电流时间谐波对高速永磁同步潜油电动机性能影响研究

于松建，韦　伟

（辽宁工业大学机械工程与自动化学院，辽宁 锦州 121000）

摘要：由于电流谐波是电动机产生损耗的重要因素，研究变频器供电引起的电流时间谐波，对永磁电动机的影响具有重要意义。以一台功率 20 kW、额定转速 6 000 r/min 和长度为 600 mm 的潜油电动机为例，运用 ANSYS 软件分析电流时间谐波对高速永磁同步潜油电动机性能的影响。结果表明：当电动机采用变频器供电时，由电流时间谐波引起的转矩脉动、定转子铁心涡流损耗和永磁体涡流损耗比正弦波供电时大 11%、72% 和 81%。

关键词：永磁电动机；电流时间谐波；转矩脉动；涡流损耗

Study on the effect of current time harmonics for the performance of high speed permanent magnet synchronous submersible motor

YU Songjian, WEI Wei

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: As the current harmonics is an important factor in the loss of the motor, it is very important to study the effect of current harmonics caused by the power supply of the inverter on the permanent magnet motor. In this paper, a 20 kW, rated speed is 6000 r/min, the length of 600 mm submersible motor as an example, the influence of current time harmonic on the performance of high-speed permanent magnet synchronous submersible motor is analyzed by using Ansys software. The results show that when the inverter is used, the torque ripple caused by the current time harmonics, And permanent magnet eddy current losses than the sine wave power supply 11%, 72% and 81%.

Key words: permanent magnet motor; current time harmonics; torque ripple; eddy current losses

0　引言

近几十年来，随着电力电子技术的快速发展，使得由变频器驱动的永磁同步电动机具有一个很宽广的转速运行范围，已经越来越广泛地应用在石油开采等领域。永磁同步电动机具有高效率、高功率密度的特点，在一些特殊领域中得到了大量的推广使用[1-4]。因为电动机在高速下运行，所以采用变频器供电。变频器起到变频作用，在供电的同时，大量谐波也进入定子电枢绕组中，导致电动机的转矩脉动、各部分损耗与温升随之增大，从而影响电动机的寿命[5]。

极数与槽数的选定是电动机设计的首要环节，合理地选取电动机的极数和槽数，能够削弱电动机的输出转矩脉动，使电动机拥有较高的效

辽宁工业大学博士科研启动基金（XB2021003）

率与功率密度[6]。过高的转矩脉动严重影响电动机带负载运行时的平稳性，过高的绕组和永磁体上的损耗与温升使电枢绕组的绝缘结构被破坏和永磁体上发生不可逆失磁，从而影响电动机运行时的安全与可靠性。因此，研究由变频器供电引起的电流时间谐波对高速永磁同步潜油电动机的影响具有重要作用[7]。

为了准确预测由变频器驱动下引起的电流时间谐波对电动机的转矩脉动和各部分损耗的大小与温升分布对电动机性能的影响，国内外已经有许多学者对其进行了深入的研究，并取得了一定的成果。文献[8]研究了变频器供电电流时间谐波对分数槽绕组和整数槽绕组、内置式和表贴式电动机的定转子铁心与永磁体上的损耗影响，得出结论：变频器供电时集中绕组中的损耗比分布绕组大，表贴式电动机的损耗比内置式电动机的损耗大。文献[9-11]研究了变频器供电下的永磁同步电动机的转矩脉动抑制方法，通过分析定子电枢绕组中的各次电流时间谐波对电动机转矩脉动的影响，采用谐波注入、增加电动机相数等方法选取合理的极槽配合，抑制由变频器供电时间电流谐波引起的转矩脉动。文献[12-13]研究了正弦波、矢量控制和直接转矩控制三种供电方式下的定转子铁心和永磁体上的损耗大小和分布，通过比较求解后的结果可得变频器供电时在永磁体上引起的涡流损耗要大于正弦波供电时引起的涡流损耗。

基于以上的研究现状，本文以一台功率20 kW、额定转速6 000 r/min的电动机为例，首先分析了变频器供电电流波形的特点，然后对比分析了正弦波供电和变频器供电在不同极槽配合和不同转子磁极的电动机铁心中磁密波形的区别，以及由此产生的转矩脉动以及各部分损耗和温升的差异。

1 电动机参数与转矩脉动损耗大小计算

1.1 电动机模型参数

为了研究高速永磁同步潜油电动机在额定负载运行时，由变频器供电产生的电流时间谐波对电动机转矩脉动以及定转子铁心和永磁体上的损耗大小与温升分布的影响。表1给出了本文所要研究分析的高速永磁同步潜油电动机主要参数，该电动机采用的是内嵌式永磁体表面加一层护套的转子结构，永磁体采用的是剩磁密度为1.1 T的耐高温钐钴材料，将其沿电动机轴向分成10段。图1给出了该电动机在有限元软件中的模型图。

表 1 高速永磁同步潜油电动机主要参数

Tab. 1 Main parameters of high-speed permanent magnet synchronous submersible motor

参数	数值
额定功率 /kW	20
极数	4
槽数	48
定子外径 /mm	100
定子内径 /mm	60
额定转速（r/min）	6 000
轴向长度 /mm	600
气隙长度 /mm	0.7
永磁体厚度 /mm	5
转子内径 /mm	25

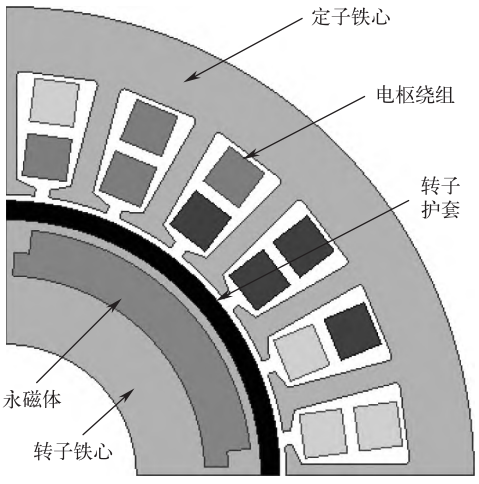

图 1 高速永磁同步潜油电动机二维模型

Fig. 1 Two dimensional model of high-speed permanent magnet synchronous submersible motor

1.2 转矩脉动计算

永磁同步电动机的转矩脉动主要由定子开槽磁导谐波引起的齿槽转矩造成。齿槽转矩是永磁电动机绕组不通电时永磁体和定子铁心之间相互

作用产生的转矩，是由永磁体和电枢齿之间相互作用力的切向分量的波动引起的。

齿槽转矩定义为电动机在不通电的情况下，磁场能量W相对于位置角α的负导数，表达式为

$$T_{\mathrm{cog}}(\alpha)=-\frac{\partial W}{\partial \alpha}=\frac{\pi z L_a}{4\mu_0}(R_2^2-R_1^2)\sum_{n=1}^{\infty}nG_nB_{rnz/(2p)}\sin(nz\alpha) \tag{1}$$

$$B_{rnz/(2p)}=\frac{4p}{nz\pi}B_{\mathrm{r}}^2\sin(n\alpha_p\pi) \tag{2}$$

式中，α为某一指定的定子齿中心线和某一指定的永磁磁极中心线之间的夹角；L_a为定子铁心的轴向长度；R_1、R_2为定子铁心外半径和定子轭内半径；z为定子槽数。

1.3 定转子铁心和永磁体上的损耗计算

$$\begin{cases}P_{\mathrm{Fe}}=P_{\mathrm{c}}+P_{\mathrm{h}}\\P_{\mathrm{h}}=\sum K_{\mathrm{h}}f(B_{\mathrm{r}}^2+B_{\mathrm{t}}^2)G\\P_{\mathrm{c}}=\sum K_{\mathrm{c}}f^2(B_{\mathrm{r}}^2+B_{\mathrm{t}}^2)G\end{cases} \tag{3}$$

式中，P_{h}、P_{c}为磁滞、涡流损耗；K_{h}、K_{c}为磁滞、涡流损耗系数；f为磁通密度频率；B_{r}、B_{t}为磁通密度的径向和切向分量；G为铁心重量。

1.4 永磁体涡流损耗计算

计算永磁体涡流损耗的具体模型为

$$P_{\mathrm{PM}}=\sum_{v}\int\frac{|J_v|^2}{2\sigma}\mathrm{d}V \tag{4}$$

式中，J_v为第v次谐波产生的涡流幅值；σ为永磁体电导率；V为永磁体体积。

2 转矩脉动计算结果及分析

2.1 变频器供电和正弦波供电的电流

为了对比分析正弦波供电和变频器供电时电流时间谐波对电动机转矩脉动的影响，本文采用ANSYS/Maxwell有限元软件设计电动机，并将该电动机主要参数输入到MATLAB/Simulink搭建的矢量控制电路中。

设置开关频率为6 kHz，直流母线电压为380 V，运行矢量控制电路，得到定子电枢绕组中的电流。截取一个电周期电流波形，空载电流波形如图2所示，谐波分布如图3所示。

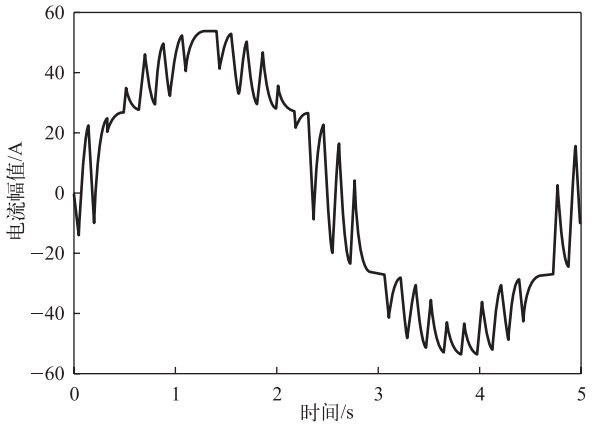

图 2 空载电流波形

Fig. 2 No load current waveform

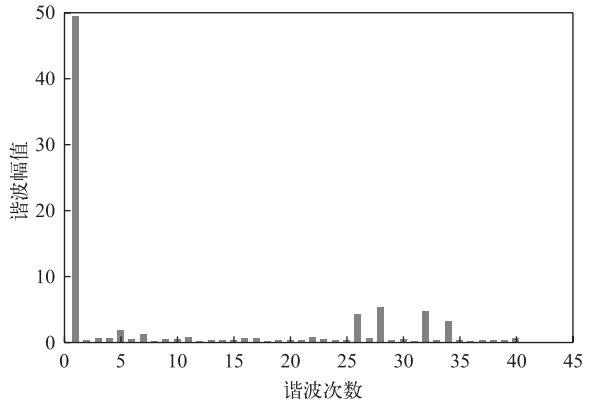

图 3 谐波分布

Fig. 3 Harmonic distribution

从图3中可以看出，在变频器供电下，电动机空载电流主要次谐波的频率都集中在变频器的开关频率附近。将截取的一个电周期的电流波形作为电流励磁源，导入ANSYS/Maxwell有限元软件中作为变频器供电的励磁，并将该电流作为傅里叶分解之后的基波幅值，即正弦波供电的电流幅值。

2.2 变频器供电和正弦波供电的转矩脉动

为了研究分数槽电动机和整数槽电动机在正弦波供电和变频器供电下的转矩脉动的差别，本文设计了4极18槽和4极24槽的两台电动机，电动机的转子和定子内外径相同，保证两台电动机的空载线反电动势相等，都为341 V。4极18槽电动机模型如图4所示，4极24槽电动机模型如图5所示。

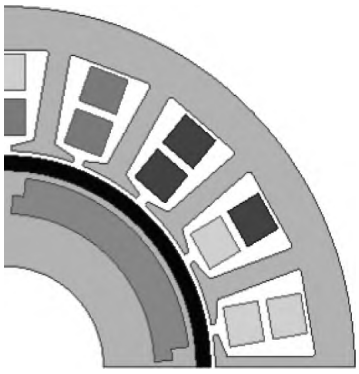

图 4　4 极 18 槽电动机模型

Fig. 4 4-pole 18 slot motor model

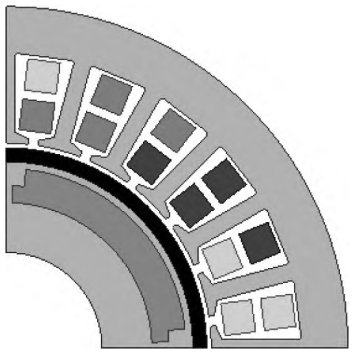

图 5　4 极 24 槽电动机模型

Fig. 5 4-pole 24 slot motor model

根据上述有限元仿真模型，分别绘制了4极18槽和4极24槽两种不同极槽配合的电动机在额定负载正弦波运行时的电磁转矩曲线图，如图6所示。两种极槽配合的电动机在额定负载变频器运行时的电磁转矩曲线如图7所示。

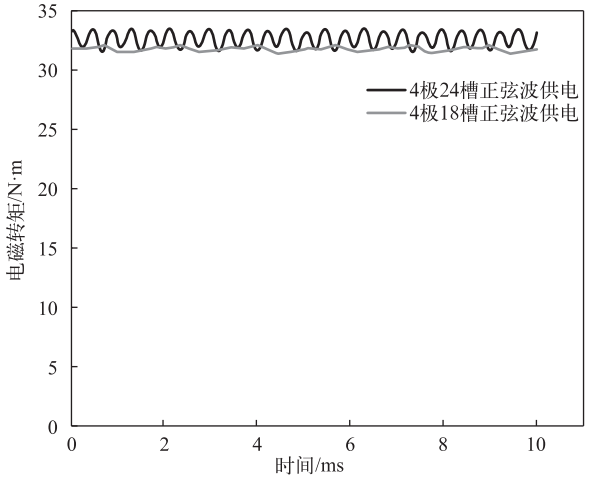

图 6　正弦波供电下的电磁转矩

Fig. 6 Electromagnetic torque under sine wave power supply

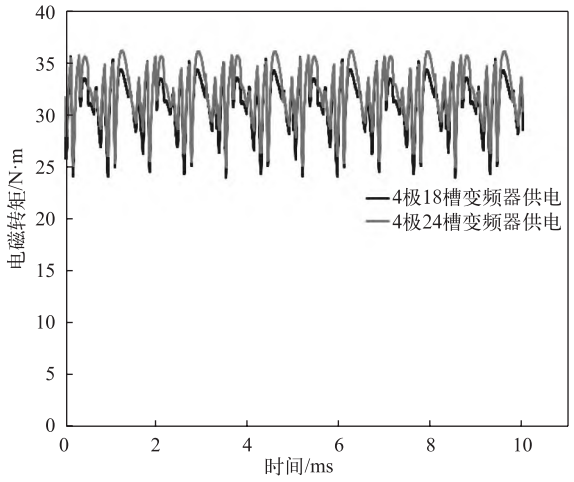

图 7　变频器供电下的电磁转矩

Fig. 7 Electromagnetic torque under inverter power supply

从图6和图7中的结果可知，在正弦波供电时，分数槽绕组电动机的转矩脉动为3%，比整数槽绕组的电动机的转矩脉动小6%，但是分数槽绕组的平均电磁转矩为31.7 N·m，比整数槽绕组的平均电磁转矩小1.2 N·m，这是由于分数槽绕组电动机能削弱定子电枢绕组产生的磁动势谐波，减小电动机的转矩脉动，同时也削弱了电动机的电磁转矩。在变频器供电时，分数槽绕组和整数槽绕组电动机的转矩脉动分别为15%和17%，比在正弦波供电时增加了12%和8%。由此可知，变频器供电时，由电流时间谐波的作用产生的转矩脉动占总的转矩脉动的75%。

3　损耗计算结果及分析

3.1　定转子铁心损耗计算

由于变频器选择不同开关频率和调制比时，时间电流谐波的幅值和频率不一样，在电动机各部分产生的损耗大小和分布有着很明显的差异。本文采用ANSYS/Maxwell软件分别求取了分数槽电动机和整数槽电动机在正弦波供电和变频器供电下电动机定转子铁心上的铁耗，而永磁体和钛合金护套上的涡流损耗只能通过三维有限元软件求取。

为了对比正弦波和变频器供电时铁心上的损耗差异，采用图2所示的矢量控制电路，得到开关频率为6 kHz和16 kHz（直流母线电压380 V）、

直流母线电压为430 V和480 V（开关频率6 kHz）四种不同变频器参数情况下的电动机定子电枢电流，根据仿真得到不同情况下的电流波形，计算4极18槽和4极24槽电动机在定转子铁心中的磁滞损耗和涡流损耗大小，如图8所示。

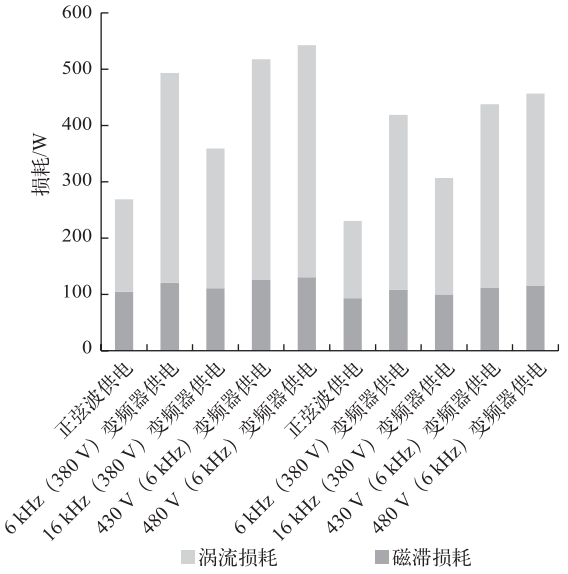

图 8　不同极槽配合电动机定转子铁心中损耗大小

Fig. 8 Core loss of motor stator and rotor with different pole slots

从图8看出，采用开关频率6 kHz和直流母线电压380 V，4极18槽和4极24槽电动机变频器供电时，定转子铁心上的损耗接近正弦波供电时的两倍，且变频器供电增加的损耗主要是铁心上的涡流损耗，而磁滞损耗基本不变。4极18槽电动机相比于4极24槽电动机在正弦波和变频器供电时，定转子铁心上的损耗分别多出38 W和74 W。这是由于4极18槽属于分数槽电动机，相比于4极24槽整数槽电动机，定子电枢绕组磁动势中含有大量谐波，谐波过多导致铁心中的损耗会更大。

当直流母线电压不变，变频器开关频率从6 kHz增加到16 kHz时，定转子铁心中的损耗减小了35%；当变频器开关频率不变，直流母线电压从430 V增加到480 V时，定转子铁心中的损耗增加了7%。

根据上述求取的定转子铁心中的损耗结果，选取4极24槽电动机在正弦波供电和开关频率6 kHz、直流母线电压380 V变频器供电时定子铁心中的损耗分布云图，分别如图9、图10所示。

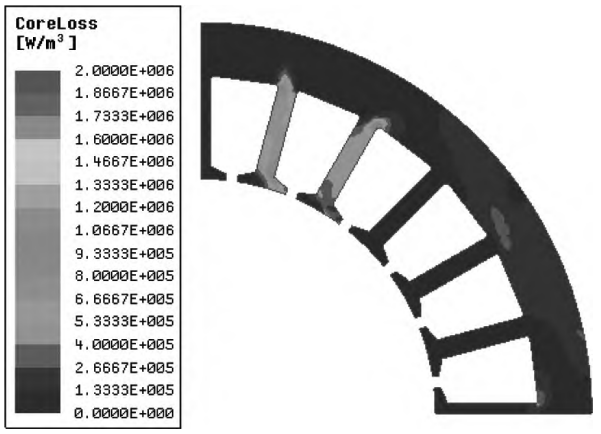

图 9　正弦波供电定子铁心损耗分布

Fig. 9 Distribution of stator core loss for sine wave power supply

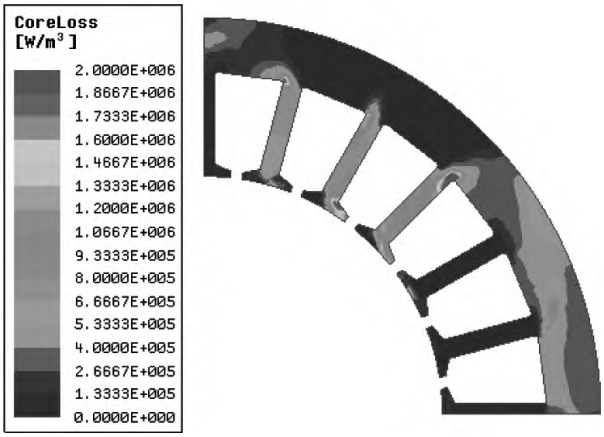

图 10　变频器供电定子铁心损耗分布

Fig. 10 Distribution of stator core loss for converter power supply

从图9和图10看出，采用变频器供电的定子铁心上的损耗分布密度明显大于正弦波供电的定子铁心损耗分布密度，且定子铁心齿部损耗密度明显大于轭部损耗密度，齿部损耗主要分布在齿顶和齿根处。

3.2　永磁体和护套上的涡流损耗计算

高速永磁同步潜油电动机为了保证转子永磁体在离心力作用下的机械强度要求，一般会在转子外表面加一层护套，目前采用比较多的就是钛合金护套和碳纤维护套。钛合金护套的机械强度远大于碳纤维护套，但是钛合金护套的电导率是

1 100 000 S/m，而碳纤维护套的电导率是3 300 S/m，远小于钛合金护套，过大的电导率会产生过高的涡流损耗，因此本段采用三维有限元软件，研究和计算了该电动机采用碳纤维护套和钛合金护套时，两种不同极槽配合的电动机永磁体和护套上的涡流损耗大小，如图11所示。

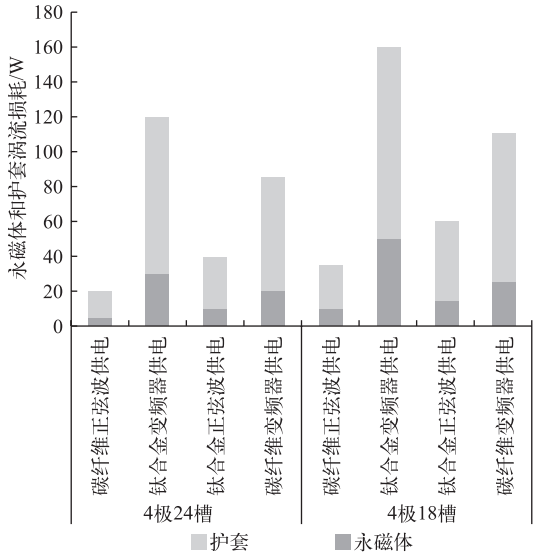

图 11　永磁体和护套上涡流损耗大小

Fig. 11 Eddy current loss on permanent magnet and sheath

从图11中结果可知，采用碳纤维护套时，永磁体上的涡流损耗相比钛合金材料护套时减小10%，护套上的涡流损耗相比钛合金材料护套时减小60%；采用变频器供电时，永磁体和护套上总的涡流损耗相比正弦波供电时增加了2.5倍，4极18槽电动机相比于4极24槽电动机，永磁体和护套上的总涡流损耗增加了33%。

4　结束语

本文以一台功率20 kW、额定转速6 000 r/min高速永磁同步潜油电动机为例，运用有限元法分析了电动机满载运行时，4极18槽和4极24槽电动机在极槽配合、正弦波和变频器供电、不同变频器参数和不同材料转子护套时，电动机转矩脉动、定转子铁心损耗、永磁体与护套上涡流损耗大小与分布情况。从中得出如下结论：

1）正弦波供电时，分数槽绕组电动机的转矩脉动比整数槽绕组的电动机小6%，变频器供电时电动机的转矩脉动比在正弦波供电时增加了10%。

2）采用变频器供电时，定转子铁心涡流损耗和永磁体涡流损耗比正弦波供电时增加72%和81%。当直流母线电压不变，变频器开关频率从6 kHz增加到16 kHz时，定转子铁心中的损耗减小35%；当变频器开关频率不变，直流母线电压从430 V增加到480 V时，定转子铁心中的损耗增加7%。

3）采用碳纤维护套时，永磁体与护套上的总损耗相比于钛合金材料护套时减小38%。

下一步将围绕实际工程案例，实地考察测量电动机损耗，并与仿真结果进行分析比较，从而优化电动机性能，更好地为社会服务。

参考文献

[1] 陈卓易，屈稳太．基于 PID 型代价函数的永磁同步电动机模型预测电流控制[J]．电工技术学报，2021，36(14)：2971-2978．

[2] MA Xiaojun，BI Chao．A technology for online parameter identification of permanent magnet synchronous motor[J]．CES Transactions on Electrical Machines and Systems，2020，4(3)：237-242．

[3] 姚绪梁，黄乘齐，王景芳，等．两相静止坐标系下的永磁同步电动机模型预测功率控制[J]．电工技术学报，2021，36(1)：60-67．

[4] 谭继鑫，井永腾，郭昊，等．基于 Boost 变换的永磁同步电动机变频电源电压谐波优化控制[J]．电工技术学报，2020，35(21)：4475-4482．

[5] 陈萍，唐任远，韩雪岩，等．抑制永磁体局部温升最高点的不均匀轴向分段技术[J]．电动机与控制学报，2016，20(7)：1-7．

[6] 郑军强，赵文祥，吉敬华，等．分数槽集中绕组永磁电动机低谐波设计方法综述[J]．中国电动机工程学报，2020，40(S1)：272-280．

[7] 王立国，郝宏海，吕辛，等．基于转子槽谐波分析的潜油电动机温度辨识[J]．电工技术学报，2011，26(6)：1-6．

[8] YAMAZAKI K，KANOU Y，YU F，et al．Reduction of magnet eddy-current loss in interior permanent-magnet motors with concentrated windings[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2010，46(6)：2434-2441．

[9] 孟光伟，李槐树，熊浩．PWM调制下无刷直流电动机的转矩脉动抑制[J]．电气传动，2011，41(1)：26-30．

[10] 廖勇，甄帅，刘刃，等．用谐波注入抑制永磁同步电动机转矩脉动[J]．中国电动机工程学报，2011，31(21)：119-127．

[11] 方程，许海平，薛劭申，等．直驱型多相永磁同步电动机转矩脉动及损耗特性[J]．电工技术学报，2014，29(5)：149-159．

[12] 佟文明，朱晓锋，贾建国，等．时间谐波对永磁同步电动机损耗的影响规律[J]．电工技术学报，2015，30(6)：60-69．

[13] 佟文明，朱晓锋，朱龙飞，等．不同供电方式对非晶合金永磁同步电动机铁耗的影响[J]．电工技术学报，2015，30(10)：115-122．

作者简介

于松建（1991—），男，硕士，助理实验师，研究方向为电动机及其控制技术。

韦伟（1989—），女，博士，讲师，硕士生导师，研究方向为电磁永磁驱动技术。

（收稿日期：2022-09-25）