

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.013

永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机研究

上官璇峰, 蒋思远

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对异步电机功率因数低的问题, 对一种新型电机—永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机进行了研究。介绍了该电机的基本结构和工作原理, 创新性地采用了双鼠笼的结构, 并对笼间磁轭厚度对电机性能的影响进行了分析。利用有限元分析方法对该电机和双转子单鼠笼异步电机及普通异步电机分别进行了仿真分析, 通过比较3种电机在不同负载下的运行状况来研究电机的起动能力和稳态运行性能。仿真研究结果表明, 永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机较双转子单鼠笼异步电机和普通异步电机具有更高的功率因数和效率, 较双转子单鼠笼异步电机具有更好的起动性能。

关键词: 永磁感应电机; 双鼠笼; 双转子; 起动能力; 稳态性能

中图分类号: TH39; TM359.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)07-0757-06

Study on dual-rotor permanent magnet induction motor with double squirrel cage

SHANG-GUAN Xuan-feng, JIANG Si-yuan

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Aiming at the low power factor of asynchronous motor, a novel type of motor—the dual-rotor permanent magnet induction motor (PMIM) with double squirrel cage was studied. The basic structure and working principle of the motor was introduced, the structure of the double squirrel cage was innovatively designed and the influence of the yoke thickness on the performance of the motor was analyzed. Then the finite element method was used to simulate the motor, the PMIM with single squirrel cage and the common induction motor respectively. The starting ability, efficiency and power factor were studied by comparing the running state of the three kinds of motor under different load. The simulation results indicate that compares with the common induction motor and the PMIM with single squirrel cage, the PMIM with double squirrel cage has higher power factor and efficiency. And it also has better starting performance than that with single squirrel cage.

Key words: permanent magnet induction motor; double squirrel cage; dual rotor; starting performance; steady-state performance

0 引言

异步电机优点突出、应用广泛,但其功率因数和效率低成了制约其发展的主要因素^[1]。永磁同步电机虽然功率因数和效率高,但其本身却不能自启动^[2]。为了更好的解决上述问题,相关学者提出了双转子的电机结构,但就目前而言,国内外关于该类电机的参考

文献较少。2002年,我国学者冯浩、刘玉军等人^[3]对双转子异步电机进行了理论分析,并用样机实验验证了其具有更高的效率和功率因数。在2004年,TROESTER E等学者^[4]对该类电机进行了研究,其中包含对永磁感应电机模型的有限元分析,并将大直径直驱式永磁感应电机用于风力发电。在2007年,国内一些学者也对该类电机进行了一些优化设计,制作了样

收稿日期:2016-12-12

作者简介:上官璇峰(1965-),男,河南滎池人,博士,教授,硕士生导师,主要从事轴向磁通永磁电机、直线电机及其控制性能分析、优化设计方面的研究. E-mail:sgxf@hpu.edu.cn

机,并通过样机试验发现双转子单鼠笼异步电机自启动较为困难^[5]。随后在 2012 年,法国亚眠大学的 ANA MARIA GAZDAC 等人^[6-7]指出了双转子异步电机的几种不同结构,分析不同材料对电机性能的影响及由于铜耗和铁耗引起的热效应。2013 年,ANA MARIA GAZDAC, LINO DI LEONARDO 等学者^[8]又对该类电机进行了深入研究,分析了双转子电机的等效电路并提出了控制策略;同年,中国学者刁统山、王秀和^[9]提出了永磁感应电机的直接功率控制策略并进行了仿真。但上述双转子电机的结构仍为单鼠笼,且并未对其起动性能进行研究和优化。

本研究将对一种新型电机—永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机进行研究,介绍该电机的基本结构和工作原理,利用有限元分析方法对该电机进行仿真分析,以验证永磁体助磁的双鼠笼双转子异步电机是否较普通异步电机功率因数和效率更高,起动性能更好。

1 电机的基本结构和工作原理

1.1 电机结构

永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机结构示意图如图 1 所示。

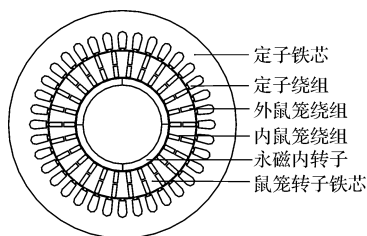


图 1 永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机截面图

它由定子、鼠笼转子和永磁转子 3 个部分组成。其中,定子由铁芯和三相对称绕组组成,鼠笼转子由铁芯、内鼠笼绕组和外鼠笼绕组组成,永磁转子由铁芯和面贴式永磁极组成。有内、外两个气隙。

1.2 工作原理

双转子双鼠笼异步电动机采用定子绕组电流和内转子永磁极共同励磁。永磁极所产生磁场的主磁通分为两部分:①经内外气隙同时与内鼠笼、外鼠笼和定子绕组相交链;②经内气隙与双鼠笼间磁轭,仅与内鼠笼绕组相交链。

定子电流所产生磁场的主磁通也分两部分:①经内外气隙同时与内鼠笼、外鼠笼相交链;②经外气隙与双鼠笼间磁轭,仅与外鼠笼绕组相交链。

定子电流所产生磁场与永磁转子永磁场之间作用,产生电磁转矩,使得永磁转子同步旋转,这两种形成合成励磁磁场。合成励磁磁场与鼠笼转子之间有相对运动,在内外鼠笼绕组中感应交流电流。内外鼠笼绕组中电流也产生同步旋转的磁场和合成励磁磁场共同产生气隙磁场,这两种磁场之间作用产生异步转矩,使鼠笼转子运转。

双转子单鼠笼电机由于内气隙(即笼型转子和永磁转子之间的气隙)的存在,增大了励磁回路的磁阻,导致双转子异步电动机的起动比普通异步电动机困难。与双转子单鼠笼异步电机相比,双转子双鼠笼电机最大的区别在于鼠笼转子间的磁轭,磁轭作为磁路,对改善电机的起动和运行性能,发挥一定作用。故本文对磁轭厚度对电机性能的影响特别予以分析,对该电机的研究提供了有价值的参考。

1.3 功率因数的提高

永磁体助磁的异步电机定子绕组产生的感应电势为:

$$\dot{E}_1 = j4.44f_1 N_1 k_w (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_m) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varphi}_1$ —定子电流产生的励磁磁通; $\dot{\varphi}_m$ —永磁体励磁作用产生的磁通; f_1 —电源频率,Hz; N_1 —每相定子绕组的串联匝数; k_w —基波绕组系数。

在普通异步电机中,只存在定子励磁电流产生的励磁磁通 $\dot{\varphi}_1$,而永磁体助磁的异步电机增加了内转子永磁体励磁作用产生的磁通 $\dot{\varphi}_m$ 。由式(1)可知,若需要产生与普通异步电机相同大小的感应电势 \dot{E}_1 , $\dot{\varphi}_m$ 越大,则所需定子励磁电流产生的励磁磁通 $\dot{\varphi}_1$ 就越小,即励磁电流就越小。所以,提高了电机的功率因数,也有利于提高电机的效率。

2 特性分析

本研究的永磁体助磁双转子双鼠笼异步电机和双转子单鼠笼异步电机均由型号为 Y160M4 普通异步电动机改制而成的。为了使研制的双转子异步电动机的性能与普通异步电机作一个合适的比较,3 台电机的定子铁芯和定子绕组相同,并保证定子与笼型转子具有相同的气隙长度。永磁转子的作用为助磁,以提高功率因数,故永磁体厚度的选取不应太薄,尽量使电机的功率因数接近 1。电机的主要设计参数如表 1 所示。

需要特别说明的是,本研究中除磁轭厚度对电机性能的影响进行研究外,电机特性对比研究时的参数均如表 1 所示。

表1 电机的主要设计参数

部件	参数/单位	值
定子	外径/mm	260
	内径/mm	170
	轴向长度/mm	155
	槽数	36
	线圈匝数	28
鼠笼转子	外气隙长度/mm	0.5
	外径/mm	169
	内径/mm	108
	槽数	52
永磁转子	永磁体极数	4
	永磁体厚度/mm	8
	极弧系数	1
	永磁体矫顽力/(kA·m ⁻¹)	930
	内气隙长度/mm	1

仿真模型截面如图1、图2所示。

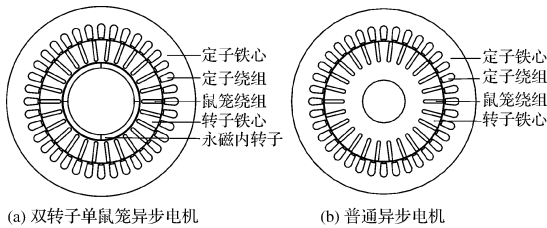


图2 仿真模型截面图

2.1 电磁场分析

为了把双转子双鼠笼异步电机的气隙磁场与原普通异步电机做一个直观的比较,本研究用有限元的方法对两种电机作电磁磁场分析,电机空载稳定运行时,气隙磁感应强度如图3所示。

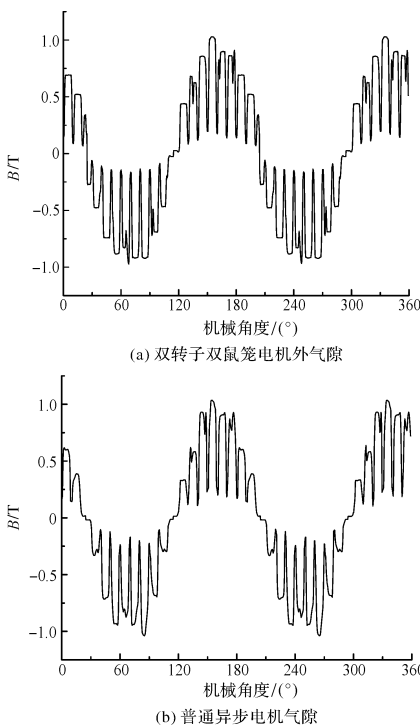


图3 气隙磁感应强度

由图3可以看出,双转子异步电机外气隙的磁感应强度和普通异步电动机气隙磁密基本相同,但普通异步电机的磁场由电机绕组的励磁电流产生,而在双转子异步电动机中,建立气隙磁场有两种励磁磁源,分别是通以励磁电流的电机绕组和永磁体,由式(1)可知,由于永磁体励磁作用产生的磁通的存在,励磁电流将会减小,进而提高功率因数。不同负载下的相电流有效值如表2所示。

表2 3种电机在不同负载下的相电流有效值(单位:A)

类型负载	普通异步电机	双转子单鼠笼异步电机	双转子双鼠笼异步电机
空载	8.943	4.055	4.382
20%负载	9.680	5.774	5.395
40%负载	11.185	8.542	7.959
60%负载	14.060	11.701	11.248
80%负载	17.469	15.821	15.098
额定负载	22.230	19.311	18.902

双转子单鼠笼异步电机永磁体励磁作用产生的磁场,一部分经内、外气隙与定子绕组相交链,另一小部分则直接穿过电机笼型转子的磁轭回到永磁体,降低了永磁体的利用率,为了避免这种浪费,不少学者对永磁体和磁轭厚度的折中选取做了大量工作^[10]。本研究中把磁轭设计到笼型转子的中部,永磁极所产生磁场的主磁通和定子电流所产生磁通经磁轭都有笼型绕组与之交链,从而提高了永磁体的利用率。

电机磁轭厚度为2 mm和4 mm时磁感应强度的切向分量如图4所示。

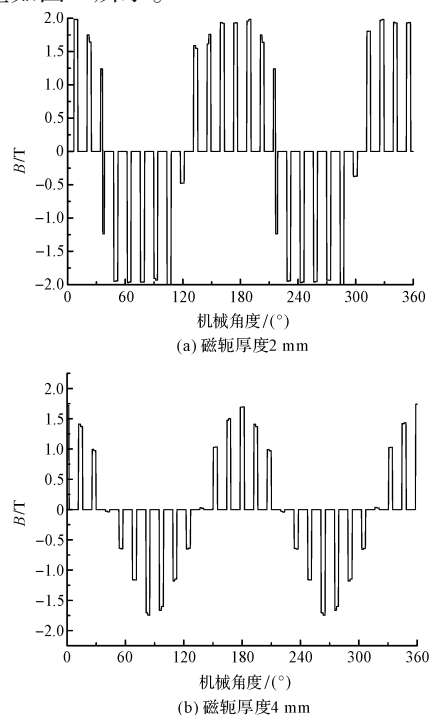


图4 电机磁轭处磁感应强度的切向分量

由图 4 可以看出,磁轭厚度为 2 mm 时,磁轭处磁感应强度的切向分量峰值为 1.942 T,磁路饱和程度较高;磁轭厚度为 4 mm 时,磁轭处磁感应强度的切向分量峰值为 1.742 T,饱和程度低。为了进一步研究磁轭厚度对电机性能的影响,本研究分别对磁轭厚度增加到 4 mm 和 6 mm 时利用有限元方法进行仿真,其仿真结果在 2.2 节和 2.4 节中具体分析。

2.2 电机起动性能分析

双转子单鼠笼异步电动机的起动比普通异步电动机困难,而本研究采用的双鼠笼的结构能明显的改善双转子电机的起动性能。普通异步电机,双转子单鼠笼电机及本研究的双转子双鼠笼电机空载起动时的速度曲线如图 5 所示。

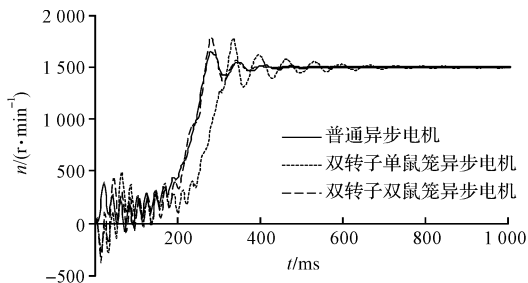


图 5 空载起动速度曲线对比

可以看出,双转子单鼠笼电机起动困难,在近 700 ms 时速度基本趋于稳定且波动时间较长,双转子双鼠笼电机就起动时间而言,和普通异步电机基本相同,在一定程度上改善了双转子单鼠笼电机起动困难的问题。

本研究为了进一步验证双转子双鼠笼异步电机的起动性能,通过有限元软件逐步加大负载转矩使其带载起动,50% 额定负载起动速度曲线对比如图 6 所示。

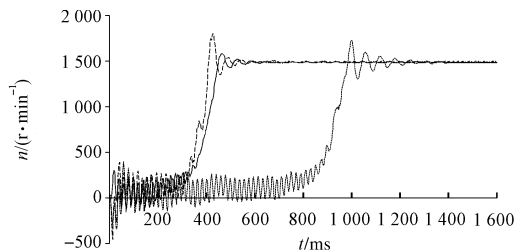


图 6 50% 额定负载起动速度曲线对比

由图 6 可知,双转子双鼠笼异步电机在 50% 的额定负载下仍能较快的起动,而双转子单鼠笼电机起动困难,起动时间将近双鼠笼的 2.5 倍。继续加大负载后,在 60% 额定负载下,双转子单鼠笼电机不能自起动。双转子双鼠笼电机直到负载转矩加大到 90% 额定负载的情况下仍能自起动,直至额定负载转矩下才不能起动。

这些结果表明,双转子双鼠笼异步电机有很好的动态性能,能够较好地实现在较大负载下的自起动,虽然在起动能力上与普通异步电机还有差距,但较双转子单鼠笼异步电机已有明显改善,因此,电机的应用不限于风扇等只需要低起动转矩类型的负载。

随后,本研究把双转子双鼠笼电机磁轭厚度增加到了 4 mm 和 6 mm 并利用有限元方法分别进行仿真,曲线如图 7 所示。

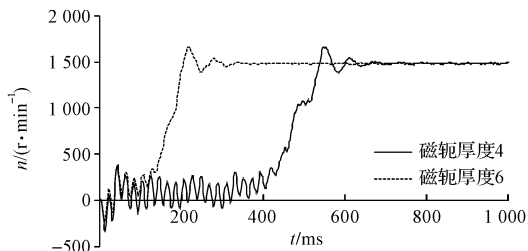


图 7 改变磁轭厚度时电机在额定负载下起动速度曲线

由图 7 可以看出,磁轭厚度增加为 4 mm 时,电机在额定负载下能较快起动,磁轭厚度增加到 6 mm 时,电机在 300 ms 时基本到达稳定速度,相比磁轭厚度为 2 mm 的双转子双鼠笼异步电机负载起动能力大幅改善。

2.3 发电机类型的负载下的起动能力对比

在这一部分中,本研究把双转子双鼠笼异步电机在发电机负载下的起动能力与其他电机做了对比分析。发电机负载的增加随转速从零到 1500 r/min 呈线性从零增长至额定负载 71.94 N·m,总负载转动惯量为转子惯量 J_r (其中双转子电机为鼠笼转子) 的 5 倍,曲线如图 8 所示。

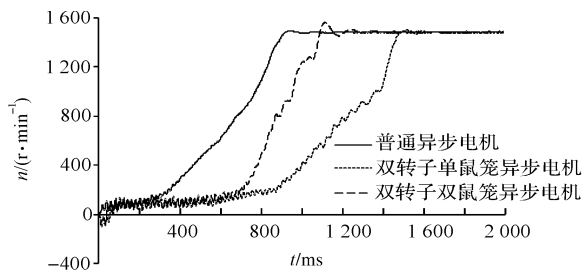


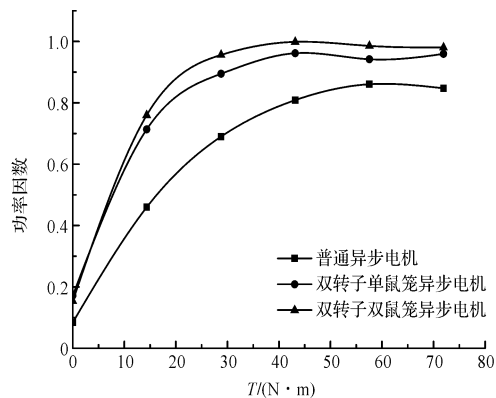
图 8 发电机类型的负载,5 倍转子惯量下的起动能力对比

从图 8 中看出,双转子双鼠笼异步电机在发电机类型的负载和五倍转子转动惯量下仍能较快起动,起动能力比普通异步电机稍差,比双转子单鼠笼异步电机有较大改善。

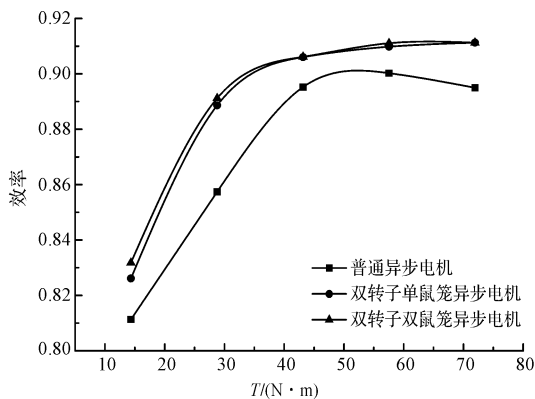
2.4 仿真结果的计算分析

为了进一步将本研究所电机与双转子单鼠笼电机及普通异步电机进行特性对比,笔者利用有限元分析软件对 3 种电机分别在空载,20% 负载,40% 负载,60% 负载,80% 负载和 100% 负载(额定负载转矩)下

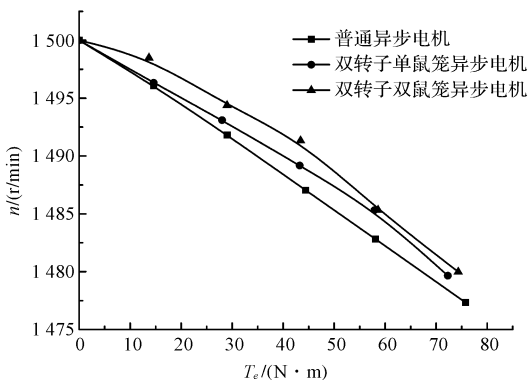
的运行状况进行进一步的仿真,并对仿真结果进行分析计算,分别得到了3种电机的功率因数、效率以及机械特性曲线如图9所示。



(a) 功率因数对比曲线



(b) 效率对比曲线



(c) 机械特性对比曲线

图9 电机稳态运行性能对比

由图9(a)可以看出,永磁体助磁的双转子异步电机较普通异步电机改善功率因数效果明显,且在20%~60%负载时改善效果最好,大幅改善了异步电动机在轻载时功率因数低的弊端,验证了双转子异步电机相较于普通异步电机能够提高功率因数的理论观点。

对比双转子双鼠笼和单鼠笼的功率因数,可以看出,双转子双鼠笼的功率因数比单鼠笼的进一步提高,其原因在于双鼠笼结构永磁极所产生磁场的主磁通的一部分可以经内气隙与双鼠笼间磁轭,与内鼠笼绕组

相交链,从而利用这一部分磁通,提高了永磁体材料的利用率,使得功率因数进一步提高。

由图9(b)可以看出,双转子异步电动机较普通异步电机效率有较大提高,其主要原因在于励磁电流的减小使得定子铜耗减小,随着负载的增加,电流中的有功分量所占比例逐渐增大,改善效率的作用逐渐减小。另外,由于双鼠笼的结构提高了永磁体的磁场利用率,使得励磁电流较单鼠笼结构小,定子铜耗比双转子单鼠笼的要小,故效率稍微提高,且在较宽的负载转矩范围内保持较高的效率。

由图9(c)可以看出,从机械特性看,双转子电机的机械特性的硬度提高,在相同负载下,电机的转差率 s 变小,那么因转差引起的功率损耗也将减小,这也是双转子异步电机效率提高的原因之一,双鼠笼结构的机械特性最硬,机械特性的硬度的提高也标志着电机过载能力提高。

磁轭厚度不同时的功率因数效率对比如表3所示。

表3 磁轭厚度不同时的功率因数效率对比

磁轭厚度/mm	功率因数	效率
磁轭厚度 2	0.980	0.911
磁轭厚度 4	0.971	0.905
磁轭厚度 6	0.966	0.899

结合2.2节中所述,并由表3可以看出,当磁轭厚度增加时,和磁轭厚度为2mm时的双转子双鼠笼异步电机相比,电机的负载起动能力提高,效率、功率因数下降。

故电机的起动能力、效率、功率因数均与外转子磁轭部分的厚度密切相关,磁轭部分越薄电机的功率因数、效率越高,在磁轭厚度变大时,电机的负载起动能力明显提高,但功率因数、效率降低,但降低速率并不大。另外,转子的刚性也与外转子磁轭密切相关,磁轭越薄则刚性越差,故在实际使用中,为了保证电机转子机械强度,磁轭不应选的太薄。在保证外转子刚性和电机负载起动能力的前提下,应尽量降低磁轭厚度,以保证电机的经济运行。

3 结束语

本研究对一种新型的高效节能异步电机—永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机进行研究。文章介绍了该电机的基本结构和工作原理,并对其起动性能及运行特性进行分析。

有限元仿真表明:该电机起动能力较永磁体助磁的单鼠笼双转子异步电机要提高很多,略差于普通鼠

笼电机;该电机在较宽的速度范围内具有较高的运行效率和功率因数,明显优于普通鼠笼电机;该电机的机械特性也较硬;永磁体的利用率也较高。

参考文献 (References) :

[1] 傅丰礼. 高效异步电动机国际发展动态[J]. 电机技术, 2009(4):1-5.

[2] AZARI M N, MIRSALEM M. Line-start permanent magnet motor synchronization capability improvement using slotted solid rotor[J]. **IET Electric Power Applications**, 2013, 7(6):462-469.

[3] 冯 浩,刘玉军,钟德刚,等. 双转子异步电动机的研究[J]. 中小型电机, 2002, 29(1):19-22.

[4] TROSTER E, SPERLING M, HARTKOPT T. Finite element analysis of a permanent magnet induction machine [C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina: IEEE, 2006.

[5] 王 朔. 双转子异步电动机的研究[D]. 杭州:浙江工业

大学信息工程学院, 2007.

[6] GAZDAC A M, MARTIS C S, MABWE A M, et al. Analysis of the material influence on the performances of the dual-rotor permanent magnet induction machine[C]. International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012), Brasov: IEEE, 2012.

[7] GAZDAC A M, MPANDA M A, BETIN F, et al. Investigation on the thermal behavior of the dual-rotor permanent magnet induction machine [C]. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal: IEEE, 2012.

[8] GAZDAC A M, LEONARDO L D, MABWE A M, et al. Electric circuit parameters identification and control strategy of dual-rotor permanent magnet induction machine [C]. Electric Machines & Drives Conference, Chicago: IEEE, 2013.

[9] 刁统山,王秀和. 永磁感应电机直接功率控制[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(4):12-18.

[10] 赵 晓,冯 浩. 基于 ANSYS 的双转子异步电机结构优化设计[J]. 机械工程师, 2010(4):63-64.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

上官璇峰,蒋思远. 永磁体助磁的双转子双鼠笼异步电机研究[J]. 机电工程, 2017, 34(7):757-762.

SHANG-GUAN Xuan-feng, JIANG Si-yuan. Study on dual-rotor permanent magnet induction motor with double squirrel cage[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(7):757-762.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 724 页)

参考文献 (References) :

[1] 卜继玲,钟汉文,周 炜,等. 系统仿真技术在橡胶悬架研发中的应用[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(1):47-54.

[2] 崔国罡,王社峰,张文举,等. 一种新型车用橡胶弹簧的改进设计研究[J]. 宁波工程学院学报, 2013, 25(3):70-76.

[3] 赵振东,雷雨成. 橡胶元件在汽车悬架中的应用分析[J]. 汽车技术, 2006(1):19-22.

[4] TABADDO F. Elastic stability of rubber products[J]. **Rubber Chemical and Technology**, 1987, 60(5):957-965.

[5] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

[6] 龚积球. 橡胶件的工程设计及应用[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2003.

[7] 王 伟,邓 涛,赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(4):8-10.

[8] 朱艳峰,刘 锋,黄小清,等. 橡胶材料的本构模型[J]. 橡胶工业, 2006, 53(2):119-125.

[9] 韩智慧,万里翔,何宇林,等. 有限元法在车辆橡胶元件中的应用[J]. 弹性体, 2010, 20(4):34-38.

[10] 张广世,孔 军,宋志强. 基于有限元法进行铁道车辆橡胶元件的设计[J]. 弹性体, 2001, 11(6):51-54.

[11] 赵 华,王敏杰,张 磊,等. 聚氨酯弹性体粘弹本构建模[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(4):512-517.

[编辑:张 豪]