

基于搜索算法的电机绕组自动排布方法

沈伟键¹, 傅为农^{1*}, 王志强²

(1. 深圳理工大学 计算机科学与人工智能学院, 广东 深圳 518107;

2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055)

Automatic Motor Winding Layout Method Based on Search Algorithm

Shen Weijian¹, Fu Weinong^{1*}, Wang Zhiqiang²

(1. Faculty of Computer Science and Control Engineering, Shenzhen University of Advanced Technology, Shenzhen 518107, China;

2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract: [Objective] To address issues of experience dependence, low efficiency, and possible omission of feasible solutions in motor winding layout design under complex slot-pole combinations, multiphase configurations, and different winding forms, a search-and-pruning-based automatic winding layout method is proposed. The method provides an automated solution framework for the unified generation and screening of concentrated windings, distributed windings, and multiphase windings. [Methods] The winding layout problem was formulated as a constrained coil-side combination search problem. A backtracking-based depth-first search framework was constructed to generate candidate winding layouts through coil-side pairing. Bit-mask representation was used to record slot occupancy, enabling fast conflict detection and feasibility checking. The synthesized fundamental and harmonic phasors were updated through incremental complex summation, which eliminated redundant full-range summation calculations. To narrow down the actual search space, symmetry reduction, a triangle-inequality reachability upper bound, and a projection upper bound along the current synthesized phasor direction were adopted to prune invalid branches that fail to satisfy the target winding factor. [Results] Representative three-phase and five-phase case studies showed that the proposed method can automatically generate feasible winding layout schemes with high fundamental winding factors under different slot-pole combinations. Compared with combinational enumeration method, the proposed method significantly reduced the number of visited search nodes and computation time, with pruning rates exceeding 95% in typical cases. Finite element simulation of a 40-slot 26-pole five-phase permanent magnet synchronous motor showed that the average torque of the

winding layout obtained by the proposed method was 14.570 N·m, slightly higher than the 14.547 N·m obtained by the star diagram method. Its torque ripple of 0.067 4% was lower than 0.075 6% obtained by the star diagram method, and the total harmonic distortion of the air-gap flux density waveform reached 9.95%, also lower than the 11.18% given by the star diagram method. [Conclusion] The proposed method effectively reduces the practical search space while ensuring the completeness of feasible solution exploration, thereby yielding winding configurations with a high fundamental winding factor and low low-order harmonic content. It is applicable to rapid design and scheme comparison for complex slot-pole combinations, multiphase configurations and diverse winding forms, providing a reliable front-end design tool for subsequent electromagnetic optimization, harmonic suppression, and torque ripple mitigation.

Key words: automatic winding layout; concentrated winding; distributed winding; depth-first search

摘要:【目的】针对复杂槽极配合、多相配置及不同绕组形式下电机绕组排布设计依赖经验、效率低且易遗漏可行方案的问题,本文提出一种基于搜索与剪枝的绕组自动排布方法,为集中绕组、分布绕组及多相绕组的统一生成与筛选提供自动化求解思路。【方法】将绕组排布问题抽象为带约束的线圈边组合搜索问题,构建基于回溯的深度优先搜索框架,以线圈边配对方式生成候选绕组方案。采用位掩码记录槽位占用状态,实现快速冲突检测与合法性判定。利用增量复数和更新基波及谐波合成相量,避免重复全量求和。为缩减实际搜索规模,引入对称规约、三角不等式可达上界和沿当前合成相量方向的

投影上界,对不可能达到目标绕组系数的分支进行剪枝。

【结果】三相与五相典型算例表明,所提方法能够在不同槽极配合下自动生成基波绕组系数较高的可行绕组排布方案。相较于组合枚举方法,本文方法显著减少了搜索节点数和计算时间,典型算例剪枝率均超过 95%。40 槽 26 极五相永磁同步电机有限元仿真结果表明,本文方法所得绕组方案的平均转矩为 $14.570 \text{ N}\cdot\text{m}$,略高于星线图法的 $14.547 \text{ N}\cdot\text{m}$;转矩脉动率为 0.067 4%,低于星线图法的 0.075 6%;气隙磁密波形总谐波畸变率为 9.95%,低于星线图法的 11.18%。**【结论】**本文方法能够在保证可行解搜索完整性的基础上有效缩减实际搜索空间,并获得具有基波绕组系数高且低阶谐波含量低的绕组排布方案。该方法适用于复杂槽极组合、多相配置及多种绕组形式下的快速设计与方案对比,可为后续电磁优化、谐波抑制和转矩脉动抑制提供前端设计工具。

关键词: 绕组自动排布;集中绕组;分布绕组;深度优先搜索

0 引言

随着新能源装备和工业自动化技术的快速发展,电机作为动力核心,其性能直接影响系统的能效、功率密度与运行稳定性。特别是在新能源汽车、航空航天、船舶推进、机器人关节及高端数控装备等场景中,高功率密度、高转矩密度与宽速域高效率已成为电机设计的重要目标^[1-2]。

近年来,集中绕组电机凭借其端部短、槽满率高、成本可控以及易于模块化和自动化制造等特点,成为中小型高性能永磁电机的重要发展方向之一,并在车用驱动、电推进和分布式驱动装备中获得广泛关注与应用^[3-7]。

与传统分布式绕组相比,分数槽集中绕组(Fractional Slot Concentrated Winding, FSCW)在缩短端部长度、降低铜耗、提升功率密度、增强弱磁扩速能力以及改善容错性等方面具有明显优势。同时,FSCW 槽极配合灵活,便于在给定外形尺寸和定转子约束下进行综合电磁优化,因此在新新能源汽车、海上风电直驱发电机、多相船舶推进电机以及故障容限驱动系统中受到持续重视^[4-10]。

然而,FSCW 也伴随着新的工程权衡:其磁动势通常包含较丰富的空间谐波,可能进一步引发转矩脉动、附加损耗、永磁体涡流损耗以及噪声振

动等问题,需要通过槽极配合、绕组层数设计及结构优化等手段进行抑制和平衡^[11-12]。

在非对称或非常规槽极配合下,绕组产生的磁动势往往难以逼近理想正弦分布,定子磁场中会出现较强的低次和高次空间谐波,从而加剧齿槽转矩和电磁转矩脉动,恶化振动噪声性能,并可能在高速工况下诱发更显著的永磁体涡流损耗与温升问题。在高精度伺服、机床主轴和机器人关节等应用场景中,这些问题还会影响定位精度与运行平稳性^[13-17]。

针对 FSCW 电机特有的齿谐波与齿调制效应,传统斜槽、斜极等手段虽能抑制部分转矩脉动,但往往会牺牲功率密度与平均转矩,使设计指标之间的矛盾更加突出^[18-20]。需要指出的是,绕组排布设计并不限于 FSCW 这一类结构。无论是分布绕组、集中绕组,还是多相、混合层数及非常规槽极配合下的绕组,其本质上都涉及在给定槽数、极数、相数、跨距及电磁性能约束的条件下,对线圈边在定子槽中的空间分布进行构造与筛选。绕组排布的合理性直接影响基波绕组系数、空间谐波分布、转矩脉动、损耗及振动噪声等关键性能指标。因此,建立一种适用于多类绕组形式的统一排布生成与评价方法,具有重要的理论意义与工程价值。

目前,绕组设计尤其是多相或非常规槽极配合的 FSCW 的设计,仍依赖解析法、星线图法以及经验性规则来生成候选绕组排布^[21-22]。这些方法在常规对称三相绕组中有效,但在槽数、极数、相数增大或结构不规则时,往往面临可行性判定困难和组合空间迅速膨胀等问题^[23-24]。

近年来,已有研究开始尝试通过多层绕组综合、混合单双层绕组、数论法以及枚举方法,突破传统星线图法对槽数、极数和相数组合的限制,为复杂绕组自动生成与优化提供新思路^[24-25]。

为解决上述问题,本文提出一种基于回溯搜索的高效枚举算法。该算法在统一的组合建模框架下,对满足给定约束条件的候选绕组方案进行系统搜索。通过结合位掩码冲突检测、增量复数和以及基于三角不等式的剪枝策略,在保证排布正确性的前提下显著压缩搜索空间,提高候选方案的生成效率。相较于传统组合枚举方法,所提方法能够覆盖集中绕组、分布绕组以及其他给定

规则下的绕组,并适用于三相、五相等不同相数及复杂槽极配合下的绕组排布设计,可为后续谐波评价、转矩脉动分析及电磁优化提供高效的前端支撑。

1 核心问题与代码分析

1.1 核心问题阐述

1.1.1 电磁平衡约束

电磁平衡的核心是要求多相绕组在整体空间分布上相带对称、幅值平衡且相位均匀错开。对于 m 相对称绕组,第 a 相电流相位 φ_a 可表示为

$$\varphi_a = \frac{2\pi(a-1)}{m}, a = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

令第 a 相在基波下的合成相量为 $C_{a,1}$,则有:

$$C_{a,1} = \sum \sigma_k e^{j\alpha k}, k = 0, 1, \dots, Z-1 \quad (2)$$

式中: k 为槽位; Z 为定子槽数; α 为相邻槽之间的电角度, $\alpha = 2\pi p/Z$, p 为转子极对数; σ_k 为 k 槽线圈边方向系数,取值为 $\pm 1, 0$ 。

式(2)的求和范围为所有满足 $a_k = a$ 的槽位 k , a_k 为第 k 槽所属相别。

理想平衡条件可表示为

$$|C_{1,1}| = |C_{2,1}| = \dots = |C_{m,1}| \quad (3)$$

且相邻两相之间的相位差为 $2\pi/m$ 。

1.1.2 性能优化目标

在满足电磁平衡和槽位占用约束的基础上,以基波绕组系数最大化为优化目标,并兼顾低阶空间谐波抑制。对于 a 相 v 次空间谐波,绕组排布对应的合成相量 C_v 为

$$C_v = \sum \sigma_k e^{jv\alpha k}, k = 0, 1, \dots, Z-1 \quad (4)$$

式(4)的求和范围为所有满足 $a_k = a$ 的槽位 k 。

基波绕组系数 $K_{w,1}$ 表达式为

$$K_{w,1} = \frac{|C_1|}{N_{act}} \quad (5)$$

式中: N_{act} 为有效线圈边数。

因此,绕组自动排布问题可表述为:在满足电磁平衡和槽位占用约束的条件下,寻找使 $K_{w,1}$ 最大的 N_{act} 。

1.2 代码整体结构概述

为实现“参数输入—自动筛选—最优输出”的设计流程,本文代码采用模块化架构,具体包括排列生成模块、移位处理模块以及控制模块。

1.2.1 排列生成模块

排列生成模块是绕组设计的基础,核心功能是基于输入的相数 m 、定子槽数 Z 、转子极对数 p ,生成所有潜在的绕组位置对组合,并考虑线圈正绕/反绕特性(大写字母表示正绕,小写字母表示反绕),确保覆盖全部可能的排布方案。

以 $Z=6, m=3$ 的集中绕组电机为例,模块首先确定槽位编号(0~5),然后根据相数确定每相覆盖2个槽,生成所有绕组排列组合,结合正绕/反绕特性,最终的排列方案包括“AaBbCc”和“AbBcCa”等共36种潜在方案。

1.2.2 移位处理模块

移位处理的核心目标是通过调整绕组相位,满足多相电机的相位平衡要求。不同相数电机的相位间隔不同:三相电机需满足各相间间隔 120° 电角度,五相电机需满足各相间间隔 72° 电角度。

模块通过移位函数实现相位调整。首先将机械槽位转换为电角度槽位,然后根据相数确定移位步数。以 $Z=12, p=2, m=3$ 的电机为例,电角度转换后,槽0对应 0° 、槽1对应 60° 、槽2对应 120° ,移位步数为 $12/(3 \times 2) = 2$,即A相从槽0开始,B相从槽2开始(对应 120°),C相从槽4开始(对应 240°),确保三相相位平衡。

1.2.3 控制模块

控制模块是代码的核心调度单元,整合排列生成模块和移位处理模块的功能,通过复数运算完成性能评估,流程如图1所示,具体流程如下。

(1)接收用户输入的 Z, p 与目标值参数,调用排列生成模块,生成潜在方案;

(2)调用移位处理模块调整各相相位,确保相位平衡;

(3)调用有效性判断模块剔除无效方案,保留满足约束的方案;

(4)对保留方案进行性能计算:基于复数域运算计算绕组系数 K ;

(5)输出绕组系数满足目标数值的所有方案。

2 优化策略

结合电机绕组的工程特性,从算法、约束和计算效率三个维度提出针对性优化策略,解决传统设计中计算量大、方案有效性低以及设计周期长

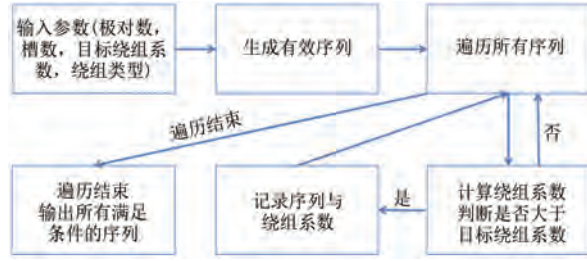


图 1 控制模块流程图

Fig. 1 Control module flowchart

的问题。

2.1 环状优化右移

环状右移操作用于将三/五相排列进行轮换。此操作确保在进行判定时,可以更方便地比较上下层的配对,并保持三/五相排列的周期性,且在递归过程中无需每次手动改变数组排列,避免冗余计算,减少时间复杂度,提高操作的灵活性。

2.2 对称规约与首项固定

考虑到目标函数与约束对某些旋转翻转对称,固定槽 0 为正极性。对于给定的起始槽位 i 和线圈跨距 y ,与其配对的另一线圈边所在槽位为 $j=(i+y) \bmod Z, \bmod$ 为取模计算。对于双层绕组,仅考虑上、下层线圈边之间的配对关系,从而避免重复生成由旋转或极性翻转产生的等价方案。对称规约能够减少重复搜索分支,降低实际搜索空间。

2.3 增量复数和与目标函数

为避免在搜索过程中对每一个候选排布重复执行完整的复数求和运算,本文采用增量复数和的方式更新评价指标。设当前已放置线圈边对应的基波合成相量为 C_v ,当新增一对线圈边 (i, j) 后,只需在原有基础上叠加新增线圈边对基波相量的贡献,即可得到新的 C'_v 。

设当前搜索状态下已放置线圈边的集合为 S ,则当前合成相量为

$$C_v = \sum \sigma_k e^{j\alpha_k}, k \in S \quad (6)$$

当新增一对线圈边 (i, j) 后,若两侧线圈边方向系数分别为 σ_i 和 σ_j ,则新增线圈边对 t 对第 v 次谐波的贡献为

$$v_t = \sigma_i e^{j\alpha_i} + \sigma_j e^{j\alpha_j} \quad (7)$$

因此,新增线圈边对 t 后的合成相量为

$$C'_v = C_v + v_t \quad (8)$$

该更新过程只需要常数复数加法,不需要

在每次递归时重新遍历所有已放置槽位。采用增量复数和不仅降低了单次评价开销,还为后续分支限界剪枝中的上界估计提供了基础。

2.4 三角不等式剪枝

设当前搜索状态下的基波合成相量为 C_v ,尚未放置的线圈边对数量为 R 。任一候选线圈边对 t 对基波合成相量的贡献记为 v_t 。如果仅考虑模长的最大可能增益,根据三角不等式,最终合成相量模长满足:

$$|C_v + \sum v_t| \leq |C_v| + \sum |v_t| \quad (9)$$

由于每新增一对线圈边所能提供的贡献有限,根据三角不等式,最终可达到的合成相量模长(三角不等式上界) U 满足:

$$U = |C_v| + R v_{\max} \quad (10)$$

式中: $v_{\max}$ 为任一候选线圈边贡献的模长最大值,为方便本文计算直接取 2。

若 $\frac{U}{N_{\text{act}}} < \tau$, τ 为目标阈值,说明即使在最理想

情况下,该分支也无法达到目标绕组系数,因此可以直接剪枝。

2.5 投影上界

为了得到更紧的上界,本文进一步引入沿当前合成相量方向的投影上界。当 C_v 不等于 0 时,定义当前合成相量方向为目标方向。计算 v_t 沿当前目标方向的正投影,记为 ρ_t ,其对应的垂直分量计为 γ_t 。只有正投影能够增加当前目标方向上的合成幅值,负投影不会提高当前分支的上界,因此可忽略。

将所有剩余候选线圈边对的正投影按照从大到小排序,取其中最大的 R 个,记为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_R$,则投影上界为

$$U_{\text{pj}} = \sqrt{(|C_v| + \sum_{t=1}^R \rho_t)^2 + (\sum_{t=1}^R \gamma_t)^2} \quad (11)$$

若 $\frac{U_{\text{pj}}}{N_{\text{act}}} < \tau$,则该分支不可能产生满足目标方

案,可以剪枝。

需要指出的是,三角不等式上界 U 的计算复杂度较低,但其估计结果通常较为宽松,因而剪枝能力有限;投影上界 U_{pj} 能更好地反映剩余候选线圈边对沿当前目标方向的有效增益,但需要额外的投影计算和排序操作。因此本文采用两级剪

枝策略,首先使用 U 进行快速筛选,仅当 U 接近目标阈值时再计算 U_{pj} 进行二次判断。两级剪枝在保证可行解的前提下,提高了剪枝效率与准确率。

2.6 递归回溯搜索

用位掩码记录已占用槽位,用复数和 C_1 与投影值 p 做原地增量更新。新增一对线圈边 (i, j) 时,可将状态转换表示为

$$C_1 \leftarrow C_1 + \sigma_i e^{j\alpha i} + \sigma_j e^{j\alpha j} \quad (12)$$

$$p \leftarrow p + R(\sigma_i e^{j\alpha i} + \sigma_j e^{j\alpha j}) \quad (13)$$

剪枝只在 U 严格小于目标的前提触发,而 U 是对全部剩余选择的合法上界,因此被剪枝的分支不可能包含更优解,不影响正确性。

3 理论优势分析

3.1 与现有绕组设计方法的对比

现有绕组设计方法主要包括星线图法、数论构造方法、多层绕组综合方法以及组合枚举方法等。星线图法根据槽电势相量在复平面上的分布关系进行相带划分,具有直观、工程经验性强等优点,在常规三相、对称槽极配合以及相带分布较规则的绕组设计中应用广泛。然而,当槽极配合呈现分数槽、相数增加、槽数与极数不满足常规对称关系,或者需要同时考虑多层、混合层数时,星线图法通常需要大量人工判断,难以直接形成统一的自动化搜索流程,且容易遗漏满足约束的可行排布方案。

数论构造方法能够利用槽数、极数和相数之间的整数关系快速生成特定类型的多相绕组方案,适用于具有明确周期性和模块化特征的绕组设计。该方法在部分规则槽极组合中具有较高效率,但其构造过程通常依赖预设的数学关系和绕组结构。当设计对象存在非常规槽极组合、混合层数、特殊线圈跨距或额外工程约束时,数论构造方法的适用范围受限,难以直接覆盖所有候选排布空间。

多层绕组综合方法通过增加绕组层数或调整不同层之间的线圈边分布,来改善部分低阶空间谐波和电磁振动问题。该方法通常以某类具体绕组结构为研究对象,更多关注特定结构下的谐波或振动改善效果,而不是面向任意槽数、极数、相数和跨距约束的统一自动排布框架。因此,当设

计目标从单一结构优化扩展到多种绕组形式的统一生成与筛选时,其通用性和可扩展性存在一定限制。

与上述方法不同,本文方法将绕组排布问题抽象为带约束的线圈边组合搜索问题。通过深度优先搜索、增量复数和评价以及分支限界剪枝,不依赖特定槽极组合的解析构造规则,也不局限于某种绕组层数或相数。只要给定槽数、极数、相数、线圈跨距以及目标绕组系数,算法即可在统一框架下生成候选排布方案,并根据基波绕组系数进行筛选。

本文方法与现有方法的主要差异在于:第一,星线图法侧重人工相带划分,而本文方法侧重自动搜索与约束判定;第二,数论构造方法侧重满足特定整数关系的规则构造,而本文方法可以处理更一般的槽极配合和约束组合;第三,多层绕组综合方法侧重特定多层结构的性能改进,而本文方法可将单层、双层、多层、集中绕组和分布绕组统一表示为线圈边放置约束下的搜索问题;第四,组合枚举方法虽然也能覆盖组合空间,但计算量随候选数量急剧增加,而本文方法通过位掩码冲突检测、对称规约和分支限界剪枝降低了搜索规模,提高了复杂槽极配合下的求解效率。

综上,本文方法并非替代传统绕组设计方法,而是提供一种更通用的自动化前端生成与筛选框架。对于规则槽极配合,传统方法仍具有简洁和直观优势;对于复杂槽极配合、多相绕组以及约束条件下的自动排布问题,本文方法能够在统一搜索框架下完成候选方案生成、约束判定、性能评价与方案筛选,从而提高绕组设计过程的自动化程度。

3.2 搜索空间尺寸

设总可放置位置数为 L ,最终每相需要放置的线圈边对数量为 $d = L/2m$ 。由于对称性,只需得到一相的排列方式就可以通过直接旋转得到余下的排列。对于单层绕组, $L = Z$; 对于双层绕组, $L = 2Z$ 。若采用组合枚举方法,需要从候选位置中选择 d 个进行合法性判断,候选组合数量的上界为 $C(L, d)$ 。因此,组合枚举方法所需访问的节点数为 $C(L, d)$ 。时间复杂度可表示为 $O[C(L, d) \cdot T]$,其中, T 为对每一个候选方案进

行完整合法性检测和性能评价所需的遍历成本。

对于本文采用的深度优先搜索方法,搜索过程可以看作一棵深度为 d 的搜索树。设第 t 层的结点平均分支数为 bt ,则最坏情况下需要访问的节点数为

$$P_{\text{node}} = 1 + b1 + b1b2 + \cdots + b1b2\cdots bd \quad (14)$$

最坏情况下的节点数上界与组合枚举方法一致,为 $C(L, d)$ 。因此,本文方法在最坏情况下仍然属于指数级复杂度。这是因为在最坏情况下,若所有分支的上界均可能达到目标阈值,则分支限界剪枝不会触发。但是本文方法在搜索过程中引入对称规约以及分支限界剪枝,可以有效加速搜索,虽然最坏情况复杂度仍为 $O[C(L, d) \cdot T]$,但实际工程中访问节点数以及运行时间一般来说远小于组合枚举方法。

3.3 搜索效率定量对比

为了定量评价剪枝效果,本文采用搜索节点数、计算时间和剪枝率作为算法效率评价指标。剪枝率用于衡量本文方法相对于组合枚举方法减少的搜索规模。将组合枚举法实际访问的搜索节点数记为 P_{naive} ,本文方法实际访问的搜索节点数记为 P_{opt} ,则剪枝率定义为

$$P_{\text{rate}} = (1 - P_{\text{naive}}/P_{\text{opt}}) \times 100\% \quad (15)$$

为验证所提搜索与剪枝策略的有效性,选取不同槽极配合和相数组合作为测试对象,在硬件环境、输入参数和目标阈值(≥ 0.9)相同条件下,将组合枚举方法与本文方法进行对比。不同槽极配合下的搜索效率对比如表 1 所示。

由表 1 可知,随着槽数、相数和候选线圈边对数量的增加,组合枚举方法的节点数和计算时间迅速增长;而本文方法由于在搜索过程中采用了位掩码冲突检测、对称规约和分支限界剪枝,实际访问节点数相对显著减少。特别是在 30 槽和 40 槽五相算例中,本文方法能够在保证可行解搜索完整性的前提下,显著减少搜索节点数和计算时间。

4 应用实例

4.1 三相绕组应用实例

在 $Z = 24, p = 5, m = 3$ 条件下,根据本文方法得到的一组三相双层绕组排布结果如图2所示。

表 1 不同槽极配合下的搜索效率对比

Tab. 1 Comparison of search efficiency under different slot-pole combinations

槽极配合	节点数		计算时间/s		剪枝率/%
	组合枚举方法	本文方法	组合枚举方法	本文方法	
$Z = 24$ $p = 5$ $m = 3$	659 472	2 577	8.830	0.030	99.6
$Z = 20$ $p = 11$ $m = 5$	4 224	161	0.065	0.009	95.3
$Z = 30$ $p = 14$ $m = 5$	188 232	1395	2.580	0.030	99.5
$Z = 40$ $p = 13$ $m = 5$	8 628 048	12 029	130.100	0.120	99.7

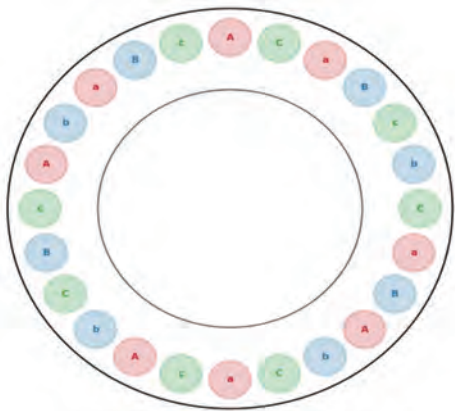


图 2 三相电机绕组排布方案

Fig. 2 Three-phase motor winding layout scheme

该方案对应的基波绕组系数为 0.958。

4.2 五相绕组应用实例

表 2 列出了若干典型五相槽极配合下,由本文算法搜索得到的绕组排布结果及其基波绕组系数。采用相别字母编码来表示各槽的线圈边分配,大写字母表示正向绕组,小写字母表示反向绕组;跨距为同一线圈两侧所在槽位之间的距离;最小公倍数(Least Common Multiple, LCM)为槽数与极数相关周期参数的 LCM,用于辅助分析槽极周期性及齿槽效应特征。

表 2 五相电机绕组排布结果
Tab. 2 Winding layout results of five-phase motor

Z	p	排列方式	跨距	$K_{w,1}$	LCM
40	13	ADBAd BeDBe CBeca eCadC adbad bEdbE cbEcA EcADc	14	0.984	520
20	11	AadDB beECc aADdb BEecC	1	0.987	220
30	14	AaAad DBbBb eECcC caADd DdbBE eEecC	1	0.980	420

由表 2 可知,本文方法在不同槽极配合下均可搜索得到基波绕组系数较高的可行方案,表明该方法对多种五相电机设计场景具有较好的适应性。

表 2 中第一种方案对应的 40 槽 26 极电机绕组图如图 3 所示。

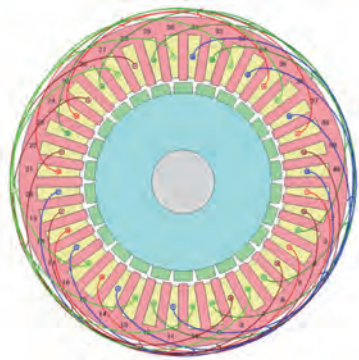


图 3 40 槽 26 极电机绕组图
Fig. 3 Winding diagram of a 40-slot 26-pole motor

为验证所提 40 槽 26 极五相绕组方案的电磁性能,基于有限元仿真模型对电机转矩和五相电流进行分析。仿真模型采用 40 槽 26 极五相永磁同步电机,仿真电机参数如表 3 所示。

表 3 40 槽 26 极五相永磁同步电机主要参数
Tab. 3 Main parameters of 40-slot 26-pole five-phase permanent magnet synchronous motor

参数名称	参数值
槽数	40
极数	26
定子叠片外径/mm	130
定子内径/mm	80
齿宽/mm	3.8
槽深/mm	18
槽口宽度/mm	3
齿顶深度/mm	1
齿顶角/(°)	30
转子外径/mm	78
气隙长度/mm	1
永磁体厚度/mm	4
永磁体极弧角/(°)	140
永磁体分段数	1
转轴直径/mm	25

仿真工况设置为:电机转速为 3 000 r/min;五相绕组通入幅值相等、相位依次相差 72°的正弦电流;相电流峰值为 5 A,对应电流有效值为 3.536 A;负载角设置为 0°电角度;直流母线电压为 100 V。

转矩采用瞬态有限元法计算。在一个电周期内,电磁转矩和相电流随电角度的变化曲线如图 4 和图 5 所示。根据图 4 提取平均转矩、最大转矩、最小转矩和转矩脉动率,将本文方法与星线图法进行对比。转矩性能对比结果和气隙磁密低阶谐波对比结果分别如表 4 和表 5 所示。

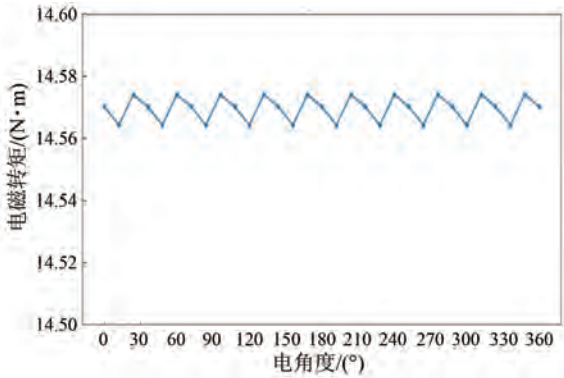


图 4 电磁转矩随电角度变化曲线
Fig. 4 Curve of electromagnetic torque versus electrical angle

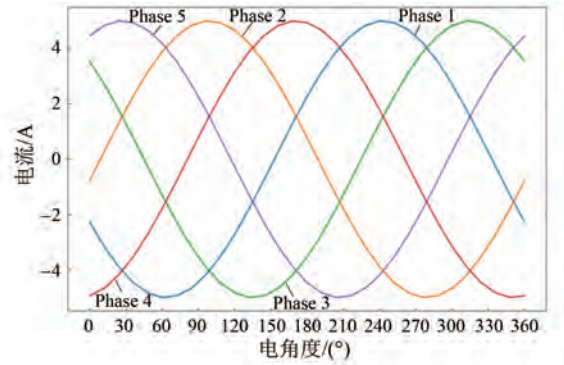


图 5 五相电流随电角度变化曲线
Fig. 5 Curves of five-phase currents versus electrical angle

表 4 转矩性能对比

Tab. 4 Comparison of torque performance

方法	平均转矩/(N·m)	最大转矩/(N·m)	最小转矩/(N·m)	转矩脉动率/%
星线图法	14.547	14.553	14.542	0.075 6
本文方法	14.570	14.574	14.564	0.067 4

表 5 气隙磁密低阶谐波对比

Tab. 5 Comparison of low-order air-gap flux density harmonics

谐波阶数	本文方法		星线图法	
	幅值/T	相对基波含量/%	幅值/T	相对基波含量/%
1	0.837 0	100	0.832 0	100
5	0.071 1	8.50	0.080 8	9.71
7	0.034 1	4.07	0.033 1	3.97
11	0.022 7	2.71	0.029 2	3.49
13	0.014 3	1.71	0.014 1	1.68

由表 4 可知,本文方法所得绕组方案的平均转矩为 14.570 N·m,略高于星线图法的 14.547 N·m,表明本文方法在优化绕组排布时并未降低平均转矩输出能力。同时,本文方法的转矩脉动率为 0.067 4%,低于星线图法的 0.075 6%,转矩脉动率降低 10.85%,表明本文方法所得绕组方案能够在保持平均转矩基本不变的基础上,提高电磁转矩输出的平稳性。

由表 5 可知,本文方法的基波气隙磁密幅值为 0.837 T,略高于星线图法的 0.832 T,表明本文方法具有较好的基波磁场合成能力。本文方法将 5 次谐波相对基波含量由 9.71%降低至 8.50%,将 11 次谐波相对基波含量由 3.49%降低至 2.71%。虽然 7 次和 13 次谐波相对基波含量略有上升,但增幅较小。综合各次低阶谐波计算得到,本文方法的总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 为 9.95%,低于星线图法的 11.18%,降低 10.9%。因此,本文方法在保持较高基波分量的同时,能够降低整体低阶空间谐波水平,改善气隙磁密波形质量。

综上,本文方法相比传统星线图法,不仅能够获得略高的平均转矩和基波气隙磁密幅值,还能够降低转矩脉动率和气隙磁密 THD,表明本文方法在绕组自动排布和电磁性能改善方面具有一定

优势。

5 结语

本文结合启发式搜索、三角不等式剪枝、有效配对生成方法以及递归回溯算法,提出一种绕组排布问题的求解方法,该方法在减少排布数目的同时提高了计算效率。40 槽 26 极五相永磁同步电机算例表明,与星线图法相比,本文方法所得绕组方案的平均转矩更高,转矩脉动率和气隙磁密 THD 更低。搜索效率对比结果表明,在典型算例中本文方法相较组合枚举方法的剪枝率均超过 95%,验证了所提搜索与剪枝策略的有效性。未来工作将引入更多约束,并扩展至故障工况性能优化。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

沈伟键进行了方案设计、内容总结与论文撰写,傅为农、王志强参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Shen Weijian. The manuscript was reviewed and revised by Fu Weinong, Wang Zhiqiang. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

[1] 颀浩浩, 吴杞康, 鲍久圣, 等. 新能源汽车驱动电机技术现状及混合励磁研究进展[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 36-51.

Xie H H, Wu Q K, Bao J S, et al. Current status of new energy vehicle drive motor technology and research progress on hybrid excitation [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 36-51.

[2] 陈鑫杰, 王慧贞. 航空电源系统用高速实心式永磁同步电机设计[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 61-70.

Chen X J, Wang H Z. Design of high-speed solid

- permanent magnet synchronous motor for aviation power system [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 61-70.
- [3] 陈前, 赵美玲, 廖继红, 等. 轻量化高效率永磁电机及其控制技术综述[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(4): 3-19.
- Chen Q, Zhao M L, Liao J H, et al. Review on lightweight and high efficiency permanent magnet motor and its control techniques [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(4): 3-19.
- [4] Xi Z Q, Niu L B, Yan X H, et al. Research on performance of interior permanent magnet synchronous motor with fractional slot concentrated winding for electric vehicles applications [J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2024, 15(10): 470.
- [5] Xia J, Tian D, Gao Y Z, et al. Electromagnetic design and performance analysis of large-scale offshore wind generators with modular fractional-slot concentrated winding [J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 186-201.
- [6] Choi D H, Jo C, Han H S, et al. Design of a six-phase surface permanent-magnet synchronous motor with chamfer-shaped magnet to reduce cogging torque and torque ripple for large-ship propulsion [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(21): 11400.
- [7] Kim J, Lee J, Kim H. A comparative study of pole-slot combination with fractional slot concentrated winding in outer rotor permanent magnet synchronous generator for hybrid drone system [J]. *Machines*, 2024, 12(7): 464.
- [8] Huang J X, Sui Y, Yin Z S, et al. Design method and performance evaluation of modular multiphase PMSM with hybrid single/double layer fractional-slot concentrated winding [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2022, 17(5): 2547-2559.
- [9] Ciriani C, Khan H A, Mansour K, et al. A general approach to the design of multi-layer fractional-slot concentrated windings with arbitrary number of slots, poles, and phases [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 89248-89261.
- [10] Kharchyshyn B, Makarchuk O, Calus D, et al. Algorithmic design of modular two-layer multiphase windings based on number theory [J]. *Energies*, 2025, 18(23): 6320.
- [11] Zhao W X, Zhu S D, Ji J H, et al. Analysis and reduction of electromagnetic vibration in fractional-slot concentrated-windings PM machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 3357-3367.
- [12] Lee Y G, Bang T K, Lee J I, et al. Characteristic analysis and experimental verification of electromagnetic and vibration/noise aspects of fractional-slot concentrated winding IPMSMs of e-bike [J]. *Energies*, 2022, 15(1): 238.
- [13] 陈滇斐, 邢宁, 马宏忠, 等. 分数槽永磁电机永磁体谐波涡流损耗建模与分析[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(14): 3514-3527.
- Chen Z F, Xing N, Ma H Z, et al. Modeling and analysis of harmonic eddy current loss in permanent magnets of fractional-slot permanent magnet machines [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(14): 3514-3527.
- [14] Zhang H, Wang W, Li X M, et al. Electromagnetic vibration analysis and mitigation of FSCW PM machines with auxiliary teeth [J]. *Machines*, 2025, 13(9): 867.
- [15] Guo L Y, Li X Y, Zhang H T, et al. Design of an unequal-teeth stator structure for a low-vibration noise permanent magnet synchronous machine considering teeth modulation [J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2025, 16(7): 339.
- [16] Shan S H, Wang Y C, Shi D, et al. Investigation of torque and reduction of torque ripples through assisted-poles in low-speed, high-torque density spoke-type PMSMs [J]. *Machines*, 2024, 12(5): 327.
- [17] Chamchuen S, Tonchua K, Khonongbua K, et al. Torque capability enhancement of interior permanent magnet motors using filleting and notching stator [J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2025, 16(9): 488.
- [18] 刘细平, 王荣清, 卢瑞攀, 等. 基于结构优化的分数槽集中绕组永磁电机谐波抑制方法综述[J]. *电气工程学报*, 2025, 20(6): 166-183.
- Liu X P, Wang R Q, Lu R P, et al. Review of harmonic suppression methods for fractional slot concentrated winding permanent magnet machines based on structural optimization [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2025, 20(6): 166-183.
- [19] 邱小华, 魏方睿, 李宗洋, 等. 定转子结构对集中绕组永磁电机中二倍频径向电磁力的影响分析[J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(1): 1-11.

- Qiu X H, Wei F R, Li Z Y, et al. Influence analysis of stator/rotor topologies on two-time frequency electromagnetic force in permanent magnet machines with concentrated windings [J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(1): 1-11.
- [20] 沈启平, 程俊, 周子遥, 等. 分数槽集中绕组永磁同步发电机电磁振动噪声分析[J]. *微电机*, 2023, 56(5): 6-12+18.
- Shen Q P, Cheng J, Zhou Z Y, et al. Research on electromagnetic vibration noise characteristics of permanent magnet synchronous generators for electric vehicles [J]. *Micromotors*, 2023, 56(5): 6-12+18.
- [21] 王子刚, 骆皓, 吉薇, 等. 分数槽集中绕组双转子异步电机谐波抑制方法[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(6): 669-679.
- Wang Z G, Luo H, Ji W, et al. Fractional slot concentrated winding double rotor asynchronous motor harmonic suppression method [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(6): 669-679.
- [22] 匡建雨, 骆皓, 孙春阳, 等. 分数槽集中绕组极对数谐波抑制方案对比研究[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(11): 110-122.
- Kuang J Y, Luo H, Sun C Y, et al. Comparison study on pole pair harmonic suppression schemes in fractional slot concentrated windings [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(11): 110-122.
- [23] Rudden I A, Li G J, Zhu Z Q, et al. Fractional-slot concentrated windings for offshore wind turbine generators: Opportunities and challenges [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 158766-158787.
- [24] Jung Y H, Kim D M, Cha K S, et al. Vibration reduction of permanent magnet synchronous motors by four-layer winding: Mathematical modeling and experimental validation[J]. *Mathematics*, 2025, 13(10): 1603.
- [25] 李艳灵, 王世伟, 林晓刚, 等. 基于谐波-励磁绕组协同设计的多相自励磁同步电机转矩提升方法[J]. *电机与控制应用*, 2026, 53(1): 57-66.
- Li Y L, Wang S W, Lin X G, et al. Torque enhancement method for multi-phase self-excited synchronous motors based on harmonic-excitation windings co-design [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2026, 53(1): 57-66.

收稿日期:2026-03-27

收到修改稿日期:2026-07-02

作者简介:

沈伟键(2006—),男,本科生,研究方向为电机参数优化算法设计,suat24000157@stu.suat-sz.edu.cn;

*通信作者:傅为农(1961—),男,博士,教授,研究方法为人工智能在电气工程中的应用,fuweinong@suat-sz.edu.cn。