

T 形轨道电枢的分析计算

刘文¹, 张惠¹, 赵静一^{2,3}, 崔彦玲¹

(1. 燕山大学 理学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学 河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为增加轨道炮弹丸对目标的命中率,根据 T 形轨道的形状设计电枢为 H 形,构建 H 形电枢受力的数学模型,对其电感梯度进行分析计算并得到电感梯度理论表达式. 利用 Mathematics 进行数值仿真,研究 T 形轨道的电感梯度的解析算法及发射轨道结构几何参数对电感梯度的影响规律,并与矩形轨道进行比较. 结果表明:T 形导轨比传统矩形导轨的电感梯度值有明显的提高,进一步说明将电枢设计成 H 形是可行的.

关键词: 轨道炮; 电枢; T 形轨道; 电感梯度; 磁感应强度

中图分类号: TJ 866; TM 15

文献标志码: A

轨道炮作为一种武器,要求炮弹对目标直接性的打击,其撞击程度取决于弹丸动能的大小,与电枢受到的力有直接关系. 电枢在回路中通过电磁力给予加速,可以达到常规火炮弹丸无法达到的速度^[1-4],因此,电枢是影响电磁轨道炮性能的重要因素. 许多研究者使用各种方法对电枢进行研究,其中对于固体电枢的研究比较广泛^[5-9]. 何大娇^[10]根据电磁轨道炮的基本原理,建立固体电枢电磁轨道炮内弹道系统效率模型,并运用罚函数内点法和遗传算法进行了优化分析;田振国等^[11]研究了电磁轨道发射过程中电枢与导轨的力学特性;杨春霞等^[12]对电磁轨道炮 C 型固体电枢坡膛段的装填方式进行了研究. 然而,作为现代军事武器,不仅要求其撞击程度,更要求其命中率和精确度,而现有的研究大多都只关注对其速度,也就是动能的提高,很少有关其精确程度的. 本文就这两方面进行考虑,为增加弹丸对目标的命中率,根据轨道形状设计电枢为 H 形,并对其进行分析计算.

1 电感梯度的计算

1.1 电磁力

电磁发射装置在发射过程中,电枢上分布的电流元受到的力可表示为

$$dF = I(\vec{dl} \times \vec{B}).$$

上式中: $I \vec{dl}$ 为电流元; B 为磁感应强度. 由毕奥-萨伐定律^[13]知,对于长为 l ,电流为 I 的通电直导线来说,其周围任意一点 P 的磁感应强度 $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)$. 其中:真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$; ρ 为 P 点到电流元的垂直距离; θ_1 和 θ_2 分别为 P 点与通电直导线电流流向的夹角.

由于轨道炮发射过程中电流有趋肤效应,电流主要分布在导轨表面. 为了简化计算,假设电流全部分布在导轨的表面上,如图 1 所示. 则 I, II, III 平面的电流分别 $\frac{c_1 d}{2(h+\omega)} I$, $\frac{c_2(h-d)}{2(h+\omega)} I$, $\frac{c_3 h}{2(h+\omega)} I$; IV, V 平面的电流为 $\frac{\omega - \omega'}{2(h+\omega)} I$; 而 VI, VII 平面的电流为 $\frac{\omega'}{2(h+\omega)} I$. 其中: h 为外轨道高; ω 为轨道总宽; d

收稿日期: 2013-04-17

通信作者: 刘文(1961-),男,教授,主要从事计算数学的研究. E-mail:liuwen1961@hotmail.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175448);河北省自然科学基金资助项目(E2012203071);流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-201103)

为上底高; w' 为上底宽(图 2); c_1, c_2, c_3 为电流分布系数,用来表示电流分布情况,一般情况下 $c_1 > c_2 > c_3$,且有 $c_1 + c_2 + c_3 = 2$.

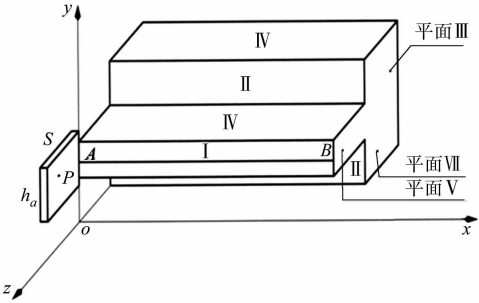


图 1 电枢与电流分布图

Fig. 1 armature and the current distribution

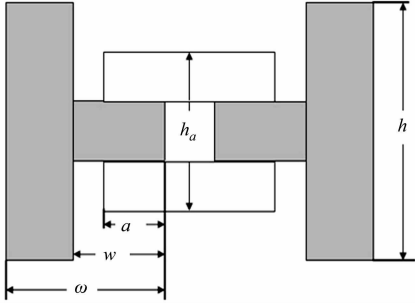


图 2 轨道截面图

Fig. 2 Cross-sectional view of rail

设平面 I 和 VI 的电流元分别为 $\frac{c_1 d\xi}{2(h+\omega)}I, \frac{d\eta}{2(h+\omega)}I$. 建立如图 1 所示的坐标, 设 $P(0, y, z)$ 为电枢上任意一点, 计算平面 I 内电流排在 P 点产生的磁感应强度 $B, Q(0, y, z)$ 为 P 在平面 I 内的投影. 由毕奥-萨伐定律易得电流元 AB 在 P 点产生的磁感应强度为

$$B_{AB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{c_1 d\xi}{2(h+\omega)} \cdot \frac{1}{\sqrt{z^2 + (\xi - y)^2}} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + z^2 + (\xi - y)^2}}.$$

将式中各单位都化为国际单位制, 则可得

$$B_{AB} = \frac{c_1 d\xi}{20(h+\omega)} \cdot \frac{1}{\sqrt{z^2 + (\xi - y)^2}} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + z^2 + (\xi - y)^2}}. \tag{1}$$

而平面 I 在 P 点产生的磁感应强度 $B = \int B_{AB}$, 且仅有沿 y 轴方向的磁场对电枢才有作用, 故有

$$B_I = B \cos \theta = \frac{c_1 I}{20(h+\omega)} \int_{\frac{h-d}{2}}^{\frac{h+d}{2}} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (\xi - y)^2}} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + z^2 + (\xi - y)^2}} \cdot \frac{z}{\sqrt{z^2 + (\xi - y)^2}} d\xi.$$

由实际情况可知 $l \gg h, \omega, s$, 则上式可化为

$$B_I = \frac{c_1 I}{20(h+\omega)} \int_{\frac{h-d}{2}}^{\frac{h+d}{2}} \frac{z}{z^2 + (\xi - y)^2} d\xi = \frac{c_1 I}{20(h+\omega)} \left[\arctan \left(\frac{\frac{h+d}{2} - y}{z} \right) - \arctan \left(\frac{\frac{h-d}{2} - y}{z} \right) \right].$$

同理, 可得其他平面在 P 点所产生的磁感应强度为

$$B_{II} = \frac{c_2 I}{20(h+\omega)} \left[\arctan \left(\frac{h-y}{z+\omega'} \right) + \arctan \left(\frac{y}{z+\omega'} \right) - \arctan \left(\frac{\frac{h-d}{2} - y}{z+\omega'} \right) + \arctan \left(\frac{\frac{h-d}{2} - y}{z+\omega'} \right) \right],$$

$$B_{III} = \frac{c_3 I}{20(h+\omega)} \left[\arctan \left(\frac{h-y}{z+\omega} \right) + \arctan \left(\frac{y}{z+\omega} \right) \right],$$

$$B_{IV} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln[(h-y)^2 + (z+\omega)^2] - \ln[(h-y)^2 + (z+\omega')^2] \},$$

$$B_V = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln[y^2 + (z+\omega)^2] - \ln[y^2 + (z+\omega')^2] \},$$

$$B_{VI} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln[(\frac{h+d}{2} - y)^2 + (z+\omega')^2] - \ln[(\frac{h+d}{2} - y)^2 + z^2] \},$$

$$B_{VII} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln[(\frac{h-d}{2})^2 + (z+\omega')^2] - \ln[(\frac{h-d}{2})^2 + z^2] \}.$$

通过坐标变换, 可以得到另一条导轨在 P 点产生的磁感应强度为

$$B_{I'} = \frac{c_1 I}{20(h+\omega)} \left[\arctan \left(\frac{\frac{h+d}{2} - y}{s-z} \right) - \arctan \left(\frac{\frac{h-d}{2} - y}{s-z} \right) \right],$$

$$B_{II'} = \frac{c_2 I}{20(h+\omega)} \left[\arctan \left(\frac{h-y}{s-z+\omega'} \right) + \arctan \left(\frac{y}{s-z+\omega'} \right) - \right.$$

$$\arctan\left[\frac{h+d}{2}-y\right] + \arctan\left[\frac{h-d}{2}-y\right] \Bigg],$$

$$B_{\text{III}'} = \frac{c_3 I}{20(h+\omega)} \left[\arctan\left(\frac{h-y}{s-z+\omega}\right) + \arctan\left(\frac{y}{s-z+\omega}\right) \right],$$

$$B_{\text{IV}'} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln[(h-y)^2 + (s-z+\omega)^2] - \ln[(h-y)^2 + (s-z+\omega')^2] \},$$

$$B_{\text{V}'} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln[y^2 + (s-z+\omega)^2] - \ln[y^2 + (s-z+\omega')^2] \},$$

$$B_{\text{VI}'} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln\left[\left(\frac{h+d}{2}-y\right)^2 + (s+z+\omega')^2\right] - \ln\left[\left(\frac{h+d}{2}-y\right)^2 + (s-z)^2\right] \},$$

$$B_{\text{VII}'} = \frac{I}{40(h+\omega)} \{ \ln\left[\left(y-\frac{h-d}{2}\right)^2 + (s-z+\omega')^2\right] - \ln\left[\left(y-\frac{h-d}{2}\right)^2 + (s-z)^2\right] \}.$$

1.2 电感梯度

通常情况下,轨道电枢是矩形的,在炮弹发射过程中会产生振动,失去对目标射击的准确率. 在这里,为了增加炮弹的准确率,根据导轨的形状将电枢设计成H形,能有效地减缓其振动,增加射击的准确度. 设其高为 $h_a(\geq d)$,则电枢所受到的电磁力为

$$F = \frac{I}{h_a} \int_0^s \int_{\frac{h-h_a}{2}}^{\frac{h+h_a}{2}} \int_0^{l_1} \sum_{i=a}^g (B_i + B_{i'}) dx dy dz +$$

$$\frac{2I}{(h_a-d)} \left[\int_{-a}^0 \int_{\frac{h+d}{2}}^{\frac{h+h_a}{2}} \int_0^{l_1} \sum_{i=a}^g (B_i + B_{i'}) dx dy dz + \int_{-a}^0 \int_{\frac{h-h_a}{2}}^{\frac{h-d}{2}} \int_0^{l_1} dx dy dz + \right.$$

$$\left. \int_s^{s+a} \int_{\frac{h+d}{2}}^{\frac{h+h_a}{2}} \int_0^{l_1} \sum_{i=a}^g (B_i + B_{i'}) dx dy dz + \int_s^{s+a} \int_{\frac{h-h_a}{2}}^{\frac{h-d}{2}} \int_0^{l_1} \sum_{i=a}^g (B_i + B_{i'}) dx dy dz \right]. \quad (2)$$

将 $B_I \sim B_{\text{VII}}$, $B_{I'} \sim B_{\text{VII}'}$ 计算式代入式(2),可得到电枢上所受到电磁力 F . 将 $F = \frac{1}{2} I^2 L'$ 代入式(2),可得H形电枢的电感梯度为

$$L_{\text{I}} = \frac{2C_1}{5h_a(h+\omega)} [s^2(f(x_{34}) - f(x_{44}))] + \frac{4C_1}{5(h_a-d)(h+\omega)} [s^2(f(x_{74}) - f(x_{34}) +$$

$$f(x_{44})) + a^2 f(x_{70'}) - f(x_{30'}) + f(x_{40'}) - (a+s)^2(f(x_{77}) - f(x_{37}) + f(x_{47}))],$$

$$L_{\text{II}} = \frac{2C_2}{5h_a(h+\omega)} [s+\omega']^2(f(x_{11}) - f(x_{21}) - f(x_{31}) + f(x_{41})) - \omega'^2(f(x_{13}) -$$

$$f(x_{23}) - f(x_{33}) + f(x_{43}))] + \frac{4C_2}{5(h_a-d)(h+\omega)} [m^2(f(x_{13}) - f(x_{23}) -$$

$$f(x_{33}) + f(x_{43}) - f(x_{53}) + f(x_{63}) + f(x_{73})) - (m+a)^2(f(x_{18}) - f(x_{28}) -$$

$$f(x_{38}) + f(x_{48}) - f(x_{58}) + f(x_{68}) - f(x_{78})) - (m+a)^2(f(x_{11}) - f(x_{21}) -$$

$$f(x_{31}) + f(x_{41}) - f(x_{51}) + f(x_{61}) + f(x_{71})) + (a+m+s)^2(f(x_{19}) -$$

$$f(x_{29}) - f(x_{39}) + f(x_{49}) - f(x_{59}) + f(x_{69}) + f(x_{79}))],$$

$$L_{\text{III}} = \frac{2C_3}{5h_a(h+\omega)} [s+\omega]^2(f(x_{12}) - f(x_{22})) - \omega^2(f(x_{15}) - f(x_{25}))] +$$

$$\frac{4C_3}{5(h_a-d)(h+\omega)} [\omega^2(f(x_{15}) - f(x_{25}) - f(x_{55}) + f(x_{65})) - (\omega-a)^2(f(x_{16}) -$$

$$f(x_{26}) - f(x_{56}) + f(x_{66})) - (s+\omega)^2(f(x_{12}) - f(x_{22}) - f(x_{52}) + f(x_{62})) +$$

$$(a+s+\omega)^2(f(x_{10}) - f(x_{20}) - f(x_{50}) + f(x_{60}))],$$

$$L_{\text{IV}} = L_{\text{V}} = \frac{1}{5h_a(h+\omega)} [\omega'^2(g(x_{13}) - g(x_{23})) - (\omega'+s)^2(g(x_{11}) - g(x_{21})) -$$

$$\omega^2(g(x_{15}) - g(x_{25})) + (\omega+s)^2(g(x_{12}) - g(x_{22}))] + \frac{1}{5(h_a-d)(h+\omega)} [\omega^2(g(x_{15}) -$$

$$g(x_{25}) - g(x_{55}) + g(x_{65})) - \omega'^2(g(x_{13}) - g(x_{23}) - g(x_{53}) + g(x_{63})) +$$

$$\begin{aligned} & (\omega' - a)^2(g(x_{18}) - g(x_{28}) - g(x_{58}) + g(x_{68})) - (\omega - a)^2(g(x_{16}) - \\ & g(x_{26}) - g(x_{56}) + g(x_{66})) + (\omega' + s)^2(g(x_{11}) - g(x_{21}) - g(x_{51}) + g(x_{61})) - \\ & (\omega + s)^2(g(x_{12}) - g(x_{22}) - g(x_{52}) + g(x_{62})) - (a + \omega' + s)^2(g(x_{19}) - g(x_{29}) - \\ & g(x_{59}) + g(x_{69})) + (a + s + \omega)^2(g(x_{10}) - g(x_{20}) - g(x_{50}) + g(x_{60})), \\ L_{\text{VI}} = L_{\text{VII}} = & \frac{1}{5h_a(h + \omega)}[(\omega' + s)^2(g(x_{31}) - g(x_{41})) - \omega'2(g(x_{33}) - g(x_{43})) - \\ & s^2(g(x_{34}) - g(x_{44}))] + \frac{1}{5(h_a - d)(h + \omega)}[\omega'2(g(x_{33}) - g(x_{43}) - \\ & g(x_{73})) - a^2(g(x_{30'}) - g(x_{40'}) - g(x_{70'})) + s^2(g(x_{34}) - g(x_{44}) - g(x_{74})) - \\ & (\omega' - a)^2(g(x_{38}) - g(x_{48}) - g(x_{78})) - (a + s)^2(g(x_{37}) - g(x_{47}) - \\ & g(x_{77})) + (a + \omega' + s)^2(g(x_{39}) - g(x_{49}) - g(x_{79}))]. \end{aligned}$$

上式中: $a(\leq \omega')$ 为 H 形电枢与轨道上底重合的部分; $x_{i,j}=y_i/z_j$; $y_1=(h+h_a)/2$, $y_2=(h-h_a)/2$, $y_3=(d+h_a)/2$, $y_4=(d-h_a)/2$, $y_5=(h+d)/2$, $y_6=(h-d)/2$, $y_7=d$; $z_1=\omega'+s$, $z_2=\omega+s$, $z_3=\omega'$, $z_4=s$, $z_5=\omega$, $z_6=\omega-a$, $z_7=a+s$, $z_8=\omega'-a$, $z_9=a+\omega'+s$, $z_{0'}=a$; $f(x)=x\arctan x + \frac{1}{4}x^2\ln(1+\frac{1}{x^2}) - \frac{1}{4}\ln(1+x^2)$; $g(x)=x^2\operatorname{arccot} x - \operatorname{arccot} x + x\ln(1+x^2) + x\ln z^2$.

由此得到的电感梯度公式 L_{I} 至 L_{VII} 的 7 个分量物理意义表示为,轨道 7 个平面上分布电流所产生的电磁场对电枢的贡献.

2 H 形电枢电感梯度的影响因素分析

由以上推导出的电感梯度公式易知,电感梯度主要与导轨横截面的各个参数有关.图 3 为电枢与轨道上底高的比值 h_a/d 对电感梯度的影响,图 4 为电感参数 a 对电感梯度的影响,图 5 为 T 形轨道与矩形轨道的电感梯度值比较.

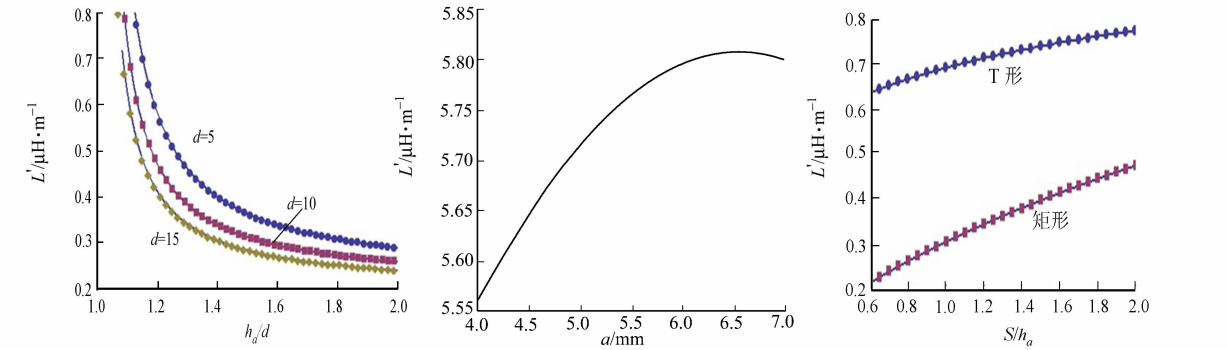


图 3 h_a/d 对电感梯度的影响

图 4 a 对电感梯度的影响

图 5 T 形与矩形轨道电感梯度值的比较

Fig. 3 Effect of h_a/d on

Fig. 4 Effect of a on

Fig. 5 Inductance gradient value

inductance gradient

comparison of T-shaped and rectangular rails

由图 3 可知:当 d 越小时,电感梯度的值越大,与前人研究的电感梯度与轨道横截面积有关相一致.这进一步说明,当导轨横截面积越小时,电感梯度值越大.当 h_a/d 的值无限接近 1,但大于 1 时,电感梯度的值越大,说明电枢可以设计的比轨道的上底高.

由图 4 可知:随着 a 的增加,电感梯度先增大后减小,当 a 取 6.54 时,电感梯度的值最大.此时,轨道的基本尺寸中上底宽 ω' 取 8 mm, $a < \omega'$ 符合实际情况.说明将电枢设计成 H 形是可行的,这不仅可以增加弹丸的命中率,而且可以增加弹丸的射击程度.

由图 5 可知:采用相同的轨道装置($h=40$ mm, $\omega=10$ mm),显然 H 形轨道的电感梯度值要比矩形轨道大,且随着电枢宽高比的增加,两组电感梯度值都是增加的.这说明对轨道炮而言,随着电枢宽高比的增加,电感梯度值逐渐增加.有研究表明,当电感梯度值从 0.6 到 0.8 时,其效率从 33.5% 提高到 40%;而当 s/h_a 取 1 时,电枢为正方形的,此时矩形电感梯度值为 0.307, T 形的电感梯度值为 0.692.

3 结束语

为了更好地提高弹丸的发射速度和命中率,选择 T 形导轨作为研究对象,根据轨道形状设计电枢为 H 形. 在考虑趋肤效应的基础上,对电枢在运行过程中受到的电感梯度进行数值分析,研究结果表明,T 形轨道的电感梯度值要比矩形轨道的值高,说明将电枢设计成 H 形是可行的.

参考文献:

[1] 李勇,李立毅. 电磁弹射技术的原理与现状[J]. 微电机,2001,34(5):35-43.

[2] KOU Bao-quan,LI Li-yi,ZHANG Cheng-ming. Analysis and optimization of thrust characteristics of tubular linear electromagnetic launcher for space-use[J]. IEEE Transactionsons on Magnetics,2009,45(1):250-255.

[3] GHASSEMI M,GHASSEMI A,ZIABASHARHAGH M. Thermal stress annlysis of the rail and the armature of an electromagnetic launcher[J]. IEEE Transactionsons on Magnetics,2009,45(1):293-297.

[4] EGELAND A. Birkeland's electromagnetic gun: A historical review[J]. IEEE Transactionsons on Plasma Science, 1989,17(2):73-82.

[5] JAMES T E,JAMES D C. Contaet pressure distribution and transition in solid armature[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2001,37(1):81-85.

[6] ELLIS R L,POYNOR J C,MEGLASSON B T. Influeene of bore and aail geometry on an electromagnetic naval rail-gun system[J]. IEEE Transaactions on Magneties,2005,41(1):182-187.

[7] MENAB I R,THOMAS C A. Thermal control of railgun armatures[J]. IEEE Transactions on Magneties,2001,37(1):92-96.

[8] DROBYSHEVSKI E M,ROZOV S I,ZHUKOV B G. Physics of solid armature launch transition into arc mode[J]. IEEE Transactions on Magneties,2001,37(1):62-66.

[9] NEWILL J F,POWELL J D,ZIELINSKI A E. Coupled finite-element codes for armature design[J]. IEEE Transactions on Magneties,2003,39(1):148-152.

[10] 何大娇. 电磁轨道炮内弹道优化设计[D]. 南京:南京理工大学,2008:1-3.

[11] 田振国,杨阴,白象忠. 电磁轨道发射过程中电枢与导轨的力学特性[J]. 机械强度,2012,34(2):234-238.

[12] 张伟,杨春霞,栗保明. 电磁轨道炮 C 型固体电枢坡膛段的装填方式研究[J]. 高压物理学报,2012,26(1):48-54

[13] 梁灿彬. 电磁学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2010:232-337.

Analysis and Calculation of T-Shaped Rail Armature

LIU Wen¹, ZHANG Hui¹, ZHAO Jing-yi^{2,3}, CUI Yan-ling¹

(1. College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. Key Laboratory of Advanced Forging and Stamping Technology and Science,
Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
3. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to increase the hit rate of railgun projectiles to the target, in this paper, the armature is designed as the H-shaped according to the shape of the T-shaped rail, according to the shape of the T-shaped rail. this base, the mathematical model is constructed by force of the armature, and the inductance gradient of the armature is analyzed and calculated, then theoretical expression of inductance gradient is obtained. By using Mathematics, numerical simulations are performedto study the inductance gradient analytical algorithm of T-shaped rail and the influence law of the launch trajectory geometric parameters to the inductance gradient, the values are compared with that of the rectangular rail. The results show that the inductance gradient value of T-shaped rail is significantly improved than the rectangular pme, further illustrate the feasibility of the design.

Keywords: raligun; armature; T-shaped rail; inductance gradient; magnetic flux density