

doi: 10.7690/bgzdh.2013.11.004

矩形截面轨道发射器电感梯度影响因素研究

杨成伟, 李小将, 武昊然

(解放军装备学院研究生院, 北京 101416)

摘要: 电感梯度是影响轨道发射器性能的重要指标之一, 针对轨道发射器电感梯度影响因素众多的问题, 对其进行合理的设计能够使轨道炮性能达到优化的效果, 从毕奥-萨法尔定律出发, 建立了矩形截面轨道发射器模型并求得电感梯度解析表达式; 运用单参数灵敏度方法对模型中几种影响因素进行仿真分析与常见电感梯度计算方法进行对比。结果表明: 与常规计算电感梯度方法相比, 该模型结果较为理想, 验证了准确性; 与常规方法的不同点在于引入电枢位置作为电感梯度影响因素之一并说明其影响方式。该研究可为轨道发射器设计提供一定参考。

关键词: 电感梯度; 影响因素; 单参数灵敏度分析

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Influencing Factors Research of Rectangular Cross-Sectional Rail Launcher Inductance Gradient

Yang Chengwei, Li Xiaojiang, Wu Haoran

(College of Graduate, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: The inductance gradient is one of the important indexes affecting rail launcher performance. For rail launcher inductance gradient many influence factors, carries on the reasonable design can make the railgun performance to achieve optimal results. A rectangular cross-sectional rail launcher model was built based on the Biot-Savart law in this paper. Furthermore, the analytical expression of inductance gradient can be obtained by this model. The single parameter sensitivity analysis method was employed to analyze several factors of the inductance gradient. The result shows that: compared with common methods, this paper performs well in both the height and the space between rails; the reason why it is different in the factor of thickness is shown. The armature position which regarded as one of the factors is introduced in the analytical expression of inductance gradient, and some details are done to explain how does it affects. This can provide reference for future design.

Key words: inductance gradient; influencing factors; single parameter sensitivity analysis

0 引言

自美国 2007 年成功试射巨大动能电磁轨道炮以来, 轨道炮以其优于常规武器的各项性能逐渐引起人们的关注, 世界多国开始意识到电磁动能武器潜在的发展空间并相继加紧其研制步伐。电感梯度作为电磁轨道发射的主要参数之一, 其计算方法更是各国研究的热点。当前对电磁轨道发射器电感梯度的研究有很多方法, 主要分为数值法和解析法 2 大类。数值法认为电感梯度在发射过程中不是一个常数, 与发射系统轨道的几何尺寸、施加电流的波形、轨道及固定外壳的材料等多种因素有关^[1-3]; 解析法主要是基于相关公式推导实现, 在系统整体发射涡流导致的能量损耗较小时, 可认为电感梯度在发射期间为一个确定的常数, 仅与发射轨道的厚度、高度、轨道间距等有关。由解析法确定的作用在电

枢上的安培力大小可参考文献[4], 从电枢受力公式可知, 电磁轨道发射产生的作用力与电流的平方和电感梯度的乘积成正比, 而导轨通过电流的大小受到电源技术发展的限制, 当前的电源技术无法提供期望大的电流; 并且过大的电流将会对导轨产生强烈的烧蚀, 所以仅提高工作电流不能作为大推力轨道炮发展的研究方向。这种情况下, 提高导轨的电感梯度显得尤为重要。文献[5]推导出电感梯度理论计算公式并对电感梯度的影响因素进行了分析, 但其分析过程中对用到的表征轨道临近效应的 2 个参数说明不足且计算结果较为复杂。文献[6]对几种截面形状的导轨进行了仿真计算, 得出非常规截面形状导轨能得到更大电感梯度的结论, 但非常规截面的导轨模型建立较困难。实验中使用最多的是矩形截面的导轨, 关于简单矩形的导轨也进行了较多的

收稿日期: 2013-06-09; 修回日期: 2013-07-17

作者简介: 杨成伟(1990—), 男, 内蒙古人, 蒙古族, 硕士, 从事武器系统与运用工程研究。

工作。笔者拟采用解析法对简单矩形截面轨道电感梯度的影响因素进行分析。

1 常见电感梯度计算方法

很多学者曾致力于轨道发射电感梯度的研究，此处列举几种典型电感梯度计算方法，以便与文中所提方法进行对比。

在轨道炮工作过程中，电流导通的时间极短，通常为 2~10 ms，在如此短暂的时间内，导轨电流产生的磁场由于趋肤效应不能快速扩散到导轨深处，只能沿着导轨表层流动，这种电流分布常称为高频电流分布，针对这一现象，Kerrisk 曾对方口径轨道炮的矩形导轨内的电流分布进行了计算，并给出了计算此类高频磁场分布的高频电感梯度 L' (单位 $\mu\text{H}/\text{m}$) 的计算公式^[7]：

$$\begin{aligned} L' &= (A + B \ln F_1) \ln F_2 \\ F_1 &= 1 + \frac{A_1 w}{h} + \frac{A_2 w s}{h^2} \\ F_2 &= B_1 + \frac{B_2 s}{h} + \frac{B_3 w}{h} + \frac{B_4 w s}{h^2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $A=0.440\ 60$, $B=-0.077\ 70$, $A_1=3.397\ 00$, $A_2=-0.066\ 03$, $B_1=1.007\ 70$, $B_2=2.743\ 70$, $B_3=0.022\ 09$, $B_4=0.263\ 70$ 。

若在轨道炮工作过程中电流均匀分布在导轨内，称此现象为低频电流分布，所求出的电感梯度称为低频电感梯度，但相对高频电感梯度而言，低频电感梯度的求解方法略显理想化，电枢附近的导轨中电流均匀分布仅存在于某些特定情况。不过，求解方式相对高频电感梯度的简化也成了此种方法的优势，Grover 提出的计算矩形导轨低频电感梯度 L' (单位 $\mu\text{H}/\text{m}$) 简便方法^[8]如下：

$$L' = 0.4 \left(\ln \left(\frac{s+w}{h+w} \right) + 1.5 + \ln(k) \right) \quad (2)$$

$\ln(k)$ 具体数值可查阅文献^[8]。

在考虑到高频和低频电流分布之后，Batteh 通过研究电流层矩形口径轨道发射器时，将电枢高度 h_a 引入电感梯度计算公式，其给出的计算电感梯度

L' (单位为 $\mu\text{H}/\text{m}$) 的公式^[9]为：

$$\begin{aligned} L' &= 0.8 \frac{s^2}{h h_a} \left(f \left(\frac{h+h_a}{2} \right) - f \left(\frac{h-h_a}{2} \right) \right) \\ f(X) &= f_1(X) + f_2(X) \\ f_1(X) &= X \cot(X) - \frac{1}{4} \ln(1+X^2) \\ f_2(X) &= \frac{1}{4} X^2 \ln \left(1 + \frac{1}{X^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

以上各方法中， w 、 h 、 s 、 h_a 分别表示轨道厚度、高度、两轨道间距及电枢高度。分析以上各方法可发现：Kerrisk 方法中给出的各常量物理定义不明确；Grover 方法中 $\ln(k)$ 的选取需查询其提供的表格，且所给出的表格中对 w 、 h 、 s 的比值大小要求较严格，局限性较大；Batteh 方法未考虑到轨道厚度对电感梯度的影响，且考虑到“四倍口径法则”问题^[10]，一般设计中取 $h_a/h=3/4$ 。

2 基于解析法的矩形截面导轨电感梯度计算

矩形截面导轨发射器及其三视图所在坐标系如图 1。体电流 I 由一侧导轨流入，流经电枢后从另一侧导轨返回，此时电枢受到 2 根导轨产生磁场的安培力作用，沿导轨做直线加速运动。可以从毕奥-萨法尔定律入手分析。为分析过程的简化特作出如下假设：

1) 不考虑趋肤效应，电流均匀分布在导轨中。

2) 用电枢中心处的磁感应强度值代替整个电枢所在位置的磁感应强度。

毕奥-萨法尔定律指出，有限长通电直导线在空间任一点产生的磁感应强度由式 (4) 计算^[11]：

$$B_{\text{线}} = \frac{\mu_0 I_{\text{线}}}{4\pi r} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4)$$

其中： $B_{\text{线}}$ 为导线产生的磁感应强度，方向满足右手定则； μ_0 表示真空磁性的常数称为真空磁导率，取值 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ ； $I_{\text{线}}$ 为导线线电流； r 为空间点到通电直导线的距离； α 、 β 为直导线两端与空间点连线的夹角。

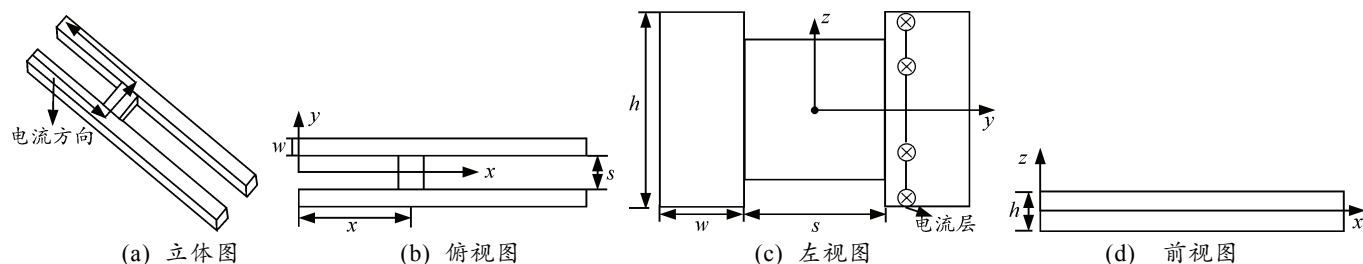


图 1 简单矩形截面导轨发射器示意图

若干连续的通电直导线组成电流层(图 2), L 为电流层中的任意一根导线, 由于在实际轨道炮系统中, 只有与电枢电流方向垂直的磁场才能对电枢产生加速力的作用, 所以图中对 L 在 P 点(等效为电枢中心点)产生的磁场进行了分解, 只须关心 B_1 分量即可。

$$B = \frac{\mu_0 x I_{\text{体}}}{4\pi w h \sqrt{y^2 + z^2} \sqrt{y^2 + z^2 + x^2}} \quad (5)$$

$$\cos \lambda = \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}} \quad (6)$$

结合式 (5)、式 (6) 并化简得:

$$B_1 = \frac{\mu_0 x y I_{\text{体}}}{4\pi w h (y^2 + z^2) \sqrt{y^2 + z^2 + x^2}} \quad (7)$$

式中, $I_{\text{体}}$ 为通过导轨的体电流。在实际轨道炮系统运行中只有电枢所在位置和电枢之前的导轨接入回路, 在图 2 中的直观表现就是 $b=0$, 此时 a 表示接入回路导轨的长度, 在图 1(b)所在坐标系中表示为 x 。对式 (7) 沿图 1(d)中 z 方向进行积分即可得通电电流层在空间任一点产生的磁感应强度:

$$B_{\text{面}} = 2 \int_0^{0.5h} B_1 dz = \frac{\mu_0 I_{\text{体}}}{2\pi w h} \cot \frac{xh}{y\sqrt{4y^2 + 4x^2 + h^2}} \quad (8)$$

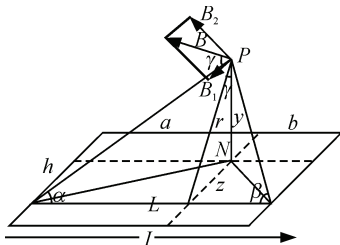


图 2 电流层在空间一点产生的磁场示意图

对式 (8) 沿图 1(c)中 y 方向进行积分即可得矩形截面导轨在电枢中心处产生的磁感应强度:

$$B_{\text{体}} = 2 \int_{0.5s}^{0.5s+w} B_{\text{面}} dy \quad (9)$$

考虑文献[4]中计算电枢受力方法及通电直导线在垂直恒定磁场中受力的计算方法:

$$F = BIS = \frac{1}{2} L I^2 \quad (10)$$

其中 B 、 S 、 I 分别为磁感应强度、导线长度、轨道中通过的电流。 L' 为导轨的电感梯度, 表征单位长度的电感值, 联立式 (9)、式 (10) 可求出电感梯度表达式:

$$L' = \frac{2s\mu_0}{\pi w h} \int_{0.5s}^{0.5s+w} \cot \frac{xh}{y\sqrt{4y^2 + 4x^2 + h^2}} dy \quad (11)$$

式 (11) 积分内函数虽不能求出具体的解析表达式, 但可利用相关数学工具对其进行计算分析。

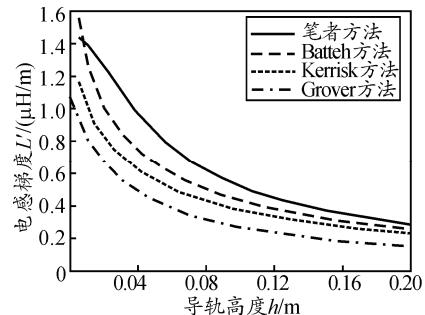
3 仿真对比分析

以上几种计算电感梯度的方法涉及参数较多, 直观方法难以准确描述, 可利用 Matlab 数学工具箱, 采用单参数灵敏度方法分别实施表 1 中几种方案, 对电感梯度的影响因素进行仿真分析, 同时与常见几种方法进行对比^[12]。笔者所用方法把电枢位置作为一个影响因素, 在不涉及到电枢位置的常见求取电感梯度方法中可取其为单位长度。

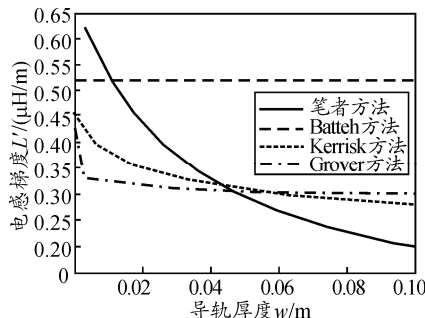
表 1 仿真对比方案

方案	导轨高度 h/m	导轨间距 s/m	导轨厚度 w/m	电枢位置 x/m
方案 1	[0,0.2]	0.05	0.005	1
方案 2	0.015	[0,0.5]	0.005	1
方案 3	0.015	0.05	[0,0.1]	1
方案 4	0.015	0.05	0.005	[0,0.25]

方案 1、方案 3 经 Matlab 编程得到的上述各方法导轨高度、导轨厚度与电感梯度的关系见图 3。



(a) 导轨高度与电感梯度的关系



(b) 导轨厚度与电感梯度的关系

图 3 方案 1、方案 3 分析结果

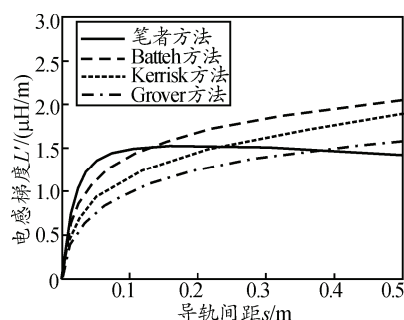
从图 3(a)可以看出, 本模型在方案 1 仿真环境下与常见几种模型变化趋势一致且逼近良好, 随着导轨高度的增加, 电感梯度呈现下降的趋势。

在方案 3 仿真环境下, 由于笔者假设忽略电流

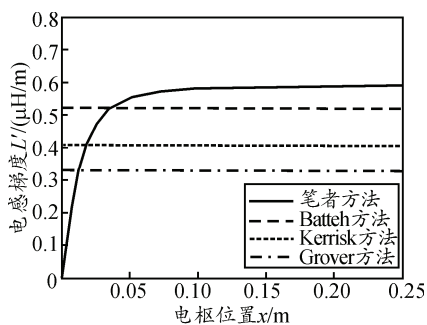
趋肤效应的影响，电流均匀分布在导轨中，增加导轨的厚度未对电流分布产生影响；当考虑电流趋肤效应时，电流在导轨表面流动，接近电枢的部位电流密度很大，所以造成了本模型的计算结果比常见几种模型小的现象。随着导轨厚度的增加，本模型求得电感梯度呈现下降的趋势；Batteh 方法未考虑导轨厚度的影响，所以结果为常数。

综合分析本文中方法与几种常见电感梯度计算模型可得出，电感梯度受导轨高度与厚度影响的原因可能是：由于 s 不变， h 或者 w 的增加可看成通流截面的增大，如此会导致两导轨所包围空间面积的相对减小，即磁链减小；同时当外部电流强度不变时，改变 h 或者 w 使得相对电流密度会降低。

方案 2、方案 4 经 Matlab 编程得到的上述各方法导轨间距、电枢位置与电感梯度的关系见图 4。



(a) 导轨间距与电感梯度的关系



(b) 电枢位置与电感梯度的关系

图 4 方案 2、方案 4 分析结果

从图 4(a)可以看出，本模型在方案 2 仿真环境下与常见几种模型变化趋势一致且逼近较好；随着导轨间距的增加，电感梯度呈现上升的趋势。电感梯度受导轨间距影响的原因可能是：由于 h 、 w 不变，导轨间距 s 的增加使得两导轨所包围的面积空间增大，导致通过电枢的磁力线增多。

在方案 3 仿真环境下，固定 h 、 s 、 w 值后，常见几种电感梯度计算方法所得的结果均为常值。本文中所用方法的电感梯度呈现随着电枢位置的增加开始逐渐上升后来趋于平稳的趋势，原因可能是：

在开始阶段，电枢受到安培力作用使得位置发生变化，但与 h 、 s 、 w 相比，此阶段接入电流回路的导轨长度还是较小，造成轨道“厚而高”的构型，从上文导轨高度和厚度的分析可知，此构型会使得磁链变小，进而导致电感梯度的减小。直到电枢位置达到一定值(0.05 m)后，电感梯度才稳定在一个较固定的值。另外，常规的轨道炮导轨的设计长度均远大于导轨高度、间距及厚度，这也是对此种现象的一种解释。

4 结论

以毕奥-萨法尔定律为基础，对矩形截面轨道发射器电感梯度进行建模，通过使用单参数灵敏度方法对文中及常见模型的仿真分析，验证了笔者所提方法的可行性并说明了轨道厚度、高度、两轨道间距和电枢位置为电感梯度的影响因素。

参考文献：

- [1] Keshtkar A. Effect of rail dimension on current distribution and inductance gradient[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 383-386.
- [2] Keshtkar A, Bayati S. Effect of rail's material on railgun inductance gradient and losses[C]. Victoria: 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology Proceedings, Canada, 2008: 130-133.
- [3] Yuan W Q, Sun L Q. Investigation on the time varying inductance gradient of railgun[C]. Victoria: 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology Proceedings, Canada, 2008: 569-572.
- [4] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 17-34.
- [5] 聂建新, 韩晶晶, 焦清介, 等. 电磁轨道发射器的几何尺寸对电感梯度的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 728-732.
- [6] 周媛, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道发射装置中导轨几何参数对电感梯度的影响[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(3): 23-27.
- [7] Kerrisk. J F. Current distribution and inductance calculations for railgun conductors[R]. New Mexico, USA: Los Alamos National Laboratory, 1981: 2-3.
- [8] Grover F W. Inductance calculations: working formulas and tables[M]. New York, USA: Dover Publications, 1962: 28-66.
- [9] Batteh J H. Momentum equation for arc-driven railguns[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(11): 3182-3186.
- [10] Marshall, R. A. Ying W. Railguns: their science and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 12-14.
- [11] 沮栋林. 电动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 48-136.
- [12] 胡玉伟, 马萍, 杨明, 等. 一种电磁轨道炮系统的仿真模型[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 54-58.