了这些物理量之间的相似比例系数,最后通过 Maxwell2D 软件对 EMCLHL 原型和缩比模型进行了仿真研究。仿真结果表明 EMCLHL 原型和缩比模型仿真对应结果的发射过程动态特性规律基本相同,原型和缩比模型各级驱动线圈的回

路电流、电枢所受电磁力、速度和位移随时间变化的规律呈比例,且满足模型设计条件中各物理量的相似比例关系,模型相似条件是成立的。从而验证了对缩比模型进行研究的结论在比例关系上能反映原型的实验结果,为设计 EMCLHL 缩比模型实验实现对原型的结构设计、仿真计算方法等进行验证提供了理论基础。

参考文献:

- [1] KAYE R J, TUMAN B N, SHOPE S L. Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(1): 703-707.
- [2] AUBUCHON M S, LOCKNER T R, KAYE R J, et al. Study of coilgun performance and comments on powered armatures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(1): 141-144.
- [3] 邹本贵, 孙学锋, 曹延杰, 等. 舰载导弹电磁线圈垂直发射方案设计[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(5): 45-48.
ZOU Bengui, SUN Xuefeng, CAO Yanjie, et al. Scheme design of electromagnetic coil vertical launcher for shipborne missile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(5): 45-48.
- [4] SANDIA M P. Lockheed martin develop electromagnetic missile launcher for naval shipboard operations [J]. Sandia Lab News, 2005, 52(2): 1-5.
- [5] 李凤层, 雷 彬, 李治源. 单级感应线圈发射器参数分析与动态特性计算[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 72-75.
LI Fengceng, LEI Bin, LI Zhiyuan. Parameter analysis and dynamic characteristic calculation of the single-stage induction coil-launcher [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(4): 72-75.
- [6] 王 昭, 曹延杰, 王 旻, 等. 三级电磁线圈垂直发射器工作过程仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 14-19.
WANG Zhao, CAO Yanjie, WANG Min, et al. Simulation of working process of three-stage electromagnetic coil vertical launcher[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 14-19.
- [7] ZOU Bengui, CAO Yanjie, WU Jie, et al. Magnetic-structural coupling analysis of armature in induction coilgun[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2011, 39(1): 65-70.
- [8] 邹本贵, 曹延杰, 李瑞峰, 等. 电磁线圈发射器相似模型研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 73-77.
ZOU Bengui, CAO Yanjie, LI Ruifeng, et al. Research on the scaling model of electromagnetic coil launcher [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 73-77.
- [9] SKURDAL B D, GAIGLER R L. Multi-mission electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 458-461.
- [10] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.
YUAN Wenzhong. The similarity theory and the statics model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998.
- [11] 赵科义, 李治源, 程树康. 单级感应线圈炮工作过程的动态仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1667-1671.
ZHAO Keyi, LI Zhiyuan, CHENG Shukang. Dynamic simulation of working process of the single-stage induction coilgun[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1667-1671.
- [12] 向红军, 李治源, 雷 彬. 基于场路耦合的多级感应线圈炮内弹道分析[J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 100-104.
XIANG Hongjun, LI Zhiyuan, LEI Bin. Analysis on interior ballistics of multi-stage inductive coil gun based on coupling of field and circuit [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(3): 100-104.
- [13] 蔡圣善, 朱 耘, 徐建军. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
CAI Shengshan, ZHU Yun, XU Jianjun. Electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [14] 曹延杰, 刘文彪, 邹本贵, 等. 三级感应线圈炮内弹道过程仿真[J]. 弹道学报, 2008, 20(4): 92-95.
CAO Yanjie, LIU Wenbiao, ZOU Bengui, et al. Interior ballistics motion simulation of three-stage synchronous inductive coilgun[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(4): 92-95.
- [15] 吴素文. 空心圆柱线圈的电感计算表[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24(3): 106-112.
WU Suwen. Inductance table of air-cored cylindrical coil [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2003, 24(3): 106-112.
- [16] 徐 挺. 相似方法与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
XU Ting. Similar methods and applications[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [17] ZHANG Yadong, WANG Ying, RUAN Jiangjun. Capacitor-driven coil-gun scaling relationships[J]. IEEE Trans. on Magn., 2011, 39(1): 221-224.
- [18] HSIEH K T, KIM B K. One kind of scaling relations on electromechanical systems[J]. IEEE Trans. on Magn., 2007, 33(1): 240-244.

王 旻(1985—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电磁发射技术。