

轴向分段式双爪极永磁电机设计与分析

宋成龙¹, 陆艳君^{2*}, 安辉¹, 邓文宇³, 齐丽君³, 安跃军^{1*}

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳芯源微电子设备股份有限公司, 辽宁 沈阳 110169;

3. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

Design and Analysis of Axially Segmented Double Claw Pole Permanent Magnet Motor

SONG Chenglong¹, LU Yanjun^{2*}, AN Hui¹, DENG Wenyu³, QI Lijun³, AN Yuejun^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: When the permanent magnet synchronous motor is under high frequency conditions, the core loss of the stator and rotor and the eddy current loss of the permanent magnet will increase, which will increase the temperature of the motor, resulting in insulation aging and permanent magnet demagnetization. In order to solve the problem of increasing loss at high frequency, a double claw pole motor with axially segmented claw pole stator and single-stage claw pole rotor with soft magnetic composite materials for stator and rotor core materials is designed. Similar to the problem of excessive torque ripple in the double-salient structure, a combination of rotor magnetic pole offset and stator oblique pole to reduce torque ripple is used. Finally, the electromagnetic design and temperature distribution of the motor are analyzed to verify the rationality of the design. For the selection of claw pole parameters, the effects of the main size ratio, polar arc coefficient, rotor magnetic pole offset distance and stator oblique pole angle on the air gap magnetic density, no-load back electromotive force, torque and torque ripple of the double claw pole motor are studied.

Key words: double claw pole motor; electromagnetic design; torque ripple; temperature analysis

摘要: 永磁同步电机在高频率工况时,定、转子铁心损耗和永磁体涡流损耗都会增加,使电机温度升高,从而导

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目(2023JH1/11100010)

Liaoning Province Open Bidding for Selecting the Best Candidates Science and Technology Plan Project (2023JH1/11100010)

致绝缘老化、永磁体退磁等。为了解决高频损耗增加的问题,设计了一台定、转子铁心材料均为软磁复合材料的轴向分段式爪极定子、单段式爪极转子的双爪极电机。类似于双凸极结构会出现转矩脉动过大的问题,采用转子磁极偏移和定子斜极相结合的方式降低转矩脉动。最后,对电机的电磁设计和温度分布进行分析,验证设计的合理性。对于爪极参数的选取,研究主要尺寸比、极弧系数、转子磁极偏移距离和定子斜极角度对双爪极电机的气隙磁密、空载反电动势、转矩及转矩脉动的影响。

关键词: 双爪极电机; 电磁设计; 转矩脉动; 温度分析

0 引言

永磁电机具有效率高、动态响应快等优点,广泛应用于各个领域。当应用在高频场合时,电机定、转子铁耗和永磁体涡流损耗均会随着频率的增加而变大,转子温度也随之升高,永磁体面临着不可逆退磁的风险^[1-2]。针对以上问题,可以从电机铁心选材和永磁体结构布置这两方面考虑进行优化设计。目前,软磁复合(Soft Magnetic Composite, SMC)材料在电机领域得到广泛应用,该材料的优点是具有各向同性,在频率超过400 Hz时,SMC材料铁心损耗特性优于硅钢片^[3-5]。同时SMC材料可以通过模具压制来实现各种结构复杂的铁心以供电机使用。其中爪极电机的复杂拓扑结构可以通过模具压制来实现,同时SMC材料还具有易回收性,使得爪极电机的研制成本大幅度降低^[6]。

文献[7]提出一种新型S形绕组的爪极永磁电机结构,综合比较了不同极对数和不同外径尺寸对爪极电机性能的影响。文献[8]在现有的研究基础上,提出一种定子轴向分段式爪极永磁同步电机结构,通过设计三台定子结构不同的轴向分段式爪极永磁同步电动机,重点研究了根部厚度、爪尖长度、爪尖厚度和爪极角对电机转矩和转矩脉动的影响。文献[9]研究一种新型混合励磁爪极电机结构,将传统圆线绕组替换成扁线式定子绕组,在降低电机端部绕组长度的情况下,提高电机定子槽满率和电机散热能力,并在爪极转子的尖部设置导磁环,降低电机漏磁。文献[10]通过巧妙设置永磁体的放置位置以及定子爪极旁路结构,使得永磁磁动势产生分流,提出一种新型爪极式并联混合励磁型双凸极电机结构。文献[11]提出一种双爪极电机结构,即定、转子均采用单段爪极形式,一相一段,段间相差机械角度放置构成旋转磁场,具有较高的转矩密度和功率密度。但此种形式的双爪极电机漏磁较大。因此,本文设计的轴向分段式双爪极电机采用多段式定子和单段式转子相结合的方式。

当电机处于高频工况时,降低各项损耗成为重中之重。合理选用定、转子材料,调整永磁体结构,均是降低双爪极电机损耗、抑制电机温升的有效措施。同时,对永磁体结构合理选用,也可以抑制永磁体因电枢反应而产生的退磁现象^[12]。根据一台电机的实际驱动参数,设计一台1.5 kW、9 000 r/min的双爪极电机,对其电磁性能和温度场进行仿真分析,分析结果可为研发新型双爪极永磁电机提供参考依据。

1 电机模型与运行原理

本文设计的是轴向分段式三相双爪极电机,但当转子也采用分段式结构时,段间漏磁的影响较大,使电机性能下降并增加设计难度。因此,在本文设计的三相双爪极电机中,定子采用三段式结构,转子采用单段式结构。其中,定子爪极由6个爪极铁心组成,转子由2个爪极铁心组成,均采用SMC材料压制而成,电机结构如图1所示。

三段定子爪极铁心沿轴向互差机械角度40°、电角度120°放置,在定子绕组内通入三相交流电,每段定子铁心会产生变化的磁场,三段定子

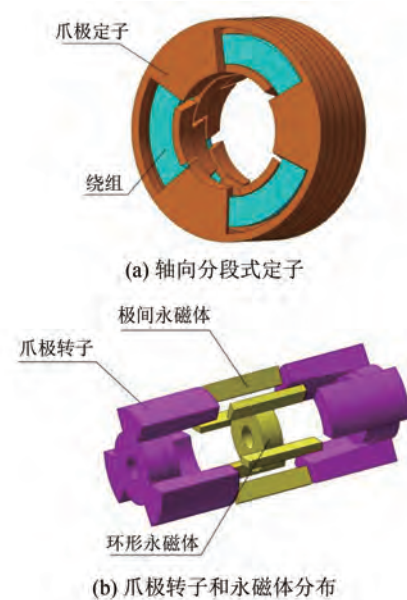


图1 双爪极电机结构

Fig. 1 Double claw pole motor structure

铁心便会产生旋转磁场,与爪极转子永磁体的励磁磁场相互作用,实现电机的机电能量转换。

2 电机电磁设计

2.1 电机基本参数选择

由于本文设计的电机定转子均采用爪极结构,漏磁较多。因此,在爪极尺寸的参数选择上会与普通的转子爪极电机和轴向分段式定子爪极电机不同。另一方面,由于爪极参数较多,因此电机设计时,在达到电磁性能的情况下,会对部分结构参数直接选定。电机主要尺寸和性能之间的关系为

$$\frac{D_c^2 l_{ef} n}{P_N} = \frac{6.1}{K_{NM} \alpha'_p B_\delta A m} \quad (1)$$

式中: D_c 为电机定子内径; l_{ef} 为电机轴向长度; n 为电机额定转速; P_N 为电机额定功率; K_{NM} 为气隙磁场的波形系数; α'_p 为计算极弧系数; B_δ 为气隙磁密; A 为电流线负荷; m 为电机相数。

本文设计的电机性能指标如表1所示。

表1 电机主要性能参数

Tab. 1 The main performance parameters of the motor

参数名称	参数值
额定功率/W	1 500
额定电压/V	200
额定转矩/(N·m)	1.59
额定转速/(r·min ⁻¹)	9 000
极对数 p	3

选择适当的 A 和 B_s 代入到式(1)中,并选择合适的主要尺寸比 λ 。轴向分段式电机的主要尺寸比一般取值在 2 以上^[8],但在电磁仿真时发现,当主要尺寸比大于 1.4 时,电机漏磁较大,气隙磁密仅有 0.4 T。因此,轴向分段式双爪极电机的主要尺寸比选择依据与正常的轴向分段式电机不一致。

通过仿真比较,最后选择主要尺寸比 λ 为 1.4,初步得到电机的主要尺寸,如表 2 所示。

表 2 电机主要尺寸参数

Tab. 2 The main size parameters of the motor mm

参数名称	参数值
定子外径	104
定子内径	54
转子外径	53.2
转子内径	10
轴向长度	39

2.2 爪极参数选择

通过电机性能参数以及主要尺寸比确定电机的基本尺寸后,进一步确定电机的定、转子爪极参数。

2.2.1 爪极角选取

为简化设计过程,本文设计的电机选用相同的定、转子爪极角,并且均采用矩形爪,爪极角如图 2 所示。

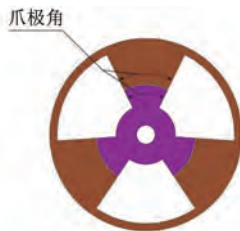


图 2 定、转子爪极角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the claw pole angle of the stator and rotor

在考虑转矩脉动和漏磁影响且添加转子爪极间永磁体的情况下,极弧系数过小时,会造成爪极间隔较大、极间永磁体过厚,造成转子爪极尖部磁密饱和、气隙磁密下降,使得转矩性能较差,并浪费永磁体材料;极弧系数过大时,由于爪极之间的间隔较小,会使极间漏磁增大,造成定子磁密分布不均匀、转子爪极尖部磁密饱和。而且由于转子爪极间隔较小,使得极间永磁体尺寸过薄,再加大工艺难度的同时,还会使永磁体易退磁。因此,针对以上情况,本文设计的双爪极电机的极弧系数

取值在 0.8~0.9 之间,对应角度为 $48^\circ \sim 54^\circ$ 。在初步确定定转子爪极参数、其他参数不变的情况下,通过改变爪极角来对比转矩和转矩脉动的变化情况,如图 3 所示。

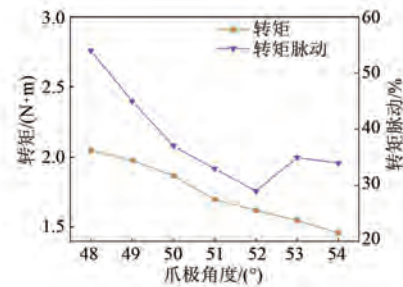


图 3 爪极角和转矩、转矩脉动的关系

Fig. 3 The relationship between the claw pole angle and the torque and torque ripple

从图 3 可以看出,转矩值和转矩脉动随着爪极角的增大总体呈下降趋势。当爪极角大于 52° 时,转矩脉动开始变大。其中,爪极角在 48° 时,转矩值达到最大值 $2.05 \text{ N}\cdot\text{m}$,转矩脉动也达到最大值 53.79%。这是由于爪极角为 48° 时,永磁体厚度最大,使得定子爪极尖部磁密饱和,反电动势谐波随着磁路饱和而增大,从而转矩脉动也随之增大。 54° 时转矩值最小,为 $1.46 \text{ N}\cdot\text{m}$;转矩脉动最小,为 30.11%。这是由于当爪极角为 54° 时,定子爪极尖部之间漏磁增大,主磁通减小,使得转矩值也随之减小。

各爪极角的转矩脉动均超过 30%,这是由于双爪极电机结构类似于双凸极结构,气隙磁密波形为平顶波,如图 4 所示。三相双爪极电机空载反电动势波形对称,本文以 A 相空载反电动势为例分析说明。A 相空载反电动势波形如图 5 所示。

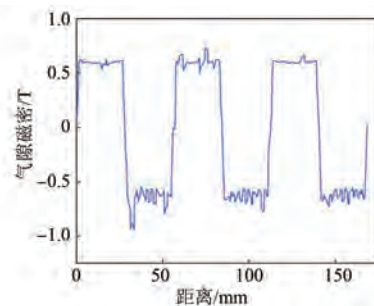


图 4 气隙磁密

Fig. 4 Air-gap magnetic flux density

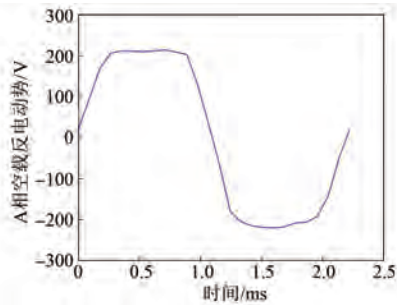


图5 A相空载反电动势

Fig. 5 A phase no-load back electromotive force

空载反电动势波形畸变率较高,达到18.39%。这就会出现转矩脉动过大造成电机的振动和噪音大,影响电机的稳定运行^[13]。因此,还要采取进一步优化措施来降低转矩脉动。

2.2.2 转矩脉动抑制

降低转矩脉动可以从电机控制和本体设计两个方面进行优化,本文从电机本体设计的角度进行研究。常见的抑制转矩脉动的方法有磁极偏移和斜极等^[14-16]。

转子磁极偏心是磁极偏移的一种,通过改变局部转子爪极尺寸,造成气隙长度不均匀,从而改变气隙中局部位置的磁导率,改善电机内磁场的分布情况,削弱气隙磁密谐波,优化气隙磁密波形,削弱电机的齿槽转矩,降低转矩脉动。设转子磁极偏心距离为 d ,示意图如图6所示。

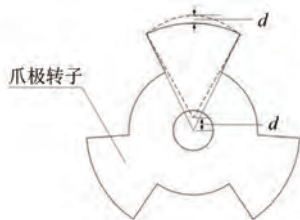


图6 转子磁极偏心示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the eccentricity of the magnetic poles of the rotor

在转子磁极偏心的基础上,可以采用斜极的方式进一步降低转矩脉动。斜极可以应用在电机的定子或者转子上,两者取其一即可。由于本文设计的双爪极电机结构的特殊性,定子采用轴向分段式集中绕组,且爪极转子中嵌入极间永磁体。若是采用转子斜极,会造成极间永磁体几何结构螺旋扭曲,不能实现励磁功能。因此,可以采用定子斜极方式,即将定子爪极尖部按圆周方向偏移。

设定子斜极角度为 γ ,如图7所示。

双爪极电机的定、转子铁心均采用模具压制而成,能够实现较复杂的定、转子铁心形状。因此,针对本文所设计的双爪极结构,采用转子磁极偏心和定子斜极相结合的方式抑制转矩脉动。

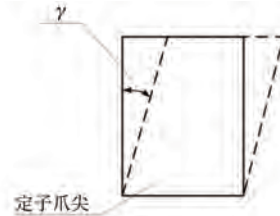


图7 定子斜极示意图

Fig. 7 Schematic diagram of stator oblique pole

转矩和转矩脉动与转子磁极偏心距离关系曲线如图8所示。

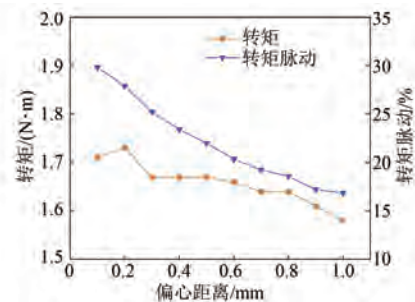


图8 转矩和转矩脉动与转子磁极偏心距离的关系

Fig. 8 The relationship between torque and torque ripple and the eccentricity distance of the rotor's magnetic poles

根据仿真结果可以看出,当转子偏心距离 d 取0.2 mm时,转矩值最大可达到 $1.73 \text{ N}\cdot\text{m}$,但此时转矩脉动仍然很大,为27.87%。当 d 取值在0.3 mm~0.8 mm之间时,转矩值可以稳定在 $1.64 \text{ N}\cdot\text{m}$ ~ $1.67 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。从图8可以看出,转矩脉动随着偏心距离的增大而减小,但是当 d 取0.8 mm时,齿槽转矩和空载反电动势波形畸变率会开始增大。齿槽转矩的存在会严重影响电机的稳定性能,使得电机产生振动,并发出噪声;反电动势波形畸变率过大会使电机产生更多的谐波损耗,导致电机温升过大。以上两个因素都会减少电机的使用寿命,因此 d 的取值要综合考虑以上两种因素。

齿槽转矩和空载反电动势波形畸变率数值如表3所示。从表3可知,当偏心距离 d 增大时,齿槽转矩整体呈下降趋势;当 d 取值为0.6 mm和0.7 mm时,空载反电动势波形畸变率达到最小值

4.44%。综合考虑以上因素,转子磁极偏心距离 d 取 0.7 mm。

表 3 齿槽转矩和空载反电动势波形畸变率数值
Tab. 3 Tooth trough torque and no-load back electromotive force waveform distortion rate values

偏心距离/mm	齿槽转矩/(mN·m)	畸变率/%
0.1	112.79	13.66
0.2	103.14	10.94
0.3	73.24	8.83
0.4	61.54	6.85
0.5	66.10	5.32
0.6	61.39	4.44
0.7	49.54	4.44
0.8	49.57	5.09
0.9	47.32	6.28
1.0	44.66	7.11

在转子磁极偏心的基础上进行定子斜极,进一步降低转矩脉动。转矩和转矩脉动与定子斜极角度关系曲线如图 9 所示。

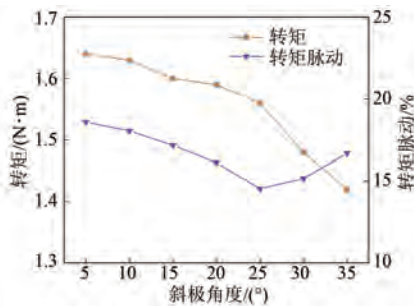


图 9 转矩和转矩脉动与定子斜极角度的关系
Fig. 9 The relationship between torque and torque ripple and the angle of the stator oblique pole

由图 9 可知,转矩值随着定子斜极角度的增大呈现减小的趋势。这是因为斜极角度增大的同时,定子爪极之间的漏磁也会增大。本文设计的电机定子斜极角度最大为 35° ,当超过 35° 时,相邻的两个定子爪尖会直接接触。当斜极角度为 35° 时,转矩值最小为 $1.42 \text{ N}\cdot\text{m}$,此时转矩脉动值为 16.68% ;斜极角度为 20° 时,转矩达到额定值 $1.59 \text{ N}\cdot\text{m}$,此时转矩脉动值为 16.12% ;斜极角度为 25° 时,转矩脉动达到最小值 14.54% ,此时转矩值为 $1.56 \text{ N}\cdot\text{m}$,小于额定值。因此,综合考虑以上因素,并结合斜极角度对空载反电动势波形畸变率的影响,最终选定斜极角度为 20° 。空载反

电动势波形畸变率与定子斜极角度关系曲线如图 10 所示。

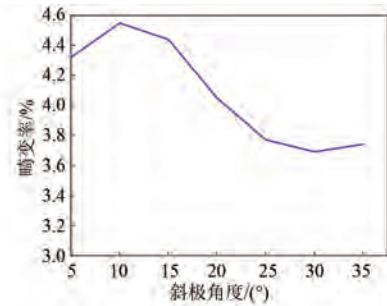


图 10 波形畸变率与定子斜极角度的关系
Fig. 10 The relationship between the waveform distortion rate and the stator angle of the oblique pole

2.2 电磁场分析

电机空载运行时,定、转子磁密分布如图 11 所示。

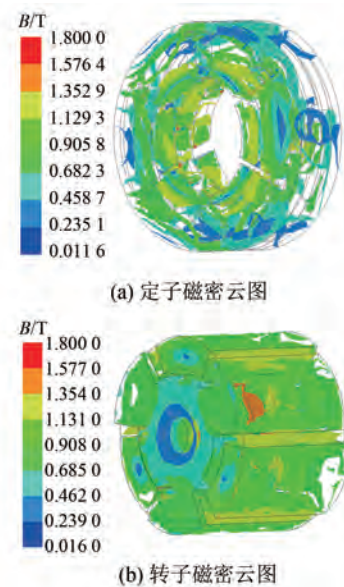


图 11 定、转子磁密分布

Fig. 11 The magnetic flux density distribution of the stator and rotor

从图 11(a)中可以看出,磁通主要集中在定子爪极尖部和根部结合的位置,爪根部分局部磁密较大,磁密值约为 1.2 T 。这是由于主要尺寸比的取值较小,造成轴向尺寸长度较小,使此处位置略微饱和,出现定子爪极根部的温度比爪尖和定子轭部稍高的情况,可以通过加装散热装置来解决这一问题。

转子部分磁密分布较为均匀,平均磁密约为 1.1 T 。永磁体位置的磁密最大,约为 1.2 T 。

经过转子磁极偏心方式和定子斜极优化,改善气隙磁密分布,优化空载反电动势波形,削弱齿槽转矩,达到抑制转矩脉动的效果。优化处理前后气隙磁密波形效果对比如图 12 所示。

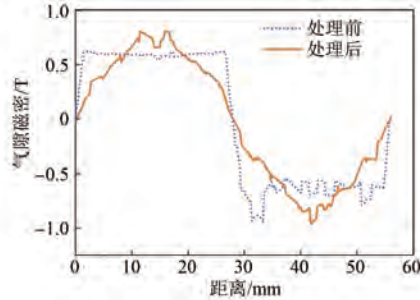


图 12 优化前后气隙磁密波形对比

Fig. 12 The comparison of optimized the before and after air gap magnetic dense waveforms

由图 12 可知,通过转子磁极偏心和定子斜极的方式,改变了气隙中局部位置的磁导率,有效改善电机内磁场的分布情况,气隙磁密波形的正弦性得到了很大提升,转矩脉动得到了有效抑制。

优化处理前后空载反电动势波形效果对比如图 13 所示。由图 13 可知,电机的内磁场经过改

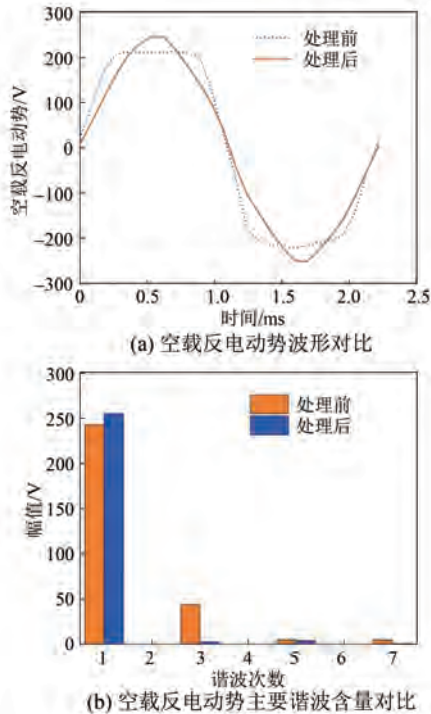


图 13 处理前后反电动势波形及其谐波含量对比

Fig. 13 The comparison of optimized A phase no-load back electromotive force waveforms and its harmonic content

善、气隙磁密优化后,空载反电动势波形的正弦性得到加强,谐波含量从 18.39% 下降到 4.05%。当谐波含量过大时,会影响电机输出转矩的平滑度,导致产生较大的转矩脉动,同时还会增加电机的谐波损耗,使电机温度升高,效率下降,减小电机的使用寿命。

3 温度场分析

电机在正常运行时电机的定子、转子、绕组和永磁体会产生各项损耗,使得电机的温度升高。当温度过高时,一方面会加快电机的绝缘老化,减少电机的使用寿命;另一方面过高的温度会使永磁体退磁^[17-18]。因此,电机的温度是永磁电机着重考虑的因素。

3.1 电机损耗计算

3.1.1 铁心损耗

铁心损耗是铁心在交流磁路中因磁滞和涡流引起的功率损耗的总称,包括磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗。采用 Bertotti 铁耗计算模型,计算式为

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e = k_h f B_m^2 + k_c f^2 B_m^2 + k_e f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (2)$$

式中: P_h 为磁滞损耗; P_c 为附加损耗; P_e 为涡流损耗; B_m 为磁通密度幅值; f 为频率; k_h 、 k_c 和 k_e 分别为磁滞损耗系数、附加损耗系数及涡流损耗的系数。

3.1.2 绕组铜耗

电机的绕组铜耗是绕组铜线中通入电流产生的损耗。双爪极电机采用的是轴向分段式集中绕组形式,因此无需计算绕组端部的铜耗,计算式为

$$P_{Cu} = m I^2 R \quad (3)$$

式中: I 为通入绕组的电流; R 为电机绕组的电阻。

3.1.3 永磁体涡流损耗

当电机在运行过程中,气隙磁场内含有部分谐波分量,这些谐波分量会在永磁体内感应出涡流,从而产生涡流损耗。涡流损耗的大小与永磁体电导率、电流频率等因素有关。永磁体采用的是 N50H 钕铁硼永磁体,经过有限元计算,永磁体涡流损耗如图 14 所示。

3.1.4 机械损耗

电机机械损耗共包括两部分:转子风摩损耗和轴承摩擦损耗。随着轴承制作工艺的不断精

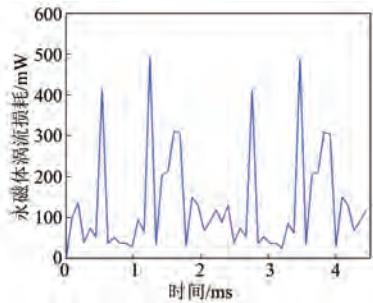


图 14 永磁体涡流损耗

Fig. 14 The eddy current loss of permanent magnet

进, 轴承摩擦损耗可以忽略不计。因此电机机械损耗仅考虑转子风摩擦损耗。精准计算机械损耗比较困难, 常采用经验公式进行估算, 机械损耗计算式为

$$P_f = aL\omega_r D_s^2 \quad (4)$$

式中: a 为经验系数; L 为电机有效长度; ω_r 为角速度; D_s 为定子铁心外径。

3.2 温度场仿真

经过上述电机各项损耗计算, 得到电机在额定工况下的各项损耗如表 4 所示。

表 4 电机主要损耗

Tab. 4 The main loss of the motor		W
参数名称	参数值	
定子铁耗	51.8	
转子铁耗	5.16	
绕组铜耗	78.3	
永磁体涡流损耗	0.14	
机械损耗	1.17	

运用温度场仿真软件, 可以得到电机各位置在室温下正常运行时的温度分布图, 如图 15 所示。由图 15 可知, 电机的平均温度为 80.3 °C, 定子爪极根部和尖部温度最高, 为 85 °C。这是由于在电机设计时考虑漏磁影响选取了较小的主要尺寸比, 导致电机轴向尺寸较小, 定子爪极根部尺寸较小。且根部与电机绕组接触导致温度较高, 但仍在安全裕度内, 后续可通过冷却装置降温。

转子部分平均温度为 79.9 °C, 其中爪尖表面温度为 83.7 °C。一方面, 由于转子爪尖和定子爪尖距离较近, 导致定子一部分热量通过气隙传递到转子爪尖; 另一方面, 在电机运行时, 转子旋转和气隙内的空气摩擦产生的机械损耗也产生热量, 导致转子爪极尖部表面温度相对较高。转子爪极根部温度较低, 为 77.8 °C。

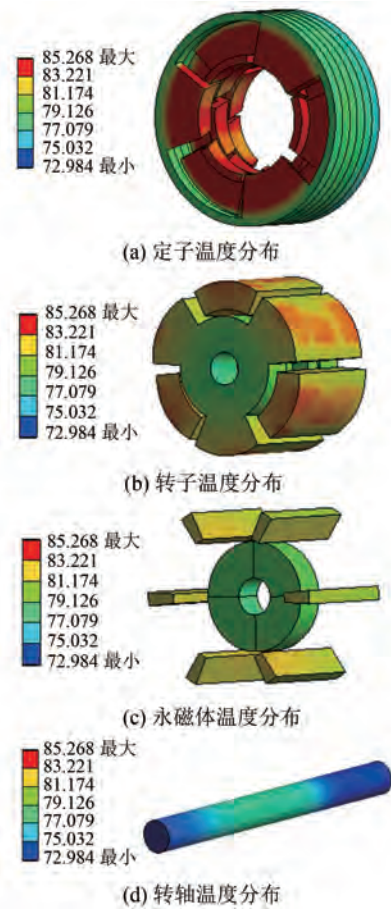


图 15 电机各部件温度分布

Fig. 15 The temperature distribution of each component of the motor

极间永磁体温度为 81.7 °C, 环形永磁体温度为 78.7 °C。极间永磁体固定在转子相邻爪尖之间, 环形永磁体由两个爪极转子固定, 仅与温度较低的根部接触, 因此前者的温度高于后者。转轴温度为 76 °C, 转轴两端与空气接触, 在实际运行时会利用空气传导部分热量, 因此转轴两端的温度比与转子接触的部分低。

永磁体使用的是 N50H, 最高工作温度为 120 °C, 留有安全裕度。电机温度分布合理, 还可以通过添加水冷进一步降低电机温度^[19-20]。

4 结语

本文设计了一款轴向分段式双爪极电机, 通过电磁和温度仿真可知:

(1) 轴向分段式电机的主要尺寸比一般取值在 2 以上, 但当主要尺寸比大于 1.4 时电机的漏磁较大, 气隙磁密较小。因此, 轴向分段式双爪极

电机的主要尺寸比选择依据与正常的轴向分段式结构不一致。

(2) 在添加转子爪极间永磁体的情况下,极弧系数过小时,会造成爪极间隔较大、极间永磁体过厚,使得转矩性能较差、浪费材料;极弧系数过大时,爪极间隔较小,会使极间漏磁增大。因此,针对以上情况,本文设计的双爪极电机的极弧系数应在 0.8~0.9 之间取值。

(3) 双爪极电机转矩脉动较大,这是由于双爪极电机结构类似于双凸极结构,气隙磁密波形为平顶波,空载反电动势波形为梯形波。可以采用转子磁极偏心和定子斜极相结合的方式抑制转矩脉动。

(4) 电机正常运行时,极间永磁体温度为 81.3 °C,环形永磁体温度为 77.5 °C,留有安全裕度。电机温度合理,满足设计要求。

参考文献

- [1] 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.
- [2] YOU Y M, YOON K Y. Multi-objective optimization of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle considering demagnetization [J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2159.
- [3] 刘成成. 软磁复合材料铁芯永磁电机新型拓扑结构及优化设计研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
LIU C C. Investigation on novel topologies and optimization methods for permanent magnet machines with soft magnetic composite material cores [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.
- [4] 常九健,王晨,郑昕昕,等. 新型软磁材料的轴向磁通轮毂电机特性研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(5): 20-27.
CHANG J J, WANG C, ZHENG X X, et al. Characterization of axial flux hub motors based on new soft magnetic materials [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(5): 20-27.

- [5] 韦福东,王建辉,刘朋鹏. 基于软磁复合材料的超高速永磁同步电机电磁设计分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 78-82.
WEI F D, WANG J H, LIU P P. Electromagnetic design and analysis of ultra-high-speed motor based on soft magnetic composite material [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(1): 78-82.
- [6] 穆德森. 软磁复合材料电机性能分析与优化设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
MU D S. Performance analysis and optimization design of soft magnetic composite material motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [7] 王东阳. 新型爪极永磁电机的设计与优化研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
WANG D Y. Design and optimization of a new type claw-pole permanent magnet machine [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.
- [8] 熊昱强,安跃军,安辉,等. 真空干泵用爪极永磁电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 48-53.
XIONG Y Q, AN Y J, AN H, et al. Design and analysis of claw pole permanent magnet motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 48-53.
- [9] 杜飞. 新型混合励磁爪极电机的设计[D]. 太原: 中北大学, 2019.
DU F. Design of a new hybrid excitation claw pole motor [D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [10] 于世洋. 电动汽车用爪极式混合励磁双凸极电机分析与设计[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
YU S Y. Design and analysis of a claw-pole stator hybrid-excitation dual-salient machine for electric vehicle [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [11] LUNDMARK S T, ALATALO M. A segmented claw pole motor for traction applications considering recycling aspects [C] // 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicle and Renewable Energies, Monte Carlos, 2013.
- [12] 魏蜜. 内置式永磁同步电机永磁体退磁问题研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
WEI M. Research on demagnetization of permanent

- magnet of interior permanent magnet synchronous motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [13] 金子剑, 安跃军, 安辉, 等. 真空泵用开关磁阻电机转矩脉动抑制分析[J]. 电工技术, 2022, (17): 190-193+196.
- JIN Z J, AN Y J, AN H, et al. Analysis of torque ripple suppression of switched reluctance motor used in vacuum pump [J]. *Electrotechnical Technology*, 2022, (17): 190-193+196.
- [14] 曹睿. 考虑磁场非正弦的永磁同步电机转矩脉动抑制研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- CAO R. Research on torque ripple minimization of PMSM considering non-sinusoidal magnetic field [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [15] 王道涵, 彭晨, 王秀和. 电动汽车高性能永磁电机转矩脉动与电磁振动抑制方法研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4): 42-50.
- WANG D H, PENG C, WANG X H. Research on different design approaches to mitigate torque ripple and electromagnetic vibration for high-performance electric vehicle traction machine [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2021, 16(4): 42-50.
- [16] 崔吉振. 双凸极永磁电机转矩脉动抑制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- CUI J Z. Research on torque ripple suppression of double salient pole permanent magnet motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [17] 韩雪岩, 王佳兴, 朱龙飞. 非晶合金轴向永磁电机永磁体涡流损耗抑制措施研究[J]. 电机与控制学报: 2023, 27(12): 74-84.
- HAN X Y, WANG J X, ZHU L F. Measures for suppressing eddy current loss of permanent magnet in amorphous alloy axial permanent magnet motor [J]. *Electric Machines and Control*; 2023, 27(12): 74-84.
- [18] 刘柯, 周羽, 杨小宝, 等. 高速永磁同步电机结构对转子涡流损耗影响[J]. 微特电机, 2022, 50(12): 16-20+26.
- LIU K, ZHOU Y, YANG X B, et al. Influence of the structure of high-speed permanent magnet synchronous motor on eddy current loss of rotor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2022, 50(12): 16-20+26.
- [19] 胡鑫, 安跃军, 杨维国, 等. 基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机冷却系统分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 80-85.
- HU X, AN Y J, YANG W G, et al. Analysis of cooling system of shielded motor for vacuum pump based on fluid-structure coupling method [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(2): 80-85.
- [20] 韩雪秋, 安跃军, 安辉, 等. 真空干泵驱动电机冷却效果分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 69-76.
- HAN X Q, AN Y J, AN H, et al. Analysis of cooling effect of drive motor for vacuum dry pump [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(6): 69-76.

收稿日期:2023-12-23

收到修改稿日期:2024-03-24

作者简介:

宋成龙(1998-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机及控制,1977967137@qq.com;

*通信作者:陆艳君(1990-),女,硕士,高级工程师,研究方向为集成电路装备研发,luyanjunneu@163.com;

安跃军(1962-),男,硕士,教授,研究方向为特种电机及控制,anyj_dq@sut.edu.cn。

Design and Analysis of Axially Segmented Double Claw Pole Permanent Magnet Motor

SONG Chenglong¹, LU Yanjun^{2*}, AN Hui¹, DENG Wenyu³, QI Lijun³, AN Yuejun^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110169, China;

3. Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Key words: double claw pole motor; electromagnetic design; torque ripple; temperature analysis

When the permanent magnet synchronous motor working at high frequency, the core loss of stator and rotor and the eddy current loss of the permanent magnet will increase, which will increase the temperature of the motor, resulting in insulation aging and permanent magnet demagnetization. Therefore, the temperature rise of the motor can be suppressed by reducing the core loss of the motor, the eddy current loss of the permanent magnet and the copper loss of the winding, so as to reduce the risk of demagnetization caused by high temperature of the permanent magnet.

At present, soft magnetic composite (SMC) materials are widely used in the field of motors. At the same time, SMC materials can be pressed by molds to achieve various iron cores with complex structures for power supply machines. Therefore, a double claw pole motor with axially segmented claw pole stator and single-segment claw pole rotor with both stator and rotor core materials of SMC materials is designed.

Firstly, the appropriate main size ratio is selected based on the air gap magnetic density as a reference, and then the main size of the motor is determined. Combined with the structural characteristics of the double claw pole motor, the main source of main magnetic flux and the magnetic density of the air gap, the influence of the claw pole angle on the motor torque, torque ripple, no-load back electromotive force and its waveforms distortion rate are discussed.

Secondly, the structure similar to the double salient pole will bring the problem of excessive torque ripple, and the combination of rotor pole offset and stator tilt is used to reduce torque ripple. Rotor pole eccentricity is a type of magnetic pole shift by changing the size of the local rotor claw pole. By changing the length of the local air gap, the breath is uneven, so as to change the permeability of the local position in the air gap, and improve the distribution of the magnetic field in the motor, so as to weaken the cogging torque of the motor and reduce the torque ripple. Based on the eccentricity of the rotor pole, the torque ripple can be further reduced by using the oblique pole. Due to the particularity of the structure of the double claw pole motor designed in this paper, the stator adopts the axially segmented centralized winding, and the structure is simple, so the stator oblique pole method is adopted. That is, the tip of the stator claw pole is offset in the circumferential direction.

Finally, the losses of the double claw pole motor are calculated. Based on the calculated loss results, the temperature field simulation model of the double claw motor is established, and the temperature distribution of the stator, rotor, permanent magnet and rotating shaft of the double claw motor is analyzed. The simulation results show that the overall temperature distribution of the motor is reasonable, and the motor will not cause operation failure due to excessive temperature, which is beneficial to suppress the demagnetization of permanent magnets due to high temperature.