

轴向磁场调制型磁力齿轮设计与验证

王 杰^[1], 曹海东^[2], 黄苏融^[2]

(1.上海电驱动有限公司, 2.上海大学, 上海 200240)

摘要: 与传统机械齿轮箱不同, 轴向磁力齿轮采用电磁变级变速原理, 使得输入端和输出端之间无机械接触, 具有无磨损, 不需润滑, 免维护等优点。本文采用二维动态场与三维静态场有限元法设计了磁力齿轮, 样机试验数据比较表明, 该有限元算法准确, 样机设计合理可行。

关键词: 磁力齿轮; 有限元仿真;

Design and Verify of Axial-Field Flux Modulation Magnetic Gear

WANG Jie^[1], CAO Hai-dong^[2], HUANG Su-rong^[2]

(1.Shanghai Edrive Co., Ltd, 2.Shanghai University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Comparing to the traditional gear box, the axial-field flux modulation magnetic gear takes the advantage of no rubbing, no lubricating, no repairing by changing the ratio changing the poles. One kinds of axial-field modulation magnetic gear is designed by 2D transient field and 3D static field finite element method. The experimental results show that the finite element analysis is precision and the prototype design is rational.

Key words: Magnetic gear; Finite element simulation;

0 引言

齿轮箱是动力传动系统中应用广泛的一种变速装置, 与传统机械齿轮箱不同, 磁力齿轮输入端和输出端之间无接触、无机械摩擦和磨损, 不需润滑, 维护方便; 同时具有自过载保护功能, 保护齿轮及设备不受冲击, 增加系统可靠性, 提高使用寿命。

随着永磁材料性能的不断提高, 磁力齿轮引起工程界越来越多的关注。最早出现的直接耦合式磁力齿轮为齿对齿结构, 永磁体利用率不高, 转矩密度低。2001年英国谢菲尔德大学D. Howe等首次提出基于磁场调制原理的磁力齿轮^[1-4], 所有齿轮永磁体均参与转矩传递, 转矩密度大大提高。2005年丹麦奥尔堡大学P. O. Rasmussen等提出了一种内置聚磁式永磁体磁力齿轮^[5], 并研制开发出样机。香港大学K. T. Chau等开展径向磁场调制式磁力齿轮及其应用研究, 并取得一定的研究成果^[6-7]。上海大学黄苏融等对轴向磁场磁力齿轮进行了研究, 并于2008年研制出原理样机^[8]。

本文以高速转子磁极对数 $p_h=4$ 、低速转子磁极对数 $p_l=23$ 、调制定子极数 $n_s=27$ 、齿轮变速比 $G_r=5.75$ 的轴向磁场调制式磁力齿轮为研究对象, 应用有限元法对其电磁性能进行仿真, 并在此基础上试制磁力齿轮原理样机, 测试样机电磁性能并与仿真结果进行比较, 验证设计与仿真方法的有效性。

1 基本原理

文献[2]对径向磁场调制型永磁磁力齿轮的工作机理作了描述, 调制定子铁磁极与隔磁极交替分布的结构对转子永磁磁场产生齿槽调制效应, 通过选取不同的极数配合来改变谐波磁场的次数, 可实现磁力齿轮任意转速比的设计。

以径向气隙磁场调制型永磁磁力齿轮为例, 其调制磁场密度对于径向距离 r 和空间角度 θ 的空间分布表达式为^[2]:

*基金项目: 863 重大项目 (2012AA10701); 上海高校创新团队建设项目 (2009)

$$\begin{cases} B_r(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos mp(\theta - \Omega_r t + \theta_0) \left[\lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos jn_s(\theta - \Omega_s t) \right] \\ B_\theta(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin mp(\theta - \Omega_r t + \theta_0) \left[\lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) \cos jn_s(\theta - \Omega_s t) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中 p 为转子磁钢的极对数, n_s 为调制定子的极数, Ω_r 和 Ω_s 为永磁转子和调制定子的旋转速度 (一般取 $\Omega_s=0$)。另外, b_{rm} , $b_{\theta m}$ 为在没有调制定子情况下, 磁密分布径向和周向分量的傅里叶系数。 λ_{rj} 和 $\lambda_{\theta j}$ 为定子参与调制时, 与磁密分布径向和周向分量有关的调制函数的傅里叶系数。

当调制定子固定不动时, 空间调制磁场的旋转速度为:

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} \Omega_r \quad m = 1, 3, 5, \dots, \infty \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \infty \quad (2)$$

式 1 和 2 中, 当 $m=1$, $k=-1$ 时, 定子调制出的谐波磁场在所有谐波磁场中幅值最大, 是磁性齿轮的工作磁场。此时磁力齿轮的变速比为:

$$G_r = \frac{n_s - p}{p} \quad (3)$$

2 电磁性能分析与样机试验

轴向磁场调制型永磁磁力齿轮的基本结构如图 1 所示。设计轴向磁场调制式磁力齿轮高速转子磁极对数 $p_h=4$ 、低速转子磁极对数 $p_l=23$ 、调制定子极数 $n_s=27$ 、齿轮变速比 $G_r=5.75^{[9]}$ 。利用有限元法仿真齿轮高速与低速转子的输出转矩及脉动情况, 仿真结果中磁力齿轮高速与低速转子最大转矩能力分别为 19.2 Nm 和 111.0 Nm, 高速转子和低速转子转矩脉动分别为 2% 和 0.35% 左右, 如图 2 所示。可见磁力齿轮高速与低速转子最大转矩能力比以及转矩脉动比均为 5.75, 与齿轮变速比一致。

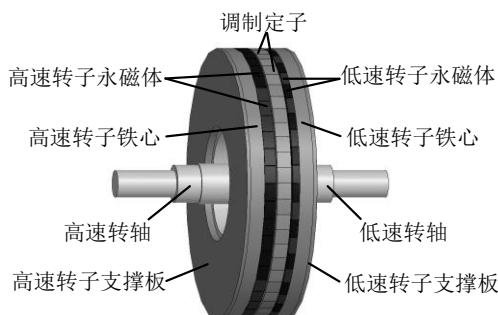


图 1 轴向磁场调制式磁力齿轮拓扑结构

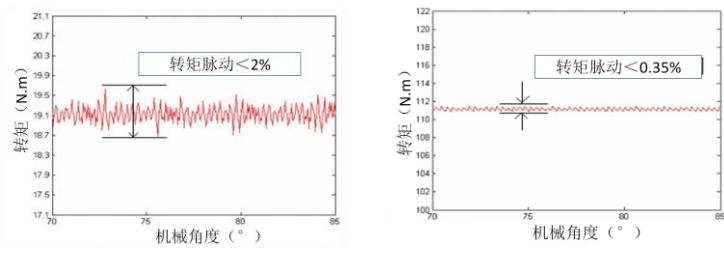


图 2 磁力齿轮最大输出转矩仿真结果

固定齿轮样机和低速转子轴, 以高精度转矩传感器测试齿轮样机低速侧转轴最大静态转矩为 86.19Nm, 约为二维有限元场仿真结果的 78%。进一步使用三维有限元场仿真分析磁力齿轮调制定子的磁力线分布与走向如图 3, 可以看出磁场除沿轴向通过调制定子外, 还存在大量沿圆周方向和径向的分量。

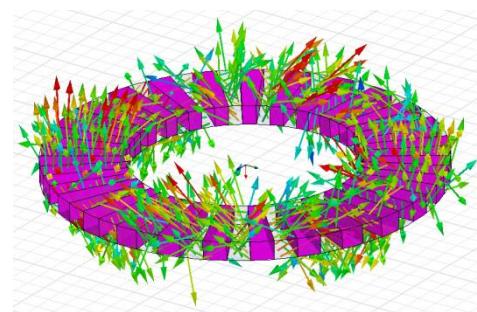


图 3 磁力齿轮调制定子磁场分布

试制轴向磁场调制式磁力齿轮原理样机如图 4。由磁力齿轮连接两台伺服电机，通过电机对拖试验测试磁力齿轮原理样机电磁性能并作比较分析，图 5 为齿轮样机实验平台。



a. 主要零部件

b. 样机实物

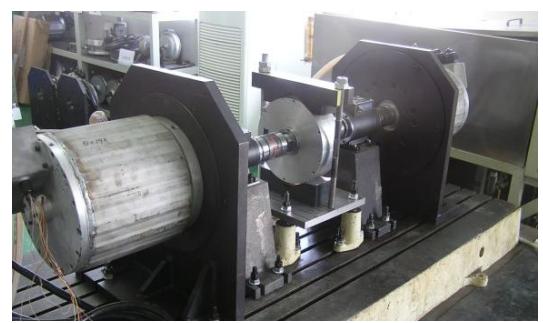
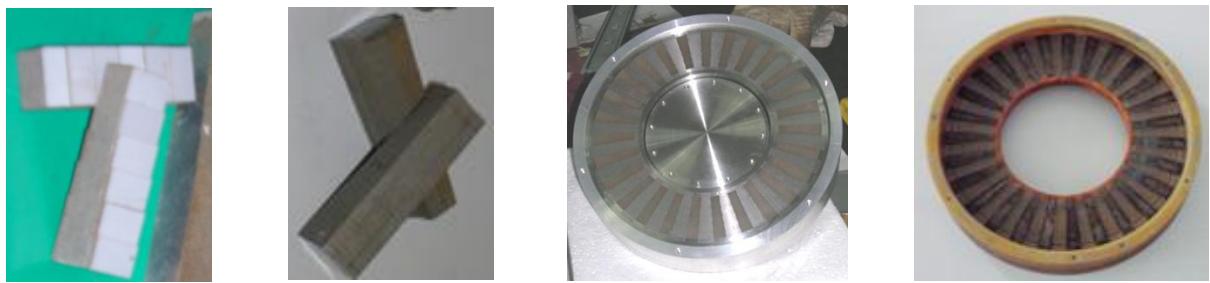


图 4 磁力齿轮原理样机实物照片

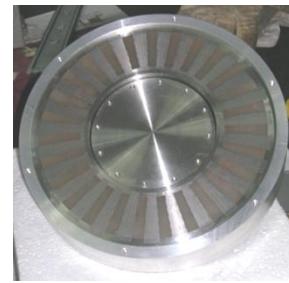
图 5 轴向磁场调制型磁力齿轮样机试验平台

为了分析比较圆周方向磁场分量及径向漏磁场对磁力齿轮铁损耗造成的影响，在样机试制与损耗实验中还分别对比了沿圆周方向叠片和沿径向叠片的调制定子铁芯，以及铝制机壳和环氧机壳的影响。图 6 为齿轮样机定子铁芯实物照片，图 7 为装配金属机壳与环氧机壳的定子铁芯实物照片。



a. 周向叠片

b. 径向叠片



a. 装配金属机壳

b. 装配环氧机壳

图 6 定子铁芯实物照片

图 7 磁力齿轮样机调制定子实物照片

利用磁力齿轮样机测试平台，在不同转速下进行齿轮样机的损耗对比实验，其实验数据如图 8 所示。可以看出，调制定子铁芯使用径向方向叠片相对于圆周方向叠片，其齿轮总损耗大大降低。说明齿轮定子铁芯内部存在大量沿圆周方向变化的磁场，定子铁芯沿圆周方向叠片会在硅钢片内部产生大量涡流损耗，影响齿轮传输效率。另外，磁力齿轮使用环氧机壳较使用金属机壳其总损耗下降约 40%~50%，说明轴向磁场调制型磁力齿轮定子外圆处存在交变的径向漏磁场，造成金属机壳内部额外的涡流损耗。

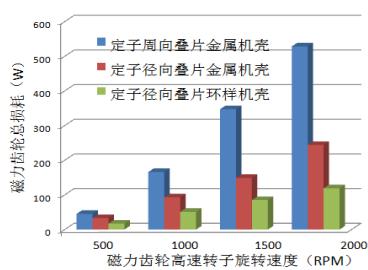


图 8 磁力齿轮样机损耗对比试验

表 1 磁力齿轮样机损耗试验数据与有限元计算比较

高速/低速转子转速 (r/min)	有限元仿真/W	样机测试/W
500/87	14.5	17
1000/174	36.7	51
1500/261	67.5	85
2000/348	106.4	119

对比磁力齿轮样机损耗测试和三维有限元计算数据如表 1，仿真结果与试验数据基本符合。使用磁力齿轮损耗仿真数据，计算自然冷却方式下连续运行的磁力齿轮调制定子与高速转子永磁体平均温度，并与齿轮样机温升试验实测值进行对比，测试值与计算值一致，如图 9 所示。可以看出，在高速转子 1500r/min、低速转子 261r/min 的运行条件下，磁力齿轮调制定子铁芯和高速转子永磁体温度分别稳定在 83.8℃ 和 72.9℃（室温条件 25℃），损耗主要来源和最高温度点为定子铁芯^[10~11]，齿轮永磁体无高温失磁风险。

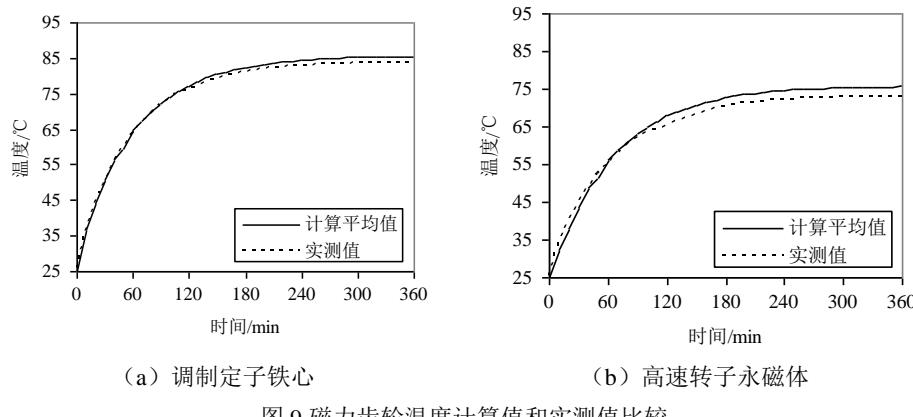


图 9 磁力齿轮温度计算值和实测值比较

3 结论

本文介绍了磁场调制型磁力齿轮的运行机理, 同时采用二维动态场和三维静态场有限元法对磁力齿轮电磁性能进行了仿真分析。仿真结果表明磁力齿轮高速、低速转子最大转矩能力及转矩脉动水平与齿轮变速比一致。在调制定子中除轴向磁场外还存在大量沿圆周方向的磁场分量以及径向漏磁场, 为减少齿轮涡流损耗应使用径向叠片定子铁芯和属绝缘材料的环氧机壳。试制轴向磁场调制式磁力齿轮样机, 测试样机最大转矩能力、不同转速条件损耗情况以及自然冷却方式下齿轮温升, 并对比有限元仿真结果, 仿真数据与试验数据基本符合, 仿真设计方法可行、有效。齿轮样机以高速转子 1500 r/min 运行时, 样机转子永磁体稳态温升不超过 50°C, 无高温失磁风险。

参考文献:

- [1] K. Atallah, S. D. Calverley and D. Howe: Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2004, 151(2):135-143.
- [2] K. Atallah and D. Howe: A novel high-performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(4): 2844-2846.
- [3] K. Atallah, J. Wang and D. Howe: A high-performance linear magnetic gear [J]. Journal of Applied Physics. 97,10N516(2005).
- [4] S. Mezani, K. Atallah and D. Howe: A high-performance axial-field magnetic gear [J]. Journal of Applied Physics.99,08R303(2006).
- [5] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen and F. T. Jorgensen: Development of a high-performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 764-770.
- [6] L. N. Jian, K. T. Chau, D. Zhang, et al: A magnetic-gearred outer-rotor permanent-magnet brushless machine for wind power generation [J]. 2007IAS, New Orleans, USA, 23-27 Sept. 2007: 4165-4169.
- [7] K. T. Chau, D. Zhang, J. Z. Jiang, et al: Design of a magnetic-gearred outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2504-2506.
- [8] 曹海东、黄苏融、谢国栋:轴向磁场调制型永磁磁力齿轮及其电磁性能分析[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(10): 24-27.
- [9] 张琪、王凯立、黄苏融、曹海东. 轴向磁场调制型磁力齿轮的设计方法[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(11): 6-10.
- [10] 徐云龙. 高速永磁电机损耗计算与热分析[D]. 沈阳工业大学, 2009: 32.
- [11] 李建强、黄苏融、曹海东、王凯立. 磁力齿轮温度场仿真与试验研究[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(7): 6-10.

作者简介:

王杰, 男, 1957.12, 工程师, 研究方向为车用电机及其控制系统设计与开发。
 曹海东, 男, 1981.2, 博士研究生, 研究方向为永磁电机及其材料应用基础研究。
 黄苏融, 男, 1953.12, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计及控制, 通讯作者。