

基于多目标遗传算法的增程器用外转子发电机的设计优化

王义文, 赵金星, 马莹莹

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年9月3日; 录用日期: 2022年10月20日; 发布日期: 2022年11月2日

摘要

增程器用外转子发电机的效率和转矩脉动等性能是电动汽车增程器系统的综合效率和振动的主要影响因素。本文研究用多目标遗传算法对某增程器用外转子发电机的主要结构参数进行分步优化, 以改善其铁损、永磁体用量、转矩脉动和反电势波形等性能。首先, 建立了目标外转子发电机的有限元仿真并进行电机模型参数化。在此基础上, 利用多目标遗传算法对定子结构尺寸、转子外径和斜极角度等结构参数进行分步优化, 以最大化目标发电机的效率和转矩脉动等综合性能。研究表明, 基于模型的多目标遗传算法优化后, 目标发电机的最高效率达到了96%, 高效率区域明显扩大, 转矩脉动百分比为10.02%, 反电势波形有明显改善。本文的研究可以为外转子永磁发电机的仿真分析和多目标优化提供重要的方法论指导。

关键词

电动汽车增程器, 多目标遗传算法, 外转子发电机, 设计优化

Design Optimization of External Rotor Generator for Range Extender Based on Multi-Objective Genetic Algorithm

Yiwen Wang, Jinxing Zhao, Yingying Ma

College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 3rd, 2022; accepted: Oct. 20th, 2022; published: Nov. 2nd, 2022

Abstract

The efficiency and torque ripple of the external rotor generator for range extender are the main

factors affecting the overall efficiency and vibration of the range extender system in electric vehicles. In this paper, multi-objective genetic algorithm is used to optimize the main structural parameters of a range extender external rotor generator step by step to improve its performance such as iron loss, permanent magnet consumption, torque ripple and back EMF waveform. First, the finite element simulation of the target external rotor generator is established and the motor model is parameterized. On this basis, the multi-objective genetic algorithm is used to optimize the structural parameters such as stator structure size, rotor outer diameter and oblique pole angle step by step to maximize the comprehensive performance of the target generator such as efficiency and torque ripple. The research results show that after the model-based multi-objective genetic algorithm optimization, the maximum efficiency of the target generator reaches 96%, the high-efficiency area is significantly expanded, the torque ripple percentage is 10.02%, and the back EMF waveform is significantly improved. The research in this paper can provide important methodological guidance for the simulation analysis and multi-objective optimization of the outer rotor permanent magnet generator.

Keywords

Electric Vehicle Range Extender, Multi-Objective Genetic Algorithm, External Rotor Generator, Design Optimization

Copyright © 2022 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

增程式电动汽车[1] [2] [3] (Range-Extended Electric Vehicle, REEV)是一种配有车载发电和地面充电功能的“纯电驱动”模式的电动汽车, 是传统汽车向纯电动汽车过渡的最佳方案。增程器是 REEV 的重要部件之一, 增程器用发电机的损耗和转矩脉动等性能对增程器的系统效率和振动等性能影响大。使用外转子的永磁同步发电机具有发动机飞轮、结构紧凑、体积小等优点。此外, 永磁发电机的结构参数和控制变量之间高度耦合且交互影响电机性能, 呈现较强的非线性特性, 而遗传算法是一种基于交叉突变和优势个体自然选择是仿生算法, 不需要优化对象的明确的数学模型, 非常适合非线性系统的优化问题。因此, 本文主要研究基于多目标遗传算法的增程器用外转子永磁发电机的主要结构参数和综合性能优化。

目前, 国内外一些专家学者对永磁同步电机的结构设计和多目标优化方法进行了一些有意义的研究。三峡大学的罗正豪、井立兵[4]采用基于传统磁路法实现永磁同步电机优化设计以及上海理工大学的林苏、赵金星[5]基于对影响外转子永磁发电机的效率和性能的各个参数逐一进行研究, 在人工选择最优参数, 但上述两种方法都存在计算量大、求解速度慢、优化准确度不高。江西理工大学的陈爽、张志[6]采用田口法实现永磁同步电机多目标优化设计, 优化电机最高效率、最小齿槽转矩、最大转矩密度, 研究结果表明, 经优化后的电机最高效率以及最大转矩密度有部分提升, 但田口法在参数之间的相互作用显著时, 会产生负效应, 使得实验结果混淆, 不能区分参数与参数间的相互作用, 这时对于电机优化参数的结果就不是最优解, 优化结果不能达到最佳。上海电机学院的赵新连[7]基于多目标遗传算法对永磁同步电动机多目标优化设计进行研究, 提出基于多目标遗传算法的优化方法具有求解速度快、优化准确等优点。深圳职业技术学院的王瑾[8]对实现汽车永磁发电机多目标优化设计的遗传算法进一步探索, 提出了一种采用二进制编码, 规范化几何秩选择, 混合交叉及均匀变异的改进的遗传算法。前述可知, 遗传算法相

较于其它算法在优化永磁电机这种强耦合、多变量、约束条件复杂的非线性系统更具优势，本文将进一步研究基于多目标遗传算法的永磁同步发电机的结构参数和控制变量的分步并行优化，以最大化目标永磁发电机的效率、成本和转矩脉动等性能。

2. 多目标优化方法

2.1. 增程发电机的有限元仿真模型

Creo 是一种传统的、专业的建模软件，而 JMAG 是一款广泛应用于电机电磁场分析的软件，能够快速进行电磁场有限元分析，能够分析和量化在现实测试中只能通过观察的现象，除此之外，还能进行噪声和振动的模拟分析，电路和控制模型的模拟分析，每个分析模块有多个子模块，在该模块中可创建仿真分析模型。本文研究用 Creo5.0 版本软件和 JMAG 18.0 版本软件，基于 JMAG 与 Creo 进行有限元建模与电磁仿真分析。具体过程如图 1 所示。

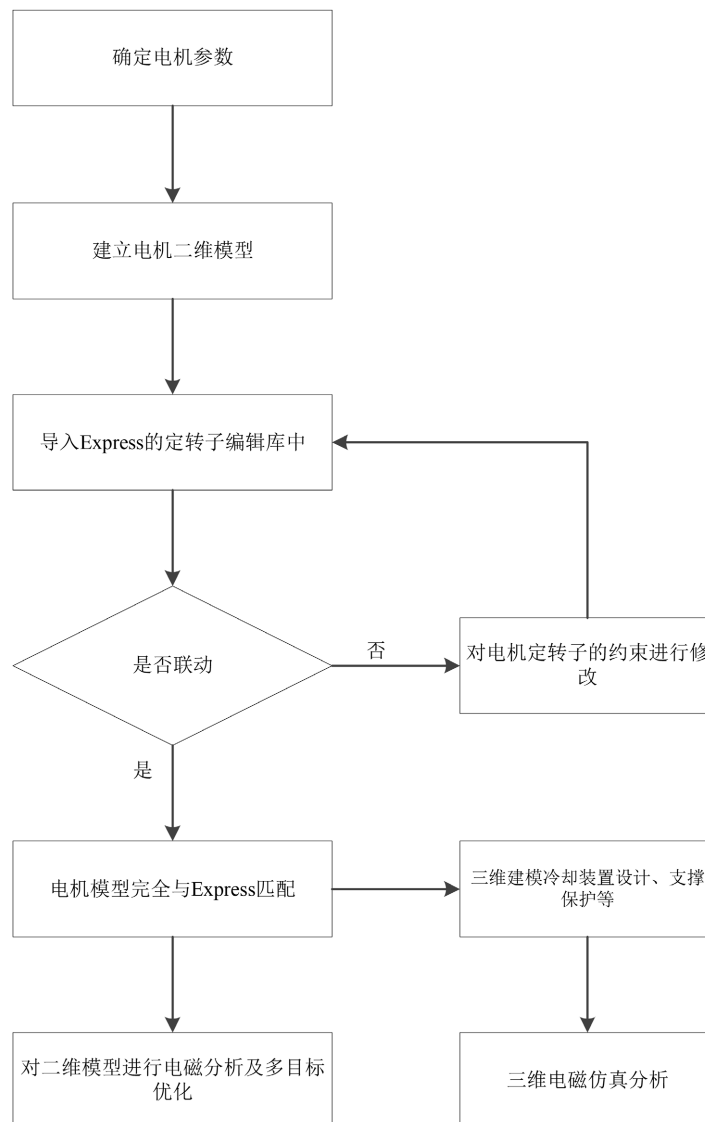


Figure 1. Flow chart of optimization method for permanent magnet motor
图 1. 永磁电机优化方法流程图

几何模型导入 Express 有多种方式：一是导入需要的电机模板；二是直接导入 dxf 文件，对文件进行编辑处理；三是基于模板模型进行修改。根据本文发电机的设计需求，首先，基于已知的发电机基本结构参数，使用 Creo 创建电机的二维数模(如图 2 所示)，采用直接导入 dxf 文件格式的方式导入 Express 的定转子编辑库中确定其基本参数是否与 Express 完全匹配，可在 Express 中对定转子进行约束定义，使其具有联动性，然后利用 JMAG 几何编辑器进行多目标遗传优化和参数化分析，最终生成我们所需的电机模型，如图 3 所示。

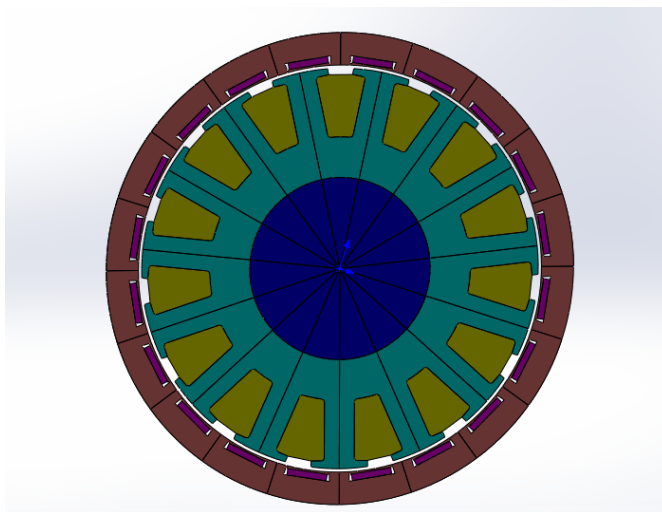


Figure 2. Creo two dimensional modulus

图 2. Creo 二维数模

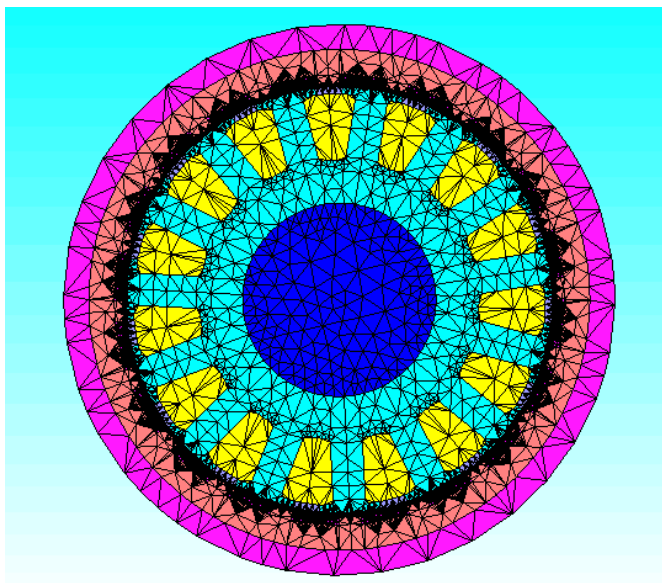


Figure 3. Finite element model of generator

图 3. 发电机有限元模型

2.2. 多目标遗传算法优化方案

永磁体的价格较贵，在满足功率等设计要求的情况下，永磁体的体积要尽可能地小，即厚度应尽量

减小使其体积减小。若永磁体的厚度太大容易产生磁饱和，增加磁漏，要尽可能地防止增大漏磁系数。增程发电机的尺寸设计过程中，除了对基本尺寸进行设计，重点难点也在于对影响永磁体体积的关键尺寸同时进行优化设计。

永磁体体积计算公式表述如下[9]：

$$V_m = 51 \frac{p_N \sigma_0 K_{ad} K_{Fd}}{f K_u K_\Phi C (BH)_{\max}} \times 10^6 \quad (1)$$

上式(1)中：

K_u ——电压系数；

K_{ad} ——直轴电枢磁动势转换到转子磁动势的折算系数；

K_Φ ——气隙磁通波形系数；

C ——永磁体磁能利用系数；

p_N ——永磁同步发电机额定容量；

$(BH)_{\max}$ ——最大磁能积。

由上式(1)可知，永磁体体积与永磁同步发电机额定容量、转子磁动势的折算系数等成正比，与电压系数、气隙磁通波形系数、永磁体磁能利用系数、最大磁能积成反比，电机越大或永磁电机的永磁体体积越大，电机的外特性越硬，性能越好。

但永磁体的体积大小还会影响电机的气隙波形、磁路结构等，并且稀土永磁体的价格较昂贵，考虑成本及适用条件等因素，对永磁体体积的大小必须综合考虑，在结果近似时应尽量减少永磁体用量。除此之外，电机的定子齿宽和轭部宽度对气隙磁通密度有较大的影响，从而影响铁耗。齿部和轭部磁通越大，损耗也就越大，相应的气隙磁密也越低，在满足要求的情况下，为减少齿部和轭部损耗，齿部和轭部应越小，但齿部和轭部过小，又会导致功率降低，转矩脉动增大，故需综合考虑其尺寸的选取。

综上所述，对于电机内部的关键参数优化，设计参数时有多个目标需求。这种需要对多种变量进行同时优化的场景，非常适合采用多目标遗传优化算法来提高设计效率。下文将以永磁体体积、铁耗和转矩脉动最小为优化目标，对以下关键尺寸进行调整优化：磁钢宽度，磁钢厚度，定子齿宽，定子磁轭厚度。

根据上述分析永磁电机的设计标准及内部关键尺寸对电机的影响，结合生产制造经验、制造工艺等方面综合给出的优化变量及变量范围，具体如表 1 所示。

Table 1. Variable range and target of progressive optimization

表 1. 渐进优化的变量范围及目标

第一步优化：	
优化变量	变量范围
半磁钢宽度(mm)	6.5~11
磁钢厚度(mm)	2.5~5.5
半定子齿宽(mm)	4~6.5
定子磁轭厚度(mm)	14~20
优化目标：铁损最小、永磁体体积最小	

Continued

第二步优化:	
优化变量	变量范围
转子外径	206~218 mm
定子齿厚	6.5~18 mm
优化目标: 转矩脉动最小、铁损最小	
第三步优化:	
优化变量	变量范围
斜极角度	0°~30°
电磁材料	50A1000, 35A300
优化目标: 转矩脉动最小、反电动势波形最优	

第一步: 发电机铁损和永磁体体积优化

优化方案如下:

优化目标 1: Min: Iron Loss(x)

优化目标 2: Min: Vmag(x)

约束条件: $6.5 \leq W_{\text{mag}} \leq 11$

$2.5 \leq T_{\text{mag}} \leq 5.5$

$4 \leq W_{\text{tooth}} \leq 6.5$

$14 \leq T_{\text{ee}} \leq 20$

其中, W_{mag} ——半磁钢宽度(mm); T_{mag} ——磁钢厚度(mm); W_{tooth} ——半定子齿宽(mm); T_{ee} ——定子磁轭厚度(mm)。

转矩脉动值、铁耗是影响电机性能及效率较为关键的参数, 同时考虑成本, 则期望保证效率及性能的前提下, 永磁体体积尽可能地小。由于电机的叠高已确定, 则永磁体的体积可简化为永磁体的表面积, 即模型的宽度与厚度的乘积。为了更有效的提高效率、降低成本, 所以铁耗和永磁体面积的权重较大些。

以磁钢宽度、磁钢厚度、定子齿宽和定子磁轭厚度为优化变量, 为了保证计算的全面性, 在满足设计需求及制造工艺要求的前提下, 尽可能取大或小的取值, 且在模型中设置磁钢宽度和定子齿宽这两个变量时, 取一半尺寸优化计算较方便, 故磁钢宽度和定子齿宽取一半计算。

发电机的铁损和转矩脉动与转矩脉动和发电势波形优化方案和第一步类似, 限于篇幅在此不做介绍。

JMAG-Designer 软件中可根据需求选择适合的优化算法, 本文选用多目标遗传算法。利用最初的 Case1 作为多目标优化遗传算法的第一代计算案例, 再设置种群数目为 20 代, 种群规模每代有 24 个遗传因子, 遗传算法流程如图 4 所示。

多目标遗传算法流程[10]首先是创建初始种群, 并对得到所有的个体进行适应度计算, 判断是否满足终止条件, 若满足条件, 即输出最优个体; 若不满足终止条件, 则进入循环, 对其进行选择操作, 产生子代再对其得到个体进行变异, 得到子代种群, 再一次计算个体适应度, 若满足条件终止循环, 不满足条件再一次进行选择、产生、变异、适应度计算直至满足循环条件。而 Pareto 图则是多目标优化结果, 在 Prareto 图上根据需要进行选择。主要体现在多目标遗传算法是尝试同时最小化 K 个独立的目标函数, 是多目标遗传算法是单目标遗传算法引申来的。

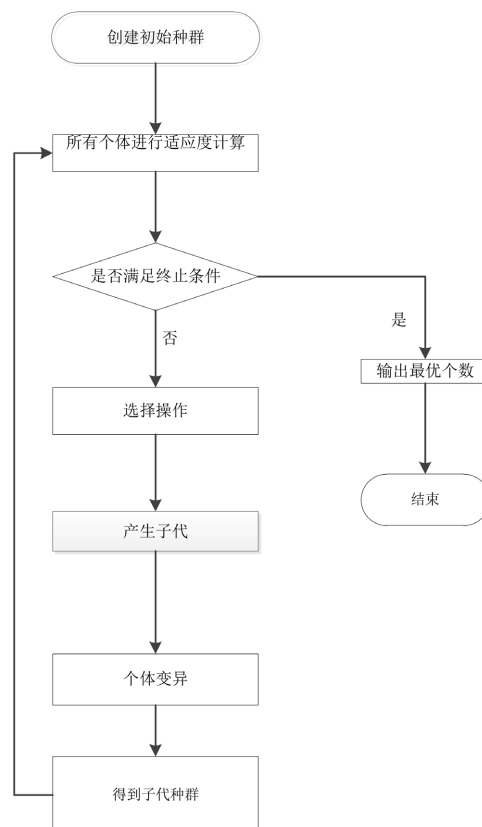


Figure 4. Flow chart of multi-objective optimization genetic algorithm
图 4. 多目标优化遗传算法流程图

3. 结果与讨论

经过前面的设计优化，最终电机优化的结果尺寸如下表 2 所示。本章将对已经设计完成的电机的多目标优化结果、气隙磁密波形及 MAP 效率图进行分析。

Table 2. Motor internal parameters
表 2. 电机内部参数

变量参数	变量数值
永磁体宽度	22 mm
永磁体厚度	3.5 mm
定子齿宽度	8 mm
齿磁轭厚度	19 mm
转子外径	218 mm
定子齿厚度	6.5 mm
斜极角度	5°
铁芯材料	35A300

由于本文设计的电机功率需求是不低于 30 kW，因此根据电机功率公式可以得出：平均转矩为 108 N·m

时功率为 30 kW，所以结果选取时应选则平均转矩大于等于 108 N·m 的 case。

图 5 是平均转矩与转矩脉动百分比的种群分布，由图可知，计算后 Case 大多集中于转矩为 110 N·m 的附近，该区间的转矩脉动值较小。图 6 是平均转矩与铁耗的种群分布，由图可知，所有 case 的铁耗值基本分布在 2000 W 以上，这些 case 比较集中在转矩为 110 N·m 的附近。

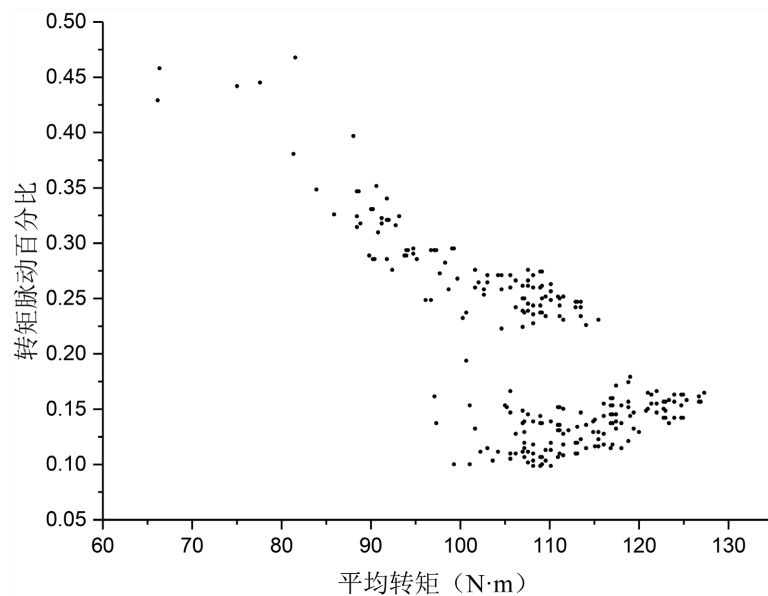


Figure 5. Population distribution of mean torque and percentage torque ripple
图 5. 平均转矩与转矩脉动百分比的种群分布

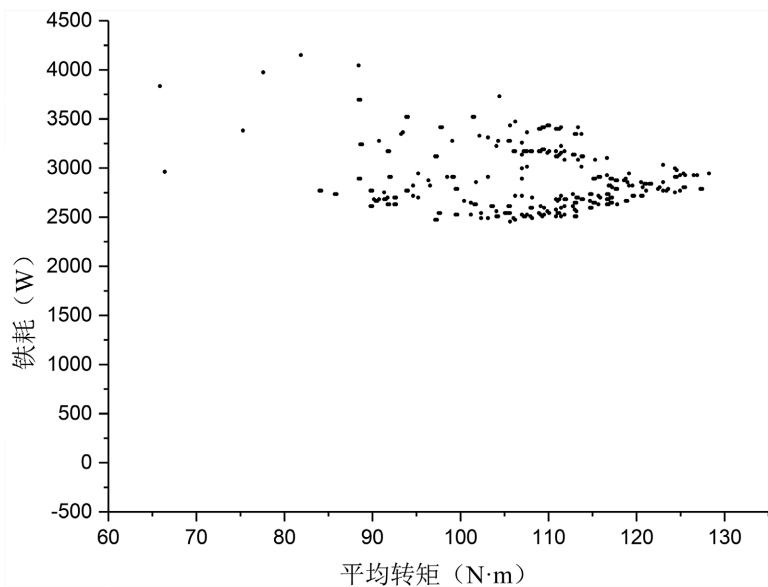


Figure 6. Population distribution of mean torque and iron consumption
图 6. 平均转矩与铁耗的种群分布

图 7 是平均转矩与永磁体面积的种群分布，由图可知，在满足产品功率需求的前提下，尽可能选最小的铁耗以提高发电机效率。图 8 是永磁体面积与铁耗的种群分布，由图可知，所有 case 的铁耗基本分布在 2000 W 以上，永磁体最小面积为 60 mm² 左右。

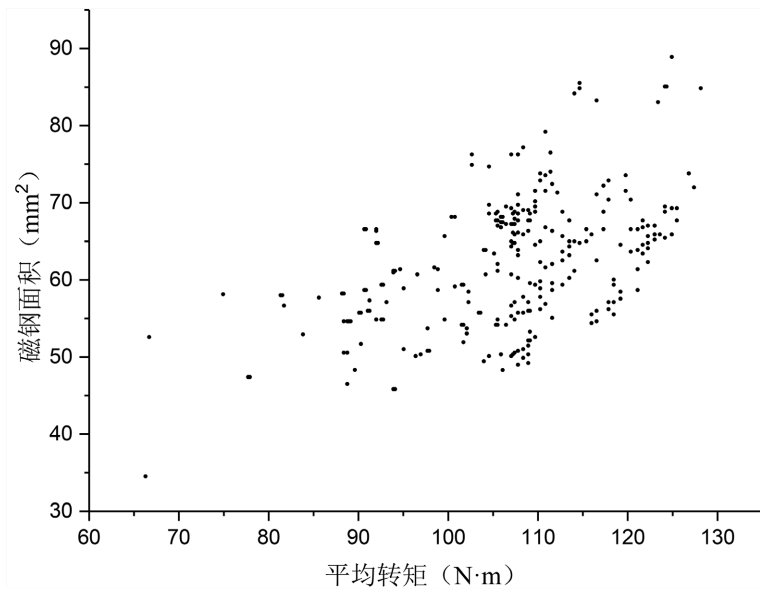


Figure 7. Population distribution of mean torque and magnetic steel area
图 7. 平均转矩与磁钢面积的种群分布

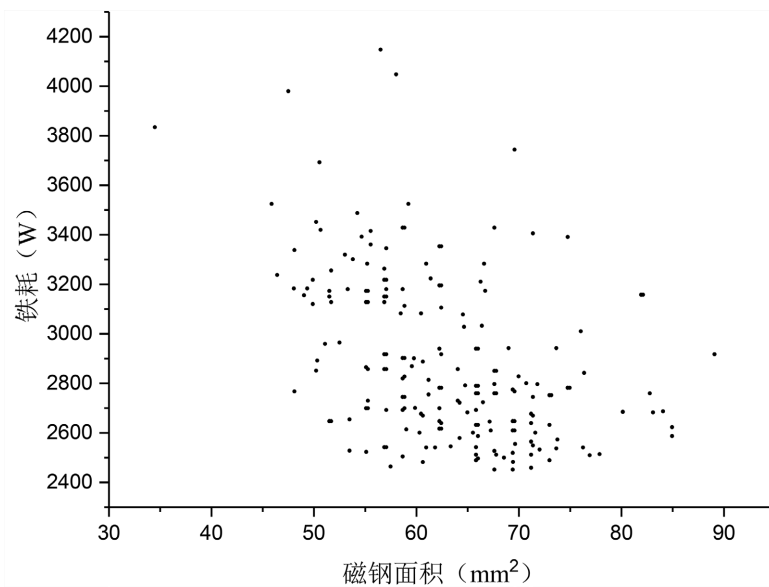


Figure 8. Population distribution of magnetic steel area and iron consumption
图 8. 磁钢面积与铁耗的种群分布

综上所述，大部分案例的电磁转矩集中在 110 N·m 左右，故以最大平均转矩大于等于 108 N·m 而转矩脉动值、铁耗及永磁体面积最小的简单方式，选取最终案例。

由于永磁体的宽度直接影响反电势的波形而电势波形存在突变是产生转矩脉动的因素，且齿槽的存在，导致气隙磁导不均匀，当转子旋转时会产生磁场转矩，磁场转矩会随着转子转动而变化，就会产生转矩脉动，然而齿槽受到定子齿宽及齿轭影响，即永磁体的宽度对转矩脉动值具有影响，定子齿宽及齿轭对其也有一定的影响[11]；由于改变其永磁体宽度，将会影响磁通截面积和气隙磁密，进而影响铁损改变，如在保持其它参数不变时，增大其宽度将导致铁损增加，而在保持其它参数不变时，增加定子齿宽降低齿部磁场饱和程度，降低磁密，会降低定子齿部铁损，且转矩产生脉动会导致磁场产生脉动而导致

功率损耗，即永磁体宽度、定子齿宽以及转矩脉动的值与铁损也有较大的相关性[12]。如图 9 是各优化自变量及目标函数之间的相关性图，相关性数值越大表示该参数之间的相关性就越大，图中运用颜色及深浅区分各参数之间的相关性程度，如红色表示两个参数之间的正相关性最大。

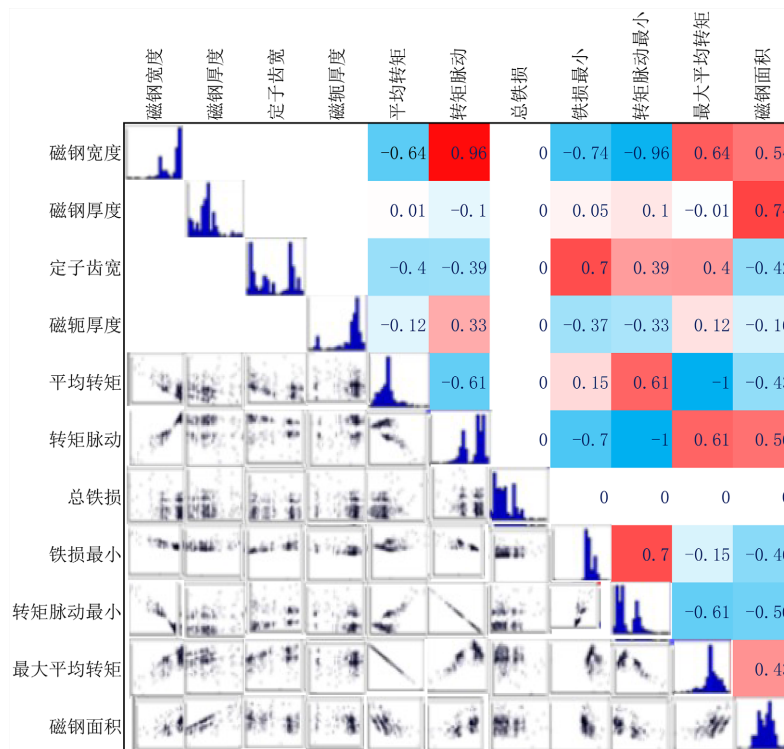


Figure 9. The results of correlation calculation of optimized variables
图 9. 优化变量相关性计算结果

经过上述多目标遗传种群分布和相关性图，再结合设计需求和铁耗低、转矩脉动小、永磁体体积小的优化目标，综合比较图中各个 case 的，选择第 241 个 case 的尺寸参数作为最终发电机方案的尺寸，具体方案尺寸及结果如表 3。

Table 3. Optimization model size and results of case241
表 3. case241 优化模型尺寸及结果

变量参数	case241 变量数值
永磁体宽度	10.9624 × 2 mm
永磁体厚度	3.1639 mm
定子齿宽度	4.18561 × 2 mm
齿磁轭宽度	18.6738 mm
结果	
磁钢表面积	69.368 mm ²
铁损	2531 W

综上所述，方案的选取综合相关度的分析，且再满足目标要求的条件下，选择转矩脉动最小，平均转矩最大的方案。由此提高发电机的功率，降低永磁体用量，节约成本，提高效率。

根据电磁定律,当磁场发生变化时,附近的导体会产生感应电动势,其方向符合法拉第电磁定律和楞次定律,与原先加在线圈两端的电压正好相反,这个电压就是反电动势,发电势波形越接近于正弦曲线说明电机的电势性能越好。如图 10 优化前与优化后的电动势波形对比图。由图可知,优化前的反电动势波形波动较大,经对斜极角度和铁芯材料等参数进行优化后,其波形近似于正弦曲线。主要是因为结构优化后,永磁体产生的磁势通过磁路后产生的磁通或者磁密更加接近正弦,所以其感应出来的反电动势的波形近似于正弦曲线[13] [14]。

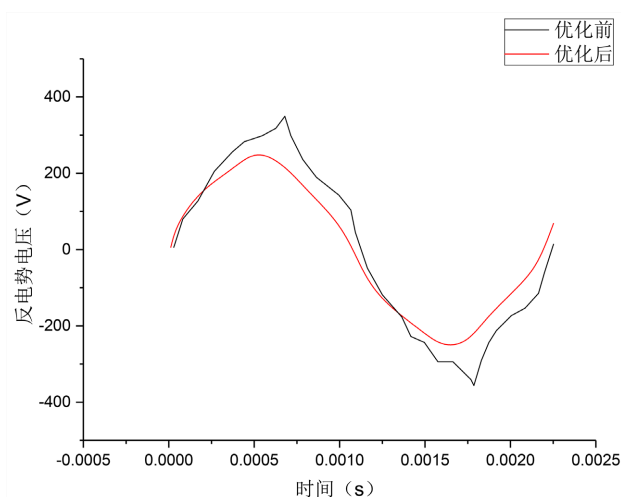


Figure 10. Comparison of back potential waveforms before and after optimization

图 10. 优化前后的反电动势波形对比图

由于定子铁芯会有很多开槽,使得气隙磁导并非均匀值,导致电机气隙磁场并非理想的梯形波,其中含有幅值较大的齿谐波。当电机旋转时会引起相绕组交链磁链的波动,使相绕组反电动势出现波动,进而导致绕组相电流的脉动,引起电磁转矩的波动,最终引起电机的振动和噪声。所以气隙磁密是评价电机性能的一个重要参数。如下图 11 是优化前后气隙磁密波形的对比图,经过斜极、齿厚、材料等参数的优化,将原本杂乱无章的气隙磁密近似于梯形波。主要是因为电机气隙磁密波形畸变率受电机磁极结构参数的影响,在对其进行优化后,气隙磁密波形畸变率下降,即气隙磁密更加井然有序。

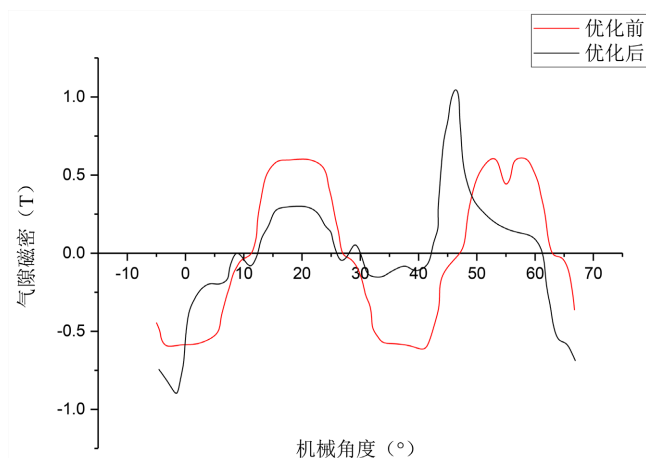


Figure 11. Comparison of air gap magnetic density waveforms before and after optimization

图 11. 优化前后的气隙磁密波形对比图

将本次设计优化完成后的永磁电机进行有限元仿真分析电机负载下的 MAP 图, 如图 12 用有限元对电机做效率 MAP 图。由图可知, 本次设计的电机综合效率在 90% 以上, 其占比为 86.6%, 电机的综合效率在 80% 以上的部分占比为 93.6%, 电机的综合效率在 70% 以上的部分占比为 95.6%, 在额定转速 3000 r/min 附近的综合效率基本可达到 90% 以上, 且额定转速 3000 r/min, 扭矩为 110 N·m 时, 效率为 96.04%, 相比优化之前的效率有明显提高, 符合最初的设计需求和目的。由图 12 可知, 效率最高的区域分布在转速 2500~4000 r/min, 扭矩 50~118 N·m 处。

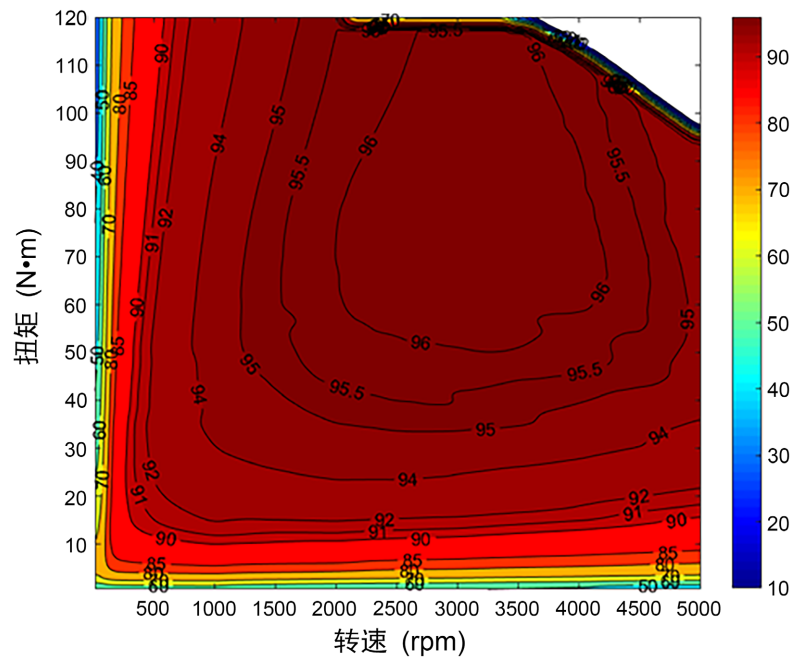


Figure 12. Motor efficiency MAP after optimization

图 12. 优化后电机效率 MAP

4. 结论

为改善增程器用外转子发电机的铁损、永磁体用量、转矩脉动和反电势波形等性能以及最大化其效率和转矩脉动等综合性能, 本文基于多目标遗传算法对某增程器用外转子发电机的主要结构参数进行分布优化, 建立增程式发电机的有限元仿真模型, 设计多目标遗传算法优化方案。优化结果表明, 基于多目标遗传算法对其主要结构参数进行分步优化后, 目标发电机的铁损、转矩脉动和反电势波形得到明显改善。相比优化前, 目标发电机的总铁损较优化前降低了 54.67%, 最高效率达到 96%, 并且高效率范围很大, 转矩脉动百分比也降到了 10.02%, 较优化之前降低了 12.43%。研究结果验证了本文提出的优化方法的有效性, 本文的研究可以为电动汽车增程器用外转子发电机的设计优化提供重要的方法论指导。

参考文献

- [1] 郭凯. 增程式电动汽车研究分析[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(19): 5-6+9.
- [2] 熊雄. 浅谈增程式电动汽车的现状及其未来发展[J]. 时代汽车, 2020(1): 51-52.
- [3] 郭美华, 王升平. 增程式电动汽车发电机技术研究概述[J]. 时代汽车, 2019(13): 73-74.
- [4] 罗正豪, 井立兵, 高起兴. 分段偏心磁极表贴式永磁电机优化设计[J]. 微特电机, 2018, 46(10): 25-27+37.
- [5] 林苏, 赵金星, 李元辉. 增程器用外转子永磁发电机结构设计及性能优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(11):

6-9.

- [6] 陈爽, 张志, 李佳星, 等. 田口法在永磁同步电机多目标优化设计的应用[J]. 微电机, 2021, 54(7): 17-22.
- [7] Zhao, X., Sun, Z. and Xu, Y. (2020) Multi-Objective Optimization Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Genetic Algorithm. *2020 2nd International Conference on Machine Learning, Big Data and Business Intelligence (MLBDBI)*, Taiyuan, 23-25 October 2020, 405-409.
- [8] 王瑾. 基于遗传算法的汽车永磁发电机多目标优化设计[J]. 自动化应用, 2010(6): 2-5.
- [9] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [10] 李焱. 基于遗传算法的多目标优化算法[J]. 科技信息, 2011(9): 423+454.
- [11] 王晓远, 吕海英. 增程式电动汽车永磁同步发电机设计与改进[J]. 微特电机, 2016, 44(12): 1-5+19.
- [12] Yu, G.W. and Pan, Y.J. (2021) Design Analysis and Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle. *4th International Symposium on Power Electronics and Control Engineering (ISPECE 2021)*. <https://doi.org/10.1117/12.2619324>
- [13] 范庆锋, 王振. 基于遗传算法的车用永磁电机转子尺寸多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(10): 97-102.
- [14] 胡景泰, 付显, 梁海泉. 双三相永磁同步发电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 77-83.