

磁浮管轨直线感应电机牵引悬浮协同优化设计^{*}

杨杰^{1,2} 张国华^{1,2} 胡海林^{1,2} 葛琼璇^{1,3}(1. 江西理工大学电气工程与自动化学院 赣州 341000; 2. 江西省磁悬浮技术重点实验室 赣州 341000;
3. 中国科学院电工研究所 北京 100080)

摘要:在磁浮管轨运输系统中,采用悬浮电磁铁与直线感应电机(linear induction motor, LIM)同平面安装方案,可有效减小盾构面积,降低建设成本;同时,LIM法向力能够提供辅助悬浮力,提高系统综合能效。围绕牵引力与法向力协同优化中建模求解误差大、优化复杂等问题,提出一种基于响应面法的一体化LIM优化设计方法。首先,确立牵引力及法向力设计目标,完成电机初始设计。其次,结合Box-Behnken试验设计法和方差分析法,分析电机参数对牵引力和法向力的影响规律,确定敏感参数集。再次,利用响应面法建立关于敏感参数的二阶代理模型,并通过了模型拟合度检验。在加工精度与电机饱和等约束下,通过二代非支配排序遗传算法对代理模型进行多目标寻优。最后,利用Maxwell软件对优化前后的电机进行时步有限元仿真。结果表明,在工频、额定电流15 A的工况下,初始电机的牵引力和法向力分别为305.9和-60.5 N,优化后为309.4和-309.3 N,优化后性能指标显著提升,设计误差分别为3.13%和3.10%,表明了协同优化设计方法切实有效。

关键词:牵引悬浮一体化;响应面法;代理模型;敏感度分析;多目标优化

中图分类号: TM359.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Collaborative optimization design of maglev tube rail linear induction motor traction and suspension

Yang Jie^{1,2} Zhang Guohua^{1,2} Hu Hailin^{1,2} Ge Qiong璇^{1,3}(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Key Laboratory of Maglev Technology of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China;
3. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In the maglev pipe rail transportation system, adopting the same plane installation scheme of suspended electromagnets and linear induction motors (LIM) can effectively reduce the shield tunneling area and lower construction costs; At the same time, LIM normal force can provide auxiliary suspension force, improving the overall energy efficiency of the system. A response surface methodology based integrated LIM optimization design method is proposed to address the issues of large modeling errors and complex optimization in the collaborative optimization of traction and normal forces. Firstly, establish the design goals for traction and normal force, and complete the initial design of the motor. Secondly, combining Box Behnken experimental design method and analysis of variance method, analyze the influence of motor parameters on traction force and normal force, and determine the sensitive parameter set. Once again, a second-order surrogate model for sensitive parameters was established using response surface methodology and passed the model fitting test. Under constraints such as machining accuracy and motor saturation, a second-generation non dominated sorting genetic algorithm is used to perform multi-objective optimization on the surrogate model. Finally, use Maxwell software to perform time-step finite element simulation on the motor before and after optimization. The results showed that under the working conditions of power frequency and rated current of 15 A, the initial traction and normal force of the motor were 305.9 and -60.5 N, respectively, and optimized to 309.4 and -309.3 N, respectively. The performance indicators were significantly improved after optimization, with design errors of 3.13% and 3.10%, respectively. This indicates that the collaborative optimization design method is practical and effective.

Keywords: integrated traction and suspension; response surface method; proxy model; sensitivity analysis; multi-objective optimization

收稿日期:2023-12-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52262050)项目资助

0 引言

城市交通拥堵问题日趋严重,依靠地面交通的传统物流运输方式,受天气和交通状况影响较大,运输效率低。管道物流运输系统利用地下管网进行物流运输,干扰因素较少,运输效率高。而采用直线感应电机(linear induction motor, LIM)驱动的磁浮管轨运输系统^[1]能够有效减小地下盾构面积,降低工程建设成本,同时有着无传动机构,加减速能力强等特点^[2]。但传统磁浮管轨运输系统仍存在一些有待优化提升的方面,如 LIM 气隙较大^[3-4]、效率低、LIM 的法向力无法利用。而内嵌式磁浮管轨系统悬浮电磁铁与直线电机同面安装,结构紧凑,有效减小电机气隙,提高效率。同时电机产生法向力^[5-6]能够提供部分悬浮力,降低悬浮和牵引能耗,提高系统综合能效。为满足内嵌式磁浮结构的要求,需对满足牵引力及法向力要求的一体化 LIM 优化设计方法进行深入研究。

模型构建是电机优化设计的重要环节,目前对于 LIM 模型多采用等效电路^[7]的形式。Kumar 等^[8]研究了 LIM 牵引特性,介绍了短次级 LIM 的设计方法和研制过程,并推导了等效电路模型,然而模型未考虑边端效应,存在一定误差。Lan 等^[9]提出了一种考虑次级感应板端部伸长度的改进等效电路,解决了单边 LIM 复合次级解析模型存在的模型构建困难、工程实用性差的问题,但是电机的特性求解依旧复杂,精度不高。为了进一步降低电机特性求解的复杂度,代理模型也逐步被应用于电机优化设计中。孔令星等^[10]融合 Kriging 代理模型优化方法和高效全局优化算法的迭代加点策略对 LIM 进行优化,能够做到在较少的计算成本下快速得到全局最优解。Rad 等^[11]采用了响应面方法构建了电机特性与电机参数之间的响应函数,替代了用等效电路构建电机模型求解特性的方法,简化了大量公式计算。Ji 等^[12]采用响应面的方法研究了电机结构参数与电机脉动、效率和功率因素的关系,推导了 LIM 的最优模型。

LIM 参数较多,且不同参数对电机特性的影响方向并不一致,单一的参数扫描优化耗时长,优化效率不高。为了提高电机优化效率,部分学者引入了智能寻优算法,如 Wang 等^[13]将差分进化算法应用于短初级双边 LIM 的

优化设计中,与传统粒子群算法和遗传算法进行比较,差分进化算法在电机优化方面表现出更强的收敛性和稳定性,显著提高电机性能。徐伟等^[14]搭建了考虑逆变器谐波影响的“T”型等效电路,将优化变量进行分层并利用二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms, NSGA-II)进行多层优化,提升了电机的功率因素和效率。吕刚等^[15]建立了考虑端部效应和帽形次级结构的 LIM 等效电路,并采用遗传算法通过优化帽形次级结构参数来优化电机的推力、功率因素和效率等特性^[16]。Jiang 等^[17]和 Shiri 等^[18]将法向力考虑到电机的多目标优化中,研究了不同参数对法向力的影响,对目标配给不同权重系数,并利用遗传算法进行优化,所得不同优化方案能针对性地提升 LIM 性能,但法向力被视作干扰力,并没有被利用起来。

综上所述,在内嵌式磁浮管轨系统中,一体化 LIM 需要同时满足法向力和牵引力需求。同时针对一体化 LIM 等效电路建模复杂和电机参数优化困难的问题,提出了一种基于响应面法的牵引-悬浮一体化 LIM 优化设计方法,利用响应面法构建牵引力和法向力的代理模型,并通过 NSGA-II 算法对电机的牵引力和法向力进行多目标寻优。

1 磁浮管轨系统结构及一体化 LIM 初始设计

1.1 磁浮管轨系统结构

内嵌式磁浮管轨运输系统结构示意图如图 1 所示,系统主要由用于车体悬浮的悬浮部分和用于驱动的牵引部分组成,这两部分采用同平面安装的方式,结构更为紧凑,减小了盾构面积从而降低工程建设成本,直线电机气隙减小至 7 mm 甚至更小,提高电机效率。悬浮部分由电磁铁、F 轨和悬浮控制器共同组成,为车体提供主要悬浮力。牵引部分由 LIM 及牵引控制系统组成, LIM 初级与电磁铁同面安装,次级与 F 轨同面安装,其中,初级由硅钢片叠压而成的铁心和三相交流绕组共同组成,次级是由铝板和次级背铁板构成。牵引部分为系统提供牵引力,同时该结构还可提供部分悬浮力。

图 2 所示为 LIM 的主要结构,其中, b_s 为槽宽, h_a 为轭部高度, d 为次级铝板厚度, g 为气隙高度, h_s 为槽高,

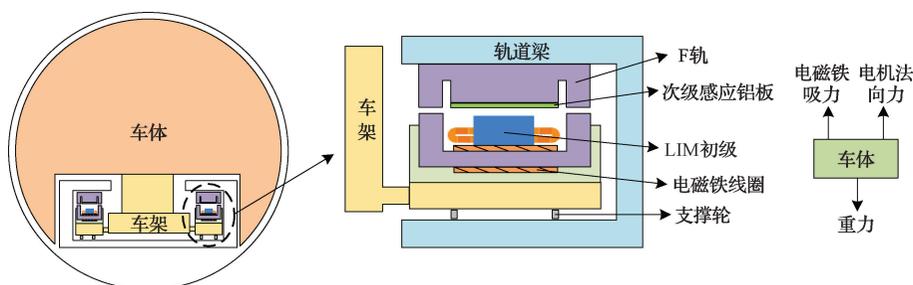


图 1 管轨列车牵引和悬浮结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traction and suspension structure of pipe rail trains

d_{Fe} 为背铁厚度和滑差频率 f_s , 这些结构和电磁参数都会影响电机的性能, 且不同参数的影响方向并不一致, 这也给 LIM 优化带来了难题。

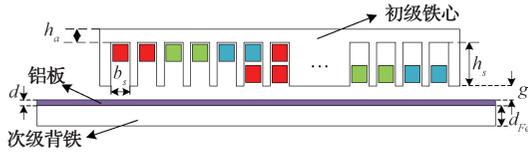


图2 LIM 纵向结构

Fig. 2 LIM vertical structure diagram

1.2 LIM 初始设计

本文以一台小型 LIM 为案例, 进行优化设计, 从而验证所提出方法的可行性。首先, 假设电机的提供与牵引力同等量级的法向力, 给定额定工况下牵引力和法向力并由初步设计^[19]可得电机参数如表 1 所示, 其中电机三维结构参数通过式(1)计算得。

表 1 LIM 初始设计电机参数

Table 1 LIM Initial design motor parameters

需求参数	符号	数值
额定电磁推力/N	F_x	300
额定法向力/N	F_y	-300
初级铁芯叠压厚度/mm	L_s	130
电机长度/mm	L	500
初级高度/mm	h	50
次级铝板厚度/mm	d	4
次级铁板厚度/mm	d_{Fe}	20
槽距/mm	t_1	12
极数	p	7

$$\begin{cases} L = 2p\tau + b_t \\ L_s = \frac{\pi \cdot P'}{2 \cdot 4.44 \cdot \alpha_w \cdot B_\delta \cdot AS \cdot \tau^2 \cdot f_N \cdot p \cdot k_{w1}} \\ h = h_t + h_a \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ 为电机极距; b_t 为边端齿宽; P' 为电机视在功率;

α_w 为绕组缩减系数; B_δ 为磁负荷; AS 为电负荷; f_N 为额定频率; k_{w1} 为绕组系数; h_t 为槽高; h_a 为初级轭部高度。由于初始设计的电机并不考虑法向力, 所以并不能够同时满足牵引力和法向力的需求, 还需对电机进行建模和优化。

2 构建响应面模型

针对传统 LIM 的牵引力和法向力求解假设条件较多、求解过程复杂这一问题, 本文提出利用响应面方法来重新构建牵引力和法向力模型。由于电机参数较多, 首先对电机参数进行敏感度分析, 从众多电机参数中提取出对电机牵引力和法向力影响较大的参数来构建模型, 以降低优化的复杂性。

2.1 参数敏感度分析

选取电机的 7 个主要参数作为分析变量, 如表 2 所示。根据三水平七因素试验设计原则, 若采用传统单参数扫描方法需要进行 2 187 组试验, 试验数据量大, 耗时长。为了减少计算量的同时还能保证系统的精度, 采用 Box-Behnken Design 的试验设计方法来构造试验, 只需构造 58 组试验就可以很好的表征电机的响应性能, 使响应函数达到较高的精度。

表 2 LIM 主要参数取值范围

Table 2 Range of main LIM parameters

参数	最小值	最大值
槽宽 x_1 /mm	4	8
槽高 x_2 /mm	25	45
气隙高度 x_3 /mm	4	10
初级轭部高度 x_4 /mm	10	30
滑差频率 x_5 /Hz	5	15
次级铝板厚度 x_6 /mm	3	5
初级铁板厚度 x_7 /mm	10	30

利用 Maxwell 分别进行了 58 组试验, 其中部分试验设计数据与有限元所得牵引力和法向力结果如表 3 所示。

表 3 Box-Behnken Design 试验

Table 3 Box behnken design test

序号	x_1 /mm	x_2 /mm	x_3 /mm	x_4 /mm	x_5 /mm	x_6 /mm	x_7 /mm	F_x /N	F_y /N
1	6	35	7	20	10	4	20	305.926 3	-60.479 9
2	6	35	7	30	5	3	20	213.700 3	-353.968
3	4	35	7	20	10	3	30	282.921 2	-367.907
4	6	25	7	20	5	4	10	210.116 6	-200.628
5	8	35	7	20	10	3	10	208.800 8	-391.663
6	6	35	4	10	10	4	10	423.063 2	-270.718
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
58	6	25	7	20	5	4	30	210.552 1	-205.932

在试验完成后,为评价所构建的参数的敏感度,引入方差分析的方法来确定单因素和交叉因素对电机牵引力和法向力的影响,方差分析的指标公式如下:

$$\begin{cases} MS_w = \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n Z_{ij})^2}{n(n-1)k} - \frac{(\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n Z_{ij})^2}{n(n-1)k^2} \\ MS_b = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \frac{Z_{ij}^2}{k-1} - \frac{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n Z_{ij})^2}{n(k-1)} \\ F = \frac{MS_b}{MS_w} \end{cases} \quad (2)$$

式中: MS_b 为组间方差; MS_w 为组内方差; k 为变量数; n 为输入变量数; Z 为响应值。将计算所得的 F 值与 F 临界值表结果进行对比,当计算结果的 F 值大于 F 临界值,则表明组间差异明显,即对应因子对目标值的影响较大,可视作为敏感参数。

1) 单因素方差分析

单因素对牵引力和法向力的影响如图 3 所示,虚线表示 F 临界值,当 F 值超过这一阈值时,可认为该参数具有较好的敏感度。由图 3 可以看出,所选电机参数中槽宽 x_1 、气隙高度 x_3 、滑差频率 x_5 和铝板厚度 x_6 均对电机牵引力和法向力敏感,其中气隙高度、滑差频率对牵引力的影响较为显著,而气隙高度、滑差频率和铝板厚度对法向力的影响较大。气隙大小和滑差频率会较大程度影响气隙磁密的幅值,从而影响牵引力和法向力,而铝板厚度则是通过影响次级等效电阻来影响牵引力。

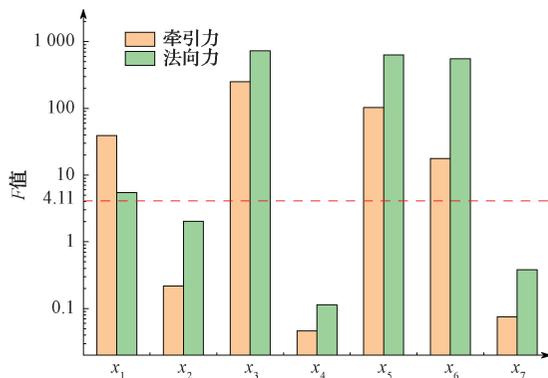


图 3 单因素对电机牵引力和法向力的影响
Fig. 3 The influence of single factor on motor traction and normal force

2) 交叉因素方差分析

(1) 交叉因素对牵引力的影响

交叉参数对牵引力影响的 F 值图如图 4 所示,其中 x_3 、 x_6 (气隙高与次级铝板厚) 的共同作用对牵引力的影响最为显著,由其二维曲面影响(图 5)可明显看出,牵引力与气隙高度和铝板厚度呈负相关关系,且受其影响较大,

气隙越大,牵引力。这是由于气隙和铝板厚度的增加都直接或者间接的导致电机等效气隙的增大,使气隙磁密纵向分量下降,最终使得电机输出推力下降。

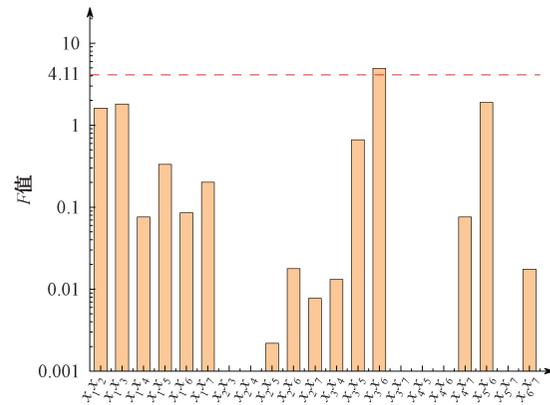


图 4 交叉参数对电机牵引力的影响
Fig. 4 The influence of cross parameters on motor traction force

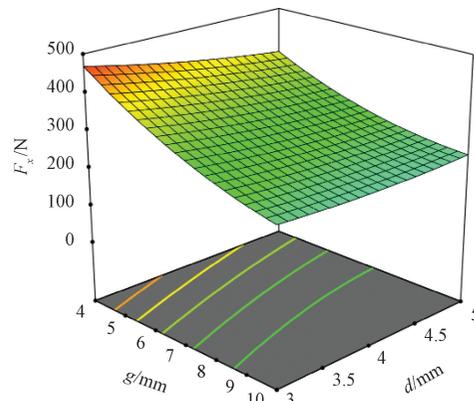


图 5 气隙高度和铝板厚度对牵引力的影响
Fig. 5 The influence of air gap height and aluminum plate thickness on traction force

(2) 交叉因素对法向力的影响

图 6 所示为交叉参数对电机法向力影响的 F 值图,其中只有气隙高 x_3 和滑差频率 x_5 与气隙高 x_3 和铝板厚度 x_6 的交叉作用的 F 值超过临界值,所以对法向力影响较为明显。

为定性观察不同交叉因素对法向力的影响效果,根据实验数据绘制了影响显著的交叉参数(滑差频率、气隙高度和铝板厚度)对电机法向力的三维影响图,如图 7 和 8 所示,气隙或铝板厚度越大,等效气隙越大,在电流源激励不变时会使气隙磁密减小,将导致法向力的绝对值减小。而滑差频率则是影响 LIM 的纵向边端效应,滑差频率越大,纵向边端效应对电机磁场影响越小,气隙磁场畸变率越小,气隙磁密沿电机运动方向分量更小,使法向力稳态

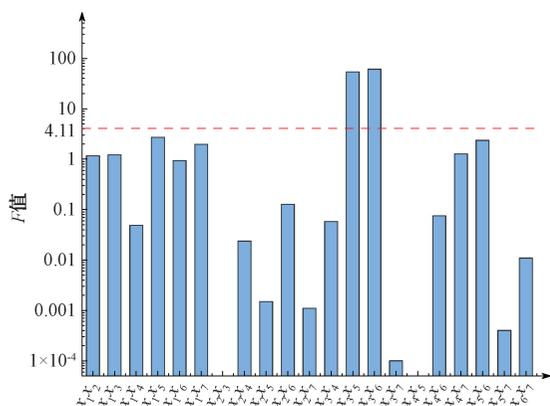


图6 交叉因素对电机法向力的影响
Fig. 6 The influence of cross factors on the motor normal force

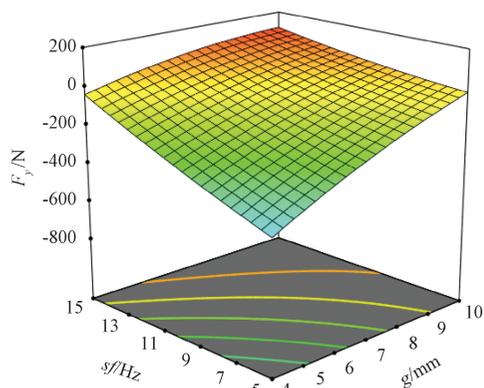


图7 滑差频率和气隙高度对法向力的影响
Fig. 7 Effect of slip frequency and air gap height on normal force

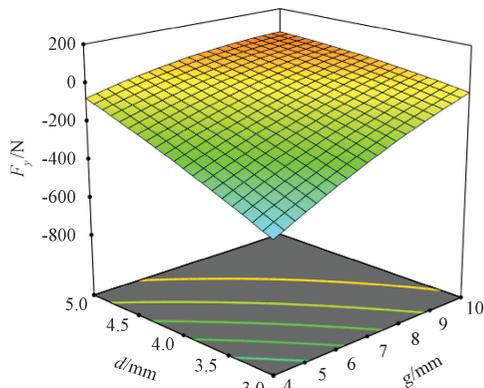


图8 铝板厚度和气隙高度对法向力的影响
Fig. 8 The influence of aluminum plate thickness and air gap height on normal force

值减小。

综上,槽宽、气隙高、滑差频率和次级铝板厚度是影响电机牵引力和法向力的敏感参数,所以选择这4个参数构建牵引力和法向力的响应面模型。

2.2 构建法向力的响应面代理模型

响应面法是一种利用试验设计方法和回归方程分析来寻找影响因素与响应之间的函数关系,其主要应用于化工、材料和生物学领域,近些年来也逐渐引入电机优化方向来,取得了不错的优化效果。LIM是一个非线性、多变量、强耦合的系统,其可用二阶模型如下:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3)$$

式中: n 为输入变量数量; β_0 、 β_i 、 β_{ii} 和 β_{ij} 分别为回归方程常数项、一次项系数、二次平方项系数和二次交叉项系数; ϵ 为误差。设槽宽 x_1 、气隙高 x_2 、滑差频率 x_3 和次级铝板厚度 x_4 , 通过回归分析方法得到的二阶牵引力和法向力模型分别如下:

$$F_x = 129.32 + 250.91x_1 - 99.03x_2 + 39.06x_3 - 143.27x_4 - 0.54x_2x_3 + 7.34x_2x_4 - 22.4x_1^2 + 3.21x_2^2 - 1.19x_3^2 + 8.48x_4^2 \quad (4)$$

$$F_y = -4293.83 + 582.04x_1 + 240x_2 + 47.25x_3 + 425.81x_4 - 4.56x_2x_3 - 24.23x_2x_4 - 49.03x_1^2 - 3.51x_2^2 + 0.59x_3^2 - 16.23x_4^2 \quad (5)$$

2.3 模型拟合度检验

为了验证二阶代理模型的合理性和有效性,通过对模型进行拟合度检验来评估代理模型的可靠性。选取决定系数 R^2 、修正的决定系数 R_A^2 和预测的决定系数 R_p^2 3个数据对拟合程度进行分析,如式(6),3个决定系数越接近1,则拟合效果越显著。

$$\begin{cases} R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \\ R_A^2 = 1 - \frac{m-1}{m-k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \\ R_p^2 = 1 - \frac{PRESS}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: m 为样本数; y_i 为第 i 个样本的响应值; \bar{y} 为响应均值; \bar{y} 为响应预测值; k 为因素个数。PRESS为预报平方和,最终根据实验数据计算得到的 R^2 、 R_A^2 和 R_p^2 结果如表4所示,可以看出,数值均大于0.9,表明牵引力和法向力代理模型均具有较好的拟合效果。且 R_A^2 与 R_p^2 的差值,满足经验法则对两者差值不大于0.2的需求,表明代理模型的预测值与实际值拟合程度较高,模型能够提供较好的预测结果。

表4 拟合精度指标
Table 4 Fit accuracy indicators

	R^2	R_A^2	R_p^2
牵引力	0.950 2	0.939 6	0.903 9
法向力	0.985 7	0.982 7	0.974 8

牵引力和法向力的模型预测值与实际值之间的关系如图9、10所示,对角线表示模型能够完全预测真实结果,可直观地看到,所有的样本点均分布在直线两侧离对角线较近的位置,表明所构建的牵引力和法向力的代理模型的预测值能够较好地与实际值相吻合。综上所述,二阶响应面模型拟合精度高,能够提供不错的预测效果,可用于后续多目标优化中。

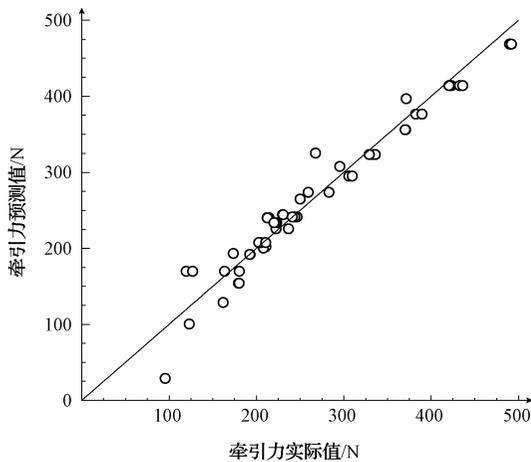


图9 牵引力的预测值与实际值

Fig. 9 Predicted and actual traction force values

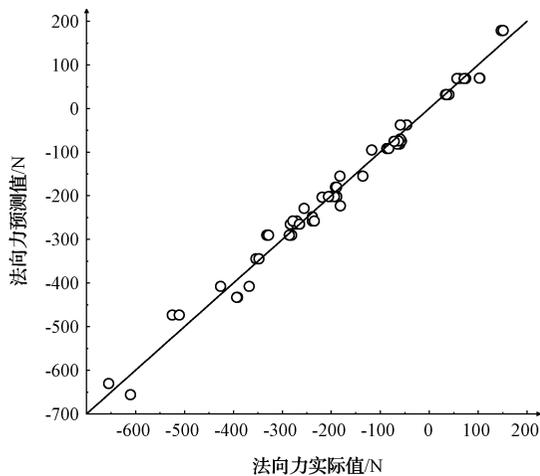


图10 法向力预测值与实际值的关系

Fig. 10 Relationship between predicted and actual values of normal force

3 LIM的多目标优化

LIM作为一个非线性、多变量、强耦合模型,其优化

过程通常较为复杂。由于不同目标之间存在非线性耦合关系,各目标之间的变化并不一致,往往在实现单一性能提升的同时会降低其他性能,难以获得对所有目标都是最优的解,优化得到的是多个目标的折中解(即 Pareto 解)。传统遗传算法虽然具备很好的全局搜索能力,可以快速找到最优解,但也存在着容易陷入早熟,搜索效率低,导致较优个体被丢弃的短板。NSGA-II 算法^[20]采用了快速非支配排序的方式,可以大幅提高搜索的效率;引入了精英策略,可以在满足种群多样性的同时保留最优个体;采用了拥挤度比较算子,能够提高种群的多样性。NSGA-II 在求解多目标问题上有着收敛性能好,搜索范围广的优点。所以本文提出采用 NSGA-II 来对 LIM 牵引力和法向力进行同时优化的方法。NSGA-II 算法优化流程如图 11 所示。

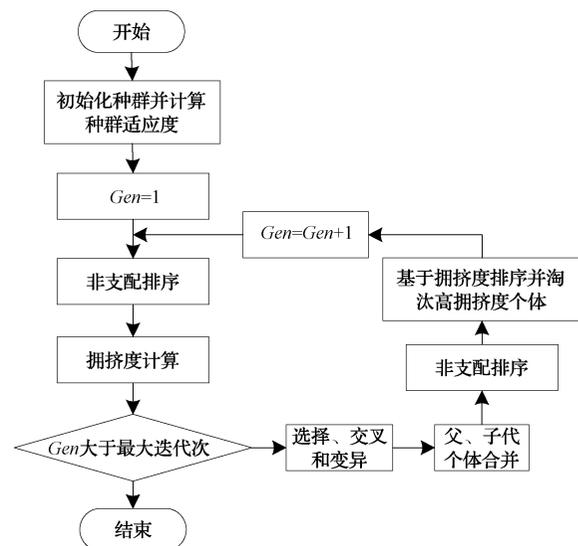


图11 NSGA-II 算法流程

Fig. 11 NSGA-II algorithm flowchart

选取电机的牵引力和法向力作为优化目标,将敏感参数槽宽 b_s 、气隙高度 g 、滑差频率 f_s 和次级铝板厚度 d_{Fe} 作为待优化变量,构建优化变量 $X(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 。同时,出于对加工精度和设计合理性的要求电机需满足如下的约束条件:

$$\begin{cases} L \leq 1000 \text{ mm}, h \leq 80 \text{ mm}, b_{tmin} \geq 3 \text{ mm}, \frac{h_s}{b_s} \leq 5 \\ B_t \leq 1.6 T, B_y \leq 1.3 T, 70\% < sf < 78\% \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 为电机长度; h 为电机高度; b_{tmin} 为最小齿宽; B_t 和 B_y 分别为齿部和轭部磁密大小; sf 为槽满率。构建目标函数如下所示:

$$\begin{cases} F_x = \left| \frac{F_{x1}(X) - F_{x0}(X)}{F_{x0}(X)} \right| \\ F_y = \left| \frac{F_{y1}(X) - F_{y0}(X)}{F_{y0}(X)} \right| \end{cases} \quad (8)$$

式中: $F_{x0}(X)$ 和 $F_{y0}(X)$ 为设计需求推力和法向力; $F_{x1}(X)$ 和 $F_{y1}(X)$ 为实际推力和法向力。经过 NSGA-II