文章编号：1000-5773(2013)02-0299-06

单级脉冲感应线圈炮能量转换效率优化研究*

刘文彪，张 媛，曹延杰

（海军航空工程学院，山东烟台 264001）

摘要：以系统能量转换效率为目标函数，建立了单级脉冲感应线圈炮的数学模型，对电枢初始位置、电容器组放电电压和电容量进行了优化分析，获得了三者影响能量转换效率的规律。分析结果表明，要提高系统能量转换效率，弹丸穿越驱动线圈时加速行程的时间应当与驱动线圈中电流的上升时间相匹配，通常情况下电容器组采用高电压、小电容量的配置方式，系统可获得较大的能量转换效率。

关键词：单级脉冲感应线圈炮；能量转换效率；目标函数；优化

中图分类号：O442 **文献标识码**：A

1 引 言

目前，如何提高脉冲感应线圈炮的能量转换效率，已经成为国内外电磁发射领域亟待解决的问题，以美国为首的欧美发达国家正在致力于该问题的研究。美国桑迪亚国家实验室正在工程研制应用于未来战斗系统(Future Combat Systems，FCS)的脉冲感应线圈迫击炮，其能量转换效率可达 22%[1]；国内研制的脉冲感应线圈炮实验装置的能量转换效率相对较低，一般在 10%以内[2-3]；而感应线圈炮的理论能量转换效率最高可达 100%[4]。由此可以得出两个结论：(1) 无论国内还是国外，脉冲感应线圈炮的能量转换效率都有较大的提升空间；(2) 在脉冲感应线圈炮能量转换效率方面，国内与国外相比存在一定的差距。脉冲感应线圈炮分单级和多级两种。国内学者对单级脉冲感应线圈炮(Single Stage Pulse Induction Coilgun，SSPICG)进行了研究：程键等[5]分析了单级线圈加速电枢的机理；曹延杰等[6]分析了 SSPICG 电枢初始位置等因素对弹丸速度的影响；赵科义等[7]对 SSPICG 的工作过程进行了动态仿真，计算了系统的能量转换效率；张涛等[8]仿真研究了圆筒型和绕线型两种不同结构的弹丸对 SSPICG 发射性能的影响；苏子舟等[9]仿真研究了弹丸配重对 SSPICG 初始位置的影响；罗凌雁等[2]对 SSPICG 的结构优化设计进行了探索。但是，总的来说国内对 SSPICG 能量转换效率的研究较少。因此，本工作将在建立 SSPICG 数学模型的基础上，对 SSPICG 能量转换效率开展研究，为感应线圈炮的工程应用提供理论参考和技术支持。

2 系统工作原理及数学模型

2.1 工作原理

SSPICG 一般由储能电源(如电容器组)、驱动线圈、发射组件(包括电枢和弹丸)、高压触发开关等部件组成，基本结构如图 1 所示。在 SSPICG 的发射过程中，驱动线圈固定不动，电枢最初位于驱动线圈中心偏右的位置。接通高压触发开关，充电电容器组给

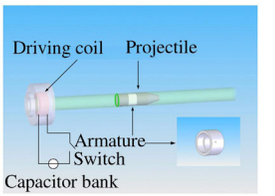


图 1 SSPICG 组成

Fig. 1 Composition of SSPICG

* 收稿日期：2011-02-25；修回日期：2012-08-23

作者简介：刘文彪(1980—)，男，博士，讲师，主要从事电磁发射技术研究. E-mail：lwb80314@sohu.com

驱动线圈馈入脉冲大电流。电流流经驱动线圈产生脉冲强磁场，变化的强磁场在电枢内感应出脉冲大电流。由于驱动线圈中的电流和电枢中的感应电流方向相反，因而驱动线圈与电枢产生互相排斥的电磁力。驱动线圈受向左的电磁力，由于被固定而静止不动；电枢受向右的电磁力，由于没有固定而推动弹丸向右作加速运动，直至飞出炮口。

2.2 数学模型

2.2.1 等效电路方程

在 SSPICG 的发射过程中，对于空心圆筒形的铝电枢，感应电流沿其轴向的分布是不均匀的。因此为了便于建模，把电枢进行离散分割，沿轴向均分为 m 片，每片为一圆环，认为其环向电流沿截面均匀分布。经过上述处理，SSPICG 系统的等效电路如图 2 所示。C 为电容器组的电容量，U_0 是电容器组的充电电压；R、R_{b1} 为回路固有电阻；L、L_{b1} 为回路固有电感。R_0、L_0 分别为驱动线圈的电阻和自感。R_1、R_2、…、R_m 和 L_1、L_2、…、L_m 分别为电枢分片的电阻和自感。M_{01}、M_{02}、…、M_{0m} 为驱动线圈和电枢分片之间的互感，M_{ij}（$i=1,2,\cdots,m$；$j=1,2,\cdots,m$；$i\neq j$）为电枢第 i 片和第 j 片之间的互感。

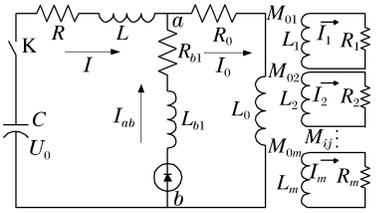


图 2 SSPICG 组成

Fig. 2 Composition of SSPICG

设如图 2 所示的 a 点到 b 点的电压降为 U_{ab}，那么在 t 时刻，当 $U_{ab}\geqslant 0$ 时，a 和 b 之间的电路断开，此时 $I_0=I$，对系统等效电路可建立如下方程

$$(L+L_0)\frac{\mathrm{d}I_0(t)}{\mathrm{d}t}+(R+R_0)I_0(t)=U_\mathrm{B}+\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{0i}I_i(t)] \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{1i}I_i(t)]+R_1I_1(t)-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{10}I_0(t)]=0 \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{2i}I_i(t)]+R_2I_2(t)-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{20}I_0(t)]=0 \tag{3}$$

$$\vdots$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{mi}I_i(t)]+R_mI_m(t)-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{m0}I_0(t)]=0 \tag{4}$$

当 $U_{ab}<0$ 时，a 和 b 之间的电路导通，此时 $I_0=I+I_{ab}$，对系统等效电路可建立如下方程

$$(R+R_{ab})I+(L+L_{ab})\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}-R_{ab}I_0-L_{ab}\frac{\mathrm{d}I_0}{\mathrm{d}t}=U_\mathrm{B} \tag{5}$$

$$RI+L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}+R_0I_0+L_0\frac{\mathrm{d}I_0}{\mathrm{d}t}=U_\mathrm{B}+\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{0i}I_i(t)] \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{1i}I_i(t)]+R_1I_1(t)-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{10}I_0(t)]=0 \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{2i}I_i(t)]+R_2I_2(t)-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{20}I_0(t)]=0 \tag{8}$$

$$\vdots$$

$$\sum_{i=1}^{m}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{mi}I_i(t)]+R_mI_m(t)-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[M_{m0}I_0(t)]=0 \tag{9}$$

式中：$M_{ii}=L_i(i=1,2,\cdots,m)$；$U_\mathrm{B}=U_0-\frac{1}{C}\int_0^t I(t)\mathrm{d}t$。

电路方程只是给出了电容器组的放电电压、驱动线圈电流以及电枢电流之间的关系。需要根据驱

动线圈电流和电枢电流推导出弹丸所受的电磁推力。

2.2.2　推力方程

采用电感法计算弹丸所受的电磁推力。理想情况下系统中的总储能为

$$W_m = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m} L_i I_i^2 + \frac{1}{2} L_0 I_0^2 + \sum_{i=1}^{m} M_{0i} I_i I_0 \tag{10}$$

设弹丸发射方向为 x 方向,那么弹丸仅沿 x 方向运动(炮管内运动忽略重力影响),自感项磁能不变化,只有互感项磁能随 x 变化。不计其它能量损失,t 时刻作用在弹丸上沿 x 方向的电磁推力为

$$F(t) = \frac{\mathrm{d}W_m}{\mathrm{d}x} = \sum_{i=1}^{m} \frac{\mathrm{d}M_{0i}(t)}{\mathrm{d}x} I_i(t) I_0(t) \tag{11}$$

由(11)式可以看出,要得到弹丸 x 方向的电磁推力,需要计算驱动线圈与电枢各片沿 x 方向上的互感梯度。在 SSPICG 中,驱动线圈和电枢均可以等效为理想的轴对称空心圆柱线圈。对于两个空心圆柱线圈之间的互感和互感梯度,可以采用等效圆环线圈法进行计算。

2.2.3　运动方程

根据牛顿第二定律,t 时刻作用在弹丸上的电磁推力可以表示为

$$F(t) = m_{\mathrm{p}} a(t) \tag{12}$$

由此可得

$$a(t) = \frac{F(t)}{m_{\mathrm{p}}} = \frac{1}{m_{\mathrm{p}}}\sum_{i=1}^{m} \frac{\mathrm{d}M_{0i}(t)}{\mathrm{d}x} I_i(t) I_0(t) \tag{13}$$

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t)\mathrm{d}t = v_0 + \int_0^t \frac{1}{m_{\mathrm{p}}}\sum_{i=1}^{m} \frac{\mathrm{d}M_{0i}(t)}{\mathrm{d}x} I_i(t) I_0(t)\mathrm{d}t \tag{14}$$

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v(t)\mathrm{d}t \tag{15}$$

式中:m_{p} 为弹丸和电枢的总质量,$a(t)$为弹丸在 t 时刻的加速度,$v(t)$为弹丸在 t 时刻的速度,$x(t)$为弹丸在 t 时刻的位移。

联立上述等效电路方程、推力方程和运动方程,即得到描述 SSPICG 发射过程的数学模型。

2.3　系统能量转换效率

在 SSPICG 的发射过程中,系统总能量不变,主要包括:电容器组的电能,线圈中的电磁能量,弹丸和电枢的动能以及电阻热损耗等。定义系统能量转换效率为弹丸和电枢所获动能与电容器组初始储能的比值。因此,SSPICG 的能量转换效率可表示为

$$\eta = \frac{W_{\mathrm{km}}}{W_{\mathrm{C}}} = \frac{m_{\mathrm{p}} v_{\mathrm{m}}^2}{CU^2} \tag{16}$$

式中:W_{km}表示弹丸和电枢最终获得的总动能,W_{C} 表示电容器组的初始储能,v_{m} 表示弹丸的出口速度,C、U 分别表示电容器组的电容量和放电电压。

3　仿真过程及结果分析

根据 SSPICG 的等效电路方程、推力方程和运动方程,结合互感和互感梯度的计算,给定初始条件即可以进行系统的动态仿真。SSPICG 的结构参数见表 1。表 1 中,D_1、d_1 和 l_1 分别表示电枢前部的外径、内径和长度,D_2、d_2 和 l_2 分别表示电枢后部的外径、内径和长度,D、d 和 l 分别表示驱动线圈的外径、内径和长度。

表 1　SSPICG 的结构参数

Table 1　Structural parameters of SSPICG

Armature							Drive-coil			
Material	D_1/(mm)	d_1/(mm)	l_1/(mm)	D_2/(mm)	d_2/(mm)	l_2/(mm)	Material	D/(mm)	d/(mm)	l/(mm)
Aluminum (Hollow column)	59	39	20	59	47	20	Copper	96	64	33

在仿真过程中，将电枢沿轴向均分为 10 片，每一片都可以看作是一个单匝空心圆柱线圈。驱动线圈采用扁平铜带密绕，绕制线圈的铜带横截面积为 0.5 mm×10 mm(矩形截面)，线圈匝数为 33。弹丸的质量为 1.285 kg。电枢的初始位置用驱动线圈和电枢的中心距 s 来度量，如图 3 所示。

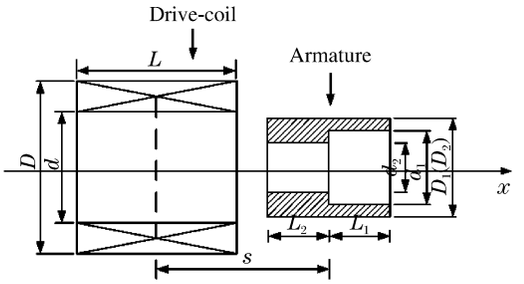


图 3 SSPICG 剖面图

Fig. 3 Section drawing of SSPICG

放电电压，电容量和电枢初始位置单独影响系统能量转换效率的规律见参考文献[9]，不再赘述。下面重点分析 3 个因素中其中两者变化和三者同时变化的情况。

3.1 电容器组放电电压和电容量同时对系统能量转换效率的影响

放电电压的变化范围是[0,50](单位 kV)，电容量的变化范围是[100,10 000](单位 μF)，电枢初始位置采用电容器组放电时电枢和驱动线圈的中心距 s 表示，给定为 16 mm。图 4 为当电容器组的放电电压和电容量同时变化时，系统能量转换效率的变化情况。从图 4 中可以看出：(1) 大放电电压和小电容量对应的区域系统能量转换效率较大，而小放电电压和大电容量对应的区域系统能量转换效率较小；(2) 无限制地提高电容器组的电容量并不能提高系统能量转换效率，反而会降低系统能量转换效率；(3) 由于电枢初始位置给定，弹丸在驱动线圈中的加速行程不变。因此在提高电容器组放电电压的同时减小其电容量，保证驱动线圈中电流上升时间不变，可有效提高系统能量转换效率并使其达到局部最大值；(4) 一旦给定电容器组放电电压和电容量两个参数中的一个，另一个参数则存在一个最佳值与之对应，使得能量转换效率达到最大。

3.2 电容器组放电电压和电枢初始位置同时对系统能量转换效率的影响

当电容器组的放电电压和电枢初始位置同时变化时，系统能量转换效率的变化规律如图 5 所示。

电容器组放电电压的变化范围是[0,50](单位 kV)，电枢初始位置的变化范围是[5,50](单位 mm)，电容器组电容量 C 给定为 3 000 μF。从图 5 中可以看出：(1) 在电枢初始位置远离驱动线圈中心位置时系统能量转换效率较低，特别是在大放电电压区域，系统能量转换效率不到 1%；电枢初始位置接近驱动线圈中心位置时，系统能量转换效率较高，特别是当放电电压在[15,30](单位 kV)之间、电枢初始位置在[5,10](单位 mm)之间时，系统能量转换效率可达到 20%以上；(2) 随着电枢初始位置向驱动线圈中心靠近，弹丸在驱动线圈中的加速行程增大，因此提高电容器组的放电电压，保证驱动线圈中电流的上升时间同步增大，能有效提高系统能量转换效率并使其达到局部最大值。

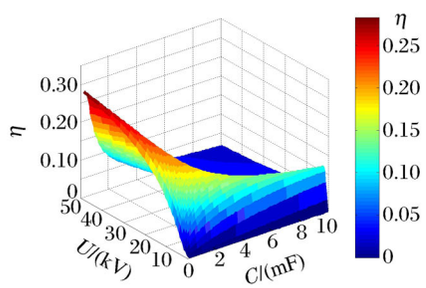


图 4 能量转换效率随放电电压和电容量的变化图

Fig. 4 Energy conversion efficiency change with discharge voltageand capacitance of capacitor bank

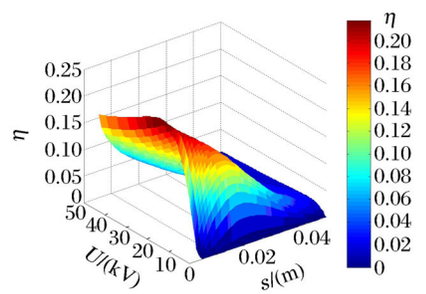


图 5 能量转换效率随放电电压和电枢初始位置的变化图

Fig. 5 Energy conversion efficiency change with discharge voltage and initial position of projectile

3.3 电容器组电容量和电枢初始位置同时对系统能量转换效率的影响

当电容器组的电容量和电枢初始位置同时变化时，能量转换效率的变化规律如图 6 所示。

电容量的变化范围是[100,10 000](单位 μF)，电枢初始位置的变化范围是[5,50](单位 mm)，电容

器组的放电电压 U 给定为 14.5 kV。从图 6 中可以看出:(1) 电枢初始位置远离驱动线圈中心时,系统能量转换效率较低,特别是在大电容量区域能量转换效率不到 1%;电枢初始位置靠近驱动线圈中心位置时的能量转换效率较高,特别是当电容量在[2 000,4 000](单位 μF)之间、电枢初始位置在[5,15](单位 mm)之间时,系统能量转换效率可达到 20%;(2) 随着电枢初始位置向驱动线圈中心移动,弹丸在驱动线圈中的加速行程增大,由于放电电压固定,因而提高电容器组的电容量,保证驱动线圈中电流的上升时间同步增大,可有效提高系统能量转换效率并使其达到局部最大值。

3.4　电容器组放电电压和电容量以及电枢初始位置同时对系统能量转换效率的影响

为了获得电容器组放电电压、电容量以及电枢初始位置同时影响系统能量转换效率的规律,以系统能量转换效率为目标函数,以电容器组的放电电压、电容器组的电容量以及电枢的初始位置为变量,对系统进行了优化分析,分析结果如图 7 所示。

图 7 中显示的是当放电电压 U 为 5、14 和 20 kV、电容量 C 为 1 000、3 000 和 5 000 μF 时,电枢初始位置 s 为 5、16 和 30 mm 的 9 个切面。从图 7 中可以看出:(1) 对于给定的单级感应线圈炮系统,在电容器组放电电压相对较大、电容量相对较小以及电枢初始位置相对靠近驱动线圈中心区域时,系统能量转换效率较大;(2) 通过优化配置最佳的电容器组放电电压、电容器组电容量以及电枢初始位置,能有效提高系统能量转换效率并使其达到局部最大值。配置的原则是,弹丸穿越驱动线圈加速行程的时间应当与驱动线圈中电流的上升时间(主要由电容器组的电容量和驱动线圈的电感确定)相匹配。

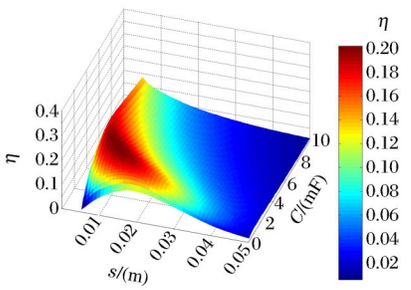


图 6　能量转换效率随电容量和电枢初始位置的变化

Fig. 6　Energy conversion efficiency change with initial position of projectile and capacitance

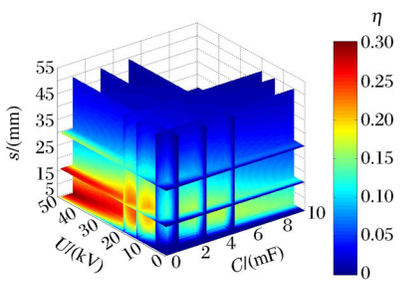


图 7　系统能量转换效率变化

Fig. 7　Energy conversion efficiency change

4　分析结果对工程实践的启示

通过分析电容器组的放电电压、电容器组的电容量以及电枢的初始位置对系统能量转换效率的影响,获得了 3 个参数单独影响、其中任意两个参数以及 3 个参数同时影响的结果,分析总结了其中的规律。理论联系实际,这些分析结果对工程实践的主要启示有以下几点。

(1) 可以通过增加电容器组的放电电压、电容器组的电容量以及寻找电枢最佳初始位置 3 种方法来提高弹丸速度;然而,若提高系统的能量转换效率,则必须通过优化配置最佳的电容器组放电电压、电容器组电容量以及电枢初始位置来实现。

(2) 优化配置电容器组放电电压、电容器组电容量以及电枢初始位置的原则是,弹丸穿越驱动线圈加速行程的时间应当与驱动线圈中电流的上升时间(主要由电容器组的电容量和驱动线圈的电感确定)相匹配。

(3) 一般情况下,电容器组采用大放电电压、小电容量的配置方式,以提高系统能量转换效率。

5　结 束 语

建立了 SSPICG 的数学模型,研究了电容器组放电电压、电容器组电容量以及电枢初始位置对系统能量转换效率的影响,获得了 3 个参数中任意 2 个以及 3 个参数同时影响的结果,深入分析了其中的规律,并根据分析结果总结提出了 SSPICG 工程实践中提高系统能量转换效率应该遵循的 3 点启示。

References:

[1] Subramanian R, Kaye R, van Reuth E, et al. Development and testing for an electromagnetic mortar [C]//2007 Mortars Conference. Morristown, NJ, USA, 2007.

[2] Luo L Y, Xu X, Mao Y. Structural optimization design of electromagnetic coil launcher [J]. Electrical Engineering, 2010(sl): 31-37. (in Chinese)
罗凌雁,徐 晓,毛 勇. 线圈型电磁发射器结构优化设计 [J]. 电气技术,2010(sl):31-37.

[3] Liu W B, Zhong P L, Zou P, et al. Simulation and analysis of muzzle velocity in single stage inductive coilgun [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(1): 31-33. (in Chinese)
刘文彪,钟佩琳,邹 平,等. 单级感应线圈炮出口速度仿真 [J]. 海军航空工程学院学报,2009,24(1):31-33.

[4] Wang Y, Xiao F. Theory of Electric Gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 93-97. (in Chinese)
王 莹,肖 峰. 电炮原理 [M]. 北京:国防工业出版社,1995:93-97.

[5] Cheng J, Ren Z X. Mechanism analysis of single stage coil accelerating armature [J]. Journal of Electrician Technology, 1997(5): 29-31. (in Chinese)
程 键,任兆杏. 单级线圈加速电枢的机理分析 [J]. 电工技术杂志,1997(5):29-31.

[6] Cao Y J, Liu W B, Zhang Y, et al. Simulation and analysis of single stage induction coilgun's best initial position [J]. Computer Simulation, 2006, 23(12): 9-11. (in Chinese)
曹延杰,刘文彪,张 媛,等. 单级感应线圈炮最佳初始位置仿真研究 [J]. 计算机仿真,2006,23(12):9-11.

[7] Zhao K Y, Li Z Y, Cheng S K. Dynamic simulation of working process of the single-stage induction coil-gun [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1667-1671. (in Chinese)
赵科义,李治源,程树康. 单级感应线圈炮工作过程的动态仿真 [J]. 高电压技术,2008,34(8):1667-1671.

[8] Zhang T, Su Z Z, Guo W, et al. Simulation of working process of single-stage induction coil-gun considering different projectile's structures [J]. Electrical Engineering, 2010(sl): 24-26. (in Chinese)
张 涛,苏子舟,国 伟,等. 不同弹丸结构的单级感应线圈炮仿真研究 [J]. 电气技术,2010(sl):24-26.

[9] Su Z Z, Guo W, Zhang T, et al. Effect of launch initial position on the performance of coil-gun by the pullback weight of the projectile [J]. Electrical Engineering, 2010(sl): 27-30. (in Chinese)
苏子舟,国 伟,张 涛,等. 弹丸配重对线圈炮最佳初始位置影响研究 [J]. 电气技术,2010(sl):27-30.

Optimization and Analysis of Energy Conversion Efficiency in Single Stage Pulse Induction Coilguns

LIU Wen-Biao, ZHANG Yuan, CAO Yan-Jie

(*Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai* 264001, *China*)

Abstract: In order to gain the rule between them, the mathematic model of single stage pulse induction coilguns is built, and the launch process is simulated and analyzed. The electrical-to-kinetic energy conversion efficiency of system is regarded as a target function, and the initial position of the armature, the discharge voltage and the capacitance of capacitor banks are regarded as variables. Results of analysis indicate that the time of projectile to be accelerated in the drive-coil should match the time of current rising in the drive-coil. As a rule, the high energy conversion efficiency can be gained in the system with capacitor banks of high voltage and low capacitance.

Key words: single stage pulse induction coilguns; energy conversion efficiency; target function; ptimization