

基于遗传算法的同步感应线圈 发射装置参数优化*

郭 赞, 鲁军勇, 关晓存, 张 晓, 谭 赛

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 武汉 430033)

摘 要: 发射速度和能量转换效率是同步感应线圈型电磁发射装置(SICEML)最重要的两项指标。驱动线圈和电枢的结构参数、驱动线圈匝数以及电枢初始触发位置都会对这两项指标产生影响。以上述参数为变量,以发射速度和能量转换效率之积为目标函数,引入遗传算法对单级 SICEML 参数进行了优化设计,并利用有限元软件进行了仿真验证。结果表明:在储能与发射装置总体体积不变的前提下,优化后的系统效率由 5.38% 提高到 13.6%,出口速度由 38 m/s 提高到 61 m/s,系统性能得到明显改善。利用单级 SICEML 样机进行了堵驻试验,结果与仿真结果吻合较好,验证了本文提出的遗传算法的可行性。

关键词: 发射速度; 能量转换效率; 同步感应线圈型电磁发射装置; 遗传算法; 有限元

中图分类号: TM303

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201426.115008

电磁发射技术是一种新型直线推进技术,能够在短时间内将电磁能转化为载荷所需的瞬时动能。其中,同步感应线圈型电磁发射装置(SICEML)是一种非接触式的电磁发射装置,能够有效减少磨损,提高装置寿命,具有广阔的应用前景^[1]。发射速度和能量转换效率是 SICEML 最重要的两项指标,影响这两项指标的因素有很多,包括:驱动线圈和电枢的结构参数(内径、外径、长度),驱动线圈匝数以及电枢初始触发位置等。SICEML 系统性能的优化已经得到广泛研究,常见的优化算法包括模拟退火法、遗传算法、蚁群算法等^[2-4]。其中遗传算法是一种全局优化算法,能够对全局变量同时进行搜索寻优,简单易行,适用范围广泛,尤其对多变量、非线性的问题能够提供较好的解决方案,在发射装置初期设计阶段能够缩小优化区间。目前遗传算法在异步感应线圈发射装置中得到一定应用,但在同步感应线圈发射装置中研究较少。因此,本文结合 SICEML 系统的特殊应用对象,提出采用遗传算法对系统参数进行优化设计,为该类型系统的优化研究提供理论基础。

1 基于电流丝法的动态发射数学模型

图 1 为单级 SICEML 结构原理图,装置主要由驱动线圈和电枢(圆筒型)组成,脉冲电容器 C 通过开关 K 向驱动线圈注入脉冲电流,形成变化磁场,并在电枢上感应出涡流,从而产生电磁力推动电枢前进。

为了预测系统动态发射性能,通常需要建立系统的仿真模型。对于 SICEML 系统,目前常用的数值分析方法有电流丝法、有限元法等,其中电流丝法原理简单、易于编程,得到广泛应用^[5-7]。本文将采用这种方法建立单级 SICEML 动态发射模型。

电流丝法是一种等效电路的方法。在 SICEML 发射过程中,电枢(圆筒型)内的感应电流沿轴向的分布是不均匀的,如果将电枢沿轴向均分为 m 片,相当于 m 片“电流丝”。当 m 足够大时,每片电枢截面足够小,此时可以认为该截面感应电流分布均匀,每个电枢分片可作为一个独立的小电枢,结合电路方程和运动方程即可对系统进行求解。

1.1 电路方程

图 2 所示为单级 SICEML 电流丝等效电路模型。左侧为放电回路,脉冲电容器中先储存一定能量,触发

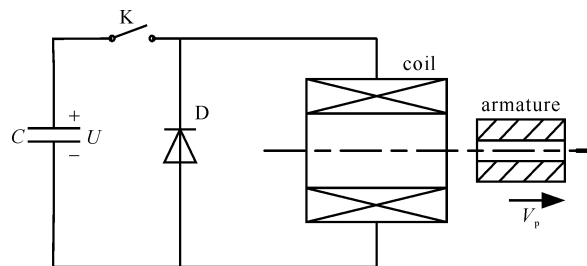


Fig. 1 Schematic diagram of single synchronous induction coil electromagnetic launcher (SICEML)

图 1 单级 SICEML 结构原理图

* 收稿日期:2014-06-23; 修订日期:2014-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51207162)

作者简介:郭 赞(1990—),男,硕士,从事电磁发射技术研究; guoyun1990@126.com。

信号下达后闭合开关 K 向驱动线圈放电。其中, C 为储能电容器, U 为电容器电压(初始值为 U_0), R_a 和 L_a 分别为电容器内阻和内感, L_d 为回路电感, R_d 为回路电阻, R_c 和 L_c 分别为驱动线圈等效电阻和电感。D 为续流二极管, 当电容电压放电至 0 时导通, 可防止电容反向充电, 延长使用寿命。右侧为电枢分片回路, R_{pj} 和 L_{pj} 分别为第 j 片电流丝分片的等效电阻和电感。驱动线圈和电枢分片之间、电枢分片与电枢分片之间相互耦合, 互感分别为 M_{cp1j} 和 M_{ppij} ($i, j=1, 2, \dots, m$)。

根据基尔霍夫电压定律, 可得驱动线圈回路方程。

二极管 D 导通前 ($U \geq 0$)

$$U = (R_a + R_d + R_c)I_c + (L_a + L_d + L_c) \frac{dI_c}{dt} + \sum_{j=1}^m \frac{d}{dt} (M_{cp1j} I_{pj})$$

$$U = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt \quad (1)$$

二极管 D 导通后, 线圈回路方程变为

$$0 = (R_d + R_c)I_c + (L_d + L_c) \frac{dI_c}{dt} + \sum_{j=1}^m \frac{d}{dt} (M_{cp1j} I_{pj}) \quad (2)$$

第 j 片电枢分片回路方程为

$$0 = R_{pj} I_{pj} + L_{pj} \frac{dI_{pj}}{dt} + \frac{d}{dt} (M_{cp1j} I_c) + \sum_{i=1, i \neq j}^m \frac{d}{dt} (M_{ppij} I_{pi}) \quad (3)$$

由于电枢分片间距不变, 所以它们之间的互感梯度为零, 将式(1)~(3)微分项展开得

$$\frac{d}{dt} (M_{cp1j} I_{pj}) = \frac{dM_{cp1j}}{dz} \frac{dz}{dt} I_{pj} + M_{cp1j} \frac{dI_{pj}}{dt} = v_p I_{pj} \frac{dM_{cp1j}}{dz} + M_{cp1j} \frac{dI_{pj}}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} (M_{pp1j} I_{pi}) = \frac{dM_{pp1j}}{dz} \frac{dz}{dt} I_{pi} + M_{pp1j} \frac{dI_{pi}}{dt} = M_{pp1j} \frac{dI_{pi}}{dt} \quad (5)$$

由式(1)~(5)可将电路方程写成矩阵形式

$$U = RI + LI + v \frac{dM}{dz} I + MI \quad (6)$$

式中:

$$U = \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}; \quad I = \begin{bmatrix} I_c \\ I_{p1} \\ \vdots \\ I_{pm} \end{bmatrix}; \quad \dot{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_c \\ \dot{I}_{p1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{pm} \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} R_{11} & & & \\ & R_{p1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_{pm} \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} L_{11} & & & \\ & L_{p1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & L_{pm} \end{bmatrix};$$

二极管导通前: $R_{11} = R_a + R_d + R_c$, $L_{11} = L_a + L_d + L_c$; 二极管导通后: $R_{11} = R_d + R_c$, $L_{11} = L_d + L_c$;

$$M = \begin{bmatrix} 0 & M_{cp11} & M_{cp12} & \cdots & M_{cp1m} \\ M_{cp11} & 0 & M_{pp12} & \cdots & M_{pp1m} \\ M_{cp12} & M_{pp12} & 0 & \cdots & M_{pp2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{cp1m} & M_{pp1m} & M_{pp2m} & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \quad \frac{dM}{dz} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{dM_{cp11}}{dz} & \frac{dM_{cp12}}{dz} & \cdots & \frac{dM_{cp1m}}{dz} \\ \frac{dM_{cp11}}{dz} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{dM_{cp12}}{dz} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dM_{cp1m}}{dz} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}。$$

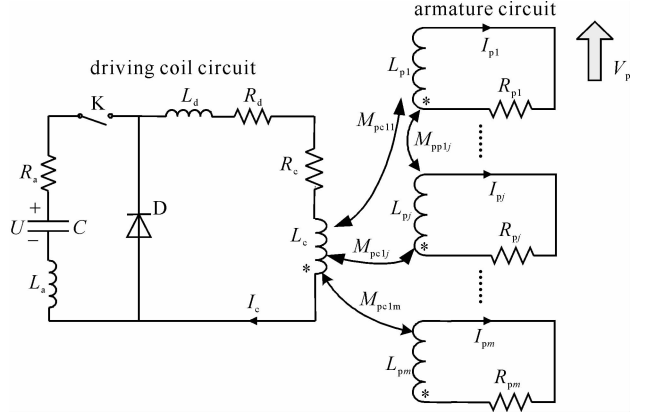


Fig. 2 Equivalent circuit of current filament method

图 2 电流丝等效电路模型

1.2 电磁推力与运动方程

电枢轴向(z 轴)电磁推力

$$F(t) = \sum_{j=1}^m \left(\frac{dM_{cp1j}}{dz} I_c I_{pj} \right) \quad (7)$$

根据牛顿第二定律可得电枢加速度为

$$a(t) = \frac{F(t)}{m_a} = \frac{1}{m_a} \sum_{j=1}^m \left(\frac{dM_{cp1j}}{dz} I_c I_{pj} \right) \quad (8)$$

式中: m_a 为电枢质量。

电枢速度

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(t) dt = v_0 + \int_0^t \frac{1}{m_a} \sum_{j=1}^m \left(\frac{dM_{cp1j}}{dz} I_c I_{pj} \right) dt \quad (9)$$

电枢位移

$$z(t) = z_0 + \int_0^t v(t) dt \quad (10)$$

联立方程(1)~(10)即构成电流丝法数学模型,结合数值计算的方法,利用 Matlab 编程即可实现单级 SICEML 动态发射过程仿真,具体求解流程如图 3 所示。通过电流丝法计算可以得到 SICEML 的动态性能,但达不到系统优化设计目的。

2 遗传算法参数优化

2.1 理论模型

遗传算法是一种基于生物学进化理论中的自然选择法则的优化算法,基本思想是从一个初始群体开始,每次迭代通过选择、交叉、变异等遗传操作,生成新一代目标函数适应度较高的种群,重复这个过程直到“进化”产生最优解^[8-9]。其基本流程如图 4 所示。

遗传算法不同于传统的单一变量的优化算法,能够对全局变量进行搜索寻优,从而有效避免陷入局部最优。同时,遗传算法简单易行,适用范围广泛,不仅能快速解决线性约束问题,而且对不连续、不可微分、随机性高等非线性问题也能可靠地解决。

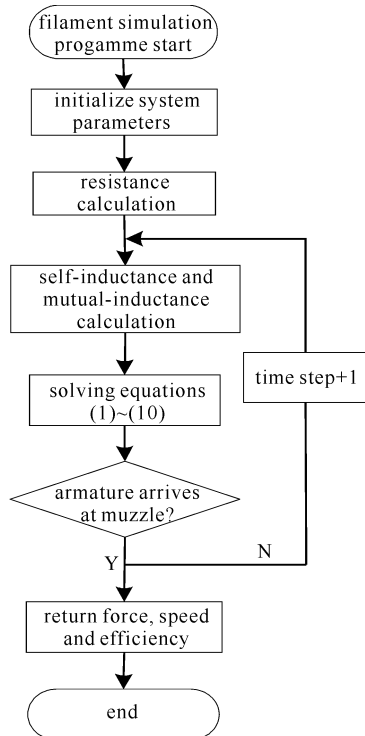


Fig. 3 Flowchart of current filament method

图 3 电流丝法仿真流程图

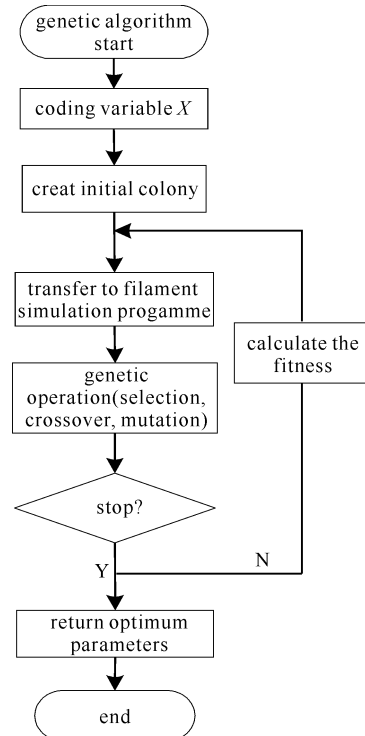


Fig. 4 Flowchart of optimization based on genetic algorithm

图 4 基于遗传算法优化流程图

2.2 单级 SICEML 优化模型

单级 SICEML 的设计变量很多,而且某些变量如线圈匝数等又有一定的离散要求,因此单级 SICEML 的优化设计是一个有约束、非线性的优化问题。单级 SICEML 最关键的性能指标是电枢的出口速度 v_p 和能量转换效率 η ,其中能量转换效率为电枢(包括载荷)出口动能与电容初始储能之比,即

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} m_a v_p^2}{\frac{1}{2} C U^2} \quad (11)$$

由式(11)可知,在电容储能与电枢质量不变的情况下,能量转换效率是速度的单调函数,二者的变化趋势是一致的。为同时体现二者变化程度可将它们的乘积作为目标函数,即

$$\max f(X) = v_p \eta \quad (12)$$

影响目标函数的参数有很多,在放电回路参数一定的情况下,选取驱动线圈轴向长度 z_c 和内外半径(R_1 , R_2),电枢轴向长度 z_p 和内外半径(r_1 , r_2),驱动线圈匝数 N 以及电枢初始触发位置 z_0 作为优化设计变量,如图 5 所示,即

$$X = X(z_c, R_1, R_2, z_p, r_1, r_2, N, z_0) \quad (13)$$

根据系统结构参数特点,基本约束条件可设置如下

$$\begin{cases} R_{\min} \leq R_2 - R_1 \leq R_{\max} \\ r_{\min} \leq r_2 - r_1 \leq r_{\max} \\ g_{\min} \leq R_1 - r_2 \leq g_{\max} \\ N \in N^+ (\text{正整数}) \end{cases} \quad (14)$$

其中,下标 min 和 max 分别表示约束的最小值和最大值。联立方程(11)~(14)即构成单级 SICEML 优化数学模型。

2.3 优化结果

根据单级 SICEML 优化数学模型,利用 Matlab 编程即可实现系统遗传算法优化设计。每次迭代过程中,系统性能参数的计算通过调用文中第 1 部分所述电流丝仿真模型来实现(图 3)。

表 1 为给定 SICEML 系统优化前后的参数对比表,优化前后系统储能不变,脉冲电容器电容量为 1 mF,初始电压为 4 kV,发射物体(包括电枢和载荷)质量保持 0.6 kg,初速度为 0。

表 1 优化前后单级 SICEML 结构参数值

Table 1 Structural parameters of a single SICEML before and after optimization

	R_2/mm	R_1/mm	z_c/mm	N	r_2/mm	r_1/mm	z_p/mm	mass/ kg	z_0/mm	$v_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta/\%$	$\max f(X) = v_p \eta$
	coil				armature					results		
before												
optimization	50	32	40	40	30	20	40	0.6	20	38	5.38	2.04
after												
optimization	50	37	52	66	36	23	50	0.6	21	61	13.6	8.30

由表 1 可以看出,优化后,驱动线圈和电枢的长度均增加,驱动线圈厚度减小、匝数增加,电流密度增大。优化后发射物体出口速度由 38 m/s 提高到 61 m/s,系统效率由 5.38% 提高到 13.6%,目标函数由 2.04 提高到 8.30,系统性能得到显著改善。图 6 为优化前后单级 SICEML 电磁推力和速度仿真曲线。

由优化前后仿真曲线可以发现,优化后电枢电磁推力峰值提高了约 20 kN。根据式(7)可知,电枢电磁推力等于互感梯度、线圈电流和电枢感应电流之积,而电枢感应电流正比于线圈与电枢间的互感^[10]。因此,线圈与电枢间的互感和互感梯度对电磁推力有直接的影响。为此,本文仿真了优化前后线圈与电枢分片间的互感与互感梯度随电枢位移的变化曲线,如图 7 所示,其中横坐标为电枢分片与线圈中心间距。可见,优化后的结构参数使线圈与电枢间的互感和互感梯度显著提高,从而改善了系统性能。

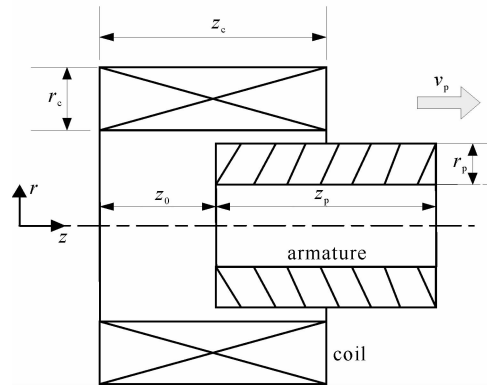


Fig. 5 Sketch of the launcher

图 5 发射装置结构剖面图

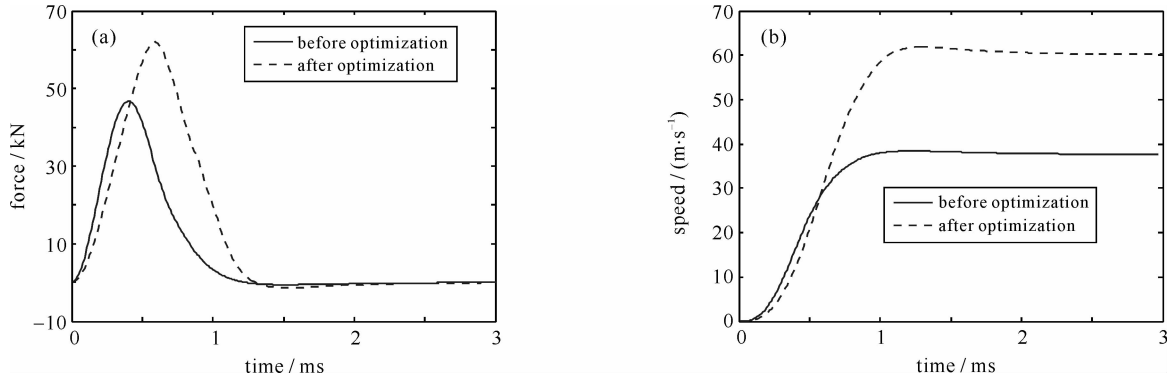


Fig. 6 Simulation curves of single SICEML before and after optimization

图 6 优化前后单级 SICEML 仿真曲线

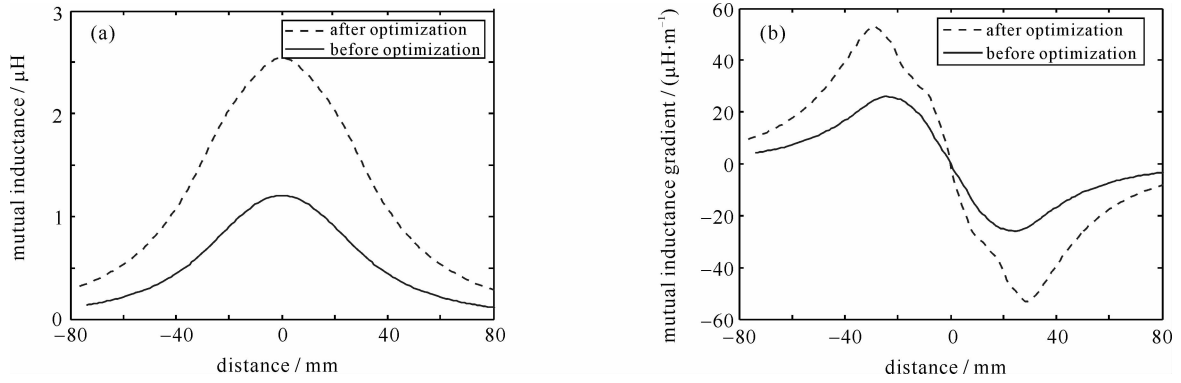


Fig. 7 Comparison curves of mutual inductance and mutual inductance gradient before and after optimization

图 7 优化前后互感、互感梯度对比曲线

3 有限元仿真及试验验证

3.1 有限元仿真验证

电流丝法动态仿真模型的建立有赖于线圈与电枢之间的互感和互感梯度的计算,而这两个参数均与电枢位移有关(图 7),因此发射过程中需反复计算这两个参数。如果精度要求较高,需要将电枢沿轴向剖分的片数 m 增多,这将加大方程系数矩阵和运算量。此外,利用数值分析的方法不能充分考虑线圈和电枢的形状、材料等因素的影响,因此仿真结果还需进一步验证。

有限元仿真软件 Ansoft Maxwell 具有强大的电磁场计算功能,同时能够充分考虑物体形状、材料等因素的影响,因此可利用 Ansoft 建立单级 SICEML 有限元模型,仿真系统动态发射过程^[11],对遗传算法优化的结果进行仿真验证。根据表 1 中优化后的参数值建立二维有限元模型,仿真过程忽略空气阻力、摩擦等因素的影响,驱动线圈激励由外电路施加。

图 8 为放电过程中电容器电压和放电电流曲线对比。在 Ansoft 有限元仿真与 Matlab 电流丝法仿真曲线中,电容器电压分别在 0.78 ms 和 0.83 ms 时放电完毕,二极管导通;放电回路电流(驱动线圈)分别在 0.53 ms 和 0.58 ms 时达到峰值,峰值电流分别为 6.76 kA 和 6.49 kA,峰值电流误差为 3.99%,两种仿真结果基本吻合。

图 9 为单级 SICEML 优化后电磁推力、速度和位移等运动特性仿真曲线对比。图 9(a)为电磁推力仿真曲线,其中 Ansoft 有限元仿真结果:电磁推力在 0.55 ms 时达到峰值 61.6 kN,在 1.14 ms 时开始反向,这也是速度曲线在达到峰值后有所下降的原因(图 9(b)); Matlab 电流丝法仿真结果:电磁推力在 0.59 ms 时达到峰值 62.0 kN,在 1.3 ms 时开始反向。两种仿真情形下电磁推力峰值相对误差 0.65%,吻合较好。速度对比曲线如图 9(c)所示,Ansoft 仿真结果:速度在 1.125 ms 时达到峰值 60.48 m/s; Matlab 仿真结果:速度在 1.28 ms 时达到峰值 61 m/s。两种仿真情形下速度峰值误差 0.85%,仿真结果基本一致。

从以上仿真结果对比中可以看出,有限元仿真结果与 Matlab 编程仿真结果基本吻合。由于优化后的发射

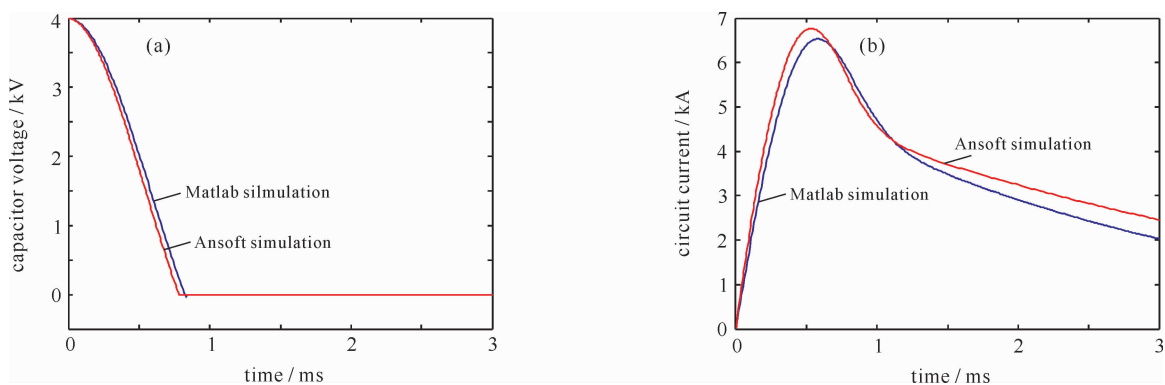


Fig. 8 Comparison curves of capacitor voltage and circuit current

图 8 电容器电压、回路电流仿真对比曲线

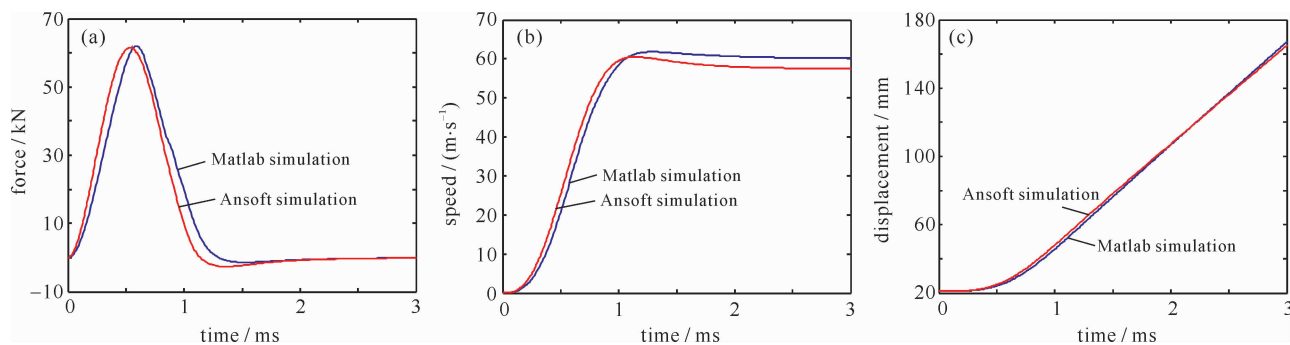


Fig. 9 Comparison curves of force, speed and displacement

图 9 力、速度和位移仿真对比曲线

线圈结构与文献[4]基本一致(本结构考虑了工程实现性),受试验条件限制,直接利用文献[4]的动态试验结果对本文的优化结果进行间接验证。该试验测量的平均能量转化效率为 11.90%,速度为 56.27 m/s,分别低于本文的优化结果 13.6%和 61 m/s,验证了本算法优化设计的有效性。

3.2 有限元试验验证

为了验证有限元仿真模型的正确性,从而间接验证优化算法,本文利用实验室已有的单级 SICEML 样机进行了堵转状态下的测力试验,试验平台如图 10 所示。通过 500 kJ 脉冲电容器储能装置给线圈通电,供电电压 4 kV,利用石英测力传感器测量电枢峰值出力。

图 11 对脉冲电流、电磁力的试验值与有限元仿真值进行了对比。在二维场路耦合模型和电压源激励下,峰值电流、电磁力的实验值与仿真值基本吻合,其中峰值电流误差 0.32%;峰值推力误差 3.8%,验证了有限元仿真模型的正确性。

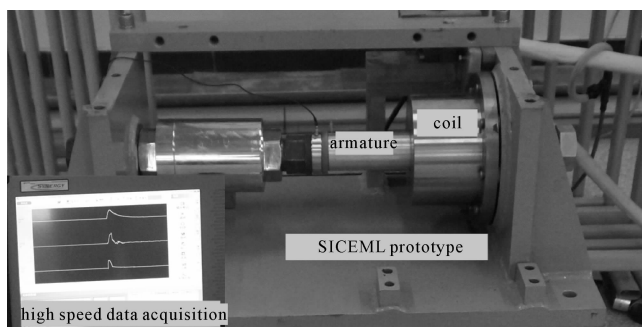


Fig. 10 Test platform of the single SICEML prototype

图 10 单级 SICEML 样机试验平台

4 结 论

本文基于电流丝法建立了单级 SICEML 动态发射模型,并引入了遗传算法对单级 SICEML 的结构参数进行了优化设计。在电源释放能量和驱动线圈外半径相同的情况下,系统效率由 5.38% 提高到 13.6%,出口速度由 38 m/s 提高到 61 m/s,系统性能得到显著改善。利用 Ansoft 软件建立了优化后的单级 SICEML 有限元模型,仿真结果与 Matlab 仿真结果吻合较好,优于相似装置的动态实验结果。最后利用实验室已有的单级 SICEML 样机进行了堵转试验,试验结果与有限元仿真结果误差较小,验证了遗传算法和有限元仿真模型的正确性,对后续试验和工程设计具有一定的指导意义。

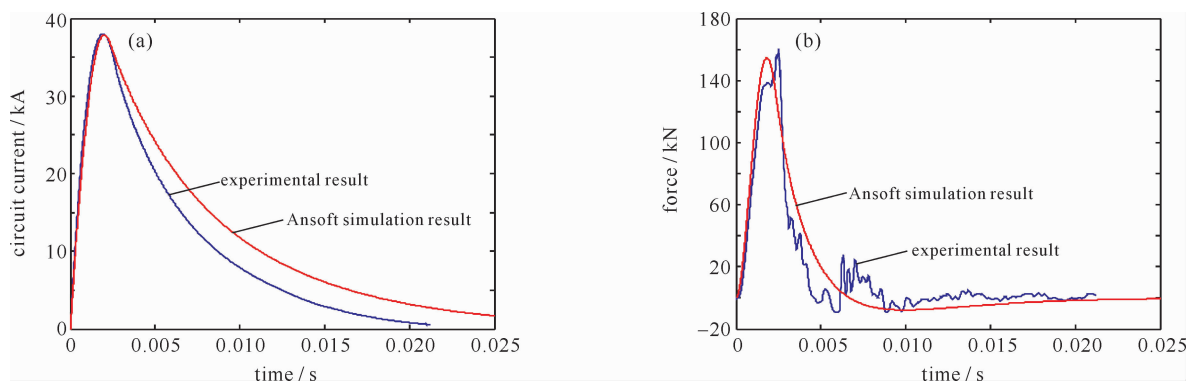


Fig. 11 Comparison curves of circuit current and force

图 11 电容电压 4 kV 时回路电流、力对比曲线

参考文献：

- [1] Fair H D. Progress in electromagnetic launch science and technology[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2007, **42**(1):93-98.
- [2] Kim S W, Jung H K, Hahn S Y. Optimal design of multistage coilgun[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1996, **32**(2):505-508.
- [3] Hainsworth G, Rodger D. Design optimization of coilguns[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1995, **31**(1):473-477.
- [4] 刘文彪, 曹延杰, 张媛, 等. 基于蚁群算法的同步感应线圈炮结构参数优化[J]. 兵工学报, 2011, **32**(11):1416-1422. (Liu Wenbiao, Cao Yanjie, Zhang Yuan, et al. Structural parameter optimization of synchronous induction coil gun based on ant colony algorithm. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(11):1416-1422)
- [5] Liu Shoubao, Ruan Jiangjun, Peng Ying, et al. Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coil gun[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2011, **39**(1):382-389.
- [6] Marder B. SLINGSHOT—a coilgun design code[R]. SAND 2001-1780, 2001.
- [7] Widner M M. WARP-10: A numerical simulation model for the cylindrical reconnection launcher[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1991, **27**(1):634-638.
- [8] 王飞朝. 遗传算法编程分析[J]. 火控雷达技术, 2005, **34**(2):63-66. (Wang Feichao. Programming analysis of genetic algorithm. *Fire Control Radar Technology*, 2005, **34**(2):63-66)
- [9] Zhang J, Chung H, Lo W L. Clustering-based adaptive crossover and mutation probabilities for genetic algorithm[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2007, **11**(3):326-335.
- [10] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995:129-130. (Wang Ying, Xiao Feng. Principle of Electric Gun. Beijing: National Defense Industry Press, 1995:129-130)
- [11] 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. (Zhao Keyi, Li Zhiyuan, Cheng Shukang. Dynamic simulation of working process of the single-stage induction coil-gun. *High Voltage Engineering*, 2008, **34**(8):1667-1671)

Design optimization of synchronous induction coil electromagnetic launcher based on genetic algorithm

Guo Yun, Lu Junyong, Guan Xiaocun, Zhang Xiao, Tan Sai

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,

Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Muzzle velocity and system efficiency are two of the most important characteristics for synchronous induction coil electromagnetic launchers (SICEMs), which could be affected by the structural parameters of the driving coil and the armature, the number of coil turns, and the initial position of the armature. To obtain the optimal parameters, genetic algorithm was introduced into the design process of a single stage SICEM in this paper. The optimization was derived based on the performance index defined as the product of the muzzle velocity and the system efficiency and the results were validated through the simulation by the finite element software Ansoft. The research results show that the system performance has improved effectively under the same storage power supply and total volume of the launcher: the system efficiency was increased from 5.38% to 13.6% and the muzzle velocity was increased from 38 m/s to 61 m/s. A single SICEM prototype was tested in blocked state and the test results show a good agreement with the simulation.

Key words: muzzle velocity; system efficiency; synchronous induction coil electromagnetic launchers; genetic algorithm; finite element

PACS: 41.75.Lx; 84.30.Sk; 02.60.Dc; 07.05.Kf