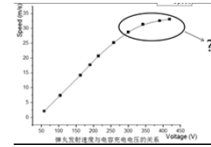


单级脉冲感应式电磁炮的制作、仿真与优化

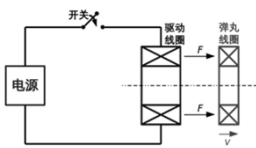
答辩人：曾明亮 PB16060117 计算机学院
导师：周海洋

研究动因

- ▶ 目前绝大多数关于电磁炮的研究都是针对磁阻式电磁炮，对感应式电磁炮的研究非常罕见。
- ▶ 磁阻式电磁炮的效率太低。（典型值是2%左右）
- ▶ 磁阻式电磁炮的速度提升空间极其有限。



感应式电磁炮的工作原理



当开关闭合时，电流通过驱动线圈，驱动线圈磁通量急剧增大，在弹丸线圈上感应出方向相反的环形电流，此环形电流与驱动线圈产生的磁场相互作用产生强大的安培力，驱动弹丸线圈向前运动。

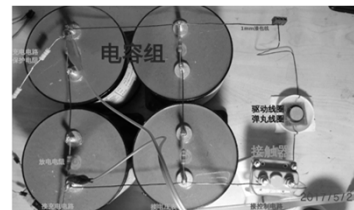
感应式电磁炮相比磁阻式电磁炮的优点

- ▶ 磁化电流有上限（磁饱和现象），感应电流无上限。故感应式电磁炮提高电容初始电压时效率不会明显降低。
- ▶ 磁阻式电磁炮有回拉现象，感应式电磁炮基本不存在回拉现象。故感应式电磁炮可以不需要精确的关断措施。

感应式电磁炮的制作

- ▶ 储能电源选用了容量 $C = 92\mu\text{F}$ ，耐压 $U_{\text{max}} = 1600\text{V}$ ，等效串联电阻 $\text{ESR} = 1\text{m}\Omega$ 的薄膜电容阵列。
- ▶ 开关选用了直流接触器。
- ▶ 驱动线圈使用直径 1mm 的漆包线绕制而成，每层 10 匝（内径 5mm ，外径 25mm ），共两层（厚度 2mm ）共 20 匝。
- ▶ 弹丸线圈选用直径为 20mm 、厚度为 1mm 的厚铝片（相当于一匝的线圈），材质为 6061 铝合金（密度： $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ ，电阻率： $4.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）。
- ▶ 电容充电电路选用了 12V 直流电转 2kV 高频交流电的升压模块，通过全波整流后为电容组充电。

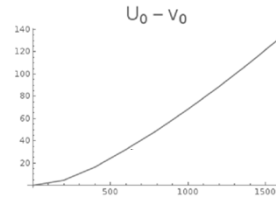
感应式电磁炮的制作



实验数据

初始电压 (V)	电源储能 (J)	初速 (m/s)	动能 (J)	效率 (%)
200	1.84	4.6	0.02	0.98
400	7.36	16.4	0.23	3.11
600	16.56	32.2	0.88	5.33
800	29.44	49.3	2.07	7.03
1000	46.00	68.4	3.98	8.66
1200	66.24	88.7	6.70	10.11
1400	90.16	110.3	10.36	11.49
1600	117.76	133.2	15.11	12.81

实验数据



感应式电磁炮的仿真

► 推导两圆环之间互感的公式:

$$M_{12}(a,b) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{C_1} \int_{C_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{R}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\phi_1=0}^{2\pi} \int_{\phi_2=0}^{2\pi} \frac{ab \cos(\phi_2 - \phi_1) d\phi_1 d\phi_2}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\phi_2 - \phi_1)}}$$

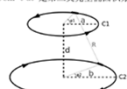
$$= \frac{\mu_0 ab}{2} \int_0^{2\pi} \frac{d\theta}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}}$$

$$= \frac{\mu_0 ab}{2} \int_0^{\pi} \frac{2 d\theta}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}}$$

$$= \mu_0 ab \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}}$$

$$= \mu_0 ab \left[\frac{2}{\pi} K(k^2) - \frac{2}{\pi} E(k^2) \right]$$

其中: $k = \sqrt{\frac{4ab}{a^2 + b^2}}$
 $K(x) = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1-x^2 \sin^2 \theta}} d\theta$ 是第一类完全椭圆积分
 $E(x) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-x^2 \sin^2 \theta} d\theta$ 是第二类完全椭圆积分



► 推导两线圈之间互感的公式:

$$M = \frac{\mu_0 n_1 n_2 \int_{x_1=x_{11}}^{x_1=x_{12}} \int_{y_1=y_{11}}^{y_1=y_{12}} \int_{x_2=x_{21}}^{x_2=x_{22}} \int_{y_2=y_{21}}^{y_2=y_{22}} M_C(x_2-x_1, y_2-y_1)}{(x_{12}-x_{11})(y_{12}-y_{11})(x_{22}-x_{21})(y_{22}-y_{21})}$$

将两个线圈的参数代入互感系数计算公式即可求出自感。



感应式电磁炮的仿真

可以列出驱动线圈与弹丸线圈的电压方程:

$$U_d = I_d(R_d + R_c + R_r) + L_d \frac{dI_d}{dt} + M \frac{dI_p}{dt} = I_p \frac{dM}{dx} v_p$$

$$U_p = I_p R_p + L_p \frac{dI_p}{dt} + M \frac{dI_d}{dt} + I_d \frac{dM}{dx} v_p$$

由于驱动线圈两端直接与电容组相连, 故可以得到:

$$\frac{dU_d}{dt} = -\frac{I_d}{C}$$

而弹丸线圈本身构成闭合回路, 故可以得到:

$$U_p = 0$$

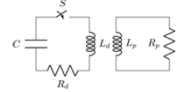
两线圈作用力大小即为互感梯度与两线圈电流大小的乘积, 结合牛顿

第二定律公式可以得到:

$$m \frac{dv_p}{dt} = \frac{dM}{dx} I_d I_d$$

由速度与位移的关系可以得到:

$$\frac{dx}{dt} = v_p$$



感应式电磁炮的仿真

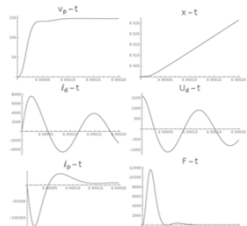
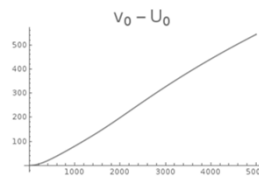


图 9 电容组初始电压 $U_0 = 1600V$ 时的仿真结果

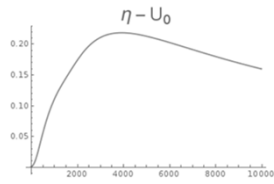
使用 Mathematica 求解微分方程即可得到仿真结果。仿真得到的弹丸初速为 144m/s, 与实验结果误差在 10% 以内, 这证明了建立的模型有一定的表述能力和预测能力。

驱动线圈电流大小峰值为 $7.48 \times 10^3 A$, 弹丸线圈感应电流大小峰值为 $1.25 \times 10^5 A$, 弹丸受力大小峰值为 $1.13 \times 10^4 N$, 加速度峰值为 $6.63 \times 10^6 m/s^2$ 。

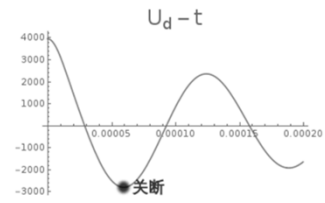
感应式电磁炮的电压与速度的关系



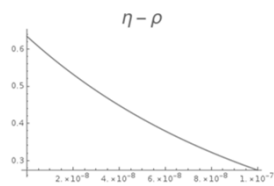
感应式电磁炮的优化——提高电压



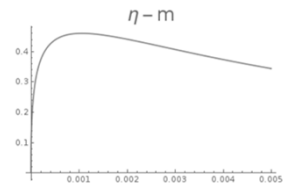
感应式电磁炮的优化——适时关断



感应式电磁炮的优化——减小弹丸电阻率



感应式电磁炮的优化——改变弹丸质量



结论——感应式电磁炮潜力巨大

- ▶ 相同储能级别下，感应式电磁炮的效率（13%）远高于磁阻式电磁炮（2%）。并且感应式电磁炮有巨大的优化空间，若提高电压并且适时关断（其他参数不变），效率甚至可以达到45%。
- ▶ 提高储能电容的初始电压，感应式电磁炮的发射初速度的提升空间远远大于磁阻式电磁炮。感应式电磁炮即使将初始电压提高到10kV，效率也不会下降太多；而磁阻式电磁炮初始电压提高到400V时，效率就已经严重下降。

展望——多级感应式电磁炮

- ▶ 需要精准控制开关通断
- ▶ 需要在使得柱状弹丸能够穿过驱动线圈的同时使驱动线圈和柱状弹丸的耦合度很高
- ▶ 需要解决弹丸在极高速运动时感应电流产生的反向电动势问题

谢谢聆听!



答辩人：曾明亮 PB16060117 计算机学院
导师：周海洋