

空压机用高速永磁电机铁心和磁钢损耗的影响因素

陈广勋

(江苏毅合捷汽车科技股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 高速电机具有电流频率高、定子铁耗和转子涡流损耗大等特点。针对额定功率 10 kW、额定转速 100 000 r/min 空压机用高速永磁电机, 对比分析了平行充磁和径向充磁、脉冲振幅调制(PAM)方波驱动和基于 SiC 的正弦波驱动时对损耗的影响。分析结果表明, 平行充磁气隙磁密谐波小, 空载定子铁心损耗比径向充磁低约 40%; 驱动方式对电机损耗尤其是转子损耗影响较大, 正弦波驱动时转子损耗几乎可忽略, 方波驱动时转子损耗占比可达总损耗的 20%。针对方波驱动转子损耗大的问题, 在转子表面增加一层铜屏蔽层, 分析结果表明可以有效降低转子涡流损耗。对同一台带压缩机负载的高速电机对比测试了 2 种驱动器控制下的母线输入的有功功率, 验证了驱动方式对电机损耗的影响。

关键词: 高速永磁电机; 充磁方式; 驱动方式; 谐波; 损耗; 涡流; 铜屏蔽层

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0061-07

doi: 10.12177/emca.2020.118

Influential Factors of Core Loss and Magnet Loss of High-Speed Permanent Magnet Motor Used in Air Compressor

CHEN Guangxun

(Jiangsu Easyland Automobile Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: High-speed motors have the features of high current frequency, large stator core loss and large rotor eddy loss. The influential factors of core loss and rotor eddy loss are analyzed for the 10 kW, 100 000 r/min high-speed permanent magnet (PM) motor used in air compressor by comparing the effects of different magnetization methods (parallel and radial) and drive modes [driving by pulse amplitude modulation (PAM) square wave and SiC based pulse width modulation (PWM) sine wave]. Finite element analysis results indicate that the air gap flux harmonics of parallel magnetization are smaller, resulting in 40% smaller stator core loss compared with radial magnetization. Drive mode has a significant effect on motor losses especially on rotor loss. The rotor loss driving by sine wave is almost negligible, while it reaches 20% of the total losses when PM motor is driven by square wave because of the current harmonics. For the high rotor loss caused by square wave drive, further analysis is done by adding a copper shield on the rotor surface which can effectively reduce the eddy current loss. A high-speed motor with compressor load is tested under the control by two kinds of drivers to test the input active power on the DC bus. The results verify the influence of drive mode on motor losses.

Key words: high-speed permanent magnet (PM) motor; magnetization method; drive mode; harmonics; loss; eddy current; copper shield

收稿日期: 2020-06-09; 收到修改稿日期: 2020-08-03

作者简介: 陈广勋(1984—), 男, 硕士, 研究主向为高速永磁电机研发。

0 引言

高速电机通常是指转速超过 10 000 r/min 或难度值(转速和功率平方根的乘积) $r/min \times \sqrt{kW} \geq 1 \times 10^5$ 的电机^[1]。高速永磁电机具有体积小、功率密度大和效率高等优点,采用与负载直连的方式,减少机械传动装置,可以减少振动噪声,提高系统的传动效率并缩小体积,与普通中低速电机相比具有较大的优势,在空气压缩机、高速电主轴、分布式发电、飞轮储能、微型燃气轮机、燃料电池以及汽车电动增压器等领域发展潜力较大^[2-4]。目前,在政策法规和市场的双重推动下,氢燃料电池汽车成为了研究的热点之一。空压机作为氢燃料电池系统中供气系统的关键部件,需要满足无油、小型、高压、低噪声和低功耗的要求^[5],其中高速电机作为空压机的核心驱动部件正是实现这些要求的前提,也是空压机设计的主要难点之一。

高速电机具有以下特点:(1)运行转速高,转子表面的线速度高达 200 m/s 以上,常规的叠片铁心转子很难承受高转速下的离心力^[6];(2)电流频率高,额定运行时频率会达到 1 000 Hz 以上,频率的升高使得高速电机中的各种损耗所占的比例与普通电机有很大的不同;(3)高速电机功率密度大,同时损耗密度也大,散热条件更为苛刻,尤其对转子而言电流时间谐波、定子磁动势的空间谐波和定子开槽导致的齿谐波在转子中产生大量的涡流损耗^[7],使转子的温升和散热问题更突出。以上这些特点均给高速电机的设计带来了全新的挑战。而空压机的功耗占整个燃料电池系统功率的约 20%^[5],降低电机的损耗,提高效率,具有很大的现实意义。

本文针对 60 kW 氢燃料电池系统的应用场合,以 1 台额定功率 10 kW,额定转速 100 000 r/min 的空压机用永磁电机为例,分析了电机定转子损耗的分布及影响因素,实现优化设计以降低损耗。

1 高速电机拓扑结构

1.1 高速永磁电机转子

高速永磁电机转子设计要满足强度及动力学

要求,还要满足良好的电磁性能。常用的永磁体材料烧结钕铁硼或钕钴属脆性材料,抗拉强度较低,需要加保护套克服高转速下的离心力,保护套通常采用高抗拉强度的碳纤维或者不导磁的合金材料。同时,为了满足转子的强度、刚度、提高临界转速,高速电机的转子通常设计成实心转子而非叠片转子。因为高速电机铁心内电磁频率高,铁耗比普通电机更高,所以转子的极数通常选择 2 极或 4 极,以 2 极为主,以降低电流频率。常见的高速永磁电机的转子结构如图 1 所示。图 1(a)是表贴式转子,永磁体表贴在轴上,外层包裹碳纤维或者不导磁的高强度合金保护套;图 1(b)是圆柱永磁体结构,外层采用不导磁的合金保护套与两段轴焊接成整体。图 2 所示为本文讨论的用于氢燃料电池空压机的 10 kW 100 000 r/min 高速电机转子实物图。采用 2 极表贴式结构,转子表面包裹碳纤维保护套。

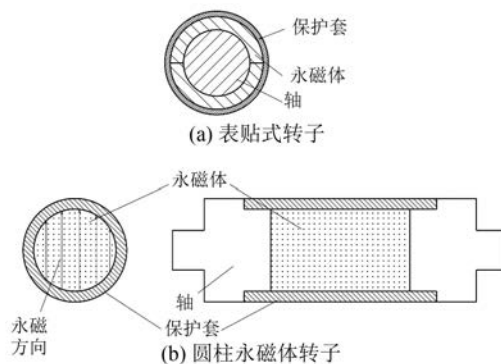


图 1 高速永磁电机转子结构

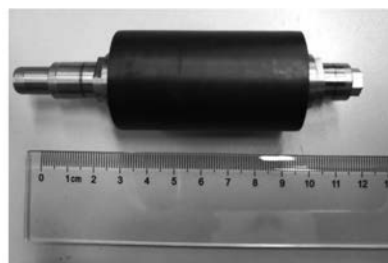


图 2 10 kW 高速电机表贴式转子实物

1.2 高速永磁电机定子

高速电机定子绕组电流和铁心中磁通的频率高,一般均超过 1 000 Hz 以上,而铁心损耗与频率的 1.3~1.5 次方成正比。与普通电机相比,为

了减少高速电机的定子铁耗,铁心材料通常选用 0.35、0.2 mm 甚至 0.1 mm 厚的高频低损耗硅钢片,也有学者研究了采用非晶合金^[8]、纳米晶^[9]和金属软磁复合材料(SMC)^[10]作为高速电机定子铁心的材料以减少铁耗。定子铁心结构可以采用无槽式、少槽式和多槽式定子铁心结构,如图 3 所示。无槽结构不存在槽开口导致的齿谐波,对减少转子涡流损耗有利,且无齿槽转矩,但气隙大,气隙磁场较弱,永磁体利用率低,绕组不易固定^[11];有槽结构的特点正好相反,制造工艺相对成熟。基于电磁性能和制造工艺的综合考虑,本文样机采用 12 槽的定子结构。

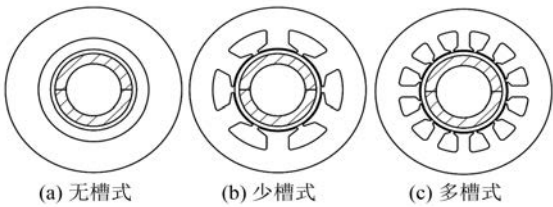


图 3 3 种典型的高速电机定子结构

2 转子充磁方式对损耗的影响

表贴式永磁转子结构可以采用平行充磁和径向充磁 2 种方式,如图 4 所示。充磁方式的不同所产生的气隙磁密和反电动势(EMF)的波形及幅值均不同,本节对 2 种充磁方式进行对比分析。

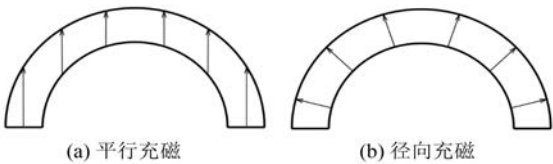


图 4 平行充磁和径向充磁

电机的设计参数如表 1 所示。

表 1 电机设计参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	10
额定转速/(r·min ⁻¹)	100 000
额定扭矩/(N·m)	0.955
母线电压/V	DC 310
槽/极	12/2
定子外径/mm	74
定子内径/mm	34
气隙/mm	2.25
铁心长/mm	50
磁钢厚度/mm	4.75

对 12 槽 2 极表贴式结构电机进行有限元分析,在其他尺寸和参数不变的前提下,仅改变永磁体的充磁方式,空载磁场分布如图 5 所示。平行充磁时最大磁密分布在定子轭部为 1.29 T;径向充磁时最大磁密分布在转子轭部,达到了 1.73 T,定子轭部的最大磁密为 1.4 T。图 6(a)为气隙磁密,进一步分析气隙磁密波形,平行充磁的气隙磁密波形成正弦分布,径向充磁则接近梯形波。图 6(b)为谐波,对气隙磁密波形进行傅里叶变换,分解出基波和谐波分布,平行充磁基波幅值为 0.73 T,径向充磁基波幅值为 0.77 T,高了约 5.5%,但径向充磁的 3、5、7、9 次谐波分量显著大于平行充磁相对次数的谐波分量。2 种充磁方式下均存在明显的 11、13、23、25 次谐波,为定子开槽所导致的一阶和二阶齿谐波,但径向充磁方式下幅值更大。在永磁体体积相同的情况下,径向充磁产生的磁通稍多,但谐波也更大。

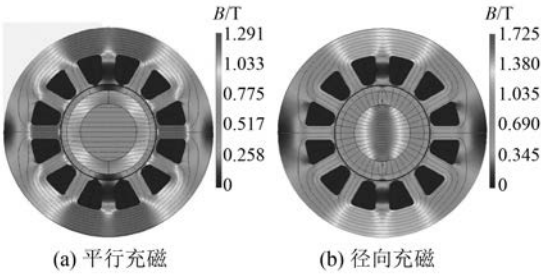


图 5 不同充磁方式下的空载磁场分布

对比平行充磁和径向充磁下的反 EMF 波形,如图 7 所示。2 种充磁方式下的线反 EMF 均较正弦,平行充磁幅值为 254.6 V,径向充磁幅值

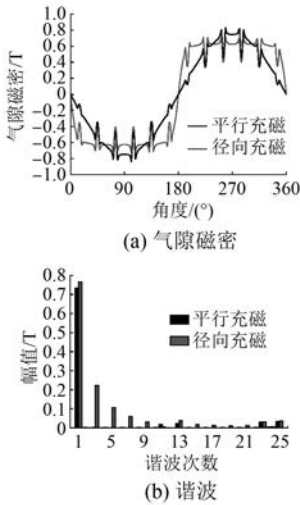


图 6 空载气隙磁密波形及谐波对比

264.8 V, 差别较小, 约 4%。而相反 EMF 波形的差别较大, 平行充磁的相反 EMF 较正弦, 径向充磁则呈现为平顶波。对线反电动势做傅里叶变换, 分解出各次谐波分布, 如图 7(b) 所示。平行充磁的 3、5 次谐波较大, 各次谐波的幅值随着阶次的升高递减。径向充磁则没有呈现出这样的规律, 各次谐波均大于平行充磁下的谐波, 尤其 5、11 和 13 次谐波远远大于平行充磁下对应阶次的谐波, 分别增加了 255%、580%、190%。

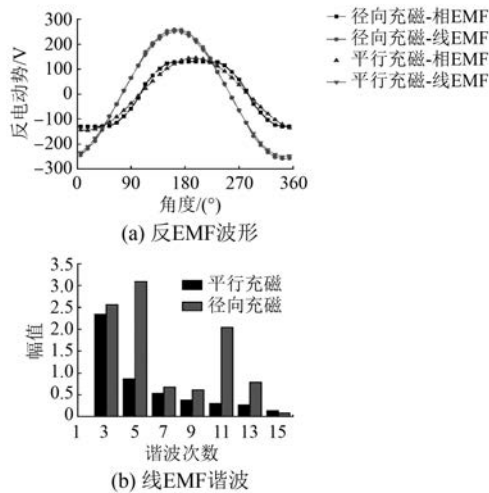


图 7 平行充磁和径向充磁的反 EMF 波形及谐波对比

有限元仿真的样机空载运行损耗分布如图 8 和图 9 所示。分别为平行充磁和径向充磁下的损耗分布, 具体数值如表 2 所示。空载时定子电流为零, 不存在定子磁动势空间谐波和电流时间谐波, 此时的转子涡流损耗全部由定子开槽导致的齿谐波产生, 从数值上看平行充磁时转子损耗几乎为零, 径向充磁时稍大, 也仅有 0.04 W, 可以忽略不计。2 种充磁方式下的定子铁心损耗分别为 191.3 W 和 274.1 W, 比平行充磁时降低了近 43%。根据 Bertotti 铁耗分立计算模型可知, 铁耗大小跟磁密幅值和频率有关; 同时根据谐波分析原理, 任意位置的磁密波形均是一系列的谐波分量的叠加, 铁耗等于其基波和各次谐波分量之和。有限元仿真的结果表明径向充磁的基波仅比平行充磁时大了 5.5%, 但铁耗却增加了 44%, 可见径向充磁的永磁转子磁场谐波导致空载定子铁耗大幅增加。

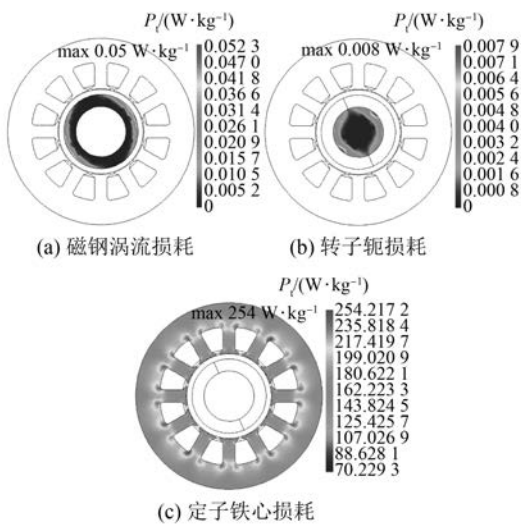


图 8 平行充磁空载损耗分布

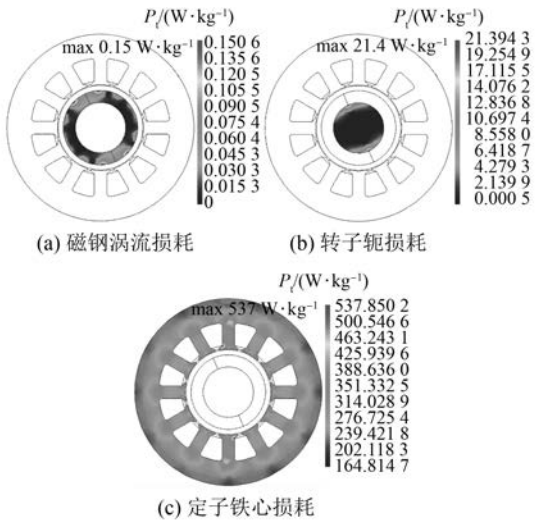


图 9 径向充磁空载损耗分布

表 2 平行充磁和径向充磁空载损耗			W
损耗	平行充磁	径向充磁	
磁钢涡流损耗	0.000 7	0.003 5	
转子铁损耗	0.000 2	0.197 0	
定子铁心损耗	191.3	274.7	
空载总损耗	191.3	274.9	

3 驱动方式对损耗的影响

由于高速电机的电流频率较高, 本文讨论的 2 极 100 000 r/min 高速电机基频达到 1 667 Hz, 普通的变频器很难调制出这样高频的正弦波电

流。目前高速电机驱动器主流的技术路线有 2 种:(1)采用脉冲振幅调制(PAM)方式的方波驱动;(2)采用基于 SiC 器件的脉冲宽度调制(PWM)调制正弦波驱动。PAM 方波驱动原理简单,软硬件实现起来相对容易,但因方波电流谐波含量大,存在电机损耗大和低速时转矩脉动大的固有缺陷。SiC 器件具有开关频率高、开关损耗小等特点,能调制出低谐波含量的正弦波电流,但成本高,软硬件实现起来较复杂。

使用有限元仿真对比分析了 PWM 调制正弦波和方波驱动在额定负载时的定转子铁心和磁钢损耗分布,根据第 2 节的分析,从降低永磁转子磁场谐波的角度,全部采用平行充磁。图 10 为额定负载时有限元分析使用的电流波形和谐波分布。其中,仿真输入的 PWM 调制正弦电流波形是 SiC 器件开关频率为 100 kHz,电流 THD 2.5% 时的波形,损耗分布如图 11 和图 12 所示。表 3 为 PWM 调制正弦波和方波驱动下的额定负载损耗对比。PWM 调制正弦波驱动电流谐波较小,跟空载时相比转子损耗仅增加 0.15 W,而方波驱动时转子损耗大幅增加到 85.5 W。对比空载、PWM 调制正弦波和方波驱动 3 种状态时的转子损耗,可以得出结论:转子的涡流损耗主要由电流时间谐波产生,定子开槽产生的齿谐波、绕组磁势空间谐波和永磁转子的磁场谐波产生的损耗占比较小;方波驱动时转子损耗较大,甚至超过总损耗的 20%,仿真结果表明调制出低谐波含量的正弦电流可以大幅降低转子的涡流损耗;对比总损耗,方波驱动比 PWM 调制正弦波驱动总损耗增加了 43%。

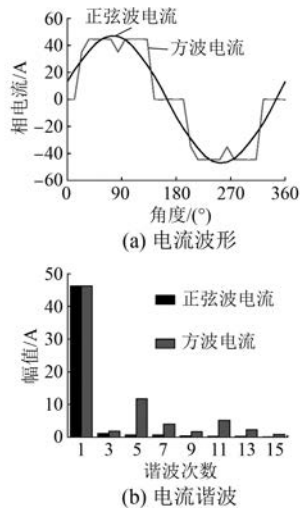


图 10 方波驱动和正弦波驱动电流波形及谐波

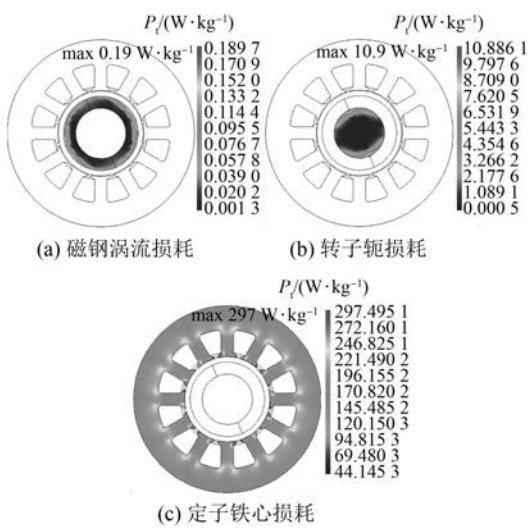


图 11 正弦波驱动下额定负载损耗分布

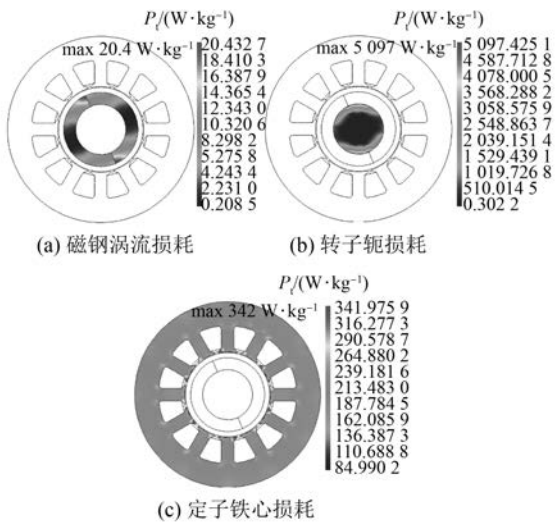


图 12 方波驱动下额定负载损耗分布

表 3 正弦波和方波驱动下的额定负载损耗对比 W

损耗	正弦波驱动	方波驱动
直流铜耗	47.5	53.5
磁钢涡流损耗	0.004	0.018
转子铁心损耗	0.151	84.57
定子铁心损耗	196.9	211.6
总损耗	244.5	350.5

4 铜屏蔽层对转子涡流损耗的影响

方波驱动时,电流谐波会在转子中产生大量的涡流损耗,根据电磁场理论,交变电磁场穿过导电媒质时会产生涡流,而涡流产生的磁场反过来

又会削弱原来的磁场。电磁场在导电媒质中的衰减用透入深度 δ 来表示：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

(1)

式中： ω 为电磁波的角频率； μ 为导电媒质的磁导率； σ 为电导率。

利用这一原理，在转子表面加一层高电导率的铜屏蔽层来削弱谐波的透入，从而减少转子涡流损耗。转子上的涡流损耗主要由电流谐波产生，由第 3 节的分析可知以 5、7 次谐波为主，5、7 次谐波合成的电磁场相对转子以 6 倍转速旋转，根据式(1) 计算得到 6 次谐波在电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$ 的铜中的透入深度为 0.66 mm。有限元分析在转子表面增加一层 0.66 mm 厚的铜屏蔽层的转子损耗分布如图 13 所示。表 4 对比了有无铜屏蔽层前后的转子损耗，可见转子表面增加铜屏蔽层后损耗分布由原来主要在转子轭上转移到铜屏蔽层中，磁钢和转子轭中的损耗变得十分微小，而转子的总损耗也由 85.5 W 下降至 49.6 W，降幅 42%，说明铜屏蔽层对电流谐波磁场的抑制效果明显。

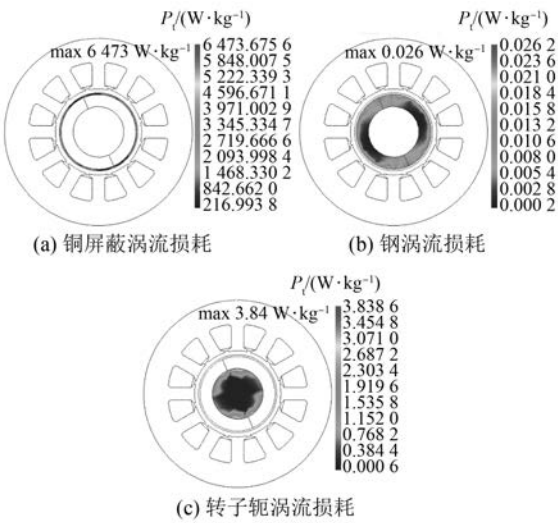


图 13 加铜屏蔽层后的转子涡流损耗分布

表 4 加铜屏蔽层前后转子涡流损耗对比					W
加铜屏蔽层前后	磁钢涡流损耗	转子轭涡流损耗	铜屏蔽层涡流损耗	转子总损耗	
无铜屏蔽层	0.917 7	84.570 0	—	85.5	
有铜屏蔽层	0.000 8	0.057 1	49.58	49.6	

对比分析了不同厚度的铜屏蔽层对转子涡流损耗的影响，如图 14 所示。由图 14 可以看出，随着铜屏蔽层厚度的增加，磁钢和转子轭上的涡流损耗呈降低的趋势，铜屏蔽层上的涡流损耗呈现先减小后增大的趋势，转子总损耗在 6 次谐波透入深度附近存在一个最小值，随后随着厚度的增加，涡流损耗的增加速度有加快的趋势；因铜屏蔽层对谐波的抑制作用，磁钢和转子轭上的涡流损耗较小，主要的损耗转移到铜屏蔽层中，转子总损耗变化趋势与铜屏蔽层的基本保持一致。

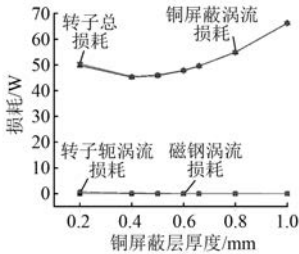


图 14 铜屏蔽层厚度对转子损耗的影响

5 样机试验

为了验证第 3 节所分析的驱动方式对高速电机损耗的影响，对额定功率 10 kW、转速 100 000 r/min 的样机分别适配 PAM 方波驱动器和 SiC 器件的 PWM 调制正弦波驱动器进行对比测试。电机所带的负载为与电机直连的压缩机负载，驱动器母线电压 DC310 V，测试用的驱动器和高速电机如图 15 所示。图 15(a)为 PAM 方波驱动器；图 15(b)为基于 SiC 器件的 PWM 调制正弦波驱动器，工作时开关频率 100 kHz，电流 THD 2.5%，图 15(c)为额定功率 10 kW，额定转速 100 000 r/min，带压缩机负载的高速电机。

由于目前高速电机测功机和高速扭矩传感器的发展滞后于高速电机，限于测试条件，试验仅对比测试了母线端的输入有功功率，测试结果如表 5 所示。在不同的转速下方波驱动下的系统功耗均高于 PWM 调制正弦波驱动，随着转速升高，压缩机负载功率快速上升，两者的差值迅速扩大，虽然无法分离出驱动器损耗和电机损耗，但显然相同驱动负载时方波驱动的系统损耗更大，因此间接验证了第 3 节中有限元分析的结果，即方波驱动时高速电机的损耗较大。

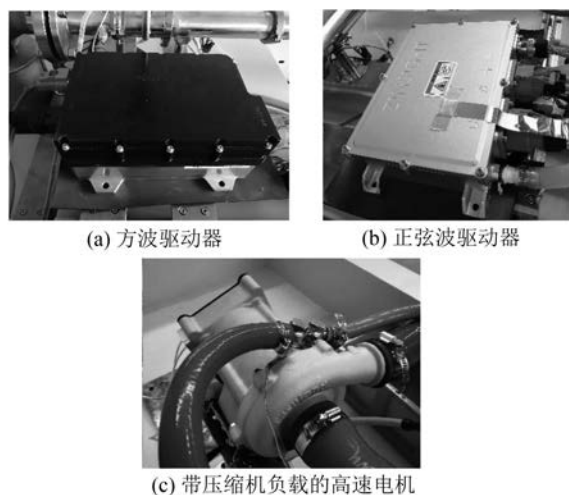


图 15 测试用的驱动器和高速电机

表 5 不同转速下的母线输入有功功率的试验数据比较

转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	50 000	70 000	80 000	90 000	100 000
方波驱动/W	1 820	4 795	7 035	9 800	12 775
正弦波驱动/W	1 774	4 410	6 370	8 873	11 676
差值/W	46	385	665	927	1 099

6 结 语

本文通过有限元分析计算了 10 kW, 100 000 r/min 高速电机的损耗,尤其是定子铁耗和转子损耗,对比分析了转子平行充磁和径向充磁、方波驱动和 PWM 调制正弦波驱动、转子加铜屏蔽层对损耗的影响,并以 1 台样机分别适配方波和 PWM 调制正弦波驱动器测试了不同转速下母线输入的有功功率,有限元分析和测试结果表明:

(1) 平行充磁的空载气隙磁密较正弦,主要的谐波是跟定子槽数相关的一次、二次齿谐波,径向充磁时除了齿谐波还含有大量的永磁转子磁场产生的低次谐波,大量的低次谐波导致空载铁心大幅增加,因此采用平行充磁可以改善空载气隙磁密波形,降低永磁转子磁场谐波,从而降低高速电机的定子铁耗。

(2) 驱动方式对高速电机的损耗影响较大,尤其是转子损耗。在谐波较小的正弦波驱动方式下,高速电机的转子涡流损耗几乎可以忽略,方波驱动时定转子损耗均有增加,但主要的增加来源于转子损耗,转子损耗占比甚至可达总损耗的 20%。

(3) 对比空载、正弦波和方波驱动 3 种状态

时的转子损耗,可知转子的涡流损耗主要由电流的时间谐波产生,定子开槽产生的齿谐波、绕组磁势空间谐波和永磁转子的磁场谐波对转子的涡流损耗影响较小,因此削弱电流谐波,采用低谐波含量的正弦波驱动可以大幅降低高速电机的转子涡流损耗。

(4) 针对方波驱动时转子损耗较大的问题,在转子表面加一层铜屏蔽,通过铜屏蔽层对电流谐波磁场的削弱作用可以有效削弱转子的涡流损耗,当铜屏蔽层的厚度在 6 次谐波的透入深度附近时转子的总损耗存在一个最小值。

【参考文献】

- [1] BOGLIETTI A, GERADA C, CAVAGNINO A. High-speed electrical machines and drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2943.
- [2] 江善林. 高速永磁同步电机的损耗分析与温度场计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [3] 于吉坤. 高速永磁同步电机电磁分析与转子动力学研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [4] 孙晓光. 高速永磁电机定子损耗和温升研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [5] 鲍鹏龙, 章道彪, 许思传, 等. 燃料电池车用空气压缩机发展现状及趋势[J]. 电源技术, 2016, 40(8): 1731.
- [6] 王凤翔. 高速电机的设计特点及相关技术研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(3): 258.
- [7] ZHOU F Z, SHEN J X, FEI W Z. Influence on rotor eddy-current loss in high-speed PM BLDC motors[C] // Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, 2006.
- [8] 李山红, 卢志超, 李德仁, 等. 高速电机用非晶合金定子铁心的损耗特性研究[J]. 微特电机, 2009, 37(6): 24.
- [9] 李立军, 卢志超, 李准, 等. 高速开关磁阻电机用纳米晶定子铁心磁特性研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 88.
- [10] 李旺昌, 王兆佳, 李晶鑫, 等. 用于高频电机磁芯的金属软磁复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(4): 1139.
- [11] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1.