

影响电磁轨道炮弹丸出膛速度的因素

鲁海鹏

(陆军步兵学院基础部, 江西 南昌 330103)

摘 要 运用大学物理知识近似计算了不考虑厚度时平板简单轨道炮的出膛速度, 根据得到的速度表达式分析了影响弹丸出膛速度的因素, 而实际的平板轨道是有厚度的, 在不考虑厚度的计算结果的基础上进一步计算, 得到了考虑平板厚度时弹丸的出膛速度, 通过图像法定性反映此时平板轨道的几何尺寸是如何影响弹丸的出膛速度的, 并讨论了考虑厚度所带来的影响, 可发现考虑或者增大平板厚度时, 相当于稀释电流, 会减小弹丸的出膛速度, 最后还给出了提高弹丸出膛速度的方法。

关键词 电磁轨道炮; 出膛速度; 平板厚度

FACTORS AFFECTING THE BORE SPEED OF ELECTROMAGNETIC RAILGUN

LU Haipeng

(Department of Basic Course, Army Infantry Academy, Nanchang, Jiangxi 330103)

Abstract This article first approximates the muzzle velocity of a simple railgun that does not consider the thickness through the knowledge of college physics, and analyzes the influencing factors of the muzzle velocity at this time through expressions. The actual plate track has thickness, so the thickness calculation is not considered. On the basis of the results, the muzzle velocity of the projectile when considering the thickness of the plate is further obtained. The factors affecting the muzzle velocity of the railgun at this time are given by the image method, And discuss the influence of thickness, It can be found that when considering or increasing the thickness of the plate, it is equivalent to the dilution current, which will reduce the muzzle velocity of the projectile. Finally, a method to increase the muzzle velocity of the projectile is given.

Key words electromagnetic railgun; exit velocity; plate thickness

火炮是一种常规武器, 其作用是将弹丸发射到预定目标上, 来达到摧毁目标的作用, 它在地面战场具有不可替代的作用, 要将弹丸抛射出一定距离, 必须给弹丸一定的初始能量。传统火炮是以发射药为基础, 利用火药爆炸产生的压力给予

弹丸初始能量, 来抛射弹丸的武器, 但目前火药技术已经进入瓶颈期, 利用火药技术发射弹丸的传统火炮的射速也已基本达到极限, 很难有较大突破, 为此, 寻找新的发射弹丸的途径是突破传统火炮射速的唯一选择, 电磁炮就是在该背景下产生

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-05-14

作者简介: 鲁海鹏, 男, 助教, 主要从事大学物理教学和大学物理军事应用研究, 476120685@qq.com。

引文格式: 鲁海鹏. 影响电磁轨道炮弹丸出膛速度的因素[J]. 物理与工程, 2022, 32(2): 20-24.

Cite this article: LU H P. Factors affecting the bore speed of electromagnetic railgun[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(2): 20-24. (in Chinese)

的一种新动能武器,是一种利用电磁力来发射弹丸的武器,从理论上讲,只要有足够大的电流,足够硬度和耐烧蚀的材料,电磁炮的发射初速是没有极限的,所以在不久的将来,电磁炮会作为新一代重要武器出现在战场,在未来战争中起到重要作用。

电磁炮也有多种类型^[1],下面对电磁轨道炮中结构最简单的平板型简单轨道炮利用大学物理知识在忽略一切阻力的情况下做近似计算,分不考虑极板厚度和考虑极板厚度两种情况,得到弹丸发射的出膛速度,分析影响出膛速度的因素,并说明考虑厚度带来的影响,体现大学物理在军事中的应用。

1 简单平板型电磁轨道炮

简单平板型轨道炮的结构如图 1 所示,两根宽为 $2a$ 的长直刚性平行板以间距 b 平行放置,构成轨道炮的轨道。位于轨道之间的电枢、轨道及右侧的高功率电源形成一个完整的闭合回路,其中电枢由导电物质构成,既可以是固体金属,也可以是等离子体,当给闭合回路通电时,轨道中方向相反的电流会在导轨之间产生方向一致向下的磁场,图中绕着轨道的虚线环代表磁场方向。而有电流流过的电枢就会在磁场中受到向左的安培力的作用向左运动,进而推动弹丸发射出去,所以电磁炮是利用电磁力给予弹丸初始能量的。

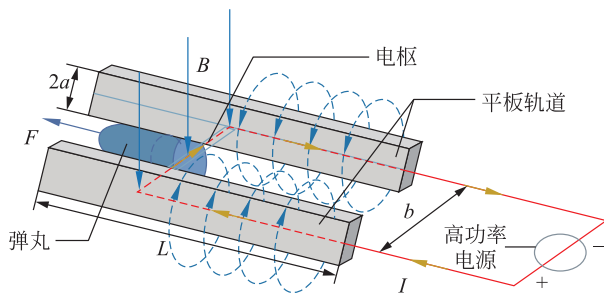


图 1 简单电磁轨道炮结构示意图

下面利用大学物理的知识近似计算平板型简单轨道炮的出膛速度:

1.1 忽略平板导轨的厚度

忽略平板轨道厚度,该问题在文献[3]中已经得到结果,这里采用先计算单侧轨道对电枢的安培力的思路,可起到简化计算的效果。以电枢为

x 轴,按图 2 所示方式建立直角坐标系。

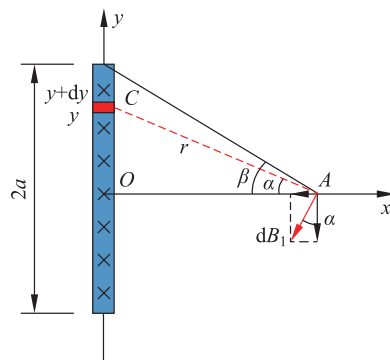


图 2 不考虑轨道厚度时轨道中的电流和产生的磁场

选取电枢上与坐标原点 O 距离为 x 的一点 A ,在轨道长度较大时,载流平面上的电流可近似看作由无数多根半无限长载流直导线组成。在 y 轴上 C 点处取宽度为 dy 的半无限长载流直导线,它在 A 点产生的磁场 dB_1 的方向如图 2 所示,大小为^[2]

$$dB_1 = \frac{\mu_0 dI}{4\pi r} \quad (1)$$

有对称性可知合磁场只有 y 分量,磁场方向朝下,大小为

$$B_1 = \int dB_1 \cos\alpha = \int \frac{\mu_0 dI}{4\pi r} \cos\alpha \quad (2)$$

利用几何关系可知 $r = \frac{x}{\cos\alpha}$, $y = x \tan\alpha$,代入电流元 dI 为

$$dI = \frac{I}{2a} dy = \frac{I}{2a} \cdot \frac{x}{\cos^2\alpha} d\alpha \quad (3)$$

将变量统一为角度 α ,得到单侧轨道在 A 点产生的磁场为

$$\begin{aligned} B_1 &= \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\mu_0 dI}{4\pi r} \cos\alpha = \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\mu_0 I}{8\pi a} d\alpha = \frac{\mu_0 I \beta}{4\pi a} \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \arctan \frac{a}{x} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 β 角为轨道平面一侧端点处与 A 点形成的 α 角,这里用反三角函数表示结果。

下面利用安培力的计算公式 $d\mathbf{F} = I d\mathbf{x} \times \mathbf{B}$ ^[2] 可求得单侧轨道对整个电枢的作用力 F_1 ,在 A 点取微元 dx ,安培力方向垂直纸面向里,大小为

$$dF_1 = IB dx = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi a} \arctan \frac{a}{x} dx \quad (5)$$

对整个电枢积分,得电枢所受安培力 F_1 大小为

$$F_1 = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi a} \int_0^b \arctan \frac{a}{x} dx$$

$$= \frac{\mu_0 I^2}{4\pi a} \left[b \arctan \frac{a}{b} + \frac{a}{2} \ln \left(\frac{a^2 + b^2}{a^2} \right) \right] \quad (6)$$

右侧轨道和左侧轨道对电枢的作用力相等, 最终电枢受到两条通电轨道的作用力 F 大小为

$$F = 2F_1 = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \left(\frac{b}{a} \arctan \frac{a}{b} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) \right) \quad (7)$$

忽略一切阻力, 只有安培力做功, 忽略电枢在不同位置处安培力的差别, 看作恒力, 设电枢从出发点至炮口距离为 L , 由动能定理

$$FL = \frac{1}{2} mv^2$$

可知, 弹丸的出膛速度为^[3]

$$v = I \sqrt{\frac{\mu_0 L}{m\pi} \left[\frac{b}{a} \arctan \frac{a}{b} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) \right]} \quad (8)$$

其中 m 为弹丸质量, 这里做了忽略电枢质量的近似。可以看出, 出膛速度与电流 I 和 L 的 $1/2$ 次方成正比, 与平板导体间距 b 和宽度 a 的关系可通过导数来确定, 令 $x = b/a$, 求得 $\frac{dv}{dx} > 0$, 所以出膛速度还会随着 b 的增大而增大, 随着 a 的减小而增大。直接提高出膛速度的方法是: 增大电流 I , 增大 L , 增大平板导体间距 b , 减小平板导体宽度 a 。

而实际中的金属轨道不可能没有厚度, 下面考虑金属导轨的厚度来计算出膛速度, 设轨道平板厚度为 h 。

1.2 考虑厚度为 h 的平板轨道

此时平板轨道可看做由无数个载流平面紧密排列构成, 可在式(4)基础上进一步计算, 得到此时的磁场。

以电枢上一场点 O 为坐标原点, 按如图 3 所

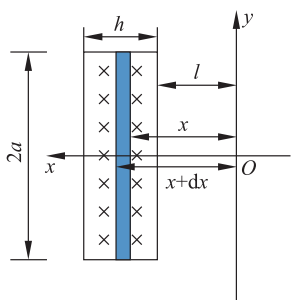


图 3 考虑轨道厚度时的轨道

示方式建立直角坐标系, 按图中方式选择距离 O 点 x 处的厚度为 dx 的载流平面, 流过电流 dI , 该电流元在 O 点产生的磁场 dB_1 方向朝下, 由式(4)可知

$$dB_1 = \frac{\mu_0 dI}{4\pi a} \arctan \frac{a}{x} \quad (9)$$

其中, 电流元 $dI = \frac{I}{h} dx$, 设 O 点与平板轨道右侧距离为 l , 可得整个单侧轨道在 O 点产生的磁场大小为

$$B_1 = \int dB_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi ah} \int_l^{l+h} \arctan \frac{a}{x} dx$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi ah} \left[(l+h) \arctan \frac{a}{l+h} - l \arctan \frac{a}{l} + \frac{a}{2} \ln \frac{(l+h)^2 + a^2}{l^2 + a^2} \right] \quad (10)$$

同样, 在 O 点取微元 dl , 安培力方向依然垂直纸面向里, 电枢受到的安培力大小为

$$F = 2 \int_0^b IB_1 dl$$

$$= \frac{\mu_0 I^2}{4\pi ah} \left\{ (b+h)^2 \arctan \frac{a}{b+h} - h^2 \arctan \frac{a}{h} - b^2 \arctan \frac{a}{b} + a(b+h) \ln[(b+h)^2 + a^2] - ah \ln(h^2 + a^2) - ab \ln(b^2 + a^2) + a^2 \arctan \frac{b+h}{a} - a^2 \arctan \frac{h}{a} - a^2 \arctan \frac{b}{a} \right\} \quad (11)$$

依然忽略一切阻力, 也不考虑电枢质量, 利用动能定理 $FL = \frac{1}{2} mv^2$, 可得出膛速度为

$$v = I \left\{ \frac{\mu_0 L}{2\pi m} \left\{ \frac{(b+h)^2}{ah} \arctan \frac{a}{b+h} - \frac{h}{a} \arctan \frac{a}{h} - \frac{b^2}{ah} \arctan \frac{a}{b} + \frac{(b+h)}{h} \ln[(b+h)^2 + a^2] - \ln(h^2 + a^2) - \frac{b}{h} \ln(b^2 + a^2) + \frac{a}{h} \arctan \frac{b+h}{a} - \frac{a}{h} \arctan \frac{h}{a} - \frac{a}{h} \arctan \frac{b}{a} \right\} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

此时的出膛速度的表达式要复杂很多, 前面不考虑平板轨道厚度的表达式(9)可由该公式取 h 趋于 0 时的极限得到。电流 I 和轨道长度 L 对出膛

速度的影响方式不变,其余3个长度量 a 、 b 和 h 对出膛速度的影响无法直接看出,求导运算也较复杂,这里使用图像法来得到这3个量是如何影响出膛速度的。

2 数值结果和结论分析

为了反映考虑平板轨道厚度 h 产生的影响,分别给出了不同厚度下出膛速度 v 随 a 和 b 的变化图像,取平板轨道的电流 $I=10^6$ A,轨道长度 $L=10$ m,弹丸质量 $m=1$ kg。

2.1 出膛速度 v 随 a 的变化

取 $b=1$ m,出膛速度 v 随 a 的变化如图4所示,三条曲线分别对应轨道厚度 $h=0$ m、 $h=0.5$ m、 $h=1$ m时的情况。

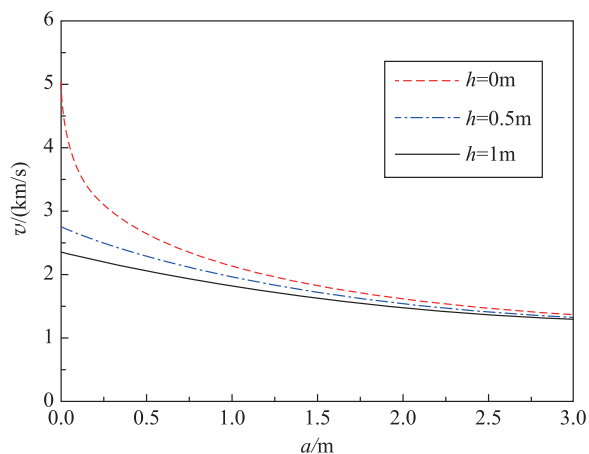


图4 不同 h 情况下 v 随 a 的变化

只看图中任意一条曲线,可发现不论平板轨道的厚度 h 是多少,出膛速度 v 都将随着 a 的增大而减小,与前面不考虑平板厚度($h=0$)时直接从式(8)分析的结论是一致的,即考虑 h 或 h 的改变不会影响 v 随 a 的增减性。该结论也可从理论上说明:如图5所示,由于通入轨道中的电流 I 的大小不变,对于厚度固定的平板,增大 a ,平板的横截面沿 y 轴方向增大,电流密度就会减小,相当于把电流沿 y 轴“稀释”了。此时可以把平板中的电流看成两部分 $I=I_1+I_2$, I_1 为图中右侧阴影区域内的电流,该电流在稀释前后产生的磁场不变,但 I_2 为平板增大以后多出来区域的电流,该电流相比稀释前的 I_2 距离 A 点更远, α 角更大,所以增大 a 会使 I_2 产生的磁场减弱,总磁场 B 也减弱,由此产生了弹丸出膛速度减小的结果。此外,图中曲线斜率的绝对值都是越来越小,即 v 随

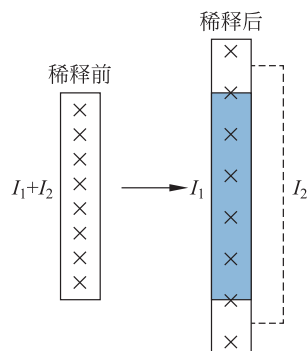


图5 增大 a 使电流稀释示意图

a 的减小速度越来越慢。

对比三条曲线,可看出在 a 较小时 v 的差别较大,增大 h 会使出膛速度急剧减小,而随着 a 的增大,这种差别逐渐减小,三条曲线在 a 趋于无穷时会重合在一起,具有一样的出膛速度,此时改变极板宽度 h 对出膛速度几乎没有影响,所以增大厚度 h 会使曲线更为平滑。产生该结论的原因是: a 很大时可看作很薄的极板,不同极板厚度所带来的影响就会很小。

2.2 出膛速度 v 随 b 的变化

取 $a=0.5$ m,出膛速度 v 随平板轨道距离 b 的变化如图6所示,三条曲线分别对应轨道厚度 $h=0$ m、 $h=0.5$ m、 $h=1$ m时的情况。

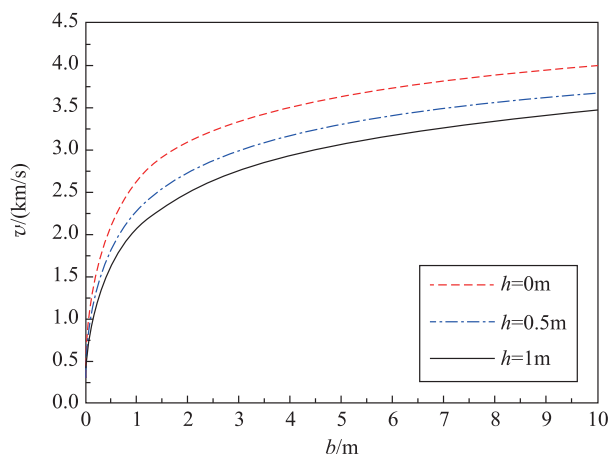


图6 不同 h 情况下 v 随 b 的变化

观察图中任意一条曲线,不论极板厚度为多少,出膛速度都会随着极板距离 b 的增大而增大。该结论同样和直接从式(8)分析的结论一致,从理论上可做如下解释:对于固定厚度的极板,电极长度 b 越长,相当于受力区域变大,且力的方向与原来一致,使整个电极所受的安培力增大,就产生了增大出膛速度的效果。另外,曲线的斜率随 b 的

增大而减小,变化趋势趋于平缓,即在 b 较大时,继续增大 b 对于提高出膛速度效果并不明显。

对比三条曲线,可以发现对于相同的 b ,考虑 h 或增加 h 会减小出膛速度,会使 v 随 b 的增加速度变慢,曲线更平滑,这点与前面图4中 h 对 v 随 a 的变化的影响是相似的,而在 b 较大时,曲线并不会重合,这点与 v 随 a 的变化是不同的。

2.3 出膛速度 v 随 h 的变化

取 $a=0.5\text{m}$, $b=1\text{m}$,出膛速度 v 随平板轨道厚度 h 的变化如图7所示。

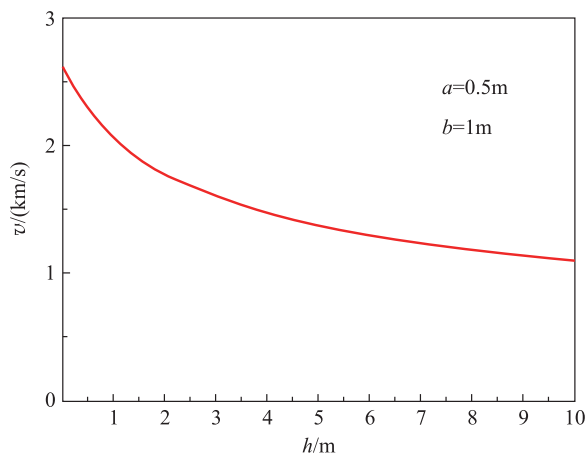


图7 v 随 h 的变化情况

由图可知:出膛速度 v 会随着极板厚度 h 的增大而较小,且变化趋势与图4中 v 随 a 的变化趋势相似,这点从图4中对于确定的 a ,当 h 较大时 v 较小可看出,从图5中确定的 b ,当 h 较大时

v 较小也可看出。从理论上来看: a 一定时,增加 h ,相当于沿 x 方向增大平板轨道的横截面积,也会“稀释”电流,被稀释到左侧的电流由于距离场点更远,产生的磁场更弱,总磁场也会减弱,从而减小了出膛速度,所以该曲线与图4中曲线的变化趋势很相似。

3 结语

综上所述,加入厚度 h 以后,出膛速度 v 随 I 、 L 、 a 、 b 的增减性并未改变,所以增大弹丸出膛速度的方法依然是增大电流、增大轨道长度、减小轨道宽度、增大轨道距离,需要注意的是,在 b 较大时,继续增大它并不能起到很好的效果,只能通过其他手段来实现。但由于电流被“稀释”,会使 v 随 a 或 b 的变化速度变慢。另外,出膛速度会随平板轨道厚度 h 的增大而减小,应尽量让平板轨道薄一些。以上结论都是运用大学物理知识得出,既可以提高学生应用物理知识解决实际问题的能力,也能对未来的新式武器的发射原理有一定了解,从中感受大学物理的魅力。

参 考 文 献

- [1] 张相炎. 新概念火炮技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.
- [2] 康颖. 大学物理[M]. 4版. 北京:科学出版社, 2019.
- [3] 陈蕾蕾. 物理与军事[M]. 北京:高等教育出版社, 2016.
- [4] 费恩曼, 莱顿, 桑兹. 费恩曼物理学讲义(新千年版·第2卷·中文版)[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2013:170, 209.
- [5] 黄亦斌, 郝继光, 吴泽宇. I_r 是内电压吗? IR 是外电压吗? [J]. 物理与工程, 2018, 28(3): 121-126.
- [6] HUANG Y B, HAO J G, WU Z Y. Is I_r the internal voltage? Is IR the external voltage? [J] Physics and Engineering, 2018, 28(3): 121-126. (in Chinese)
- [7] 杰克逊 J D. 经典电动力学(上册)[M]. 北京:人民教育出版社, 1978:232-234.
- [8] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2011:533.
- [9] 梁灿彬. 三相鼠笼电动机修理[M]. 北京:农业出版社, 1979:21.
- [10] 普通高中教科书·物理(选择性必修第二册)[M]. 北京:人民教育出版社, 2019:36.
- [11] 普通高中教科书·物理(选择性必修第二册)[M]. 广州:广东教育出版社, 2020:56.
- [12] 颜辉, 王素云, 饶华东. 追本溯源 破难之道——关于电磁感应中恒定磁场驱动下功率问题的求解[J]. 物理教学, 2021, 43(12): 51-52+70.
- [13] YAN H, WANG S Y, RAO H D. Tracing the source and breaking through the difficulty—Solution of power problem of constant magnetic field drive in electromagnetic induction[J]. Physics Teaching, 2021, 43(12): 51-52+70. (in Chinese)
- [14] 封小超. 洛伦兹力公式中的 v 究竟是什么[J]. 大学物理, 1984(7): 10-12.
- [15] FENG X C. What exactly is v in Lorentz force formula? [J]. College Physics, 1984(7): 10-12. (in Chinese)
- [16] 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2012:236.

(上接第19页)

YAN L G. Correct understanding of the reference system in which the work-energy relation about motional electromotive force holds[J]. Physics Teacher, 2021, 42(5): 58-60. (in Chinese)

[5] 颜辉, 王素云, 饶华东. 追本溯源 破难之道——关于电磁感应中恒定磁场驱动下功率问题的求解[J]. 物理教学, 2021, 43(12): 51-52+70.

YAN H, WANG S Y, RAO H D. Tracing the source and breaking through the difficulty—Solution of power problem of constant magnetic field drive in electromagnetic induction[J]. Physics Teaching, 2021, 43(12): 51-52+70. (in Chinese)

[6] 封小超. 洛伦兹力公式中的 v 究竟是什么[J]. 大学物理, 1984(7): 10-12.

FENG X C. What exactly is v in Lorentz force formula? [J]. College Physics, 1984(7): 10-12. (in Chinese)

[7] 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2012:236.