

# 基于改进的NSGA-II的圆筒型永磁直线电机的多目标优化

彭 珍<sup>1</sup>, 刘春元<sup>2\*</sup>, 周振峰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江理工大学, 信息科学与工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>嘉兴学院, 信息科学与工程学院, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2023年3月28日; 录用日期: 2023年5月22日; 发布日期: 2023年5月29日

## 摘要

本文改进了传统的第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGAII), 以解决在圆筒型永磁直线电机功率和效率的多目标优化中, Pareto解集分布不佳且容易陷入局部最优解的问题。首先, 介绍电机的相关原理, 并建立电机的二维有限元模型, 根据模型计算电压、电流等数据; 其次, 使用敏感参数分析法从所有的电机结构参数中选择重要优化变量, 并建立优化模型、计算电机的电磁参数; 最后, 对电磁参数数据训练, 以改进的NSGA-II为优化算法的多目标优化模型, 优化电机的功率和效率, 并对结果进行验证。仿真结果验证了所提出的改进的NSGA-II的优越性。

## 关键词

圆筒型永磁直线电机, 多目标优化, 功率, 非支配排序遗传算法

# Multi-Objective Optimization of Tubular Permanent Magnet Linear Motor Based on Improved NSGA-II

Zhen Peng<sup>1</sup>, Chunyuan Liu<sup>2\*</sup>, Zhenfeng Zhou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>College of Information Science and Engineering, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2023; published: May 29<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 彭珍, 刘春元, 周振峰. 基于改进的 NSGA-II 的圆筒型永磁直线电机的多目标优化[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2782-2790. DOI: 10.12677/mos.2023.123255

## Abstract

This article improves the traditional NSGA-II genetic algorithm to solve the problem of poor distribution of Pareto solution set and easy local optimal solution in multi-objective optimization of power and efficiency of Tubular Permanent Magnet Linear Motor. Firstly, introduce the relevant principles of the motor and establish a two-dimensional finite element model of the motor. Calculate voltage, current and other data based on the model. Secondly, use the sensitive parameter analysis method to select important optimization variables from all motor structural parameters and establish an optimization model to calculate the motor's electromagnetic parameters. Finally, the electromagnetic parameter data is trained, and the improved NSGA-II is used as the multi-objective optimization model of the optimization algorithm to optimize the power and efficiency of the motor, and the results are verified. The simulation results verify the superiority of the proposed improved NSGA-II.

## Keywords

Tubular Permanent Magnet Linear Motor, Multi-Objective Optimization, Power, Non-Nominated Sorting Genetic Algorithm

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

圆筒型永磁直线电机(Tubular Permanent Magnet Linear Motor, TPMLM)具有结构简单、推力密度高、气隙磁场高且不存在扁平型永磁直线同步电机(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)的横向端部效应等特点,广泛应用于智能制造[1]、震荡系统[2]、以及海浪发电[3]等领域,故此,研究出更高性能的 TPMLM 具有很好的现实意义。

目前,国内外学者在 TPMLM 的多目标优化方面已开展了大量研究,并提出了多种控制方法[4],在对电机优化过程中采用单一控制手段研究后发现,仍存在制动能量回馈效率低及制动转矩脉动大等不足[5]。研究者们通过优化其再生制动控制参数进行改进,提出了诸如结构优化[6]、分层响应面法[7]、粒子群优化算法[8]、黑洞算法[9]、多目标优化算法[10]等方法,对 TPMLM 进行定位力、转矩、效率以及功率优化等多目标优化。

文献[11]采用正交实验法,以永磁体厚度、气隙长度、定子齿的宽度、定子槽口的宽度和极弧系数作为优化变量,通过对实验数据分析对比,对电机效率和齿槽转矩进行了优化,但该方法需要大量试验和测试,且很容易陷入局部最优解而无法找到全局最优解;文献[12]基于有限元模型,使用表面响应法和粒子群优化算法相结合的多目标优化设计方法计算得到了横向磁通永磁直线电机的最优结构参数,多目标优化算法往往需要几十甚至几百个样机性能数据作为分析样本,使用有限元法计算会很耗时。李祥林教授[13]在多目标优化问题中采用了分层优化策略,以提高转矩密度和降低转矩纹波为目标,通过结合响应面分析法(Response Surface Methodology, RSM)和第二代非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)等多种优化方法,得出了可行的优化方案,然后制作了样机,并进行了实验,

实验证明了 NSGA-II 在电励磁双定子场调制电机的多目标优化上有很好的实践作用。黄守道[14]等人为了在提高转矩密度的同时减小齿槽转矩，提出了一种将转子磁极分段，对每段磁极以特定角度磁化的方法，然后结合有限元仿真结果和多目标遗传算法 NSGA-II 对该电机结构进行了优化分析，最后给出了 Pareto 解集。同样证明了 NSGA-II 在电机的多目标优化上有着很好的效果。

本文旨在解决现有电机在效率和功率的多目标优化方面存在的问题，包括优化效率低、优化效果不理想以及易陷入局部最优解的问题。提出了一种基于改进后的 NSGA-II 算法对电机的功率和效率进行多目标优化的方法。通过实施该方法，希望能够有效提升 TPMLM 在多目标优化方面的效果。首先，对电机原理进行介绍，并依据 TPMLM 的尺寸和电机原理在 ANSYS Maxwell 上搭建二维模型；其次，利用敏感参数分析法得到对电机的功率和效率的多目标优化影响大的参数变量，计算电机的初始功率和效率；然后利用得到的数据使用基于高效非支配排序(Efficient Non-dominated Sorting, ENS)的 NSGA-II 对电机的功率和效率进行优化，得到相应的 Pareto 前沿和优化后的功率和效率值与初始值进行比较。

## 2. 电机建模

根据电机设计的基础理论，利用 ANSYS Maxwell 2D 搭建电机的二维有限元仿真模型如图 1 所示：

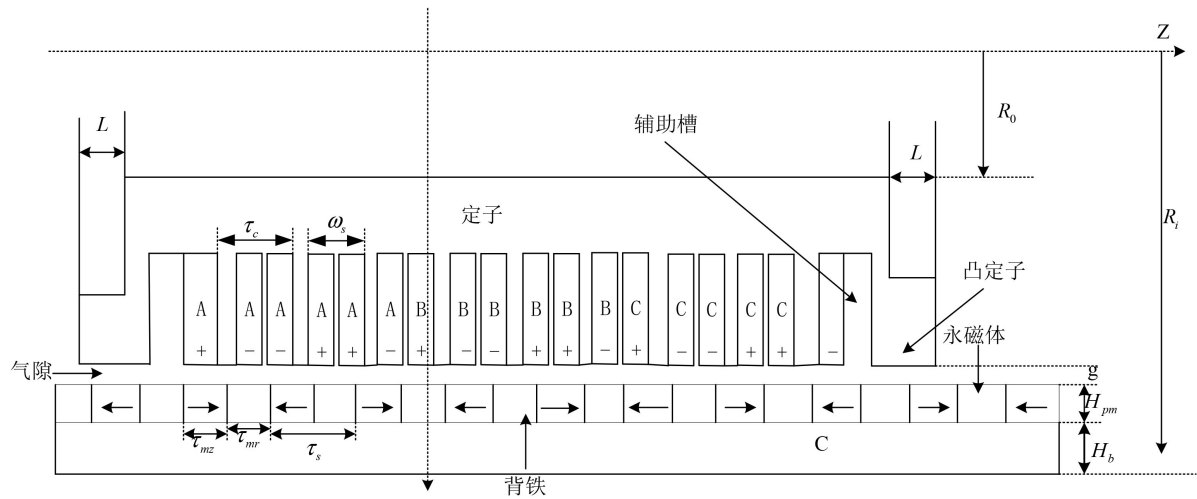


Figure 1. The structure diagram of tubular permanent magnet linear machine

图 1. 圆筒型永磁直线电机的结构图

实际上，在电机的优化过程中，并不需要对所有的结构变量都进行调整，只需要对电机优化目标影响较大的参数进行优化校正，而将对优化目标影响较小的变量固定在一个经验范围内即可。为了获取影响电机优化目标较大的参数信息，可以使用灵敏参数法进行分析。根据灵敏度分析[15]从表 1 中的所有参数数据中选取了灵敏度指数高的 5 个关键结构参数作为 TPMLM 的优化变量。根据输出性能随参数变化进一步给出每个参数变量的限制范围，如表 2 所示。

Table 1. Initial parameter data of motor design

表 1. 电机设计初始参数数据

参数	数值
极弧系数( $\alpha$ )	0.76
槽距( $\tau_c$ /mm)	19.5

Continued

径向永磁体长度( $\tau_{mr}/\text{mm}$ )	14.5
永磁体厚度( $H_{pm}/\text{mm}$ )	3
外径( $R_0/\text{mm}$ )	54.5
气隙长度( $g/\text{mm}$ )	1
极距( $\tau_p/\text{mm}$ )	21.5
槽宽( $W_{slot}/\text{mm}$ )	10.6
轴向永磁体长度( $\tau_{mz}/\text{mm}$ )	7
背铁厚度( $H_b/\text{mm}$ )	3.2
内径( $R_i/\text{mm}$ )	48.5

Table 2. Optimization variables and parameter ranges

表 2. 优化变量及参数范围

参数	数值
极弧系数( $\alpha$ )	0.5~0.8
气隙长度( $g/\text{mm}$ )	1~2
背铁厚度( $H_b/\text{mm}$ )	2~5
永磁体长度( $H_{pm}/\text{mm}$ )	3~6
槽宽( $W_{slot}/\text{mm}$ )	9~11

### 3. 改进后的 NSGA-II 多目标优化

#### 3.1. 第二代快速非支配遗传算法 NSGA-II

NSGA-II [16]的基本原理是利用快速非支配排序和拥挤距离排序使种群个体收敛到最终的 Pareto 前沿, 具有全局搜索能力强、参数设置少等特点。

其主要优化步骤包括:

- 1) 初始化种群: 随机生成一组初始解作为初始种群, 同时设置算法参数, 如种群大小、交叉概率、变异概率等;
- 2) 非支配排序: 对种群中的个体进行非支配排序, 得到每个个体的支配解集和被支配数量, 同时确定种群中的前沿(Pareto front);
- 3) 拥挤度计算: 对每个前沿中的个体计算其拥挤度, 以保证解的多样性和分布性;
- 4) 选择: 按照非支配排序和拥挤度计算的结果, 选择下一代种群中的个体;
- 5) 交叉和变异: 对选择出的个体进行交叉和变异操作, 生成新的个体;
- 6) 终止条件判断: 判断是否满足终止条件, 如达到最大迭代次数或收敛等, 若满足, 结束算法, 否则返回步骤 2。

NSGA-II 算法通过非支配排序和拥挤度计算, 保证了解的多样性和分布性, 能够有效地搜索多目标优化问题的全局最优解。

### 3.2. NSGA-II 的改进

尽管 NSGA-II 有全局搜索能力强、参数设置少等特点，但是在直接将 NSGA-II 用在圆筒型永磁直线电机的多目标优化问题时，发现其只适用于优化无约束的优化对象，优化结果的 Pareto 解集的分布性不是很理想，集中在某一区域的解非常多，易陷入局部最优解。为此，在非支配排序的问题上，对 NSGA-II 引入高效非支配排序 (Efficient Nondominated Sort, ENS) 的思想取代非支配排序，使得 Pareto 解具备良好的多样性且偏向于设计要求，并提升计算效率。

非支配排序和 ENS 的不同点在于，前者通常在将某个解分配给前沿之前，将其与总体中的所有其他解进行比较，而 ENS 仅将其与已分配给前沿的解进行比较。因此，添加到前端的解决方案不能主导之前添加的任何解决方案。ENS 的引入大大地避免了大量冗余，提高了计算效率。引进 ENS 后的 NSGA-II 的主要算法流程如下图 2 所示：

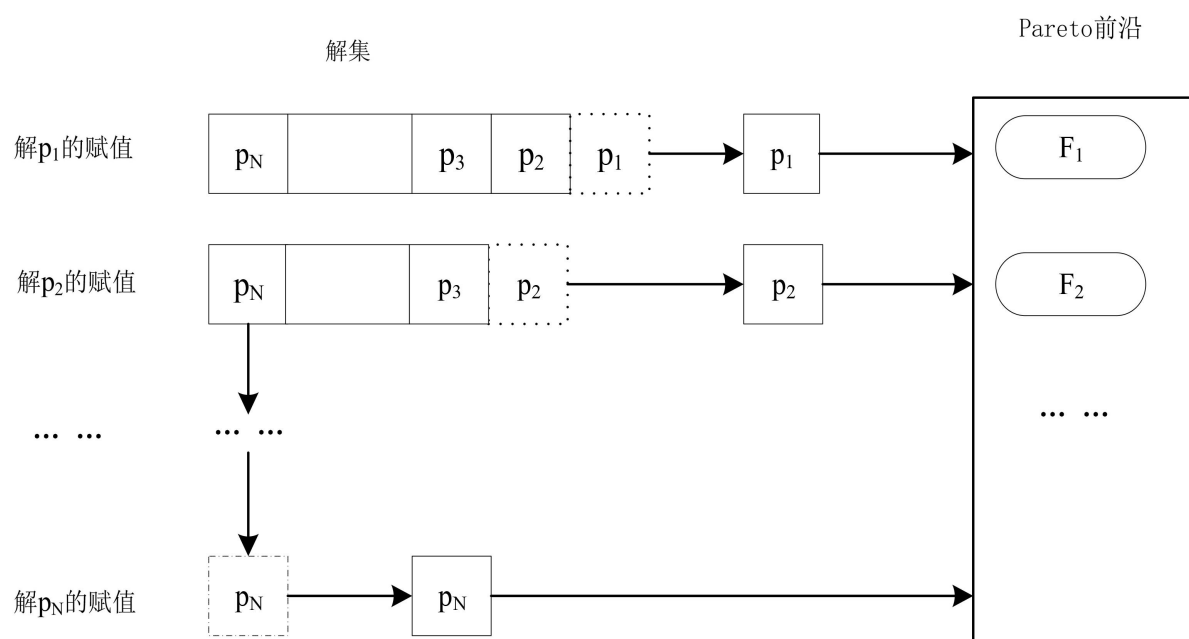


Figure 2. ENS non-dominated sorting method

图 2. ENS 非支配排序方式

ENS 对于最小化问题，首先根据第一目标值以升序对种群  $P$  中的  $N$  个解进行排序，最大化问题则按降序进行排序，其中  $N$  是种群大小；在完成群体  $P$  中个体的排序后，ENS 开始将解逐一分配给排序群体  $P$  中的前沿，从第一个解  $p_1$  开始，到最后一个解  $p_N$  结束。当完成一轮前沿分配后，后边的种群个体仅需与当前前沿相同的种群个体进行比较，然后看其支配关系即可，因为小于当前前沿的时候已经说明了后边的种群个体一定被前边种群支配。ENS 非支配排序的主要方式如图 2 所示：

本文分别使用了 NSGA-II 和改进后的 NSGA-II 对电机模型进行了优化，参数设置如下：种群规模大小设置为 300；变异算子的变异概率设置为 0.2；交叉算子的交叉概率设置为 0.8；最大迭代次数设置为 1000。优化后的 Pareto 前沿如图 3 所示，可从图 3 得到通过改进后的 NSGA-II 相较于原始 NSGA-II 的优化效果更好，优化后的输出功率为 488.62 W，效率为 93.17%。

优化前后各设计变量和输出功率和效率的取值如表 3 所示，基于 ENS 的 NSGA-II 搜索空间更为广阔，使得 Pareto 最优解分布均匀，而且解的质量要更高。

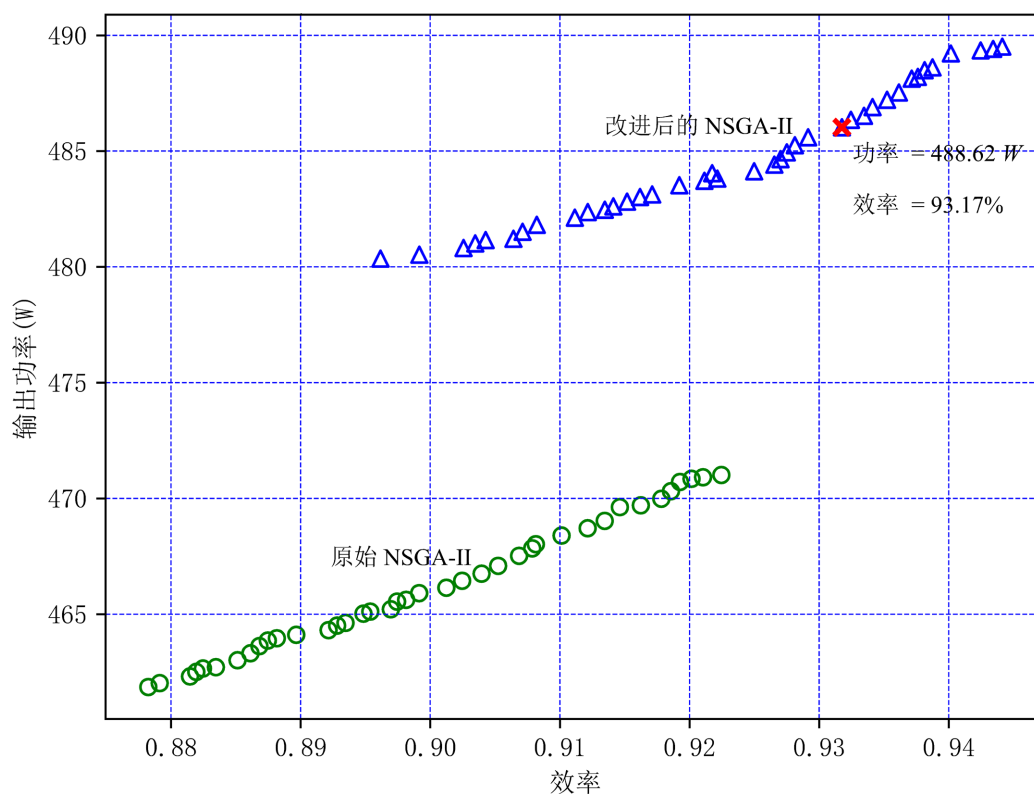
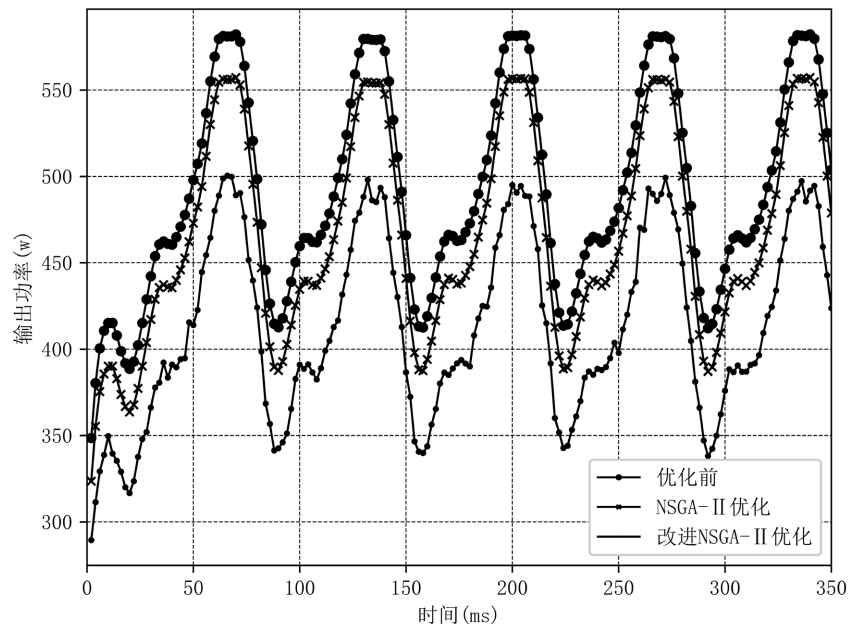


Figure 3. Optimization result  
图 3. 优化结果

Table 3. Comparison of optimization results  
表 3. 优化结果对比

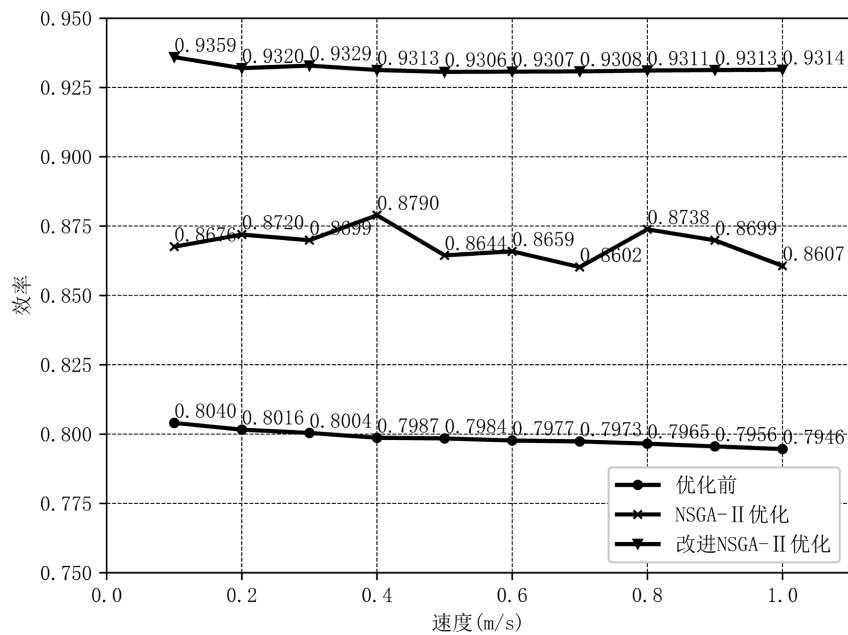
优化变量	优化前	原始 NSGA-II	改进后的 NSGA-II
极弧系数( $\alpha$ )	0.76	0.63	0.62
气隙长度(g/mm)	1	1.64	1.59
背铁厚度( $H_b$ /mm)	8	2.84	2.83
永磁体长度( $H_{pm}$ /mm)	3	5.99	5.99
槽宽( $W_{slot}$ /mm)	12.6	10.88	10.87
输出功率(W)	410.09	463.67	488.62
效率(%)	72.84	86.83	93.17

在速度为 0.5 m/s, 负载为  $10 \Omega$  的条件下, 分别计算了优化前、原始 NSGA-II 和改进 NSGA-II 优化后的 TPMLM 的输出功率。我们将三种优化结果的输出功率对比绘制在图 4 中。从图中可以看出, 使用 NSGA-II 和改进 NSGA-II 优化后的 TPMLM 的输出功率明显增加。对多组数据计算平均功率, 在未进行优化的情况下, TPMLM 的平均功率经计算得到 410.09 W。而在使用 NSGA-II 算法进行优化后, 输出功率有了明显的增加。在对 NSGA-II 算法进行改进后, 输出功率也有了些微的提升, 从 463.67 W 增加到。这些结果表明, 使用改进后的 NSGA-II 算法可以有效地提高 TPMLM 的输出功率, 实现更好的优化效果。



**Figure 4.** Comparison of output power optimization results  
**图 4.** 输出功率优化结果对比

TPMLM 的绕组的电阻取值为  $0.8 \Omega$ ，在速度为  $0.1 \sim 1.0 \text{ m/s}$  时分别计算优化前、原始 NSGA-II 和改进 NSGA-II 优化时的运行效率，结果如图 5 所示，根据图中的效率数据计算可得，优化前 TPMLM 的运行效率为 79.84%，使用 NSGA-II 优化后，TPMLM 的工作效率相比优化前，有明显的提升，达到了 86.83%，再基于改进后的 NSGA-II 又在 NSGA-II 的基础上提升了 6.34%，运行效率为 93.17%，可见改进后的 NSGA-II 在电机的运行效率上有较好的效果。



**Figure 5.** Comparison of efficiency optimization results  
**图 5.** 效率优化结果对比

## 4. 结论

本文提出了基于改进的 NSGA-II 对 TPMLM 的功率和效率的多目标优化。通过灵敏度参数分析法分析出初始优化变量，再根据电机原理对圆筒型永磁直线电机进行建模，将建模后的数据导出，使用改进后的 NSGA-II 进行参数优化。

本研究充分利用基于 ENS 的 NSGA-II 的全局搜索能力对目标进行优化，基于 ENS 的 NSGA-II 搜索空间更为广阔，使得 Pareto 最优解分布均匀，而且解的质量要更高，能够获得电机结构参数最优解，实现 TPMLM 的最佳运行性能。

仿真和试验结果表明：通过电机参数结构优化，使用改进后的 NSGA-II 算法，在速度为 0.1~1.0 m/s 下的平均效率从 79.84% 提升到了 93.17%，在速度为 0.5 m/s，负载为 10  $\Omega$  条件下的输出功率从 410.09 W 提升到了 488.62 W。说明在不同状况下，优化后功率提高，效率提升，且样机实测表明该方法对 TPMLM 结构优化设计的有效性。因此，所提出的 TPMLM 优化设计可以方便、高效地获得最优结构设计。

## 致 谢

在完成本篇论文《基于改进的 NSGA-II 的圆筒型永磁直线电机的多目标优化》之际，我要向所有支持和帮助过我的人们表示由衷的感谢，没有大家的支持和鼓励，我将无法完成这篇论文。

## 基金项目

浙江省科学技术厅“尖兵”“领雁”研发攻关计划(项目编号：2023C01162)；嘉兴学院大学生科研训练计划(SRT)项目(8517221278)。

## 参考文献

- [1] 支凡, 张鸣, 朱煜, 等. 无铁心永磁同步直线电机推力谐波分析与消除[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2101-2110.
- [2] 钟国翔, 韦笃取, 张波. 永磁同步电机系统、网络混沌振荡同步中断分析与控制[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 8-13+20.
- [3] 张静, 余海涛, 陈琦, 胡敏强. 一种海浪发电用永磁单相直线电机的工作特性与实验分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 110-116.
- [4] Doi, S., Sasaki, H. and Igarashi, H. (2019) Multi-Objective Topology Optimization of Rotating Machines Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Magnetics*, **55**, Article No. 7202605. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2899934>
- [5] Zhu, Y., Wu, H. and Zhang, J. (2020) Regenerative Braking Control Strategy for Electric Vehicles Based on Optimization of Switched Reluctance Generator Drive System. *IEEE Access*, **8**, 76671-76682. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990349>
- [6] Hao, J., Suo, S., Wang, Y., et al. (2019) Optimization of Port Size of High Power Density Permanent Magnet Synchronous Motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **295**, Article ID: 042125. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/4/042125>
- [7] 李红梅, 班东坡, 刘立文, 马洪坡, 纪振兴. 基于响应面与分层优化的超超高效异步电机设计[J]. 微电机, 2018, 51(3): 1-5.
- [8] 李伟起, 林荣文, 陶涛. 基于多目标粒子群算法的异步起动永磁同步电机优化设计[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11): 56-61.
- [9] 吴涛, 商慧丽, 张煜葵, 周颖. 基于黑洞多目标进化算法的永磁直线同步电机优化设计[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1567-1572.
- [10] Jiang, S., Zhang, J., Ong, Y.S., et al. (2014) A Simple and fast Hypervolume Indicator-Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **45**, 2202-2213. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2014.2367526>
- [11] 陈硕, 汤琼, 彭智俊, 等. 基于正交试验法优化表贴式永磁同步电机永磁体[J]. 微特电机, 2019, 47(10): 36-38, 41.
- [12] 赵玫, 于帅, 邹海林, 等. 聚磁式横向磁通永磁直线电机的多目标优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17):



3730-3740.

- [13] 李祥林, 李金阳, 杨光勇, 王玉彬, 冯兴田. 电励磁双定子场调制电机的多目标优化设计分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 972-982.
- [14] Wu, S.P., Huang, X.J., Tian, C.C. and Zhang, P.J. (2019) Multi-Physical Field Optimization Analysis of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Based on NSGA-II Algorithm. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, 11-14 August 2019, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8922236>
- [15] Gao, Y., Wang, Z. and Chen, Y. (2008) Cost-Sensitive Parameters Estimation Method of Bayesian Networks. 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, 12-14 October 2008, 1-4. <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.2712>
- [16] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., *et al.* (2002) A Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>