

# 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机 优化设计<sup>\*</sup>

初 秋, 车 爽, 李春艳

(黑龙江大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 针对稀土永磁同步电机(PMSM)对稀土永磁材料依赖性大的问题,提出一种少稀土组合磁极 Halbach PMSM,永磁体采用 Halbach 充磁方式。阐述了该电机新型转子的磁钢结构,其中主磁极由双层永磁体组成,上层磁钢为钕铁硼永磁材料,下层磁钢为铁氧体永磁材料,辅磁极磁钢也为铁氧体永磁材料。以电磁转矩、转矩脉动和齿槽转矩为优化标准,对电机每极永磁体块数、充磁角度、永磁体材料和永磁体厚度等电机参数进行优化。采用定子斜槽结构降低齿槽转矩。优化后的少稀土组合磁极 PMSM 在保证转矩性能的情况下,减少了永磁体用量,降低了电机成本。最后通过有限元法分析该电机在空载和额定负载下的特性,验证了该电机设计的合理性。

**关键词:** 永磁同步电机; Halbach 阵列; 少稀土; 组合型磁极; 有限元分析

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)03-0022-07

doi: 10.12177/emca.2023.002

## Optimization Design of Less-Rare-Earth Halbach Permanent Magnet Synchronous Motor with Module Poles<sup>\*</sup>

CHU Qiu, CHE Shuang, LI Chunyan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The rare earth permanent magnet synchronous motor (PMSM) depends much on the rare earth permanent magnet materials. In order to solve this problem, a less-rare-earth PMSM with Halbach array and module poles is proposed. The new structure of the rotor magnetic steel of the motor is described. The main pole of the rotor magnet is composed of two layers of permanent magnets, the outer magnet is made of NdFeB permanent magnet material, the inner magnet is made of ferrite permanent magnet material, and the auxiliary pole magnet is also ferrite permanent magnet material. The electromagnetic torque, the torque ripple and the cogging torque are regarded as optimization criteria. The motor parameters are optimized by using the number of permanent magnets per pole, magnetization angle, permanent magnet material and permanent magnet thickness. A chute-type stator structure is used to reduce cogging torque. The optimized less-rare-earth PMSM with module poles reduces the amounts of permanent magnets and reduces the cost of motor while ensuring the torque performance. Finally, the finite element method is used to analyze the performances under the conditions of no-load and rated load operation, and to verify the validity and reasonableness of the proposed motor.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); Halbach array; less rare earth; module poles; finite element analysis

收稿日期: 2022-10-17; 收到修改稿日期: 2023-01-03

<sup>\*</sup> 基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E075); 黑龙江省教育厅基金项目(TSTAU-C2018014)

作者简介: 初 秋(1994—),女,硕士研究生,研究方向为 Halbach 永磁同步电机分析与设计。

李春艳(1980—),女,博士,副教授,研究方向为特种永磁电机设计。(通信作者)

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度高、效率高、结构简单和易于调速等优点,广泛应用于各行业<sup>[1-3]</sup>。稀土永磁材料作为一种不可再生的战略资源,是我国高科技领域的关键材料之一。传统PMSM多采用稀土永磁材料。然而,随着国家对稀土永磁材料监管力度的加大,稀土永磁材料需求量的日益增长等多方面原因的影响,近年来稀土永磁材料价格大幅上涨<sup>[4-6]</sup>。为了降低PMSM对稀土永磁材料的依赖性。近年来,少稀土PMSM引起国内外众多专家学者的兴趣和关注,并进行了大量的研究工作。少稀土PMSM采用稀土永磁材料和非稀土永磁材料共同励磁。通过对两种永磁材料合理设计,降低稀土永磁材料用量<sup>[7-8]</sup>,达到电机所需的性能指标。文献[9]提出一种隔磁桥式双层外转子结构永磁电机。转子外层采用弧形铁氧体永磁材料,内层置入钕铁硼永磁材料。该电机采用串联磁路,通过与基准永磁电机对比,进行有限元分析和样机试验验证,该电机有效减少稀土永磁材料的用量,增加了电机的输出转矩。文献[10]提出一种带有容错齿的少稀土永磁电机,提出的两种电机模型,在同时使用单层集中绕组和容错齿的条件下,通过分析该电机永磁体串联结构和并联结构得出结论,并联结构永磁电机,可有效降低转矩脉动,具有较高的电磁转矩,而串联结构永磁电机,具有相对较小的电磁转矩。两种结构永磁电机均具有较高容错性能。通过对比可知该电机在并联磁路具有更好的容错性。文献[11]提出一种将Halbach阵列和组合型磁极相结合的具有容错性能的永磁电机。通过在转子结构中添加工铁氧体磁环以改善电机性能,通过对比发现,该电机可有效降低齿槽转矩和电机总谐波畸变率,但该电机整体电磁转矩略有减小。可见,研究少稀土PMSM结构和控制方法对摆脱稀土永磁材料的依赖以及降低制造成本具有十分重要的意义和价值。

本文主要提出一种少稀土组合磁极Halbach PMSM,其中转子磁钢采用钕铁硼永磁材料和铁氧体永磁材料。Halbach阵列具有单边聚磁特性,能够提供较高的气隙磁通密度,采用Halbach阵列的PMSM有利于实现PMSM高功率密度和转

矩密度,因此少稀土组合磁极Halbach PMSM转子引入Halbach阵列。本文设计电机基本结构,采用单参数扫描法以电机电磁转矩、转矩脉动和齿槽转矩为标准,对电机参数进行优化,采用定子斜槽对齿槽转矩进一步优化,并利用有限元进行分析,验证该电机理论分析设计的合理性。

## 1 Halbach阵列及电机结构

### 1.1 Halbach阵列

与传统表贴式电机相比,采用Halbach阵列,可改善气隙磁密波形的正弦度,提供相对较大的气隙磁通密度基波幅值,降低齿槽转矩及转矩脉动。Halbach阵列还具有单边聚磁特性,可使电机气隙磁场一侧相对增强,提高电机效率<sup>[12]</sup>。可通过改变每极永磁体块数、永磁体充磁方向以及永磁体厚度等,优化电机电磁性能。图1(a)为采用组合磁极Halbach PMSM转子结构及永磁体充磁方向示意图。如图1(b)所示,每个磁极由组合而成的主磁极和两侧辅磁极组成,充磁角度为 $\theta_i$ ,表达式如下:

$$\theta_i = (1 \pm p) \times \theta \quad (1)$$

式中: $\theta_i$ 为第*i*块永磁体的充磁角度;*p*为电机极对数; $\theta$ 为第*i*块永磁体几何中线与横坐标的夹角;“+”和“-”分别对应外转子和内转子结构。

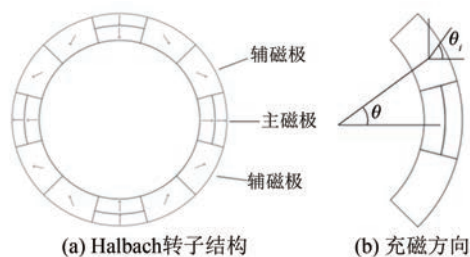


图1 Halbach永磁体结构及充磁方向

### 1.2 电机结构

本文提出少稀土组合磁极Halbach PMSM,以设计达到与稀土PMSM相同的转矩输出能力为目标的前提下降低电机的制造成本,摆脱对稀土永磁材料的依赖,在电机应用上具有良好的经济价值。少稀土组合磁极Halbach PMSM的结构模型图如图2所示。

该电机采用4极36槽双层绕组结构。

转子磁钢采用稀土钕铁硼和非稀土铁氧体两种永磁材料共同励磁。采用Halbach阵列,主磁

极为双层磁钢,上层磁钢采用高磁能积的钕铁硼永磁材料,下层磁钢采用价格低廉的铁氧体永磁材料。利用 Maxwell 建立电机模型,少稀土组合磁极 Halbach PMSM 的额定参数如表 1 所示。

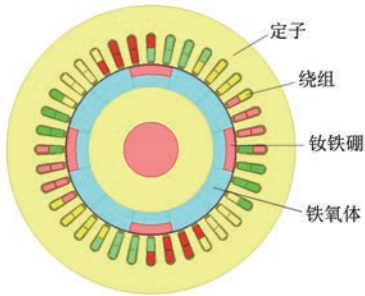


图 2 电机结构图

表 1 电机额定参数

| 参数名称                        | 参数值   |
|-----------------------------|-------|
| 额定功率/W                      | 750   |
| 额定电压/V                      | 380   |
| 额定转矩/(N·m)                  | 4.77  |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 1 500 |

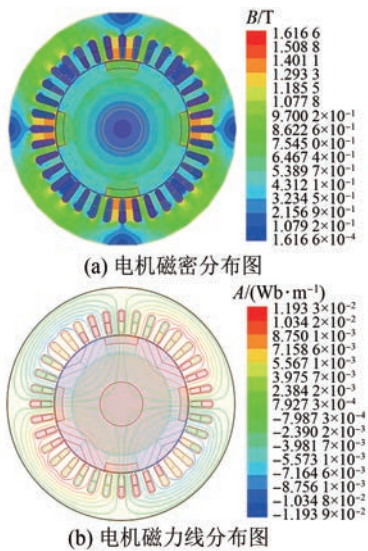


图 3 电机磁密云图和磁力线分布图

该电机在空载条件下磁场分布如图 3 所示,其中图 3(a)为该电机在空载条件下的磁密云图,图 3(b)为该电机在空载条件下的磁力线分布图。可以看出该电机磁通密度在合理范围内,定子和转子处磁密基本不超过 1.5 T,最大磁密为 1.61 T 左右,初步验证了该电机磁路结构的合理性。

## 2 电机的优化设计

### 2.1 电机优化设计目标及方法

电磁转矩、齿槽转矩、转矩脉动作为表示电机性能的重要指标,为该电机的优化标准。选择合适的转子结构参数是优化电机的关键,将每极永磁体块数、永磁体充磁角度、永磁体材料和永磁体厚度这 4 个参数作为该电机的优化对象。采用单参数扫描法分析优化电机的转矩性能。

### 2.2 每极永磁体块数对转矩性能的影响

在两种永磁体用量分别相同的前提下,分析每极永磁体块数对转矩性能的影响。将主磁极双层磁钢结构原则上作为一块永磁体分析,根据式(1)求出每一磁极下不同块数永磁体对应的充磁角度。在额定负载条件下对取每极永磁体块数 2~5 块进行分析,不同永磁体块数对转矩性能的影响,如图 4 所示。

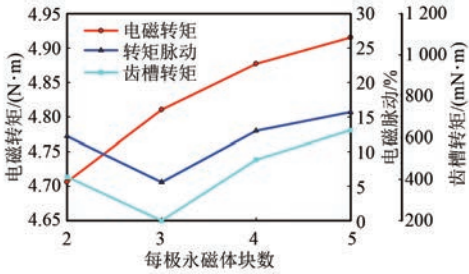


图 4 每极永磁体块数对转矩性能的影响

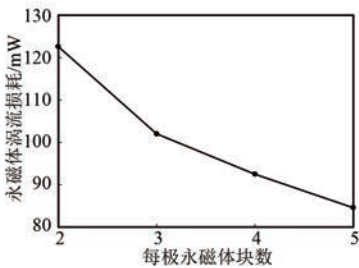


图 5 每极永磁体块数对涡流损耗的影响

由图 4 可以看出,随着每极永磁体块数的增加,电磁转矩随之增大。转矩脉动和齿槽转矩先减小后增大。由图 5 可知,在永磁体体积相同的条件下,每极永磁体分块可降低其涡流损耗。但每极永磁体块数的增加,会导致永磁体生产、电机加工和安装难度增加等问题。可以看出当每极永磁体块数为 3 块时,此时充磁角度为 30°,转矩脉动和齿槽转矩达到最低点,此时电磁

转矩满足少稀土组合磁极 Halbach PMSM 额定转矩需求。

2.3 永磁材料充磁角度对转矩性能的影响

为了进一步验证充磁角度对转矩性能的影响,保持每极永磁体块数为 3 块不变,改变辅磁极充磁角度,在 0°~90°之间,每隔 10°取一个值。得到永磁体充磁角度对少稀土组合磁极 Halbach PMSM 转矩性能的影响,如图 6 所示。

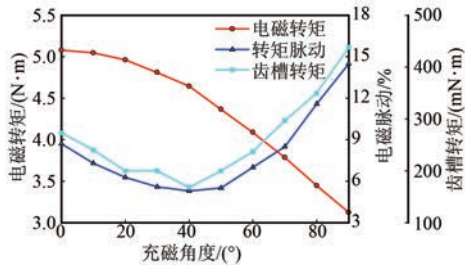


图 6 永磁体充磁角度对转矩性能的影响

从图 6 可知,随着充磁角度的增大,电磁转矩呈现下降趋势。转矩脉动和齿槽转矩随充磁角度的变化先减小在增大。可以看出该电机转矩性能在 20°~40° 呈现相对理想状态。

2.4 永磁材料对转矩性能的影响

当铁氧体材料固定时,选取 N30、N35、N40、N45、N50 这 5 种不同的稀土钕铁硼材料,分析不同钕铁硼材料对转矩性能的影响情况,如图 7 所示。可以看出当钕铁硼材料变化时,随着钕铁硼材料性能的加强,电磁转矩、转矩脉动、齿槽转矩均随之增加。这是因为永磁材料性能越好,剩磁和矫顽力越大,永磁体每极提供的磁链越多。由 PMSM 的转矩方程可知,永磁体提供的每极磁链越多,永磁转矩越大,越有利于提高电机的电磁转矩。钕铁硼材料的主要性能如表 2 所示。

表 2 钕铁硼材料主要性能

| 牌号  | 剩磁/T | 矫顽力/(kA·m <sup>-1</sup> ) |
|-----|------|---------------------------|
| N30 | 1.10 | 838                       |
| N35 | 1.23 | 890                       |
| N40 | 1.27 | 907                       |
| N45 | 1.39 | 916                       |
| N50 | 1.47 | 890                       |

保持钕铁硼材料不变,铁氧体材料分别选取 Y20、Y25、Y30、Y35、Y40、Y43 这 6 种材料,分析

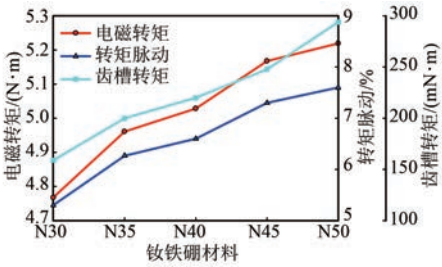


图 7 钕铁硼材料对转矩性能的影响

不同铁氧体材料对转矩性能的影响情况,如图 8 所示。随着铁氧体材料的性能变化,电磁转矩增大,而转矩脉动和齿槽转矩随之减小。铁氧体材料的主要性能如表 3 所示。

表 3 铁氧体材料主要性能

| 牌号  | 剩磁/T  | 矫顽力/(kA·m <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------|---------------------------|
| Y20 | 0.340 | 155                       |
| Y25 | 0.365 | 170                       |
| Y30 | 0.390 | 180                       |
| Y35 | 0.410 | 190                       |
| Y40 | 0.450 | 335                       |
| Y43 | 0.470 | 345                       |

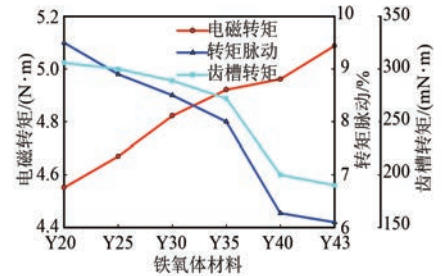


图 8 铁氧体材料对转矩性能的影响

2.5 永磁材料厚度对转矩性能的影响

保持永磁体材料、永磁体外径不变的条件下,分析在相同充磁角度下永磁体厚度对电机转矩性能的影响。

保持铁氧体厚度不变,钕铁硼厚度变化范围在 2~6 mm,每隔 1 mm 取一个值进行分析。钕铁硼厚度对电机转矩性能的影响如图 9 所示。可以得知,随着钕铁硼厚度的增加,电磁转矩随之增加,在钕铁硼厚度到达 4 mm 后达到微饱和状态,之后钕铁硼厚度增加,电磁转矩缓慢增大。转矩脉动和齿槽转矩均随着钕铁硼厚度的增加而随之增大。

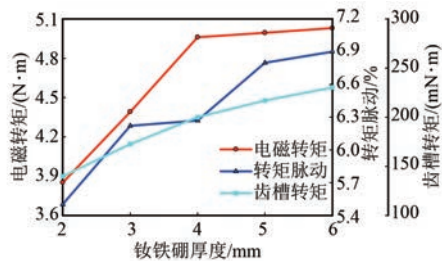


图9 钕铁硼厚度对转矩性能的影响

保持钕铁硼材料厚度的固定,铁氧体厚度变化范围在5~13 mm,每隔2 mm取一个值进行分析。铁氧体厚度对电机转矩性能的影响,如图10所示。可以看出,随着铁氧体厚度的增加,电磁转矩先增加,铁氧体厚度在9 mm附近处达到峰值,之后铁氧体厚度增加电磁转矩缓慢减小,转矩脉动随着铁氧体厚度的增加而变大,铁氧体厚度对齿槽转矩的影响不大,可以看出随着铁氧体厚度增加齿槽转矩整体上略有下降。

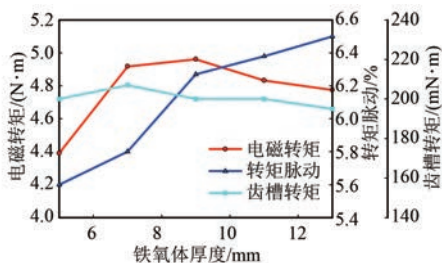


图10 铁氧体厚度对转矩性能的影响

### 3 斜槽优化设计

以上分析可知电机齿槽转矩为200 mN·m,电机额定转矩为4.77 N·m,齿槽转矩约占额定转矩的4.1%。为进一步降低电机齿槽转矩,采用电机定子斜槽结构。直槽时定子槽倾斜0°,选取定子斜槽角度在2°~8°范围变化时分析直槽和不同斜槽角度对齿槽转矩的影响如图11所示,直槽和斜槽时齿槽转矩波形图如图12所示。

定子斜槽角度在2°~8°范围内,斜槽角度越大,齿槽转矩越小。选取斜槽角度为6°时,齿槽转矩为60.8 mN·m,约占额定转矩的1.27%。与直槽时200 mN·m相比,数值上齿槽转矩下降了70%,达到了较好的优化结果,更有利于电机的平稳运行。

分析直槽和不同斜槽角度对额定负载运行时

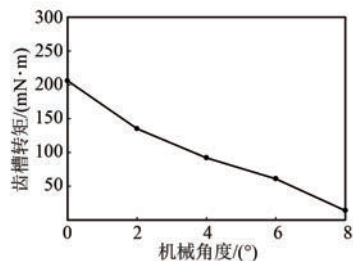


图11 斜槽角度对齿槽转矩的影响

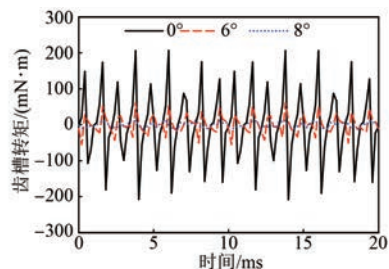


图12 斜槽0°、6°、8°时齿槽转矩对比

的电磁转矩以及额定负载电磁转矩波动的影响,分别如图13和图14所示。直槽和斜槽对应的负载电磁转矩图如图15所示。

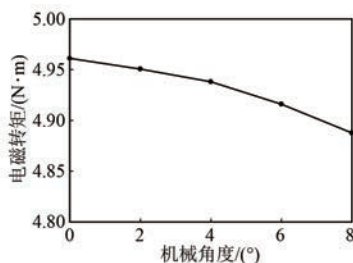


图13 斜槽角度对额定负载时电磁转矩的影响

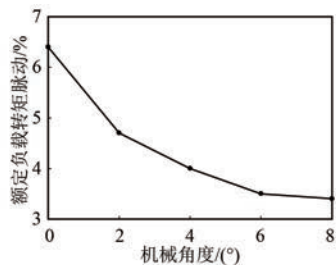


图14 斜槽角度对额定负载时转矩脉动的影响

定子斜槽角度在2°~8°范围内,随着斜槽角度的增加,电磁转矩微降,电磁转矩波动也更小。选取斜槽角度为6°时,电磁转矩为4.92 N·m,与直槽4.97 N·m相比,电磁转矩数值上下降了0.8%,此时电磁转矩仍能够达到输出转矩的要求。负载转矩脉动从直槽时的6.4%下降到了斜

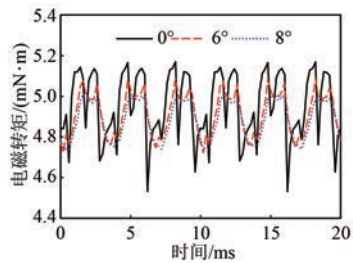


图 15 斜槽 0°、6°、8°时电磁转矩对比

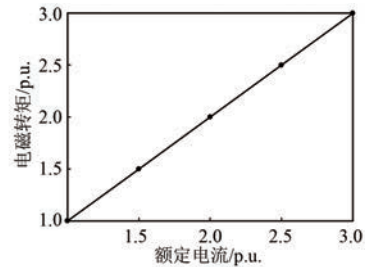


图 16 电磁转矩随电流变化曲线

槽角度 6°时的 3.5%,脉动数值上下下降了 45%。结合齿槽转矩和负载电磁转矩及波动综合考虑,优化后的斜槽角度选取为 6°。

4 有限元磁场分析

通过对电机的优化设计,确定了该电机的基本结构参数,利用有限元软件对该电机磁场进行仿真分析,电机的结构参数和仿真分析结果如表 4 所示。

表 4 电机结构参数

| 参数名称                        | 参数值    |
|-----------------------------|--------|
| 输出功率/W                      | 750.5  |
| 输出转矩/(N·m)                  | 4.78   |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 1 500  |
| 定子外径/mm                     | 122    |
| 定子内径/mm                     | 72     |
| 轴向长度/mm                     | 66     |
| 每极永磁体块数                     | 3      |
| 充磁角度/(°)                    | 20     |
| 钕铁硼材料                       | NdFe35 |
| 铁氧体材料                       | Y40    |
| 钕铁硼永磁体厚度/mm                 | 4      |
| 铁氧体永磁体厚度/mm                 | 9      |
| 气隙/mm                       | 0.5    |

4.1 过载和退磁分析

利用有限元对电流进行参数化扫描,从 1.0 p. u. 额定电流开始每增加 0.5 p. u. 为一步,得到电机电磁转矩对应输入电流的变化曲线,如图 16 所示。电流从 1.0 p. u. 额定电流上升到 3.0 p. u. ,电磁转矩与电流呈线性增长,可以看出电机具有较高过载能力,满足电机的设计需求。

电机在过载电流时的铁氧体磁密分布图如图

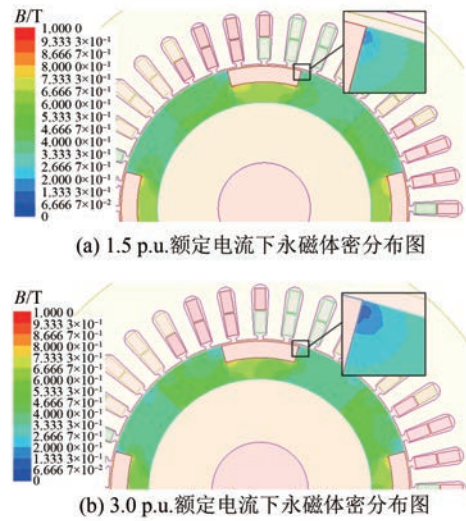


图 17 过载下永磁体磁密分布图

17 所示。已知 Y40 铁氧体的退磁曲线拐点磁密约为 0.11 T,磁密低于此拐点则认为该永磁体出现不可逆退磁。由图 17(a)可知,在过载电流达到额定电流的 1.5 p. u. 时,铁氧体边缘处磁密为 0.12 T 不存在退磁,从图 17(b)中看出当过载电流达到额定电流的 3.0 p. u. 时,铁氧体在边缘处磁密为 0.08 T,有小范围退磁。电机整体退磁情况符合设计的需求。在实际生产中,该电机一般工作在额定电流,最大电流应限制小于 3.0 p. u. 的额定电流。

4.2 电磁性能分析

图 18 为优化后该电机额定转速运行时空载反电动势波形图。电机空载反电动势幅值为 294 V,有效值为 186 V。图 19 为优化后该电机空载情况下气隙磁密变化波形图。

少稀土组合磁极 Halbach PMSM 在额定转速运行时负载电磁转矩波形如图 20 所示。该电机在额定转速下运行能够输出的额定负载电磁转矩平均值为 4.92 N·m,电机空载摩擦转矩按电机额

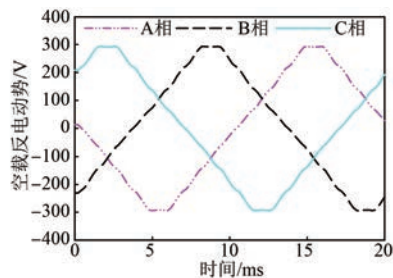


图 18 空载反电动势波形

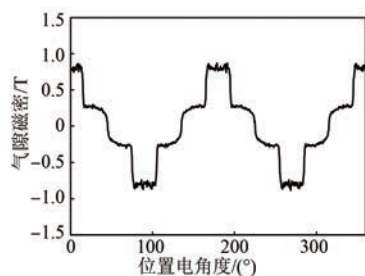


图 19 气隙磁密波形

定负载转矩的 3% 估算,空载摩擦转矩约为  $0.14 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,得出输出机械转矩为  $4.78 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。换算为机械功率  $750.5 \text{ W}$ ,满足额定输出功率的要求。该电机的转矩脉动为 3.5%,电机运行平稳。

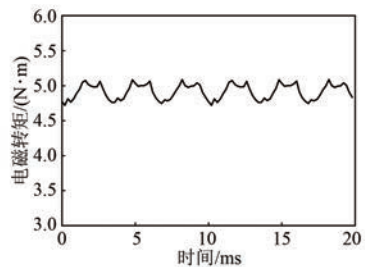


图 20 额定负载转矩波形

## 5 结 语

本文提出一种新型少稀土组合磁极 Halbach PMSM。该电机主磁极采用钕铁硼和铁氧体共同励磁,辅助磁极采用铁氧体励磁。少稀土组合磁极 Halbach PMSM 在达到普通稀土 PMSM 相同功率的条件下能够降低稀土永磁材料的用量。减少了传统 PMSM 对稀土永磁材料的依赖,同时通过对电机转子结构的优化、有限元仿真验证了该电机的电磁性能及该电机结构的合理性。

## 【参考文献】

- [1] 刘晓,肖罗鹏,崔鹤松,等. 新型双段 Halbach 阵列轴向永磁联轴器的多目标优化[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(6): 63.
- [2] 邢泽智,王秀和,赵文良. 基于不同极弧系数组合分段倾斜磁极的表贴式 PMSM 齿槽转矩削弱措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5737.
- [3] 孙丽兵,王金玉,李肖艳. 无轴承 PMSM 电磁特性仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 69.
- [4] 王琳. 少稀土轮辐式组合永磁型同步电机的设计与分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [5] 蔡同乐,陈云云,庄佳红. 少稀土非对称永磁电机的分层多目标优化分析[J]. 微电机, 2021, 54(3): 14.
- [6] 吴伟强,朱孝勇,项子旋,等. 少稀土组合励磁永磁无刷电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 73.
- [7] 杨玉波,王秀和,朱常青. 组合磁极削弱永磁同步电动机转矩脉动方法研究[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(2): 34.
- [8] 朱焜秋,程一峰. 基于组合磁极的无轴承 PMSM 转子优化设计[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 123.
- [9] ISHII S, HASEGAWA Y, NAKAMURA K, et al. Characteristics of novel flux barrier type outer rotor IPM motor with rare-earth and ferrite magnets[C]// 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012.
- [10] CHEN Q, LIU G, ZHAO W, et al. Design and analysis of the new high-reliability motors with hybrid permanent magnet material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(12): 8207010.
- [11] LIU G, SHAO M, ZHAO W, et al. Cost reduction of a new fault-tolerant Halbach permanent magnet machine using ferrite magnet[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8102904.
- [12] 倪有源,何强,王群京. 双层 Halbach 永磁电机解析建模与优化[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 53.