

# 动圈式永磁直线直流电机的精英保留多种群遗传优化算法\*

吴峻,王湘,宋蕾

(国防科技大学智能科学学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**为了实现陆基无人机电磁弹射器高机动性及其直线弹射电机的高功率密度,针对动圈式永磁直线直流电机,提出精英保留的多种群遗传算法(Multi-Population Genetic Algorithm with Elite Retention, MPGAER)的电机最大功率密度优化方法。以磁通密度和电流密度为约束条件,利用其搜索能力强、收敛速度快的特点优化电机的结构参数,并与磁路法初始设计结果和传统遗传算法优化结果进行比较。结果表明:与磁路法初始设计相比,MPGAER能使电机质量减少6.25%,功率密度提高10%,电机动态性能得到提高;MPGAER优化设计的电机功率密度高于遗传算法设计结果,所提方法有效地解决了在优化过程中出现易收敛于局部最优点和寻优效果差的问题。

**关键词:**无人机;电磁弹射器;动圈式永磁直线直流电机;多种群遗传算法;结构参数;功率密度

**中图分类号:**TM344.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)04-076-09

## Multi-population genetic optimization algorithm with elite retention for moving-armature permanent magnet linear direct current motor

WU Jun, WANG Xiang, SONG Lei

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to realize the high maneuverability of the electromagnetic catapult and the high power density of the linear catapult motor of the land-based unmanned aerial vehicle, a multi-population genetic algorithm with elite retention (MPGAER) was proposed to optimize the maximum power density of motor. It takes flux density and current density as constraints, and optimizes the structure parameters of the motor with its strong search ability and fast convergence speed, and compares with the initial scheme based on magnetic circuit method and the optimization results of traditional genetic algorithm. The results show that, compared with the initial scheme design, MPGAER can reduce the motor mass by 6.25%, increase the power density by 10%, and improve the dynamic performance of the motor; the motor power density of the MPGAER optimized design is higher than the genetic algorithm design result, which indicates that the proposed method effectively solves the problems of easy convergence to the local best advantage and poor optimization effect in the optimization process.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; electromagnetic catapult; moving coil permanent magnet linear direct current motor; multi-population genetic algorithm; structural parameters; power density

随着现代战争信息化、自动化程度的不断提高,无人机的作用越来越大,发射起飞作为固定翼无人机应用的首要环节,直接影响飞机的安全与使用。与气动液压弹射相比,电磁弹射装置简单、结构紧凑、维护简便、可靠性高、发射间隔短,是新发展的一种装备,而实际上是一种全程可控的直线电机系统<sup>[1-5]</sup>。其中,陆基无人机电磁弹射器一般采用车载或车拖方式,由直线弹射电机、控制与驱动系统、储能与能量管理系统、制动系统等部分组成,要求具有高机动性。以适于随时随地展开工作。直线弹射电机作为其中体积和质量最大的部分,直接影响到系统的机动性。为了提升机

动性,在满足功率容量要求的前提下,希望直线弹射电机质量和体积越小越好。因此,提高功率密度是直线弹射电机研究的一个重要方向。

目前,旋转电机高功率密度的有关研究主要集中在电动汽车和电动飞机等领域,研究文献较多<sup>[6-8]</sup>。由于直线电机应用推广比较晚,大功率直线弹射系统的应用研究则更晚,直线弹射电机的研究首先围绕推力密度的提高而展开<sup>[9]</sup>。有文献表明,直线电机推力密度最高可达到300~900 N/kg,但它的功率密度并不高<sup>[10]</sup>。在无人机电磁弹射需求的牵引下,直线电机高功率密度的研究工作需进一步加强,尤其对于空间和质量受

\* 收稿日期:2019-12-31

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200602-40)

作者简介:吴峻(1973—),男,江西玉山人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:wujun2008@nudt.edu.cn

限的移动平台来说,意义重大<sup>[11]</sup>。“十二五”国家科技支撑计划要求电动汽车驱动电机的功率密度达到 2.7 kW/kg 以上<sup>[7]</sup>;另外,参照无人机气动液压弹射系统,以 COBHAM 公司研制的双模式导弹弹射器 (Dual Mode Missile Eject Launcher, DMEL) 为例,它能将重 155 kg 的无人机加速至 8.9 m/s,弹射时间在 300 ms 以内,系统总质量约为 40 kg,系统的功率密度约为 1.02 kW/kg<sup>[12]</sup>。参考这些指标,本文所研究的直线弹射电机功率密度建议应至少达到 3.5 kW/kg。

电机功率密度的提高是一个多约束、多变量、多峰值、混合离散的复杂非线性优化过程。若采用传统的解析法、爬山法,寻优过程受初始解的制约太大,结果常收敛于初始解附近的局部最优解<sup>[13]</sup>。神经网络算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法等也存在着一定的局限性。其中,神经网络算法运算时需要大量的参数样本,学习时间过长,甚至可能达不到学习的目的;蚁群优化算法计算量大,求解所需时间较长,收敛速度慢,易陷入局部最优;粒子群优化算法易产生早熟收敛,尤其是针对复杂的多峰搜索问题,局部寻优能力较差<sup>[14]</sup>。

目前,以解析法为主的研究,虽然能有效地提高功率密度,但依赖模型的精确程度,只能定性分析最优解问题<sup>[15-17]</sup>。面对多约束、多变量、多峰值的电机功率密度提高优化问题,有大量的文献采用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA),通过遗传算法模拟生物进化过程,可避免复杂的数学推导,准确、高效地获得最优解。文献<sup>[18]</sup>针对弧形音圈电机实际结构,以永磁体尺寸和气隙长度为优化变量,采用遗传算法对弧形音圈电机进行优化设计,有效降低了电机体积,减小了机械时间常数。文献<sup>[19]</sup>提出通过优化初级冲片槽高、槽宽、初级轭高、次级圆钢厚度、导线直径、气隙长度、极对数、每槽导体数和极距 9 个变量,以电机性能、电磁参数、结构参数、成本为约束条件,基于遗传算法对圆筒型直线感应电机的力功比和力能进行优化设计。但这些传统遗传算法容易过早收敛,且无法全面地将优化问题的约束表示出来,所以,目前大量文献集中研究如何避免过早收敛,提高进化效率<sup>[20-21]</sup>。

近年来,许多学者提出并应用了多种群遗传算法,该算法能够保持种群的多样性,并且不同种群采用不同的进化机制,可避免出现过早收敛,又可实现多约束、多变量的非线性优化求解,全局搜索能力强、优化速度快,在动态变化的环境中具有

较强的适应能力,具有较好的优化效果。这些结果表明,基于解析模型的多种群遗传算法在解决旋转电机的结构参数优化设计问题时具有更好的效果<sup>[22-23]</sup>。当这些算法应用到永磁直线直流电机时,也具有明显优点,但仍存在早熟收敛、容易停滞在局部最优解的不足,还需进一步研究完善。因此,本文针对一种动圈式永磁直线电机的高功率密度设计,提出了一种精英保留的多种群遗传算法 (Multi-Population Genetic Algorithm with Elite Retention, MPGAER),通过仿真对比验证了方法的有效性。

## 1 动圈式永磁直线直流电机的功率密度

### 1.1 弹射指标

拟设计的电磁弹射器以“扫描鹰”无人侦察机及其气压弹射器为参照,所提技术指标见表 1。该无人机重 15 kg,最大起飞质量为 18 kg,最大巡航速度为 120 km/h,最大起飞速度为 100 km/h。

表 1 电磁弹射器技术指标

Tab. 1 Technical specifications of electromagnetic launcher

指标	要求
弹射无人机质量	≤20 kg
起飞速度	≤100 km/h
弹射加速距离	≥4.5 m
功率密度	≥2.7 kW/kg

因此,直线弹射电机的设计输入要求为:弹射飞机最大质量为 20 kg,弹射加速起飞最大速度为 100 km/h,加速距离至少为 4.5 m,功率密度至少为 2.7 kW/kg。

### 1.2 电机的功率计算

为了提升弹射器的机动性,大幅减少电机的质量,电机采用如图 1 所示的双边动圈式永磁直线直流电机形式,初级铁心与线圈为定子,推动飞机加速起飞,磁钢通过铝合金框架组合为弹射轨道。同时,在轨道两侧布设 3 条供电轨,对应电机三相线圈上装有受流刷,它们与供电轨之间接触移动受流供电。

电机初级铁心设计主要包括铁心的轭部高度、齿部宽度、齿部高度、槽口宽度等参数的设计,如图 2 所示。

基于磁路法初步设计直线弹射电机<sup>[24]</sup>,具体参数见表 2。其中,绕组材料为铜,铁心材料为 35W310,绕组分布方式为单边整距分布。

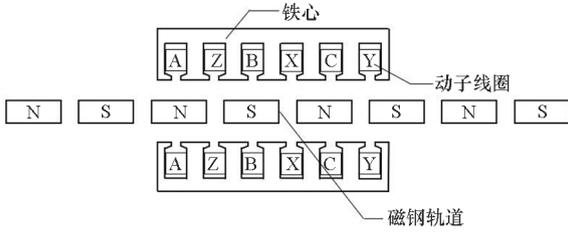


图 1 双边动圈式永磁直线直流电机示意图

Fig. 1 Sketch of bilateral moving-armature permanent magnet linear DC motor

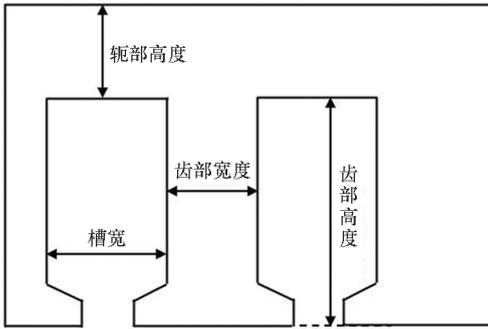


图 2 电机初级铁心主要参数

Fig. 2 Main parameters of motor primary core

表 2 直线弹射电机的参数

Tab. 2 Parameters of linear motor for launcher

参数	数值
单边气隙/mm	3.5
电机纵深宽度/mm	76
初级齿部宽度/mm	9
初级齿部高度/mm	22
初级槽宽/mm	11
初级轭部高度/mm	16
绕组电流密度/(A/mm <sup>2</sup> )	30
永磁体长度/mm	48
永磁体宽度/mm	10
单边铁心槽数	18
槽满率	0.9
极对数	3
额定电压/V	120
额定电流/A	1 750
质量/kg	42.23
功率密度/(kW/kg)	3.35
推力/kN	5.11

根据电机高功率密度的要求,选择钕铁硼永磁材料作为永磁体材料,其力学性能优良,可生产

加工成不同形状。本电机选择牌号为 48H 的钕铁硼永磁体,退磁曲线如图 3 所示。

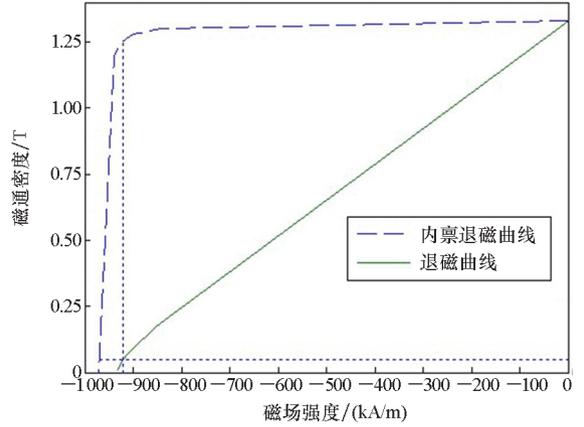


图 3 48H-NdFeP 退磁曲线

Fig. 3 Demagnetization curve of 48H-NdFeP

弹射电机工作时每次只导通两相绕组,每一相导通 120°,等效电路模型如图 4 所示。

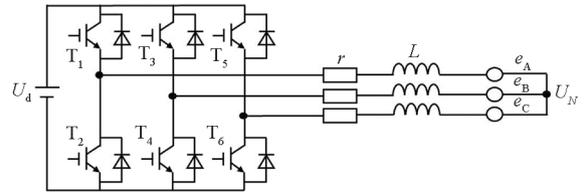


图 4 永磁直线直流电机系统等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of permanent magnet linear DC motor

电机为三相星型连接的电枢绕组,三相电流之和为零,即:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (1)$$

电机三相绕组的电压平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $u_A, u_B, u_C$  为定子三相电压; $i_A, i_B, i_C$  为定子三相相电流; $r$  为相电阻; $L$  为相电感; $M$  为任意两相的互感; $e_A, e_B, e_C$  为各相绕组的反电势。

电机感应电动势为:

$$E_m = \frac{1}{3} Z N B_{gm} l v_m \quad (3)$$

式中, $Z$  为槽数, $N$  为绕组匝数, $B_{gm}$  为气隙磁通密度, $l$  为电枢绕组纵深宽度, $v_m$  为电机速度。

气隙磁场密度<sup>[25]</sup>为:

$$B_{gm}(x) = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\cos\left(n\pi \frac{x}{\tau}\right) \sin\left(n\pi \frac{\tau_p}{2\tau}\right) \operatorname{sh}\left(n\pi \frac{h_m}{\tau}\right)}{n \operatorname{sh}\left[n\pi \left(\frac{g+h_m}{\tau}\right)\right]} \quad (4)$$

式中,  $B_r$  为剩余磁场密度,  $\tau$  为极距,  $\tau_p$  为磁极宽度,  $h_m$  为永磁体厚度,  $g$  为气隙高度。

两相导通时刻, 电机电路的电压平衡方程为:

$$U_d = 2E_m + 2I r_a \quad (5)$$

式中,  $I$  为初级绕组的平均电流,  $r_a$  为每相绕组的等效电阻。

综合以上, 电机的电磁力  $F$  为:

$$F = \frac{2E_m I}{v_m} = \frac{2\left(\frac{Z}{3} N B_{gm} l v_m\right) I}{v_m} = \frac{2}{3} Z N B_{gm} l I \quad (6)$$

电机输出功率  $P$  为:

$$P = Fv = \frac{2}{3} Z N B_{gm} l v_m \quad (7)$$

式中,  $v_m$  表示最大速度。

### 1.3 电机的功率密度计算

电机质量  $M_{motor}$  包括初级铁心质量、绕组质量和次级永磁体质量, 即:

$$\begin{aligned} M_{motor} &= m_{core} + m_{cop} + m_{PM} \\ &= (2p\tau h_y + 6ph_c d_c) l \rho_{core} + \alpha h_a d_a L_c \rho_{cop} + \\ &\quad nh_m d_m \cdot \tau_p \cdot \rho_{PM} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $n$  为永磁体块数,  $d_m$  为永磁体宽度,  $\rho_{PM}$  为永磁体密度;  $p$  为初级铁心对应的次级永磁体极对数,  $h_y$  为铁心轭部高度,  $h_c$  为齿部高度,  $d_c$  为齿部宽度,  $\rho_{core}$  为铁心密度;  $\alpha$  为槽满率,  $h_a$  为绕组高度,  $d_a$  为绕组宽度,  $L_c$  为绕组长度,  $\rho_{cop}$  为绕组铜线密度。

将电机功率密度定义为单位质量所折合的输出功率大小, 由式(7)、式(8)可得到功率密度  $P_D$  为:

$$\begin{aligned} P_D(P, M_{motor}) &= \frac{P}{M_{motor}} \\ &= \frac{B_{gm} l v_m}{3[(2p\tau h_y + 6ph_c d_c) l \rho_{core} + \alpha h_a d_a L_c \rho_{cop} + nh_m d_m \tau_p \rho_{PM}]} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可知, 若要提高功率密度, 应增大气隙磁场密度、电枢电流以及电机纵厚度等, 但上述参数对结果的影响是相互耦合的。例如, 增大气隙磁场密度需增加永磁体厚度, 可永磁体厚度增加会导致电机质量增加, 造成功率密度指标下降。因此, 功率密度提升优化问题要有一种可应对多约束、多变量参数耦合的有效算法。

## 2 动圈式永磁直线直流电机的优化算法

### 2.1 功率密度目标函数的建立

#### 2.1.1 目标函数

根据电机功率密度最大化的优化目标, 建立目标函数:

$$\max P_D(P, M_{motor}) = \max \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\} \quad (10)$$

式中,  $P$  为电机输出峰值功率,  $M_{motor}$  为电机质量,  $f_i(x)$  为电机相关参数。

#### 2.1.2 优化变量

优化变量的选取按如下规则<sup>[26]</sup>进行。

1) 各变量之间应相互独立, 选取时互不干扰, 互不影响。

2) 变量的选取应与目标函数有关, 并对电机的性能有较大的影响。

3) 选择变量的个数应适量。选择变量过多使得计算量很大、优化过程耗时久, 造成资源浪费; 变量过少则会造优化效果不明显, 优化失效的情况。

4) 有特殊规定、限制的变量按常量处理。

结合实际情况, 选择如下变量进行优化: 气隙长度、纵厚度、初级齿部宽度、齿部高度、轭部高度。

#### 2.1.3 约束条件

电机参数优化的具体的约束条件见表3。电机弹射时间短, 且双边结构也有利于散热, 因此, 可以考虑允许电机短时过载和瞬时磁饱和, 初级绕组电流密度可提高到  $25 \sim 30 \text{ A/mm}^2$ , 限定齿部与轭部磁密最大一般不超过  $1.8 \text{ T}$ 。

表3 约束条件

Tab.3 Constraint condition

约束名称	约束变量符号	约束范围
气隙磁密/T	$B_\delta$	$0.7 \sim 0.8$
电流密度/(A/mm <sup>2</sup> )	$J$	$25 \sim 35$
初级齿部磁密/T	$B_c$	$\leq 1.8$
初级轭部磁密/T	$B_e$	$\leq 1.8$

约束表达式为:

$$\begin{cases} g_1(X) = B_{\delta 0} - B_\delta \leq 0 \\ g_{21}(X) = J - J_{01} \leq 0 \\ g_{22}(X) = J_{02} - J \leq 0 \\ g_3(X) = B_c - B_{c0} \leq 0 \\ g_4(X) = B_e - B_{e0} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $B_{80}$ 、 $J_{01}$ 、 $J_{02}$ 、 $B_{c0}$ 、 $B_{e0}$  为表 3 中各变量约束范围的边界值。

这些变量的数量级各不相同, 优化计算时的灵敏度也不同, 有可能会出现一个变量提前达到约束边界值, 从而限制其他变量改变的情况。为避免这种情况的发生, 对上述约束条件进行归一化处理。

$$\begin{cases} g_1(X) = \frac{B_{80} - B_{\delta}}{B_{80}} \leq 0 \\ g_{21}(X) = \frac{J - J_{01}}{J_{01}} \leq 0 \\ g_{22}(X) = \frac{J_{02} - J}{J_{02}} \leq 0 \\ g_3(X) = \frac{B_c - B_{c0}}{B_{c0}} \leq 0 \\ g_4(X) = \frac{B_e - B_{e0}}{B_{e0}} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

#### 2.1.4 增广目标函数

把目标函数和优化的约束条件相结合形成一个增广目标函数, 将有约束的最优化问题转化成无约束的极值问题。为此, 引入惩罚函数<sup>[10]</sup>:

$$P_j(X) = \begin{cases} 0 & g_j(X) \leq 0 \\ K + \omega_j g_j^2(X) & g_j(X) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\omega_j$  为约束权因子;  $g_j(X)$  为约束条件;  $K$  为调整系数,  $K \geq 0$ 。

引入  $K$  值后, 一旦发生违反约束的情况, 惩罚值就会有一个很大的突变量, 以避免搜索进入远离约束边界的不可行区域。根据重要性的不同, 设置不同大小的约束权因子。重要程度大的约束条件, 其权因子相对较大; 重要性次之的约束条件, 其权因子相对较小。

为使各个目标尽可能达到最优, 需要在目标之间进行协调。通过基于各目标权重系数的增广目标函数, 可将式(10)所示的多目标优化问题简化为单一函数的优化问题, 将式(13)代入式(10), 得到增广目标函数为:

$$P'_D(X) = P_D(P, M_{\text{motor}}) - \sum_{j=1}^m P_j(X) \quad (14)$$

传统遗传算法进化搜索时, 采用该目标函数作为适应度函数来区分种群个体好坏, 根据适应度函数值决定其相应个体遗传至下一代的概率大小, 适应度值大的个体遗传到下一代的概率比较大, 反之, 遗传概率比较小。

## 2.2 精英保留策略

传统遗传算法并行计算能力强, 可全局优化,

但存在早熟收敛、后期种群同化、容易停滞在局部最优解等不足, 并且种群进化时因交叉、变异等会产生多个优良个体, 它们会破坏当前种群中的最优个体, 影响算法收敛和运行效率。针对这些不足, 提出一种带有精英保留的多种群遗传算法, 具体为:

1) 改变仅靠单个群体进行遗传进化的框架, 引入多个种群同时进行优化搜索, 不同种群赋以不同控制参数, 实现不同的搜索目标。

2) 将上一代种群与变异后的种群结合, 各种群之间通过移民算子实现信息交换, 各种群使用各代的最优个体替换最差个体, 使适应度最好的个体保留到下一代种群。

3) 精英个体不参与选择、交叉、变异等运算操作, 使最优个体不被破坏, 算法更好地收敛到全局最优解<sup>[27]</sup>。

MPGAER 流程如图 5 所示。从选择策略来看, 精英保留策略是算法收敛到最优解的基本保障。如果下一代群体的最佳个体适应度值小于当前群体最佳个体的适应度值, 则用当前群体的最佳个体直接替换下一代最差的个体。

## 2.3 算法的实现

算法采用最简单的二进制编码, 选择函数选取随机遍历抽样, 采用基于排序的适应度的分配方式, 交叉变异算子采用单点交叉重组、离散变异的方式。将判断精英种群最优个体保持代数是否满足设定要求作为算法终止优化的依据。具体步骤如下:

**步骤 1:** 读取电机磁路法初始设计参数并初始化。

**步骤 2:** 计算初始参数和优化前的电机功率密度。

**步骤 3:** 产生初始种群, 在编码规定的范围内随机生成包含  $n$  个个体的初始种群。

**步骤 4:** 评价种群, 选出适应度最好的作为精英个体保留至下一代。

**步骤 5:** 算法产生新一代种群, 对父代个体进行选择、交叉、变异, 并计算子代种群的适应度值。

**步骤 6:** 用父代精英个体替换子代最差个体。

**步骤 7:** 若遗传代数达到规定进化代数, 终止迭代, 输出精英个体及优化结果, 否则返回步骤 4。

本算法优化变量有 5 个, 设定子种群 10 个, 每个种群的个体数为 60, 二进制编码位数为 10, 最优个体至少保持代数可设为 20。交叉概率与

变异概率影响着算法的搜索速度及种群的多样性,不同的取值会有不同的优化结果。所以,为满足算法的多样性以及全局搜索能力,采用为不同

子种群设定不同的交叉概率与变异概率的方式,在 0.7 ~ 0.9 之间随机选取交叉概率,在 0.001 ~ 0.05 之间随机选取变异概率。

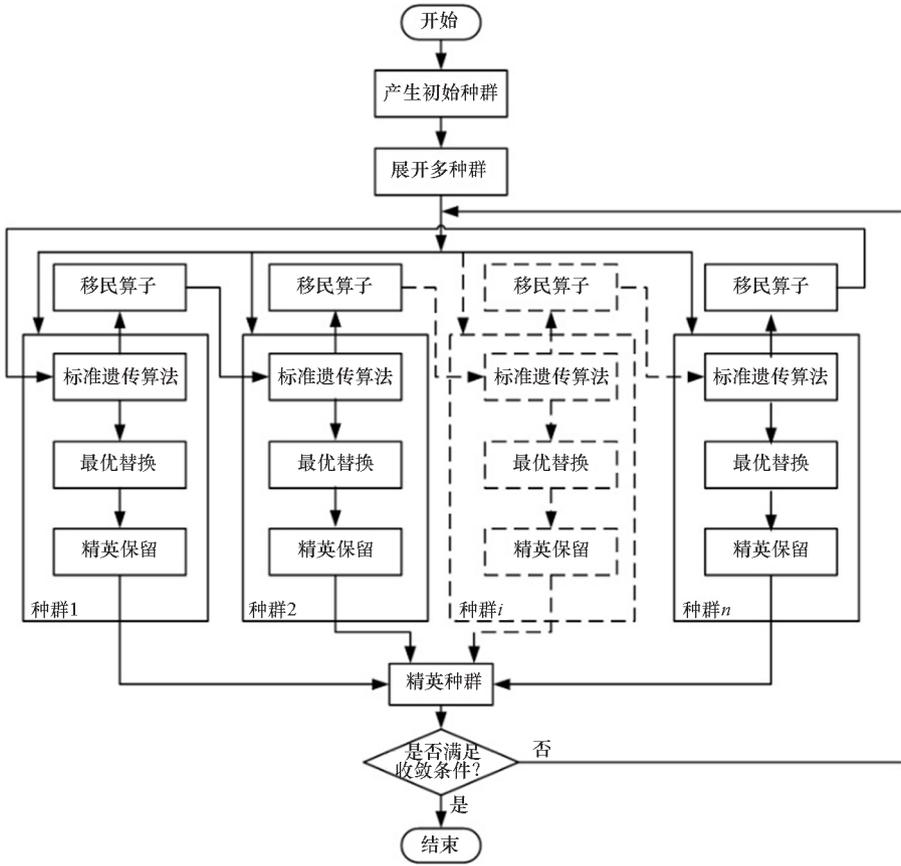


图5 MPGAER 流程图

Fig. 5 Flowcharts of MPGAER

2.4 优化的结果

MPGAER 的进化过程如图 6 所示,最优解随着 MPGAER 遗传进化代数的增多逐渐趋于稳定并达到最大,3 次运算后结果最终趋于一致,这表明算法的稳定性好。

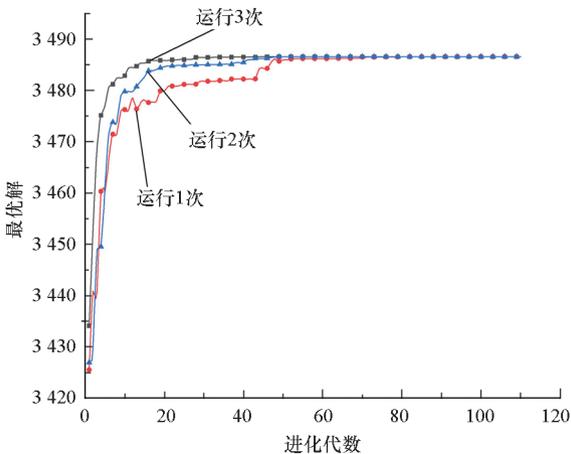


图6 MPGAER 的进化过程

Fig. 6 Evolutionary process of MPGAER

表 4 为分别采用磁路法、GA 和 MPGAER 对电机的优化结果对比。其中,GA 和 MPGAER 为基于磁路法设计方案的优化结果。MPGAER 设计优化的电机初级铁心轭部高度由 16 mm 降为

表 4 不同算法对电机的优化结果对比

Tab. 4 Comparison of the results of different algorithms for the optimization of motor parameters

项目	结构参数		
	磁路法	MPGAER	GA
气隙长度/mm	3.5	4	4
电机纵深宽度/mm	76	80	80
初级齿部宽度/mm	9	9	9.1
初级齿部高度/mm	22	18.7	22.1
初级轭部高度/mm	16	12	14
电流密度/(A/mm <sup>2</sup> )	30	30.3	31.1
质量/kg	43.23	40.53	43.79
推力/kN	5.11	5.43	5.57
功率密度/(kW/kg)	3.60	3.96	3.65

12 mm;齿部高度由 22 mm 降为 18.7 mm;电机质量由 43.23 kg 减少到 40.53 kg,减少了 6.25%;功率密度由初始设计的 3.60 kW/kg 增加到 3.96 kW/kg,提高了 10%。MPGAER 优化结果明显优于磁路法和 GA 设计结果。

### 3 有限元仿真分析

进一步,采用 Ansoft Maxwell 2D 有限元仿真软件对磁路法初始设计以及 GA 和 MPGAER 设计的电机模型分别进行性能分析,电机的模型如图 7 所示。在图 7 中定义磁路法的初始设计模型为初始模型,考虑到永磁体的铝合金框架引入的涡流损耗不大,对计算结果影响不大<sup>[14]</sup>,为了简化计算,没有将其放入仿真模型。

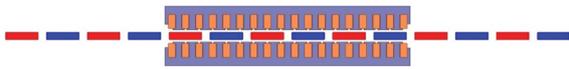


图 7 电机仿真模型

Fig. 7 Simulation model of motor

电机的空载反电势对比情况如图 8 所示。为了简化对比,由于反电势具有反面对称性,图 8 只显示了算法优化前后的电机空载反电势半个周期的波形,MPGAER 优化后的电机空载反电势幅值明显增大,这有利于增加推力。算法优化前后的推力变化如图 9 所示,它已经可以体现推力的变化及其波动的周期性,MPGAER 优化后的电机推力峰值较优化前增大 400 N 左右。算法优化前后的电机速度变化情况如图 10 所示,在 320 mm 距离内,耗时 78 ms 条件下,优化前电机速度达到 7.33 m/s,MPGAER 优化后的电机速度达到 7.44 m/s。另外,从图 8 ~ 10 以及表 4 可见,GA 优化后电机的空载反电势、推力和速度较优化前都有所增加。但自身重量的增加导致其功率密度较优化前只增加了 0.05 kW/kg。

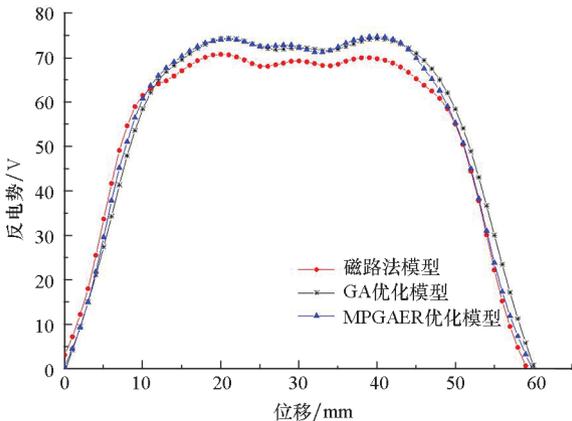


图 8 电机的空载反电势对比

Fig. 8 Comparison of the motor back EMF of no-load

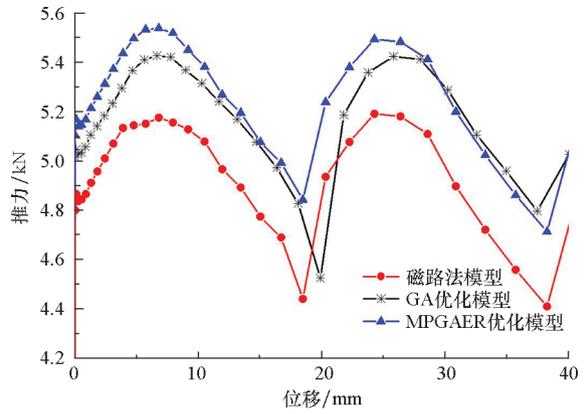


图 9 推力对比

Fig. 9 Comparison of thrust

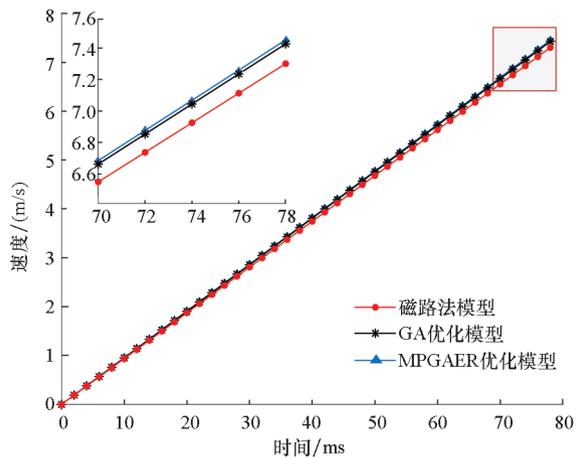


图 10 速度对比

Fig. 10 Comparison of speed

### 4 结论

1) 以动圈式永磁直线直流电机功率密度最大化为目标,在传统遗传算法的基础上引入多种精英保留策略,对气隙长度、电机纵深宽度、初级铁心齿部宽度、齿部高度、轭部高度等进行优化,设计结果优于传统遗传算法设计结果,并且解决了传统遗传算法易收敛于局部最优点和寻优效果差的不足。

2) 经 MPGAER 优化后的电机功率密度更高,与磁路法初始设计结果相比,能使电机质量减少 6.25%,功率密度提高 10%。优化后的电机输出平均推力更大,实现相同的起飞速度耗时更短,功率密度更大。

3) MPGAER 更适用于复杂函数的优化,且稳定性好。

### 参考文献 (References)

[1] 罗宏浩, 吴峻, 常文森. 新型电磁弹射器的动态性能仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2285 - 2288.

- LUO Honghao, WU Jun, CHANG Wensen. Dynamic performance simulation of a novel electromagnetic launcher[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(8): 2285-2288. (in Chinese)
- [2] 宋蕾, 吴峻, 杨宇. 基于 Halbach 永磁体阵列的无人机电磁弹射器双边型涡流制动[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(7): 21-26.
- SONG Lei, WU Jun, YANG Yu. Double-sided eddy current brake of electromagnetic launcher for unmanned aerial vehicle based on Halbach permanent magnet array [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(7): 21-26. (in Chinese)
- [3] DENG C, YE C Y, YANG J T, et al. A novel permanent magnet linear motor for the application of electromagnetic launch system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [4] 赵宏涛, 吴峻, 余佩倡. 电磁弹射技术发展综述[C]//中国电工技术学会学术年会论文集, 2011: 91-95.
- ZHAO Hongtao, WU Jun, YU Peichang. Review of the development of electromagnetic catapult technology [C]//China Electrotechnical Society Academic Conference, 2011: 91-95. (in Chinese)
- [5] 李小民, 李会来, 向红军, 等. 飞机电磁弹射系统发展及其关键技术[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(4): 1-7.
- LI Xiaomin, LI Huilai, XIANG Hongjun, et al. Development and key technology of electromagnetic aircraft launch system[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(4): 1-7. (in Chinese)
- [6] 王晓远, 高鹏, 赵玉双. 电动汽车用高功率密度电机关键技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 53-59.
- WANG Xiaoyuan, GAO Peng, ZHAO Yushuang. Key technology of high power density motors in electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 53-59. (in Chinese)
- [7] 温典. 高功率密度纯电动汽车用永磁同步电机的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- WEN Dian. Research on high power density permanent magnet synchronous motor for the pure electric vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [8] 严长伟. 电动汽车用高功率密度永磁同步电机优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- YAN Changwei. The optimization design of high power density permanent magnet synchronous motor used in electric vehicle[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [9] 黄磊, 余海涛, 胡敏强, 等. 一种初级永磁型直线电动机的推力特性[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(9): 6-11.
- HUANG Lei, YU Haitao, HU Minqiang, et al. Thrust force characteristic of a primary permanent magnet linear motor[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(9): 6-11. (in Chinese)
- [10] SATO K. Thrust ripple reduction in ultrahigh-acceleration moving-permanent-magnet linear synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(12): 4866-4873.
- [11] 马伟明, 王东, 程思为, 等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2025-2035.
- MA Weiming, WANG Dong, CHENG Siwei, et al. Common basic scientific problems and development of leading-edge technology of high performance motor system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2025-2035. (in Chinese)
- [12] 黄钰墨. 高速液压弹射系统设计及关键元件研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- HUANG Yuzhao. Designing of high speed hydraulic ejection system and investigation of the key component [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] 胡国祥, 鲍仁明, 张鹏, 等. 基于改进萤火虫算法的永磁同步电机 PID 参数优化研究[J]. 变频器世界, 2019(6): 81-85.
- HU Guoxiang, BAO Renming, ZHANG Peng, et al. Research on PID parameter optimization of permanent magnet synchronous motor based on improved firefly algorithm[J]. The World of Inverters, 2019(6): 81-85. (in Chinese)
- [14] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle swarm optimization[J]. Swarm Intelligence, 2007, 1(1): 33-57.
- [15] 李艳明, 彭雪明, 梁晓龙, 等. 基于磁通切换永磁直线电机的导弹电磁发射技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2830-2834.
- LI Yanming, PENG Xueming, LIANG Xiaolong, et al. Electromagnetic missile launch technology based on linear flux-switching permanent magnet machine[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2830-2834. (in Chinese)
- [16] 罗雪芹. 全电飞机用高功率密度永磁同步电机研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LUO Xueqin. Research on high power density permanent magnet synchronous motor for all electric aircraft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 姜文, 黄文新, 蒋雪峰, 等. 定子电励磁型磁通切换电机的绕组构成分析与功率密度优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6266-6277.
- JIANG Wen, HUANG Wenxin, JIANG Xuefeng, et al. Winding configurations analysis and power density optimization of stator electrical excitation flux-switching machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6266-6277. (in Chinese)
- [18] 兴连国, 周惠兴, 曹荣敏, 等. 基于遗传算法的弧形音圈电机优化设计[C]//2011年中国智能自动化学术会议论文集, 2011: 187-193.
- XING Lianguo, ZHOU Huixing, CAO Rongmin, et al. Design optimization of rotary VCM based on genetic algorithm[C]// Proceedings of Central South University (Science and Technology), 2011: 187-193. (in Chinese)
- [19] 康燕琴, 上官璇峰, 肖家乐. 基于遗传算法圆筒型直线感应电机的优化设计[J]. 电机技术, 2008(5): 1-4.
- KANG Yanqin, SHANGGUAN Xuanfeng, XIAO Jiale. Optimal design of tubular linear induction motor based on genetic algorithm [J]. Electrical Machinery Technology,

- 2008(5): 1-4. (in Chinese)
- [20] 赵宁, 赵永志, 付晨曦. 具有适应值预测机制的遗传算法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 116-121.  
ZHAO Ning, ZHAO Yongzhi, FU Chenxi. Genetic algorithm with fitness approximate mechanism[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(3): 116-121. (in Chinese)
- [21] 刘珏, 王能建, 罗旭, 等. 采用改进遗传算法的舰载机保障调度方法[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(2): 194-205.  
LIU Jue, WANG Nengjian, LUO Xu, et al. Deck operation scheduling method of carrier-based aircraft based on improved genetic algorithm [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(2): 194-205. (in Chinese)
- [22] 李立毅, 唐勇斌, 刘家曦, 等. 多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 69-77.  
LI Liyi, TANG Yongbin, LIU Jiayi, et al. Application of the multiple population genetic algorithm in optimum design of air-core permanent magnet linear synchronous motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 69-77. (in Chinese)
- [23] 时统宇, 王大志, 李召. 基于多种群遗传算法的永磁涡流驱动器的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊2): 262-268.  
SHI Tongyu, WANG Dazhi, LI Zhao. Multi-objective optimization design of PMECD by multiple population genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(Suppl 2): 262-268. (in Chinese)
- [24] SONG L, WU J, BAO Y. Linear permanent magnet motor blend brake system simulation for electromagnetic launcher[C]// Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2016: 650-654.
- [25] 张涛, 刘丹丹, 赵辉, 等. 基于等效磁化电流法的永磁同步直线电机静态气隙磁场计算[J]. 机械, 2015, 42(5): 51-54.  
ZHANG Tao, LIU Dandan, ZHAO Hui, et al. Calculate static gap magnetic field distribution for permanent magnet synchronous linear motor through equivalent magnetizing current method[J]. Machinery, 2015, 42(5): 51-54. (in Chinese)
- [26] 鲍海锋, 丁德锐, 王玉林. 基于MPGAER的机械臂时间最优轨迹规划[J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 15-20.  
BAO Haifeng, DING Derui, WANG Yulin. Time-optimal trajectory planning algorithm for manipulators via MPGAER[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(2): 15-20. (in Chinese)
- [27] 弭宝福. 遗传算法进化策略的改进研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.  
MI Baofu. The improvement research on evolution strategy of genetic algorithm [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)