

电磁炮采用电磁力发射弹丸，它突破了传统化学能发射弹丸的速度限制。作为一种全新概念的武器，其技术不仅在军事领域，同时在航空、航天、交通运输、工业生产、科学研究等领域具有不可估量的应用前景，各发达国家均从战略高度予以重视并不断加大力度开展研究。近年来随着新技术、新材料不断发展，电磁发射技术在发射装置、发射重量、弹丸速度、大功率电源等方面的研究取得了一系列成果。美国的苏伦斯·利弗莫尔国家实验室和洛斯·阿拉莫斯国家实验室曾合作，将 2.2g 的弹丸加速到 10km/s 的超高速。中国工程物理研究院流体物理研究所率先建造了我国第一台电磁轨道发射试验装置，把 0.34g 的弹丸加速到 16.8km/s 的速度。弹丸的超高速，使其具有了巨大的动能和极强的穿透力，从而大大提高了武器的射程和威力^[1-3]。

目前对电磁炮的研究方兴未艾，涉及到电磁炮研究的各个领域。而对于弹丸的速度建模问题，Parker 认为电磁炮的速度与膛壁烧蚀、等离子体质量增加有关；Ray 从运动阻力角度引入与速度有关的阻力项等^[4]。但这些研究都没有考虑空气阻力的问题，毫无疑问，这种情况的计算，都存在力学分析和计算时的缺陷。作为为高技术高精度的电磁发射装置，工程上要求对其进行精确的理论分析与计算。因此，本文在考虑了电枢运动过程中等离子体的粘性阻力、惰性阻力和空气阻力情况下，构建了电枢运动的受力和速度模型，并运用罚函数内点法对发射参数进行了优化计算。

1 电枢受力分析及运动模型的构建

电枢在受到电磁力的作用下，推动它前面的弹丸高速运动，因此电枢的选择是研究电磁轨道炮的一个重要环节。目前用于电磁轨道炮的电枢主要形式有固体电枢、等离子体电枢和复合电枢等 3 种，见图 1 所示：

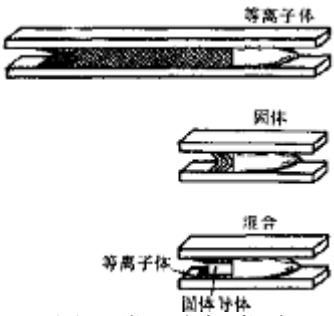


图 1 常见电枢类型

Fig.1 Common type of armature

本文所构造的模型采用等离子电枢。

电枢在大电流通过时，在极短时间内迅速熔化并汽化爆炸，形成等离子体电枢。等离子体电枢在轨道上运行时受到电磁力 F_L 的作用；随着电枢中电流的增大和时间的延续，等离子体的温度急剧升高，导致轨道内壁和发射体材料局部融化、蒸发，与等离子区混合，形成粘滞性阻力 F_v ；部分材料迁移到电枢上，增加了等离子体电枢的质量，形成惰性阻力 F_d ；实际电磁轨道炮发射过程中，等离子体电枢还会受到前方的空气阻力 F_a 。这几种力分别定义如下：

1) 根据电磁理论, 电磁力 F_L 可表达为^[4]:

$$F_L = \frac{dE}{dL} = \frac{1}{2} L' i^2 \quad (1)$$

式中: 电磁力 F_L 是电枢在轨道上受到的向前驱动力, E 为系统储存的能量, 主要为轨道分布电感的磁能; L' 为电感增量, 反映了单位长度导轨的电感; L 为电枢运动的位移量; i 为驱动电流。

2) 粘滞阻力 F_v 可表达为^[4]:

$$F_v = \frac{\lambda v^2 m_a (d + h)}{dh} \quad (2)$$

式中: λ 为粘滞因数, 与电枢与轨道的加工精度和光滑度有关, 在精度和光滑较高情况下,

$\lambda = 0.0125$; m_a 为电枢质量; d 为导轨间距; h 为导轨宽度; v 为电枢速度。

3) 惰性阻力 F_d 可表达为^[4]:

$$F_d = v \frac{dm_a}{dt} \quad (3)$$

电枢质量 m_a 按以下公式求出:

$$\frac{dm_a}{dt} = \alpha i U_a \quad (4)$$

$$m_a = \alpha U_a \int_0^t i dt + m_0 \quad (5)$$

式中: α 是烧蚀系数, 与速度、电枢与轨道的材料有关, 通常看作为一个常量, 当采用铜材料时, $\alpha \approx 4.7 \times 10^{-8} \text{ kg/J}$; m_0 为电枢的初始质量, 取 0.01 kg ; U_a 是弧压, 它的大小是模型合理的关键参数, 如果等离子体平稳时, 弧压可以通过测量轨道口出两端电压近似得到, 而根据澳大利亚坎培拉实验室及其他实验室^[5]的实验结果, 可以假定炮口电压为常数。

弧压与电枢电阻满足欧姆定律, 即:

$$U_a = i R_a \quad (6)$$

其中, R_a 为电枢电阻。

4) 空气阻力 F_f 为:

空气阻力与速度有关, 与电枢的横截面积有关, 近似表达式为^[6]:

$$F_f \approx 1.1 \rho_a S v^2 \quad (7)$$

$$S = d h \quad (8)$$

式中: ρ_0 为空气密度, 在标准状况下, 空气密度为 1.29kg/m^3 ; S 为炮膛的截面积。

等离子体电枢所受的合力为:

$$F = (m_p + m_a)\alpha = F_L - F_r - F_d - F_g \quad (9)$$

式中: m_p 为弹丸质量; m_a 为电枢质量; α 为电枢的加速度。

由牛顿定律和运动学公式, 得到电枢的瞬时速度和位移分别为:

$$\begin{cases} v = v_0 + \int_0^t \alpha dt \\ L = L_0 + \frac{1}{2} \int_0^t v dt \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_0 为电枢的初速度; L_0 为电枢运动时, 轨道的初始长度。综合上述 (1), (2), (9), (10) 即可得到电枢的速度方程为: