DOI: 10.13382/j.jemi.B2306822

多目标算法分层优化策略在开关磁阻电机中的应用*

黄朝志 张文进 李海雯 孙燕文
(江西理工大学电气工程与自动化学院 赣州 341000)

摘 要:针对电机多参数多目标协同优化较为复杂的问题,提出了基于非支配排序遗传算法分层迭代优化的思想。首先,介绍定子分段混合励磁开关磁阻电机的设计流程和工作原理。其次,选择电机的待优化参数和优化目标,并引入 Pearson 相关系数分析电机参数与优化目标的相关性,根据相关性结果对待优化参数进行分层;建立各层优化参数与优化目标的非线性模型,将非线性目标模型引入多目标优化算法。最终,在 Pareto 前沿中选取最优个体,完成对电机结构参数和控制参数的分层迭代优化,确定电机的最优结构参数和控制参数,并通过有限元分析软件进行验证。相比较于初始模型,优化后电机的效率略有提高,平均转矩增加 12.44%,转矩脉动减小 64.96%。根据最优参数制造出实验样机,实验结果验证了优化设计的有效性和优越性。

关键词: 定子分段;混合励磁;磁阻电机;分层优化
中图分类号: TM352 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Application of multi-objective algorithm layered optimization strategy in switched reluctance motor

Huang Chaozhi Zhang Wenjin Li Haiwen Sun Yanwen
(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Aiming at the complicated problem of multi-parameter and multi-objective cooperative optimization of motor, a layered iterative optimization method based on non-dominated sorting genetic algorithm is proposed. Firstly, the design flow and working principle of stator segment mixed excitation switched reluctance motor are introduced. Secondly, the parameters to be optimized and the optimization target of the motor are selected. After Pearson correlation coefficient is introduced to analyze the correlation between the motor parameters and the optimization target, the optimization parameters are stratified according to the correlation results. The nonlinear model of each layer optimization parameter and optimization objective is established, and the nonlinear objective model is introduced into the multi-objective optimization algorithm. Finally, the optimal individual is selected in Pareto front, the hierarchical iterative optimization of motor structure parameters and control parameters is completed, the optimal structure parameters and control parameters of the motor are determined, and the finite element analysis software is used to verify. Compared with the initial model, the efficiency of the optimized motor is slightly improved, the average torque is increased by 12.44% and the torque ripple is reduced by 64.96%. The experimental prototype is manufactured according to the optimal parameters, and the experimental results verify the effectiveness and superiority of the optimal design.

Keywords: segmented stator; hybrid excitation; switched reluctance; layered optimization

0 引 言

开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)是一种定子采用直流励磁方式,定子和转子两侧均采用凸极结构的磁阻电机[1]。开关磁阻电机具有结构简单、制造成本低、调速范围宽、运行容错性能好等优点,在工业驱动中具有巨大的应用潜力,因此在电动汽车、航空和工业应用中得到了广泛的应用。但由于转矩脉动和噪声的影响较大,限制了该电机在某些领域的推广[2-3]。

收稿日期: 2023-08-12 Received Date: 2023-08-12
*基金项目:国家自然科学基金(52167005)、江西省教育厅项目(GJJ200826)、江西省自然科学基金(20232BAB204063)项目资助

在算法优化方面,文献[4-8]针对永磁电机有限元分析高维数、计算量大的特点,提出了一种基于非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms-II, NSGA-Ⅱ)的多级优化策略,将参数进行分层,降低优化操作难度。文献[9-14]将分层优化思想应用于开关磁阻电机,通过 NSGA-II 实现了转矩的提高和低转矩脉动的性能。Diao 等[15]提出了系统级确定性优化和系统级鲁棒性优化的设计方法,通过系统级确定性获得最优电磁性能,通过系统级鲁棒性减少生产误差。通过上述文献可知,电机优化是一个涉及多参数和多目标优化协同优化的过程,多数情况下需要同时优化几个甚至十几个参数,这将会增大优化过程的复杂程度,并影响优化结果的准确度,而分层优化思想的提出,进一步解决了这一问题。

在电机设计方面,Mousavi 等[16]提出了一种带有分段定子的外转子开关磁阻电机,该电机定子由 6 个 W 型分段结构构成,转子由 22 极组成,通过实验结果,验证了分段定子产生的转矩比传统电机高 20%。文献[17-19]在相邻定子齿中埋入永磁体,并对电机定子进行分段,通过研究发现,在相同尺寸的前提下,分段结构减小了电机的重量,而永磁体的增加使得电机的转矩密度和效率提高。因此,本文总结上述文献描述电机的优点,提出了定子分段混合励磁的外转子开关磁阻电机(segmented stator hybrid excitation switched reluctance motor, SSHESRM)。

多数论文在电机优化过程中,只是针对强层参数进行优化,对弱层进行忽略或只是扫描优化,这样难以确保参数是否最优。因此,本文对分层优化策略进一步分析,提出一种分层迭代优化的思想。其主要步骤为:首先,利用 Pearson 相关系数分析参数的灵敏度,根据灵敏度分析结果对电机参数进行分层;其次,建立各层优化参数与目标函数的高精度非线性模型,并将目标函数模型引入 NSGA-II 中。对强层参数先优化,寻得暂定的最优强层参数;再对弱层参数进行优化,寻得暂定的最优弱层参数;然后对暂定的最优强层参数再次寻优,如此迭代进化,直到寻得电机的最优模型。

1　电机结构和工作原理分析

1.1　电机设计流程

电机设计流程如图 1 所示,步骤如下。

步骤 1)介绍了传统的三相 12/10 内转子磁阻电机模型,该电机绕组部分采用短磁路结构,绕组接线方式如图 2(a)所示。磁通经过相邻定、转子磁极进行闭合,这种短磁路结构提高了定子进行能量转换能力。

步骤 2)将传统 12/10 磁阻电机作为单元电机,且单元电机数量为 2,确定流程中第 2 个电机结构为 24/20 内转子磁阻电机。保持励磁绕组不变,仍为短磁路结构,对定子部分采用分段式模块化结构。因为电机为短磁路结构,不同于长磁路结构,所以在采用模块化结构后对电机磁路质量并无影响。相反,电机所用硅钢片材料更少、使得质量大约减少 10%,同时在定子冲片过程中分段式结构可采用较小的材料进行冲压,减少了材料成本。

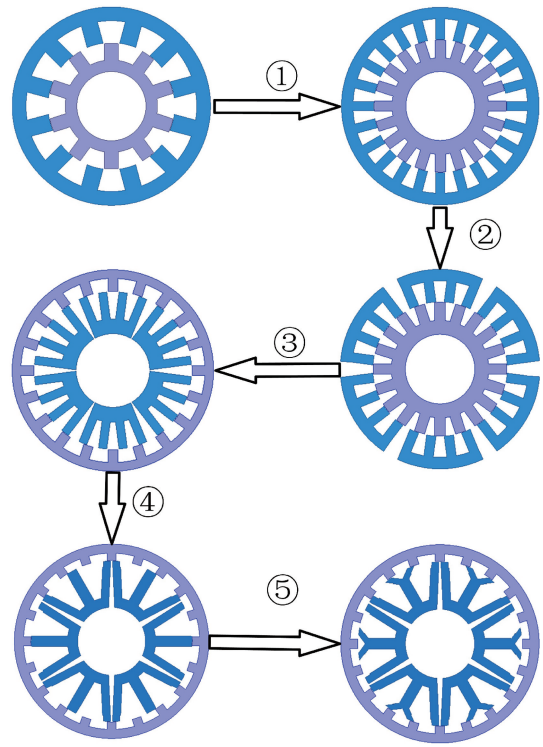


图 1　电机设计流程

Fig. 1　Motor design process

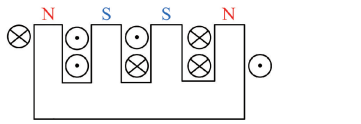
步骤 3)在保持定子和转子部分体积不变,将内转子电机变化为外转子电机,电机绕组仍采用短磁路结构。相较于内转子电机,外转子电机具有更大的旋转半径和转动惯量,而转子部分可与从动部分直接连接,方便直接驱动,减小驱动系统的间接能量损耗。

步骤 4)将电机分段定子中间部分的两个极合并为一个公共磁极,使得一个分段定子的绕组产生的两组磁力线,最终汇集到中间齿部分。同时对励磁绕组部分进行简化,即简化后的绕线方式如图 2(b)所示,且绕组仍为短磁路结构。

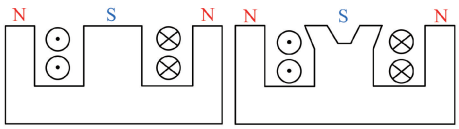
步骤 5)将公共极的端部拆分为两个相似的齿,而齿根部分依旧为整体结构,如图 2(c)所示。在这一步骤中,考虑和分析了两个概念,包括转子极的数量和极的位置状态。当绕组磁通路径中有两个极时,使得总转换能量最大化。同时也为后续混合励磁,永磁体的添加提供了前提条件。

1.2　电机工作原理

前文已经对电机定子分段外转子的设计流程进行了



(a) 短磁路绕组
(a) Short magnetic circuit winding



(b) 绕组简化　　(c) Y型齿结构
(b) Winding simplification　　(c) Y-shaped tooth structure

图 2　分段定子进化过程

Fig. 2　Segmented stator evolution process

详细的描述,电机由 6 个分段定子组成,每部分为 W 型分段结构,每个 W 型定子的中间部分为 Y 型齿结构。

在此基础上,增加混合励磁部分,将永磁体嵌入到定子两侧齿和中间的 Y 型齿之间,且相邻永磁体的磁性相反,最终形成本文所提出的永磁辅助式分段定子结构,如图 3 所示。励磁绕组采用集中绕组的形式,缠绕在分段的定子极上;转子部分由 20 极组成,电机的三维拓扑结构如图 4 所示。

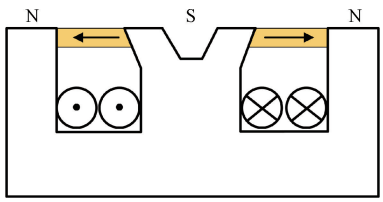


图 3　永磁辅助式定子结构

Fig. 3　Permanent magnet assisted stator structure

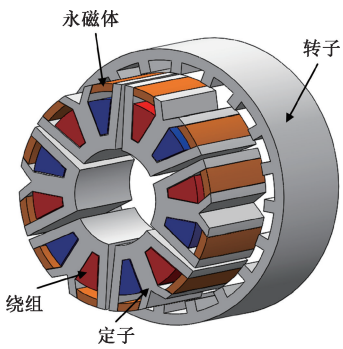
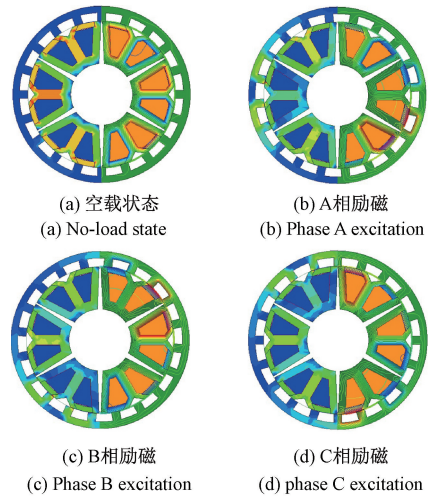


图 4　三维拓扑结构图

Fig. 4　3D topological structure diagram

SSHESRM 和传统 SRM 都遵循“最小磁阻原理”,即磁通始终沿着最小磁阻路径闭合。图 4(a)显示了 SSEHSRM 的初始状态,此时各相绕组无电流激励,永磁体产生的磁通只有少部分通过气隙,而大部分在定子块内形成封闭的磁路。当绕组中通入励磁电流后,绕组产生的磁通量将强制改变永磁体磁通量方向。此时,气隙中的磁通量由永磁体和绕组共同产生,合成磁通所经历的路径为:定子和永磁体(N 极)—气隙—转子齿—转子轭—转子齿(另一侧)—气隙—定子和永磁体(S 极)。

开关磁阻电机的旋转方向由绕组的励磁顺序所决定,根据图 5(b)~(d)所示的三相顺序进行励磁,即 A 相、B 相、C 相开关管依次关断,此时电机将进行逆时针旋转。



(a) 空载状态　　(b) A相励磁
(a) No-load state　　(b) Phase A excitation

(c) B相励磁　　(d) C相励磁
(c) Phase B excitation　　(d) phase C excitation

图 5　各相励磁时磁力线和磁密云图

Fig. 5　Magnetic field line and magnetic dense cloud diagram during each phase excitation

2　分层优化设计

2.1　分层优化流程

前文已经对电机结构模型进行介绍并对其工作原理进行了简单的描述。由于开关磁阻电机的非线性因素较强,传统的公式解析法在求解电机输出性能时容易存在较大的误差,因此借助有限元分析软件是一种即简单又高效的方法。

本文提出一种分层优化的思想,来减少 SSHESRM 多参数和多目标同时优化复杂性和操作难度较大的问题,该方法不仅适用于开关磁阻电机,同时可以推广至各种电机的优化设计中,具有广泛的应用性。分层优化策略,其流程如图 6 所示,优化分析的具体过程如下:

1)确定待优化参数和优化目标,并通过敏感度分析将待优化参数进行分层。

2)通过 GA-SVM 进行模型预测,建立待优化参数关于优化目标的非线性模型,其目的是耦合多目标算法和电机模型。

3)通过多目标算法 NSGA-II 进行参数寻优。记录各

层最优个体和设计参数

4)通过“结果比较”模块,将优化结果与上一次优化结果相比,若有所改善,则跳转到下一步,继续进行优化;否则结束分层优化流程。

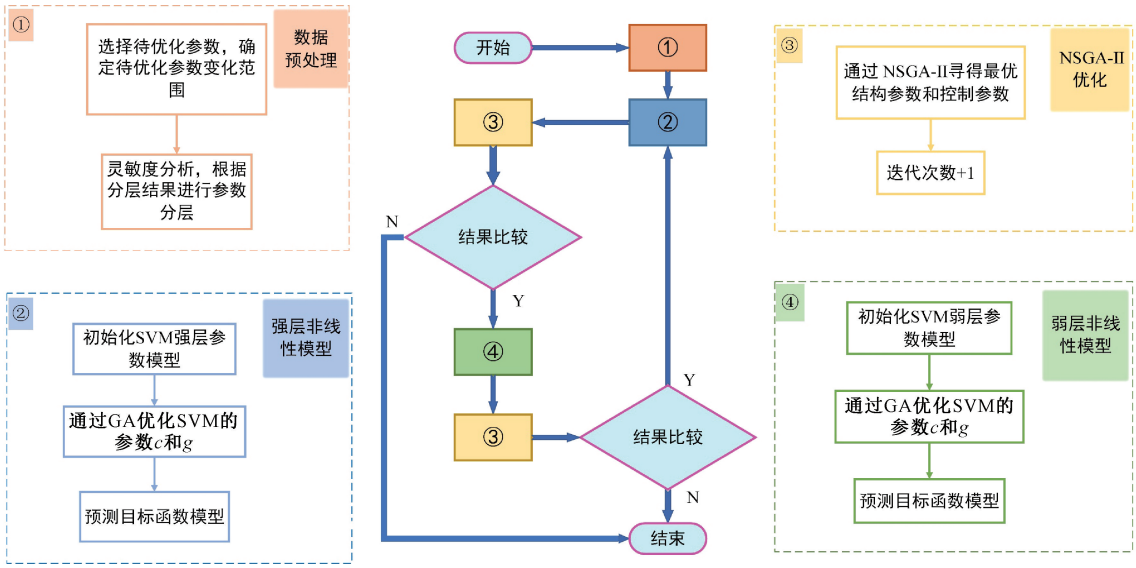


图 6　分层优化流程

Fig. 6　Layered optimization flow chart

2.2　参数预处理

电机的基本参数如表 1 所示,有关电机结构的基本参数,如图 7 中 D_{so}、D_{si}、D_{ro}、D_{ro} 所示。保持表 1 中基本参数的数值不变。

表 1　SSEHSRM 基本参数

Table 1　Basic parameters of SSEHSRM

参数	数值	参数	数值
定子外径 D_{so}	142 mm	母线电压	120 V
定子外径 D_{si}	60 mm	限幅电流	18 A
转子外径 D_{ro}	172 mm	铁心材料	50W470
转子内径 D_{ri}	143 mm	永磁体材料	NdFe30
铁心长度	60 mm	气隙长度	0.5 mm

图 7 中除基本参数外,其余所示均表示为待优化参数,其中,H_{cr} 为转子轭厚、,H_{cs} 为定子轭厚、β_{in} 为分段定子的内间隔角、β_{out} 为分段定子的外间隔角、β_s 为分段定子极弧、β_r 为转子极弧、θ_Y 为 Y 型齿宽角度、α_Y 为 Y 型齿的开角、H_{pm} 为永磁体厚度、θ_{pm} 为永磁体嵌入定子的角度,共计 10 个结构参数。

众所周知,角度位置控制(angle position control, APC)方法是开关磁阻电机最常用的控制方法。保持电压幅值不变,对电机的开通角和关断角进行控制,来改变电流波形以及电流波形和绕组电感的相对位置。因此,本文选择 APC 控制方法,将 APC 中的重要参数开通角(θ_{on})和关断角(θ_{off})加入待优化参数。目前,共计 12 个待优化参数,其中包括控制参数和结构参数,需要优化参

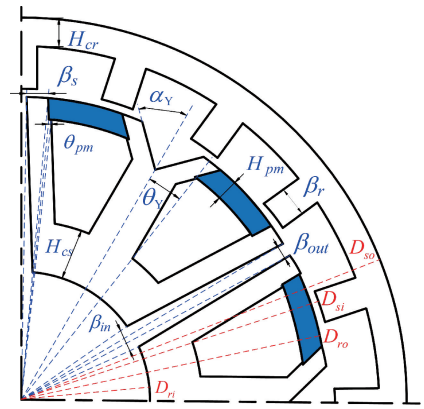


图 7　SSEHSRM 结构参数

Fig. 7　SSEHSRM structural parameter

数的变化范围如表 2 所示。

表 2　待优化参数范围

Table 2　Optimization parameters range

参数	数值	参数	数值
H_{cr}	5~8 mm	β_r	5~8°
H_{cs}	8~10 mm	α_Y	45~60°
H_{pm}	4~6 mm	θ_Y	6~8°
β_{in}	3~7°	θ_{pm}	0.5~1°
β_{out}	0.5~1°	θ_{on}	−1~1°
β_s	4~6°	θ_{off}	6~9°

2.3　参数敏感度分析

为了获得更好的电机输出性能,以平均转矩 T_{avg}、转

矩脉动 T_{rip} 和效率 η 为优化目标。其中平均转矩、转矩脉动和效率的计算公式如式(1)所示。

$$T_{avg}=\int_{t_1}^{t_2}T\mathrm{d}t\,T_{rip}=\frac{T_{max}-T_{min}}{T_{avg}}$$
$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{out}+P_{铁耗}+P_{铜耗}} \tag{1}$$

式中：$t_1 \sim t_2$ 表示为转子转动一个极距所用的时间。

由表 2 可知，本文所描述的优化是一个涉及多目标、多变量的多维优化问题。如果同时对 12 个决策变量进行优化，将会产生巨大的计算量，极大地增加优化设计的难度。为了减少实验次数和计算复杂度，本文对优化目标关于决策变量的敏感性进行了分析，并根据敏感性分析结果对决策变量进行了分层。在多维优化问题中，需要度量决策变量与优化目标之间的相关性。定义 Pearson 相关系数来衡量决策变量与优化目标之间的相关程度。

$$\rho_{XY}=\frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-E(X))(Y_i-E(Y))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-E(X))^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-E(Y))^2}} \tag{2}$$

式中：X_i，Y_i 和 $E(X)$ 分别为决策变量，优化目标和决策变量的平均值。本文选取 300 个样本点进行灵敏度分析，即式(2)中 $n=300$。将灵敏度分析结果数据绘制成分布直方图，如图 8 所示。

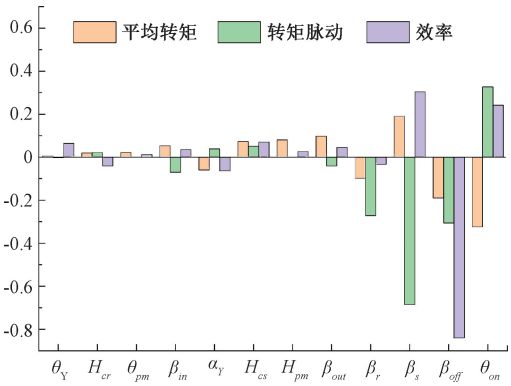


图 8　灵敏度分析结果

Fig. 8　Sensitivity analysis result

各设计变量变现出与优化目标不同的相关程度，仅通过相应的相关系数结果很难选择出关键设计变量。为了解决这一问题，本文采用了权衡相关系数分析法。所选设计变量 $S_{com}(x_i)$ 的综合相关系数：

$$S_{com}(x_i)=w_1\cdot|S_{Tavg}(x_i)|+w_2\cdot|S_{Trip}(x_i)|+w_3\cdot|S_\eta(x_i)| \tag{3}$$

式中：x_i 为设计变量，$S_{Tavg}(x_i)$、$S_{Trip}(x_i)$、$S_\eta(x_i)$ 分别为所选设计变量对平均转矩、转矩脉动和效率的 Pearson 相关系数。

w_1、w_2、w_3 分别为平均转矩、转矩脉动和效率的评价系数，3 个系数的大小分别为 0.2，0.6，0.2。分层结果如图 9 所示，显然，θ_{on}、θ_{off}、β_s、β_r 这 4 个参数表现出来的敏感性更高。因此，将这 4 个参数视为强相关层，将剩余 8 个参数视为弱相关层。

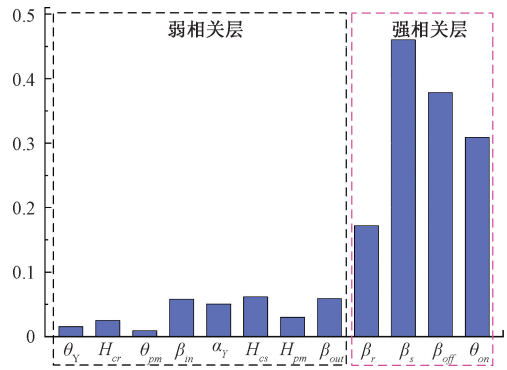


图 9　参数分层结果

Fig. 9　Parameters layered result

2.4　多目标优化算法

NSGA-II 通过比较每个个体间的支配关系确定 rank 层级，以拥挤度作为同 rank 层排序依据，同时加入锦标赛机制以及精英保留策略，使得算法复杂度降低，收敛速度加快。图 10 所示为 NSGA-II 的流程图。

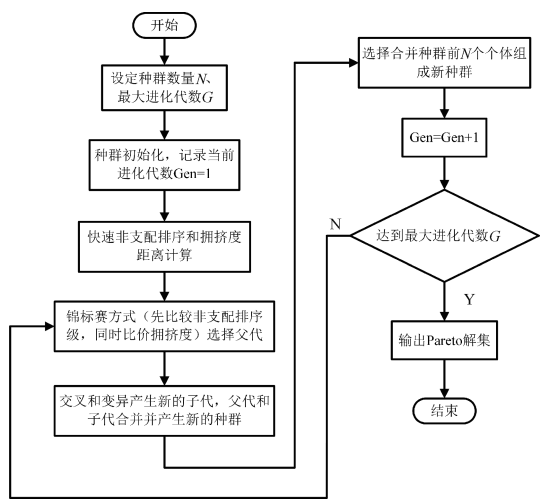


图 10　NSGA-II 流程

Fig. 10　Process diagram of NSGA-II

本次实验算法的主要参数设定如表 3 所示。

表 3　NSGA-II 参数设置

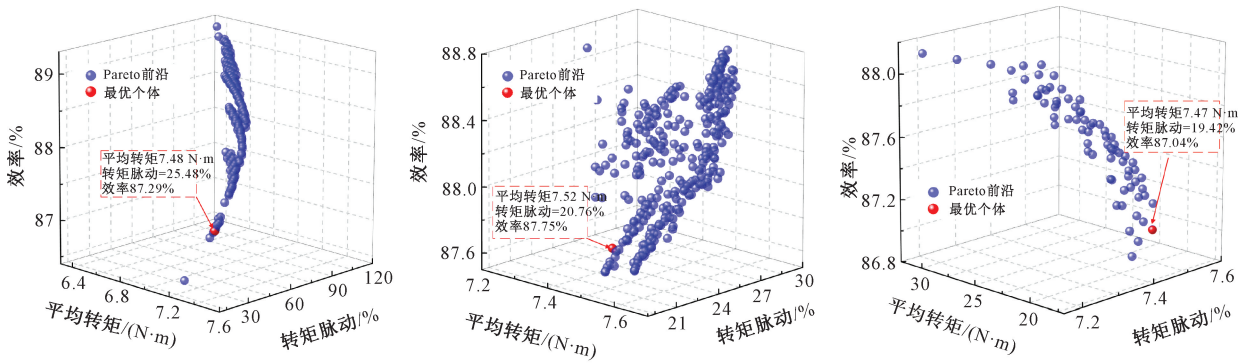
Table 3　NSGA-II Parameter Settings

参数名	种群规模	迭代次数	交叉系数	变异系数
数值	50	50	0.8	0.2

将图 6 步骤②中，通过 GA-SVM 建立好的非线性代理模型，添加到多目标优化算法中。该代理模型相较于耦合脚本，在保证算法精度的同时，加快了算法寻优的时间。

2.5　分层优化结果

通过 3 次迭代，每代 pareto 前沿和最优个体的分布情况如图 11 所示。这里需要说明一下，图 11 中注释的最优个体为算法优化所得，而表 4 为有限元分析所得。因为算法中优化目标为预测模型，与实际模型有所偏差，但误差结果在可接受范围之内。



(a) 第1层迭代　(b) 第2层迭代　(c) 第3层迭代
(a) First iteration　(b) Second iteration　(c) Third iteration

图 11　各层 pareto 前沿和最优个体

Fig. 11　Pareto frontiers and optimal individuals at each layer

通过表 4 可以看出，经历第 1 次优化后，平均转矩由 6.67 N · m 提高到 7.47 N · m，提高了 12%，而转矩脉动从 86.58%降低了 61.6%，达到了 24.98%，但效率提升相对较低；在第 2 次优化后平均转矩和效率的提升并不太明显，只有转矩脉动下降了 3.36%。第 3 次优化后，虽然转矩脉动继续降低了 2.66%，但是却牺牲了部分转矩和效率，因此分层优化流程结束。

分层优化并非是一个无限循环的过程，需要进行多代优化。通过分析可以看出，分层优化是否结束可以通过图 5 中的“结果比较”模块来判定，这说明本文提出的分层优化并不是一个无限循环的过程。随着优化过程的进行，设计参数的变化范围也根据各 Pareto front 对应的设计参数而减小，最终趋于最优参数。分层优化看起来是一个复杂的过程，需要多次优化，但与非分层优化相比，大大减少了实验操作难度。

表 4　分层优化结果

Table 4　Layered optimization result

参数		迭代次数			
		初始	1st	2nd	3rd
强层	θ_{on}	0	−0.8	−0.8	−0.9
	θ_{off}	7.5	7.8	7.8	7.9
	β_s	5	6	6	6
	β_r	6	7.8	7.8	7.9
弱层	H_{cr}	6.5	6.5	6.8	6.8
	H_{cs}	9	9	8.2	8.2
	β_{in}	5	5	6.6	6.6
	β_{out}	0.7	0.7	0.7	0.7
	α_Y	52	52	45.1	45.1
	θ_Y	7	7	6.2	6.2
	H_{pm}	5	5	4.4	4.4
	θ_{pm}	0.7	0.7	0.5	0.5
平均转矩 T_{avg}		6.67 N · m	7.47 N · m	7.50 N · m	7.47 N · m
转矩脉动 T_{rip}		86.58%	24.98%	21.62%	18.96%
效率 η		87.14%	87.39%	87.41%	87.08%

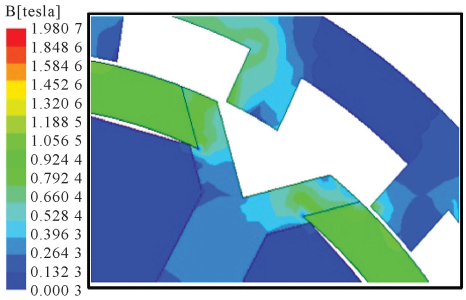
3　电机优化结果和实验分析

3.1　输出性能

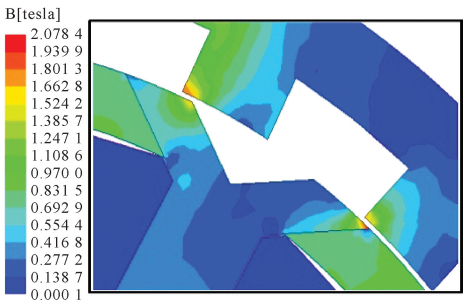
通过表 4 有关于分层优化的结果可以看出，迭代优化过程中，电机输出的平均转矩相差不大，但是相较于初始模型有所提高。其中第 3 次迭代结果电机的转矩脉动最小，只有 18.96%；而第 2 次迭代结果电机的效率最大，达到了 87.41%。

为了追求更小的转矩脉动，可以选择第 3 次迭代结果作为电机最优模型。为了追求较高的效率，可以选择第 2 次优化结果。本文综合考虑 3 个优化目标的影响，最终选择将第 2 次迭代的结果作为最终的优化结果。

图 12 为 A 相和 B 相交换区间，转子齿部的磁通密度，图 12(a)为初始模型，图 12(b)为优化模型。通过比较转子齿部的磁通密度可以看出，经过优化后，换相区间转子齿的磁通密度大于优化前的，这意味着在 A 相和 B 相交换区间内可以产生更大的转矩，即提高了电机的最小转矩，最终减小转矩脉动。



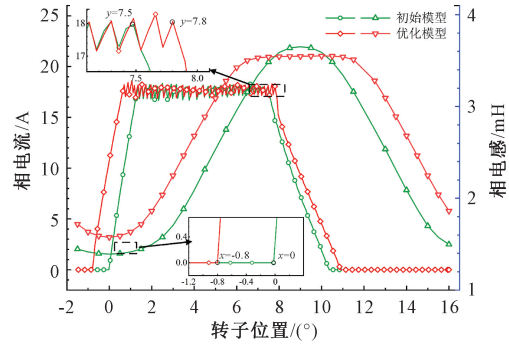
(a) 初始模型
(a) Initial model



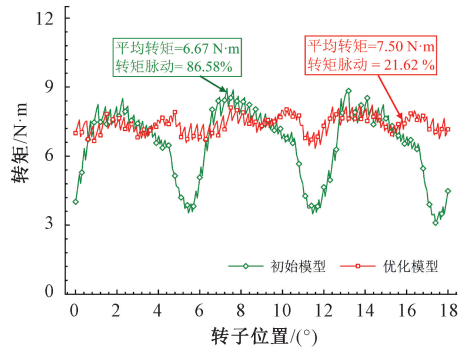
(b) 最优模型
(b) Optimum model

图 12　转子齿部磁密对比

Fig. 12　Magnetic density comparison of rotor teeth



(a) 单相电流和电感对比
(a) Comparison of single-phase current and inductance



(b) 转矩对比
(b) Comparison of torque

图 13　初始模型和优化模型输出性能比较

Fig. 13　Comparison of output performance between the initial model and the optimized mode

图 13(a)为初始模型和优化模型单相电流和电感曲线。经过分层优化后,使得电机在最小电感区域的电感较初始状态有所提高;而导通角的提前,使得最小电感区域的电流也较初始状态有所增大,从而导致换相区域的最小转矩增大,最终减小电机的转矩脉动。最大电感区域得到了扩展,使得相电流仍然存在于最大电感的平顶区域,而非电感下降区间,因此不会产生较多的负转矩。图 13(b)为一个转子极距内转矩的对比图,分层优化后,平均扭矩达到 7.5 N · m。与初始模型相比平均转矩提高了 12.44%,而转矩脉动减小了 64.96%。

对比电机初始模型和优化模型在 300~1 500 rpm 条件下的输出性能,各转速情况下对应的控制参数如表 5 所示。

表 5　不同转速下的控制参数

Table 5　Control parameters at different speeds

转速/rpm	初始模型		优化模型	
	开通角/(°)	关断角/(°)	开通角/(°)	关断角/(°)
300			8.0	-0.6
500			7.8	-0.8
700			7.4	-1.6
900	0	7.5	7.0	-2
1 100			6.8	-2
1 300			6.8	-2
1 500			6.8	-1.4

采用表 5 中的控制参数,得到电机优化前后平均转矩的对比曲线,如图 14(a)所示。优化后电机在各转速下的平均转矩均有所提高,尤其在转速小于 1 300 rpm 时较为明显,而随着转速的升高平均转矩提高的比重越来越小。

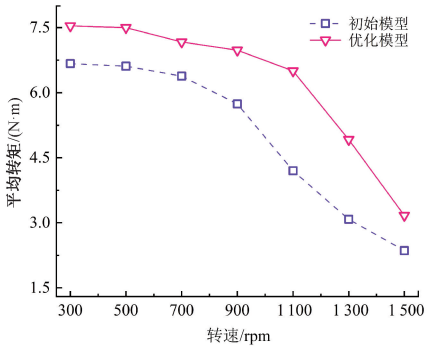
电机优化前后转矩脉动和效率的对比曲线,如图 14(b)所示。图中虚线部分表示为优化前后转矩脉动的对比,很明显在各转速条件下,优化后电机的转矩脉动要比初始模型小的多。

图中实线部分表示为优化前后效率的对比,在低速 300~700 rpm 时效率的提升效果不是十分明显,但随着转速的提高,效率提升的比重越来越大。

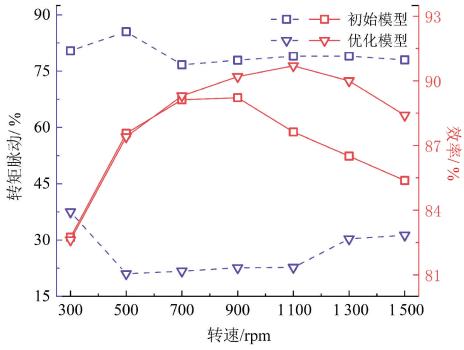
通过表 5 可知,在不同转速下电机对应不同的开通角和关断角。在不同转速下采用不同的控制参数,综合分析平均转矩、转矩脉动和效率的变化情况,证明了优化后电机性能得到了提高,说明本文所提出优化方法的有效性和准确性。

3.2　实验分析

根据上述分层优化过程,确定了电机定转子的模型。首先通过三维设计软件,设计了 SSEHSRM 的实验样机,



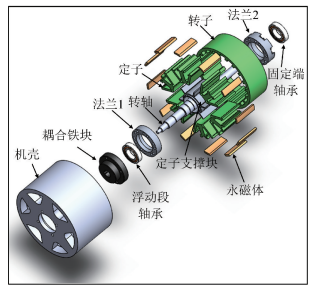
(a) 转矩对比
(a) Comparison of torque



(b) 转矩脉动和效率
(b) Comparison of efficiency and the torque ripple

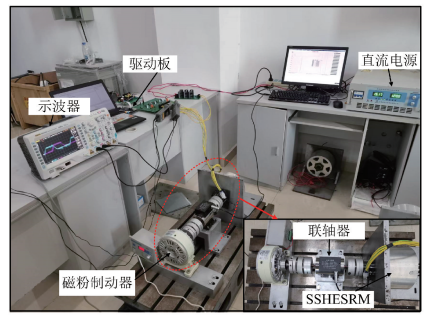
图 14　多转速下电机性能对比

Fig. 14　Motor performance comparison at multiple speeds



(a) 样机爆炸图
(a) Prototype explosion figure

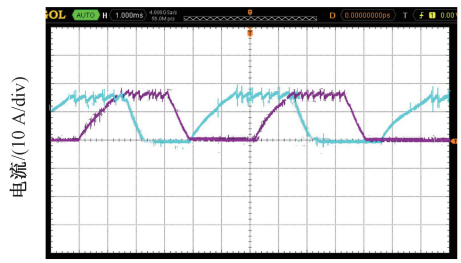
(b) 定子、转子、转轴
(b) Stator, rotor, shaft



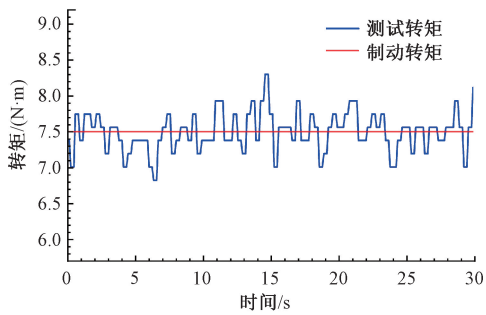
(c) 电机样机及测试平台
(c) Motor prototype and test platform

图 15　样机部件和测试平台

Fig. 15　Prototype parts and test platform



(a) 样机实验电流图
(a) Experimental current figure of prototype



(b) 样机实验转矩图
(b) Experimental torque figure of prototype

图 16　样机实验电流和转矩曲线

Fig. 16　Prototype test current and torque curves

图 15(a)为样机的 3D 结构爆炸图。根据电机结构绘制了零部件的工程图,并加工出具体的定子、转子及部分零部件,如图 15(b)所示。实验测试平台所用到的设备如图 15(c)所示。

图 15(a)所示的电机爆炸图,其中法兰 2 用作固定端的轴承室;法兰 1 用作浮动端的轴承室,并且该轴承室内应有波形弹簧与浮动端轴承配合安装,波形弹簧作用给浮动端轴承添加预紧力,防止浮动端轴承打滑。耦合铁块是用于连接电机机壳和转轴,因为转子和壳体进行为热套安装,机壳随转子一同旋转。定子支撑块作为电机中重要的一个零件,其作用对分段定子进行固定,因此该部件需要较高的精度,否则将会使得气隙不均匀,导致不平衡磁拉力等影响。

对实验样机进行测试时,所采用的控制方式即为前文所提出的 APC 控制方法,电机转速为 500 rpm,将开通角设置为-0.8°、关闭角为 7.8°,相电流限幅为 18 A,实验电流波形如图 16(a)所示。通过调节磁粉制动器的励磁电流,实现 7.5 N·m 的稳定负载,实验所得转矩图如图 16(b)所示,转矩脉动大约为 19.7%,与仿真存在一定误差,但误差在可接受范围内。

4 结 论

本文介绍了一种基于NSGA-II的分层优化策略。运用该策略于定子分段混合励磁的开关磁阻电机的优化中,以平均转矩、转矩脉动和效率为优化目标,对12个参数(结构参数和控制参数)进行分层,降低了多参数协同优化的复杂性和难度。经历两次迭代后寻找到最优解,在500 rpm下的仿真结果表明,相比较于初始模型优化后电机的效率略有提高,而平均转矩增加12.44%,转矩脉动减小64.96%。在不同转速下电机的平均转矩均得到提高、转矩脉动降低的效果最为明显,而效率的提升程度随着转速的增高而增大。

参考文献

[1] SESHADRI A, LENIN N C. Review based on losses, torque ripple, vibration and noise in switched reluctance motor [J]. IET Electric Power Applications, 2019: 1311-1326.

[2] GAN C, WU J, SUN Q, et al. A review on machine topologies and control techniques for low-noise switched reluctance motors in electric vehicle applications [J]. IEEE Access, 2018: 31430-31443.

[3] LAN Y, BENOMAR Y, DEEPAK K, et al. Switched reluctance motors and drive systems for electric vehicle powertrains: State of the art analysis and future trends [J]. Energies, 2021: 14-24.

[4] 高锋阳,高建宁,李明明,等. 内置式Halbach永磁同步电机的参数敏感度分层优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2022:180-190.
GAO F Y, GAO J N, LI M M, et al. Optimization design of Halbach interior permanent magnet synchronous motor based on parameter sensitivity stratification Halbach[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022: 180-190.

[5] 曹永娟,冯亮亮, 毛瑞, 等. 轴向磁场永磁记忆电机多目标优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2021: 1983-1991.
CAO Y J, FENG L L, MAO R, et al. Multi-objective stratified optimization design of axial-flux permanent magnet memory motor [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2021:1983-1991.

[6] SUN X, SHI Z, LEI G, et al. Multi-objective design optimization of an IPMSM based on multilevel strategy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021: 139-148.

[7] HUA Y, ZHU H, GAO M, et al. Multiobjective optimization design of permanent magnet assisted bearingless synchronous reluctance motor using NSGA-Ⅱ [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021: 10477-10487.

[8] 徐萌, 周玉祥, 徐海,等. 基于改进粒子群算法的开关磁阻电机本体优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4), 131-141.
XU M, ZHOU Y X, XU H, et al. Ontology optimization of switched reluctance motor based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4), 131-141.

[9] FARAHANI E F, KONDELAJI M A J, MIRSALIM M. A new exterior-rotor multiple teeth switched reluctance motor with embedded permanent magnets for torque enhancement [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 1-5.

[10] QIAO W, DIAO K, HAN S, et al. Design optimization of switched reluctance motors based on a novel magnetic parameter methodology [J]. Electrical Engineering, 2022, 104(6): 4125-4136.

[11] QIAODAN L, FENGCHONG L, HAOLAN X, et al. Structural torque ripple suppression method of switched reluctance motor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56.

[12] 杨成林, 张棋皓, 王浩. 基于对数分布参考点LDRP的分解多目标进化MOEA/D算法实现模拟电路故障参数估计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2):119-128.
YANG CH L, ZHANG Q H, WANG H. Fault parameter estimation of analog circuits using the decomposed multi-objective evolutionary algorithm MOEA/D based on logarithmic distribution reference points LDRP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 119-128.

[13] 刘智睿, 杨志刚, 赵志伟, 等. 决策空间自组织多模态多目标鲸鱼优化算法研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 48-55.
LIU ZH R, YANG ZH G, ZHAO ZH W, et al. Research on self-organizing multi-modal multi-objective whale optimization algorithm in decision space [J]. Electronic Measure Technology, 2023, 46(4): 48-55.

[14] 蔡奇志, 苗荣霞, 樊逸飞, 等. 基于粒子群优化神经网络的电梯群控算法[J]. 国外电子测量技术,2019, 38(5):114-119.
CAI Q ZH, MIAO R X, FAN Y F, et al. Elevator group control system based on BP neural network by improved PSO[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(5): 114-119.

[15] DIAO K, SUN X, YAO M. Robust-oriented optimization

of switched reluctance motors considering manufacturing fluctuation [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022: 2853-2861.

[16] MOUSAVI-AGHDAM S R, FEYZI M R, BIANCHI N, et al. Design and analysis of a novel high-torque stator-segmented SRM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016:1458-66.

[17] ANDRADA P, BLANQUE B, MARTINEZ E, et al. A novel type of hybrid reluctance motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014: 4337-4345.

[18] DING W, YANG S, HU Y, et al. Design consideration and evaluation of a 12/8 high-torque modular-stator hybrid excitation switched reluctance machine for EV applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017: 9221-9232.

[19] ZHU J, CHENG K W, XUE X. Design and analysis of a new enhanced torque hybrid switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018: 1965-1977.

作者简介

黄朝志,于 2001 年和 2004 年获得江西理工大学电气工程与自动化学院学士学位和硕士学位,博士毕业于江苏河海大学能源与电气工程学院,现为江西理工大学电气学院副教授,主要研究方向为磁阻电机设计、驱动和控制技术、以及电力电子设备应用程序。

E-mail: huangchaozhi@ 163. com

Huang Chaozhi received his B. Sc. and M. Sc. degrees in the School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China, in 2001 and 2004, respectively. He received his Ph. D. degree from the School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Jiangsu Province, China. He is now an associate professor at the Jiangxi University of Science and Technology. His main research interests include SRMs and PMSMs, and their drive and control, and power electronics applications.

张文进(通信作者),目前在江西理工大学攻读电气工程硕士学位,主要研究方向为开关磁阻电机和永磁同步电机结构设计与优化分析。

E-mail: wenjinzhang2021@ 163. com

Zhang Wenjin(Corresponding author) is now a M. Sc. candidate in Electrical Engineering at the Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China. His main research interests include structural design and optimization analysis of SRMS.

李海雯,目前在江西理工大学攻读电气工程硕士学位,主要研究方向为磁阻电机结构设计和多目标算法优化。

E-mail: 1751640057@ qq. com

Li Haiwen is now a M. Sc. candidate in electrical engineering at Jiangxi University of Science and Technology. Her main research interests include switched reluctance motor structure design and multi-objective algorithm optimization.

孙燕文,目前在江西理工大学攻读电气工程硕士学位,主要研究方向为开关磁阻电机控制器的设计和研究。

E-mail: syw6688379@ 163. com

Sun Yanwen is now a M. Sc. candidate in Electrical Engineering at the Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China. His main research interests include the design and research of SRMs and PMSMs controllers.