

Crowbar 电源网络与导轨炮负载匹配特性分析

陈志强, 贾伟, 王海洋, 汤俊萍, 郭帆, 李俊娜, 陈维青

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 采用 Crowbar 回路构建导轨炮电源网络, 与串联增强型导轨炮模型进行了仿真, 通过仿真, 分析了 Crowbar 电源网络与导轨炮参数的匹配特性, 包括单个回路参数、Crowbar 回路数量、纹波系数对导轨炮负载驱动电流和系统能量转移效率的影响。仿真分析结果为建立符合导轨炮负载要求的 Crowbar 形式电源网络提供了相关参考。

关键词: Crowbar 回路; 脉冲电源; 导轨炮; 匹配特性; 能量转移效率

中图分类号: TM83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)02-0048-06

Matching Characteristic Analysis of Crowbar Pulsed Power Source and Railgun Load

CHEN Zhiqiang, JIA Wei, WANG Haiyang, TANG Junping,

GUO Fan, LI Junna, CHEN Weiqing

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A simulation model of a series augmented railgun and a pulsed power source using crowbar circuit is established. The matching characteristic of the pulsed power source and the railgun is analyzed, including the influences of the parameters of each circuit, the number of branch circuit, and the ripple coefficient on current waveform and energy transfer rate. Simulation is conducted to support the design of pulsed power source for railgun.

Key words: Crowbar circuit; pulsed power source; railgun; matching characteristic; energy transfer rate

0 引言

导轨炮研究中, 电源的设计在一定程度上决定了导轨炮的性能^[1-6]。导轨炮电枢在发射过程中位置的变化使得导轨炮作为负载时呈现出非线性特性, 阻抗随时间发生变化。另一方面, 为了提高能量转移效率(电枢与弹丸离开导轨后的动能与发射初级储能之比, 以下的效率均指能量转移效率), 要求加载在电枢中的电流为方波, 因为导轨中的通流能力受到导轨材料和结构的制约, 在一定电流条件下, 为了充分利用导轨的加速空间, 使电枢发射时处在一个较高的加速度下, 应使波形尽量接近方波, 电流为方波时还可以减小发射过程中电枢和其附属结构的机械震动。电源网络设计过程中, 必须综合考虑以上两

个因素。

导轨炮电源网络形式随储能方式各异, 电容储能型网络目前一般采用 Crowbar 回路形式^[6-13], 而电感储能型网络有 Meatgrinder^[14]和 Xram^[15-16]电路。这些电路的共同点是都可以通过多个支路的并联减轻每条支路的承载压力, 获得参数更大的电流。但是各支路如何选取及采用何种配合方式以获取符合导轨炮非线性负载下电流波形要求, 仍是值得深入探讨的问题。

针对 Crowbar 形式电源网络, 已有学者从理论和实验两个方面对其进行了研究^[6-13], 笔者从电路仿真的角度比较系统地探究了该类网络拓扑结构作为导轨炮电源时的设计规律及其与导轨炮负载的匹配特性。

收稿日期: 2013-09-25; 修回日期: 2013-10-26

基金项目: 国家 863 计划项目资助项目。

Project Supported by 863 Projects Fund.

1 导轨炮和 Crowbar 回路

导轨炮主要由高功率脉冲电源、导轨以及电枢和弹丸组成, 弹丸通常与电枢成一体化设计。导轨一端加载一脉冲电流, 电流流经导轨和电枢形成磁场, 磁场与电枢中电流方向构成一定夹角, 根据安培定律, 在电枢上产生一个与电流和磁场方向正交的安培力, 推动电枢和弹丸加速前进, 电枢和弹丸离开导轨时速度即为出膛速度。

图 1 为串联增强导轨炮示意图, 采用文[1]中所列导轨炮机电一体化控制方程建立导轨炮模型, 模型参数参考文[17]: 电枢质量 10 g, 加速距离 1.5 m; 导轨等效电感梯度 $0.7 \mu\text{H}/\text{m}$, 等效电阻梯度 $0.4 \text{ m}\Omega/\text{m}$; 电枢在待发位置时, 导轨初始电阻 $1 \text{ m}\Omega$, 初始电感 $1 \mu\text{H}$; 发射时静摩擦力 50 N, 滑动摩擦力 10 N。不考虑导轨发射过程中电流波形变化、摩擦和欧姆发热引起导轨和电枢的烧蚀等造成导轨炮相关参数的变化。

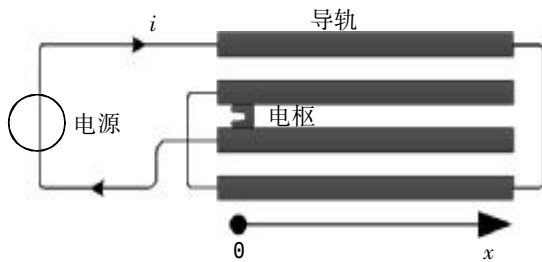


图 1 串联增强型导轨炮示意图

Fig. 1 Series augmented railgun

单个 Crowbar 回路见图 2, 由储能电容、Crowbar 器件(一般为大功率硅堆)、回路开关(气体开关、真空开关或晶闸管等)和续流电感组成。多个 Crowbar 回路并联构成 Crowbar 网络。该网络最大的优点是各个支路相互影响小, 波形参数调节方便, 可以根据负载特性调节 Crowbar 支路器件的参数和支路导通时序, 得到需要的波形。

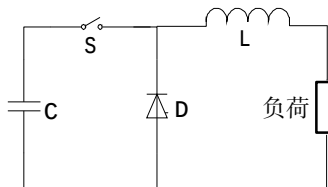


图 2 Crowbar 回路

Fig. 2 Crowbar circuit

采用 MATLAB/Simulink 软件^[18-20]建立了导轨炮和 Crowbar 回路仿真模型见图 3, 通过改变 Crowbar 支路的电容值、电感值、电容上充电电压, Crowbar 支路数量和支路导通时序, 探究采用 Crowbar 回路建立的电源与导轨炮非线性负载的匹配规律。

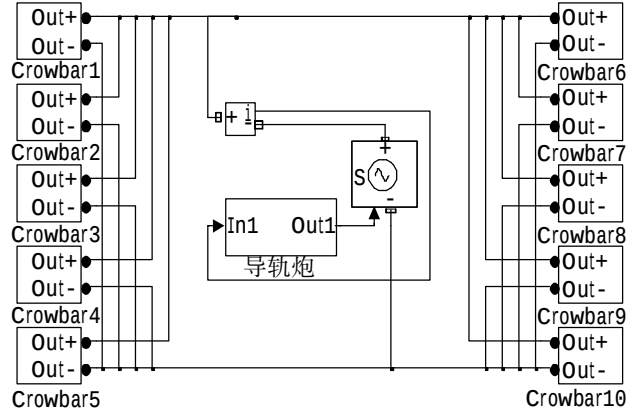


图 3 10 个 Crowbar 回路与导轨炮的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of crowbar circuit and railgun

2 Crowbar 电源网络与导轨炮负载匹配分析

在 Crowbar 电源网络构建过程中, 因为并联后网络的复杂性以及导轨炮负载的非线性, 整个电路呈现高阶状态, 无法根据目标波形的要求得到电路参数的解析解, 所以需采用电路仿真, 反复调节, 以获取电路参数。

负载阻抗特性一定时, 电源与负载匹配性能的提升主要来自电源网络结构参数的调整, 电源网络参数的调整将影响输出波形的形状和幅值, 进而决定负载的输出特性。下面将在波形构建过程中, 以构建特定幅值和纹波系数小于一定指标的方波为目标, 通过探讨 Crowbar 支路数量、Crowbar 支路中器件参数、纹波系数对负载波形参数和效率的影响来分析 Crowbar 网络和导轨炮负载的匹配特性。已知电流峰值越高, 效率越高^[1,3], 但是电流峰值要受到器件的限制, 文中选取 300 kA 作为目标波形的峰值。考虑到回路中连接件和器件的电感, 以 $3 \mu\text{H}$ 作为回路电感的下限。

2.1 Crowbar 支路中器件参数、纹波系数对波形的影响

波形一般由波前、波峰和波尾组成。波形构建过程中, 简便起见, 先采用一定数量的相同参数 Crowbar 支路同时导通, 构成具有一定上升沿和幅值的电流波形, 作为方波波前。再添加其他导通时序的 Crowbar 支路来调节波形脉宽, 整个波形调节过程中要求纹波系数满足一定的要求。

构建波前时, 如果采用相同参数的支路不一定能刚好达到 300 kA 的电流, 此时可添加一路电容值较小的支路以满足电流峰值要求。图 4 为 Crowbar 支路电容 $C=5.0 \text{ mF}$, 电容充电电压 $U=3 \text{ kV}$, 电感 $L=10 \mu\text{H}$ 时的 4 个支路构成的方波波前, 其上升沿为 $334 \mu\text{s}$, 幅值 300 kA。

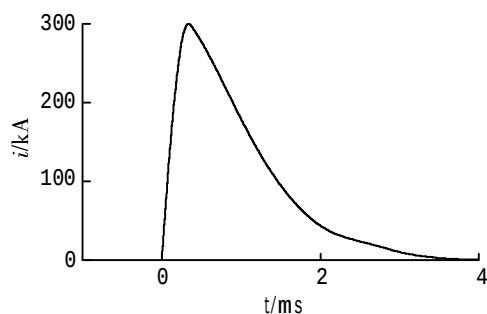
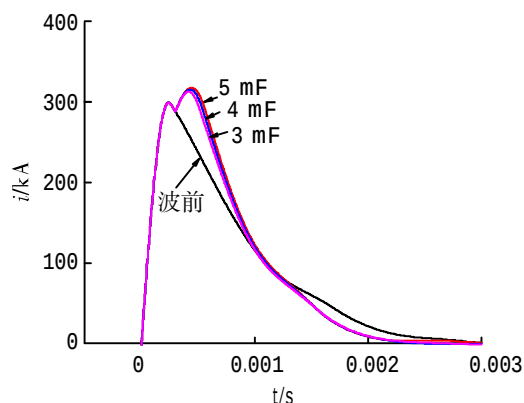


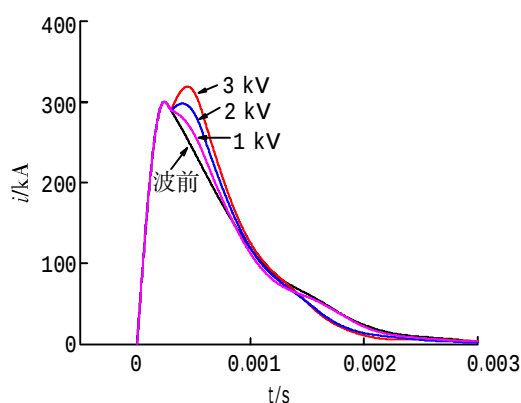
图 4 方波波前

Fig. 4 The wavefront

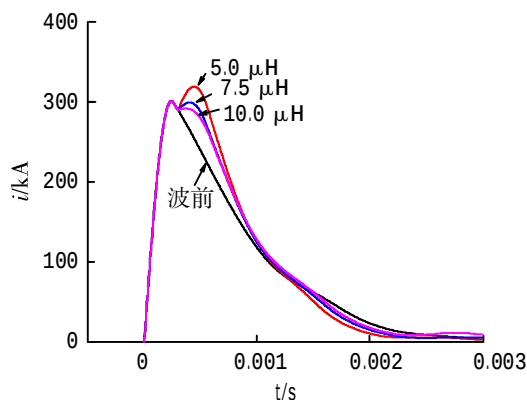
在前面构成波前的 Crowbar 支路基础上添加第



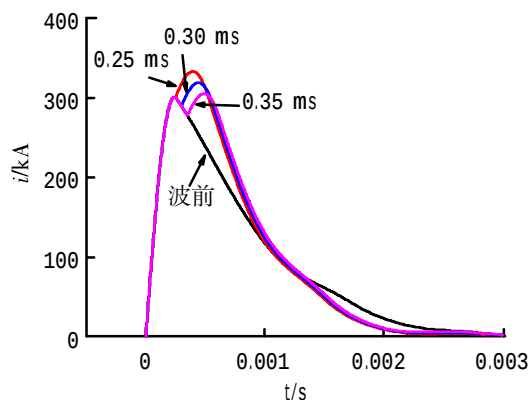
(a) 电容容值对波形的影响



(b) 新增支路不同时刻导通时对波形的影响



(c) 回路电感对波形的影响



(b) 电容充电电压对波形的影响

图 5 构建方波时支路参数对波形的影响

Fig. 5 The influence of circuit's parameters on waveform

刻对应电流和图 4 中波前电流峰值之差与峰值的比值即可视为纹波系数的下限, 因此从对纹波系数的下限要可以推导出各个支路的导通时刻, 而该支路引起的第 2 个波峰电流和波前电流峰值之差与波前峰值的比值可视为纹波系数的上限, 调节支路电感和充电电压和电容均可以使该支路引起的波峰符合纹波系数上限要求。电容为储能元件, 并且在实际发射试验时, 如果所有电容充电电压一致, 将会减少装置或操作复杂性, 因此不调节电容参数, 而是调节支路电感使波形满足纹波上限要求。

5 个 Crowbar 支路, 分析该支路参数对整个波形的影响。支路添加后波形的变化具有一定相似性, 因此仅分析第 5 个支路即可, 对第 6 个和之后的支路不作分析。图 5 为不同参数的第 5 个支路对回路波形的影响。

新支路的引入, 增加了波峰持续时间, 陡化了波形的下降沿。图 5(a)、(b)、(c) 说明新增支路电容容值、电容充电电压和回路电感均对波形有调节效果, 只是影响方式不一样。图 5(d) 为新增支路不同时刻导通所形成的波形, 从图中可见新增支路的导通时刻与波形的纹波系数关系密切, 第 5 个支路的导通时

综上, 可以得到构建方波的一般方法: ①根据幅值和上升沿要求, 采用多路同时放电获取电流波形的波前; ②根据纹波系数的要求, 得到下一个支路的导通时刻、支路的电感值; ③对于一个参数确定的导轨炮, 幅值和纹波系数确定后, 采用多少个支路产生方波具有最大的效率, 在下一节讨论。

2.2 Crowbar 支路数量对效率的影响

在之前构建的波前基础上继续完成整个方波的构建。支路电容为 5 mF, 充电电压 3 kV, 波形纹波系数 1%, 以纹波系数下限要求确定时序, 以调节电

感满足纹波系数上限。添加的支路参数见表 1, 逐渐增加支路数时回路电流波形见图 6, 电枢出膛速度和系统效率随支路数的变化规律见图 7。

表 1 峰值 300 kA, 纹波系数 1% 时构建方波的支路参数

Tab. 1 Circuit's parameters of square-wave with 300 kA amplitude, 1% ripple

参数	Crowbar1-4	Crowbar5	Crowbar6	Crowbar7	Crowbar8	Crowbar9	Crowbar10
导通时间/ms	0.000	0.267	0.439	0.567	0.700	0.805	0.904
电感/ μH	5.0	8.9	8.2	8.3	6.3	5.7	4.7

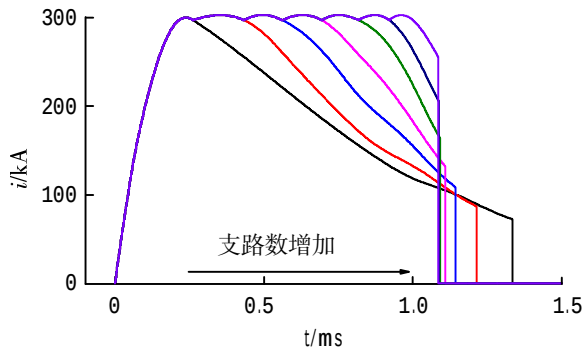


图 6 支路数增加时电流波形变化

Fig. 6 Changes of current waveform when the number of branches increased

形峰值持续时间不断增加, 电枢在导轨上加速时间变短, 导轨中剩余电流越来越大, 10 个支路时剩余电流高达 250 kA。

从图 7 中可以看出, 效率的变化与出膛速度的变化不同, 随着电流波形波峰时间的增加, 出膛速度一直增加, 但是效率先得到提高, 之后又开始下降。这是因为 Crowbar 支路的引入, 增加了峰值持续时间, 使电枢维持一个较高加速度, 从而电枢出膛时的动能增大, 但是也改变了电枢离开导轨时导轨中的剩余电流, 使导轨炮中剩余磁能增加, 当这两者达到平衡时, 导轨炮系统具有最大的效率。此外, 由于导轨长度的限制, 支路数增加到一定数量使电枢离开导轨时电流处于峰值时, 电枢出膛之前的电流波形不会再次发生变化, 速度将达到一个极限。

2.3 纹波系数对效率的影响

纹波系数越小, 所得波形波峰更为平缓, 更接近于方波, 效率应该越高, 但在 Crowbar 支路上并非如此。图 8 为导轨足够长时, 不同纹波系数下 10 个支路构成的回路电流波形, 可见, 纹波系数越小, 10 个支路得到的电流波形波峰时间越支路也就越多。

图 9 为纹波系数 3%、1% 和 0.5% 时效率和速度随支路数的变化, 不同纹波系数下, 效率和出膛速度随支路数的变化规律相同, 但是整体幅值上, 纹波系数越小, 效率相对要低。纹波系数更小时, 新添加支路导通时刻也就越早, 为了抑制新添加支路引起的

图 6 中波形从左到右依次对应 Crowbar 支路数 4 个增加到 10 个的电流波形, 电流截止位置为电枢离开导轨的时刻。随着 Crowbar 支路的增加, 电流波

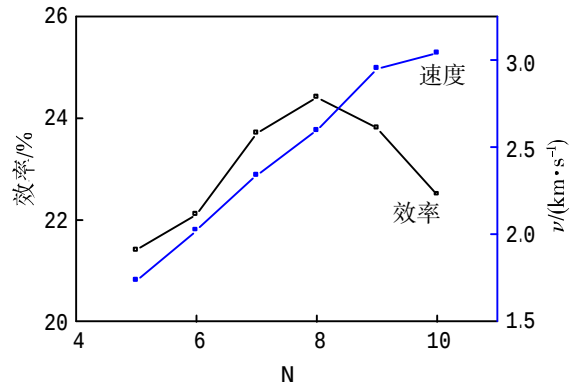


图 7 效率和速度随支路数变化

Fig. 7 Efficiency and velocity vs branch number

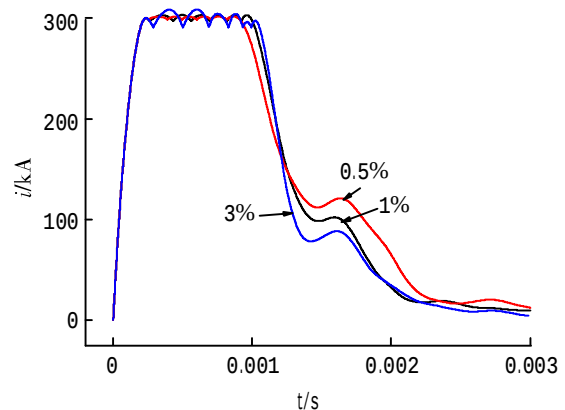


图 8 不同纹波系数下 10 个支路时电流波形

Fig. 8 Current waveforms when different ripple factors in 10 branches

波峰, 该支路需要选用更大的电感, 而电感的增加引起了整个电流波形脉宽的延展, 使波峰下降时间提前, 而波尾电流处在较高的幅值, 增高了电枢出膛时系统的剩余磁能。这点从图 8 也可以得到印证。该结论并非与方波能够提高效率相悖, 如果某种电源网络能够使所有能量都在方波阶段释放, 方波纹波系数越小, 效率会越高。

纹波系数增大时, 效率得到一定提升, 但是此时方波峰值阶段的震荡也更明显, 造成电枢和弹丸在加速过程中受力不均匀, 并且在构造方波过程中发现, 纹波系数越大时, 需要较小的电感, 支路导通时间越靠后, 支路电感也越小, 因为整个电源尺寸的限

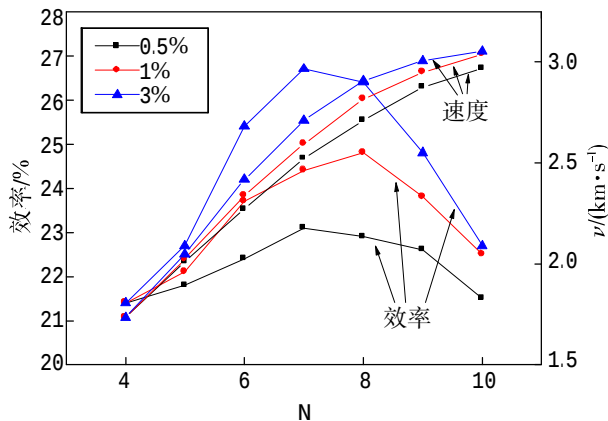


图 9 不同纹波系数下效率和速度随支路数的变化
Fig. 9 Efficiency and velocity vs branch number when different ripple factors

制,要获取更小的电感将有一定的难度。因此需要综合权衡波形震荡、器件参数实现与效率的关系。

2.4 Crowbar 支路参数对效率的影响

方波构建过程中,当回路波形的参数峰值和纹波系数确定时,导通时序作为控制纹波系数限的方法已经被确定,电感作为调节纹波系数上限的方法也被确定,因此文中不去分析不同时序和电感对效率的影响,仅分析电容和充电电压对效率的影响。分析中设定峰值 300 kA,纹波 1%;分析中改变了电容和电容充电电压,构成相同峰值波前的支路数会有所不同;为了使结果具有可比性,对构成波前的支路电感进行适当的调整,使波形上升沿一致。

取回路电容充电电压为 3 kV,分析不同电容值 4、5、6 mF 时速度和效率随支路数的变化,结论见图 10。

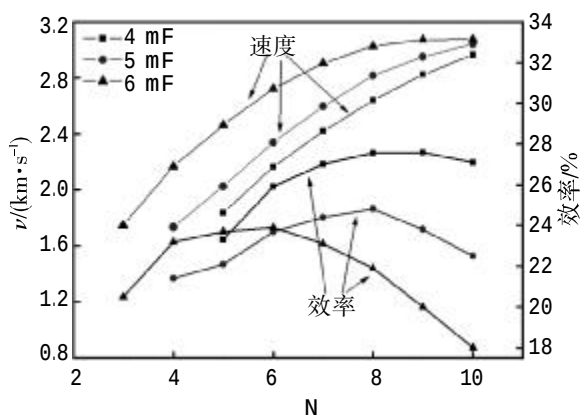


图 10 不同电容下速度和效率随支路数变化
Fig. 10 Efficiency and velocity vs branch number when different capacitance

从图 10 可以看出随着电容值的增加,构成波前和达到最大效率需要的支路数减少,但能够得到的最大效率也会下降。电容为 6 mF 时,电枢出膛速度在 9 个支路时已经达到极限,再增加支路不会再增

加速度。相同支路时,较高电容下获得的出膛速度会更高;相同的出膛速度时,电容值较小会引起支路数增加,但是效率却得到提高。

取电容值为 5 mF,分析不同充电电压 2.5、3、3.5 kV 时速度和效率随支路数的变化,结果见图 11。

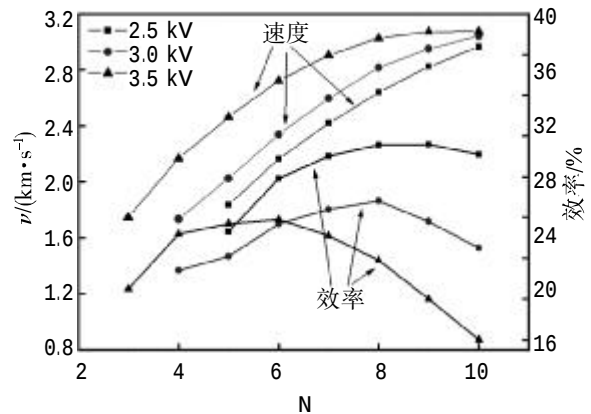


图 11 不同电压下速度和效率随支路数变化
Fig. 11 Efficiency and velocity vs branch number when different voltage

从图 11 中可以看到,电容充电电压和电容值对效率和速度的影响规律相似。随充电电压的增加,构成波前和达到最大效率需要的支路数减少,但是能够得到的最大效率下降。充电电压 3.5 kV 时,电枢出膛速度在 9 个支路时已经达到极限,再增加支路不会再增加速度。相同支路时,较高电容充电电压下获得的出膛速度会更高;相同的出膛速度时,较低电容充电电压时虽然支路数增加,但是效率也得到相应提高。

综上,在构建方波时为了提高效率应选择低容值、低充电电压支路,但此时得到相同的出膛速度时相对高容值、高充电电压支路会增加支路数目,造成装置和控制的复杂性,因此必须均衡考虑出膛速度、效率和支路数目来确定电容和电容充电电压。

3 结语

文中建立了采用 Crowbar 回路的电源网络与串联增强型导轨炮的仿真模型。分析了 Crowbar 支路参数、纹波系数对所构建波形的影响,得到了采用 Crowbar 支路搭建导轨炮负载电源的一般方法:①根据回路电流峰值要求,以一定数量的支路同时导通的方式构建电流的峰值;②根据纹波系数的下限确定下个支路的导通时刻,并调节该支路的电感以满足纹波上限,以此类推添加支路,直到获得效率最高的电源网络。

在该方法的基础上,分析了 Crowbar 支路数目、纹波系数和支路参数对整个系统效率的影响:①支

路数增加时,效率先增加后减小,且存在一个最大效率;②采用 Crowbar 支路时并非纹波系数越小得到的效率就越高;③电容值和电容充电电压对效率影响具有相同的规律,数值越小时,虽然需要的支路数越多,但是能够获得的最大效率也越高。

参考文献:

- [1] 王莹,肖峰.电炮原理[M].北京:国防工业出版社,1995.
WANG Ying, XIAO Feng. The physics of electric launch [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.
- [2] RUTBERG P G, KUMKOVA I I, SHVETSOV G A, et al. New steps in EML research in Russia[C]//The 14th International Symposium on EML Technology. Victoria, BC: IEEE, 2008:10-13.
- [3] LYU Qing'ao, LI Zhiyuan, LEI Bin, et al. Review on the technology characteristics and the military application of railgun [C]//The 14th International Symposium on EML Technology. Victoria, BC: IEEE, 2008:14-18.
- [4] HAN Yongxia, LIN Fuchang, DAI Ling, et al. Analysis of electric parameters of a PPS system and their influence on muzzle velocity in EMG [C]//The 14th International Symposium on EML Technology. Victoria, BC: IEEE, 2008:31-35.
- [5] SHI Zhengjun, YU Xinjie. Two-objective optimization design for pulsed power supply [C]//The 14th International Symposium on EML Technology. Victoria, BC: IEEE, 2008:36-40.
- [6] JULIAN A L, BLACK J H, MAIER W B. Power supply design for high voltage capacitor discharge railgun supply using thyristors [C]//The 14th International Symposium on EML Technology. Victoria, BC: IEEE, 2008:41-45.
- [7] 周媛,严萍.脉冲成形网络参数对轨道型电磁驱动系统效率的影响[J].强激光与粒子束,2010,22(3):13-19.
ZHOU Yuan, YAN Ping. Effect of pulse forming network parameters on efficiency of electromagnetic launch system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(3): 13-19.
- [8] DONG Jiannian, ZHANG Jun, LI Jun, et al. The 100 kJ modular pulsed power units for railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1):275-278.
- [9] LI Jun, WANG Yongfeng. Experimental results from pseudoliquid armatures launched by two-turn railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1):80-82.
- [10] 杨玉东,王建新.电容式电磁炮电源电路的设计与仿真[J].高压电器,2008,44(5):435-437.
YANG Yudong, WANG Jianxin. Design and simulation of power source for capacitive EM gun [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5):435-437.
- [11] 陈庆国,张海燕.电容器储能型轨道电磁炮的理论分析与动态仿真[J].电机与控制学报,2006,10(1):23-26.
CHEN Qingguo, ZHANG Haiyan. The circuit theory analysis and dynamic simulation for the capacitor driven railgun [J]. Electrical Machines and Control, 2006, 10(1): 23-26.
- [12] 彭波,林福昌.储能电容器组保护电感结构与保护方法的研究[J].高压电器,2012,48(6):48-52.
PENG Bo, LIN Fuchang. Protection inductor structure and protection methods for pulsed capacitor banks [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6):48-52.
- [13] 孟绍良,贾保明.用于电热化学发射试验的脉冲电源系统[J].弹道学报,2004,16(1):86-90.
MENG Shaoliang, JIA Baoming. Setup of pulsed power system for electrothermal-chemical launcher research [J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(1): 86-90.
- [14] SITZMAN A, SURLS D, MALLICK J. Design, construction and testing of an inductive pulsed-power supply for a small railgun [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2007, 43(1): 270-272.
- [15] DEDIE P, BROMMER V, SCHARNHOLZ S. Twenty-stage toroidal XRAM generator switched by countercurrent thyristors [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 263-267.
- [16] DEDIE P, SCHARNHOLZ S, BROMMER V. ICCOS counter-current thyristor high-power opening switch for currents up to 28 kA [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(4): 1235-1239.
- [17] 陈志强.导轨炮负载特性的仿真和试验研究[D].西安:西安交通大学,2011.
CHEN Zhiqiang. Simulation and experimental study of railgun's load characteristic [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2011.
- [18] 于群,曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M].北京:机械工业出版社,2011.
YU Qun, CAO Na. Power system modeling and simulation based on MATLAB/Simulink [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
- [19] 章程,方志.基于 Simulink 的介质阻挡放电的仿真[J].高压电器,2007,43(3):218-221.
ZHANG Cheng, FANG Zhi. Simulation of dielectric barrier discharge using Simulink [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3):218-221.
- [20] 马朝华,杨育霞.基于 MATLAB/Simulink 的 CVT 铁磁谐振过程的仿真研究[J].高压电器,2007,43(3):209-211.
MA Zhaohua, YANG Yuxia. Simulation of CVT'S ferroresonance process based on MATLAB/Simulink [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3):209-211.

陈志强(1987—),男,助理工程师,硕士,主要从事脉冲电源的研究。