

# 高速永磁电机综合设计与分析\*

张超<sup>1</sup>, 朱建国<sup>2</sup>, 韩雪岩<sup>1</sup>, 佟文明<sup>1</sup>, 马鑫<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870;

2. 悉尼理工大学, 澳大利亚 悉尼 2007)

**摘要:** 高速非晶合金永磁电机设计受电磁、机械、温升的制约, 因此高速非晶合金永磁电机的设计是一个多物理场综合设计的过程。针对高速非晶合金永磁电机设计受多物理场制约的问题, 基于多物理场的分析方法, 分析了非晶合金材料对高速永磁电机电磁性能的影响; 研究了内置式永磁转子在高速运行状态下的应力分布, 并分析了轴承支撑刚度对转子系统临界转速的影响; 针对高速非晶合金永磁电机损耗分布特点研究了其温度场的分布。基于提出的多物理场综合设计方法, 设计并制造了一台额定功率 15 kW、最高转速 30 000 r/min 的高速内置式非晶合金永磁电机, 并对样机进行了试验, 验证了仿真分析与设计方法的可行性, 为高速非晶合金永磁电机的设计提供参考。

**关键词:** 非晶合金; 高速永磁电机; 多物理场; 综合设计

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)09-0009-07

## Integrated Design and Analysis of High-Speed Permanent Magnet Motor\*

ZHANG Chao<sup>1</sup>, ZHU Jianguo<sup>2</sup>, HAN Xueyan<sup>1</sup>, TONG Wenming<sup>1</sup>, MA Xin<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for REPM Machine Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. University of Technology, Sydney 2007, Australia)

**Abstract:** Due to the constraints of electromagnetic, mechanical and thermal, the design of high-speed permanent magnet motor with amorphous alloy core is an integrated process. Based on the method of multi-physics analysis, the influence of amorphous alloy to the motor was analyzed, the stress distribution of interior permanent magnet rotor was studied. Also, the influence of bearing stiffness for critical speed of rotor system was analyzed. In consider of the distribution of loss, thermal analysis was shown. Based on the method of integrated design, a high-speed permanent magnet motor with amorphous alloy core rated as 15 kW, 30 000 r/min was designed and fabricated. Through the test of the motor, the multi-physics field analysis and integrated design was proved feasible and the theory for the design of high-speed permanent magnet motor with amorphous alloy core was provided.

**Key words:** amorphous alloy; high speed permanent magnet motor; multi-physics field; integrated design

## 0 引言

高速永磁电机体积小、功率密度高, 在飞轮储

能、航空航天、高速磨床、压缩机等领域的应用越来越广泛<sup>[1-5]</sup>。随着电机转速的增加, 电机频率上升, 导致电机铁心损耗增加。非晶合金材料具有

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51307111); 国家科技支撑计划(2013BAE08B00); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2013049)

作者简介: 张超(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为高速永磁电机设计及其控制。

朱建国(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电工磁性材料与新型电驱动系统。

韩雪岩(1978—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为特种电机及其控制。

佟文明(1984—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为特种电机及其控制。

马鑫(1981—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为永磁电机设计及其控制。

高频低损耗的优异性能,能够显著减小电机中的铁心损耗<sup>[6]</sup>。但由于非晶合金带材的饱和磁密小于传统硅钢片,非晶合金电机的铁心磁密分布远远不同于传统硅钢片铁心,仅用非晶合金铁心替换现有的硅钢片铁心不仅难以达到预期效果,甚至性能不及已有的硅钢片电机<sup>[7]</sup>。

高速非晶合金永磁电机设计不仅要考虑高频高速状态下电机的电磁性能,同时电机的机械特性与电机安全可靠运行紧密相关,不合理的机械设计将导致电机的损坏<sup>[8]</sup>。文献[9]在高速内置转子中采用切向式结构,并通过楔形榫头固定永磁体,但该转子加工工艺复杂。文献[10]在高速内置转子中采用多层永磁体结构,从而减小隔磁桥的受力以满足电机 40 000 r/min 转速对机械强度的要求,可是存在转子结构加工工艺复杂、漏磁严重的问题。文献[11]采用有限元方法对转子自由状态下的临界转速进行了分析,为高速电机临界转速的设计提供了参考。高频高速导致高速电机损耗分布特点不同于常规转速电机,温度分布也不同于常规电机,尤其是电机转子温升与轴承温升,超过一定阈值极易导致永磁体退磁与轴承的损坏。文献[12]分析了高速永磁电机中的损耗分布特性,为高速永磁电机损耗计算提供了一定参考。文献[13]基于应力场、电磁场对高速表贴式永磁转子进行了综合优化设计。文献[14]基于多物理场对一台 MW 级高速表贴式永磁电机进行了分析。高速永磁电机的特性表明基于多物理场分析的高速非晶合金永磁电机综合设计非常重要。

本文以一台额定功率 15 kW、最高转速 30 000 r/min 的永磁电机为基础展开非晶合金永磁电机综合设计技术的研究。基于电磁、机械、温度多物理场分析方法对高速非晶合金永磁电机进行设计,得到满足电磁、机械、温升特性的样机方案,并加工制造了一台高速非晶合金永磁电机。通过对样机的试验,验证了多物理场综合设计方法的可行性,为高速非晶合金永磁电机的设计提供了参考。

## 1 基于多物理场的综合设计流程

高速非晶合金永磁电机的设计受电磁、机械、温升等物理参数的制约,其综合设计过程是各物

理场参数间耦合迭代的过程。综合设计流程如图 1 所示。为满足电机性能要求,每个设计过程都必须合理设计电机的相关参数。高速非晶合金永磁电机设计首先要考虑电机的机械可靠性,在机械可靠性的基础上完成电机尺寸初选,然后进行电机相关物理场参数的设计,综合设计中每一步的计算都直接关系到最终电机的性能。

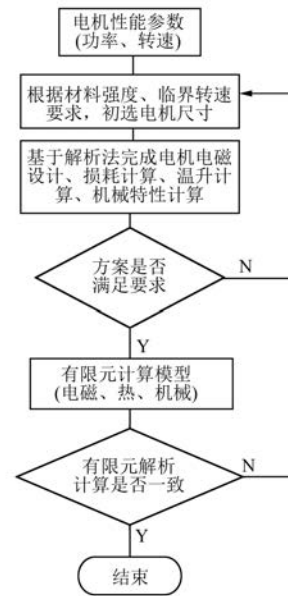


图 1 综合设计流程图

## 2 材料性能与电机电磁设计

### 2.1 非晶合金材料与电机性能参数

非晶合金带材具有薄、脆、硬的物理特性,其厚度仅有 0.025 mm。非晶合金带材低损耗的特性使其应用于电机尤其是高频电机中能显著减小电机的铁心损耗。非晶合金带材与硅钢片性能对比如表 1 所示。

表 1 材料性能对比

参数	非晶合金	硅钢片
厚度/mm	0.025	0.35
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	7.18	7.65
损耗 P <sub>10/400</sub> /W	2.3	18
B <sub>1 000A/m</sub> /T	1.38	1.5
电阻率/(μΩ·cm)	130	45

高速非晶合金永磁电机性能参数如表 2 所示。

表 2 电机性能参数

定子外径/mm	额定功率/kW	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	绝缘等级
130	15	20 000	30 000	F

## 2.2 非晶合金永磁电机的极槽配合

非晶合金带材对加工工艺敏感,不当的加工工艺将引起非晶合金带材性能的严重恶化。在电机外形尺寸一定的情况下,随着电机槽数的增加,槽宽逐渐减小,定子槽宽度的减小导致加工对电机齿部损耗特性影响较大。受铁心损耗、变频器输出频率的限制,高速永磁电机一般选择极数较少的结构<sup>[15]</sup>。2极结构虽然能够降低电机的运行频率,减小电机铁心损耗,但是2极结构绕组端部长,一方面使电机铜耗增大,另一方面导致高速电机铁心长度增加,影响高速转子系统的刚度,增加了转子系统设计的复杂性。随着电力电子技术的发展,变频器输出频率逐渐提高,甚至高达上千赫,基于非晶合金高频低损耗的特性,综合考虑,本文选择4极结构。

不同极槽配合对电机性能的影响如表3所示。少槽结构齿宽较大,有利于减小加工对定子齿部性能的影响,但少槽结构导致电机转子损耗增加,永磁转子损耗在转子中产生热量,而转子热量难以散发,过大的转子损耗引起转子温度升高容易导致永磁体退磁。因此,选择4极18槽的极槽配合。

表 3 不同极槽配合下的电机性能

槽数	极数	齿宽/mm	转子损耗/W	永磁体损耗/W
6	4	17.5	171	93
12	4	9.5	73	26
18	4	6.8	48	23
24	4	4.5	41	21

## 3 高速内置式永磁转子结构设计

### 3.1 永磁转子受力理论分析

永磁转子高速旋转,在转子表面产生较大的离心力。离心力作用于转子隔磁桥引起隔磁桥形变受力,严重情况将导致隔磁桥损坏,影响电机安全运行。高速永磁转子高速运行所产生的离心力为

$$F = mr\omega^2 \quad (1)$$

式中:  $m$ ——转子质量;

$r$ ——转子半径;

$\omega$ ——转子角速度。

则转子所受离心应力为

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中:  $F$ ——离心力;

$A$ ——离心力作用面积。

为了保证高速状态下转子的安全可靠运行,通常离心应力受材料特性的限制,即

$$\sigma \leq \frac{[\sigma]}{S} \quad (3)$$

式中:  $[\sigma]$ ——材料许用应力;

$S$ ——安全系数。

以高速内置式永磁转子中最易损坏的隔磁桥为研究对象,隔磁桥宽度为  $t$ ,长度为  $L$ 。根据式(2)与式(3),安全运行状态下永磁体宽度须满足式(4)。

$$t \geq \frac{FS}{[\sigma]L} \quad (4)$$

### 3.2 高速永磁转子强度有限元分析

由于高速内置式永磁转子隔磁桥结构复杂,故解析计算无法考虑集中应力对转子隔磁桥受力的影响。传统永磁内置式永磁转子通常采用“一”型结构,如图2所示。该结构加工工艺简单,容易装配;但在高速电机领域,该结构由于隔磁桥数量有限,隔磁桥所承受的离心力较大。基于有限元法计算的该结构在高速段30 000 r/min所受应力高达1 113 MPa,远远超过材料许用应力。

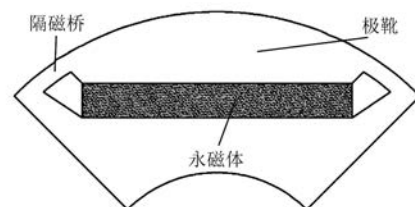


图 2 “一”字型结构

本文在传统结构的基础上对永磁体进行分段,在转子上增加加强筋用以改善永磁转子的机械强度。加强筋虽然在改善转子机械强度方面效果显著,但是随着加强筋个数的增多,永磁电机漏磁增加,削弱电机的转矩输出能力,因此本文将转

子每极永磁体分两段进行设计。分段后的结构如图 3 所示。

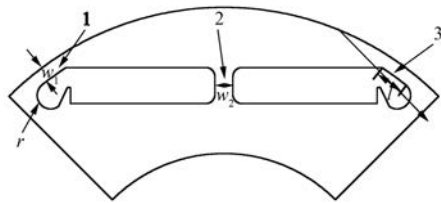


图 3 两段永磁转子结构

隔磁桥 1 与隔磁桥 3 在结构上对称,因此二者受力情况相同,隔磁桥 2 则与隔磁桥 1、3 的受力情况完全不同。由图 3 可知,隔磁桥 1 的长度为  $l$ ,宽度为  $w_1$ ,倒角半径为  $r$ ,隔磁桥 2 的宽度为  $w_2$ 。在高速永磁内置转子的结构确定后,隔磁桥 1、3 与隔磁桥 2 的几何尺寸就成为亟需解决的问题。

内置式永磁转子隔磁桥尺寸不仅影响转子的机械特性,同时对电机电磁性能也有重要的影响。本文采用有限元法与方差分析相结合的方法分析各参数对电机机械特性与电磁性能的影响,方差分析的目的是求得各设计参数变化对电机各性能指标影响所占的比重,在转子设计方面综合考虑并均衡各设计参数。利用式(5)计算得到的反电动势与强度方差计算结果如表 4、表 5 所示。

$$S = n \sum_{i=1}^n [m_{y_i}(X_i) - m(X)]^2 \quad (5)$$

- 式中:  $y_i$ ——设计变量;
- $n$ ——设计变量的个数;
- $X$ ——电机各性能指标;
- $m_{y_i}(X_i)$ —— $y$  的第  $i$  个影响因子下  $X$  的平均值;
- $m(X)$ —— $X$  的平均值。

表 4 反电动势方差分析结果

参数	$E_0/V$		$D_1/\%$	
	S	比重/%	S	比重/%
$w_1$	621.7	68.98	0.012 3	35.65
$l$	5.59	0.62	0.009 9	28.7
$w_2$	273.54	30.35	0.010 8	31.3
$r$	0.49	0.05	0.001 5	4.35
总和	901.32	100	0.034 5	100

表 5 强度方差分析结果

参数	$S_1/MPa$		$S_2/MPa$	
	S	比重/%	S	比重/%
$w_1$	761.84	3.95	997.56	45.7
$l$	1 632.57	8.48	28.11	1.29
$w_2$	698.41	3.62	1 136.96	52.08
$r$	16 175.55	83.95	20.39	0.93
总和	19 268.37	100	2 183.02	100

根据表 4 中的反电动势方差计算结果,隔磁桥宽度  $w_1$  对反电动势  $E_0$  的影响最大,隔磁桥宽度  $w_2$  对反电动势  $E_0$  的影响仅次于  $w_1$ , $l$ 、 $r$  对反电动势的影响最小,几乎可以忽略不计。隔磁桥尺寸  $w_1$ 、 $l$ 、 $w_2$  均对反电动势畸变率  $D_1$  有影响,隔磁桥倒角半径  $r$  对反电动势波形畸变率  $D_1$  的影响最小。根据表 5 中强度的方差计算结果,对隔磁桥 1 的机械强度  $S_1$  最具影响的是隔磁桥的倒角半径  $r$ ,隔磁桥 2 的宽度  $w_2$  对隔磁桥 1 的机械强度也有影响,在隔磁桥尺寸的设计中需要注意。隔磁桥 2 的机械强度  $S_2$  主要受其宽度  $w_2$  的影响,此外,隔磁桥 1 的宽度  $w_1$  对隔磁桥 2 的机械强度也有影响。基于方差分析结果,隔磁桥 1 的半径  $r$  对应力影响最大,但其对反电动势的影响很小,因此在转子外形尺寸的基础上尽可能增加隔磁桥 1 的半径  $r$ 。最终得到的内置式转子应力分布如图 4 所示,转子最大应力 299.8 MPa,小于硅钢片屈服强度 450 MPa,满足高转速对转子机械可靠性的要求。

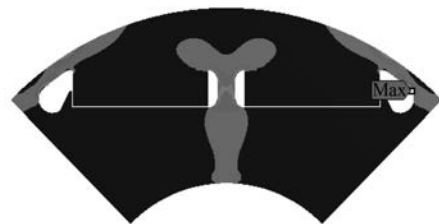


图 4 内置转子应力分布

## 4 转子临界转速分析

随着电机转速的提高,转速有可能接近或达到转子系统的临界转速,从而加剧转子系统的振动<sup>[16]</sup>。因此,转子动力学作为高速电机设计中的重要内容,临界转速的准确计算直接关系到高速

永磁转子的安全运行。

高速永磁电机可采用滚动轴承、磁轴承、气浮轴承等方式支撑其轴系,但就可靠性与成本方面而言,滚动轴承具有一定的优势。因此,本文所设计的高速永磁转子系统,其两端由滚动轴承支撑。

轴承刚度作为表征轴承动态特性最重要的参数,其大小及变化特性直接影响轴承-转子系统的临界转速。因此,研究轴承支撑特性对轴承-转子系统的影响非常重要。轴承刚度对转子系统临界转速的影响如图 5 所示。

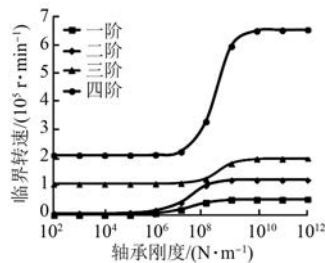


图 5 临界转速与轴承刚度的关系

从图 5 可以看出,当轴承刚度小于  $10^6$  N/m 时,1~4 阶临界转速变化不大,由于轴承刚度过小,1 阶临界转速与 2 阶临界转速很小。当轴承刚度大于  $10^6$  N/m 时,随着轴承刚度的增加,转子各阶临界转速逐渐增加。轴承刚度从  $10^6$  N/m 增加到  $10^9$  N/m,一阶临界转速开始显著增加,一阶临界转速增加为原来的 8.1 倍。当轴承刚度大于  $10^9$  N/m 时,随着轴承刚度的进一步增加,1~4 阶临界转速趋于稳定,基本保持不变,轴承刚度的继续增加基本无益于转子系统刚性的提高。根据图 5 的计算结果,为满足电机 30 000 r/min 转速的要求,并考虑高速电机转速 1.2 倍的安全裕量,轴承刚度不应低于  $10^8$  N/m。

## 5 高速内置式永磁电机温度场分析

### 5.1 冷却方式

高速永磁电机由于转速、频率均大于常规转速永磁电机,其损耗分布特性也不同于传统转速永磁电机。定子采用非晶合金材料在一定程度上降低了铁心损耗,但高速旋转也带来了转子摩擦损耗、转子铁心损耗、永磁体涡流损耗增加的问题。为了散发高速永磁电机中的热量,避免转子温度过高,高速电机常采用水冷、油冷、风冷及混

合冷却等方式。综合考虑成本、运行噪声等因素的影响,本文采用螺旋水道冷却方式。高速永磁电机散热方式如图 6 所示。

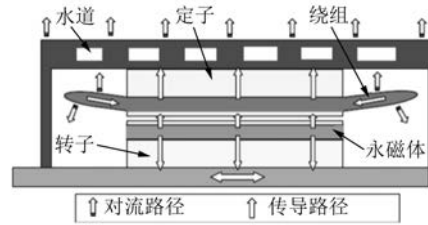


图 6 高速永磁电机散热方式

### 5.2 物理模型的建立

散下线的定子绕组导线在槽内排列极不规则,为了简化分析,对定子槽内绕组作如下假设:(1)电机浸漆状态良好,浸渍漆填充均匀;(2)铜线绝缘漆分布均匀;(3)忽略股线间由于绝缘漆膜所造成的温差。

基于上述假设条件,将槽内上下层铜线分别等效看作一个导热体,槽内所有绝缘材料等效成另一个导热体。上下层等效导热体周围与槽壁平行,等效后的绝缘导热体均匀分布在槽内,如图 7 所示。

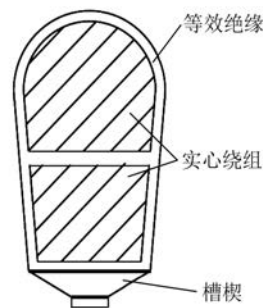


图 7 槽内等效绕组

高速永磁电机永磁转子在气隙中高速旋转,转子旋转带动气隙中空气流动,定转子间主要通过对流方式进行热交换。对流换热导致流体场与温度场耦合在一起,增加求解难度。为了简化计算分析,引入气隙有效导热系数,通过静止流体的有效导热系数等效气隙中流动空气的导热能力,即单位时间内静止流体在定转子之间所传递的热量和流动空气所传递的热量相等,通过对气隙的等效处理,可将旋转的转子视为静止不动处理。经过这样处理后,可以用导热方式换热的效果等

价气隙中对流方式换热的效果。有效导热系数  $\lambda_{\text{eff}}$  可按下述方法求取。

假设定子内表面和转子外表面为光滑圆柱面, 则气隙中的雷诺数可表示为

$$Re = \frac{v_{\varphi 1} \delta}{\nu} \quad (6)$$

其中:  $v_{\varphi 1} = 2\pi nr_0/60, \delta = R_i - r_0$ 。

式中:  $v_{\varphi 1}$ ——转子的圆周速度;

$n$ ——转子的转速;

$r_0$ ——转子的外径;

$\delta$ ——气隙的长度;

$R_i$ ——定子的内径;

$\nu$ ——空气的运动黏度。

临界雷诺数  $Re_{\text{cr}}$  的表达式为<sup>[17]</sup>

$$Re_{\text{cr}} = 41.2 \sqrt{R_i / \delta} \quad (7)$$

当  $Re < Re_{\text{cr}}$ , 气隙中的空气流动为层流, 有效导热系数  $\lambda_{\text{eff}}$  等于空气的导热系数  $\lambda_{\text{air}}$ 。

当  $Re > Re_{\text{cr}}$ , 气隙中的空气流动为紊流, 这种状态下, 气隙的有效导热系数可用式(8)计算:

$$\lambda_{\text{eff}} = 0.0019 \cdot \eta^{-2.9084} \cdot Re^{0.4614 \ln(3.33361 \cdot \eta)} \quad (8)$$

其中:  $\eta = r_0 / R_i$ 。

### 5.3 热源与温度分布

非晶合金永磁电机高速运行, 高速运行中在电机不同部位产生相应损耗, 由于非晶合金与高转速的特殊性导致电损耗分布特性不同于常规电机。电机损耗在电机内产生热量, 并通过传导、对流的方式进行热交换, 最终达到热平衡。

高速非晶合金永磁电机产生的总损耗如式(9)所示。

$$P = P_{\text{cu}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{ad}} + P_{\text{s}} + P_{\text{fw}} \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{cu}}$ ——电机定子铜耗;

$P_{\text{Fe}}$ ——铁心损耗;

$P_{\text{ad}}$ ——附加损耗;

$P_{\text{s}}$ ——杂散损耗;

$P_{\text{fw}}$ ——摩擦损耗。

铁心损耗包括齿部损耗与轭部损耗, 附加损耗由变频器供电引起, 高速电机中的摩擦损耗包括轴承摩擦损耗, 以及转子与气隙空气的摩擦损耗。采用有限元与解析计算相结合的方法求取高速非晶合金永磁电机各部分损耗, 将损耗作为热源加载到电机的不同部位求取电机温度分布。环境温度 22℃ 下, 高速非晶合金永磁电机整体温度

分布如图 8 所示。

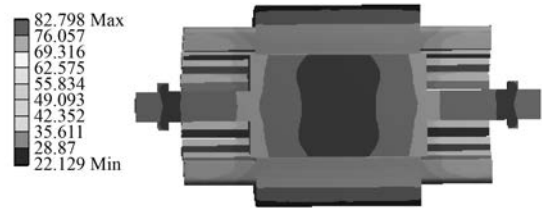


图 8 电机整体温度分布

从图 8 可以看出, 由于定子采用非晶合金材料, 定子铁心损耗较小, 定子温度不高, 而高速非晶合金永磁电机中转子温度与轴承温度较高。转子热量由于难以散发, 造成其温度较高, 高转速引起轴承处摩擦损耗增加, 从而导致轴承温度升高。

## 6 样机制造与试验

### 6.1 样机制造

基于上述综合设计方法, 设计并完成了一台高速非晶合金永磁电机样机制造。样机定转子结构如图 9、图 10 所示。

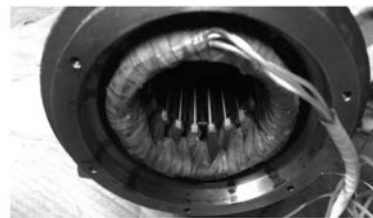


图 9 电机定子结构



图 10 电机转子结构

### 6.2 样机试验

为了验证电机的性能, 对样机进行了空载特性试验。通过高频变频器供电, 样机转速达到 30 000 r/min, 证明了样机高速特性下机械设计的可靠性。空载运行状态下的损耗特性与电机转速关系如图 11 所示。从图 11 可以看出, 计算值与

试验值一致性较好,由于装配工艺、变频器特性等因素的影响,计算值稍小于实际测试值。

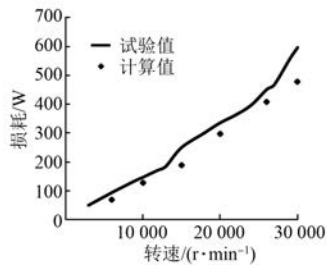


图 11 空载损耗与转速的关系

受目前负载试验条件的限制,负载试验初步试验了电机 7 000 r/min 下的电机负载特性。额定负载下电流波形如图 12 所示。试验测试额定负载下,相电流有效值 28.8 A,相电流计算值 30 A,误差 4%。

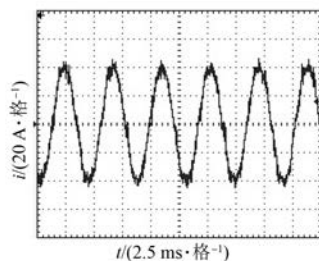


图 12 相电流波形

## 7 结 语

本文基于多物理场的设计方法对一台额定功率 15 kW、最高转速 30 000 r/min 的高速非晶合金永磁电机进行了综合设计,并加工制造了一台样机。通过样机试验验证了理论计算与分析的正确性,并得出以下结论:

(1) 高速非晶合金永磁电机频率设计范围宽,相同转速下,极数比传统硅钢片高速电机选择空间大,多极数有利于增强电机转子的刚度,便于转子动力学设计。

(2) 为满足高速运行状态下机械可靠性的要求,通过增加加强筋的方法分散内置永磁转子应力以减小单个隔磁桥的受力,同时,通过增加隔磁桥尾端半径的方法减弱转子应力集中效应。

(3) 轴承刚度在一定范围内对转子系统的稳定运行影响很大,适当增加电机的轴承刚度有利于提高转子系统的临界转速,但轴承刚度过大无

益于提高转子系统的刚性。

(4) 转子热量散发困难和高速轴承损耗的增加,使高速电机转子与轴承温度较高;定子由于非晶合金材料的低损耗特性,温度较低。因此有效降低转子温度与轴承温度,是高速非晶合金永磁电机冷却系统与电磁设计的研究重点。

## 【参 考 文 献】

- [ 1 ] PAPINI L, RAMINOSOA T, GERADA D, et al. A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 6( 61 ): 3071-3080.
- [ 2 ] GERADA D, MEBARKI A, BROWN N L, et al. High-speed electrical machines: technologies, trends, and developments [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61( 6 ): 2946-2959.
- [ 3 ] LI W L, QIU H B, ZHANG X C, et al. Analyses on electromagnetic and temperature fields of superhigh-speed permanent-magnet generator with different sleeve materials [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61( 6 ): 3056-3063.
- [ 4 ] 王天煜,王凤翔,方程.高速永磁电机转子多场综合设计 [ J ].沈阳工业大学学报, 2011, 33( 5 ): 486-490.
- [ 5 ] 张涛,朱焜秋,孙晓东,等.基于有限元法的高速永磁转子强度分析 [ J ].电机与控制学报, 2012, 16( 6 ): 63-68.
- [ 6 ] KOLANO R, KRYKOWSKI K, KOLANO B A, et al. Amorphous soft magnetic materials for the stator of a novel high-speed PM-BLDC motor [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49( 4 ): 1367-1371.
- [ 7 ] FAN T, LI Q, WEN X. Development of a high power density motor made of amorphous alloy cores [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61( 9 ): 4510-4518.
- [ 8 ] BINDER A, SCHNEIDER T, KLOHR M. Fixation of buried and surface-mounted magnets in high-speed permanent magnet synchronous machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42( 4 ): 1031-1037.
- [ 9 ] JANNOT X, VANNIER J C, MARCHAND C, et al. Multiphysic modeling of a high-speed interior permanent-magnet synchronous machine for a multiobjective optimal design [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26( 2 ): 457-467.

(下转第 66 页)

- [ 4 ] 董蕾.基于比例复数积分控制的单相逆变器并网研究[J].电气自动化,2012,34(2): 31-34.
- [ 5 ] 张兴,汪杨俊,余畅舟,等.采用PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(30): 5287-5295.
- [ 6 ] 李浩然,杨旭红,薛阳,等.基于模糊PI参数自整定和重复控制的三相逆变器并网研究[J].电机与控制应用,2015,42(2): 31-36.
- [ 7 ] 曹鑫晖.分布式发电并网建模与控制策略研究[D].上海:复旦大学,2013.
- [ 8 ] 郭小强,邬伟扬,赵清林,等.三相并网逆变器比例复数积分电流控制技术[J].中国电机工程学报,2009,29(15): 8-14.
- [ 9 ] 冯奕,颜建虎.基于比例复数积分的风力发电并网逆变器控制方法[J].农业工程学报,2016,32(13): 177-182.
- [ 10 ] 郭小强.光伏并网逆变器通用比例复数积分控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(13): 3393-3399.
- [ 11 ] 杨秀云.PWM逆变器重复控制策略的研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [ 12 ] 李俊林.单相逆变器重复控制和双环控制技术研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [ 13 ] 张娜.基于重复控制理论的光伏并网逆变器输出控制的研究[D].天津:天津大学,2010.
- [ 14 ] 汪东林.基于重复控制算法的正弦波逆变电源设计[D].合肥:合肥工业大学,2003.
- [ 15 ] 杨苹,郑远辉,许志荣,等.基于准比例谐振积分与重复控制的光伏并网逆变器研究[J].可再生能源,2015,33(7): 993-998.
- [ 16 ] 陈凯,张杰.重复控制逆变器并网电流控制技术研究[J].中国测试,2015,41(3): 91-95.
- [ 17 ] 王淑惠,鞠文耀,贾中路.基于复合控制的单相并网逆变器研究[J].电力电子技术,2011,45(2): 8-9.
- [ 18 ] 滕国飞,肖国春,张志波,等.采用重复控制的LCL型并网逆变器单闭环电流控制[J].中国电机工程学报,2013,33(24): 13-21.
- [ 19 ] 梁利民,粟时平,朱镜儒.基于三相光伏并网系统的比例谐振重复控制研究[J].电力科学与工程,2014(6): 66-72.
- [ 20 ] 贲冰.基于重复控制的逆变器复合控制技术研究[D].秦皇岛:燕山大学,2007.

收稿日期: 2016 -09 -20

(上接第 15 页)

- [ 10 ] KIM S, YONGIN S K, KIM Y, et al. A novel rotor configuration and experimental verification of interior PM synchronous motor for high-speed applications [J].IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 843-846.
- [ 11 ] EDE J D, ZHU Z Q, HOWE D. Rotor resonances of high-speed permanent-magnet brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1542-1548.
- [ 12 ] 沈建新,李鹏,郝鹤,等.高速永磁无刷电机电磁损耗的研究概况[J].中国电机工程学报,2013,33(3): 62-74.
- [ 13 ] 吴震宇,曲荣海,李健,等.表贴式高速永磁电机多场耦合转子设计[J].电机与控制学报,2016,20(2): 98-103.
- [ 14 ] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.1.12MW高速永磁电机多物理场综合设计[J].电工技术学报,2015,30(12): 171-180.
- [ 15 ] 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): 258-264.
- [ 16 ] 田野,孙岩桦,丁成伟,等.不同支撑和转子装配方式的高速电机临界转速分析[J].振动与冲击,2013,32(8): 24-31.
- [ 17 ] 黄国治,傅丰礼.Y2系列三相异步电机技术手册[M].北京:机械工业出版社,2004.

收稿日期: 2017 -03 -06

(上接第 59 页)

### 【参考文献】

- [ 1 ] 梅晓榕,兰朴森,柏桂珍.自动控制元件及线路[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1993.
- [ 2 ] 蒋范明,韩昌佩.空间应用的两相混合式步进电机细分电路设计[J].微特电机,2012,40(2): 74-75.
- [ 3 ] 李秀红.高细分新型步进电机驱动系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [ 4 ] 尹达一,冯鑫,郑列华.微特电机在卫星水色扫描仪中的应用[J].微特电机,2008,36(8): 10-11.
- [ 5 ] 郝建强,张建.IR2110在电机驱动中的应用[J].微特电机,2008,41(6): 51-52.

收稿日期: 2016 -09 -19