

新型永磁复合电机的设计与优化^{*}

葛研军, 万宗伟, 王 雪, 张 俊
(大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 基于同心式永磁齿轮的运行机理, 设计了一种新型的低速大转矩永磁复合电机模型, 给出了模型参数化设计的计算方法。通过控制变量法, 逐一改变调磁极块的长度、厚度, 定子冲片轭铁厚度以及内转子轭铁的厚度等参数, 再通过 Ansoft 有限元仿真软件对这些参数进行优化仿真。结果表明, 可以有效提高电机的转矩密度, 降低转速波动。

关键词: 同心式永磁磁齿轮; 永磁电机; 参数化设计; 控制变量法; 优化仿真

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0051-05

Design and Optimization of New Permanent Magnet Compound Motor^{*}

GE Yanjun, WAN Zongwei, WANG Xue, ZHANG Jun

(College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Based on the mechanism of concentric permanent magnet gear, a new model of low speed and high torque permanent magnet compound motor was designed, and the calculation method of the basic parameters of the model was given. By controlling the variable method, the parameters such as the length of the pole block, the thickness of the stator punch and the thickness of the inner rotor yoke were changed, and the parameters were optimized by Ansoft finite element simulation software. The results showed that the motor torque density and reduce speed fluctuations were effectively improved.

Key words: concentric permanent magnet gear; permanent magnet motor; parametric design; control variable; optimization simulation

0 引 言

机械传动系统大多需要一个旋转动力源(如异步电机或永磁同步电机)外接一个机械齿轮变速箱,其目的是将旋转动力源的高速低转矩输入转换为低速大转矩输出。但机械齿轮箱的引入也会带来噪声、润滑以及机械齿轮间的胶合、点蚀、磨损等问题。

随着稀土永磁材料的发展,磁力传动装置得以迅速发展^[1-5]。2001年,英国人 K. Atallah 和 D. Howe^[6]设计出了一种全新的高性能磁力齿轮,通过调磁环调制作用,可使内、外转子上永磁体全

部参与转矩的传递,其转矩密度可达到 $183 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^3$,可与机械齿轮相媲美。

将这种新型永磁齿轮与现代永磁电机相结合,可形成一种永磁复合电机^[7-8]。该电机可将普通电机的旋转驱动与机械齿轮的变速传动相结合,不仅缩短了机电系统的传动链,而且还可克服传统机械齿轮箱上述缺陷,具有非常广阔的应用前景。

基于磁场调制式磁齿轮的原理,设计出一种只有单层气隙结构的新型永磁复合电机。这种新型永磁复合电机结构简单,易于装配,且因为其单层气隙的结构特点,避免了多层气隙漏磁严重的问题,提高了永磁复合电机的转矩密度,降低了输出波动。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51375063)

作者简介: 葛研军(1964—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为机电传动与控制。

万宗伟(1992—),男,硕士研究生,研究方向为机电传动与控制。

王 雪(1993—),女,硕士研究生,研究方向为机电传动与控制。

1 新型永磁复合电机运行机理

新型永磁复合电机的机械结构如图 1 所示。在图 1 中,定子冲片以及定子槽中的三相绕组构成电机的定子部分,电机的转子部分由永磁体块及硅钢片压制的轭铁组成。

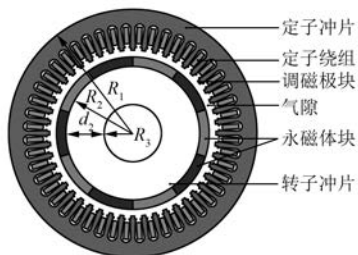


图 1 新型永磁复合电机机械结构示意图

从结构上来看,新型永磁复合电机的机电结构与传统永磁同步电机十分相似,均由三相绕组中的交流电产生旋转磁场,与内转子上的永磁体进行磁场耦合并以此传递转矩。

与传统永磁电机的不同之处在于,图 1 所示的定子铁心槽与槽之间均有一凸起部分,其作用相当于磁齿轮的调磁极块,可对定子绕组形成的磁场进行调制,使其产生的磁场与内转子永磁体极对数相匹配并形成传动比。

将调磁环和电机定子合为一体的结构,可使调磁极块数与定子槽数相等,并将传统复合电机的三层气隙简化为一层,减少了极间漏磁,降低了电机的装配难度。

若设新型复合电机绕组的极对数为 p ,定子槽数为 Z ,电流频率为 f ,绕组产生的磁场转速为 n_0 ,内永磁体极对数为 p_s ,输出转速为 n_s ,传动比为 i ,则有:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

$$p_s = Z - p \quad (2)$$

$$i = \frac{p_s}{p} = \frac{n_0}{n_s} \quad (3)$$

$$n_s = \frac{n_0}{i} = \frac{60f}{Z - p} \quad (4)$$

由式(4)得知,新型永磁电机的输出转速与绕组频率,绕组极对数和定子槽数(调磁极块数)有关。其中,绕组频率和绕组极对数决定电机绕

组磁场的转速,绕组极对数和定子槽数决定内外磁场的传动比。

2 模型参数计算

2.1 结构参数计算

设电机输出功率 $P = 23 \text{ kW}$,输出转速 $n_s = 6 \text{ r/min}$,由于磁场调制式磁齿轮其传动比 i 在 3~8 且传动比为分数时其传动性能较好^[9-10],因此本文取传动比 $i = 4.25$ 。

由式(3)可得 $n_0 = 25.5 \text{ r/min}$,由式(1)~式(4)可得:

$$p = 16, f = 6.8 \text{ Hz}, Z = 84, p_s = 68$$

设复合电机定子外径为 R_1 ,转子外径为 R_2 ,转子内径为 R_3 ,转子厚度为 d_2 ,轴向长度为 L ,电机输出转矩为 T ,总体积为 V ,并取转矩密度 $T_d = 150 \text{ kN} \cdot \text{m/m}^3$,则有:

$$T = 9549 \frac{P}{n} = 36.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V = \frac{T}{T_d} = \frac{D_1^2 \pi}{4} \cdot L \quad (5)$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{C_A P}{Ln}} \quad (6)$$

式中: C_A ——电机常数,可由电机主要尺寸计算公式获得^[12]。

根据电机设计经验,预取 $d_2 = 80 \text{ mm}$ 及 $D_1 = 1080 \text{ mm}$,根据式(5)、式(6)可计算出 $L = 720 \text{ mm}$, $D_2 = 790 \text{ mm}$, $D_3 = 630 \text{ mm}$ 。

2.2 气隙及槽型计算

取最小气隙长度为 1 mm ,槽型选择梨型槽。图 2 所示为复合电机梨形槽结构示意图。

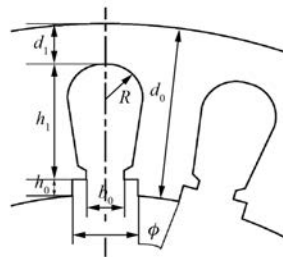


图 2 复合电机梨形槽结构示意图

设定子冲片厚度为 d_0 ,定子轭部厚度为 d_1 ,定子槽齿距为 b_1 ,齿宽厚度(即调磁环厚度)为 h_0 ,齿宽之间相交角为 ϕ ,定子槽下线深度为 h_1 ,则:

$$h_1 = d_0 - d_1 - h_0 \quad (7)$$

$$d_0 = \frac{D_1 - D_2}{2} - \delta \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\pi D_2 \phi}{360 b_0} \quad (9)$$

式中: α ——调磁环参数,是调磁环导磁材料和气隙的比值,预取 $h_0 = 6 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 1$ 。

由式(8)及式(9)可得: $b_0 = 14 \text{ mm}$, $\phi = 2.14^\circ$, $h_1 = 108 \text{ mm}$, $d_0 = 144 \text{ mm}$ 。其他槽尺寸算法与普通电机相同。

2.3 永磁体的结构参数

设 B_r 为永磁体剩磁, B_s 为轭铁所能通过的最大磁通密度,永磁体厚度为 h_3 ,永磁体径向长度为 l_1 。由于穿过永磁体表面与内轭铁截面的磁通量相等^[13-14],因此若设永磁体表面积为 S_y ,磁力线穿过内轭铁的截面积为 S_e ,则 $B_r \cdot S_y = B_e \cdot S_e$ 。

$$h_3 = \frac{L_1 B_r}{2 B_e} \quad (10)$$

$$l_1 = \frac{\pi D_2}{2 p_s} \quad (11)$$

由式(11)及式(12)并经圆整可得: $h_3 = 8 \text{ mm}$, $l_1 = 18 \text{ mm}$ 。

综上,可初定表1所示的新型永磁电机结构参数。

表1 新型永磁电机初选结构参数

参数名称	参数值
内转子永磁体极对数 p_s	68
定子绕组极对数 p	16
定子冲片外径 D_1/mm	1 080
电机转子外径 D_2/mm	790
电机转子内径 D_3/mm	630
定子槽数 Z	84
最小气隙长度 δ/mm	1
电机轴向长度 L/mm	720
磁化强度 $M/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	-890 000
真空磁导率 μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
相对磁导率 μ_r	1.099 7
定子轭部厚度 d_1/mm	30
转子轭部厚度 d_2/mm	90
调磁环厚度 h_0/mm	6
调磁环齿端占比 α	1
永磁体厚度 h_3/mm	8
永磁体径向长度 l_1/mm	18

表1中永磁体材料为 NdFe35,充磁方式为径向充磁。

基于 Ansys Maxwell 软件对由表1所示参数电机进行建模分析,可得图3及图4所示的电机输出转矩与转速。

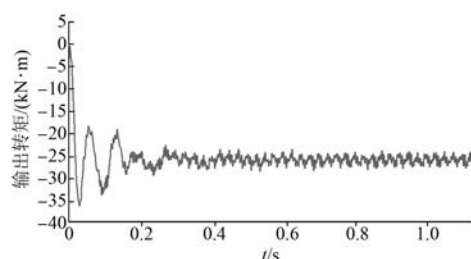


图3 电机输出转矩

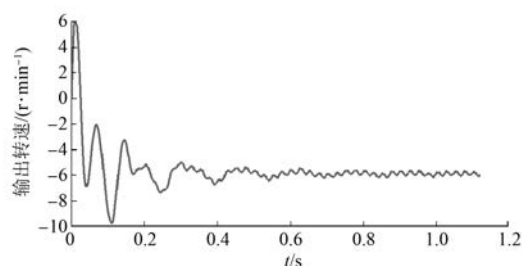


图4 电机输出转速

由图3可知,电机启动时,转矩急速增加;到达幅值后,转矩开始波动;最后转矩在 26 kN 附近稳定。这是因为电机启动时转子转速小,转子能够获得足够的转矩冲量使得输出转矩急速增大。由于干扰谐波对工作谐波干扰较强,转矩波动幅值较大;当转子转速提高时,干扰变弱,电机输出转矩变得平稳。

由图4可知,启动时,复合电机的定子磁场开始旋转,根据楞次定律,转子开始向减少磁通方向旋转(与定子磁场转向相同即正转)。随着转子的旋转,调磁环开始对内外磁场产生调制作用,工作谐波大于干扰谐波,转子开始反转。电机平稳后的转速为 6 r/min,定子磁场转速为 25.5 r/min,满足设计传动比的要求,验证了对新型复合电机传动比的理论推导。

3 结构参数优化

设永磁复合电机的输出转矩为 T ,影响转矩的参数主要有 d_1 、 d_2 、 h_0 、 α 及 δ ,下面将逐一改变这些参数,通过仿真结果来研究它们之间的关系。

3.1 d_1 及 d_2 与 T 关系

图5所示为 d_1 及 d_2 与 T 之间的关系图。由

图 5 可知,当 d_1 从 27 mm 开始逐渐变大, T 先快速增加,然后缓慢上升最后趋于稳定。因为当 d_1 过小时,定子轭铁内的磁通达到了材料允许的极值,产生漏磁现象;随着 d_1 的增加,轭部磁密会逐渐减少,直至达到正常值,这时轭部漏磁减少,复合电机输出转矩增加;当轭部磁密达到正常值时,即使继续增加 d_1 , T 也不再增加;由于定子冲片厚度是一个固定值,随着 d_1 增加,定子最大槽深 h_1 会减小,导致有效槽面积减少,降低电机的工作性能。

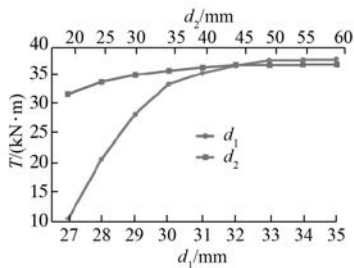


图 5 d_1 、 d_2 与 T 的关系

d_2 与 T 的关系同 d_1 类似。当 d_2 从 20 mm 开始增加时, T 先迅速增大,然后缓慢上升最后趋于稳定。

转子轭铁也需要一定的厚度来避免磁饱和现象所带来的漏磁问题,且 d_2 会直接影响复合电机转子的转动惯量, d_2 过大会导致复合电机启动困难。

综上所述, d_1 、 d_2 都不应该取值过小,否则将出现磁饱和现象,增加电机的涡流损耗;但也不能取值太大, d_1 过大,将会降低定子槽的有效面积,减小槽内导体数,影响电机的性能; d_2 过大将增加内转子的转动惯量及其制造成本。

最终取 $d_1 = 32$ mm, $d_2 = 50$ mm。

3.2 α 、 h_0 与 T 关系

α 和 h_0 是影响复合电机磁场调制效果的重要参数。图 6 所示为 α 、 h_0 和电机最大输出转矩 T 的关系图。由图 6 可知,随着 α 的增加,复合电机的磁场调制效果越好, T 也越大。当 α 一定时,随着 h_0 的增加, T 先迅速变大,然后缓慢增加,直到趋于稳定,说明调磁极块需要具有一定的体积。若体积过小,会使得复合电机磁场调制效果较差,导致磁场的干扰谐波过大,影响性能;但是增大调磁极块的厚度,会增加磁路磁阻,降低磁动势。

故在设计复合电机调磁极块时,应首先让调

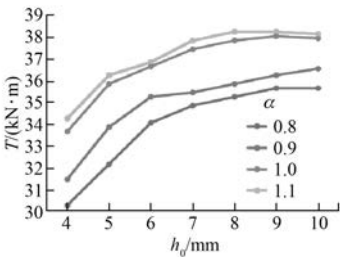


图 6 调磁极块参数与 T 的关系

磁极块的体积满足设计要求,然后在机械结构允许的情况下,使得 α 尽量大一些, h_0 尽量小一些。

优化后取 $h_0 = 8$ mm, $\alpha = 1.1$ 。

3.3 δ 与 T 关系

δ 对电机性能的影响很大,随着气隙减少,电机输出转矩大幅增加。这是因为当磁场耦合时,磁感线会沿磁阻最小的路径通过,而空气的磁阻很大, δ 增加时,会直接导致复合电机的磁动势下降,进而导致输出转矩降低。但气隙长度过小将增加装配难度,转子旋转时易发生刚蹭现象,故取 $\delta = 0.8$ mm。

综上所述,最终优化的模型结构参数如表 2 所示(未变参数未在表 2 列出)。

表 2 优化后永磁电机的结构参数	
参数名称	参数值
定子轭铁厚度 d_1 /mm	32
转子轭铁厚度 d_2 /mm	50
调磁环厚度 h_0 /mm	8
调磁环参数 α	1.1
气隙宽度 δ /mm	0.8

图 7 和图 8 为模型优化后的输出转矩图和输出转速图。优化后电机输出转矩为 36.1 kN,较优化前 26.4 kN 提高了 26.9%,且模型优化后电机输出转矩和转速比优化前更加稳定。

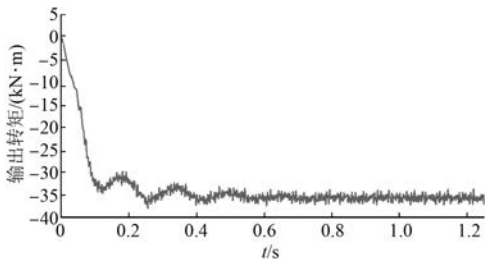


图 7 模型优化后输出转矩图

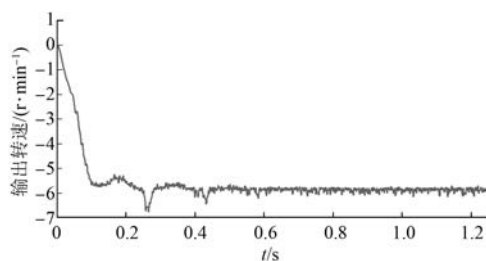


图8 模型优化后的输出转速图

4 结 语

通过研究同心式磁齿轮和永磁同步电机的运行机理,建立了一种新型永磁复合电机的模型,给出了模型参数的计算方法。通过有限元软件对模型进行验证,结果表明,仿真结果和理论设计输出基本一致。

通过仿真计算逐一分析了结构参数与输出转矩的关系。结果表明,定子轭铁厚度、转子轭铁厚度、调磁环厚度、气隙宽度等参数对转矩影响较大。其中气隙宽度对复合电机输出转矩的影响最大。

调磁环的磁场调制效果需要调磁极块具有一定的体积。设计复合电机时需要充分考虑实际情况来决定调磁极块的厚度以及宽度,其中厚度过大会增加磁路磁阻,宽度过大会增加绕组的下线难度。

【参 考 文 献】

- [1] 王虎生,侯云鹏,程树康.无接触永磁齿轮传动机构发展综述[J].微电机,2008,41(2): 72-73.
- [2] 江建中,刘新华.新型磁场调制式磁性齿轮的设计研究[D].上海:上海大学,2008.
- [3] JØRGENSEN F T. Magnetic device for transfer of forces DK:WO 2006/133703 A1[P].2006:12.
- [4] JØRGENSEN F T, ANDERSEN T O, RASMUSSEN P O.The cycloid permanent magnetic gear[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2008,44(6): 1659-1655.
- [5] UZIEL R C.Cycloidal magnetic gear speed reducer [J].Modern Mechanical Engineering,2013(3): 147-151.
- [6] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear[J].IEEE Transactions on Magnetics, 2001,37(4): 2844-2846.
- [7] 陈栋,王敏,易靓,等.磁齿轮复合永磁电机综述[J].电机与控制应用,2015,42(3): 1-6.
- [8] 杜世勤,章跃进,江建中.新型永磁复合电机研究[J].微特电机,2010,38(4): 1-3.
- [9] 葛研军,辛强,聂重阳.磁场调制式永磁齿轮结构参数与转矩关系[J].机械传动,2011,36(4): 8-10.
- [10] 葛研军,聂重阳,辛强.调制式永磁齿轮气隙磁场及转矩[J].机械工程学报,2012,48(11): 53-58.
- [11] 唐任远.现代永磁电机[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [12] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [13] 朱雪松,郝伟娜,高竹发.Halbach 阵列型摆线永磁齿轮传动转矩的有限元分析[J].轻工机械,2013, 31(2): 25-30.
- [14] 郝伟娜,高竹发.摆线永磁齿轮的涡流损耗研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.
- [15] CALVERLY S D, HOWE D, ATALLAH K. High performance magnetic gears[J].Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004 (272/276): 1727-1729.

收稿日期: 2018 -01 -05

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编:200063 电话:021-62574990-745 传真:021-62576377

国内邮发代号:4-199 每册定价:12.00 元 全年定价:144.00 元