

# 高转矩密度磁力齿轮的拓扑结构与性能比较\*

杨敏健, 朱孝勇, 项子旋, 全力, 简彦洪  
(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮是两类具有不同拓扑结构和运行原理的磁力齿轮, 采用定量设计比较法设计了具有相同有效体积和永磁体用量的上述两类磁齿轮, 并通过有限元分析法对二者的转矩传递性能进行比较研究。研究表明, 永磁行星齿轮较同轴永磁齿轮有更高的转矩密度和更低的转矩脉动。此外, 由于永磁行星齿轮具有更加灵活的运行模式, 并且能实现功率分流, 使其在混合动力汽车领域有很好的应用前景。加工了一台永磁行星齿轮样机, 并搭建试验平台进行了相关的试验, 结果表明了该拓扑结构的有效性。

**关键词:** 永磁行星齿轮; 同轴永磁齿轮; 转矩密度; 转矩脉动

**中图分类号:** TG 457.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0056-07

## Topology Design and Performance Comparison of High Torque Density Magnetic Gear\*

YANG Minjian, ZHU Xiaoyong, XIANG Zixuan, QUAN Li, JIAN Yanhong  
(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Magnetic planetary gear (MPG) and coaxial magnetic gear (CMG) were the two types of magnetic gears with different topologies and operating principle. By using quantitative design method and finite-element method the torque performance of the MPG and the CMG, which with the same effective volume and the amount of permanent magnets, were compared. The results revealed that the MPG possess a higher torque density and lower torque ripple. Furthermore, considering the MPG had more flexible operation mode and could realize power split, which made MPG an interesting candidate in hybrid electric vehicles, a prototype of MPG was fabricated and tested. Both theoretical analysis and experimental results verified the effectiveness of this topology.

**Key words:** magnetic planetary gear; coaxial magnetic gear; torque density; torque ripple

### 0 引言

机械齿轮作为转矩和转速传递装置广泛应用于各种工业场合, 然而由于机械齿轮的接触式结构, 却使其存在着诸如摩擦损耗、机械振动、噪声以及需要润滑定期维护等固有问题。与传统的机械齿轮不同的是, 通过磁场耦合进行能量传递的磁齿轮, 由于其各传动部件间实现了物理隔离, 使

得磁齿轮具备低噪声、免维护, 且具有自适应过载保护能力等优点<sup>[1-2]</sup>。因此磁齿轮在直驱风力发电机、混合动力汽车及人工心脏等需要高减速比领域且机械齿轮维护成本大的应有场合具备潜在的应用价值<sup>[3-9]</sup>。

基于上述优点, 早期各种类型的磁齿轮应运而生。然而, 很长一段时间采用铁氧体永磁材料的磁齿轮由于其较低的转矩密度及相对复杂的磁

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477069, 51177065)

作者简介: 杨敏健(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合动力汽车用永磁式行星齿轮电机设计。

朱孝勇(1975—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电动汽车驱动控制, 新型电机设计与控制。

项子旋(1987—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为无刷化双转子磁通切换电机及其控制技术。

路结构使得其受关注程度有所降低。20 世纪 80 年代,随着高磁能积稀土永磁材料钕铁硼的诞生,磁齿轮再次成为了各科研人员的研究热点。文献 [10] 提出了一种行星齿轮结构的磁性齿轮,由永磁太阳轮、永磁行星轮和永磁齿圈 3 部分组成。该结构实质上是机械行星齿轮的一种转换结构,将机械齿轮中的机械齿轮部分由永磁体磁极代替后形成的无接触式齿轮。不同于文献 [10] 由机械齿轮直接转换而成的磁齿轮结构,文献 [11] 中提出了一种基于磁场调制原理的磁齿轮,由永磁高低速转子和铁磁调磁环同轴装配而成,因此也有学者称其为同轴永磁齿轮。在同轴永磁齿轮中,通过铁磁调磁环调节高低速转子间的气隙磁场,从而实现磁能与机械能的相互转换,达到转矩传递和变速的目的。目前,在永磁齿轮领域主要侧重于对永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮拓扑结构和动态响应性能的研究<sup>[12-15]</sup>,鲜有系统地对上述两类永磁齿轮的转矩传递性能进行定量分析比较。

本文采用定量设计法设计了具有相同永磁体用量和相同有效体积的永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮,并且在相同的工作条件下对两者的转矩传递性能进行了具体的比较研究。通过矩角特性分析,对永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮的带负荷能力进行比较,且对两者的稳态转矩特性进行了比较分析。最后,制造了 1 台试验样机,进行了转矩传递性能的试验分析。

## 1 高转矩密度永磁齿轮原理与结构设计

### 1.1 永磁行星齿轮的运行原理与结构设计

永磁行星齿轮是一种将传统机械行星齿轮的机械齿轮部分经过永磁体替换后得到的一类永磁齿轮,不但具备着机械行星齿轮多端口多运行模式的特点,同时又兼顾了磁性齿轮低传递损耗、运行时无噪声、免维护、具备自适应过载保护等特点。永磁行星齿轮几何结构拓扑图如图 1 所示。永磁行星齿轮由永磁太阳轮、永磁齿圈、永磁行星轮和行星架构成,其中,永磁行星轮安装于行星架上,可同时围绕着太阳轮公转和自转。不同部件之间的转矩传递依靠的是稀土永磁材料钕铁硼所产生的磁耦合力,而不是接触式的机械齿。

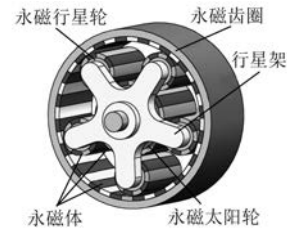


图 1 永磁行星齿轮三维结构图

通常情况下,行星齿轮的个数与永磁行星轮的转矩密度呈正相关,但是随着行星齿轮数量的增加,永磁行星齿轮的转矩脉动也会随之增加,且永磁行星齿轮中各永磁齿轮之间极对数最简比与永磁行星轮的最大安装数量间存在着相互制约关系。因此,在永磁行星齿轮的设计中,首先应确定的是永磁体的磁极对数和永磁行星轮的数目。

当行星轮与太阳轮之间或者行星轮与外齿圈之间相互耦合时,在虚设的接触点有着相同的线速度,从而避免了不必要的磁极滑动。因此,在永磁行星齿轮中每一对磁极的极距是相同的。各永磁齿轮永磁体磁极间的关系可以表示为

$$R_s \theta_s = R_p \theta_p = R_r \theta_r \quad (1)$$

式中:  $R_s$ 、 $R_p$ 、 $R_r$ ——永磁太阳轮、行星轮和齿圈的半径;

$\theta_s$ 、 $\theta_p$ 、 $\theta_r$ ——弧度制下永磁太阳轮、行星轮和齿圈的磁极角。

永磁行星齿轮几何结构拓扑图如图 2 所示。永磁太阳轮、永磁行星轮和齿圈的半径存在着如下几何关系:

$$R_s + 2R_p = R_r \quad (2)$$

结合式(1)和式(2)且由  $\theta = 2\pi/p$  可得各永磁齿轮极对数间关系为

$$p_s + 2p_p = p_r \quad (3)$$

式中:  $p_s$ 、 $p_p$ 、 $p_r$ ——永磁太阳轮、行星轮和齿圈的磁极对数。

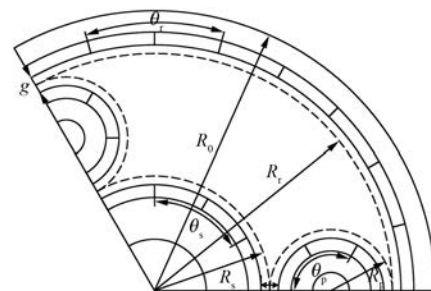


图 2 永磁行星齿轮几何结构拓扑图

式(3)表明,一旦确定了永磁太阳轮和行星轮的极对数,永磁齿圈的极对数可由该式求得。此外,永磁行星齿轮中其各齿轮极对数之间的比例等于其相应的半径比例。

在永磁行星齿轮设计中,永磁行星轮的个数与转矩密度之间存在着正相关关系,然而永磁行星轮的个数并不能任意选择,若选择不当,永磁行星齿轮将出现无效的磁耦合,并随之伴随产生不平衡的径向磁拉力,从而影响永磁行星齿轮的转矩传递性能。当确定了永磁太阳轮和永磁齿圈的极对数后,永磁行星齿轮中能放置行星轮个数的最大值  $N_p$  可由式(4)确定:

$$\begin{cases} \frac{p_s}{p_r} = \frac{a}{b}, & a \text{ 和 } b \text{ 为极对数最简比} \\ N_p = 2p_r/b, & \text{若 } a \text{ 和 } b \text{ 均为奇数} \\ N_p = p_r/b, & \text{若 } a \text{ 或者 } b \text{ 有一个为偶数} \end{cases} \quad (4)$$

基于上述设计原则,本设计中首先确定了永磁行星轮为 5 对极,永磁太阳轮为 10 对极,以及永磁行星齿圈为 20 对极。根据式(4)可知,在该极对数配比下,永磁行星齿轮中能放置的最大行星轮个数  $N_p = 10$ 。此外,考虑到本次设计中永磁行星齿轮的有效半径为 58 mm,为了避免行星轮之间由于物理空间过小而造成的磁干涉对转矩传递产生的负作用,同时在考虑设计成本和避免过大的转矩脉动,选取安装 5 个行星轮于永磁行星齿圈中。

### 1.2 同轴永磁齿轮的运行原理与结构设计

同轴永磁齿轮三维结构图如图 3 所示。

同轴永磁齿轮由高速转子、低速转子和铁磁调磁环同轴装配而成。当没有铁磁调磁环时,高低速转子间由于极对数的不同无法形成有效的磁

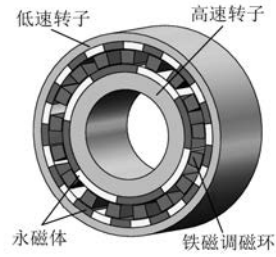


图 3 同轴永磁齿轮三维结构图

耦合,在不考虑磁饱和的情况下,磁场的合成可以应用叠加原理,此时由永磁体产生的气隙磁密可分为径向分量和切向分量<sup>[16]</sup>。由于气隙磁场分布的周期性和对称性,其傅里叶展开式中不含有偶次项,对径向分量  $B_r$  和切向分量  $B_\theta$  分别进行傅里叶展开可得:

$$B_r(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5}^{\infty} b_{rm}(r) \cos[mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0] \quad (5)$$

$$B_\theta(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5}^{\infty} b_{\theta m}(r) \sin[mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0] \quad (6)$$

式中:  $b_{rm}$ 、 $b_{\theta m}$ ——气隙磁场径向分量傅里叶系数和切向分量傅里叶系数;

$p$ ——永磁体极对数;

$\Omega_r$ ——转子永磁体旋转速度。

当加入  $N_s$  块旋转速度为  $\Omega_s$  的铁磁调磁环后,考虑其影响,引入由于磁场调制影响产生的气隙磁场的径向傅里叶系数  $\lambda_{rk}$  和切向傅里叶系数  $\lambda_{\theta k}$ ,并根据式(5)和式(6)可得到调磁后的径向和切向气隙磁密分别为

$$\begin{aligned} B_r(r, \theta) = & \lambda_{r0} \sum_{m=1,3,5\dots} b_{rm}(r) \cos[mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0] + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5\dots} \sum_{k=1,2,3\dots} \lambda_{rk}(r) b_{rm}(r) \\ & \cos\left[(mp + kN_s) \left(\theta - \frac{mp\Omega_r + kN_s\Omega_s}{mp + kN_s} t\right) + mp\theta_0\right] + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5\dots} \sum_{k=1,2,3\dots} \lambda_{rk}(r) b_{rm}(r) \\ & \cos\left[(mp - kN_s) \left(\theta - \frac{mp\Omega_r - kN_s\Omega_s}{mp - kN_s} t\right) + mp\theta_0\right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B_\theta(r, \theta) = & \lambda_{\theta 0} \sum_{m=1,3,5\dots} b_{\theta m}(r) \sin[mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0] + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5\dots} \sum_{k=1,2,3\dots} \lambda_{\theta k}(r) b_{\theta m}(r) \\ & \sin\left[(mp + kN_s) \left(\theta - \frac{mp\Omega_r + kN_s\Omega_s}{mp + kN_s} t\right) + mp\theta_0\right] + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5\dots} \sum_{k=1,2,3\dots} \lambda_{\theta k}(r) b_{\theta m}(r) \\ & \sin\left[(mp - kN_s) \left(\theta - \frac{mp\Omega_r - kN_s\Omega_s}{mp - kN_s} t\right) + mp\theta_0\right] \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知,永磁体产生的磁场经过铁磁调磁环调制后气隙磁密空间谐波对应的旋转角速度为

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kN_s} \Omega_r + \frac{kN_s}{mp + kN_s} \Omega_s \quad (9)$$

由式(9)可知,由于引入铁磁调磁环的调制作用而引起的气隙磁密空间谐波的转速与转子永磁体产生的基波磁密的转速不同(当  $k$  不为零时),因此在高低速转子磁场基波转速不同时仍然可以传递有效的恒定转矩,而这要求内外转子的极对数和调制块的块数间满足一定的数量关系。即当永磁体极对数为  $p_h$  的高速转子经过极块数为  $N_s$  的调磁极片的调磁作用后,在外气隙产生 1 个极对数为  $N_s - p_h$  的磁场。若选择低速转子的永磁体极对数为  $p_l = N_s - p_h$ , 则低速转子产生的气隙磁场与高速转子调制后的磁场耦合,使得该类磁齿轮能够平稳地传递转矩。根据其运行原理,同轴永磁齿轮也被称为磁场调制式永磁齿轮。

基于上述 2 类永磁齿轮的运行原理和设计原则,为了客观地对其进行转矩传递性能的比较分析,分别设计了 2 个具有相同有效体积、相同气隙长度以及相同永磁体用量的永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮。其具体的设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

参数名称	永磁行星齿轮	同轴永磁齿轮
轴向长度/mm	50	50
气隙长度/mm	0.5	0.5
有效半径/mm	58	58
永磁体类型	NdFeB35	NdFeB35
永磁体体积/m <sup>3</sup>	1.21×10 <sup>-4</sup>	1.21×10 <sup>-4</sup>
行星轮极对数	5	-
太阳轮极对数/高速转子极对数	10	4
齿圈极对数/低速转子极对数	20	13
行星轮个数	5	-
调磁极片个数	-	17
调磁极片厚度/mm	-	7.7
永磁体厚度/mm	3	4.4
最大减速比	3:1	3.25:1

## 2 有限元分析与性能比较

### 2.1 磁场分布比较

通过定量设计法并确定了永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮的结构尺寸参数后,可利用有限元分析方法对两者的性能进行深入分析。磁场分布图

如图 4 所示。

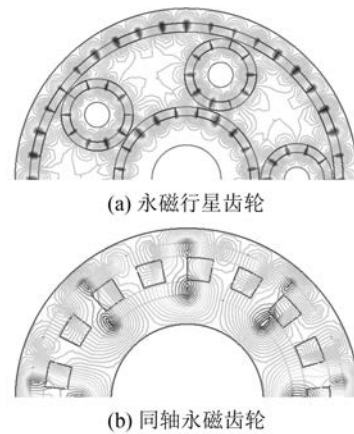


图 4 磁场分布图

首先分析了两者在最大负载条件下的磁场特性。从图 4(a)中可以看出,相邻行星齿轮之间不存在相互的磁耦合且永磁太阳轮和永磁齿圈之间也未发生相应的磁耦合现象。永磁行星轮间的磁耦合以及永磁太阳轮和永磁齿圈间的磁耦合均会导致磁齿轮转矩脉动的增大及削弱转矩传递能力。上述两类不利于永磁行星齿轮正常运行的磁耦合现象均未出现,可初步证明该设计的合理性。

相比较于永磁行星齿轮在一个运行周期中只有部分永磁体参与到转矩传递当中,同轴永磁齿轮所有的永磁体均参与到转矩的传递上。

### 2.2 传递转矩性能比较

当永磁齿轮的其他部件固定,只旋转永磁行星轮的太阳轮和同轴永磁齿轮的高速转子时,可得太阳轮和高速转子的矩角特性曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,太阳轮和高速转子的传递转矩范围相当,均为 -17.0~17.0 N·m,当负载超出此范围时磁齿轮将发生失步而无法动作。同理,当只旋转齿圈和低速转子,永磁齿轮的其他部

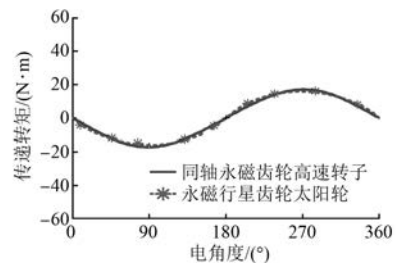


图 5 太阳轮与高速转子矩角特性曲线

件保持固定时,齿圈和低速转子的矩角特性曲线如图 6 所示,其中齿圈所对应的传递转矩范围为-50.7~50.7 N·m,低速转子所对应的传递转矩范围为-55.3~55.3 N·m。

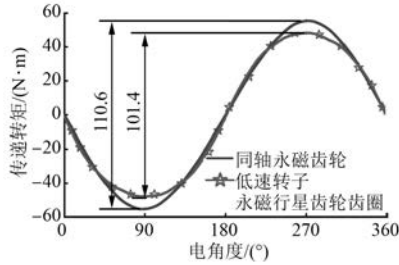


图 6 齿圈与低速转子矩角特性对比图

由于永磁行星齿轮是 1 个多自由度的磁力传动装置,主要表现为安装在行星架上的行星轮除围绕行星轮的固有轴自转外,同时还要围绕太阳轮公转。现有的 Maxwell 有限元仿真软件仅支持最多两个转动部件的瞬态仿真,而本文中的永磁行星齿轮最多涉及到 8 个转动部件的瞬态运动过程。为了有效验证永磁行星轮中行星架的最大传递转矩,通过太阳轮和齿圈的最大传递转矩数据间接计算可得行星架的最大传递转矩。

当考虑差动行星齿轮传动模式下,即太阳轮、齿圈和行星架均不固定的情况下,以太阳轮和齿圈作为输入端计算行星架的输出转矩,各部件的转速关系为

$$(p_s + p_r) \cdot \omega_c = p_s \cdot \omega_s + p_r \cdot \omega_r \quad (10)$$

式中:  $\omega_s$ 、 $\omega_r$ 、 $\omega_c$ ——太阳轮、齿圈和行星架的转速。

假设在能量传递过程中没有损耗,即行星架输出功率等于齿圈和太阳轮的输入功率之和,结合式(10)可得行星架的转矩表达式为

$$T_c = \frac{(p_s + p_r) (\omega_s T_s + \omega_r T_r)}{\omega_s p_s + \omega_r p_r} \quad (11)$$

式中:  $T_s$ 、 $T_r$ 、 $T_c$ ——太阳轮、齿圈和行星架的传递转矩。

永磁行星齿轮各齿极对数已知,根据矩角特性曲线图已知太阳轮和齿圈的最大传递转矩分别为 17 N·m 和 50.7 N·m,当用功率为 5.4 kW 和 16 kW 的动力装置分别驱动太阳轮和齿圈,并根据式(11)可得行星架的输出转矩如图 7 所示。

因此可得行星架的最大传递转矩为 76 N·m。

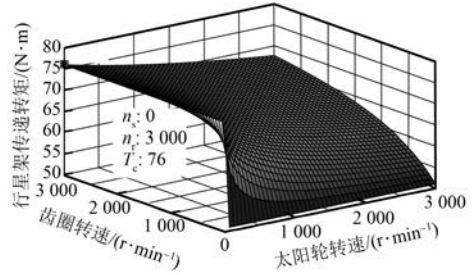


图 7 行星架输出转矩与齿轮转速关系图

### 2.3 稳态转矩与转矩脉动比较

为了有效反映转矩传递过程中永磁行星齿轮和同轴永磁齿轮转矩脉动的大小,仿真了最大负载时两者的稳态转矩。太阳轮和高速转子的稳态转矩波形如图 8 所示。从图 8 中可以看出,太阳轮和高速转子的稳态转矩的平均值均为 17.0 N·m,但太阳轮的转矩脉动为 1.7%,低于同轴永磁齿轮高速的转矩脉动 2.3%。齿圈与低速转子稳态转矩波形图如图 9 所示。齿圈的转矩脉动为 0.16%,同轴永磁齿轮低速转子的转矩脉动为 2.0%。可见,永磁行星齿轮的转矩脉动均低于同轴永磁齿轮,主要原因在于同轴永磁齿轮是利用空间特定次谐波进行转矩传递。

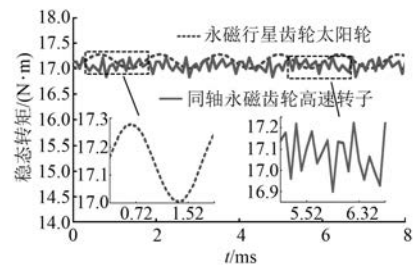


图 8 太阳轮与高速转子稳态转矩波形

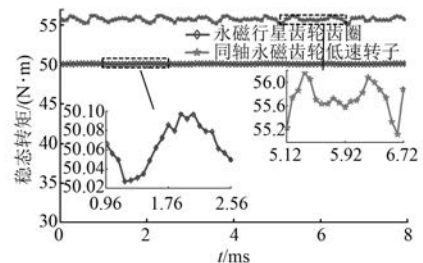


图 9 齿圈与低速转子稳态转矩波形

行星齿轮和同轴齿轮详细的性能比较数据,如表 2 所示。

表 2 行星齿轮和同轴齿轮详细的性能比较数据

转矩性能	永磁行星 齿轮	同轴永磁 齿轮
太阳轮、高速转子最大传递转矩/(N·m)	17.0	17.0
齿圈、低速转子最大传递转矩/(N·m)	50.7	55.3
行星架最大传递转矩/(N·m)	76	-
太阳轮、高速转子转矩脉动/%	1.7	2.3
齿圈、低速转子转矩脉动/%	0.16	2.0
转矩密度/(kN·m·m <sup>3</sup> )	143.9	104.7

### 3 试验验证

通过分析比较,永磁行星齿轮由于其更高的转矩密度和更低的转矩脉动,且永磁行星齿轮具备更加灵活的运行模式。因此加工了 1 台有 5 个行星齿轮组成的永磁行星齿轮样机进行进一步的试验验证。试验样机如图 10 所示。相应的试验台架由原动机、动态转矩转速传感器以及磁粉制动器构成。



图 10 行星架与永磁行星齿轮装配图

首先本试验进行了传动比的验证,设计中永磁太阳轮、永磁行星轮和永磁外齿圈的极对数比为 2:1:4,因此最大减速比为齿圈固定时,太阳轮和行星架的转速比为 3:1。太阳轮和行星架的转矩转速测试波形如图 11 所示,可见两者的转速严格保持 3 倍的转速比关系。转矩比略小于 3 倍,这主要由于永磁行星齿轮运行时存在的永磁体涡流损耗。此外,永磁行星齿轮随原动机加速减速时的动态性能测试波形如图 12 所示。在整个加速、减速及停止过程中,行星架始终跟着太阳轮的转速变化而变化,显示了良好的永磁行星齿轮良好的动态特性。

### 4 结 语

本文采用定量设计法设计了具有相同有效体积、相同永磁体用量的永磁行星齿轮和同轴永磁

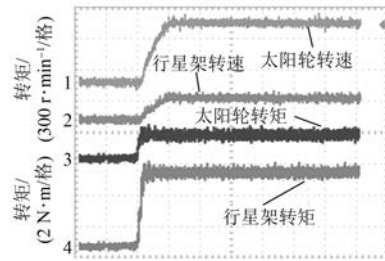


图 11 太阳轮与行星架转速转矩测试波形

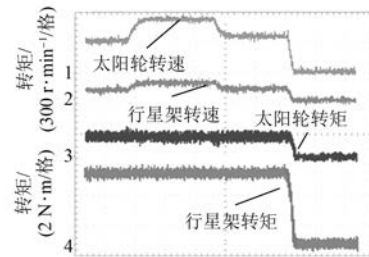


图 12 动态性能测试波形

齿轮。基于有限元分析法对两者的磁场分布和转矩传递性能进行了详细的比较。结果表明,永磁行星齿轮具备更高的转矩密度和更低的转矩脉动。此外加工的永磁行星齿轮样机表明了设计的合理性,且进一步验证了永磁行星齿轮有着较好的动态相应性能。该磁力传动装置在未来的混合动力汽车无级变速器领域作为功率分流装置有着潜在的应用价值。

### 【参考文献】

- [1] RASMUSSEN P O, ANDERSEN T O, JØRGENSEN F T, et al. Development of a high-performance magnetic gear [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 764-770.
- [2] GOUDA E, MEZANI S, BAGHLI L, et al. Comparative study between mechanical and magnetic planetary gears [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 439-450.
- [3] 夏冬. 永磁齿轮的阻尼系统及其在人工心脏无接触驱动装置中的应用 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 91-96.
- [4] 朱孝勇, 孙彦彪, 全力, 等. 混合动力汽车用五相容错式永磁行星齿轮电机及工作方法: CN103023206A [P]. 2013-04-03.
- [5] 葛叶明, 朱孝勇, 陈龙. 电动汽车用定子永磁型磁通记忆式游标电机性能分析 [J]. 电机与控制应用,

- 2014,40(4): 45-51.
- [ 6 ] 包广清,刘新华,毛开富.基于磁场调制式磁齿轮传动的永磁同步风力发电系统[J].农业机械学报,2011,42(5): 116-120.
- [ 7 ] LIU C T, HWANG C C, CHIU Y W. Design of a coaxially magnetic-gearred liner actuator for electric power steering system applications [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 ( 3 ): 2401-2408.
- [ 8 ] CHEN M, CHAU K T, LIU C H. Design of a new non-rare-earth magnetic variable gear for hybrid vehicular propulsion system[J].IET Electrical System in Transportation,2016,6(3): 153-162.
- [ 9 ] CHIBA A, KIYOTA K, HOSHI N, et al. Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 ( 1 ): 175-182.
- [ 10 ] HUANG C, TSAI M, ORRELL D G, et al. Development of a magnetic planetary gearbox [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44 ( 3 ): 403-412.
- [ 11 ] ATALLAH K, HOWE D. A novel high-performance magnetic gear [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 ( 4 ): 2844-2846.
- [ 12 ] 杨超君,李直腾,李志宝,等.高性能磁力齿轮传动扭矩与效率的数值计算[J].中国电机工程学报,2011,31(32): 107-114.
- [ 13 ] 刘美钧,包广清,候晨晨,等.磁场调制型磁齿轮动态性能分析[J].机械传动,2017,41(3): 21-26.
- [ 14 ] 杨岸涛,并立兵,李浩.一种混合充磁同心磁齿轮及其复合电机分析[J].微特电机,2017,45(4): 31-33,38.
- [ 15 ] WANG R J, MATTHEE A, GERBER S, et al. Calculation of torque performance of a novel magnetic planetary gear [ J ]. IEEE Magnetics Letters, 2016, 7 ( 1 ): 1-5.
- [ 16 ] ATALLAH K, CALVERLEY S D, HOWE D. Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear [ J ]. IEE Proc Electr Power Appl, 2004, 151 ( 2 ): 135-143.

收稿日期: 2018-03-26

(上接第 18 页)

性控制。仿真结果表明,当电机的负载转矩、定子电阻和定子电感变化时,积分反步自适应控制相比传统的反步自适应控制具有更好的动静态性能。

### 【参考文献】

- [ 1 ] HU J, QIU Y, LU H. Adaptive robust nonlinear feedback control of chaos in PMSM system with modeling uncertainty [ J ]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40 ( 19/20 ): 8265-8275.
- [ 2 ] 温慧慧,张进.单相三绕组永磁同步电动机的起动性能分析[J].现代电子技术,2016,39(17): 140-144.
- [ 3 ] 陈昊,周建亮,王永,等.永磁同步电机速度跟踪控制[J].电力电子技术,2013,47(6): 100-102.
- [ 4 ] 韩璐,张开如,樊英杰,等.基于变系数 PID 永磁同步电机的研究[J].现代电子技术,2016,39(18): 127-129.
- [ 5 ] 王庆龙,张兴,张崇巍.永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J].中国电机工程学报,2014,34(6): 897-902.
- [ 6 ] 熊丝琦.永磁同步电机混沌系统的自适应反步方法研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [ 7 ] 李岩,盛正印.自适应反步法的永磁同步电动机速度跟踪控制[J].微特电机,2014,42(12): 54-57.
- [ 8 ] 崔苏雯,盛正印,李岩.永磁同步电动机伺服系统反步法控制研究[J].微特电机,2014,42(11): 74-75.
- [ 9 ] 陈宁,熊丝琦,刘波,等.PMSM 混沌系统的自适应反步控制[J].中南大学学报(自然科学版),2014(1): 99-104.
- [ 10 ] 花熙文.永磁同步电机的模糊反步自适应调速策略研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [ 11 ] 朱汉未.永磁同步电机的自适应反推控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [ 12 ] 徐艳平,张保程,周钦,等.基于 PSO 的自适应反推永磁同步电动机 DTC 控制方法研究[J].微特电机,2017,45(1): 62-66.

收稿日期: 2018-01-03