

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.06.002

分数槽集中绕组永磁辅助同步磁阻电机的设计

史涔澂, 蔡诗萌, 邱建琪

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为了改善同步磁阻电机存在的转矩密度低、效率低等问题,课题组设计了一种10极12槽的永磁辅助同步磁阻电机。定子采用隔齿绕分数槽集中绕组,减小了相间耦合,增大了绕组自感,从而提高了电机的容错能力;此外,通过永磁辅助,增大电机的交直流电感差,提高了电机的转矩密度;针对样机转矩脉动较大的问题,采用转子不对称磁障结构与定子斜槽的改进方法进行优化。仿真结果表明优化后电机的转矩脉动从32.0%减小到15.0%,表明课题组设计方案和优化方法具有可行性。

关键词:同步磁阻电机;永磁辅助;分数槽集中绕组;隔齿绕

中图分类号:TM35

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2021)06-0006-06

Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor with Fractional Slot Concentrated Winding

SHI Cenwei, CAI Shimeng, QIU Jianqi

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the problems of low torque density and low efficiency of synchronous reluctance motor, a 10-pole 12-slot PMa-SynRM with fractional slot and concentrated winding (FSCW) was designed. Only alternate teeth carried a concentrated coil in the stator, which reduces the coupling between phases and increases the self-inductance of the windings, thereby improving the fault tolerance of the motor. The self-inductance of the winding was improved, thereby improving the fault tolerance of the motor. In addition, with the help of permanent magnets, the difference between inductance of d -axis and q -axis was increased, and the torque density of the motor was improved. Aiming at the problem of large torque pulsation of the prototype, rotor asymmetric magnetic barrier structure and stator skew were used for optimization. The simulation result shows that the torque ripple of the motor before and after the optimization is reduced from 32.0% to 15.0%, which verifies the feasibility of the optimization method.

Keywords: synchronous reluctance motor; permanent magnet assist; fractional slot concentrated winding; alternate-teeth winding

永磁同步电机具有效率高、功率因数高和体积小等优点,是目前主流的电机类型。但永磁同步电机存在速度控制范围小、材料成本高昂等问题,且对稀土资源依赖性高,限制了其在商用领域的进一步发展。近年来,国际上永磁电机呈现出轻稀土的发展趋势,以铁氧体为主要永磁材料的永磁辅助同步磁阻电机(permanent magnet assisted synchronous reluctance motors, PMa-SynRM)开始受到重视^[1]。与传统的同步

磁阻电机相比,永磁辅助同步磁阻电机可以提高转矩密度、提高效率,并显著改善功率因数。与永磁同步电机相比,永磁辅助同步磁阻电机采用的铁氧体成本明显低于稀土永磁体,且由于铁氧体提供的磁链较小,其空载电动势只有传统的内置式永磁同步电机的1/3左右,磁阻转矩占总转矩的比例可达到60%以上,可较好地解决永磁同步电机在应用中遇到的调速范围低、成本高昂等难题^[2]。

收稿日期:2021-04-07;修回日期:2021-07-12

第一作者简介:史涔澂(1970),女,浙江杭州人,博士,副教授,研究方向为永磁电机及其控制、电机优化设计。E-mail:singing@zju.edu.cn

永磁辅助同步磁阻电机大多采用分布绕组,以达到更高的凸级比。但分布绕组需要人工下线,生产效率较低,且分布绕组的端部较长,增加了漆包线的材料成本和电机铜耗。与此相对,分数槽集中绕组永磁辅助式同步磁阻电机(fractional-slot concentrated-windings permanent magnet assisted synchronous reluctance motor, FSCW-PMaSynRM)具有结构简单、绕组端部损耗低及各相绕组之间的磁耦合小等特点,可以实现工业自动下线,降低了电机制造成本,具有轻量化、高效率和高容错率等优势^[3]。

在需要高容错能力的场合,定子结构采用隔齿绕组型式,一方面可以使电机各相绕组在物理空间上相对独立,另一方面可以减小相间互感,避免了故障相对正常相的影响^[4]。同时,隔齿绕组型式可提高电机定子的槽满率,增大绕组自感,使电机具有更高的磁阻转矩^[5]。

课题组设计了一台 10 极 12 槽隔齿绕分数槽集中绕组永磁辅助电机,并对比分析了隔齿绕电机与全齿绕电机的输出性能,讨论了电机参数对分数槽集中绕组永磁辅助电机性能的影响;最后针对样机转矩脉动较大的问题,采用不对称转子磁障结构^[6]与定子斜槽的方法进行了优化。

1 永磁辅助同步磁阻电机的基本结构和数学模型

1.1 永磁辅助同步磁阻电机的基本结构

永磁辅助同步磁阻电机是通过在同步磁阻电机的转子槽中插入永磁体变化而来的,其典型模型如图 1 所示^[7]。

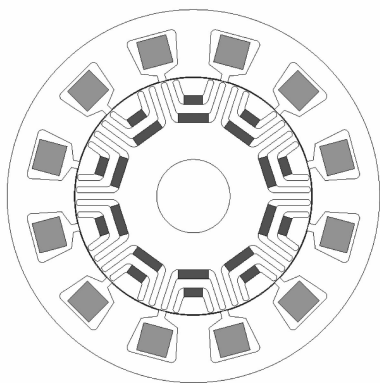


图 1 永磁辅助同步磁阻电机结构

Figure 1 Structure of PMA-SynRM

由于转子交、直轴磁路磁阻不相等,永磁辅助同步磁阻电机的电磁转矩中同时含有磁阻转矩和永磁转矩。与普通的同步磁阻电机相比,永磁辅助同步磁阻

电机由于在磁障中加入了永磁体,永磁体产生的磁场增加了磁桥上的饱和程度,增大了交直轴的电感差,从而提高电机的磁阻转矩。因而,永磁辅助同步磁阻电机与永磁同步电机的不同在于其磁阻转矩分量大于永磁转矩分量。

1.2 永磁辅助同步磁阻电机的数学模型

同步磁阻电机将没有磁障隔磁的方向定义为 d 轴正方向,将超前于 d 轴 90° 电角度的方向定义为 q 轴正方向。永磁辅助同步磁阻电机 d - q 轴定义方向与同步磁阻电机一致,且永磁体磁链方向沿着 q 轴负方向。永磁辅助同步磁阻电机的转子磁力线走向如图 2 所示,电机的电压、电流相量关系如图 3 所示^[8]。

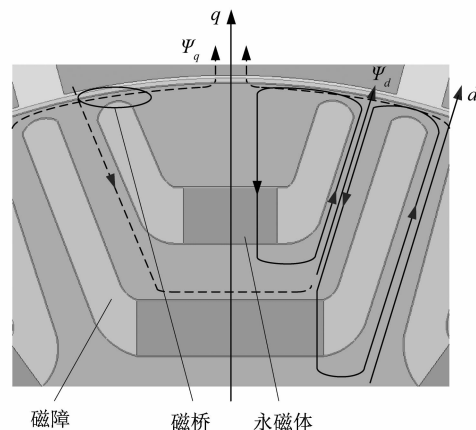


图 2 永磁辅助同步磁阻电机磁力线走向示意图

Figure 2 Schematic diagram of magnetic field line of PMA-SynRM

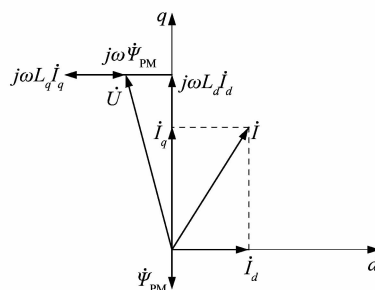


图 3 永磁辅助同步磁阻电机电压电流相量关系

Figure 3 Voltage and current phasor relationship of PMA-SynRM

同步磁阻电机转子 q 轴上存在磁障结构,故 q 轴磁阻较大,电感较小。永磁辅助同步磁阻电机在磁障中插入了磁阻与真空相近的永磁体,其产生的磁链可以使磁桥饱和,减小电枢 q 轴电感,提高电机交、直轴电感的差值。同时,两层永磁体产生的磁力线在永磁

体间隔区域内方向相反,当两层永磁体产生的磁通接近时,磁通几乎完全抵消,不会引起 d 轴磁路饱和,故不会减小 d 轴电感^[9]。

由相量关系图图 3 可以看出,永磁磁链对 q 轴电流产生的磁链起到了削弱作用,从而减小了电压矢量和电流矢量间的夹角,有利于功率因数的提升。忽略电机磁滞损耗和铁芯饱和,得到永磁辅助同步磁阻电机在 d - q 坐标系下的数学模型。基于坐标变换解耦控制,在 d - q 坐标系下,稳态时电机的电压方程如下:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q + Ri_d; \\ u_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d + Ri_q. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

磁链方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= L_d i_d; \\ \Psi_q &= L_q i_q - \Psi_{PM}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当电机稳态运行时,其电磁转矩的一般形式为:

$$T_{em} = \frac{3}{2}p\Psi_{PM}i_d + \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_d i_q. \quad (3)$$

式中: u_d, u_q 为电压空间矢量的交、直轴分量; L_d, i_d 分别为直轴电感与直轴电流; L_q, i_q 为交轴电感与交轴电流; Ψ_d, Ψ_q 分别为交、直轴磁链; Ψ_{PM} 为永磁磁链; p 为极对数。

电磁转矩表达式(3)中,第 1 项为永磁转矩分量,第 2 项为磁阻转矩分量。

由式(3)可知,若要调节永磁转矩,需要从电枢激励和永磁体两方面考虑。若要调节磁阻转矩,需要从改变转子磁路方面考虑,即增大 d, q 轴磁路的不对称性,从而增加交、直轴电感的差值。

2 电机设计

2.1 电机设计指标

本研究中样机要求电机的额定功率为 180 W,其最高转速是额定转速的 3 倍,最高线反电动势幅值不能高于母线电压。各项技术数据指标如表 1 所示。

表 1 永磁辅助同步磁阻电机技术数据

Table 1 Technical data of PMA-SynRM

直流母线 电压/V	额定转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	额定转矩/ ($N \cdot m$)	额定相 电流/A	恒功率转折点转 速/($r \cdot \min^{-1}$)	效率/ %
100	600	2	5.6	1 000	>70

考虑到永磁辅助同步磁阻电机自身的特点,需要尽可能提高电机的磁阻转矩分量,使其至少占总电磁转矩的 70%。因此,永磁辅助同步磁阻电机设计的关键是尽可能增大交、直轴的电感差,以增大电机的磁阻转矩。

2.2 极槽配合与绕组型式

电机选用 10 极 12 槽,定子绕组采用隔齿绕分数槽集中绕组。隔齿绕电机每个定子槽中只包含一个线圈边,而全齿绕电机的每个定子槽中含 2 个线圈边^[10]。

针对隔齿绕的分数槽集中绕组电机,由于每个槽只包含一个线圈边, $2n$ 个槽可容纳 n 个线圈,且对于三相电机,定子中的线圈数应为 3 的倍数,因此定子槽数应为 6 的倍数。同时,由于不平衡磁拉力的存在,会导致电机振动和噪声,对电机的稳定运行产生不利影响,因此每相包含的线圈数应为偶数。隔齿绕分数槽集中绕组电机的定子槽数最少应为 12。对于 12 槽的电机,绕组因数在 10 极或 14 极时达到最大,为 0.966。由于永磁辅助同步磁阻电机的转子多为多层磁障结构,极数过多时机械强度难以达到需求,因此课题组选用 10 极 12 槽的电机极槽配合进行样机设计。

在电机尺寸、转子结构和定子电流均相同的情况下,稳态运行时隔齿绕与全齿绕电机的磁场分布如图 4 所示。

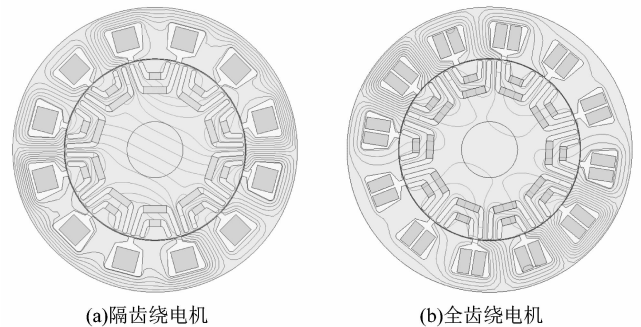


图 4 不同绕组型式的分数槽集中绕组电机磁场分布

Figure 4 Field distributions of FSCW motors with different windings

2.3 磁障层数

永磁辅助同步磁阻电机一般采用多层磁障的转子结构,磁障层数越多,单位电流产生的电磁转矩越大。由于本研究中采用了 10 极 12 槽的极槽配合,极对数较多,且电机的设计尺寸较小,考虑到制造工艺的复杂度以及电机的机械强度,采用 2 层磁障结构进行样机设计。

2.4 气隙长度

气隙长度是影响电机磁路饱和程度的重要因素。对于使用磁性较差的铁氧体作为永磁体材料的永磁辅助同步磁阻电机来说,气隙长度越小,产生一定气隙磁密所需的铁氧体体积越小。但考虑到电机的制造难

度,气隙长度还需要满足电机的机械结构稳定性。课题组采用电机气隙长度为 0.4 mm。

2.5 永磁体用量

永磁辅助同步磁阻电机中的永磁体主要起到提高转矩密度、增大交直流电感差值的作用,因此一般采用铁氧体作为主要材料。永磁体的用量不仅对永磁体磁链有影响,还会对电机的磁路饱和程度造成影响,从而改变电机的磁阻转矩。保持永磁体厚度为 3 mm,并保持 2 层磁障中永磁体宽度一致,改变永磁体的宽度,样机转矩特性的变化如图 5 所示。

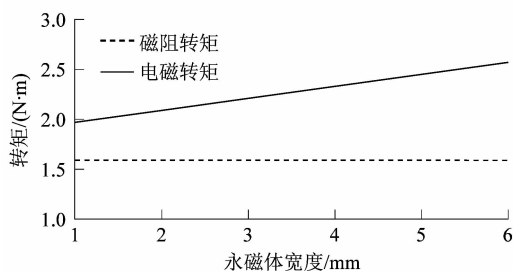


图 5 永磁体宽度对电机转矩特性的影响

Figure 5 Influence of width of permanent magnets on torque characteristics

由图 5 可知,随着永磁体宽度的增加,永磁磁链增加,使得整体电磁转矩增加,磁阻转矩占比不断降低。由于本文中样机机械结构的限制,综合成本与电机性能考虑,最终选择在 2 层磁障中,分别插入了宽度为 6 与 10 mm 的铁氧体,作为提供转子永磁励磁的永磁体材料。

2.6 永磁辅助同步磁阻电机样机参数及性能

课题组设计了一种分数槽集中绕组永磁辅助同步磁阻电机,电机基本参数如表 2 所示。

表 2 电机基本参数

Table 2 Parameters of motor

级数/ 槽数	定子铁心 外径/mm	定子铁心 轴向长/mm	定子铁心 内径/mm	转子铁心 内径/mm
10/12	122	60	78	24
电机轴向 长度/mm	气隙 长度/mm	永磁体 厚度/mm	永磁体 宽度/mm	
62	0.4	3	10,6	

隔齿绕电机的空载相反电势波形如图 6 所示。给定定子相电流最大值为 8 A 时,隔齿绕电机的负载磁通密度分布情况如图 7 所示。为了准确计算出电磁转矩中磁阻转矩的占比,在稳态场仿真模型中,通过冻结磁导率方式^[11]分离出磁阻转矩,并计算其占比,仿真结果如图 8 所示。

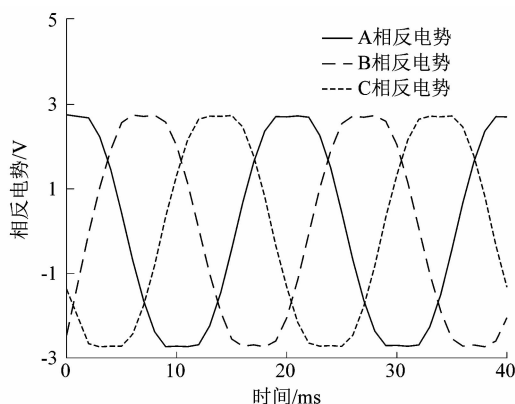


图 6 转速为 600 r/min 时的隔齿绕电机空载相反电势波形

Figure 6 No-load opposite potential waveform of prototype with alternate teeth wound at speed of 600 r/min

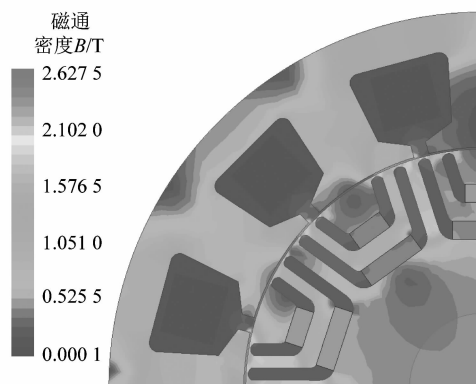


图 7 隔齿绕电机负载磁通密度

Figure 7 Load magnetic density of prototype with alternate teeth wound

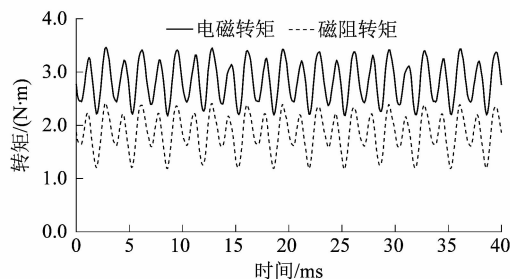


图 8 隔齿绕电机的转矩特性

Figure 8 Torque characteristics of prototype with alternate teeth wound

在电机体积相同、永磁体用量相同的情况下,改变样机绕组型式,电机输出性能对比如表 3 所示,电机交、直流电感波形对比如图 9 所示,转矩波形对比如图 10 所示。

表3 不同绕组型式电机的性能比较

Table 3 Performance comparison of motors with different winding types

绕组方式	级数/ 槽数	直轴电 感/mH	交轴电 感/mH	总电磁转矩/ (N·m)	磁阻转矩/ (N·m)	磁阻转矩 占比/%	铜耗/W	铁耗/W	相感应 电势/V	效率/%
集中绕组隔齿绕	10/12	25.70	18.80	2.78	1.85	66.5	26.90	4.08	54	84.9
集中绕组全齿绕	10/12	19.10	12.60	2.63	1.58	60.1	23.90	4.05	49	85.5
分布绕组	10/36	12.15	5.13	2.57	1.52	59.1	28.50	2.04	21	84.1

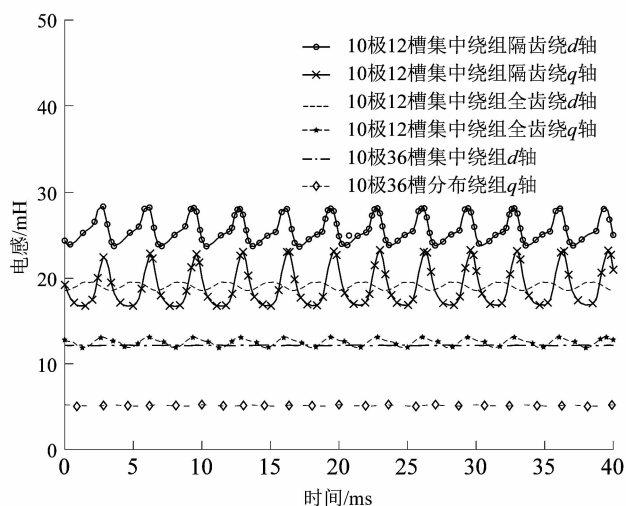


图9 不同绕组型式电机的电感波形对比

Figure 9 Inductance of motors with different winding types

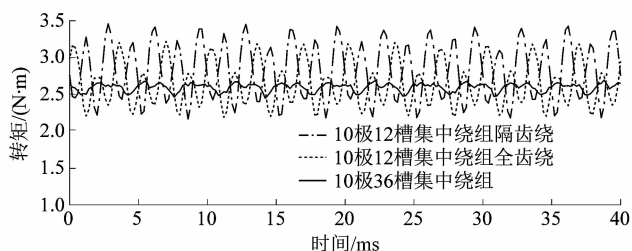


图10 不同绕组型式电机的转矩波形对比

Figure 10 Torque of motors with different winding types

集中绕组电机与分布绕组电机相比,由于端部长度短,铜耗较低,电机效率较高。其中,隔齿绕电机与全齿绕电机相比,电感绝对值较大,交直流电感的差值绝对值大于分布绕组电机,从而有效提高了磁阻转矩;且绕组系数高,具有更高的自感与更低的互感,能够进一步提高电机容错能力。

3 转矩脉动优化

在样机输出的电磁转矩中,磁阻转矩占比可达到70.0%。但此时电机转矩脉动达到32.0%(本研究中把转矩脉动定义为转矩波形的峰峰值与平均转矩的比

值),显然不足以满足实际应用的需要。为了提高电机的转矩平稳性,抑制其转矩脉动,需要对电机进行转矩脉动的优化。

3.1 转子不对称磁障

永磁辅助同步磁阻电机转子一般具有多层磁障结构,且磁障位置与形状多变,对转子磁场的影响十分复杂,能直接影响电机转矩脉动。因此,可以通过改变磁障的位置或形状,以及设置不对称磁障来抑制转矩脉动。不对称磁障结构如图11所示。将样机U型磁障一侧旋转约5°,优化前后的样机电磁转矩特性对比如图12所示。可以看出,采用不对称转子磁障结构后,电机转矩脉动由对称结构的32.0%下降到27.6%左右,该优化方法能起到有效减小电机转矩脉动,抑制电机噪声的作用。

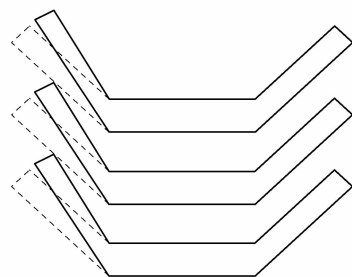


图11 左右不对称转子磁障结构

Figure 11 Asymmetric magnetic barrier structure in rotor

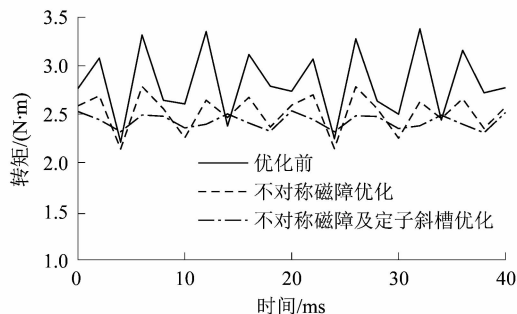


图12 样机优化前后转矩波形对比

Figure 12 Comparison of torque waveforms before and after optimization

3.2 定子斜槽

定子斜槽与转子斜极的目的是削弱由齿槽效应引起的齿谐波,改善电机齿槽转矩和转矩脉动。斜槽或斜极的角度由电机的极槽配合决定,对于本研究采用的10极12槽电机,斜槽的角度应为 360° 除以10与12的最小公倍数60,即为 6° 。

课题组在经转子不对称磁障结构优化过的样机基础上,采用了定子斜槽的方式对样机进行了进一步优化,优化前后的电机转矩性能对比如图12所示。采用定子斜槽后,电机转矩脉动由原来的27.6%下降到15.0%左右。

4 结语

课题组设计了一种隔齿绕分数槽集中绕组的永磁辅助同步磁阻电机,基于有限元分析与控制变量法,确定极槽配合、磁障层数、气隙长度和永磁体宽度等参数,并对比分析了电机在集中绕组隔齿绕、集中绕组全齿绕和分布绕组3种绕组型式下的输出特性。仿真结果表明隔齿绕永磁辅助同步磁阻电机由于磁路相间独立,具有较大的绕组自感和交直流电感差,可以提高电机故障短路时的容错能力。其转矩密度与磁阻转矩占比优于全齿绕电机,效率优于分布绕组电机。此外,可以采用转子不对称磁障、定子斜槽等方式进一步优化,使电机转矩脉动得到了有效抑制。

参考文献:

- [1] BOLDEA I, TUTELEA L N, PARSA L, et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (10):

5696 – 5711.

- [2] REDDY P B, GALIOTO S, EL-REFAIE A, et al. Design of synchronous reluctance motor utilizing dual-phase material for traction applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 (3): 1948 – 1957.
- [3] BIANCHI N, FORNASIERO E. Impact of MMF space harmonic on rotor losses in fractional-slot permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24 (2): 323 – 328.
- [4] WANG B, WANG J B, GRIFFO A, et al. A general modelling technique for a triple redundant 3x3-phase PMA SynRM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (11): 9068 – 9078.
- [5] ISHAK D, ZHU Z Q, HOWE D. Comparison of PM brushless motors, having either all teeth or alternate teeth wound [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (1): 95 – 103.
- [6] YING F, CHAO T, CHEN S, et al. Design and analysis of a new interior permanent magnet motor for EVs [C]. 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei: IEEE, 2016: 1357 – 1361.
- [7] 徐媚媚, 刘国海, 陈前, 等. 永磁辅助同步磁阻电机设计及其关键技术发展综述 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (23): 247.
- [8] KIM W H, KIM K S, KIM S J, et al. Optimal PM design of PMA-SynRM for wide constant-power operation and torque ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (10): 4660 – 4663.
- [9] 沈建新, 蔡顺, 郝鹤, 等. 同步磁阻电机分析与设计: 永磁辅助同步磁阻电机的设计研究 [J]. 微电机, 2017, 50 (3): 79 – 84.
- [10] HU L, EL-REFAIE B, ZHU A M, et al. Winding inductances of fractional slot surface-mounted permanent magnet brushless machines [J]. International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2009, 28 (6): 1590 – 1606.
- [11] CHU W Q, ZHU Z Q. Average torque separation in permanent magnet synchronous machines using frozen permeability [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49 (3): 1202 – 1210.

(上接第5页)

- [33] LIU Z B, LEI Q, XING S Q. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8 (5): 3741.
- [34] SINGH D, SINGH R, BOPARAI K S. Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 80 – 95.
- [35] REZWAN K, CHEN Q Z, BLAKER J J, et al. Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering [J]. Biomaterials, 2006, 27 (18): 3421.
- [36] ESSLINGER S, GADOW R. Additive manufacturing of bioceramic scaffolds by combination of FDM and slip casting [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 40 (11): 3707 – 3713.
- [37] FLORENCEJ M, YODER L A. Display system architectures for digital micromirror device (DMD)-based projectors [J]. Projection Displays, 1996, 2650: 193 – 208.

- [38] QUAN H Y, ZHANG T, XU H, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges [J]. Bioactive Materials, 2020, 5 (1): 110 – 115.
- [39] KOMISSARENKO D A, SOKOLOV P S, EVSTIGNEEVA A D, et al. DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41 (1): 684.
- [40] 王璟, 刘宇宁, 许芊, 等. 有机染料对DLP型3D打印光敏树脂的影响研究 [J]. 化学试剂, 2018, 40 (6): 528 – 532.
- [41] GUO J, ZENG Y, LI P R, et al. Fine lattice structural titanium dioxide ceramic produced by DLP 3D printing [J]. Ceramics International, 2019, 45 (17): 23007 – 23012.
- [42] HE R X, LIU W, WU Z W, et al. Fabrication of complex-shaped zirconia ceramic parts via a DLP-stereolithography-based 3D printing method [J]. Ceramics International, 2018, 44 (3): 3412 – 3416.
- [43] ZHANG J C, HUANG D, LIU S F, et al. Zirconia toughened hydroxyapatite biocomposite formed by a DLP 3D printing process for potential bone tissue engineering [J]. Materials Science and Engineering: C, 2019, 105: 110054.