

刮板机用混合永磁低速电机设计与抗退磁分析

刘家奇, 艾叶, 王凯冬, 于思洋*

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Design and Demagnetization Analysis of a Hybrid Permanent Magnet Low-Speed Motor for Scraper Conveyors

Liu Jiaqi, Ai Ye, Wang Kaidong, Yu Siyang*

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the issues of high permanent magnet cost, excessive air-gap magnetic field harmonics, and poor high-temperature demagnetization resistance in rare-earth permanent magnet motors for scraper conveyors, this paper proposes a hybrid-pole low-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM) excited by both ferrite and NdFeB. The design leverages the advantages of ferrite magnets, such as low cost and strong high-temperature demagnetization resistance, to address these problems. [Methods] The electromagnetic design of the PMSM was first conducted to determine its fundamental parameters. To enhance permanent magnet material utilization, five distinct rotor structures were designed and comparatively analyzed under identical magnet usage conditions, from which the configuration with optimal torque output capability was selected. Subsequently, three hybrid-pole magnetic circuit designs were developed for comparative evaluation. Finally, finite element analysis software was employed to perform comprehensive assessments of the finalized design, including electromagnetic performance analysis, temperature field verification, and high-temperature demagnetization resistance evaluation, thereby validating the effectiveness of the hybrid-pole solution. [Results] Compared with traditional rare-earth permanent magnet motors, the hybrid-pole rotor structure reduced the permanent magnet cost by 15.5% while maintaining the rated torque, decreased the torque ripple by 16.7%, and significantly enhanced the high-

temperature demagnetization resistance. [Conclusion] The hybrid-pole rotor structure demonstrates remarkable effectiveness in reducing permanent magnet costs, optimizing motor performance, and improving high-temperature stability, providing reliable technical support for energy-saving, emission reduction, and reduced maintenance requirements in scraper conveyors.

Key words: hybrid-pole; permanent magnet synchronous motor; ferrite; high-temperature demagnetization resistance

摘要: [目的]针对刮板输送机用稀土永磁电机存在永磁体成本高、气隙磁场谐波含量较高以及高温抗退磁能力差等问题,本文设计一种由铁氧体和钕铁硼共同励磁的混合磁极低速永磁同步电机(PMSM),利用铁氧体永磁成本低、高温抗退磁能力强等优点改善上述问题。[方法]首先对PMSM进行电磁设计,确定其基本参数。为提升永磁材料利用率,在控制永磁体用量相同的条件下,设计五种不同转子结构并进行对比分析,选取转矩输出能力最强的转子结构。在此基础上,设计三种不同磁路结构的混合磁极方案进行对比分析。最后利用有限元软件,对最终方案进行电磁性能分析、温度场校核以及高温抗退磁能力分析,验证混合磁极方案的有效性。[结果]与传统稀土永磁电机相比,混合磁极转子结构在保证额定转矩的前提下,永磁体成本降低了15.5%,转矩脉动降低了16.7%,同时显著提升了高温抗退磁能力。[结论]混合磁极转子结构在降低永磁体成本、优化电机性能以及增强高温稳定性方面效果显著,为刮板输送机实现节能减排和降低维护需求提供了可靠的技术支持。

关键词: 混合磁极; 永磁同步电机; 铁氧体; 高温抗退磁能力

基金项目: 辽宁省自然科学基金联合基金(2023-MSLH-245)

Liaoning Provincial Natural Science Foundation Joint Fund (2023-MSLH-245)

0 引言

为维持煤矿生产正常运行,刮板机需要能够连续运转。刮板机不但要求驱动电机起动转矩大,还应具有故障率低、维护少和节能等特点。现有的刮板输送机主要采用异步电机加减速器的组合作为其驱动系统,这种组合使得整个驱动系统体积庞大,维护成本高且效率与运行可靠性均较低^[1]。现阶段,稀土永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因具有结构简单、效率和功率因数高及起动转矩大等优点^[2],被广泛应用在矿石开采、工业生产等领域^[3]。但由于早期稀土产业储量消耗过快、开采缺乏管理,近年来国家针对稀土资源进行了严格的管控,这使得稀土 PMSM 的成本水涨船高^[4-6]。同时,在稀土 PMSM 的磁极制造过程中,由于加工工艺等原因,气隙磁场谐波含量较高,会增加电机损耗、削弱电机性能。此外,稀土永磁材料的矫顽力会随着温度的升高而降低,在高温环境下稀土永磁体可能会发生局部失磁甚至永久退磁^[7-8]。

针对上述关键问题,不少学者开展了混合永磁电机的相关研究^[9-19]。文献[20]提出一种偏置式混合永磁电机,利用永磁体偏移放置设计,调整钕铁硼和铁氧体磁动势中心轴线之间的相对角度,使总的永磁磁动势位移和增强,永磁转矩和磁阻转矩在同一电流相角附近达到峰值,并接近理论上的最大转矩,在提高电机性能的同时也有助于增强抗退磁能力。文献[21]提出一种新型辐条式混合永磁无刷电机,该电机将高性能稀土永磁和低成本铁氧体永磁相结合,与传统辐条式非稀土铁氧体电机相比,该电机不仅保持了较低的永磁成本,而且具有较好的弱磁能力和抗退磁能力。文献[22]提出一种混合永磁外转子内置式 PMSM,采用双层新月形磁极结构和混合永磁材料,钕铁硼放置在铁氧体两侧,有效提升了电机性能并降低了稀土永磁材料的用量。文献[23]提出一种稀土永磁和铁氧体混合励磁的同步磁阻电机,该电机电磁性能良好且稀土使用量较少,与纯稀土电机相比,价格优势明显。文献[24]提出了一种具有独特的 q 轴外磁阻设计的混合永磁电机, N 极左侧磁块使用铁氧体代替稀土永磁,实现了反凸极特性,相比传统内置式永磁电机具有更

好的抗退磁能力和过载能力。

尽管现有研究在降低永磁体成本、改善电磁性能和增强高温抗退磁能力方面效果显著,但多集中于高凸极比、高速电机领域,对低速大转矩电机的研究较少。为此,本文提出一种混合磁极转子结构的低速大转矩 PMSM。研究内容包括:电机电磁设计,通过对比不同转子结构提高永磁材料利用率,设计混合磁极方案并进行对比分析,最后通过有限元仿真验证电磁性能和高温抗退磁能力,证明该结构的有效性。

1 电机电磁参数设计

针对刮板输送机用永磁电机替换异步电机加减速器驱动系统的工程问题,设计一台直驱低速大转矩 PMSM,其性能指标如表 1 所示。

表 1 PMSM 性能指标

Tab. 1 Performance index of the PMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	262.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	75
额定电压/V	1 140
效率/%	95
绝缘等级	F 级
温升考核	B 级

1.1 电机主要尺寸设计

电机定子内径和铁心长度的选取是电机设计中关键的一步。在功率和转速确定的情况下,电机的主要尺寸基本上由线负荷 A 和磁负荷 B_δ 来决定,如式(1)所示:

$$\frac{D_{11}^2 L_{ef} n}{P'} = \frac{6.1}{\alpha'_p K_{Nm} K_{dp} A B_\delta} \quad (1)$$

式中: D_{11} 为定子内径; L_{ef} 为铁心轴向有效长度; n 为电机额定转速; P' 为计算功率; α'_p 为计算极弧系数; K_{Nm} 为气隙磁场波形系数; K_{dp} 为绕组系数; A 为线负荷; B_δ 为气隙磁通密度最大值。

对于 PMSM,计算功率 P' 的表达式为

$$P' = \frac{K_E P_N}{\eta_N \cos \varphi_N} \quad (2)$$

式中: K_E 为额定负载时感应电势与端电压的比值; η_N 、 $\cos \varphi_N$ 分别为额定负载的效率、功率因数。

本文设计的 PMSM 采用水冷方式,因此电

磁负荷可选较大值。在低速大转矩的应用场景下,电机铁心轴向长度不宜太长,综合考虑后,取定子内径 D_{i1} 为 885 mm,铁心轴向有效长度 L_{ef} 为 560 mm。

1.2 极槽配合的选取

极数和电机的额定频率是电机的重要参数,需要在初始设计时确定。低速大转矩 PMSM 由变频器供电,电机转速可随频率变化而变化,如式(3)所示。电机极数和频率的选择具有较大的灵活性,因此,在电机设计中要综合考虑各种因素的影响。

$$n = \frac{60f}{p} \quad (3)$$

式中: p 为电机极对数; f 为电机额定频率。

当 p 较小时, f 值较小。由于死区效应,逆变器输出电压基波幅值降低,谐波电压幅值增大,电压波形畸变率高,电机转矩脉动大,导致低速性能不佳。因此, p 和 f 的值不宜太小。当 p 较大时, f 值较大,会导致定子铁心损耗增大,从而降低效率。因此, p 和 f 的值也不宜太大。

在额定转速确定的情况下,综合考虑上述因素的影响,选取电机极对数 p 为 20,额定频率 f 为 25 Hz。

针对定子外径受限导致槽数增加困难的问题,低速大转矩 PMSM 通常采用分数槽集中绕组(Fractional-Slot Concentrated Winding, FSCW)实现多极多槽结构,定子槽数 Z 为相数的整数倍。定子极间距 τ 如式(4)所示:

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (4)$$

为了同时削弱 5 次和 7 次谐波电动势,绕组节距 y_1 和极节距 τ 应满足式(5):

$$y_1 = \frac{5}{6}\tau \quad (5)$$

集中绕组节距 y_1 为 1,由式(4)、(5)可计算得到定子槽数 Z 为 48 槽。

1.3 转子结构设计对比分析

由于 FSCW 低速大转矩 PMSM 具有多极多槽的结构特点,其转子磁路结构通常采用切向型或径向充磁的一字型,加工方便、易于制造。但即便是采用了较好的隔磁磁障,此类转子结构还是会产生较多漏磁,导致永磁材料利用率较低。V 型

转子结构在减少漏磁的同时还有一定的聚磁作用。PMSM 的转矩表达式为

$$T_e = p [i_s \psi_f \sin \beta + \frac{1}{2}(L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\beta] \quad (6)$$

式中: i_s 为 dq 坐标系下定子电流值; ψ_f 为永磁体磁链; β 为 dq 坐标系下电流矢量与 d 轴的夹角; L_d 、 L_q 分别为电机定子绕组 d 、 q 轴电感。

在 FSCW 低速大转矩内置式转子 PMSM 中, L_d 、 L_q 差距不大,磁阻转矩占比较低^[25],电磁转矩主要由永磁转矩主导。因此,优化磁极设计对提升永磁材料利用率和电磁性能至关重要。本文在定转子尺寸、绕组形式及永磁体用量完全相同的条件下,对比分析了五种不同的转子结构,如图 1

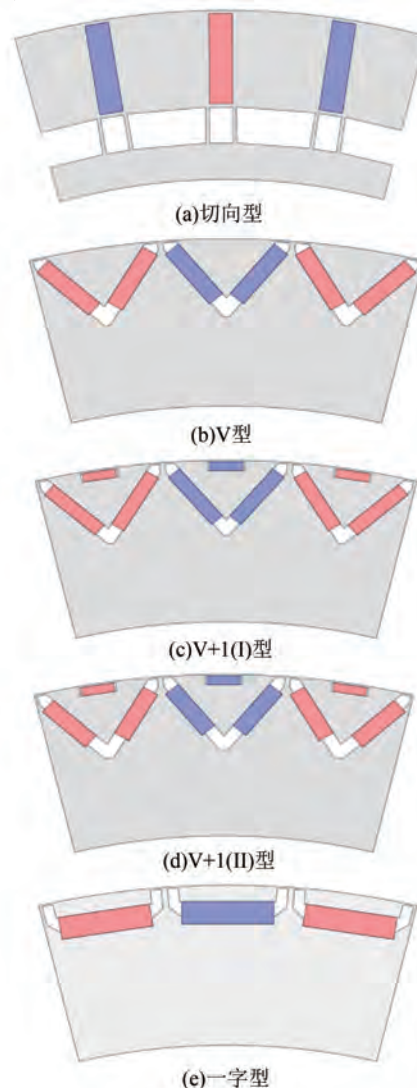


图 1 不同转子结构图

Fig. 1 Structure diagram of different rotors

所示,分别为切向型、V型、V+1(I)型、V+1(II)型和一字型。其中,V+1(I)型的永磁体宽度与V型一致,V+1(II)型的充磁方向长度与V型一致。

五种不同转子结构的电磁转矩对比如图 2 所示,具体数据如表 2 所示。

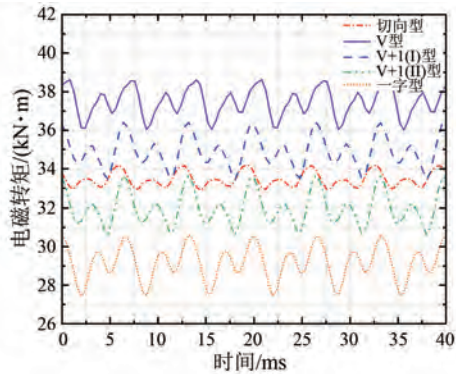


图 2 转矩对比图

Fig. 2 Torque comparison diagram

表 2 平均转矩数据对比

Tab. 2 Average torque data comparison

转子类型	平均转矩/(kN·m)	转矩脉动/%
切向型	33.46	3.96
V型	37.46	6.94
V+1(I)型	34.89	8.59
V+1(II)型	31.99	9.55
一字型	29.15	10.83

由表 2 可知,相同永磁材料用量下,切向型、V型、V+1(I)型转子结构均达到了额定转矩 33.425 kN·m 的需求,而 V+1(II)型和一字型转子结构未达标,且转矩脉动也最高。其中,V型转子结构平均转矩最高 37.46 kN·m,转矩脉动 6.94%也仅高于切向型。这一结果印证了 FSCW 低速大转矩 PMSM 的特点,永磁转矩在总电磁转矩中占比极高,虽然 V+1(I)型和 V+1(II)型转子结构的凸极高于其他转子结构,但磁阻转矩的提升并不能抵消因转子结构变动而导致的永磁转矩下降;二者的平均转矩结果进一步说明,永磁体宽度对输出转矩的影响大于永磁体充磁方向长度对输出转矩的影响。V型结构因漏磁率低和聚磁能力强,成为最优选择,为后续用铁氧体替代部分钕铁硼提供了转矩裕度。电机主要设计参数如表 3 所示。

表 3 电机主要参数

Tab. 3 Main parameters of the motor

参数名称	参数值
定子内径/mm	885
定子外径/mm	1 060
轴向长度/mm	560
气隙长度/mm	1.8
定子槽数	48
转子极对数	20

2 混合磁极方案设计

2.1 混合磁极的工作原理

在内置式 PMSM 中,磁钢上表面与永磁体槽紧密贴合,使得槽上表面磁通密度变化连续。V型转子结构采用径向充磁,可等效为三个子磁极的一字型结构。通过铁氧体与钕铁硼的磁密差值,将矩形波气隙磁密线性叠加为阶梯波,使其更接近正弦波,从而降低谐波含量,提升电磁性能。混合磁极的等效原理如图 3 所示。

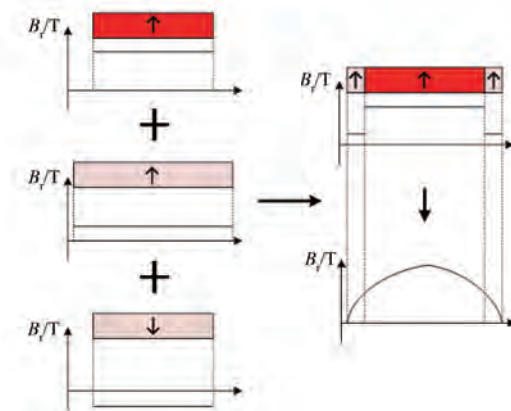


图 3 混合磁极等效原理图

Fig. 3 Equivalent principle diagram of hybrid magnetic poles

2.2 混合磁极方案对比分析

在 V 型转子结构的基础上,提出三种混合磁极方案,如图 4 所示。图中,浅色磁块代表铁氧体,深色磁块代表钕铁硼。本文设计的电机铁氧体材料采用 Y30H-2,钕铁硼材料采用 N38SH,两者的参数性能如表 4 所示。方案 a 为并联磁路混合磁极,将原来纯稀土 V 型永磁磁极的两端替换为铁氧体永磁材料,通过调整两种永磁材料的用量,可以改善气隙磁场波形的正弦度。同时这两

个位置也是高温下钕铁硼永磁材料局部退磁的高风险地区,而铁氧体永磁材料就可以发挥高温抗退磁的能力。方案 b 为串并联磁路混合磁极,在方案 a 的基础上只替换 V 型磁极左右两端的上角,在保留方案 a 功能的前提下,铁氧体永磁材料还受到下方钕铁硼永磁材料的助磁作用,提升铁氧体工作点的磁密,保证转矩输出能力不会下降太多。方案 c 为串联磁路混合磁极,虽然不能改善气隙磁密波形正弦度,但此方案可以在降低成本、增强局部高温抗退磁能力的同时,最大程度保证电机的转矩输出能力。

表 4 永磁材料参数性能

Tab. 4 Permanent magnet material parameter performance

材料牌号	Y30H-2	N38SH
剩余磁通密度/mT	390~410	1 220~1 300
磁感应矫顽力/(kA·m ⁻¹)	266~290	907~987
内禀矫顽力/(kA·m ⁻¹)	302~334	1 592
最大磁能积/(kJ·m ⁻³)	28.7~31.9	287~326

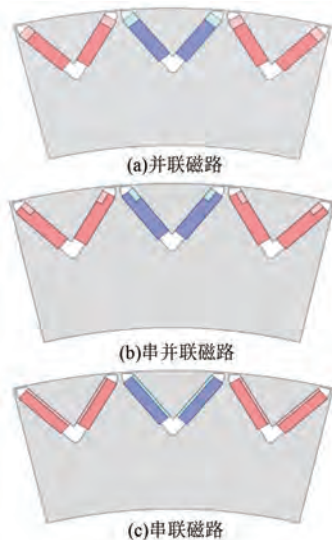


图 4 混合磁极方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hybrid magnetic pole schemes

三种混合磁极方案的空载反电势波形及傅里叶分解图分别如图 5、6 所示。利用式(7)可计算出三种方案的空载反电势总谐波失真(Total Harmonic Distortion, THD),方案 a 为 2.08%,方案 b 为 2.13%,方案 c 为 2.57%。

$$THD = \frac{\sqrt{u_3^2 + u_5^2 + \dots + u_v^2 + \dots}}{u_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中: u_1 为基波幅值; u_v 为高次谐波幅值。

由图 5、6 可知,永磁体材料用量相同时,方案 a 的空载反电势有效值最小,但其空载反电势 THD 最低。方案 b 与方案 c 的空载反电势有效值基本相同,方案 b 的空载反电势 THD 略低于方案 c,对比结果与所述规律相符。

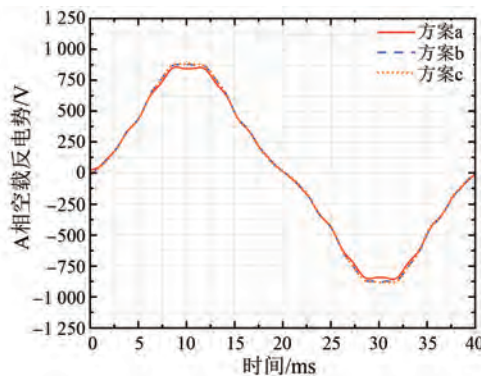


图 5 空载反电势对比图

Fig. 5 Comparison diagram of no-load back electromotive force

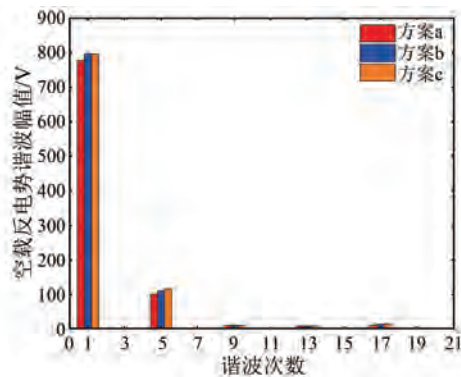


图 6 空载反电势的傅里叶分解对比图

Fig. 6 Fourier decomposition comparison diagram of no-load back electromotive force

三种方案的电磁转矩对比如图 7 所示,具体转矩数据如表 5 所示。方案 a 的转矩输出能力较差,方案 b 与方案 c 的平均转矩相差不大,但方案 b 相比方案 c 可在一定程度上改善气隙磁密波形正弦度。因此,综合考虑后选取方案 b 作为本文电机的混合磁极转子方案。

在混合磁极方案确定后,使用优化算法来调整两种永磁材料的用量配比。将永磁体成本和平均转矩作为优化目标,优化完成后的电磁转矩图如图 8 所示。由图 8 可知,铁氧体永磁材料的体积占总磁极的 16.55%,电机平均转矩为

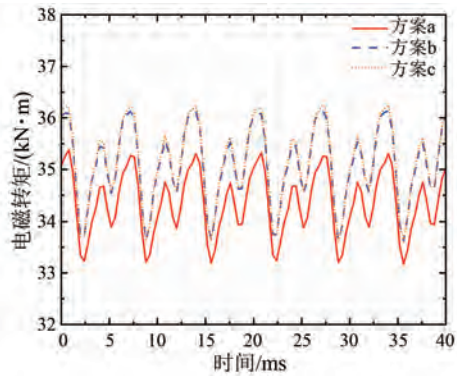


图 7 电磁转矩对比图

Fig. 7 Comparison diagram of electromagnetic torque
 33.52 kN·m, 转矩脉动为 5.78%, 满足性能要求。在输出转矩满足要求的情况下, 与纯稀土 V 型转子永磁电机相比, 混合磁极方案的永磁材料成本降低了 15.5%, 转矩脉动降低了 16.7%。

表 5 混合磁极平均转矩数据对比

Tab. 5 Hybrid magnetic pole average torque data comparison

方案	平均转矩/(kN·m)	转矩脉动/%
方案 a	34.34	6.42
方案 b	35.08	7.12
方案 c	35.13	7.53

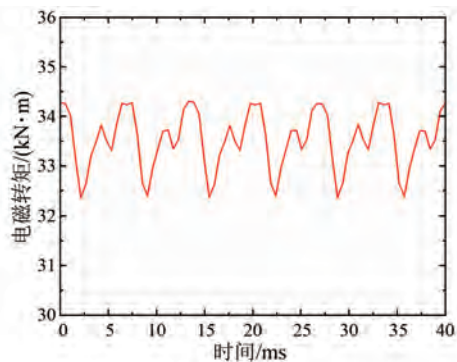


图 8 优化后电磁转矩图

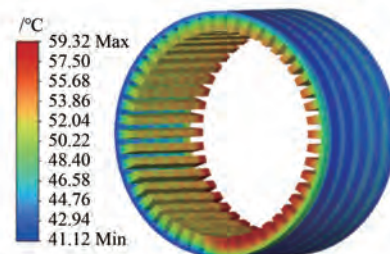
Fig. 8 Optimized electromagnetic torque diagram

3 温度场仿真校核及抗退磁能力分析

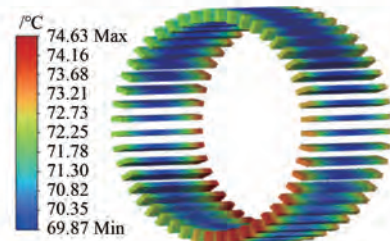
3.1 电机温度场仿真与分析

本文电机采用水冷方式, 根据水流的流向可以将水道分为轴向型和周向型两种, 其中周向型常用螺旋水道。轴向型水道进出水口在同一侧, 水道拐角较多, 拐角处水流阻力较大, 流速不均匀。螺旋型水道无拐角, 水流速度均匀, 水流阻力

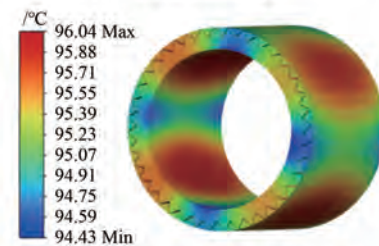
相对较小^[26]。因此, 本文水冷系统采用螺旋水道。电机在额定状态下主要部件的温度场仿真云图如图 9 所示。



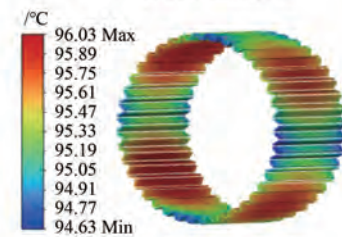
(a) 定子温度云图



(b) 绕组温度云图



(c) 转子温度云图



(d) 永磁体温度云图

图 9 电机主要部件温度云图

Fig. 9 The temperature contour plot of key motor components

由图 9 可知, 额定运行状态下电机最高温度 96 °C 出现在转子内部。由于转子距离机壳水道较远, 仅通过空气和转子支架传导散热。而定子紧贴机壳, 散热效果最佳, 最高温度为 59 °C。绕组端部为温度集中区, 最高达到 74 °C。本文电机采用 F 级绝缘, 极限温度为 155 °C, 额定工况下最高温度远低于此限值。同时, 永磁体最高温度

96 ℃ 也低于 N38SH 钕铁硼材料的拐点温度 150 ℃, 表明其抗退磁能力在运行中保持良好。

3.2 混合磁极抗退磁能力分析

在电机运行过程中, 永磁体的性能受交变电流和温升共同影响。正常状态下, 钕铁硼和铁氧体的退磁曲线为直线, 永磁体的工作点在退磁曲线上往复运动, 电磁性能保持稳定。但当电机的运行环境恶化, 如电机温升增高, 此时钕铁硼的矫顽力会持续下降, 抗退磁能力会快速变弱。温度达到 150 ℃ 时, 钕铁硼 N38SH 的退磁曲线将会出现拐点, 对应的磁密值为 0.35 T。若磁钢的工作点下降到拐点以下, 永磁体将发生不可逆退磁, 电机的电磁性能将发生不可逆的损害。而铁氧体的矫顽力温度系数为正值, 当温度升高时, 其矫顽力数值会升高, 抗退磁能力会变强, 退磁曲线并不会出现拐点, 即只要铁氧体 Y30H-2 的磁密保持在 0 以上就不会发生不可逆退磁。

对混合磁极进行退磁校核, 选择混合磁极上的 12 个边角点来检查磁极的磁密数值是否有退磁风险。混合磁极的磁密检查点分布如图 10 所示。

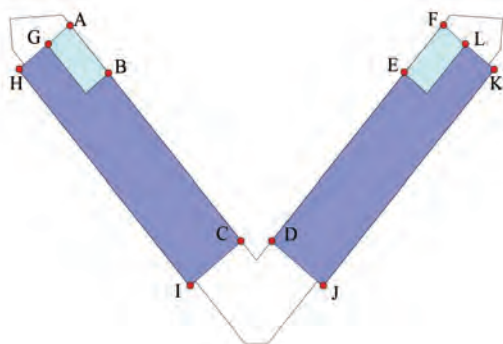


图 10 混合磁极检查点位置图

Fig. 10 Check point location diagram of hybrid magnetic pole

在做退磁校核时, 通过仿真观测这 12 个点的磁密数值来判断磁极是否发生不可逆退磁。在电机运行过程中, 由于转子中的磁场分布呈现周期性分布, 不同转子位置上磁极检查点的磁密并不相同, 因此选择一个周期中磁密最小的磁极进行校核更有代表性。额定运行状态下磁密最小磁极的磁通密度云图如图 11 所示, 检查点的磁密数值如表 6 所示。

由表 6 可知, 所有检查点的磁密数值均大于 0。根据温度场校核结果, 额定负载状态下的温度

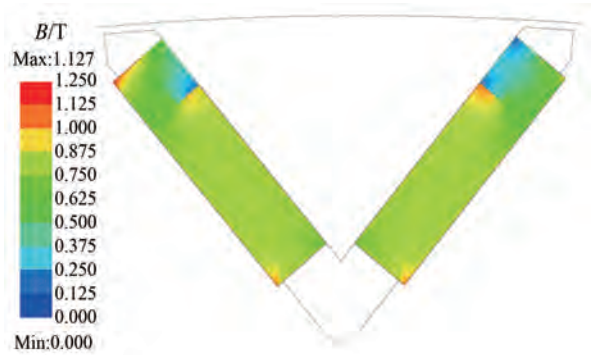


图 11 额定负载磁密云图

Fig. 11 Rated load magnetic flux density contour plot

不会使钕铁硼退磁曲线出现拐点, 因此混合磁极不会发生不可逆退磁。除了 V 型磁极中间部位对称的检查点磁密数值接近以外, 磁极左侧的磁密数值都大于右侧, 这是因为左侧磁极靠近定子磁动势正方向, 受到助磁效果; 右侧磁极靠近定子磁动势负方向, 受到去磁效果。

表 6 额定负载下检查点磁密值

Tab. 6 Check point magnetic density value under rated load

检查点	磁密/T	检查点	磁密/T
A 点	0.506 8	G 点	0.848 1
B 点	0.159 2	H 点	1.069 2
C 点	0.655 7	I 点	0.945 0
D 点	0.658 2	J 点	0.933 2
E 点	0.142 0	K 点	0.770 9
F 点	0.127 1	L 点	0.454 6

永磁体性能主要受温度和定子电流两个重要因素影响, 为校核混合磁极在高温下的抗退磁能力, 对 150 ℃、两倍过载状态下的混合磁极进行退磁校核, 重点关注右侧磁极 E、F 检查点的磁密。

在 150 ℃、两倍过载状态下, 由图 12 可知, 铁氧体部位 E、F 检查点的磁密分别为 0.087 5 T 和 0.081 1 T, 仍然大于 0; 钕铁硼部位的磁密数值也未降到拐点以下, 磁极未发生不可逆退磁。

150 ℃、两倍过载状态下纯稀土电机的磁密云图如图 13 所示。图中, 磁极左右两个上角部位已经发生不可逆退磁, 电机的电磁性能受到了不可逆的损害。从抗退磁能力的角度来看, 混合磁极的抗退磁能力强于纯稀土钕铁硼磁极, 拓宽了电机的工作温度范围。



图 12 150 °C、两倍过载磁密云图

Fig. 12 Magnetic flux density contour plot at 150 °C under 2× overload



图 13 150 °C、两倍过载纯稀土电机磁密云图

Fig. 13 Magnetic flux density contour plot of pure rare-earth motor at 150 °C under 2× overload

4 结语

本文针对煤矿刮板输送机用稀土永磁电机的永磁体成本高、气隙磁场调节困难和高温抗退磁能力差等问题,设计了一种由铁氧体永磁材料和钕铁硼永磁材料共同励磁的混合磁极 PMSM。在满足电机电磁性能的前提下,通过使用铁氧体永磁材料替换部分钕铁硼永磁材料,使永磁体成本下降 15.5%,改善了气隙磁场的正弦度,转矩脉动降低 16.7%,且增强了高温下磁极的抗退磁能力,提升了电机运行的稳定性,为低速大转矩 PMSM 的设计拓宽了思路。

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

刘家奇进行了方案设计、仿真研究与论文撰

写,王凯冬和艾叶进行了内容总结,于思洋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, simulation study and paper writing were carried out by Liu Jiaqi. The content summary was carried out by Wang Kaidong and Ai Ye. The manuscript was revised by Yu Siyang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 阚乃杰, 吴家成. 矿用刮板输送机隔爆型三相永磁半直驱电机开发及应用[J]. 防爆电机, 2019, 54(5): 14-18.
Kan N J, Wu J C. Development and application of flame-proof semi-direct drive three-phase permanent magnet motor for mine scraper conveyor [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2019, 54(5): 14-18.
- [2] 刘小俊. 带全阶观测器的永磁同步电机电流滑模控制器研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(6): 690-699.
Liu X J. Research on current sliding mode controller with full-order observer for PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(6): 690-699.
- [3] 孟全. 大功率永磁直驱电动滚筒带式输送机的应用[J]. 煤矿机电, 2020, 41(1): 84-85+89.
Meng Q. Application of high power permanent magnet direct driving electric roller for belt conveyor [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2020, 41(1): 84-85+89.
- [4] 李学强, 黄顺春, 刘乃光, 等. 稀土永磁产业发展现状及提升建议[J]. 中国稀土学报, 2026, 44(2): 158-169.
Li X Q, Huang S C, Liu N G, et al. Current development status and enhancement recommendations for rare earth permanent magnet industry [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2026, 44(2): 158-169.
- [5] 林迎前, 孙毅, 王云冲, 等. 稀土和铁氧体混用永磁辅助同步磁阻电机[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1145-1157.
Lin Y Q, Sun Y, Wang Y C, et al. A hybrid PM-assisted SynRM with ferrite and rare-earth magnets

- [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1145-1157.
- [6] 陈先峰, 黄平林, 钱诚棵. 无稀土轴向磁通永磁电机的设计研究[J/OL]. 电工技术学报, 2026-01-27. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.251856>.
- Chen X F, Huang P L, Qian C K. Design study of rare-earth-free axial flux permanent magnet machines [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026-01-27. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.251856>.
- [7] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- Tang R Y. Modern permanent magnet machines theory and design [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [8] 崔刚, 熊斌, 李振国, 等. 转子温度空间分布差异诱发永磁电机局部失磁特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2437-2447.
- Cui G, Xiong B, Li Z G, et al. Research on local demagnetization characteristics of permanent magnet motor induced by spatial distribution difference of rotor temperature [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2437-2447.
- [9] Zeng X X, Quan L, Zhu X Y, et al. Investigation of an asymmetrical rotor hybrid permanent magnet motor for approaching maximum output torque [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 0602704.
- [10] Chen Y Y, Zhou X, Li Z Y, et al. Torque performance enhancement for hybrid PM motor considering magnet characteristic difference and variation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59(11): 8202405.
- [11] 江龙顺, 杨雷, 陈亮, 等. 工业机器人用少稀土混合磁钢永磁同步电机研究[J]. 微特电机, 2025, 53(5): 21-26.
- Jiang L S, Yang L, Chen L, et al. Research on less-rare-earth hybrid permanent magnet synchronous motor for industrial robots [J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(5): 21-26.
- [12] Shi L W, Jing J N, Wang W Q, et al. Electromagnetic characteristic analysis of a negative-salient hybrid permanent magnet motor for electric vehicles [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2024, 5(3): 1283-1291.
- [13] Zhao W L, Yang Z S, Liu Y, et al. Analysis of a novel surface-mounted permanent magnet motor with hybrid magnets for low cost and low torque pulsation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(6): 8104804.
- [14] 李宗耀, 初秋, 车爽, 等. 少稀土组合磁极Halbach永磁同步电机性能和材料成本研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 74-82.
- Li Z Y, Chu Q, Che S, et al. Research on performance and material cost of Halbach permanent magnet synchronous motor with less rare earth combined magnet poles [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 74-82.
- [15] 司响, 朱孝勇, 左月飞, 等. 基于移相解耦调制的少稀土混合励磁电机驱动性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7899-7908.
- Si X, Zhu X Y, Zuo Y F, et al. Research on drive performance of the less-rare-earth hybrid-excitation PM motor based on decoupled SVPWM control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7899-7908.
- [16] Diao C W, Zhao W L, Wang N, et al. Analysis of a high-speed axial flux permanent magnet motor with hybrid magnets for low cost [C]// 2022 IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation, Denver, CO, USA, 2022: 1-2.
- [17] 史兵, 朱孝勇, 全力, 等. 共直流母线开绕组的少稀土混合磁材料永磁无刷电机系统零序电流抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 25-33.
- Shi B, Zhu X Y, Quan L, et al. Zero-sequence current suppression strategy for open winding hybrid permanent magnet material brushless motor with common DC bus [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(9): 25-33.
- [18] 潘绪前, 朱孝勇, 左月飞, 等. 定子永磁型双凸极非稀土永磁电机谐波电流抑制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 72-78.
- Pan X Q, Zhu X Y, Zuo Y F, et al. The current suppression of doubly salient permanent magnet motor with non-rare-earth [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(11): 72-78.
- [19] 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): 73-78.
- Wu W Q, Zhu X Y, Xiang Z X, et al. Design and

- analysis of a less-rare-earth permanent magnet brushless motor with hybrid permanent magnets [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(9): 73-78.
- [20] Zhu X Y, Li S P, Zheng S Y, et al. Torque component redistribution and enhancement for hybrid permanent magnet motor with permanent magnet offset placement [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 631-641.
- [21] Zhu X Y, Wang X, Zhang C, et al. Design and analysis of a spoke-type hybrid permanent magnet motor for electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(11): 8208604.
- [22] Yu D, Huang X Y, Zhang X C, et al. Optimal design of outer rotor interior permanent magnet synchronous machine with hybrid permanent magnet [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 0603105.
- [23] Wu W Y, Zhu X Y, Quan L, et al. Design and analysis of a hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor considering magnetic saliency and PM usage [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28(3): 5200306.
- [24] Zheng S Y, Zhu X Y, Xu L, et al. Comparative analysis and multi-objective optimization of hybrid permanent magnet motors considering different saliency characteristics [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(8): 5205205.
- [25] 甘宝平, 刘杰, 冯岗, 等. 低速大转矩模块化容错永磁电机不同转子结构分析[J]. *微电机*, 2024, 57(11): 1-11.
- Gan B P, Liu J, Feng G, et al. Analysis of different rotor structures of low-speed and high-torque modular fault-tolerant permanent magnet motors [J]. *Micromotors*, 2024, 57(11): 1-11.
- [26] 张兆宇, 于思洋, 张岳, 等. 永磁/磁阻混合转子双定子低速大转矩同步电机冷却及热管理技术研究[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(11): 114-124.
- Zhang Z Y, Yu S Y, Zhang Y, et al. Cooling and thermal management technology for low speed and high torque synchronous motor with permanent magnet and reluctance hybrid rotor and double stator [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(11): 114-124.
-
- 收稿日期:2026-03-03
收到修改稿日期:2026-03-30
作者简介:
刘家奇(1999—),男,硕士研究生,研究方向为高品质永磁及特种电机,18340281895@163.com;
*通信作者:于思洋(1988—),男,博士,副教授,研究方向为高品质永磁及特种电机系统,yusy@sut.edu.cn。