doi:10.11887/j.cn.201904008 http://journal.nudt.edu.cn

电磁发射用脉冲功率电源放电建模分析*

熊诗成[1],鲁军勇[2],郑宇锋[2],曾德林[2]
(1. 海军研究院,北京 100161;2. 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:为高效研究电磁发射用脉冲功率电源放电性能,为电磁发射提供技术支持,降低研发成本,电磁发射过程的相关建模与仿真工作需要重点研究。对弹丸在轨道中实际运动物理过程建立数学模型,对脉冲功率电源建立电路模型,采用联合两种模型的方法对脉冲功率电源放电系统进行研究,提出一种基于发射过程多物理现象的脉冲功率电源放电系统仿真模型。通过实验验证了提出方法的有效性,为后续脉冲功率电源放电研究提供了依据。

关键词:电磁发射;脉冲功率电源;建模仿真
中图分类号:TM832 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)04-053-07

Modeling and analysis of discharge of pulsed power supply for electromagnetic launch

XIONG Shicheng[1], *LU Junyong*[2], *ZHENG Yufeng*[2], *ZENG Delin*[2]
(1. Naval Research Academy, Beijing 100161, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to effectively study the discharge performance of pulsed power supply for electromagnetic launch, provide technical support for electromagnetic launch and reduce the cost of research and development, the related modeling and simulation work of electromagnetic launch process needs to be studied. A mathematical model for the actual physical process of the projectile was established, a circuit model of the pulsed power source was set up, and the discharge system of pulsed power supply was studied by using the method of combination of these two models. Furthermore, the simulation model of pulsed power supply discharge system based on the multi physical phenomena in transmit process was proposed. The effectiveness of the proposed method was verified by experiments, which lays a foundation for the discharge research of pulsed power supply.

Keywords: electromagnetic launch; pulsed power supply; modeling and simulation

电磁发射应用中,脉冲功率电源作为中间储能系统对轨道输出巨大脉冲电流,产生强大的洛伦兹力推动轨道中的弹丸高速前进。为了使弹丸高速且平稳前进,脉冲功率电源通常是由多个脉冲成形单元组成脉冲成形网络后,按照时序放电获得巨大平稳的类似梯形的电流波形。为了高效研究电磁发射用脉冲功率电源放电性能优化,以为电磁轨道炮的设计提供技术支持,降低研发成本,世界各国非常重视电磁发射过程的相关建模与仿真工作。电磁发射过程伴随着电、力、磁、热等现象,多种物理场间相互耦合,通过仿真能有效研究各个因素对放电性能的影响,从而促进电磁发射技术的发展。

脉冲功率电源从蓄电池获得初始电能,根据电磁轨道炮发射相关需求来控制能量的输出。发射装置和电枢组成了脉冲功率电源的动态负载,如图1所示,动态负载在发射过程中发生电场、磁场、应力场多场耦合。目前对于电磁发射应用专业的仿真软件有EMAP3D,MEGA和EMAS。其中最权威的是EMAP3D软件,该软件可以仿真枢轨之间的滑动电接触,属于美国海军专有研究软件。除此之外还有ANSYS,Simplorer,MATLAB和PSpice之类的开放软件用于仿真电磁发射过程。目前电磁发射建模和仿真通常基于多物理场耦合中的一个场,我国还没有专门的电磁发射应用仿真软件,只有一些商业化软件可用。

文献[1]尝试通过联合Simulink和Simplorer软件对电磁发射过程进行建模与分析:采用Simplorer对脉冲功率电源进行建模分析,采用Simulink对发射轨道和电枢进行建模。该方法考

* 收稿日期:2018-03-14
作者简介:熊诗成(1989—),男,湖北武汉人,工程师,博士,E-mail:812105189@qq.com

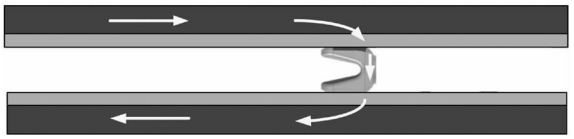


图1 动态负载

Fig. 1 Dynamic load

虑了发射过程中的接触电阻现象和速度趋肤效应,但是缺乏兼容性。文献[2]采用 PSpice 软件对电磁发射系统进行建模。该模型考虑了发射过程中多种物理现象,包括接触电阻、电流趋肤效应、速度趋肤效应等对发射过程的影响。所有的物理现象都转化为电器元件,并赋以相应的参数代入电路模型中。实验证明该方法仿真效果较好,但是该方法对物理过程进行电路建模过于复杂烦琐而不易理解。文献[3]基于 MATLAB 平台,针对电磁发射系统发射过程提出了一种快速求解方法,该方法与 Simplorer 仿真相比电枢出膛速度误差低于3%,验证了该方法的有效性。但该方法考虑轨道和电枢组成的动态负载的物理现象还不够完全。文献[4-7]也初步构建了电磁发射系统的模型,其中包括脉冲功率电源、发射装置和弹丸,但是模型过于简单。文献[8-12]研究了动态负载中的多种物理现象,但不能够联合脉冲功率电源建立整体电磁发射过程模型,同时采用有限元软件仿真会耗费大量时间。

通过以上分析,针对电磁发射过程中的建模存在以下问题:①对于发射过程中轨道和电枢组成的动态负载的多种物理现象考虑不完整;②采用电路对动态负载进行建模过于烦琐,不易理解;③如果采用多个软件进行联合仿真建模,会存在兼容性问题;④采用有限元仿真软件对发射过程进行建模仿真,会消耗大量时间;⑤只对动态负载中某一物理现象进行建模,没有进行整体放电过程建模。综上所述,目前对脉冲功率电源动态负载放电的建模和仿真仍是一件创新性工作。

本文对弹丸在轨道中实际运动物理过程建立数学模型,对脉冲功率电源建立电路模型,采用联合两种模型的方法对脉冲功率电源放电系统进行研究,提出了一种基于发射过程多物理现象的脉冲功率电源放电系统仿真模型,为脉冲功率电源放电研究提供参考。

1 脉冲功率电源电路数学分析

在电磁发射应用中,多个脉冲功率模块并联放电结构如图2所示。为了方便讨论,选取电阻 R_L 作为负载。当多模块对同一负载进行放电时,模块之间存在着电气联系,会影响各自的放电状态。多个脉冲功率电源模块放电过程相对于单个模块放电更为复杂。由于负载上的放电电流由多个模块的放电状态共同决定,为了研究多模块放电特性,需要将各个模块的放电状态分开研究。

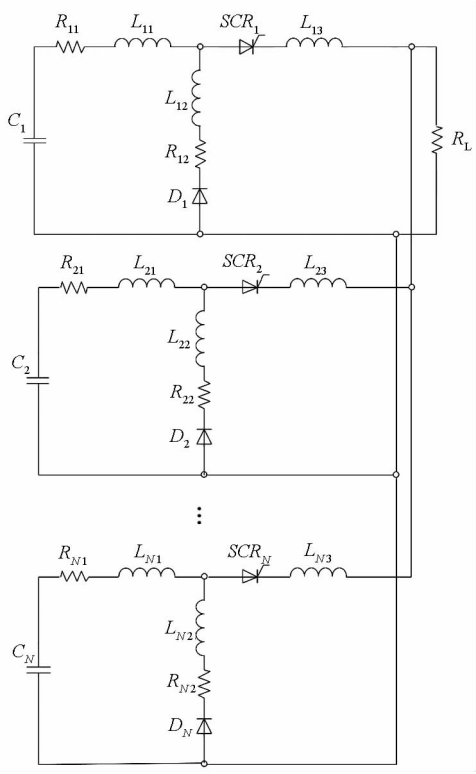


图2 N 个脉冲功率电源模块放电电路图

Fig. 2 N pulsed power supply modules circuit

每个模块的放电状态根据其开关晶闸管和续流二极管的开通状态决定。通常脉冲功率电源的工作状态有两种:RLC 电路放电状态和 RL 电路放电状态。下面将根据每个模块的放电状态进行研究。由于多模块放电电路结构复杂,独立节点数通常少于独立回路数,以下采用节点电压法进行分析。

1.1 模块工作状态全处于 RLC 电路放电

当所有模块的脉冲电容器还有正向电压、续流二极管均未导通时,此时有 N 个模块都处于 RLC 电路对负载进行放电,可以得到支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_1$ 为

$$\boldsymbol{Y}_1 = \mathrm{diag}\left[\frac{1}{\frac{1}{sC_1}+R_{11}+s(L_{11}+L_{13})} \quad \frac{1}{\frac{1}{sC_2}+R_{21}+s(L_{21}+L_{23})} \quad \cdots \right.$$
$$\left. \frac{1}{\frac{1}{sC_N}+R_{N1}+s(L_{N1}+L_{N3})} \quad \frac{1}{R_L}\right] \tag{1}$$

其中,支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_1$ 为一个 $N+1$ 阶对角矩

阵,s 为复变量。以图 2 中模块一为例,R_{11} 为电阻,C_1 为电容,L_{11} 为电感,$u_{11}(0_-)$ 为 R_{11} 两端电压,$i_{11}(0_-)$ 为流经 R_{11} 的电流。支路电压源矩阵 $\boldsymbol{U}_{s1}$ 为

$$\boldsymbol{U}_{s1}=\left[\frac{u_{11}(0_-)}{s}+(L_{11}+L_{13})i_{11}(0_-)\quad \frac{u_{21}(0_-)}{s}+(L_{21}+L_{23})i_{21}(0_-)\quad \cdots \quad \frac{u_{N1}(0_-)}{s}+(L_{11}+L_{13})i_{N1}(0_-)\quad 0\right] \tag{2}$$

根据电路节点电压方程的矩阵形式可得

$$\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{Y}_1\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}U_{n1}=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{Y}_1\boldsymbol{U}_{s1} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{A}_1$ 为关联矩阵,U_{n1} 为节点电压。根据式(3)解得

$$U_{n1}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}\times\left[\dfrac{u_{i1}(0_-)}{s}+(L_{i1}+L_{i3})i_{i1}(0_-)\right]}{\dfrac{1}{R_{\mathrm{L}}}+\sum_{i=1}^{N}\dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}} \tag{4}$$

负载电流为

$$I_1(s)=\frac{U_{n1}}{R_{\mathrm{L}}}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}\times\left[\dfrac{u_{i1}(0_-)}{s}+(L_{i1}+L_{i3})i_{i1}(0_-)\right]}{1+R_{\mathrm{L}}\times\sum_{i=1}^{N}\dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}} \tag{5}$$

1.2　模块工作状态处于 RLC 电路和 RL 电路放电

部分脉冲功率电源模块的电容器放电一段时间后,脉冲电容器电压降为零,模块工作状态由 RLC 电路转化为 RL 电路,此时整个脉冲功率电源系统中既有模块处于 RLC 放电回路,又有模块处于 RL 放电回路。假设前 M 个模块处于 RL 放电回路,后面 $N-M$ 个模块处于 RLC 放电回路,可以得到支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_2$ 为

$$\boldsymbol{Y}_2=\mathrm{diag}\left[\frac{1}{R_{12}+s(L_{12}+L_{13})}\quad \cdots \quad \frac{1}{R_{M2}+s(L_{M2}+L_{M3})}\quad \frac{1}{\dfrac{1}{sC_{M+1}}+R_{(M+1)1}+s(L_{(M+1)1}+L_{(M+1)3})}\quad \cdots \quad \frac{1}{\dfrac{1}{sC_N}+R_{N1}+s(L_{N1}+L_{N3})}\quad \frac{1}{R_{\mathrm{L}}}\right] \tag{6}$$

其中,支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_2$ 为一个 $N+1$ 阶对角矩阵。支路电压源矩阵 $\boldsymbol{U}_{s2}$ 为

$$\boldsymbol{U}_{s2}=[(L_{12}+L_{13})i_{12}(0_-)\quad \cdots \quad (L_{M2}+L_{M3})i_{M2}(0_-)\quad \frac{u_{(M+1)2}(0_-)}{s}+(L_{(M+1)1}+L_{(M+1)3})i_{(M+1)2}(0_-)\quad \cdots \quad \frac{u_{N2}(0_-)}{s}+(L_{N1}+L_{N3})i_{N2}(0_-)\quad 0\Big]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

其中:电压源矩阵 $\boldsymbol{U}_{s2}$ 为一个行和列数分别为 $N+1$ 和 1 的矩阵;$i_{12}(0_-)$,$i_{22}(0_-)$,…,$i_{M2}(0_-)$ 分别表示前 M 个模块 RL 回路开始放电前模块中流过电抗器的电流;$u_{(M+1)2}(0_-)$,$u_{(M+2)2}(0_-)$,…,$u_{N2}(0_-)$ 分别表示后 $N-M$ 个模块 RLC 回路开始放电前模块中电容器上的电压;$i_{(M+1)2}(0_-)$,$i_{(M+2)2}(0_-)$,…,$i_{N2}(0_-)$ 分别表示后 $N-M$ 个模块 RLC 回路开始放电前模块中流过电抗器的电流。

根据电路节点电压方程的矩阵形式可得

$$\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{Y}_2\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}}U_{n2}=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{Y}_2\boldsymbol{U}_{s2} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{A}_2$ 为关联矩阵,$\boldsymbol{Y}_2$ 为支路导纳矩阵,U_{n2} 为节点电压,$\boldsymbol{U}_{s2}$ 为支路电压源矩阵。根据式(8)解得

$$U_{n2}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\dfrac{(L_{i2}+L_{i3})i_{i2}(0_-)}{R_{i2}+s(L_{i2}+L_{i3})}+\sum_{i=M+1}^{N}\dfrac{\dfrac{u_{i2}(0_-)}{s}+(L_{i1}+L_{i3})i_{i2}(0_-)}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}}{\dfrac{1}{R_{\mathrm{L}}}+\sum_{i=1}^{M}\dfrac{1}{R_{i2}+s(L_{i2}+L_{i3})}+\sum_{i=M+1}^{N}\dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}} \tag{9}$$

此时负载电流为

$$I_2(s)=\frac{U_{n2}}{R_{\mathrm{L}}}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\dfrac{(L_{i2}+L_{i3})i_{i2}(0_-)}{R_{i2}+s(L_{i2}+L_{i3})}+\sum_{i=M+1}^{N}\dfrac{\dfrac{u_{i2}(0_-)}{s}+(L_{i1}+L_{i3})i_{i2}(0_-)}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}}{1+\sum_{i=1}^{M}\dfrac{R_{\mathrm{L}}}{R_{i2}+s(L_{i2}+L_{i3})}+\sum_{i=M+1}^{N}\dfrac{R_{\mathrm{L}}}{\dfrac{1}{sC_i}+R_{i1}+s(L_{i1}+L_{i3})}} \tag{10}$$

1.3　模块工作状态全处于 RL 电路放电

脉冲功率电源模块的电容器放电一段时间后,所有模块的脉冲电容器电压降为零,模块工作状态由 RLC 电路转化为 RL 电路,此时整个脉冲功率电源系统模块都处于 RL 放电回路。假设 N 个模块处于 RL 放电回路,此时可以得到支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_3$ 为

$$\boldsymbol{Y}_3=\mathrm{diag}\left[\frac{1}{R_{12}+s(L_{12}+L_{13})}\quad \frac{1}{R_{22}+s(L_{22}+L_{23})}\quad \cdots \quad \frac{1}{R_{N2}+s(L_{N2}+L_{N3})}\quad \frac{1}{R_{\mathrm{L}}}\right] \tag{11}$$

其中,支路导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_3$ 为一个 $N+1$ 阶对角矩阵。支路电压源矩阵 $\boldsymbol{U}_{s3}$ 为

$$\boldsymbol{U}_{s3}=[(L_{12}+L_{13})i_{13}(0_-)\quad (L_{22}+L_{23})i_{23}(0_-)\quad \cdots \quad (L_{N2}+L_{N3})i_{N3}(0_-)\quad 0]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

其中:电压源矩阵 $\boldsymbol{U}_{s3}$ 为一个行和列数分别为 $N+1$ 和 1 的矩阵;$i_{13}(0_-)$,$i_{23}(0_-)$,…,$i_{N3}(0_-)$ 分别表示 N 个模块 RL 回路开始放电前模块中流过电抗器的电流。与前小节类似,根据电路节点电压方程的矩阵形式可得

$$\boldsymbol{A}_3\boldsymbol{Y}_3\boldsymbol{A}_3^{\mathrm{T}}U_{n3}=\boldsymbol{A}_3\boldsymbol{Y}_3\boldsymbol{U}_{s3} \tag{13}$$

其中,$\boldsymbol{A}_3$ 为关联矩阵,$\boldsymbol{Y}_3$ 为支路导纳矩阵,U_{n3} 为节点电压,$\boldsymbol{U}_{s3}$ 为支路电压源矩阵。根据式(13)解得

$$U_{n3} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{(L_{i2} + L_{i3}) i_{i3}(0_-)}{R_{i2} + s(L_{i2} + L_{i3})}}{\frac{1}{R_L} + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_{i2} + s(L_{i2} + L_{i3})}} \tag{14}$$

此时负载电流为

$$I_3(s) = \frac{U_{n3}}{R_L} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{(L_{i2} + L_{i3}) i_{i3}(0_-)}{R_{i2} + s(L_{i2} + L_{i3})}}{1 + \sum_{i=1}^{N} \frac{R_L}{R_{i2} + s(L_{i2} + L_{i3})}} \tag{15}$$

2 动态负载数学模型

在实际电磁发射应用中,脉冲功率电源对轨道和电枢放电,电枢在轨道中发生多场耦合,发射过程需要考虑电流趋肤效应、电枢和轨道间的接触电阻、速度趋肤效应、摩擦阻力、电枢熔化磨损、空气阻力因素。

2.1 电流趋肤效应

导体内通过交流电或交变磁场时,导体内的电流分布是不均匀的,电流集中在导体外表的薄层,越靠近导体表面,电流密度越大,从而导致导体电阻增加,这一现象叫作趋肤效应。脉冲功率电源产生的大功率脉冲电流在几毫秒内流经轨道和电枢,在此过程中轨道和电枢间不可避免地会发生趋肤效应。在脉冲功率电源的放电模型中,需要考虑电枢和轨道间的趋肤效应。研究表明趋肤效应可以用梯子形状的电路来模拟,用 R_1、R_2、R_3、R_4 表示梯子的四个电阻,用 L_1、L_2、L_3 表示电感,如图3所示。在电磁发射应用中,轨道横截面是长方形,文献[2]研究的梯子形状的电路同样可以用来模拟在长方形截面中的趋肤效应。

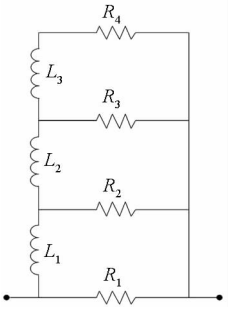


图3 枢轨趋肤效应模型

Fig. 3 Skin effect model of armature and rail

枢轨趋肤效应模型展现了枢轨电阻梯度和电感梯度的变化。枢轨趋肤效应模型中的电阻和电感值可以由以下公式求得

$$R_1 = \alpha_R R_0 \tag{16}$$

$$R_2 = \frac{1}{a}\alpha_R R_0 \tag{17}$$

$$R_3 = \left(\frac{1}{a}\right)^2 \alpha_R R_0 \tag{18}$$

$$R_4 = \left(\frac{1}{a}\right)^3 \alpha_R R_0 \tag{19}$$

$$L_1 = \alpha_L L_0 \tag{20}$$

$$L_2 = \frac{1}{b}\alpha_L L_0 \tag{21}$$

$$L_3 = \left(\frac{1}{b}\right)^2 \alpha_L L_0 \tag{22}$$

式中,$R_0 = 2\rho_{rail}/(w_{rail} h_{rail})$,$L_0 = 2/3\mu_0 w_{rail}/h_{rail}$,$w_{rail}$表示轨道宽度,$h_{rail}$表示轨道高度,$\rho_{rail}$表示轨道电阻率,$\mu_0$ 表示真空磁导率。该模型可以有效模拟在交流电下轨道的电阻和内部电感。电磁发射轨道其他系数为 $\alpha_R = 50$, $\alpha_L = 8.5$, $a = 3.27$, $b = 0.316$。

2.2 接触电阻

枢轨之间的接触表面并非完美光滑,电枢和轨道只在一些离散点上接触。当有电流通过时,电流只通过接触点而非整个面,为了描述这种非完美接触现象,引入接触电阻的概念。接触电阻[1]表示为

$$R_c = \frac{k_c}{h_{rail}}\sqrt{\frac{\mu_{rail}\rho_{rail}}{2\pi t}} \tag{23}$$

$$R_a = \frac{w_a}{h_a}\sqrt{\frac{\mu_a\rho_a}{2\pi t}} \tag{24}$$

式中,R_c 表示接触电阻,k_c 表示接触电阻常数,μ_{rail}表示轨道材料的磁导率,t 表示流经轨道此处的时间,R_a 表示电枢电阻,w_a 表示电枢宽度,h_a 表示电枢高度,μ_a 表示电枢的磁导率,ρ_a 表示电枢的有效电阻率。

2.3 速度趋肤效应

发射过程中由于电枢和轨道并非理想接触,会形成由许多接触点组成的薄层。当电枢低速运动时,电流均匀分布在枢轨之间的薄层上;当电枢高速运动时,流经薄层的电流会从电枢前端接触点移动到后端接触点,此时电流会收缩在薄层后侧。这种现象称为速度趋肤效应,这是接触压降的主要原因。

研究表明电枢和轨道滑动接触时会使负载的电阻增加,针对速度趋肤效应[1]有表达式

$$R_{VSEC} = R_{VC} v^{3/2} \tag{25}$$

式中,R_{VSEC}是由于速度趋肤效应而产生的电阻,R_{VC}是比例系数,v 表示电枢的速度,通常 $R_{VC} = 1.5 \times 10^{-8}$。

2.4　摩擦阻力

电枢在轨道中运动时受到电磁力的推力,同时受到摩擦阻力和空气阻力。研究摩擦阻力需要考虑枢轨之间的接触压力。轨道和电枢之间的接触压力包含预紧力和电流产生的洛伦兹力。接触压力可以表示为

$$F_{\mathrm{C}}(t)=F_{\mathrm{pre}}(t)+F_{\mathrm{i}}(t) \tag{26}$$

式中,$F_{\mathrm{pre}}(t)$表示预紧力,$F_{\mathrm{i}}(t)$表示电磁力。在发射过程的初期电流较小,此时电枢和轨道间的接触压力主要是预紧力;在电流逐渐增大到达平顶波峰时,此时电流产生的洛伦兹力逐渐增大,轨道和电枢间的接触压力主要是洛伦兹力产生的。

当电流上升至峰值时,此时电枢近似于均匀加速度运动,在此阶段电磁力占据了接触压力的绝大部分,电磁力可以表示为

$$F_{\mathrm{i}}(t)=K_{\mathrm{I}}i^{2}(t) \tag{27}$$

式中,K_{I}表示比例系数,$i(t)$为经过电枢的电流。根据洛伦兹定律,K_{I}可以用低频率的电感梯度的公式表达

$$K_{\mathrm{I}}=l_{\mathrm{wing}}L'/(3S) \tag{28}$$

式中,l_{wing}表示电枢尾翼长度,L'表示轨道低频率下的电感梯度,S表示两根轨道间的横截面积。

在电枢运动之前,电枢和轨道之间会产生静摩擦力,此时电流产生的洛伦兹力不足以推动电枢。当电流进一步增大超过最大静摩擦力时,电枢运动,此时电枢与轨道间由静摩擦变成滑动摩擦。当电枢在轨道上滑动时会产生滑动摩擦力$F_{\mathrm{friction}}=\mu_{\mathrm{friction}}F_{\mathrm{C}}(t)$,其中$\mu_{\mathrm{friction}}$被称为滑动摩擦系数,与材料和接触属性有关。

2.5　空气阻力

电枢在高速运动时,不断挤压前方的空气,被挤压后的空气对组件产生阻力,阻碍其向前运动。电枢受到的空气阻力[10]为

$$F_{\mathrm{p}}=\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)\rho_0\left[Av^{2}+Axa+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f2}}Pv^{2}x\right] \tag{29}$$

式中,a是电枢运动时的加速度,v是电枢运动时的速度,x为电枢移动距离,γ是电枢前方空气的比热,ρ_0是电枢前方空气密度,A为组件横截面积,P为轨道与电枢界面的接触长度,c_{f2}为空气与轨道间的黏滞系数。

2.6　电枢熔化磨损

当电枢和轨道间发生滑动摩擦时,接触面上会产生焦耳热和摩擦热,生成的热量一部分传导进轨道,另一部分导致电枢熔化磨损。电枢在轨道上不同位置的磨损速度[11]可以表示为

$$W(x)=\frac{P_{\mathrm{j}}+P_{\mathrm{f}}-\dfrac{\sqrt{\pi}}{2^{3/2}}\sqrt{\dfrac{\sqrt{2ax}}{d}}(2dh_{\mathrm{a}})\sqrt{\rho'_{\mathrm{r}}C_{\mathrm{r}}k_{\mathrm{r}}}(T_{\mathrm{m}}-T_0)}{(2dh_{\mathrm{a}})\sqrt{2ax}\left[\rho'_{\mathrm{a}}C_{\mathrm{a}}(T_{\mathrm{m}}-T_0)+H_{\mathrm{a}}\right]} \tag{30}$$

式中,P_{j}表示焦耳热功率,P_{f}表示摩擦热功率,d表示电枢和轨道的接触长度,ρ'_{r}表示轨道材料密度,C_{r}表示轨道材料比热容,k_{r}表示轨道材料热导率,T_{m}表示电枢材料熔点,T_0表示轨道整体温度,ρ'_{a}表示电枢材料密度,C_{a}表示电枢材料比热容,H_{a}表示电枢材料潜热。

3　脉冲功率电源放电仿真与实验

根据前文研究的脉冲功率电源数学模型和动态负载数学模型建立脉冲功率电源放电模型,脉冲功率电源参数和动态负载参数如表 1 所示。

表 1　脉冲功率电源放电系统参数

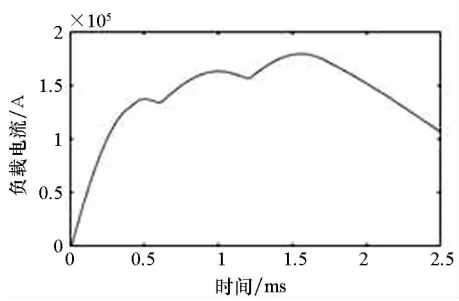
Tab. 1　Parameter of pulsed power supply discharge

参数	数值
电容器充电电压	8 kV
电容器电容值	2 mF
电感器电感值	45 μH
放电时序	0 – 0 – 0 – 06 – 1.2 ms
电枢质量	0.012 kg
轨道长度	1 m

根据以上参数,采用 MATALB 软件对脉冲功率电源放电系统进行仿真建模。通过选取合适的参数,仿真结果如图 4 所示。图 4 分别显示了电磁发射过程中的负载电流、电枢加速度、电枢速度和电枢位移随时间变化的关系。根据 5 个脉冲功率电源模块组成的放电系统,仿真得到的负载电流峰值为 179 kA,电枢在 2.16 ms 时出炮口,此时电枢的出口初速为 1112 m/s,电枢出炮口时电流值为 137 kA。由于电枢的加速度、速度和位移都和负载电流相关,通过研究仿真模型得到的电流结果来验证模型的有效性。

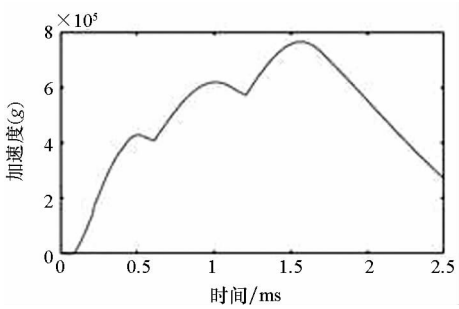
图 5 显示了实际负载电流、动态负载仿真电流和静态参数仿真电流的比较结果。静态负载模型假设轨道和电枢在电磁发射过程中的电路参数为线性变化的电阻和电感,由于没有考虑发射过程中趋肤效应、接触电阻、速度趋肤效应、摩擦阻力、空气阻力和电枢熔化磨损因素,导致负载阻抗小于实际情况。因此,图 5 中静态参数模型电流值较大,动态负载模型仿真结

果和实际情况相差较小。



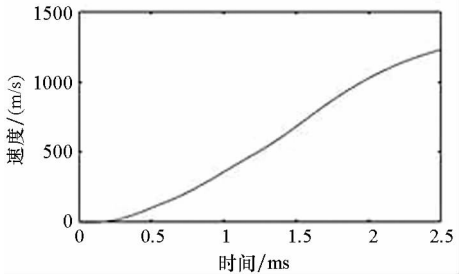
(a) 负载电流

(a) Load current



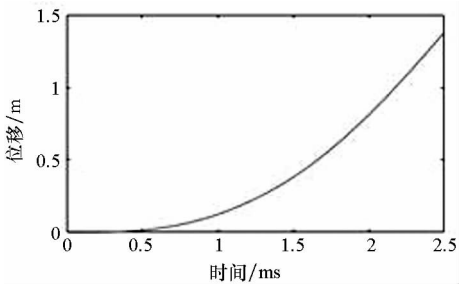
(b) 加速度

(b) Acceleration



(c) 速度

(c) Velocity



(d) 位移

(d) Displacement

图4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

在实验过程中通常采用B点探头的方法进行速度测量,通过弹丸经过相邻两个B点探头的时间间隔来测定该时间段的平均速度。图6显示了本文模型仿真速度与实际速度的比较结果。从结果可以看出,仿真效果较好,误差较小。

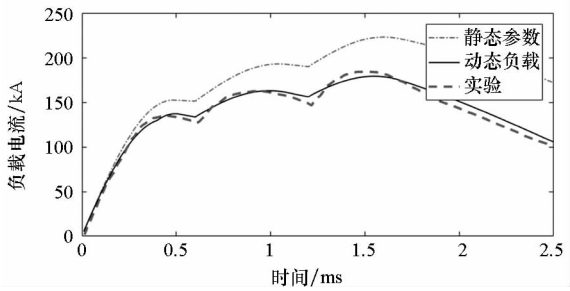


图5 负载电流比较

Fig. 5 Comparison of load current

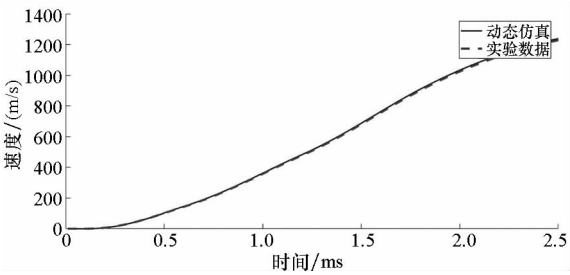


图6 速度比较

Fig. 6 Comparison of velocity

4 结论

围绕脉冲功率电源放电系统模型,对脉冲功率电源放电数学模型、动态负载数学模型进行研究。动态负载考虑电磁发射过程中电流趋肤效应、接触电阻、速度趋肤效应、摩擦阻力、空气阻力、电枢熔化磨损等因素。通过仿真与实验,将提出的放电模型与实验和静态参数模型仿真结果进行比较,验证了提出的脉冲功率电源放电模型的有效性。提出的脉冲功率电源放电模型可为脉冲功率电源放电研究提供参考。

参考文献(References)

[1] Yu X J, Fan Z N. Simulation and two-objective optimization of the electromagnetic-railgun model considering VSEC resistance and contact resistance [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 405 - 410.

[2] Zhou Y, Zhang D D. Modeling of electromagnetic rail launcher system based on multifactor effects [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1516 - 1522.

[3] 刘旭堃, 于歆杰, 刘秀成. 电容储能型脉冲电源分时分段触发策略自动计算方法研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 186 - 193.
LIU Xukun, YU Xinjie, LIU Xiucheng. An automatic calculation method for the triggering strategy of the capacitive pulsed-power supply [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 186 - 193. (in Chinese)

[4] Shi Z J, Yu X J. Two-objective optimization design for pulsed power supply [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 525 – 530.

[5] Chao T, Yan Y, Ma P, et al. Optimization of electromagnetic railgun based on orthogonal design method and harmony search algorithm [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1546 – 1554.

[6] 龚晨, 于歆杰, 刘秀成. 电容储能型轨道炮连续发射系统设计与仿真[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 111 – 115, 121.
GONG Chen, YU Xinjie, LIU Xiucheng. Continuous emission scheme and its simulation for capacitor-based railgun system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 111 – 115, 121. (in Chinese)

[7] 胡玉伟, 马萍, 杨明, 等. 一种电磁轨道炮系统的仿真模型[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 54 – 58.
HU Yuwei, MA Ping, YANG Ming, et al. A simulation model of electromagnetic rail gun system [J]. Ordnance Industry Automation, 2012, 31(9): 54 – 58. (in Chinese)

[8] 肖铮. 电枢 – 轨道再留滑动接触面摩擦磨损研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
XIAO Zheng. Friction and wear behavior of armature-rail sliding electrical contact surface [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)

[9] Watt T, Motes D T. The effects of surface coatings on the onset of rail gouging [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 168 – 173.

[10] Tzeng J T, Sun W. Dynamic response of cantilevered rail guns attributed to projectile/gun interaction—theory [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 207 – 213.

[11] Lewis K B, Nechitailo N V. Transient resonance in hypervelocity launchers at critical velocities [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 157 – 162.

[12] Wetz D A, Stefani F, Parker J V, et al. Advancements in the development of a plasma-driven electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 495 – 500.