

轨道炮的消弧实验研究

为了研究轨道炮的消弧措施，搭建了电磁轨道炮的仿真模型，对电阻消弧和电容消弧进行了仿真，得到了仿真结果。给出了实验中电弧电阻的求解方法，为熄弧电阻的选择提供了依据。对电容消弧方法进行了实验验证，熄弧电容容量选为600 μF，理论上熄弧电容的极限回收电压为1.3 kV，实际回收电压为256 V，回收效率较低，熄弧效果不明显。结合电容熄弧方案的实验情况，分析了电容熄弧效果不佳的原因，提出了通过改变熄弧电容容量来提高回收效率的改进措施。

李振超 孙德元 于德江 陈 冲/中国电子科技集团公司第二十七研究所

电磁轨道炮在弹丸出膛后，由于电路的瞬时断开会在炮膛出口处起弧。电弧的存在，一方面会烧蚀轨道，引起轨道摩擦系数的变化，影响轨道炮的使用寿命；另一方面拉弧会产生大量的等离子体，破坏轨道炮的使用环境，影响其他能源组件的正常工作。从系统效率角度来看，炮口起弧是将残存在炮膛中的电磁能以热能的方式消耗掉，这部分能

量的消耗严重影响了整个电磁发射系统的效率。为了提高电磁发射系统的整体效率，需要考虑回收残存在电磁轨道炮中的剩余磁能。

目前，国内外对于炮口熄弧主要采取两类措施：①一类是在炮口跨接电阻，电阻耗能来达到消弧的目的^[1]；②另一类则是在炮口两端跨接电容器，通过电容器维持炮尾的电气连接，避免起弧同时可以回收轨道炮中残余的能量^[2]。

本文通过搭建电磁轨道炮的仿真模型，对电阻熄弧和电容熄弧进行了仿真，得到了仿真结果。并对电容熄弧方案进行了实验，通过对比仿真数据与实验结果，分析了消弧支路阻抗选择原则。

轨道炮的消弧仿真

1. 仿真模型

根据文献[3]中提出的仿真模型，在PSPICE中搭建了如图1所示的仿真模



李振超/工程师

关键词/Keywords

电磁轨道炮 ·
仿真模型 ·
电阻熄弧 ·
电容熄弧 ·

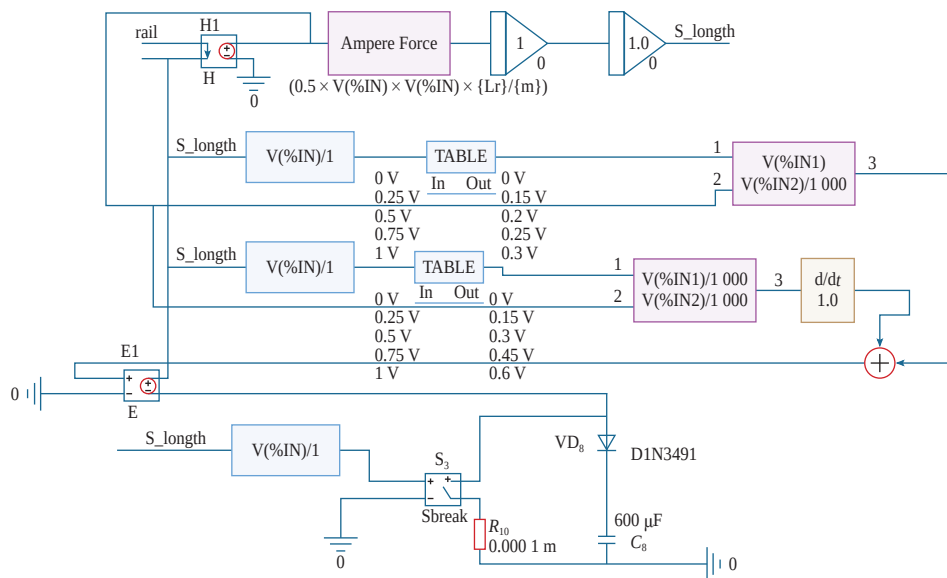


图1 电磁轨道炮仿真模型

型。在这个模型中取轨道炮的电阻梯度为 $0.1\text{ m}\Omega/\text{m}$ ，电感梯度为 $0.6\text{ }\mu\text{H}/\text{m}$ ，实验中所用的炮体长度取为 1 m 。

在仿真过程中，主回路采用3个75 kJ的PFN模块，单个模块的电容量为 $2\text{ }344\text{ }\mu\text{F}$ ，每个PFN模块的充电电压为 $1\text{ }400\text{ V}$ ，根据式(1)可知3个模块的总能量约为7 kJ，即

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

2. 电容消弧仿真

图2为主电流的仿真结果，图3为熄弧电容两端电压波形。主回路电流峰值为 60 kA ，电容器两端电压最高达到了 1.6 kV ，出膛电流达到了 26 kA ，所建模型模拟了弹丸出膛的过程。回路以及炮体的电感为 L ，取为 $6\text{ }\mu\text{H}$ ，则可以从能量守恒的角度计算电容器的理论充电电压。根据能量守恒可以计算出电容的理论最高充电电压 $U = 2\text{ kV}$ ，即

$$\frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2)$$

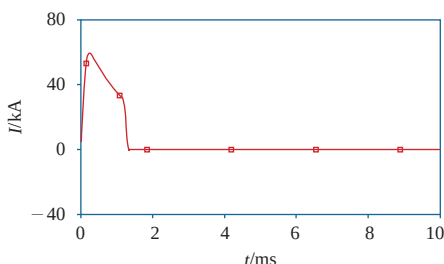


图2 主电流波形

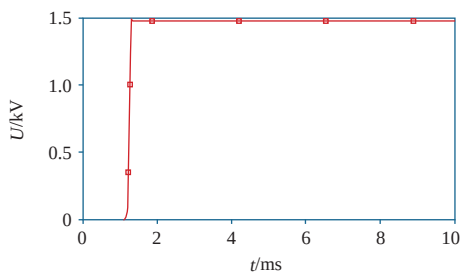


图3 熄弧电容两端电压波形

由仿真结果可以得知消弧电容的电压回收效率为 $1.6/2 = 80\%$ ，由于 2 kV 是一个理论计算的极限值，考虑线路电阻以及电感内阻，部分能量以热能的形式消耗掉，因此回收电压不可能达到100%。

仿真结果显示，二极管两端的电压最高为 3.4 kV 。这是因为弹丸在出膛的瞬间，二极管、电容支路瞬间流过轨道炮残余电流，电流的变化率较大，而二极管存在结电容，因此二极管两端会产生过电压现象^[2-4]。在实验时需要注意二极管是否能承受此电压。

在实验连线中，电容器与轨道炮之间需要连接铜线，连线之间的杂散电感会影响电容器的最终回收电压。电容器与轨道炮之间连线长约 1 m ，取熄弧支路的杂散电感为 $1\text{ }\mu\text{H}$ ；将 $1\text{ }\mu\text{H}$ 电感加入熄弧支路进行仿真。由仿真结果可以得知：熄弧电容的最终回收电压约为 1 kV 。由此可以得出如下结论：熄弧支路的杂散电感对实验结果影响很大。由于熄弧支路杂散电感的存在，熄弧支路的电流到达峰值的时间变长、其峰值变小，主回路中消耗的能量增多，熄弧电容上的回收电压会有所降低。

3. 电阻消弧仿真

改用熄弧电阻替换熄弧电容，仍然采用上述仿真模型进行仿真。熄弧电阻值的选取应遵循如下原则：熄弧电阻支路阻抗应该大于电枢支路的阻抗，并且其阻抗值应该小于电弧阻抗值。仿真过程中分别选取熄弧电阻阻值为 $2\text{ m}\Omega$ 和 $20\text{ m}\Omega$ ，电流波形如图4和图5所示。

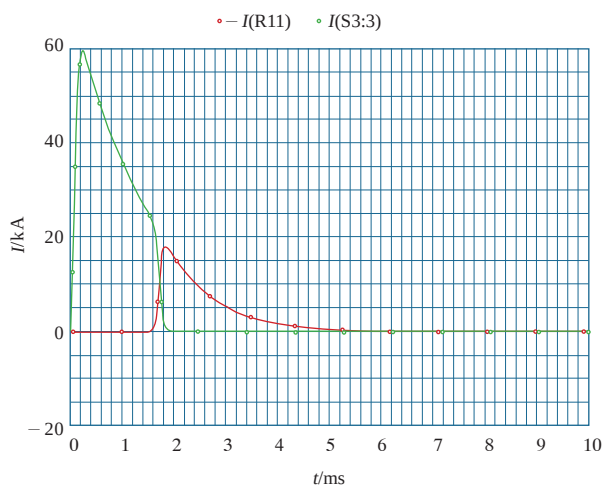


图4 熄弧电阻 $2\text{ m}\Omega$ 的波形

从仿真的效果来看，电阻为 $2\text{ m}\Omega$ 时，熄弧支路吸收的能量最多，但是对于熄弧电阻的选取还

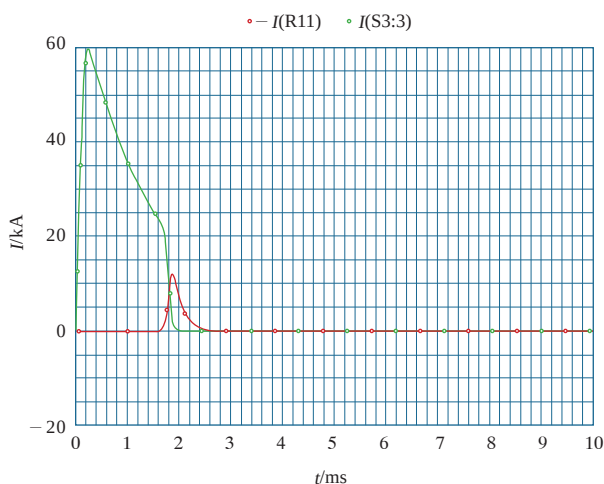


图5 熄弧电阻20 mΩ的波形

是比较随意；由主电流的波形可以看出选用2 mΩ电阻时，主电流下降比较快，表示主回路所消耗的能量较少。据此，需要进一步确定电弧的电阻。

4. 电弧电阻的求解

根据式（3），用实验过程中测得的轨道炮炮口电压值除以主回路的电流值得电弧电阻的变化曲线，如图6所示，即

$$R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

从图6中可知，弹丸大约在2 ms左右出膛，在弹丸未出膛时，由电压除以电流可得到电枢支路的电阻值，其电阻值维持在2~3 mΩ之间有助于仿真模型中电枢电阻的选择与验证。在弹丸出膛后，电压除以电流为电弧电阻值，电弧电阻在变化过程中，有一段稳定的时间，可以认为在这段

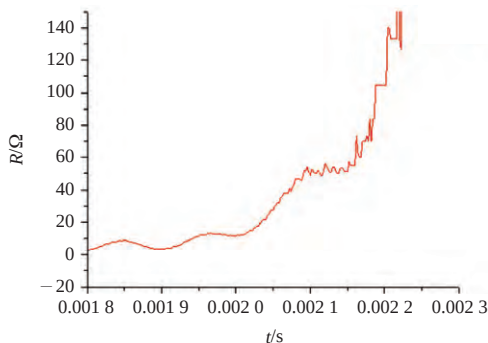


图6 电弧电阻变化趋势图

时间内，电弧稳定，其电阻值平均为50 mΩ。

电容消弧实验

由于电容消弧方式可以回收残存在电磁轨道炮中的剩余磁能，提高电磁发射系统的整体效率，本文采用电容消弧方式进行了实验。实验时采用了两个PFN模块，单个模块的电容量为2 344 μF，二极管放在晶闸管的前面，调波电感为10 μH。试验中采用轨道炮炮口并联电容的方式回收能量，同时避免炮口起弧，并联电容的容量为600 μF。为了防止熄弧电容回收的能量反馈到回路中，在熄弧之路中串联了一个二极管，实验中使用的是4寸二极管。

实际进行实验时由于回路中电感较大，因此将调波电感改为5 μH，这样可以降低实验的充电电压，确保开关器件的安全。

实验中，PFN模块的电容器充电电压为1 800 V，实验时电流电压波形如图7所示。从实验结果可知，流经弹丸的峰值电流为54.4 kA，弹丸出膛时的剩余电流为15 kA，熄弧电容上的回收电压为256 V。

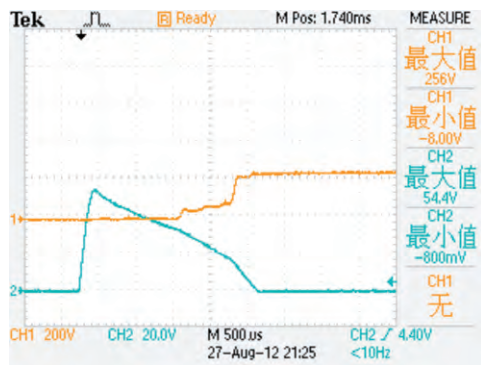


图7 主电流与回收电压

对熄弧电容回收电压的理论估算：一个电源模块中调波电感5 μH，回路电感取3 μH，两个模块并联则取总电感为4 μH，由式（2）可以得出熄弧电容的极限回收电压为1.3 kV。可见实际消弧电容的电压回收效率比较低。在实验时炮口仍然起弧，熄弧电容只回收到了部分电压，熄弧失败。炮口起弧，电弧电压限制了熄弧电容的能量回收。

在进行消弧实验时应该保证消弧支路的阻抗

远小于电弧电阻值,这样才能保证弹丸出膛时电流主要走消弧支路;但同时,消弧支路的阻抗应该远大于电枢电阻,保证放电瞬间主电流走电枢支路,而非消弧支路。从实验结果分析,认为消弧支路的阻抗选择不合适影响了实验结果。有关熄弧电容的容量选取,文献[2]中提到:熄弧电容的容量要与主电路的电容量可比拟。目前使用的熄弧电容容量为600 μF ,主电路中为两个2 344 μF 的电容器,因此可以考虑改变熄弧电容的电容量,从而改变熄弧支路的阻抗,使其在起弧后小于电弧支路的阻抗,这样回路中的剩余电流才能大部分回收到熄弧电容中,进而有利于剩余能量的回收。

结束语

电磁轨道炮的消弧是在其应用中需要解决的问题。目前,国内外对于炮口消弧主要采取的措施有电阻消弧和电容消弧两种。为了研究轨道炮的消弧措施,本文介绍了轨道炮的行为仿真模型,得到了电容消弧与电阻消弧两种方法的仿真结果,并给出了实验中电弧电阻的求解方法,为熄弧电阻的选择提供了依据。

由于电容消弧方式可以回收残存在电磁轨道炮中的剩余磁能,提高电磁发射系统的整体效率,本文采用电容消弧方式进行了实验。实验中采用了两个PFN模块,单个模块电容量为2 344 μF ,熄弧

电容容量选为600 μF ,这样实际熄弧电容上的回收电压为256 V,回收效率较低。在进行消弧实验时应该保证消弧支路的阻抗远小于电弧电阻值,这样才能保证弹丸出膛时电流主要走消弧支路;但同时,消弧支路的阻抗应该远大于电枢电阻,保证放电瞬间主电流走电枢支路,而非消弧支路。因此可以考虑改变熄弧电容的电容量,从而改变熄弧支路的阻抗,使其在起弧后小于电弧支路的阻抗,这样回路中的剩余电流才能大部分回收到熄弧电容中,进而有利于剩余能量的回收。

参考文献

- [1] Parker V, evinson S J L. Muzzle arc control using an inductive shunt [J]. IEEE Ransactions on Magnetics, 1997 (33): 594-598.
- [2] Bernardes J S, Lacava G P. Analysis of a railgun capacitor-muzzle-shunt energy recovery scheme [J]. Power Modulator Symposium, 2002, 30 (6): 347-350.
- [3] 胡玉伟. 电磁轨道炮系统的建模与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] 杨玉东, 王建新, 薛文. 轨道炮动态负载特性的分析与仿真 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (8): 1026-1031.

(收稿日期: 2015-01-20) EA

(上接第112页)

- [4] 杨世武, 姜锡义, 王星晖, 等. 高速铁路站内绝缘节和钢轨烧损模拟测试及研究 [J]. 铁道学报, 2013, 35 (10): 82-88.
- [5] 雷栋, 董平安, 张雪原, 等. 重载电气化铁道钢轨电位的测试与分析 [J]. 铁道学报, 2010, 32 (5).
- [6] 缪耀珊. 交流电气化铁道的钢轨对地电位问题 [J]. 电子电气自动化, 2007 (4).
- [7] 张婧晶. 高速铁路综合接地系统的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

- [8] 胡京, 蓝磊, 文习山. 工频电流对金属管道烧蚀试验研究 [J]. 高压电器, 2010, 46 (2): 56-57.
- [9] KieBling, Puschmann, Schmieder. 电气化铁道接触网 [M]. 中铁电气化局接团有限公司, 译. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 电气化铁道设计手册 牵引供电系统 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- [11] 谭秀炳, 刘向阳. 交流电气化铁道牵引供电系统 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002.

(收稿日期: 2014-07-23) EA