

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0040

基于均匀设计试验法的电磁线圈发射关键参数优化

杨保成*, 韩俊峰

(四川工程技术大学, 德阳 618000)

摘 要: 电磁线圈发射的出口速度及发射效率会受到发射系统结构参数和电路参数等关键参数的影响。为获得更高的出口速度和发射效率, 根据电路原理和动力学原理建立电磁线圈垂直发射模型, 并利用有限元仿真软件 Ansoft Maxwell 进行动态仿真。利用均匀设计试验法安排数次试验, 研究了5级线圈发射系统的触发位置等关键参数对发射效率的影响。对仿真结果进行逐步回归分析, 提出利用模拟退火算法对触发位置进行优化的方法, 得到最佳触发控制策略。对所得触发位置进行仿真, 发射效率达到56.27%, 验证了所提优化方法的有效性, 为高质量发射技术的优化提供参考。

关 键 词: 电磁感应线圈发射; Maxwell 仿真; 参数优化; 均匀设计试验法; 模拟退火算法

中图分类号: TJ339

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)02-0440-06

电磁发射技术是继传统火炮发射之后出现的一种新概念发射技术, 具有隐蔽性好等优点^[1]。线圈式电磁发射装置是电磁发射的早期形式^[2], 可广泛应用于防空反导、远程压制、近程主动防护等, 也可用于弹射火箭类负载^[3]。

目前, 已有许多文献采用人工智能算法对电磁线圈发射系统进行优化, 文献[4-5]采用蚁群算法对同步感应线圈炮的结构参数进行了优化设计, 提高了系统能量转换效率, 文献[6]采用遗传算法对单级感应线圈发射装置的结构参数进行优化, 系统性能得到了显著改善, 文献[7]利用多目标粒子群算法和第2代非支配排序遗传算法对模型进行优化, 在实现弹丸平稳加速的同时实现了能量传递效率最大化, 文献[8]采用鸡群优化算法优化5级线圈炮的结构参数, 出口速度得到了显著提升。

对于多级同步感应线圈炮, 提高发射性能需要各参数间进行合理配合。文献[9]对多级同步感应线圈炮提出了感应线圈炮的最优发射控制策略, 并给出了多级感应线圈炮的触发表达式。文献[10]

对不同弹丸初始速度下的驱动线圈最佳触发位置进行了仿真, 但随着级数的增多, 工作将变得非常繁琐。文献[11]研究了触发位置与初速对发射性能的影响, 这2个因素对性能影响较大, 且二者之间具有一定的相关性。

但随着发射级数的增加, 所需要优化的参数骤增, 仍对发射系统采取单因素分析的方法, 不仅计算过程耗时耗力, 而且无法全面考虑各参数间的影响。为将繁琐的工作简单化, 文献[12]提出了试验设计方法, 可以通过对部分试验结果进行分析来掌握几乎全部试验的情况。为提高发射初速及效率, 本文首先对电磁线圈发射系统进行建模, 并考虑了垂直发射中的重力影响, 使用有限元分析软件 Ansoft Maxwell 对电磁线圈发射过程进行仿真; 然后, 基于均匀试验设计法对5级同步感应线圈发射装置进行优化分析, 选择了5级发射系统的5个驱动线圈触发位置建立起均匀设计表, 并分别仿真得到了各次试验的发射结果; 最后, 基于试验数据利用逐步回归分析法和模拟退火算法研究了各触发

收稿日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-07-07; 网络出版时间: 2023-07-24 17:25

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230724.1628.001

*通信作者. E-mail: bch@scetc.edu.cn

引用格式: 杨保成, 韩俊峰. 基于均匀设计试验法的电磁线圈发射关键参数优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(2): 440-445.

YANG B C, HAN J F. Optimization of key parameters of electromagnetic coil launching based on uniform design experimentation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(2): 440-445 (in Chinese).

位置对发射性能的影响, 得到了最佳的触发位置。

1 电磁线圈发射模型

电磁线圈发射系统结构如图 1 所示, 固定若干驱动线圈, 弹丸放置于第 1 级驱动线圈中心偏出口方向处, 接着导通第 1 级驱动电路使线圈通电, 产生一个变化磁场并在弹丸内部感应出电流, 这 2 种电流方向相反使得 2 个线圈之间产生一个排斥力, 驱动线圈受到的推力向尾端, 弹丸受到的推力向出口端, 但由于驱动线圈被固定而保持静止, 弹丸被加速而向出口运动。同理弹丸依次受到向出口的排斥力而被继续加速, 直至弹丸被多级驱动线圈不断加速直至飞离出口。

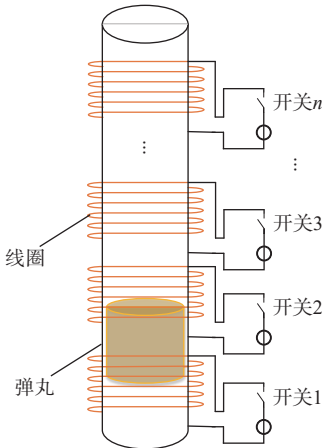


图 1 线圈发射系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of coil transmitting system

本文利用 Ansoft Maxwell 软件的瞬时分析模块对同步感应线圈发生器进行计算, 得到发射过程中各参数随时间的变化特性曲线及电磁场分布规律^[13]。本文针对 5 级线圈发射系统的触发位置进行优化, 驱动线圈设计成细长形状^[14], 发射系统结构参数如表 1 所示^[15-16], 长 1 m 的电磁线圈发射器在 100 ms 内将 350 kg 的组件垂直发射速度可达 21.5 m/s。本文线圈均采用相同导线进行绕制, 并

表 1 发射系统结构参数^[15-16]

Table 1 Launch system structure parameters^[15-16]

参数	数值	参数	数值
驱动线圈内径/mm	830	电容值/mF	8
驱动线圈长度/mm	180	充电电压/kV	4.7
驱动线圈匝数	230	电容器电阻/mΩ	0.5
驱动线圈厚度/mm	100	电容器电感/μH	0.2
级间距/mm	20	回路电阻/mΩ	5
弹丸外径/mm	810	回路电感/μH	0.4
弹丸长度/mm	180	续流二极管电阻/mΩ	1
弹丸厚度/mm	80	续流二极管电感/μH	1
弹丸质量/kg	350		

采用固定尺寸的铝筒作为弹丸, 从静止开始加速。

利用 Ansoft Maxwell 软件瞬态求解器对基于表 1 参数的发射系统采用柱坐标建模, 模型如图 2 所示。每一级线圈驱动电路的脉冲电容器都采用相同的电压和容量, 单级线圈驱动电路如图 3 所示。考虑到重力因素, 在 Ansoft Maxwell 中勾选 Consider Mechanical Translation, 设定弹丸的负载力为-3 500 N 作为垂直发射过程中弹丸所受重力作用。

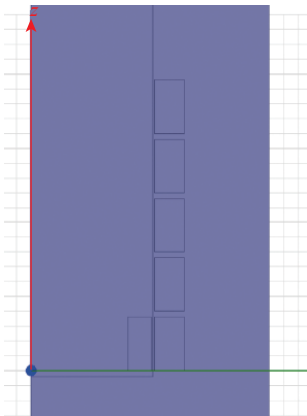


图 2 Ansoft Maxwell 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Ansoft Maxwell model

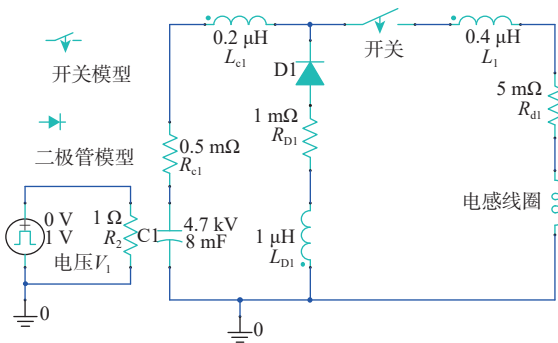


图 3 单级线圈驱动电路图

Fig. 3 Drive circuit diagram of single-stage coil

2 均匀设计试验法

均匀设计试验法在多因素、多水平试验设计中具有显著优点, 并被广泛应用^[12]。均匀设计表不用将因素的所有组合进行试验, 通过找到具有最佳试验结果的水平组合, 分析试验结果对整体试验进行掌握, 能够很好地简化试验分析过程^[17]。其设计步骤为: ①确定试验指标, 根据实际需求选择试验设计过程中可调整的变量(即因素数), 和各试验因素所处的具体状态(水平数); ②根据因素数和水平数来选择均匀设计表, 并进行重新排布; ③完成试验操作, 对试验结果进行分析处理。本文中因素指线圈发射系统的各设计参数, 水平指各设计参数所选定的几种数值。

2.1 因素数与水平数的选择

本文设计的 5 级同步感应线圈垂直发射系统具有 5 个独立电源,每一级驱动线圈都有一个最佳的触发位置。本文将第 1 级驱动线圈触发位置记为 x_1 ,第 2 级~第 5 级驱动线圈延迟于第 1 级的位置量记为 $x_2 \sim x_5$ 。这 5 个因素用于均匀试验研究。本文所述的触发位置均指弹丸线圈的中心位置。

针对本文研究的 5 级发射系统,考虑到 3.2 节所选回归方程含有 11 个系数,当水平数不小于 11 时的各 5 因素均匀设计表的偏差如表 2 所示^[18]。本文选择偏差较小的 17 个水平数的设计。

表 2 5 因素各水平数下均匀设计表的偏差^[18]
Table 2 Deviation of uniform design table under each level of five factors^[18]

水平数	偏差	水平数	偏差
11	0.428 6	15	0.007 2
12	0.227 2	16	0.207 0
13	0.381 4	17	0
14	0		

考虑到偏差最小,且水平数越多结果分析越精确,故本文选择 17 水平数下 5 因素的均匀设计表。在发射过程中,弹丸线圈的各级触发位置理论上应在弹丸到达各级驱动线圈中心线之后,因此, x_1 的范围为 95~290 mm, x_2 的范围为 0~90 mm; x_3 的范围为 0~200 mm; 同理, x_4 的范围为 0~200 mm, x_5 的范围为 0~200 mm。根据各因素水平数的取值范围,进行 17 等分得到各因素的水平数表如表 3 所示。

表 3 均匀设计试验因素水平
Table 3 Factor level table for uniform design experimentation

水平数	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /mm	x_5 /mm
1	95	0	0	0	0
2	102.5	5.5	12.5	12.5	12.5
3	115	11.25	25	25	25
4	127.5	16.75	37.35	37.5	37.5
5	140	22.5	50	50	50
6	152.5	28	62.5	62.5	62.5
7	165	33.75	75	75	75
8	177.5	39.25	87.5	87.5	87.5
9	190	45	100	100	100
10	202.5	50.5	112.5	112.5	112.5
11	215	56.25	125	125	125
12	227.5	61.75	137.5	137.5	137.5
13	240	67.5	150	150	150
14	252.5	73	162.5	162.5	162.5
15	265	78.75	175	175	175
16	277.5	84.25	187.5	187.5	187.5
17	290	90	200	200	200

2.2 均匀设计试验表的确定

根据使用 17 水平数 5 因素的均匀设计表^[18],结合表 3 中各因素水平数,进行因素水平数据排布,得到均匀设计试验安排表如表 4 所示。

表 4 均匀设计试验安排
Table 4 Uniform design experiment schedule

试验编号	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /mm	x_5 /mm
1	95	16.5	112.5	162.5	175
2	102.5	39.25	25	125	150
3	115	61.75	150	87.5	125
4	127.5	84.25	62.5	50	100
5	140	11.25	187.5	12.5	75
6	152.5	33.75	100	187.5	50
7	165	56.25	12.5	150	25
8	177.5	78.75	137.5	112.5	0
9	190	5.5	50	75	187.5
10	202.5	28	175	37.5	162.5
11	215	50.5	87.5	0	137.5
12	227.5	73	0	175	112.5
13	240	0	125	137.5	87.5
14	252.5	22.5	37.5	100	62.5
15	265	45	162.5	62.5	37.5
16	277.5	67.5	75	25	12.5
17	290	90	200	200	200

为研究各因素对发射性能的影响情况,以弹丸线圈最大发射速度作为试验指标,利用 Ansoft Maxwell 软件分别对表 4 中的 17 组试验进行仿真计算,并基于仿真数据对结果进行分析。

3 试验仿真及结果分析

3.1 试验仿真

依据第 2 节中的仿真模型,设置充电电压为 4.7kV,弹丸质量为 350 kg,负载设置为弹丸所受重力为-3.5 kN,仿真步长设置为 0.5 ms^[19]。任意选择 5 级线圈触发位置分别为 110, 220, 420, 620, 820 mm,仿真得到电磁力和速度随时间变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,弹丸线圈的最大发射速度达到 24.10 m/s,发射效率为 23.01%。进一步根据表 4 的均匀设计表来安排试验并进行仿真计算,得到各次试验最大发射速度结果如表 5 所示。

为研究各因素与发射速度之间的相关关系,选择回归方程进行相关性分析。

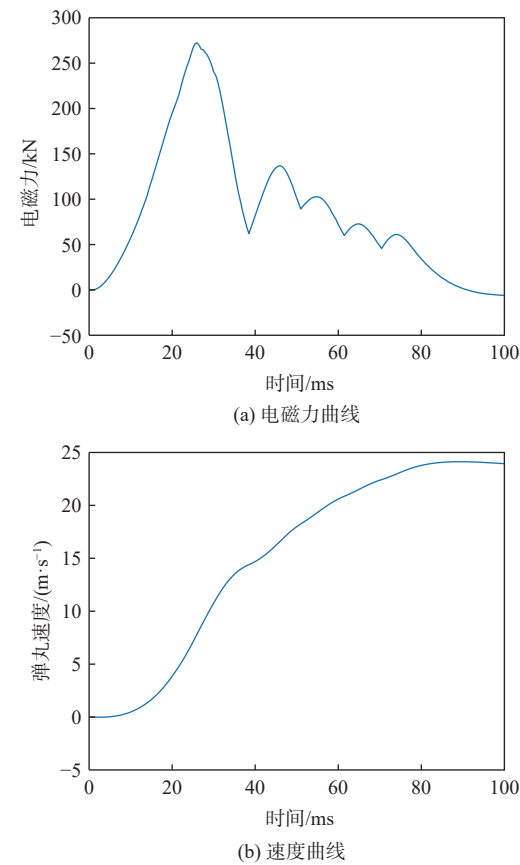


图 4 电磁力和速度曲线

Fig. 4 Curves of electromagnetic force and velocity

表 5 均匀设计试验结果

Table 5 Uniform design experiment results

试验 编号	最大发射 速度/(m·s ⁻¹)	试验 编号	最大发射 速度/(m·s ⁻¹)	试验 编号	最大发射 速度/(m·s ⁻¹)
1	3.52	7	36.51	13	34.61
2	9.94	8	33.82	14	36.20
3	36.6	9	36.33	15	31.86
4	36.3	10	34.86	16	31.93
5	36.63	11	34.97	17	22.10
6	37.19	12	35.66		

3.2 回归分析

回归分析可直接基于大量的试验数据进行数

学处理^[20]。为研究 $x_1 \sim x_5$ 对发射性能的影响, 本文采用逐步回归算法对仿真结果进行分析。考虑到因素之间的互相影响, 因此, 回归方程选择为

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_1^2 + b_7x_2^2 + b_8x_3^2 + b_9x_4^2 + b_{10}x_5^2 \quad (1)$$

式中: y 为最大发射速度; $b_0 \sim b_{10}$ 为回归系数。基于表 4 和表 5 的仿真数据编写回归分析程序, 得到回归方程中各回归系数如表 6 所示。

由此可得回归方程为

$$y = -46.602\,8 + 0.800\,1x_1 - 0.084\,5x_2 + 0.016\,3x_3 + 0.010\,7x_4 + 0.139\,2x_5 + 0.002\,0x_1^2 + 0.001\,9x_2^2 + 0.000\,1x_3^2 - 0.000\,2x_4^2 + 0.000\,9x_5^2 \quad (2)$$

3.3 参数优化

为使发射速度达到最大, 针对回归方程难以直接求解得到最佳触发位置。模拟退火算法通过跟踪当前迭代搜寻到的最优值来寻找全局最优, 具有较强的鲁棒性、隐含并行性及渐进收敛性, 在工程中得到了广泛应用^[21-22]。模拟退火算法的核心算法为: 以一定的概率接受新状态所产生的最优解, 以此来避免模型中的局部极值点, 从而继续计算得到全局最优解。

对于回归方程(2)中 5 个触发位置 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 的范围, 通过模拟退火原理进行迭代计算获得最优解, 得到优化后的参数为 $x_1 = 155\text{ mm}$, $x_2 = 30\text{ mm}$, $x_3 = 62\text{ mm}$, $x_4 = 65\text{ mm}$, $x_5 = 67\text{ mm}$, 将最优参数代入有限元模型中, 由此对应的各级驱动线圈触发位置如表 7 所示。

基于所得触发位置进行仿真, 可得仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 弹丸加速较为平稳, 没有较大波动。弹丸线圈最大发射速度达到 37.69 m/s, 发射效率为 56.27%, 远大于优化前 24.10 m/s 的发射速度, 达到了优化目的。

表 6 回归系数值

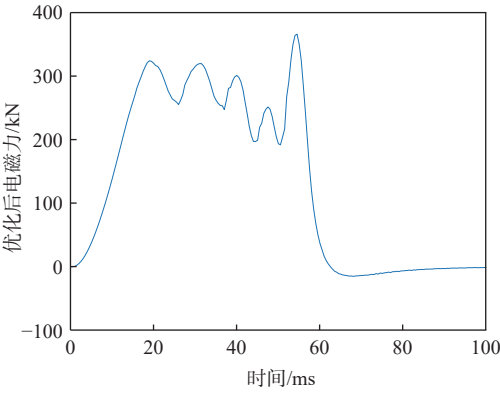
Table 6 Value of regression coefficients

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}
-46.602 8	0.800 1	-0.084 5	0.016 3	0.010 7	0.139 2	0.000 2	0.001 9	0.000 1	-0.002 0	0.000 9

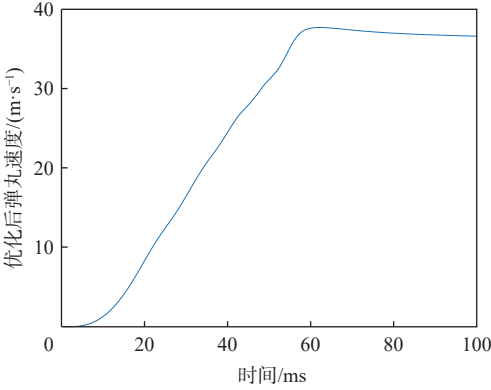
表 7 优化后的触发位置

Table 7 Optimized trigger positions

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
155	185	247	312	379



(a) 电磁力随时间变化曲线



(b) 优化后弹丸速度曲线

图 5 优化后的曲线

Fig. 5 Curves after optimization

4 结 论

1) 本文对 5 级发射器的触发位置进行优化, 提高了多级电磁线圈发射的出口速度和发射效率。对文中参数其弹丸最大发射速度可达 37.69 m/s, 发射效率可达 56.27%, 优化效果显著。

2) 本文考虑了重力因素, 利用 Ansoft Maxwell 模拟了 5 级同步感应线圈垂直发射过程, 为线圈炮的垂直发射器设计提供了理论指导。

3) 本文基于均匀设计试验方法, 使用较少的试验次数分析研究了 5 级线圈垂直发射系统的线圈触发位置对发射性能的影响, 并利用模拟退火算法对其进行了优化, 为将来大质量发射技术的优化提供了参考。

参考文献 (References)

[1] 王莹, 肖峰. 电炮原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 96-97.
WANG Y, XIAO F. Principle of electric gun[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992: 96-97(in Chinese).

[2] 马伟明, 肖飞, 聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 1-10.
MA W M, XIAO F, NIE S X. Applications and development of power electronics in electromagnetic launch system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 1-10(in

Chinese).

[3] 张涛, 国伟, 苏子舟, 等. 基于磁场方向变化的同步感应线圈发射器效率提升分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 517-524.
ZHANG T, GUO W, SU Z Z, et al. Efficiency improvement analysis of synchronous induction coil transmitter based on the change of magnetic field direction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 517-524(in Chinese).

[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 W B, CAO Y J, ZHANG Y, et al. Structural parameter optimization of synchronous induction coil gun based on ant colony algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(11): 1416-1422(in Chinese).

[5] LIU W B, CAO Y J, ZHANG Y, et al. Parameters optimization of synchronous induction coilgun based on ant colony algorithm[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 100-104.

[6] 郭赞, 鲁军勇, 关晓存, 等. 基于遗传算法的同步感应线圈发射装置参数优化[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 115008.
GUO Y, LU J Y, GUAN X C, et al. Design optimization of synchronous induction coil electromagnetic launcher based on genetic algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 115008(in Chinese).

[7] NIU X B, LIU K P, ZHANG Y D, et al. Multiobjective optimization of multistage synchronous induction coilgun based on NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1622-1628.

[8] NIU X B, LI W Q, FENG J Y. Nonparametric modeling and parameter optimization of multistage synchronous induction coilgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(7): 3246-3255.

[9] 关晓存, 鲁军勇. 多级感应线圈炮最优发射控制策略[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 055002.
GUAN X C, LU J Y. Optimum launch control strategy of multi-level induction coilgun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 055002(in Chinese).

[10] 向红军, 李治源, 袁建生. 考虑电枢速度的多级感应线圈炮最佳触发位置[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1): 7-11.
XIANG H J, LI Z Y, YUAN J S. Optimal trigger position of multi-stage inductive coilgun with armature velocity[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(1): 7-11(in Chinese).

[11] 李三群, 张朝伟, 邓启斌, 等. 多级同步感应线圈炮的动态特性仿真[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3065-3070.
LI S Q, ZHANG C W, DENG Q B, et al. Simulation of dynamic characteristic of multi-stage synchronous induction coilgun[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3065-3070(in Chinese).

[12] 徐琅, 李卫东, 王秀凤, 等. 预载荷下板料激光弯曲成形的工艺参数分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(6): 1149-1154.
XU L, LI W D, WANG X F, et al. Analysis on process parameters of laser bending of preloaded metal plate[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(6): 1149-1154(in Chinese).

[13] 王钊, 曹延杰, 王旻, 等. 三级电磁线圈垂直发射器工作过程仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 14-19.
WANG Z, CAO Y J, WANG M, et al. Simulation of working process of three-stage electromagnetic coil vertical launcher[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 14-19(in Chinese).

[14] 王振春, 谭颢, 刘福才. 电磁线圈发射器研究现状和发展 [C]//中

- 国自动化大会论文集. 上海: 中国自动化协会, 2020: 828- 833.
- WANG Z C, TAN Y, LIU F C. Research status and development of electromagnetic coil transmitter [C]//Proceedings of the China Automation Conference. Shanghai: China Association of Automation, 2020: 828- 833(in Chinese).
- [15] 王钊, 金洪波, 邹本贵, 等. 电磁线圈发射器垂直发射过程建模与仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(3): 272-276.
- WANG Z, JIN H B, ZOU B G, et al. Modeling and simulation of electromagnetic coil launcher for vertical launching process[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2013, 28(3): 272-276(in Chinese).
- [16] JIN Y S, KIM Y B, KIM J S, et al. A 4.8-MJ pulsed-power system for electromagnetic launcher experiment[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(10): 3369-3373.
- [17] 蔡智超, 李毅博. 基于 Halbach 阵列电磁超声纵波换能器优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4408-4417.
- CAI Z C, LI Y B. Optimum design of electromagnetic acoustic longitudinal wave transducer based on halbach array[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4408-4417(in Chinese).
- [18] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 35-46.
- FANG K T. Uniform design and uniform design table[M]. Beijing: Science Press, 1994 : 35-46(in Chinese).
- [19] YANG D, LIU Z X, SHU T, et al. An improved genetic algorithm for multiobjective optimization of helical coil electromagnetic launchers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(1): 127-133.
- [20] 朱庄生, 张萌. 面向 InSAR 的空气扰动影响机翼挠曲变形建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(1): 38-50.
- ZHU Z S, ZHANG M. Air disturbance affecting wing deflection deformation modeling for InSAR[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(1): 38-50(in Chinese).
- [21] 张长勇, 刘佳瑜. 基于混合遗传算法的多箱型集装箱装载问题分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 747-755.
- ZHANG C Y, LIU J Y. Multi-box container loading problem based on hybrid genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 747-755(in Chinese).
- [22] 郭庆, 惠晓滨, 张贾奎, 等. 多模函数优化的改进花朵授粉算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 828-840.
- GUO Q, HUI X B, ZHANG J K, et al. Improved flower pollination algorithm for multimodal function optimization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(4): 828-840(in Chinese).

Optimization of key parameters of electromagnetic coil launching based on uniform design experimentation

YANG Baocheng*, HAN Junfeng

(Sichuan Polytechnic University, Deyang 618000, China)

Abstract: An electromagnetic coil launcher's muzzle velocity and launch efficiency are determined by critical system characteristics like circuit and structural design. To obtain higher muzzle velocity and launch efficiency, this article establishes an electromagnetic coil vertical launch model according to the circuit principle and dynamics principle and uses the finite element simulation software Ansoft Maxwell for dynamic simulation of the proposed model. Several experiments are conducted using the uniform experimental design method to examine the influence of key parameters, such as the trigger positions of the five-stage coil launcher system, on the launch efficiency. The simulated annealing algorithm is used to propose a method of optimizing the trigger sites and produce the ideal trigger sequence after the simulation results are assessed using the stepwise regression approach. Finally, the simulation is carried out based on the trigger positions obtained by the simulated annealing, and the launch efficiency of 56.27% is achieved. This result verifies the effectiveness of the proposed optimization method and provides a valuable reference for the optimization of high-mass launch technology in the future.

Keywords: electromagnetic induction coil launcher; Maxwell simulation; parameters optimization; uniform design experimentation; simulated annealing algorithm