

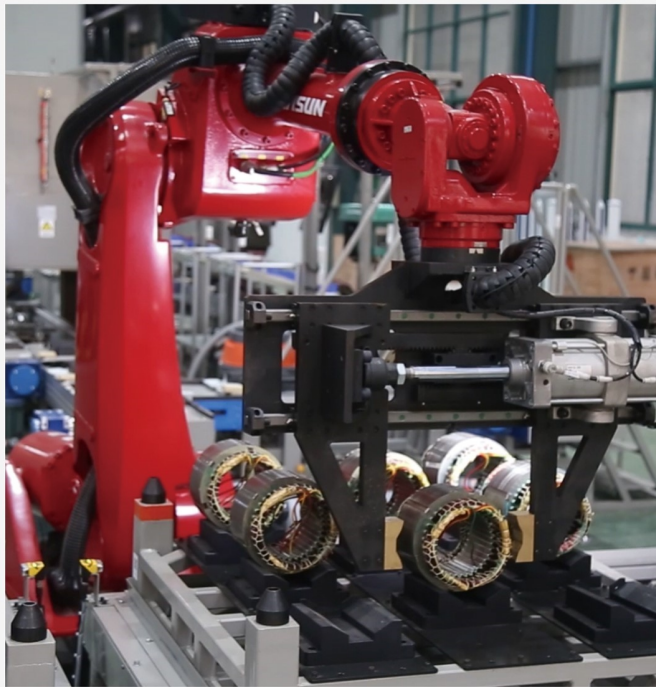
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

李仕豪, 狄冲, 鲍晓华, 孙跃.
低转矩脉动低速大转矩电主轴感应
电机的设计与分析.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 31.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机 · 智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

低转矩脉动低速大转矩电主轴感应电机的设计与分析*

李仕豪¹, 狄冲¹, 鲍晓华¹, 孙跃²

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 安徽皖南电机股份有限公司, 安徽 泾县 242500)

摘要: 针对低速大转矩电主轴电机转矩脉动偏高的工程实际问题, 对电机不同槽配合的性能进行分析综合对比, 精确选择出各方面性能较优的电机方案。针对感应电机有限元仿真瞬态场收敛速度慢、在多方案对比时求解周期长的问题, 提出时谐场和瞬态场联合仿真的思路, 实现电机的快速优化设计。对一台 12 极 7.5 kW 的电主轴感应电机在每极每相槽数为 3、2.5、2 三种不同槽配合的组合下进行二维电磁有限元分析计算, 对比其在额定工况下的铁耗、绕组铜耗、转子铝耗、效率、功率因数和转矩脉动等电磁性能。结果表明了转子导条数目的增加, 能够使电机电磁性能保持较高水平, 特别是能够维持较低的转矩脉动水平。最后对定子槽数 90 和转子槽数 106 的槽配合方案进行了样机制作, 试验验证了样机的性能, 并验证了时谐场和瞬态场联合仿真的准确性。

关键词: 感应电机; 槽配合; 转矩脉动; 有限元仿真

中图分类号: TM346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0031-10

doi: 10.12177/emca.2021.191

Design and Analysis of Low Torque Ripple Low Speed High Torque Motorized Spindle Induction Motor*

LI Shihao¹, DI Chong¹, BAO Xiaohua¹, SUN Yue²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Wannan Motor Co., Ltd., Jingxian 242500, China)

Abstract: Aiming at the practical engineering problem of high torque ripple of low speed high torque motorized spindle motor, the performance of different slot number combination of the motor is analyzed and compared to accurately select the motor scheme with better performance. The convergence speed of transient field in finite element simulation of induction motor is slow, and a long simulation period is needed when comparing multiple schemes. Aiming at these problems, the joint simulation of time harmonic field and transient field is proposed to realize the rapid optimization design of the motor. Two-dimensional electromagnetic finite element simulation is carried out for a 12-pole, 7.5 kW motorized spindle induction motor with three different slot number combinations of 3, 2.5 and 2 slots per pole per phase, and the electromagnetic properties of the motor under the rated conditions such as iron loss, winding copper loss, rotor aluminum loss, efficiency, power factor and torque ripple are compared. The results show that increasing the number of rotor bars can lead to better electromagnetic performances, especially a low level of

收稿日期: 2021-12-02; 收到修改稿日期: 2022-01-19

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977055); 安徽省科技重大专项项目(18030901036, 201903a05020042)

作者简介: 李仕豪(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为电机设计理论和技术等。

狄冲(1991—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机设计和电机电磁场开源有限元建模仿真技术等。

鲍晓华(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计理论和技术等。

torque ripple. Finally, a prototype with 90 stator slots and 106 rotor slots is made, and the performance of the prototype, as well as the accuracy of the joint simulation of time harmonic field and transient field, is verified by experiments.

Key words: induction motor; slot number combination; torque ripple; finite element simulation

0 引言

随着科技的发展,人们对机械加工精度的要求越来越高,促使高端数控机床相关领域的研究日益增加,并逐步成为研究热点。直驱式电主轴电机作为数控机床的核心部件,直接与机床主轴连接,省去了齿轮、皮带、链条等传动装置,具有传动效率高、振动小、精度高的特点^[1]。电主轴电机按电机类型主要包括感应电机和同步电机。电主轴感应电机有可靠性高、成本低、制作工艺成熟等优点,但同时也具备效率和功率因数较低、功率密度低和机械特性软等缺点。电主轴永磁电机具有转矩密度高、功率因数高、调速范围广等优点,但是也存在成本高、加工过程复杂、在恶劣环境下易退磁等缺点^[2-4]。

国内外学者主要对电主轴电机进行低速大转矩、高速高功率以及高稳定性高功率密度等方向的研究^[5-8]。本文主要研究设计一台满足实际需求的高性能低转矩脉动的主轴电机。鼠笼式感应电机相比于永磁电机,转子导条具备阻尼绕组的功能,可以有效吸收气隙磁场中的谐波,从而使电机的转矩脉动相较于永磁电机显著降低。本文在此基础上研究如何通过调整定子和转子的槽数有效降低电机的转矩脉动,同时探讨定转子槽数对电机其他性能的影响,如功率因数、效率以及材料的消耗。国内外学者也对电机的定转子槽数的选择进行了大量的研究^[9]。

针对异步电机的槽数组合问题,研究人员一般在保持定子槽数和极对数不变的情况下,对最佳的转子槽数进行研究。Gyftakis 等^[10]研究了定子相同的情况下,选择不同转子槽数对电机性能的影响,通过改变转子槽数,对电机电磁转矩、定子电流和磁通密度等电磁特性产生了影响。Gundogdu 等^[11]分析了在定子槽数不变的情况下,转子槽数对导条电流的影响,对不同方案下电机的转子导条电流、转矩脉动、电机损耗和功率因数等性能进行了一系列的对比分析,得出定子槽数为 48、极数为 8 的感应电机,选择转子槽数为

52,可以获得最大转矩和较小的转矩脉动,有效降低了谐波含量。然而,这些研究只是证明了转子槽数的合理选择可以优化电机性能,并未考虑其与定子槽数组合的影响,而电机本身定转子是相互耦合干扰的,所以需要进一步综合考虑定转子的槽数组合对电机的影响。感应电机一般采用整数槽,相较于分数槽其谐波含量较少,从而其效率和功率因数等性能较优;定子采用分数槽可以有效减少电机的转矩脉动,而分数槽在永磁电机的设计中被广泛研究和应用^[12-14]。本文为减小电机的转矩脉动,改善电机转矩的平稳输出能力,研究在感应电机中采用分数槽对电机各项性能的影响。

在对感应电机的定子槽数和转子槽数不同组合的研究中,文献[15-16]研究了在不同定转子槽数下的振动和噪声特性。文献[15]通过建立感应电机振动特性的全解析模型,仿真研究了各种槽数对噪声的影响,发现电机的噪声只与定转子的槽数相关,而与槽的几何形状无关。文献[16]通过分析三种不同槽配合的电磁力波次数,选择有利于电机电磁噪声抑制的槽配合。但文献[15-16]受限于感应电机仿真周期相对较长的原因,都只选择了较少的样本数进行分析。而文献[17]为消除由于导条谐波引起的转矩脉动,通过对目标电机两极对数和三极对数所有的槽数组合进行分析,根据模拟结果建立一个数据库,提出了一种新的转子槽数选择方法,并确定了增加定子槽数会增加转子槽数选择的自由度。但该方法过程繁琐,任务量较大,较难应用于实际工程之中,且主要针对两极对数和三极对数的电机。

以往对电机多种槽配合组合的分析较为简单或者过于繁琐。针对低速大转矩电主轴感应电机在极数确定情况下的多种槽配合,不同于以往的场路联合仿真,本文采用时谐场和瞬态场联合快速仿真。通过对比分析目标电机的 16 种不同槽配合类型下,特别是当电机定子侧采用分数槽时,电机铜耗、铁耗、铝耗、功率因数和转矩脉动等性能的变化规律,来对目标电机进行优化。最后,通

过仿真结果和试验数据,对优化设计方案的性能进行验证。

1 时谐场和瞬态场联合优化设计

1.1 电主轴电机设计要求

低速大转矩电主轴电机相比于传统的电机,它的额定转速相对较低,输出转矩相对较高,是机床的核心部件,对整个机床的加工精度有较大影响。因此,电主轴电机设计时对电机的转矩脉动有较高的要求。感应电机的转矩脉动通常比永磁同步电机更低,因此本文主要以感应电机为例进行设计研究。为满足各项工业实际应用需求,本文设计的电主轴感应电机的主要参数和性能指标如表 1 所示。

表 1 电主轴电机的设计要求和性能指标

参数名称	参数值
额定电压 U_N/V	380
额定功率 P_N/kW	7.5
频率 f/Hz	50
极对数 p	6
相数 m	3
功率因数 $\cos\varphi$	≥ 0.68
效率 η	≥ 0.70
转矩脉动系数 $K_{Tb}/\%$	≤ 1

一般而言,在电机进入稳态后,输出转矩时大时小,出现不规则的转矩输出。在稳定工作温度下,找出最大转矩和最小转矩即可定义表 1 中的

转矩脉动系数。电机的转矩脉动系数根据下式计算^[18]:

$$K_{Tb} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T_{\max} 为最大转矩; T_{\min} 为最小转矩。

1.2 时谐场和瞬态场联合快速优化

采用有限元方法对电机进行电磁性能的分析研究,根据不同的电机类型,主要使用三种求解器,分别是静磁场求解器、时谐场求解器和瞬态场求解器^[19]。不同求解器的原理和计算方式不同,具有的优缺点也不相同,根据不同的电机种类和求解需要来选择合适的求解器类型。三种求解器的具体比较如表 2 所示。

表 2 求解器类型及优缺点比较

求解器类型	优点	缺点
静磁场求解器	求解迅速,适用同步电机	无法考虑感应涡流
时谐场求解器	求解迅速,适用感应电机	无法考虑时间谐波
瞬态场求解器	求解精度高,适用各类电机	求解过程长

静磁场求解器由于未考虑涡流效应,所以不适用于感应电机的电磁设计。时谐场和瞬态场求解器也各有不同的优缺点。针对这些求解器的特点,可以采用时谐场和瞬态场联合优化设计的方法,更加高效地进行电机的电磁设计。先进行时谐场仿真计算后,得到初步的解,优化到目标解以后,再在瞬态场里计算分析。具体的设计流程如图 1 所示。

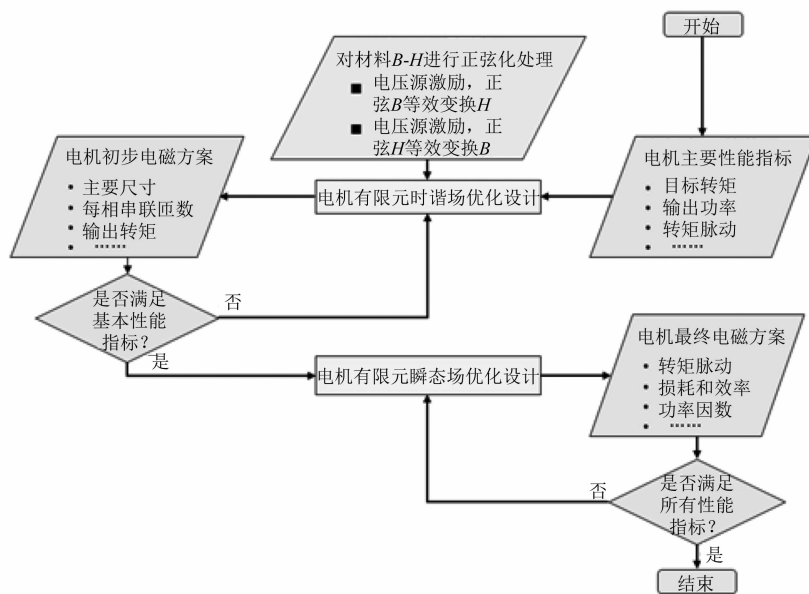


图 1 时谐场和瞬态场联合设计流程

一般而言,感应电机电磁方案的有限元仿真设计先用解析法进行初步计算分析,得到符合目标性能的电机设计后,再通过瞬态场仿真重新计算来最终判断其是否符合性能要求。但是解析法的精度相对较差,计算结果往往与实际值有较大误差。因此,在进行瞬态场仿真时,可能反复进行多次数据调整。瞬态场仿真计算量大,对计算机计算性能要求高,求解过程长。如图 1 的流程所示,用时谐场仿真来代替解析法,进行电磁方案的初步设计。时谐场仿真的结果精度相对较高,计算速度和解析法一样相对较快。但由于其不考虑时间谐波和空间谐波对电机的影响,所以仍然通过瞬态场来进行符合性能指标的最后验证。通过该方法可以有效减少在瞬态场仿真中可能存在的反复计算,节约了时间和计算资源。

2 不同槽配合对电磁性能的影响

通过上述仿真方法对目标电机进行初步电磁方案设计。由于低速大转矩电主轴电机需要有一个平稳的转矩输出,从而对转矩脉动有较高的要求,而研究发现不同槽配合对转矩脉动有较为显著的影响。因此,针对适合目标电机的多种槽配合类型进行了仿真分析,找到符合电机性能要求的较优电磁设计方案。

2.1 槽配合对转矩脉动的影响

在极数和相数确定的情况下,定子槽数由每极每相槽数 q 决定。 q 值的大小对电机的各项参数如附加损耗、温升及绝缘材料的消耗量等都有影响。针对目标电机极数较多、转矩脉动要求高等特点,一般可以选取 q 为 2 或 3。因为合适槽配合下的分数槽有短端匝、高效率、高功率密度等特点,且对转矩脉动有较好的削弱作用,所以对 q 取 2.5 进行研究分析^[20]。

感应电机在选取转子槽数时必须与定子槽数有恰当的配合。不恰当的槽配合类型可能导致电机性能的恶化,例如可能会引起附加损耗、附加转矩、振动和噪声增加等一系列性能上的缺陷。

根据三相感应电机设计常用的槽配合,选择了 16 种槽配合类型分别进行仿真分析^[21],如表 3 所示。不恰当的槽配合可能会导致电机产生较大的电磁振动。

表 3 主要槽配合类型

每极每相槽数 q	定子槽数 Q_s	转子槽数 Q_r
2	72	56,64,80,88
2.5	90	68,70,74,88,98,106,110
3	108	86,88,92,100,116

对采用的槽配合按照设计要求进行时谐场和瞬态场联合仿真分析,求解出其二维有限元计算解。求出的各槽配合类型具体转矩脉动系数如图 2 所示。在每极每相槽数为整数时,与分数槽相比,转矩脉动系数整体较高,说明分数槽确实对转矩脉动有削减效果。对于 $q=2$ 和 2.5 时的一系列槽配合类型,随着转子槽数的增加,其转矩脉动逐渐减小;而 $q=3$ 的槽配合类型,转矩脉动随着转子槽数的增加反而上升。

如图 2 所示,理论上满足实际性能需要的槽配合类型有 72/88、90/74、90/88、90/98、90/106、90/110。而其中 72/88、90/74、90/88、90/98 这几种槽配合类型虽然满足转矩脉动设计需要,但裕量都较小(转矩脉动系数较接近 1),可能会出现误差,实际制造过程中也可能出现材料和制造工艺导致的性能下降。

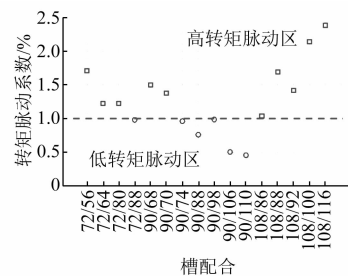


图 2 各槽配合下的转矩脉动系数

从图 2 还可以发现:在采用分数槽后,各电机方案的转矩都有明显下降;整数槽方案在不同的槽数组组合下,转矩脉动有下降,但仍高于设计需求。齿槽转矩是电机转矩脉动的一个重要影响因素,其幅值与电机的定子槽数 Q_s 和极数 $2p$ 的最小公倍数(LCM)成反比。由表 4 可以发现,在使用了分数槽后,电机的 LCM($Q_s, 2p$)增大,有效降低了电机的齿槽转矩,这应该是导致电机转矩脉动下降的重要原因之一。另外,表 4 显示在采用分数槽后,电机的绕组系数相较于整数槽方案有所下降,但并不是很显著。

表 4 不同定子槽数的绕组特性对比

每极每相槽数 q	绕组系数	LCM($Q_s, 2p$)
2	0.965 9	72
2.5	0.951 4	180
3	0.957 9	108

在传统的电机设计中,避免采用分数槽的一个重要原因是,采用了分数槽以后会增加电机的谐波含量,从而导致电机的纹波转矩和铜耗增加,各项性能遭到削弱。如图 3 所示,对转矩脉动系数较小的 72/88、90/88、90/106、90/110、108/86 五个方案进行转矩的傅里叶分解发现,在采用了分数槽的各方案后,尽管高阶谐波转矩含量增加,但有效降低了六次谐波转矩,而六次谐波转矩的含量明显高于其他谐波转矩,对整个转矩性能的影响最大。在分数槽结构中,调节转子槽数能更好地降低谐波转矩的含量。

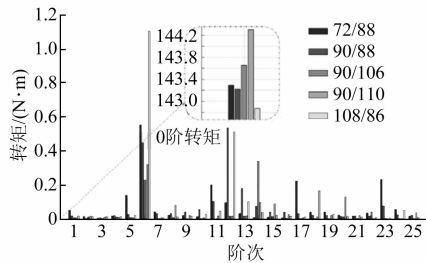
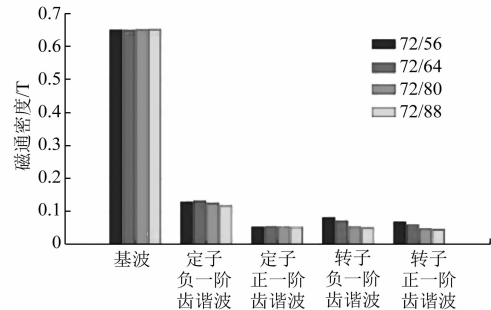


图 3 各槽配合下的转矩组成

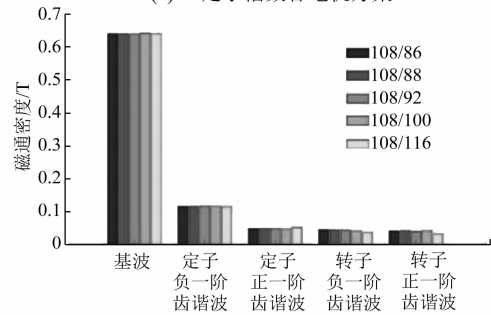
如图 4 所示,通过对各方案电机磁通密度进行傅里叶分解,可以进一步发现定转子槽数变化对电机性能的影响。在图 4(a)中,整数槽 72 定子槽数的各方案,随着转子槽数的增加,电机的转子齿谐波呈现削弱的趋势,而定子齿谐波综合来看,整体无明显变化。同理,图 4(b)中对整数槽 108 定子槽数的各方案对比发现,尽管随着转子槽数的增加,转子齿谐波趋于下降,但定子齿谐波的增长更为明显,所以槽数的增加反而增加了整体谐波的含量。图 4(c)中分数槽 90 定子槽数的各方案中,随着转子槽数的增加,转子齿谐波同样呈现下降的趋势,而定子齿谐波呈现缓慢的增长。

由图 4(a)~图 4(c)均能发现转子槽数增长,而转子齿谐波下降,原因可能是转子导条数的增加,降低了每根导条的导条电流,从而减小了对气隙磁密的干扰。而从各图对比中发现谐波含量较

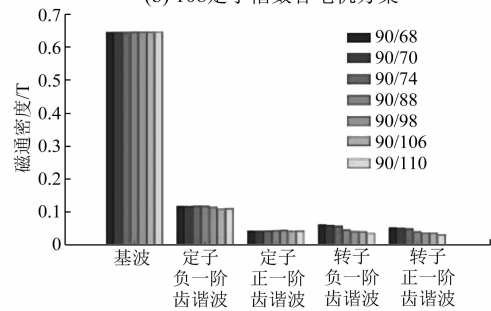
小、基波较大的方案确实属于转矩脉动较小的槽配合方案。在图 4(d)中对转矩脉动较小的各方案进行比较,可以看出,在采用分数槽的情况下,谐波含量并未显著增加,而且相较于整数槽方案,定子齿谐波均呈现减少的趋势。



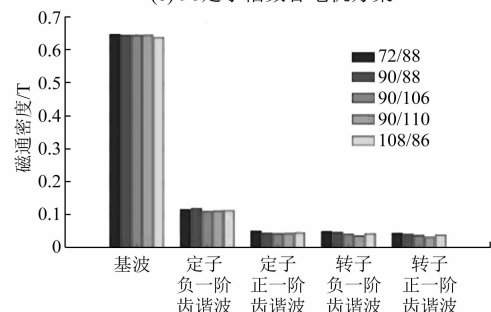
(a) 72 定子槽数各电机方案



(b) 108 定子槽数各电机方案



(c) 90 定子槽数各电机方案



(d) 转矩脉动较小的各电机方案

图 4 各槽配合下的气隙磁密频谱

2.2 槽配合对功率因数的影响

工业应用中,感应电机运行时需要吸取无功功

率用于励磁,这会使电网的功率因数变坏,造成能量的浪费。因此,在实际设计时,更高的功率因数更加满足实际应用需要,并且符合节能减排的需求。

感应电机的无功功率 Q 可以由磁能 W 求得,具体计算公式为

$$Q = \omega W = 2\pi f W \quad (2)$$

式中: ω 为供电电源的电角频率。

以电机额定工况为例,瞬态场和时谐场对于非线性材料中储存的磁能如图 5 中阴影部分标注所示,其具体计算公式如下:

$$\begin{cases} W_{\text{瞬态}} = \int_0^{B_N} H_N dB_N \\ W_{\text{时谐}} = \frac{1}{2} B_N H_N \end{cases} \quad (3)$$

式中: H_N 为额定工作点处的磁场强度; B_N 为额定工作点处的磁通密度。

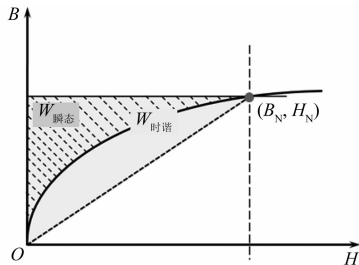


图 5 时谐场和瞬态场磁能计算示意图

如图 5 和式 (3) 所示,时谐场里计算的磁能比瞬态场里计算的要大,导致时谐场里计算的无功功率偏大,最后得出的功率因数比瞬态场计算值偏小。因此,瞬态场的功率因数计算值更接近实际值,如图 1 流程图所示,需要采用瞬态场计算来确定功率因数的值。

图 6 显示了在不同槽配合情况下的功率因数对比,可以发现, $q=3$ 等一系列定子槽数相对较多的槽配合下,功率因数有明显的下降,而 $q=2.5$ 和 2 的槽配合类型的功率因数没有大的变化。这可能是因为定子槽数较多,导致槽漏感较大,功率因数恶化。但是随着转子槽数的增加,各槽配合类型的功率因数在定子槽数不变的情况下逐渐增加。

2.3 槽配合对效率的影响

电机的效率由电机的额定输出功率减去所有损耗的值比上额定输出功率计算,而感应电机的损耗主要由定子铜耗、转子铝耗、磁路中的铁心损

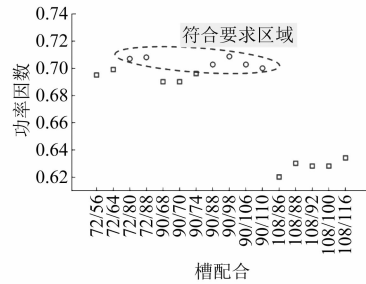


图 6 各槽配合的功率因数

耗、机械损耗和附加损耗组成。电磁设计中一般考虑电磁性能相关的损耗,主要包括定子铜耗、铁心损耗和转子铝耗等。定子铜耗主要由定子相电流和绕组电阻决定。定子槽数不变,改变转子的槽数对电机定子相电流的影响不是特别明显。而定子槽数的改变对定子相电流影响较大。采用分数槽 $q=2.5$ 的各槽配合类型的定子相电流与整数槽比相对较低。采用 $q=2$ 的各槽配合类型其定子电流相对分数槽稍高,但变化不大。而采用 $q=3$ 的各槽配合类型定子相电流明显增加。每极每相槽数的变化会导致每槽导体数的改变,从而影响绕组电阻的大小。随着每极每相槽数的增加,绕组电阻也逐渐变大。二维瞬态场计算后对各槽配合定子铜耗按下式求解:

$$\begin{cases} R_{AC} = k_R \frac{N l_{av}}{\sigma_{Cu} S_c} \\ P_{Cu} = m I^2 R_{AC} \frac{k_R}{\rho_{Cu} \sigma_{Cu}} J_{Cu}^2 m_{Cu} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_{AC} 是一相绕组的交流电阻; k_R 是考虑了集肤效应的电阻折算系数; N 是每相串联匝数; l_{av} 是单匝平均长度; σ_{Cu} 是铜的电导率; S_c 是导体截面面积; P_{Cu} 为定子铜耗; ρ_{Cu} 是铜的密度; J_{Cu} 是绕组内的电流密度; m_{Cu} 是铜的质量。

具体结果比较如图 7 所示。按二维有限元分

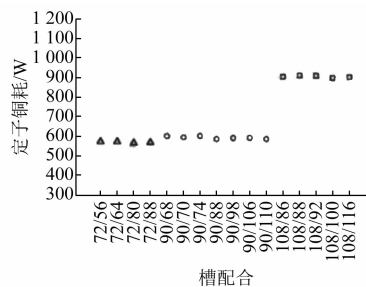


图 7 各槽配合的定子铜耗

析计算可知,随着定子槽数的增加,定子铜耗逐渐增加。每极每相槽数 $q=3$ 的一系列槽配合类型,由于相应的定子相电流较大,导致其定子铜耗相对较高。

目标电机采用铸铝材料作为转子导条材料,其不同槽配合类型的转子导条内损耗 P_{Al} 按下式求解:

$$P_{Al} = \sum_{n=1}^{Q_r} \iiint_V \frac{J_{Al}^2}{\sigma_{Al}} dV \quad (5)$$

式中: J_{Al} 是转子导条的电流密度; σ_{Al} 是铝的电导率; V 是单根转子导条所对应的体域。

具体结果比较如图 8 所示。一般认为,整数槽和分数槽相比,其转子铝耗较低,原因是分数槽绕组的电机气隙谐波含量丰富,容易在转子导条内感应出高频涡流。而同为整数槽,每极每相槽数不同的槽配合,其转子铝耗较为接近。在定子槽数一定时,转子槽数增加,转子铝耗随之增加。转子铝耗由转子导条电阻和转子导条内电流决定。当转子导条数增加,转子内导体面积增加,导条内电流下降,转子铝耗随之下降。然而,从图 8 可以发现,即便采用分数槽 $q=2.5$,只要保证转子导条数较多,转子铝耗也能维持在一个较低的水平。这可能是因为,转子导条本身可以看作阻尼绕组,可以对气隙谐波进行滤波,降低了导条内谐波电流的含量。

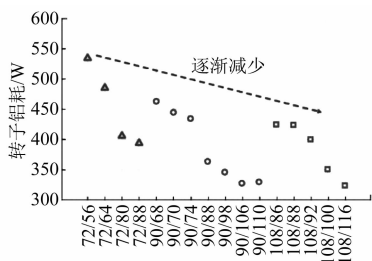


图 8 各槽配合的转子铝耗

图 9 显示了在不同槽配合下的定子铁心损耗 P_{Fe} 的对比图,本文的铁耗计算采用的是 Bertotti 方法^[21]:

$$P_{Fe} = k_h B^2 f + \frac{\pi \sigma_{Fe} d}{6} (Bf)^2 + k_e (Bf)^{3/2} \times 8.67 \quad (6)$$

式中: k_h 和 k_e 是根据材料的损耗曲线提取的磁滞损耗系数与异常损耗系数; B 为铁心的磁通密度

峰值; σ_{Fe} 是铁的电导率; d 为硅钢片厚度。

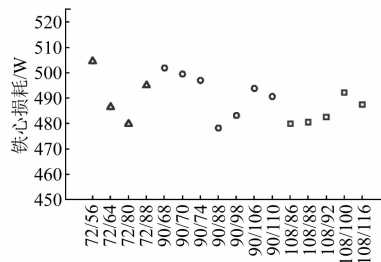


图 9 各槽配合的铁心损耗

从图 9 可以发现,在定转子槽配合相近的情况下,定子铁心损耗都能维持在较低的水平。各槽配合类型的铁心损耗变化不大。 $q=2$ 和 2.5 的一系列槽配合的电机,随着转子槽数的增加,其铁心损耗出现先降后增的趋势。而 $q=3$ 的一系列槽配合的电机,随着转子槽数的增加,其铁心损耗出现先增后降的趋势。

机械损耗和杂散损耗在电机的二维有限元仿真计算中不能求取。机械损耗按经验取额定功率和经验系数的乘积,经验系数取 0.14,机械损耗取 1.05 kW。

综合考虑上述各部分损耗,可以按下式计算出电机的实际效率:

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_N} \right) \quad (7)$$

式中: ΣP 为各损耗总和。

由二维瞬态场有限元分析计算和经验公式计算的各槽配合效率如图 10 所示。从图 10 可以发现,常用的槽配合类型,其效率都基本满足实际设计需要。定子槽数相同情况下的各槽配合类型,随着转子槽数的增加,效率逐渐提高。由上述各损耗具体数据分析对比可以发现,不同的槽配合类型,在定子槽数一定时,铁耗和铜耗没有显著的变化。唯有铝耗随着转子槽数的增加呈下降的趋势,有利于提高效率。

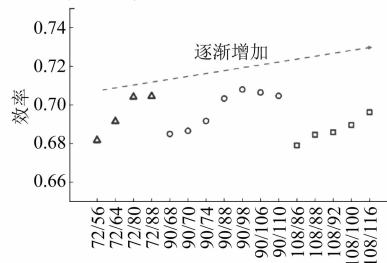


图 10 各槽配合的效率

尽管分数槽电机有降低转矩脉动的优势,但通常认为电机采用分数槽绕组会引起气隙磁密的恶化,从而导致效率和功率因数等性能的下降,所以在设计感应电机时,通常避免使用分数槽电机。但分析对比表明本文中所设计的采用分数槽绕组的感应电机各部分损耗均无明显增加,效率并未出现较大恶化,且在转矩脉动方面具有一定优势。从实际工业需求考虑,更高的效率更符合经济和节能减排的要求。综合考虑得出 72/80、72/88、90/88、90/98、90/106、90/110 等槽配合类型更满足实际需要。

3 不同槽配合对材料的消耗

通过对上述不同槽配合电机电磁性能的研究分析可以得出满足需要的槽配合类型有 90/106 和 90/110。通过仿真软件可以对不同槽配合电机的材料消耗进行分析比较。其各槽配合类型的用铜量如图 11 所示。从图 11 可以发现,随着定子槽数的增加,每槽导体数相对增加,导致电机的用铜量上升。各槽配合电机的具体用铝量和用铁量对比分别如图 12 和图 13 所示。随着转子槽数的增加即转子导条数的增加,各槽配合电机的用铝量逐渐增加。各槽配合类型的用铁量主要受转子槽数的影响,电机定转子开槽的总数目增加,电机的用铁量逐渐减少。

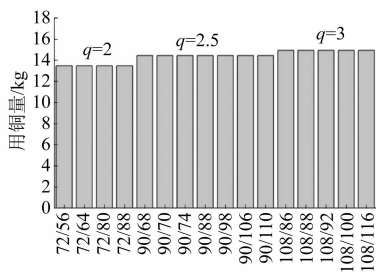


图 11 各槽配合的用铜量

综合电机各方面材料耗费的具体分析,分数槽的各槽配合电机在各种材料的耗费上均处于较为适中的位置,综合性价比较优。通过比较发现,两目标电机方案 90/106 和 90/110 在用铝量和用铁量上各占优势。综合比较考虑 90/106 的槽配合方案成本更低,既符合实际的电磁设计要求,又能满足工业的实际制造与应用要求。

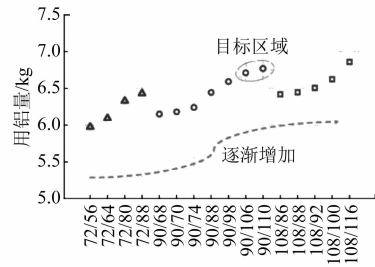


图 12 各槽配合的用铝量

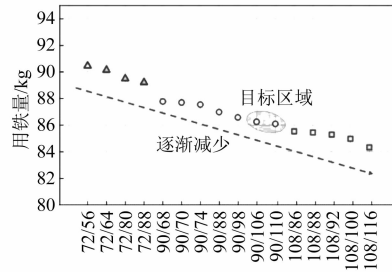


图 13 各槽配合的用铁量

4 试验分析

根据上述研究分析,在综合考虑了电机的转矩脉动、效率、功率因数以及消耗的材料等因素后,决定采用定子槽数为 90、转子槽数为 106 的槽配合电机作为样机,来对仿真分析结果进行验证。样机主要结构参数如表 5 所示。图 14 是通过二维仿真得出的电机在带载情况下的磁密和磁力线分布图,可以看出电机各处的磁密并未过高,满足电机的实际设计需求。图 15 显示了样机和转子铁心,并展示了电机在数控机床的实际应用场景。通过将目标样机与配套的数控机床进行安装试用,证明设计生产的直驱式低速大转矩电主轴样机的转矩脉动和输出转矩都基本满足实际需要。

表 5 电机主要参数

参数名称	参数值
定子外径 D_{se}/mm	590
定子内径 D_s/mm	490
转子内径 D_r/mm	390
铁心长度 l'/mm	80
气隙长度 δ/mm	1
定子槽数 Q_s	90
转子槽数 Q_r	106
每相串联匝数 N	225
并联支路数 a	2

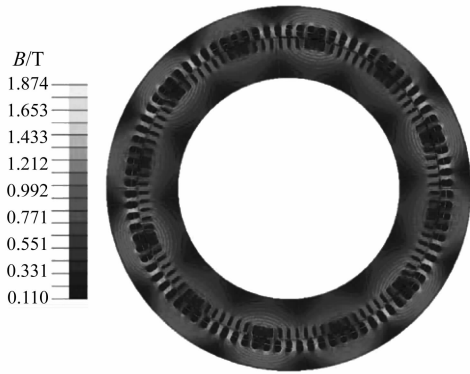


图 14 带载情况下电机磁密和磁力线分布图

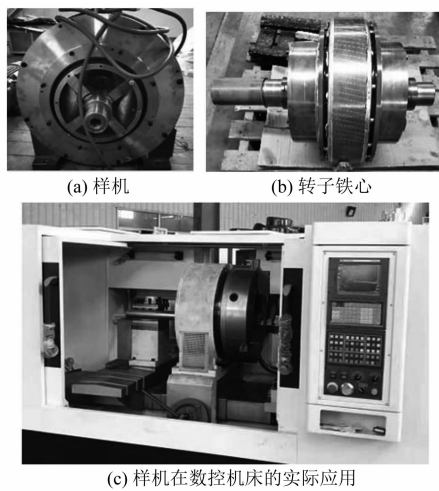


图 15 样机及实际应用场景照片

样机具体的性能实测数据和二维瞬态场仿真计算的电磁性能对比如表 6 所示。通过分析表 6 的试验数据和仿真计算结果可以发现, 由于绕组电阻的差异, 导致了定子相电流和铜耗等性能的误差, 因为在实际的试验过程中, 电阻会随温度的变化而变化, 所以存在误差。而且杂散损耗不能在仿真中直接得出, 而是由经验系数计算得到, 铁耗的计算也是经过后处理得到, 都存在一定的误差, 因此实测数据和仿真计算数据存在一定的差异。但从对电机性能进行理论分析判断的角度来说, 二维瞬态场仿真计算电机电磁性能的准确性较高, 对电机的试验分析提供了有效参考和相互验证。同时, 试验数据也验证了通过选用合理槽配合的分数槽所设计的电机, 其效率和功率因数能维持在较高水平。

表 6 试验结果对比

参数名称	样机实测	有限元仿真
额定电流 I_N/A	20.73	18.14
定子铜耗 P_{Cu}/W	790.18	592.81
转子铝耗 P_{Al}/W	266.81	327.68
铁心损耗 P_{Fe}/W	455.69	493.90
机械损耗 P_{Ω}/W	1 054.91	1 050.00
杂散损耗 P_{LL}/W	94.91	—
效率 η	0.74	0.71
功率因数 $\cos\varphi$	0.74	0.70
转差率 $s/\%$	2.99	2.08
额定转矩 $T_N/(N\cdot m)$	146.93	143.66

5 结 语

本文通过时谐场和瞬态场联合仿真, 以及对不同的槽数组合进行二维建模仿真, 对比了 16 种不同槽配合类型对电机电磁性能和材料耗费等方面的影响。结果表明转子槽数的增加在一定程度上可以优化电机性能, 而定子槽数的选择对电机功率因数、转矩脉动、效率等方面也有较大的影响。当定子槽数过多时, 定子槽漏感会有较大幅度的增加, 从而导致电机各方面性能恶化较为严重。但是通过在定子侧选择合适的分数槽与转子槽数相配合, 可以较为显著地抑制电机的转矩脉动, 并使其他电磁性能均维持在较高水平。本文也证明了时谐场和瞬态场联合仿真, 可以较为迅速准确地对感应电机进行优化仿真设计, 为不同感应电机的优化设计提供了参考思路。

【参 考 文 献】

- [1] 吴玉厚. 数控机床电主轴单元技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-10.
- [2] 潘志城. 电主轴用直驱式永磁同步电机的设计及优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [3] BARCARO M, BIANCHI N, MAGNUSSEN F. Permanent-magnet optimization in permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for a wide constant-power speed range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59(6): 2495.
- [4] KONG Y, LIN M, YIN M, et al. Rotor structure on reducing demagnetization of magnet and torque ripple in a PMA-synRM with ferrite permanent magnet[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11):

- 8108705.
- [5] HWANG C C, CHANG C M, LIU C T. Design considerations for spindle SPM motors with minimized usage of rare-earth magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2013,49(7): 3925.
- [6] HONG D K, CHOI J H, KIM D J, et al. Development of a high speed induction motor for spindle systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2013,49(7): 4088.
- [7] JINTANAWAN T, SILLAPAPINIJ A, AJAVAKOM N. Effects of tolerance design on suppression of electromagnetic-induced acoustic noises and vibration transmission in hard disk drive spindle motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (11): 5129.
- [8] SUNG S J, JANG G H, JANG J W. Vibration and noise in a HDD spindle motor arising from the axial UMF ripple [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013,49(6): 2489.
- [9] JOKSIMOVIC G, MELECIO J I, TUOHY P M, et al. Towards the optimal “slot combination” for steady-state torque ripple minimization: an eight-pole cage rotor induction motor case study [J]. Electrical Engineering,2020,102(1): 293.
- [10] GYFTAKIS K N, KAPPATOU J. The impact of the rotor slot number on the behaviour of the induction motor [J]. Advances in Power Electronics, 2013, 2013: 837010.
- [11] GUNDOGDU T, ZHU Z Q, MIPO J C. Influence of rotor slot number on rotor bar current waveform and performance in induction machines [C] //2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2017.
- [12] WU D, ZHU Z Q. Design trade-off between cogging torque and torque ripple in fractional slot surface-mounted permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2015,51(11): 8108704.
- [13] 鲍晓华,刘佳炜,孙跃,等. 低速大扭矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报,2019,34(6): 1148.
- [14] 唐旭,王秀和,田蒙蒙,等. 基于改变定子齿槽参数的异步起动永磁同步电动机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 电工技术学报,2016,31(23): 1.
- [15] LEE G, MIN S, HONG J P. Optimal shape design of rotor slot in squirrel-cage induction motor considering torque characteristics [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2013,49(5): 2197.
- [16] 代颖,张千帆,宋立伟,等. 抑制车用异步电机电磁噪声的槽配合 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(27): 32.
- [17] BESNERAIS J L, LANFRANCHI V, HECQUET M, et al. Optimal slot numbers for magnetic noise reduction in variable-speed induction motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (8): 3131.
- [18] 中国电器工业协会. GB/T 30549—2014: 永磁交流伺服电动机通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社,2014.
- [19] DI C, PETROV L, PYRHONEN J J, et al. Accelerating the time-stepping finite-element analysis of induction machines in transient-magnetic solutions [J]. IEEE Access,2019,7: 122251.
- [20] EL-REFAIE A M. Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(1): 107.
- [21] FIORILLO F, NOVIKOV A. An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform [J]. IEEE Transactions on Magnetics,1990,26(5): 2904.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

