

文章编号: 1673-3193(2024)06-0814-09

# 高速低真空磁浮列车直线电机电磁力的优化设计

程志平, 姚舜才, 李柏霖

(中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为了对高速低真空磁浮列车在运行过程中产生的电磁力进行深入分析, 并在此基础上实现对电磁力的优化, 以直线感应电机为研究对象, 提出了参数化处理和Evolutionary Algorithms(EA)多目标优化相结合的方法来优化电磁力。首先根据磁浮列车所用直线感应电机的电机结构, 建立了瞬态场有限元模型, 然后分析其电磁力的特性曲线。参数化次级厚度来预测次级厚度大小与电磁力的关系, 使用以速度、次级铝板厚度、次级钢板厚度为变量, 电磁推力和法向力为目标的EA多目标优化方法, 得到最佳的电磁推力和法向力。结果表明, 随着次级厚度的增大, 电磁推力的值减小, 电磁法向力由正值变为负值且绝对值减小, 法向力由吸引力变为排斥力。当速度为0.001 m/s、次级铝板厚度为2.895 mm、次级钢板厚度为5.789 mm, 稳态时的电磁推力和法向力与优化前相比分别提升了3.62 N和2.503 N, 优化效果显著。参数化处理和EA多目标优化相结合的方法能够有效优化电磁力, 适用于直线感应电机的多目标优化设计, 优化结果可以为直线感应电机设计时结构和性能的提高提供重要依据。

**关键词:** 磁浮列车; 电磁力; 直线感应电机; 参数化处理; EA多目标优化

**中图分类号:** TM359.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.010

**引用格式:** 程志平, 姚舜才, 李柏霖. 高速低真空磁浮列车直线电机电磁力的优化设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 814-822.

CHENG Zhiping, YAO Shuncai, LI Bailin. Optimization design of electromagnetic force for linear motor of high speed and low vacuum maglev train[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(6): 814-822.

## Optimization Design of Electromagnetic Force for Linear Motor of High Speed and Low Vacuum Maglev Train

CHENG Zhiping, YAO Shuncai, LI Bailin

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to conduct an in-depth analysis of the electromagnetic force generated during the operation of high-speed and low-vacuum maglev trains and realize the optimization of the electromagnetic force on this basis, taking linear induction motor as the research object, a method combining parametric processing and evolutionary algorithms (EA) multi-objective optimization was proposed to optimize the electromagnetic force. Firstly, the finite element model of transient field was established based on the structure of linear induction motor used in maglev train. Then the characteristic curve of electromagnetic force was analyzed. The relationship between the secondary thickness and the electromagnetic force was predicted by parameterizing the secondary thickness. The optimal electromagnetic thrust and normal force were

**收稿日期:** 2024-04-10

**作者简介:** 程志平(1996-), 女, 硕士生, 主要从事直线电机的设计与优化研究。

**通信作者:** 姚舜才(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电气传动与控制的研究。E-mail: 1274873556@qq.com。

obtained by using EA multi-objective optimization method which took the velocity, the thickness of the secondary aluminum plate and the thickness of the secondary steel plate as variables and the electromagnetic thrust and normal force as targets. The results show that with the increase of secondary thickness, the value of electromagnetic thrust decreases, the normal force changes from positive to negative and the absolute value decreases, and the normal force changes from attractive to repulsive. When the speed is 0.001 m/s, the thickness of the secondary aluminum plate is 2.895 mm, and the thickness of the secondary steel plate is 5.789 mm, the electromagnetic thrust and normal force at steady state are increased by 3.62 N and 2.503 N, respectively, compared with before optimization. The optimization effect is remarkable. The method combining parametric processing and EA multi-objective optimization can effectively optimize the electromagnetic force, which is suitable for the multi-objective optimization design of linear induction motor. It provides an important basis for the improvement of the structure and performance of linear induction motor design.

**Key words:** maglev train; electromagnetic force; linear induction motor; parametric processing; EA multi-objective optimization

## 0 引 言

高速低真空磁浮列车由于取消了车轮,需要使用非黏着驱动。在众多类型的电机中,直线感应电机就具有结构简单、性能可靠,可以实现不依靠车轮驱动等特点,所以直线感应电机成为磁浮列车驱动的不二之选。

研究直线感应电机,电磁力分析是一个必不可少的步骤。近年来国内外文献中就有很多关于直线感应电机电磁力分析的案例。王滢等<sup>[1]</sup>结合中低速磁浮列车的直线感应电机结构参数,基于准一维理论建立了气隙磁场数学模型,后采用有限元仿真从气隙磁场、次级涡流和牵引力三个方面对数学模型进行了验证。结果表明,列车速度会影响直线感应电机的纵向动态端部效应,使直线感应电机推力下降、效率降低。刘希军等<sup>[2]</sup>以固定翼无人机电磁弹射用直线感应电机 T 型等效电路模型为基础,根据直线感应电机的设计参数,建立数学模型并仿真分析了直线感应电机在不同运行速度下的滑差频率对电机电磁推力输出的影响。Jeong 等<sup>[3]</sup>对于集装箱扫描仪搬运车的直线感应电机的次级板材料为铜和铝的两种模型进行了推力、效率和载荷特性的有限元分析,指出了推力、效率和功率因数会随滑差特性变化。Ma 等<sup>[4]</sup>基于直线感应电机的基本原理,提出了一种利用瞬时电流值计算直线感应电机推力的新方法。为了验证该方法,设计了一个十二槽、单层绕组的三相直线感应电机模型。实验表明,电流较小时计算结果与实验结果基本吻合。当电流增大

时,初级铁芯饱和,一致性变差。此方法在初级铁芯不饱和时适用。Domínguez 等<sup>[5]</sup>中利用三维有限元仿真工具深入研究了横向磁通直线感应电机的相关知识,通过几何改动,改进机器的主磁路并确保纵向和横向磁通同时运行,此方法使推力在静止和低速条件下得到显著改善。由于三维仿真涉及更多的自由度和单元,计算量通常远大于二维仿真,需要更多的计算资源和时间,对计算机硬件的要求也很高,虽然二维电磁模型无法捕捉三维空间中的所有细节,可能无法准确模拟电磁场的趋肤效应、波导模式等,但本文研究的电磁力在二维模型下也可以提供准确的结果,实际问题中的边界条件也可以合理地用二维模型来近似,材料属性在第三维度上变化不大,二维模型能较为精确地表征实际情况,故本文使用二维有限元仿真。Han 等<sup>[6]</sup>以运行在高速非周期瞬态工况下的短初级六相直线感应电机为研究对象,提出了一种实时修正滑差频率和转矩电流的矢量控制策略,用于动态推力补偿。仿真和实验结果表明,所提出的控制策略有利于优化暂态过程中的推力。Hu 等<sup>[7]</sup>针对直线感应电机端部效应使牵引效率降低,法向力的波动对悬浮系统产生扰动等问题,建立了考虑端部效应的直线感应电机动力学模型,提出了恒转差频率矢量控制方法。实验结果表明,文中提出的算法和改进能够满足列车全速推力输出和法向力的要求。吕刚等<sup>[8]</sup>提出分段等效电路模型,分析了次级断续时直线感应电机特有的电磁现象及其特性。将不同频率和速度下计算的推力、次级断续时推力和效率的动态变化曲线与实验测量结果进行对比,分析了直线感应电机的特性

变化情况。孟大伟等<sup>[9]</sup>针对直线感应电机磁场复杂、边缘效应明显等缺点,参考旋转感应电机理论,设计了适合直线感应电机运行的一种特殊结构的栅格型次级。对栅格型次级等效电路分析的结果表明,栅格型次级能规范感应涡流的路径,消除直线感应电机的第二类横向边缘效应,提高直线电机的推力特性。葛研军等<sup>[10]</sup>提出一种短初级单边型直线感应电机倒梯形次级结构,与传统栅格型结构相比,倒梯形结构具有电磁推力大、法向吸力小等优点。上述文献均对直线感应电机的电磁推力进行了分析研究,但对于电磁法向力以及电磁力的优化问题研究较少。

本文将采取有限元软件对直线感应电机进行2D瞬态场仿真,考察和分析直线感应电机的动态特征,直观准确地分析直线感应电机的电磁推力和法向力特性曲线,对次级厚度进行参数化处理并使用Evolutionary Algorithms(EA)多目标优化方法优化电磁力,最终实现直线感应电机结构和机能的优化,为直线感应电机在高速低真空磁浮列车上的应用等提供理论依据。

## 1 磁浮列车直线感应电机的拓扑结构及工作原理

以直线感应电机初级为描述对象,常见的拓扑类型有四种,分别为短初级双边、短初级单边、长初级双边以及长初级单边。高速低真空磁浮列车悬浮于轨道上方必须采用直线电机驱动,其中单边直线感应电机多用于此种情形中。考虑到高速低真空磁浮列车通常速度较快,在运行耗能方面,短初级直线感应电机很有优势,因此采用短初级的方案。综上,采取短初级单边直线感应电机作为磁浮列车的驱动电机最为合适<sup>[11]</sup>,其拓扑结构如图1所示。

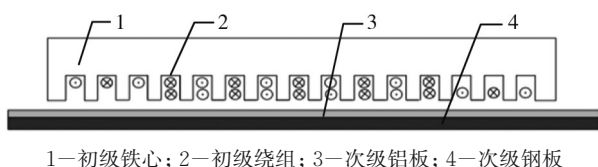


图1 短初级单边直线感应电机的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of short primary single-sided linear induction motor

短初级单边直线感应电机应用于磁浮列车时将初级安设在转向架上,次级安设在轨道的背部并将其表面附铝来提供涡流路径。悬浮磁铁与轨

道构成闭合磁路,通过气隙传感器和悬浮控制器来保证稳定悬浮。同时,轨道和悬浮磁铁构成的闭合磁路遵循磁通总要沿着磁阻最小路径闭合的规律,使车辆的侧向稳定性有所保证<sup>[12]</sup>。

## 2 磁浮列车直线感应电机的物理模型与电磁力分析

电磁力是由切割次级导体产生的感应电流与初级绕组通入的交流电在电机气隙中产生的行波磁场相互作用生成的<sup>[13]</sup>。为便于研究,不考虑纵向和横向端部效应,即电机铁心和绕组沿 $x$ 坐标的正负方向无限延伸,且各种场量与 $z$ 坐标无关,得到如图2所示的二维场理想模型<sup>[14]</sup>。

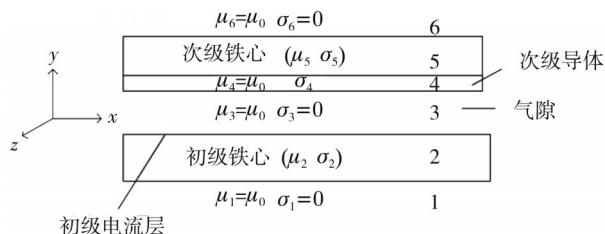


图2 二维场理想模型

Fig. 2 Two-dimensional field ideal model

模型中,1~6分别代表6个不同的区域:区域1是空气,它沿坐标 $y$ 的负方向延伸到无限远;区域2是电机的初级铁心;区域3是电机的机械气隙;区域4是电机次级的导体;区域5是电机次级铁心;区域6是空气,它沿坐标 $y$ 的正方向延伸到无限远。 $\mu_1 \sim \mu_6$ 和 $\sigma_1 \sim \sigma_6$ 分别代表相应区域的磁导率和电导率,其中 $\mu_2$ 和 $\mu_5$ 不是常数,它们分别与初级铁心和次级铁心的饱和度有关。为了考虑这种非线性问题的影响,设想将初级铁心和次级铁心切割成平行于 $xz$ 平面的许多薄片,从而成为由 $N$ 个区域组成的多层模型。研究第 $n$ 区域两个边界面上的电磁场,如图3所示。

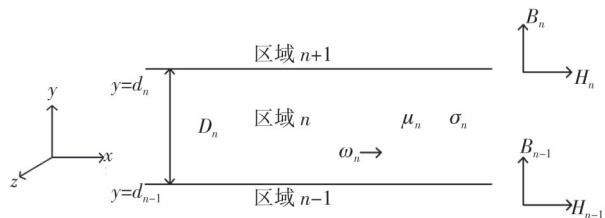


图3 区域 $n$ 的通用模型

Fig. 3 General model for region  $n$

图3中, $B_{n-1}$ 和 $H_{n-1}$ 分别为下边界面上磁感应强度的法向分量和磁场强度的切向分量, $B_n$ 和 $H_n$ 分别为上边界面上的对应分量。根据 $B_n$ 和 $H_n$ ,

可以求出由电流层  $j_1$  传送的通过  $y=y_n$  边界面上的平均时间功率。

当  $n=r, r+1, \dots, N-1$  时, 由电流层  $j_1$  向上传送的功率为

$$P'_n = 0.5\text{Re}(E_n H_n^*), \quad (1)$$

式中:  $E_n$  为区域  $n$  中电场强度的  $z$  分量;  $H_n^* = H_n^* - j_1^*$ , 当  $n=r$  时,  $H_n^* = H_n^*$ ;  $H_n^*$  为  $H_n$  的共轭值;  $j_1^*$  为  $j_1$  的共轭值,  $j_1$  为初级中初级绕组的线电流密度。

当  $n=1, 2, 3, \dots, r$  时, 由电流层  $j_1$  向下传送的功率为

$$P''_n = -0.5\text{Re}(E_n H_n^*). \quad (2)$$

由电磁场基本方程  $\nabla \times E_n = -\frac{\partial}{\partial t} B_n$ , 易求出

$$E_n = -\frac{\omega}{k} B_n, \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为电源角频率;  $k = \frac{\pi}{\tau}$  为比例常数,  $\tau$  为电机极距。

将式(3)代入式(1)和式(2), 得

$$P'_n = -0.5\text{Re}\left(\frac{\omega}{k} B_n H_n^*\right), \quad (4)$$

$$P''_n = 0.5\text{Re}\left(\frac{\omega}{k} B_n H_n^*\right). \quad (5)$$

进入某区域  $n$  单位面积上的净功率为

$$P_n = -0.5\text{Re}\left[\frac{\omega}{k} (B_{n-1} H_{n-1}^* - B_n H_n^*)\right], \quad (6)$$

式中:  $H_{n-1}^*$  为  $H_{n-1}$  的共轭值。当区域  $n$  紧贴在电流层  $j_1$  之上时,  $H_{n-1}^* = H_{n-1}^* - j_1^*$ ; 否则  $H_{n-1}^* = H_{n-1}^*$ 。

同步速度为

$$V_s = 2\tau f, \quad (7)$$

式中:  $\tau$  为电机极距;  $f$  为频率。

作用在区域  $n$  单位面积上的切向电磁力, 即方向平行于坐标  $x$  的电磁推力为

$$F_x = \frac{P_n}{V_s} = 0.5\text{Re}(B_n H_n^* - B_{n-1} H_{n-1}^*). \quad (8)$$

作用在区域  $n$  单位面积上的法向电磁力, 即方向平行于坐标  $y$  的电磁力, 可由麦克斯韦应力方程直接计算, 法向电磁力为

$$F_y = -\frac{\mu_0}{4} \left( \frac{|B_{n-1}|^2}{\mu_0^2} - |H'_{n-1}|^2 \right) + \frac{\mu_0}{4} \left( \frac{|B_n|^2}{\mu_0^2} - |H_n|^2 \right), \quad (9)$$

式中:  $\mu_0$  为空气磁导率。当区域  $n$  紧贴在电流层  $j_1$  之上时,  $H'_{n-1} = H_{n-1} - j_1$ ; 否则  $H'_{n-1} = H_{n-1}$ 。

如果  $F_y$  是负值, 说明区域  $n$  受此法向电磁力的影响, 将沿坐标  $y$  向电流层  $j_1$  移动, 这种力通常称为吸引力; 相反, 如果  $F_y$  是正值, 说明区域  $n$  将沿相反方向移动, 这时的  $F_y$  称为悬浮力。

### 3 磁浮列车直线感应电机的有限元模型与特性分析

#### 3.1 直线感应电机的有限元分析模型

利用 ANSYS Maxwell 2D 软件中的瞬态求解器对具有平移运动的直线感应电机进行仿真。忽略直线感应电机的横向边端效应, 对磁浮列车直线感应电机进行建模<sup>[15]</sup>。电机的长、宽、高分别为 360, 60, 40 mm, 其他主要参数如表 1 所示。

表 1 直线感应电机的主要尺寸参数

Tab. 1 Main dimension parameters of linear induction motor

参数	数值
极数	6
相数	3
齿宽 $b$ /mm	5
槽宽 $d$ /mm	5
槽深 $h$ /mm	25
机械气隙 $g$ /mm	2
极距 $\tau$ /mm	60
铝板厚度 $D_{Al}$ /mm	4
钢板厚度 $D_{st}$ /mm	8

磁浮列车直线感应电机的有限元模型如图 4 所示。

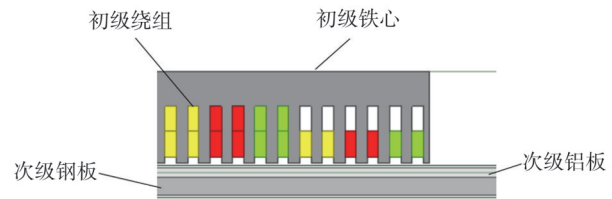


图 4 直线感应电机的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of linear induction motor

图 5 为电流为 6 A, 时间为 0 s, 速度为 0 m/s 时的直线感应电机的磁密云图。次级板初始位置在 -60 mm 处, 由图中可以看出, 初级绕组之间的磁感应强度最强, 初级绕组与次级板之间的磁感应强度次之, 初级铁心的磁感应强度较弱。由于电机两端存在半填充槽, 会出现漏磁通, 磁感应强度最弱。

图 6 为电流为 6 A, 时间为 0.1 s, 速度为

6 m/s时的直线感应电机的磁密云图。由图6可以看出,速度不为0时次级板开始向右做平移运动,此时次级板移动600 mm,到达540 mm的位置,随着次级板的运动,初级铁心、初级绕组以及次级板的磁感应强度都随之发生变化。

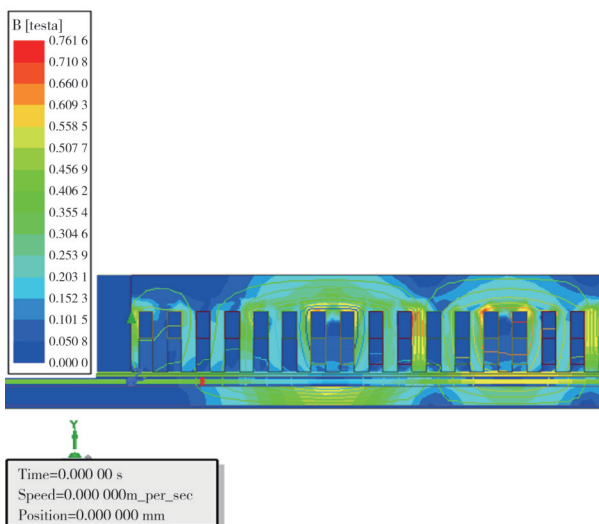


图5  $t=0$  s,  $v=0$  m/s时直线感应电机的磁密云图

Fig. 5 Magnetic dense cloud map of linear induction motor at  $t=0$  s and  $v=0$  m/s

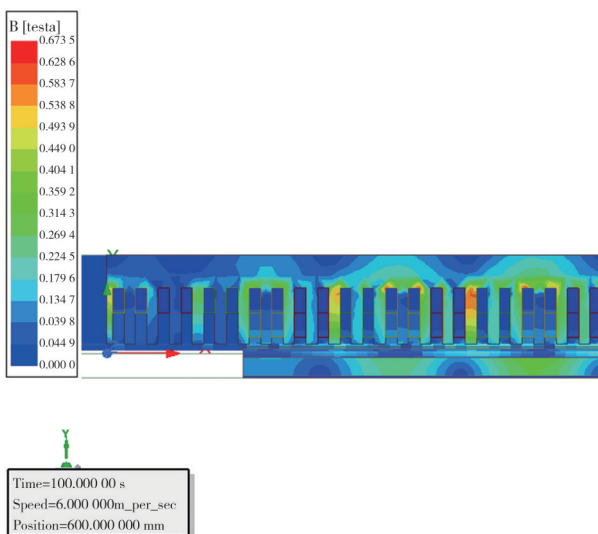


图6  $t=0.1$  s,  $v=6$  m/s时直线感应电机的磁密云图

Fig. 6 Magnetic dense cloud map of linear induction motor at  $t=0.1$  s and  $v=6$  m/s

### 3.2 直线感应电机的动态特性分析

采用二维时间步长有限元分析,通过后处理得到磁场产生的推力和法向力的特性曲线<sup>[16-17]</sup>。

图7和图8分别为直线感应电机的推力和法向力随时间变化的曲线。当电流为6 A,速度为0 m/s,次级铝板厚度为4 mm,次级钢板厚度为

8 mm时,推力在初期处于振荡状态,约0.14 s后转为稳态。0.005 s时推力值达到最大值40.48 N,0.14 s稳态时的值为12.15 N。法向力曲线的变化规律与推力曲线大致相同,由于直线感应电机的电磁力具有非线性特性,初期当直线感应电机运行在非线性区域时,会引起法向力的振荡。0 s时法向力的值最大为72.36 N,0.14 s稳态时的值为-1.229 N。

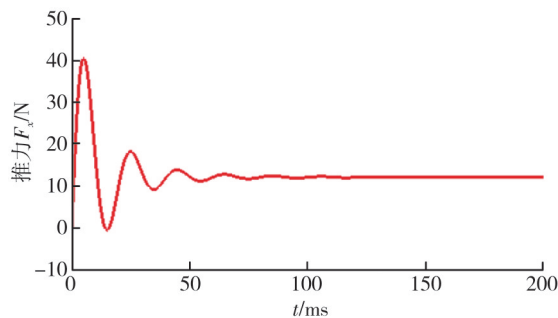


图7 直线感应电机的推力随时间变化的曲线

Fig. 7 Linear induction motor thrust force change curve with time

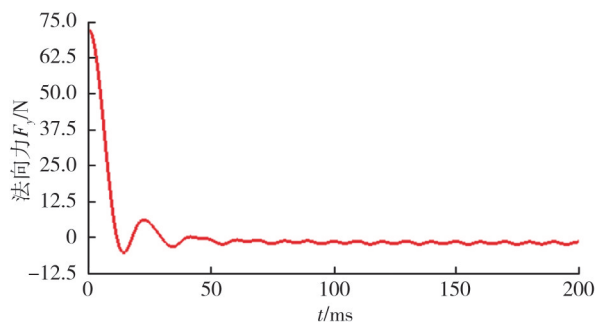


图8 直线感应电机的法向力随时间变化的曲线

Fig. 8 Linear induction motor normal force change curve with time

## 4 磁浮列车直线感应电机的参数化处理与EA多目标优化

### 4.1 直线感应电机的结构优化与EA多目标优化

#### 4.1.1 结构优化

结构优化设计<sup>[18]</sup>是指从众多设计序列中寻找结构的最优设计序列。在保证结构几何形状满足规范要求的前提下,通过改变结构几何尺寸、材料类型等一些设计变量,可以在工程系统中合理配置设计资源。通过优化,一方面可以节省材料的用量,另一方面可以降低成本。

ANSYS优化模块采用了三大优化变量来描述优化过程。1)将设计变量作为自变量,定义其取值范围,通过改变自变量的取值得到优化结果;2)状态变量可以是设计变量的函数,也可以

独立于设计变量,可以有上限和下限,也可以只有单边限制;3) 目标函数是设计变量的函数,通过改变设计变量的值来改变目标函数的值。本文就采用此优化模块来优化直线感应电机的结构。

#### 4.1.2 EA 多目标优化

多目标优化的过程可以视为是对目标函数在一定约束限制下进行最大化或最小化<sup>[19-20]</sup>。多目标、多个等式和不等式约束的多目标优化问题可表示为式(10)。

$$\begin{aligned} & \text{Max/Min } f_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{obj}}, \\ & \text{满足} \\ & \begin{cases} g_k(x) = 0, & k = 1, 2, \dots, K, \\ h_l(x) \leq 0, & l = 1, 2, \dots, L, \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $x$  为优化问题的变量;  $f_i(x)$  为目标函数;  $N_{\text{obj}}$  为优化目标的个数;  $K$  和  $L$  分别为等式约束和不等式约束的个数。

在实际应用中,大多数优化问题都是多目标优化问题,需要满足多个目标上的最优值。多目标优化问题有许多可能的解,这些可能的解共同构成帕累托解集,即帕累托最优解集,这个集合中的解必须同时满足所有约束条件。优化问题需要满足多个目标函数,这些目标函数可能相互冲突、相互制约。此时,优化将具有很强的耦合关系,这是非常复杂的。因此,如果想要简化目标函数,有时可以把一些目标函数看作约束。

首先假设存在多个可能方案和多个不同的目标函数, Pareto 最优将同时满足:

- 1) 至少有一个目标函数的计算结果可以更好,即至少有一个目标函数返回的值更好;
- 2) 其他目标函数的计算结果不会变差。

这样用新方案代替旧方案的过程,即为 Pareto 改进。反复进行 Pareto 改进,最终将会出现一个方案无法再进行 Pareto 改进。此时,该方案即为 Pareto 效率或 Pareto 最优。

常见的多目标优化算法有粒子群优化(PSO)、人工神经网络(ANNs)和多目标进化算法(EA)等。本文采用 EA 算法对直线感应电机的电磁力进行优化。

#### 4.2 直线感应电机的次级厚度参数化对电磁推力和法向力的影响

在 ANSYS Maxwell 2D 的绘图区中将次级铝板和钢板的  $Y$  坐标设为变量  $-d$ , (原始  $d$  为 2 mm), 则次级铝板厚度为  $2d$ , 次级钢板厚度为  $4d$ , 选择

Optimetrics 优化器添加参数,扫描变量  $d$ , 线性步长的起点设为 1 mm, 终点设为 2.2 mm, 步长为 0.2 mm, 分别得到图 9 和图 10 所示的不同  $d$  值时的推力、法向力曲线以及图 11 和图 12 所示的平均推力、法向力随  $d$  变化的曲线。

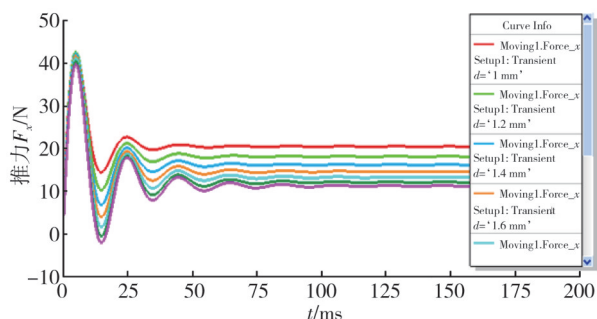


图 9 不同  $d$  值的推力曲线

Fig. 9 Thrust curves of different values of  $d$

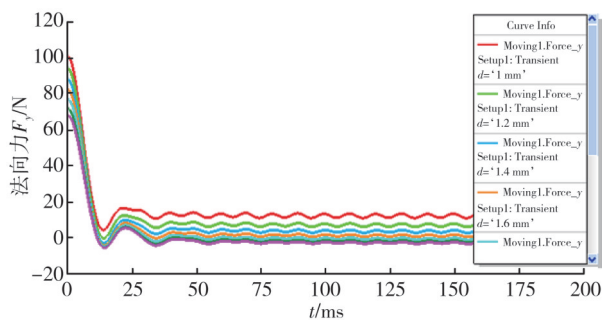


图 10 不同  $d$  值的法向力曲线

Fig. 10 Normal force curves of different values of  $d$

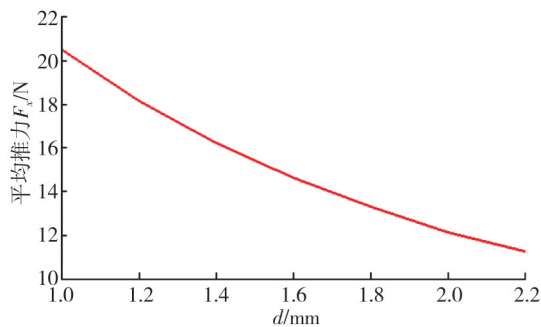


图 11 平均推力随  $d$  变化的曲线

Fig. 11 Change curve of average thrust with  $d$

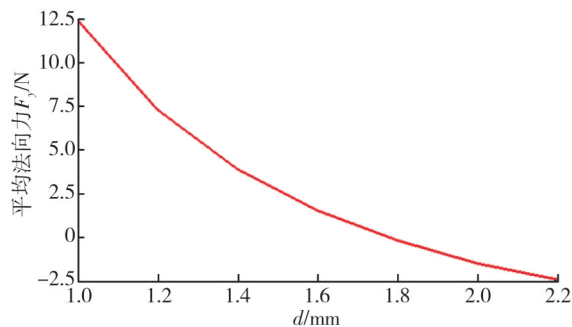


图 12 平均法向力随  $d$  变化的曲线

Fig. 12 The curve of the mean normal force with  $d$

由图9~图12可以看出:随着次级铝板和钢板厚度的逐渐增大,直线感应电机的推力和法向力达到稳态时的值都越来越小。 $d$ 值每增加0.2 mm,推力就平均减少约1.53 N,法向力平均减少约2.5 N。 $d$ 值为1 mm时,直线感应电机的推力和法向力都达到最大<sup>[21]</sup>,此时次级铝板厚度为2 mm,次级钢板厚度为4 mm。因此,设计直线感应电机时,在机械强度允许的范围内,可以通过适当减小次级厚度使直线感应电机的结构更合理、性能更突出,而且还能节省材料和节约成本。

#### 4.3 直线感应电机的EA多目标优化对电磁推力和法向力的改进

优化前直线感应电机的电磁推力和法向力较小,为了提高电磁推力和法向力,本文基于optiSLang和Workbench平台进行了直线感应电机优化设计。在原有模型的基础上,建立工程项目,设定速度、次级铝板厚度和次级钢板厚度等优化变量,然后设置电磁推力和法向力的最大值等优化目标。

目标函数是要通过多目标优化得到最大的电磁推力和法向力,即 $\text{Max}(F_x, F_y)$ ,速度、次级厚度对电磁力的影响较大,故以速度 $v$ 、次级铝板厚度 $d_1$ 和次级钢板厚度 $d_2$ 为参数变量。优化前的速度为0 m/s,次级铝板和次级钢板的厚度分别为4 mm和8 mm,由4.2节分析可知次级厚度越大电磁力越小,故选取 $v$ 的范围为 $[0, 5]$ , $d_1$ 为 $[2, 5]$ , $d_2$ 为 $[4, 10]$ ,得到优化设计的目标函数和约束函数为

$$\begin{cases} \text{Max}(F_x, F_y) = f(v, d_1, d_2), \\ 0 \leq v \leq 5, \\ 2 \leq d_1 \leq 5, \\ 4 \leq d_2 \leq 10. \end{cases} \quad (11)$$

选用EA取样方法,样本点数量设为50,生成基于多目标优化的模块。运行得到的多目标优化结果如图13所示。横纵坐标分别为两个优化目标的电磁推力和法向力,所有的优化计算结果以散点形式分布在图形中,图形中红线部分为Pareto Front解集(即求解过程中的最优解集),蓝色点为不满足设定目标的结果点,黑色点为其他求解结果。

通过对图13中的最优解集进行分析和计算,最终确定图中48号点为最优解,将其优化变量数据(速度0.001 m/s、次级铝板厚度2.895 mm和次级钢板厚度5.789 mm)代入ANSYS Maxwell模型中得到新的电磁推力和法向力曲线,并与优化前的电磁推

力和法向力曲线进行对比,如图14和图15所示。当 $t=0.14$  s电磁推力和法向力曲线趋于稳定时,优化后的推力为15.77 N,比优化前的推力提升了3.62 N,提高了约29.79%;此时优化后的法向力为3.732 N,比优化前的法向力提升了2.503 N。上述优化效果显著,得到了较好的电磁推力和法向力。

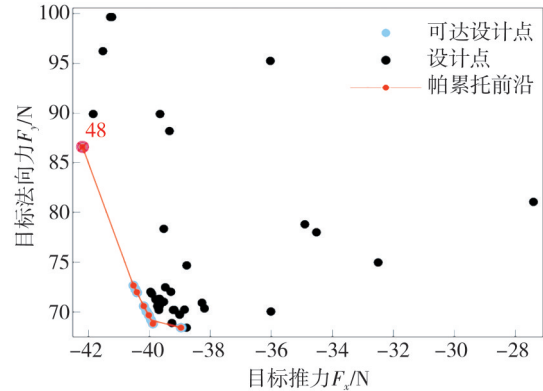


图13 优化结果的2D散点分布图

Fig. 13 2D scatter distribution of optimization results

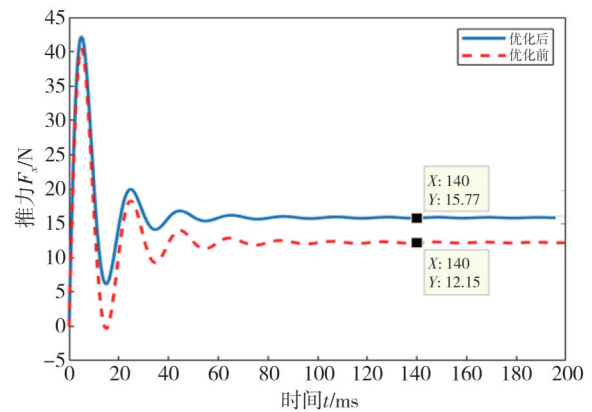


图14 EA优化前后电磁推力的对比

Fig. 14 Comparison of electromagnetic thrust before and after EA optimization

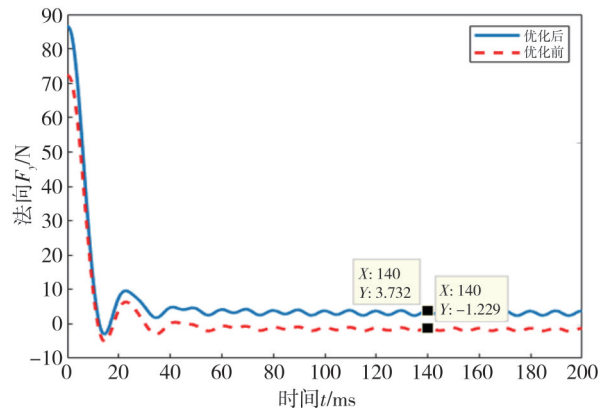


图15 EA优化前后电磁法向力对比图

Fig. 15 Comparison of electromagnetic normal force before and after EA optimization

## 5 结 论

本文分析了磁浮列车直线感应电机的结构、工作原理及特性,利用 ANSYS Maxwell 2D 软件的瞬态求解器建立了有限元模型,得到了直线感应电机的推力和法向力的特性曲线,并用有限元法对其进行了分析。将次级厚度进行参数化处理,使用 ANSYS 软件的优化模块进行结构优化,分析了次级厚度对直线感应电机推力、法向力的影响。同时,使用 EA 多目标优化方法,基于 optiSLang 和 Workbench 平台进行了直线感应电机优化设计。经过优化,电磁推力和法向力较优化前有了大幅提升。

相比已有的研究,本文使用参数化优化和 EA 多目标优化相结合的方法,有效提高了电磁力,为直线感应电机设计时结构和性能的提高以及材料和成本的节约提供了依据。本研究基于直线电机 2D 模型,后续将继续研究 3D 模型并使用更好的优化算法。

### 参考文献:

- [ 1 ] 王滢,刘学龙,刘方麟,等. 中低速磁浮列车速度对直线感应电机牵引力影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1671-1677.  
WANG Ying, LIU Xuelong, LIU Fanglin, et al. Effect of train speed on traction of linear induction motor for medium-low speed maglev train[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(12): 1671-1677. (in Chinese)
- [ 2 ] 刘希军,崔哲,高丽霞,等. 无人机电磁弹射用直线感应电机电磁推力分析[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 16-19.  
LIU Xijun, CUI Zhe, GAO Lixia, et al. Analysis of electromagnetic thrust of linear induction motor for electromagnetic ejection of UAV[J]. Computer Simulation, 2022, 39(8): 16-19. (in Chinese)
- [ 3 ] JEONG J H, CHOI J Y, SUNG S Y, et al. A Study on the thrust characteristic analysis of linear induction motor according to secondary reaction plate using the container scanner vehicle[J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2016, 65(1): 65-72.
- [ 4 ] MA J Q, ZHU Y P, JIANG J. A Novel method to calculate the thrust of linear induction motor based on instantaneous current value [J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(2): 76-81.
- [ 5 ] DOMÍNGUEZ J A, DURO N, GAUDIOSO E. Finite element analysis of different transverse flux linear induction motor models to improve the performance of the main magnetic circuit[J]. Machines, 2024, 12(2): 1-31.
- [ 6 ] HAN Y, NIE Z L, XU J, et al. Control strategy for optimising the thrust of a high-speed six-phase linear induction motor[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(11): 2260-2268.
- [ 7 ] HU H L, ZHONG J P, CHEN Y H, et al. Research on sectional constant slip control of linear induction motor based on parameter self-tuning [J]. Energy Reports, 2023, 9(10): 979-989.
- [ 8 ] 吕刚,罗志昆,曾迪晖,等. 次级断续时直线感应牵引电机的分段式等效电路与特性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 944-953.  
LÜ Gang, LUO Zhikun, ZENG Dihui, et al. A piecewise equivalent circuit and characteristic analysis of linear induction traction motor when the secondary is discontinuous[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 944-953. (in Chinese)
- [ 9 ] 孟大伟,杜超. 直线感应电机的特殊次级结构推力特性研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(6): 29-39.  
MENG Dawei, DU Chao. Thrust characteristics research of linear induction motor with special secondary structure [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(6): 29-39. (in Chinese)
- [ 10 ] 葛研军,陈伟,王鹏,等. 短初级单边型直线感应电机倒梯形次级结构电磁特性研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 32-38.  
GE Yanjun, CHEN Wei, WANG Peng, et al. Study on electromagnetic characteristic of inverted trapezoidal secondary structure of short-primary single-sided linear induction motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(4): 32-38. (in Chinese)
- [ 11 ] 徐伟,李耀华,孙广生,等. 短初级单边直线感应电机新型等效电路[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 80-86.  
XU Wei, LI Yaohua, SUN Guangsheng, et al. New equivalent circuits of short primary single-sided linear induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9): 80-86. (in Chinese)
- [ 12 ] 吕刚. 轨道交通直线感应电机与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [ 13 ] 张树鑫,黄苏丹,曹广忠,等. 轨道交通用直线电动机的电磁力特性分析[J]. 微特电机, 2021, 49(12): 23-28.  
ZHANG Shuxin, HUANG Sudan, CAO Guang-

- zhong, et al. Analysis of electromagnetic force characteristics of linear motors for rail transit[J]. *Small and Special Electrical Machines*, 2021, 49(12): 23-28. (in Chinese)
- [14] 龙遐令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 刘慧娟, 张振洋, 宋腾飞, 等. ANSYS Maxwell + Workbench 2021 电机多物理场耦合有限元分析从入门到工程实战[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [16] 卢琴芬, 叶云岳. 基于场路结合模型的深槽式单相直线感应电机特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(18): 89-93.  
LU Qinfen, YE Yunyue. Characteristics study of single phase deep-slot linear induction motor based on field-circuit combined model [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(18): 89-93. (in Chinese)
- [17] 秦伟, 吕刚, 马育华, 等. 无铁心直线感应悬浮电机非均匀气隙工况的三维磁场与力特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(9): 3564-3574.  
QIN Wei, LÜ Gang, MA Yuhua, et al. 3D analytical model to analysis the magnetic field and characteristic of coreless linear induction maglev motor for uneven air gap conditions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(9): 3564-3574. (in Chinese)
- [18] 严云. 基于 ANSYS 参数化设计语言的结构优化设计[J]. *华东交通大学学报*, 2004, 21(4): 52-55.  
YAN Yun. Design of structure optimization with APDL [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2004, 21(4): 52-55. (in Chinese)
- [19] 彭珍. 基于 NSGA-II 的圆筒型永磁直线电机的多目标优化算法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [20] 吴思玥. 基于代理模型的直线感应电机多目标优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [21] 裘昌利. 磁浮列车用直线感应电机的 Maxwell 2D 仿真及实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.