

电磁轨道炮中的电流线密度与膛压

李 军

(北京特种机电技术研究所, 北京 100012)

摘 要: 为提供一个统一的参考标准, 将不同口径电磁轨道炮的研究成果联系起来, 借鉴传统火炮内弹道研究方法, 通过描述电磁轨道炮发射过程微分方程组, 以及电枢与轨道电磁力解析分析, 分别从宏观层面和微观层面考察了电磁轨道炮的内弹道过程。结果表明, 电磁轨道炮的电磁场、应力场和温度场不由电流大小或口径大小单独决定, 而是有由它们的比值即电流线密度决定。电流线密度平方与轨道压力、弹底压力、轨道间磁压力、轨道温度成正比, 电流线密度可以反映电磁轨道炮的内膛压力大小。提出以电流线密度作为电磁轨道炮的核心参数, 且比照传统火炮内弹道学参数的命名, 电流线密度可以看作是电磁轨道炮的“膛压”。对大、小口径电磁轨道炮发射过程模拟计算对比表明, 以电流线密度作为表征量, 可以有效联系起不同口径电磁轨道发射装置上相关参数的变化规律。

关键词: 电流线密度; 膛压; 电磁轨道炮; 发射器; 内弹道学; 口径

Linear Current Density and Bore Pressure of Electromagnetic Railgun

LI Jun

(Beijing Institute of Special Electromechanical Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to find a universal parameter that can relate the researches of electromagnetic (EM) railguns with different calibers, taking the tradition interior ballistic theory into consideration, we investigated the interior ballistic of railgun from aspects of both microcosmic and macrocosmic, by demonstrating the differential equations of railgun launch process and analytically analyzing the EM forces in railgun. Analysis shows that the magnetic flux density, stress, rail stress, and temperature fields depend on not current or caliber separately, but the ration of current to caliber, namely, the linear current density. Meanwhile, the square of linear current density is linearly proportional to rail stress and projectile pressure, and it represents the electromagnetic pressure in railgun. It is proposed that linear current density is a key parameter of railgun, which can be considered as the bore pressure of railgun, referencing the similar idea in interior ballistic theory. Comparison between launch simulation of railguns with different calibers indicates that, using linear current density as the character parameter, the patterns of parameters in railgun with different calibers can be effectively connected.

Key words: linear current density; bore pressure; electromagnetic railgun; launcher; interior ballistic; caliber

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 世界各军事强国加强了电磁轨道炮技术的基础研究, 并不断尝试将该技术转化应用到武器装备中^[1]。

受电磁轨道炮关键技术发展水平的制约, 我国的相关研究目前主要局限于基础研究层次^[2]。我们以中小口径电磁轨道发射实验平台为基础开展了轨道寿命问题的机理研究并取得了重要进展, 在防止发射过程中转捩问题的顺应性电枢技术和防止削削的分层分轨道技术等方面都取得了重大突破。这些

技术与相关理论在中小口径发射器的研制中得到了应用和验证, 并使发射器寿命 30 年来首次突破了 100 次^[3]。但这些验证试验均是基于 1 MA 级电流和 200 g 级电枢质量的中小口径轨道炮发射完成, 其研究成果是否能够外延应用到数 MA 级电流和数 kg 级电枢质量的未来应用所需规模的发射系统上则有待进一步研究。

实际上, 相关科研人员已认识到电流大小是轨道发射器寿命最关键的影响因素之一, 大口径电磁炮和小口径炮的轨道寿命研究有显著的区别, 有关小口径电磁炮的技术研究获得的理论成果不能简单适用于大口径电磁炮的轨道寿命问题研究。如何利用中小口径的研究成果指导大口径电磁轨道炮的研

基金资助项目: 国家自然科学基金重点项目(51237007)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51237007).

制是目前关注的重要问题。

尽管电磁发射和火炮发射的作用机理不同,但是加速过程有相似性,火炮发射中成熟的内弹道研究方法值得借鉴。从火炮内弹道学可以发现,小口径炮和大口径炮的理论设计都遵循相同的内弹道基本理论,内弹道设计与口径大小无关,关注的重要设计参数是最大膛压和初速^[4],而不是弹底推力(弹底膛压与弹丸截面积的乘积)和炮口动能(初速平方和弹丸质量乘积的一半)。电磁轨道炮弹丸所受推力可简单表示为电流平方与电感梯度乘积的一半,与电流的平方成正比,但电流大小反映的是弹丸所受推力,并不能反映单位面积推力的大小即压强,即电流大,推力大,并不代表压强一定大。此外,弹丸具有高动能并不意味着其有高初速。因此,比照传统火炮内弹道学,我们认为电流大小和能量大小不是电磁轨道炮的核心参数。

本文通过描述电磁轨道炮发射过程微分方程组的微观层面和电枢与轨道电磁力解析分析的宏观层面去考察电磁轨道炮的内弹道过程,提出电流线密度能直观反映电磁轨道炮内膛磁压力大小,是电磁轨道炮膛压的表征量,可将其形象地称为电磁轨道炮的“膛压”。

1 电磁轨道炮微分方程组讨论

单匝电磁轨道炮的结构原理可用图 1 来描述,载流电枢在强大电磁力的作用下沿轨道高速滑动。假设轨道高度为 h , 厚度为 s , 间距为 w , 电枢高度与轨道高度相同。典型轨道炮驱动电流波形如图 2 所示, 电流最大幅值为 I_0 ^[6]。

描述某小口径单匝电磁轨道炮电磁场、应力场和温度场的微观特性的数学模型主要为^[7]:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{j} \quad (1)$$

$$\nabla \times \frac{\mathbf{j}}{\sigma} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot K \nabla T + \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{j}}{\sigma} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

其中: \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{j} 为电流密度; \mathbf{v} 为电枢速度; \mathbf{S} 为应力; T 为温度; σ 为电导率; μ 为磁导率; ρ 为轨道或电枢的质量密度; C_p 为轨道或电枢的比热容; K 为轨道或电枢其热导率; t 为时间。

假设某大口径电磁轨道炮在几何尺度上与小口径电磁炮为 k 倍关系, 即 $x' = kx$, $y' = ky$,

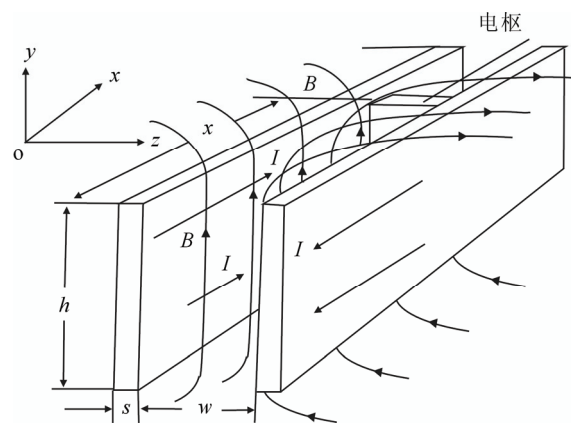


图 1 电磁轨道炮工作原理结构图^[5]

Fig.1 Electromagnetic railgun principle

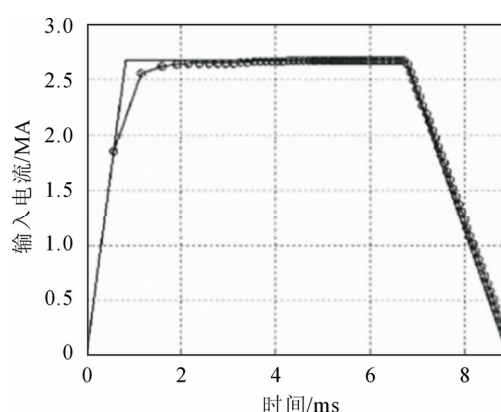


图 2 电磁轨道炮电流波形示意图

Fig.2 Current waveform of Electromagnetic railgun

$z' = kz$, $\nabla' = \nabla / k$, 并假设大、小炮的 σ 和 μ 相同, 则描述该大口径电磁轨道炮的电磁场、应力场和温度场的微观特性的数学模型也主要由以下方程组构成(其相关量用上标“'”来与小炮参量区分):

$$\nabla' \times \mathbf{B}' = \mu \mathbf{j}' \quad (5)$$

$$\nabla' \times \frac{\mathbf{j}'}{\sigma} = -\frac{\partial \mathbf{B}'}{\partial t'} + \nabla' \times (\mathbf{v}' \times \mathbf{B}') \quad (6)$$

$$\nabla' \cdot \mathbf{S}' + \mathbf{j}' \times \mathbf{B}' = \rho' \frac{d\mathbf{v}'}{dt'} \quad (7)$$

$$\nabla' \cdot K' \nabla' T' + \frac{\mathbf{j}' \cdot \mathbf{j}'}{\sigma} = \rho' C_p' \frac{\partial T'}{\partial t'} \quad (8)$$

当 $\mathbf{B}' = \mathbf{B}$ 时, 由式(5)可得

$$\nabla \times \mathbf{B} = k \mu \mathbf{j}'$$

与式(1)对照则有

$$\mathbf{j}' = \mathbf{j} / k \quad (9)$$

同时, 由式(6)可得

$$\nabla \times \frac{\mathbf{j}}{\sigma} = -k^2 \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t'} + k \nabla \times (\mathbf{v}' \times \mathbf{B})$$

与式(2)对照有:

$$t' = k^2 t \quad (10)$$

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} / k \quad (11)$$

当 $\mathbf{S}' = \mathbf{S}$ 时, 由式(7)可得

$$\frac{1}{k} \nabla \cdot \mathbf{S} + \frac{1}{k} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \rho' \frac{1}{k} \frac{d\mathbf{v}}{k^2 dt}$$

与式(3)对照有

$$\rho' = k^2 \rho \quad (12)$$

当满足式(9)至式(11)条件时, 由式(4)和式(8)可得出, $T' = T$ 。利用边界条件, 当 $x = x_0$ 时 (x_0 为一定值), 轨道截面积为 A , 此时

$$\int_A \mathbf{j} dA = I_0 \quad (13)$$

当 $x' = x'_0$ 时 ($x'_0 = kx_0$), 有

$$\int_{A'} \mathbf{j}' dA' = I'_0 = \int_A \frac{1}{k} \cdot \mathbf{j} k^2 dA = k I_0$$

因此 $I'_0 / I_0 = k$ (14)

以上式子表明: 当大、小口径电磁轨道炮发射电流幅值之比等于几何尺寸比例系数 k , 且满足式(10)至式(12)时, 它们的电磁场、应力场和温度场幅值及分布规律相同, 互为镜像。美国高技术研究所 Hsieh K T 等人的研究得到了与我们相似的结论^[7], 且本研究将速度项引入方程组, 使得对比分析更为直观。当轨道炮内膛口径为正方形, 即轨道间距 w 与轨道高度 h 相同, 也与电枢高度相同时, 由式(14)可得

$$I'_0 / h' = I_0 / h \quad (15)$$

则可知: 当 I_0/h 不变, 且满足上述相关条件时, 大、小口径电磁炮的电磁场、应力场和温度场幅值和分布规律相同。由此可见, I_0/h , 即电流大小与口径大小之比, 是 2 个电磁发射系统具有相同物理场的核心参数, 即大、小炮的电磁场、应力场和温度场幅值和分布规律不是单独由电流大小或口径大小决定的, 而是有由它们的比值决定的。

在进行电磁轨道炮发射器轨道寿命研究时, 必须分析轨道中的应力场和温度场, 因为轨道的寿命必然与其承受的应力和温度相关。如果大小炮的电磁场、应力场和温度场幅值和分布规律都相同, 则利用小炮研究获得的相关结论必然能为大炮的轨道寿命研究提供理论指导。鉴于 I_0/h 的重要性, 下面将专门讨论其意义。

2 单位面积电磁力解析表达式讨论

传统火炮在进行身管设计前, 必须先进行内弹

道设计, 确定内膛压力大小和分布随时间和弹丸行程的变化曲线, 并作为火炮身管强度设计的重要依据, 典型的内膛压力曲线如图 3、图 4 所示^[4]。同理, 电磁轨道炮发射器强度设计时必须先获得轨道上单位面积电磁力的大小和分布规律随时间和电枢位移变化的曲线。以下分析电磁轨道炮发射过程中电枢和轨道单位面积电磁力的解析表达式, 并探寻 I_0/h 的在电磁轨道炮中更深层次的物理含义。

2.1 弹底压力

参照传统火炮内弹道学的命名, 电磁轨道炮弹底(电枢)的单位面积压力可称为弹底压力 P_d , 其简化计算公式为

$$P_d = \frac{0.5 L' I^2}{h w}$$

式中, L' 为电磁轨道炮的电感梯度。当轨道高度与轨道间距相同时, 上式简化为

$$P_d = \frac{0.5 L' I^2}{h^2} = \frac{1}{2} L' \left(\frac{I}{h} \right)^2 \quad (16)$$

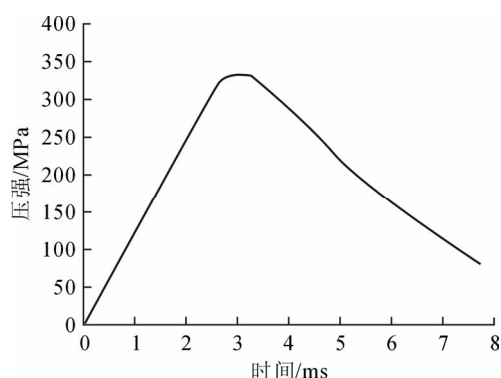


图 3 传统火炮弹底压力随时间的变化曲线

Fig.3 Relationship between projectile pressure and launch time of conventional gun

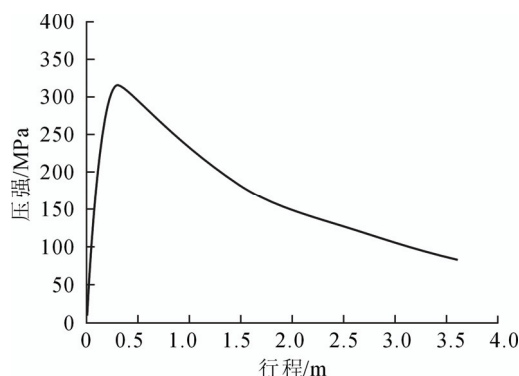


图 4 传统火炮弹底压力随弹丸行程的变化曲线

Fig.4 Relationship between projectile pressure and projectile movement distance of conventional gun

从式(16)可以看出, 弹底压力与 I/h 的平方成正比, I/h 值可以用来反映弹底压力的大小。电感梯度约为 $0.5 \mu\text{H}$ 且 I/h 值为 40 kA/mm 时, 弹底压力为 400 MPa 。

2.2 轨道压力

参照传统内弹道学命名, 轨道表面单位面积的电磁力可称为膛压 P_r , 并可估算为^[8]

$$P_r = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi h^3} (2h \arctan \frac{h}{w} - w \ln(\frac{w^2 + h^2}{w^2}))$$

当轨道间距和高度相同时有

$$P_r = 0.44 \frac{\mu_0}{\pi} (\frac{I}{h})^2 \quad (18)$$

从式(18)可以看出, P_r 与 I/h 的平方成正比, I/h 值可以用来反映轨道压力的大小。当 I/h 值为 40 kA/mm 时, 轨道压力约为 281.6 MPa 。

2.3 轨道间磁压力

如果将电磁轨道炮的发射器简化为 2 根无限长的平行导线, 通反向电流, 则发射器中心轴线上的磁感应强度可表示为

$$B = 2 \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{0.5h} = \frac{2\mu_0}{\pi} \cdot \frac{I}{h}$$

中心轴线上的磁压力可以表示为

$$P_B = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \frac{2\mu_0}{\pi} \frac{I}{h} \cdot \frac{2I}{\pi h} = \frac{2\mu_0}{\pi^2} (\frac{I}{h})^2 \quad (19)$$

从式(19)可见, 轨道间的磁压力也与 I/h 平方成正比, I/h 值可以用来反映轨道间磁压力的大小。当 I/h 值为 40 kA/mm 时, 轨道间磁压力为 407 MPa 。

2.4 轨道熔化温度

由于速度趋肤效应, 电磁轨道炮电枢附近轨道上的电流主要集中在轨道内侧, 可以近似地将电流看成面电流, 其集中度(current concentration)可以用 I/h 来表示。则轨道温度的上升量可以近似表示为^[8]

$$\Delta T \approx \frac{2\mu_0 I^2}{\pi \rho C_p h^2} \ln(1 + \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\rho C_p \eta_0}{\mu_0 k}}) \quad (20)$$

由式(20)可见, 温度上升量也与 I/h 的平方成正比, 对于纯铜轨道来说, 熔化温度所对应的电流集中度 I/h 是 43 kA/mm 。

3 初步讨论

综上所述, I/h 大小反映了电磁轨道炮的轨道电流集中程度, 其平方与轨道温度上升量成正比, 如

忽略轨道初始温度大小, 则与轨道温度成正比, I/h 过高轨道会熔化, 必须严格控制。此外, I/h 平方大小还与轨道压力、弹底(电枢)压力和轨道间磁压力成正比, I/h 反映了电磁轨道炮的内膛压力大小, 因此, 参照传统内弹道学的命名^[4], 可以将其看成电磁轨道炮的膛压。

在国外近期的文献中, 轨道高度与电枢高度相同时, 将 I/h 称为 linear current density, 作为电磁轨道炮设计的重要参数, 其中文可直译为线性的电流密度。为简化起见, 国内一些学者将其简称为线电流密度。严格意义上讲, I/h 应称为电流线密度, 或面电流密度, 或面电流线密度。综合分析, 可以将电流线密度作为表征电磁轨道炮膛压的特定称呼。

假设大、小口径电磁轨道炮具有同样的电流线密度最大值, 但电流最大值相差一倍, 电感梯度相同。图 5 和图 6 分别是其发射电流随时间的变化和弹丸位移变化的示意图, 图 7 是弹底压力随弹丸行程的变化的示意图。

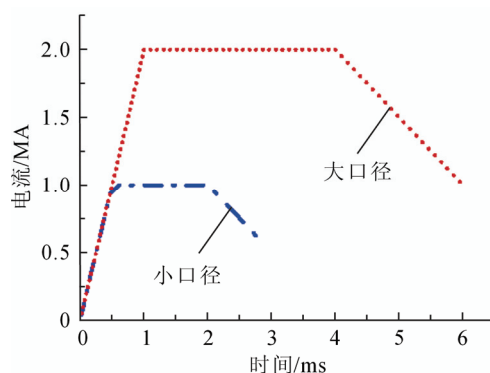


图 5 2 种典型电磁轨道炮发射电流随时间变化示意图

Fig.5 Relationship between current and launch time of two typical electromagnetic rail guns

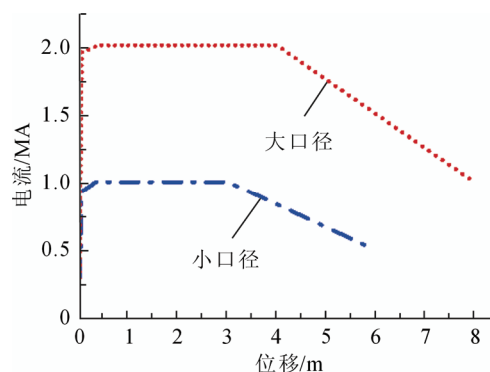


图 6 2 种典型电磁轨道炮发射电流随位移变化示意图

Fig.6 Relationship between current and launch time of two typical electromagnetic rail guns

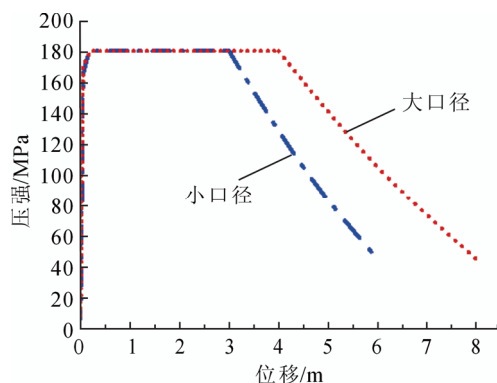


图7 2种典型电磁轨道炮弹底压力随位移的变化曲线

Fig.7 Relationship between projectile pressure and movement distance of two typical EM rail guns

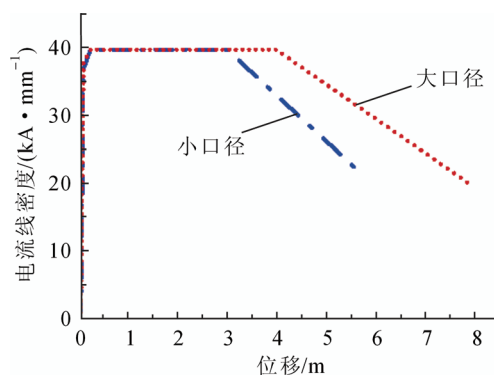


图8 2种典型电磁轨道炮电流线密度随位移的变化曲线

Fig.8 Relationship between linear current density and movement distance of two typical EM rail guns

从图5至图7可看出大小电磁轨道炮的电流存在显著的差异,但其核心参数弹底压力平台值却很一致。所以,电流变化曲线难以直观揭示发射过程的本质特性。图8和图9分别是它们的电流线密度随弹丸行程和时间的变化曲线示意图,彼此很接近并与弹底压力规律相同,较好地揭示其发射过程的本质。因此,电流线密度能直观地表征电磁轨道炮膛单位面积电磁力,而电流却不能。电流线密度是电磁轨道炮膛压的表征量,而且计算简便,知道电流曲线和口径,就能很方便地判定其内膛压力大小。

应注意本文中提出的 I/h 代表膛压是应用于方形口径电磁轨道炮中,即 $h=w$ 。此代表式在其他异形口径轨道炮的应用中应结合具体情况做出推导、调整,但以电流线密度作为轨道炮的核心参数仍然适用。

4 结论

1) 电磁轨道炮的电磁场、应力场和温度场不单独由电流大小和口径大小决定,而是有由它们的比值即电流线密度决定的。

2) 弹底(枢)压力、轨道压力和轨道间磁压力与电流线密度平方成正比,电流线密度能直观反映电磁轨道炮的内膛压力大小。

3) 电流线密度能直观反映电磁轨道炮内膛磁压力大小,是电磁轨道炮膛压的表征量,可将其形象地称为电磁轨道炮的“膛压”。

致谢

非常感谢清华大学王赞基和袁建生老师在概念讨论中提出的建议,也很感谢华中科技大学夏胜

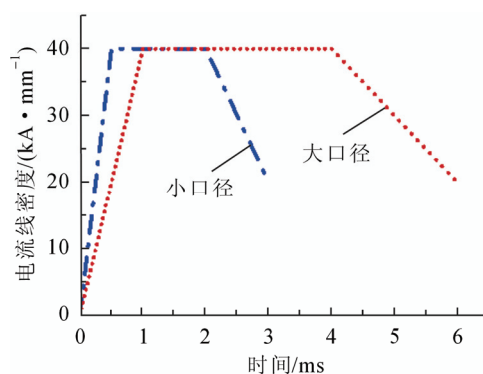


图9 2种典型电磁轨道炮电流线密度随时间的变化曲线

Fig.9 Relationship between linear current density and launch time of two typical EM rail gun

国老师提供的部分参考文献和关于电流线密度与轨道熔化温度关系的相关讨论,感谢军械工程学院金龙文博士在文章修改过程中的帮助。最后衷心地感谢我的电磁轨道炮老师 Richard Marshall 博士对我的帮助。他已病逝1年多了,仅以此文寄托我的哀思。

参考文献 References

- [1] Fair H D. The past, present, and future of electromagnetic launch technology and IEEE international EML Symposium[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 41(1): 1024-1027
- [2] Li J. The development of EML technology in China[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 41(1): 1029-1033
- [3] 北京特种机电技术研究所. 电磁轨道炮寿命试验研究报告 201206[R]. 北京: 北京特种机电技术研究所, 2012.
Beijing Institute of Special Electromechanical Technology. The report of electromagnetic rail gun life test 201206[R]. Beijing, China: Beijing Institute of Special Electromechanical Technology, 2012.
- [4] 华东工学院 103 教研室. 内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
103 Staff Room, East China Institute of Technology. Interior ballis-

tics[M]. Beijing, China: National Defence Industry Press, 1978.

- [5] Marshall R A, Wang Y. Railguns: their science and technology[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2004.
- [6] Satapathy S, Vanicek H. Energy partition and scaling issues in a rail-gun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 178-185.
- [7] Hsieh K-T, Kim B K. One kind of scaling relations on electromechanical systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 240-244.
- [8] Hawke R S, Brooks A L, Fowler C M, *et al.* Electromagnetic railgun launchers: direct launch feasibility[J]. AIAA Journal, 1982, 20(7): 978-985.



LI Jun

Ph. D.

Senior engineer

李 军

1968—, 男, 博士, 高工

主要从事电磁发射技术研究工作。国际电磁发射技术委员会常务委员, 中国电工技术学会电磁发射技术专业委员会主任委员

E-mail: lijun99@tsinghua.org.cn

收稿日期 2013-12-07 修回日期 2014-01-16 编辑 肖 铮

中国物理学会第十九届全国静电学术会议征文

中国物理学会第十九届全国静电学术会议将于 2014 年 8 月中旬在山西太原举行。

一、会议主题

1、放电基本过程与理论

高压放电理论与方法; 静电放电特性; ESD模型; 气体放电的数值模拟。

2、静电安全与应用技术

静电安全与灾害防护; 静电产生与控制; 电磁兼容与防护; 静电生物效应; 静电除尘; 静电应用技术。

3、放电过程的诊断与测试技术

放电过程检测与监测方法; 静电测试技术; 放电等离子体的诊断。

4、放电等离子体应用

高压放电技术及其应用; 放电等离子体技术及其应用; 气体放电与高级氧化过程。

二、会议征文

1. 会议只接受未在国内期刊或学术会议上公开发表的学术论文。稿件为中文, 投稿截止时间为 2014 年 5 月 31 日。

2. 参会论文将编入《中国物理学会第十九届静电学术会议论文集》, 不收取版面费。

3. 会议推荐部分优秀论文至《高电压技术》(EI 收录期刊)、《北京理工大学学报》(EI 收录期刊)和《安全与环境学报》(核心期刊, 正刊)。请作者根据论文研究内容, 选择投稿方向。论文格式可以从各期刊官网下载。

4. 期刊论文的审稿均由各杂志社自行组织盲审, 会务组仅协助投送稿件, 不负责审稿。

会务组联系方式:

欧阳吉庭: 13521106352; 010-68912635 (北京理工大学)

缪劲松: 13520534567 (北京理工大学)

梁礼孩: 13903534371 (中国兵器特种能源集团, 山西)

论文投稿邮箱: esd2014@sina.com