

表贴式无轴承永磁电动机的设计研究

周晓燕^{1,2}, 章跃进², 仇志坚²

(¹ 青岛理工大学, 青岛 266033; ² 上海大学, 上海 200433)

摘要: 利用电磁场有限元法对表贴式无轴承永磁电动机进行了设计研究, 提出了无轴承永磁电动机的设计特点, 深入研究了永磁体极弧系数对无轴承电机的悬浮性能、气隙磁密以及反电势的影响。最后对样机进行了反电势的测试, 测试结果和计算值吻合较好。

关键词: 表贴式无轴承永磁电动机; 极弧系数; 悬浮; 气隙磁密; 反电势

中图分类号: TM317 文献标识码: A 文章编号: 1004-7027(2014)04-0000-00

0 引言

1 表贴式无轴承永磁电动机的设计思路

2 表贴式无轴承永磁电动机的设计特点

3 表贴式无轴承永磁电动机的设计方法

4 表贴式无轴承永磁电动机的设计结果

5 表贴式无轴承永磁电动机的设计结论

6 表贴式无轴承永磁电动机的设计展望

7 参考文献

1 引言

无轴承永磁电动机的定子槽内嵌入两套绕组, 其中转矩绕组和转子永磁体极对数相同, 它们相互作用产生电磁转矩, 悬浮绕组极对数与转子永磁体不同, 依靠破坏气隙磁场的对称性产生悬浮所需要的悬浮力。与传统机械轴承电机相比, 无轴承电机具备无接触、无摩擦等优点^[1], 它的出现开辟了高速电机研究领域的新方向, 具有重要的理论意义和实际价值。

无轴承电机的设计方案除了满足电磁转矩的要求之外, 还要满足提供稳定悬浮力的悬浮要求, 需要综合考虑两者要求。文献^[2]分别对转矩绕组和悬浮绕组进行设计, 综合比较各种转子结构, 采用表贴式结构, 之后给出了表贴式永磁体厚度对悬浮控制的影响。文献^[3]利用磁场有限元法对表贴式永磁型无轴承电机进行了电磁设计, 研究了电机的关键退磁区域以及永磁体厚度对悬浮性能的影响。

本文利用电磁场有限元法对表贴式无轴承永磁电动机进行电磁设计, 重点研究表贴式结构永磁体极弧系数对电机悬浮力和稳定悬浮性能的影响, 并综合考虑其对转矩性能的影响, 在此基础上, 提出了合理的设计方案, 并制作样机进行实验。

2 表贴式无轴承永磁电动机的设计思路

由于转矩绕组和悬浮绕组的相互独立性, 无轴承电机设计的基本思路是采用传统电机的设计方法对电机的基本尺寸和转矩绕组进行设计, 根据转矩绕组估算方案计算所需最大悬浮力, 在满足提供最大悬浮力的基础上对悬浮绕组进行设计, 之后对转矩性能进行校核, 得到优化的电磁方案。本文设计的基本要求: 额定功率 P_N , 额定转速 n_N , 额定电磁转矩 T_N 的表贴式无轴承永磁电动机。

由于无轴承结构的特殊性, 无轴承永磁电动机的设计具有以下特点: (1) 表贴式无轴承永磁电动机极对数要满足 $p_m = 2p_s$ 。考虑电机转速需要, 转子取 p_r 对极结构, 则悬浮绕组极对数可以取 p_s 或 $2p_s$, 为便于结构设计, 这里悬浮绕组极对数取 p_s 。(2) 由于定子槽内嵌入两套绕组, 无轴承永磁电动机的体积要大于同功率的传统永磁电机体积 V 。(3) 定子槽内两套绕组结构, 在设计过程中要注意槽满率的问题, 一般转矩绕组的槽满率不大于 0.6 , 给悬浮绕组预留出足够的空间。(4) 为了控制需要, 悬浮绕组的 δ 相轴线和永磁体 N 极以及 ϵ 轴正向应重合。(5) 悬浮绕组提供的悬浮力要满足抵消转子重力和最大偏心状态下的磁拉力之和。(6) 考虑悬浮控制的稳定性, 要求加载后悬浮力脉动小。

电机基本尺寸的初步设计

为了减少齿槽转矩,降低转矩脉动,提高运行稳定性,本文采用 u 极 y 槽的分数槽结构,利用 $\text{O} \delta y$ áiBi 软件对电机的基本尺寸进行估算。电机的基本参数如表 y 所示。图 y 和图 y 为静态空载磁场分布。

表 y 电机基本尺寸

参数/单位	数值	参数/单位	数值
定子内径 $\div \text{Eaa}$	úy	转子外径 $\text{N}_i \text{Eaa}$	úp
转子内径 $\text{N}_0 \text{Eaa}$	úp	气隙长度 úEaa	y
永磁体厚度 óEaa	úÜÖ	永磁体材料	óúíàè
轴向长度 EÉaa	úú		

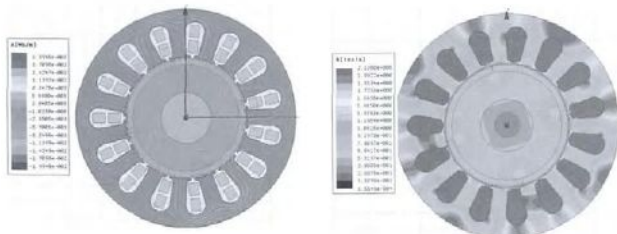


图 y 空载磁力线分布

图 y 空载磁密分布

u 极弧系数对悬浮力及悬浮脉动的影响

在无轴承永磁电动机设计中,永磁体尺寸除了要满足常规电磁转矩要求,还要满足提供较大和稳定的悬浮力的要求。文献 $[\text{úúú}]$ 提出由于转子偏心产生的磁拉力随着永磁体厚度的增加而增加,因而抵消所需悬浮电流随之增大,所以电机设计过程中,在满足其他电磁性能的基本要求的前提下,应选择稍薄的永磁体。

图 $ú$ 和图 $ü$ 为分别为转子向 i 轴正方向偏心 pÁyaa , 旋转一周,永磁体极弧系数 $\text{ú}_a \text{ÉpÜúó}$, pÁíópÜöóý 四种情况下不同转子位置处的偏心磁拉力,其中 I_i 为 i 轴方向的磁拉力, I_o 为 δ 轴方向

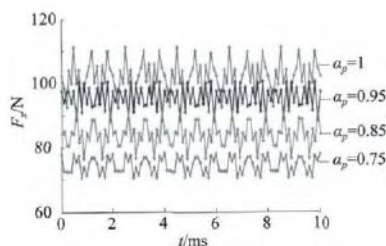


图 $ú$ 偏心磁拉力 I_i 和极弧系数的关系

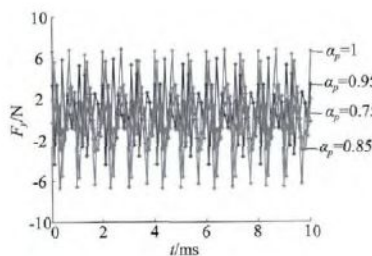
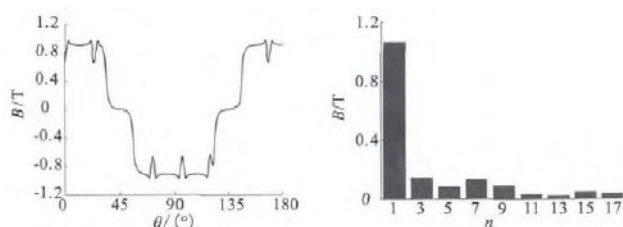


图 $ü$ 偏心磁拉力 I_o 和极弧系数的关系

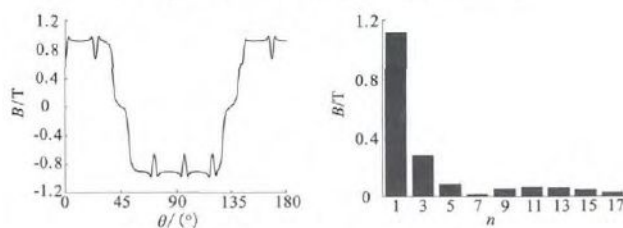
的磁拉力。从图中可以看出,随着极弧系数的增大,偏心磁拉力的幅值随之增大,相应的,抵消偏心磁拉力所需的负载悬浮电流随之增大;同时,脉动幅度也随极弧系数的增大而增加,影响悬浮控制的稳定性。因此,在满足其他要求的前提下,表贴式无轴承永磁电动机应选择较小的极弧系数。

u 极弧系数对电机转矩性能的影响

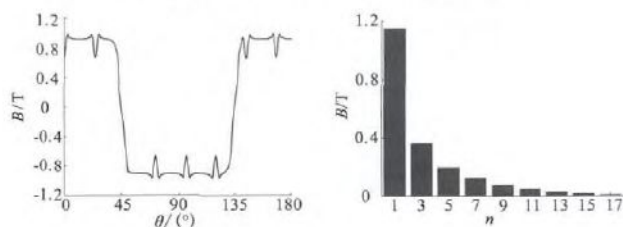
极弧系数的大小直接影响气隙磁密的分布,进而影响电机的各项性能。图 ó 分别为 $\text{ú}_a \text{ÉpÜúó}$, pÁíópÜöóý 时的气隙磁密及其谐波分布。从图 ó 中可以看出,极弧系数从 pÜúó 到 y ,波形中基波和各次谐波含量均相应越大。



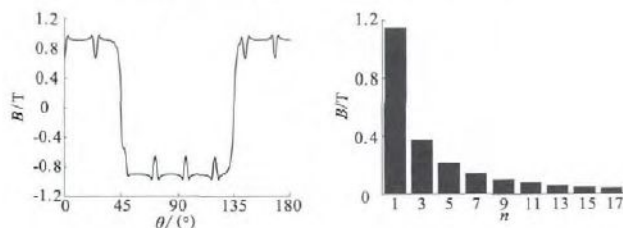
(a) $\alpha_p = 0.75$ 时的气隙磁密和气隙磁密谐波



(b) $\alpha_p = 0.85$ 时的气隙磁密和气隙磁密谐波



(c) $\alpha_p = 0.95$ 时的气隙磁密和气隙磁密谐波



(d) $\alpha_p = 1.0$ 时的气隙磁密和气隙磁密谐波

图 $ü$ 气隙磁密及其谐波分布

表 y 为四种情况下的反电势波形基波和 u 次谐波的有效值。可以看出,随着极弧系数的减少,该结

表 y 极弧系数和反电势谐波关系

极弧系数 ú_a	y	pÜöó	pÜíó	pÜúó
基波有效值 $\text{n}_y \text{Éi}$	ýýpÜóý	ýýpÜöó	ýýpÜýü	ýýpÜüü
u 次谐波有效值 $\text{n}_u \text{Éi}$	íÜpá	úÜíí	óÜýý	úÜüü

构电机空载反电势基波幅值略有降低,而 5 次谐波含量明显减少。

综合以上分析,样机的极弧系数取 0.6,图 6 为样机额定转速时 ϕ 相计算反电势。

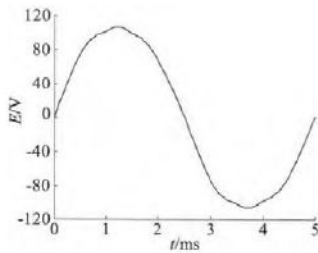


图 6 ϕ 相计算反电势

测试反电势

图 7 为搭建的测试实验平台,采用直流电机拖动,由于目前实验室直流原动机和直流电源的限制,实验测试的转速为 1500 r/min,测试反电势波形如图 8 所示,示波器为两路输出。测试结果和计算结果吻合较好。



图 7 样机实验平台

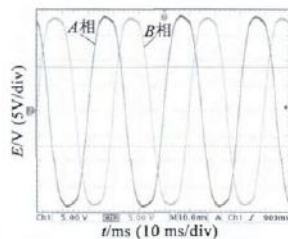


图 8 测试反电势波形(截图)

(上接第 10 页)

系中,以粗糙集展开赋权并显示性能指标的重要性,突出了应用于电传动系统牵引电机不同类型的特点,方便于选型及优化,缩短了开发周期。

(2) 综合了台架试验数据、仿真结果及生产厂家实车采集三方面数据,验证了应用粗糙集理论下牵引电动机评价方法的准确性。观察发现永磁同步电机具有较高的综合评价指标,研究价值较高。

参考文献

- [1] 孙博,胡顺安,周俊,等.国内非公路矿用自卸车发展现状研究[J].煤矿机械,2013(12):1-4.
- [2] 李孟良,刘伏萍,陈燕涛,等.基于 AHP 的混合动力客车排放和油耗性能评价[J].江苏大学学报(自然科学版),2013(4):1-5.
- [3] 孙博,胡顺安,周俊,等.国内非公路矿用自卸车发展现状研究[J].煤矿机械,2013(12):1-4.

结语

本文对表贴式无轴承永磁电动机进行了设计研究,重点研究了永磁体极弧系数对电机悬浮性能的影响,同时考察了极弧系数对气隙磁密和空载反电势的影响。提出在满足其他电磁性能的前提下,选择较小的极弧系数有利于得到较优化的悬浮性能。

参考文献

- [1] 仇志坚.永磁型无轴承电机的基础研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [2] 邓智泉,严仰光.无轴承交流电动机的基本理论和研究现状[J].电工技术学报,2011(12):1-5.
- [3] 年珩.无轴承电机的设计与控制研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [4] 严欣平.无轴承永磁同步电机电磁设计与控制策略研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [5] 张涛.无轴承永磁同步电机参数设计及抑制振动控制研究[D].镇江:江苏大学,2011.

作者简介:周晓燕(1985-),女,博士研究生,讲师,研究方向为永磁电机电磁场分析及永磁电机设计。

- [6] 王伟,王庆年,初亮,等.混合动力汽车驱动电机性能评价体系研究[J].农业机械学报,2011(12):1-5.
- [7] 柴海波,鄢治国,况明伟,等.电动车驱动电机发展现状[J].微特电机,2011(12):1-5.
- [8] 舒服华.粗糙集在电能质量综合评价中应用[J].电力自动化设备,2011(12):1-5.
- [9] 王国胤,姚一豫,于洪.粗糙集理论与应用研究综述[J].计算机学报,2011(12):1-5.
- [10] 聂燕飞.基于层次分析法和灰色关联分析的油田科技人才评价模型研究[J].上海:上海交通大学,2011.

作者简介:金晶(1985-),副教授,研究方向为机车车辆传动设计与控制。