

磁阻永磁齿轮结构及其动态特性仿真分析

韩加佳¹, 韩俊豪²

(1. 国网南充供电公司, 四川南充 637100;

2. 河南省农业科学院 农副产品加工研究中心, 河南郑州 450002)

摘要: 通过对磁阻永磁齿轮的结构分析, 对一种传动特性较好的结构形式, 详细分析了其在两种形式负载下的传动特性。分析表明, 在阶跃负载作用下, 其经过短暂启动后, 进入平稳运行阶段, 启动冲击较大; 在线性负载作用下, 磁阻永磁齿轮启动时的冲击较阶跃负载作用下的要小, 并且其最大转矩传递能力较阶跃负载作用下的要大。根据极弧比的概念对极弧比对转矩传递能力的影响进行了仿真分析, 得出了最佳极弧比。

关键词: 磁阻式永磁齿轮; 动态特性; 负载; 极弧比; 仿真分析

中图分类号: TM144; TH132.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0030-05

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.007

Simulation on the structure and transmission characteristics of reluctance permanent magnet gear

HAN Jia-jia, HAN Jun-hao

1. Nanchong Power Supply Company of State Grid, Nanchong 637100, China;

2. Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

Abstract: By analyzing the structure of reluctance permanent magnet gear, a structure form with good transmission characteristics was proposed, and a detailed analysis was given for transmission characteristics under two kinds of loads. The result shows that under step load, after a short start, the system enters the stable operation stage, with a larger starting impact; under linear load under the reluctance permanent magnet gear has a smaller start impact and higher maximum torque transmission capacity than that under step load. According to the concept of polar arc ratio, the influence of the pole arc ratio on the torque transfer capability is simulated and analyzed, and the optimum arc ratio determined.

Key words: reluctance permanent magnet gear; dynamic characteristics; load; polar arc ratio; simulation

1 引言

磁力齿轮是一种无接触传动装置, 可以减少噪声、振动和摩擦磨损, 因而具有广泛的应用前景。早在 1901 年一份美国专利中首先展示了一种利用磁力进行动力传递的装置^[1], 其结构类似于机械齿轮, 这种装置由两个转子构成, 每个转子的边缘为凸齿形状, 凸齿上缠绕着线圈, 线圈通电时, 转子上便产生多个电磁磁极, 通过两个转子上电磁磁极的相互作用, 一个转子便可以带动另一个转子进行传动, 这种结构形式的磁力齿轮每一时刻只有少数几个电磁磁极参与传动, 所以传动效率低, 且结构复杂, 实用性不大。随着永磁材料技术的发展, 日本学者提出了平行轴永磁齿轮结构^[2], 这种结构用永磁磁极

替代电磁磁极, 简化了磁力齿轮的结构, 但其传动效率仍然很低。2001 年, 英国学者 Atallah 和 Howe 提出了一种磁场调制型永磁齿轮拓扑结构^[3-5], 该拓扑结构由高速转子、低速转子和调制定子三部分组成, 高速转子和低速转子的表面贴装有弧形永磁磁极, 每一个转子上相邻的两块永磁磁极充磁方向相反, 为了使高速转子和低速转子产生的磁场能够有效耦合, 它们之间布置了调制定子, 其转矩密度已接近机械齿轮的水平, 成为磁力传动技术发展过程中的一个里程碑, 磁力传动技术又重新引起了人们的关注。2008 年, 东北大学的满永奎教授根据开关磁阻电机的传动原理, 提出了磁阻永磁齿轮拓扑结构, 这种结构仍然由高速转子、低速转子和调制定

收稿日期: 2019-05-28

修回日期: 2020-01-09

通讯作者: 韩俊豪 E-mail: 2469417511@qq.com

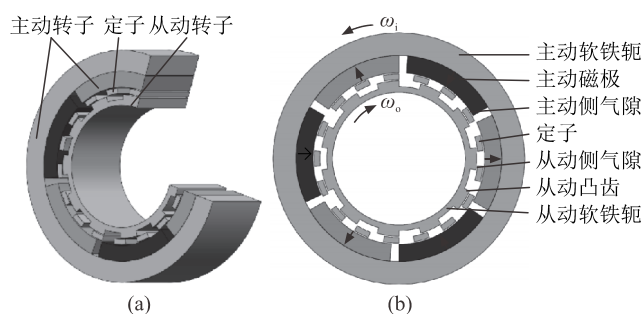


图1 磁阻永磁齿轮结构：(a)三维模型，(b)横截面

子三部分组成。其中高速转子上均布有若干个永磁磁极，低速转子上则为均布的软磁材料凸极，由于这种磁力齿轮的低速转子没有永磁材料，因而减少了永磁材料的用量，有利于降低成本，且结构更加紧凑，加工制造容易^[6]。随后几位学者又对磁阻永磁齿轮的传动原理进行了研究，证明其可以连续传动^[7-10]。自从磁阻永磁齿轮传动装置提出以来，对其的研究进展较慢，转矩传动能力较大和传动较平稳的拓扑结构仍然处于研究试验阶段，相关基础理论研究不足，基于此，本文对一种传动特性较好的结构形式，运用 Magnet 仿真软件对其进行动态仿真分析，并确定最佳极弧比。

2 结构及参数

图1为磁阻永磁齿轮的结构。由三维模型(图1a)可知，其由主动转子、定子和从动转子三部分组成。由其横截面图(图1b)可知，主动转子由主动软铁轭和贴装在上面的 P_h 个主动磁极组成，其中主动磁极等间距分布，相邻两个磁极径向充磁方向相反，中间的一层为调磁环定子，定子由 P_m 个软磁材料制成的调磁片均匀间隔分布。最里层的是从动转子，从动转子由从动软铁轭和 P_l 个凸齿组成，为软磁材料。三个转子之间没有机械接触，其中主动转子与定子之间的间隙称为主动侧气隙，从动转子与定子之间的间隙称为从动侧气隙。当主动转子以 ω_1 的速度转动，从动转子则以 ω_0 的速度反向转动，齿轮的传动比

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{P_h - P_m}{P_h} = -\frac{P_l}{P_h} \quad (1)$$

式中的负号表示输入与输出的旋转方向相反。

主动磁极的数量 P_h 、从动凸齿的数量 P_l 和定子的数量 P_m 满足关系

$$P_l = P_m - P_h \quad (2)$$

表1和表2分别给出了磁阻永磁齿轮的结构和

表1 磁阻永磁齿轮的结构参数

名称	数值	名称	数值
从动软铁轭半径/mm	58	主动软铁轭厚度/mm	20
从动软铁轭厚度/mm	5	主动磁极数量	6
从动凸齿厚度/mm	5	定子调磁片数量	17
从动侧气隙厚度/mm	1	从动凸齿数量	11
定子厚度/mm	5	主动磁极扇形角/(°)	55
主动侧气隙厚度/mm	1	定子扇形角/(°)	360/(2P _m)
主动磁极厚度/mm	15	从动凸齿扇形角/(°)	360/(2P _l)

表2 磁阻永磁齿轮材料性能参数

名称	数值	名称	数值
磁极相对磁导率	1.1	空气相对磁导率	1
磁极矫顽力/kA·m ⁻¹	-827.6	软铁轭材料	硅钢
磁极材料	NdFeB	凸齿材料	硅钢

材料性能参数。

3 传动特性仿真分析

3.1 阶跃负载条件下

在实际工作中，磁阻永磁齿轮如果用于驱动带式输送机，则其启动过程相当于对齿轮施加了一个阶跃负载，故需对阶跃负载下齿轮的动态特性进行研究，本文应用 MagNet 软件对图1所示磁阻永磁齿轮的动态特性进行分析，表1和表2为图1中齿轮的结构参数和材料属性，启动阶段的特性对齿轮的传动性能有很大影响，故首先对阶跃负载下的齿轮启动特性进行仿真，仿真时，对主动转子施加 600 °/s 的速度约束，对从动转子分别施加 $T_L=50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、70 N·m、90 N·m 的阶跃外负载，阻尼系数为 2。

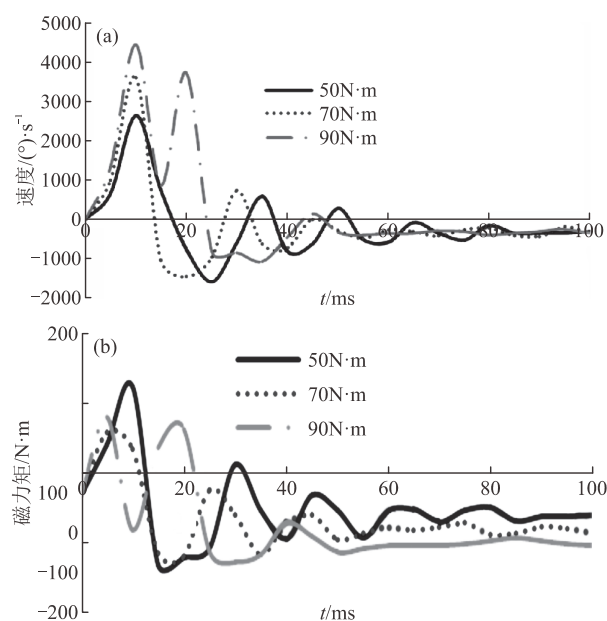


图2 不同外负载下从动转子启动响应曲线：(a)速度，(b)转矩

在上述约束条件下，相当于对主动转子施加了一个阶跃速度，对从动转子施加了一个阶跃负载，这时，从动转子在电磁转矩、自身惯性、外负载以及阻尼的联合作用下，从静止状态逐渐加速，最后进入稳定运行状态，MagNet 软件可以对磁阻永磁齿轮的整个动态运动过程进行仿真。

图 2 为三种外负载下从动转子在前 100 ms 时的转速和转矩响应曲线。在图 2a 中，三条转速曲线变化规律相同，均在 8 ms 左右出现了一个瞬时正的峰值，且其转速峰值在负载 $T_L=50\text{ N}\cdot\text{m}$ 时，约为 $2600\text{ }^\circ/\text{s}$ ， $T_L=90\text{ N}\cdot\text{m}$ 时达到了 $4500\text{ }^\circ/\text{s}$ ，分别是主动转子转速的 4 倍多和 7 倍多，随后，从动转子转速迅速振荡衰减，约 80 ms 后，转速稳定于某一负值附近并呈现小幅波动。图 2a 的结果表明，当对主动转子施加阶跃速度约束，从动转子施加不同的阶跃负载约束时，从动转子将产生很大的与负载方向相同的速度冲击，且最大速度冲击发生的时刻以及瞬态过程持续的时间不随负载而变化。

从动转子的磁力矩响应曲线(图 2b)表明，在启动瞬间，从动转子的磁力矩为负值，即与负载转矩方向相反，但紧接着从动转子的磁力矩突然反向并增加到一个很大的正向峰值， $T_L=50\text{ N}\cdot\text{m}$ 时正向峰值约为 $130\text{ N}\cdot\text{m}$ ， $T_L=90\text{ N}\cdot\text{m}$ 时，正向峰值为 $75\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右，且正向峰值出现的时刻随着负载转矩的减小而存在滞后现象，这正是图 2a 中从动转子产生速度冲击的原因。瞬时峰值之后，从动转子的磁转矩振荡衰减，约 80 ms 后，磁力矩均稳定于某一负值 $-61.3\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $50\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $-81.3\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $70\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $-100.4\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $90\text{ N}\cdot\text{m}$)附近并呈现小幅波动，这与图 2 中转速的变化规律是一致的。这里需要注意的是，从动转子的磁力矩大于外负载，这是由于从动转子所受的磁力矩，一部分用于克服外负载，另一部分用于克服阻尼产生的阻力，故从动转子磁力矩与外负载的差值为阻尼产生的阻力。

图 3 为三种外负载下从动转子稳态过程的速度响应曲线，进入稳态过程后，对应于三种负载的平均转速分别为 $-327.5\text{ }^\circ/\text{s}$ (负载 $50\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $-328.3\text{ }^\circ/\text{s}$ (负载 $70\text{ N}\cdot\text{m}$)和 $-330.8\text{ }^\circ/\text{s}$ (负载 $90\text{ N}\cdot\text{m}$)，传动比分别为 1.83、1.83 和 1.81，与(1)式的计算结果基本一致，从动转子转速波动的最大幅值分别为 $140.1\text{ }^\circ/\text{s}$ (负载 $50\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $166.7\text{ }^\circ/\text{s}$ (负载 $70\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $181.8\text{ }^\circ/\text{s}$ (负载 $90\text{ N}\cdot\text{m}$)，即负载越大，转速的波动越大。

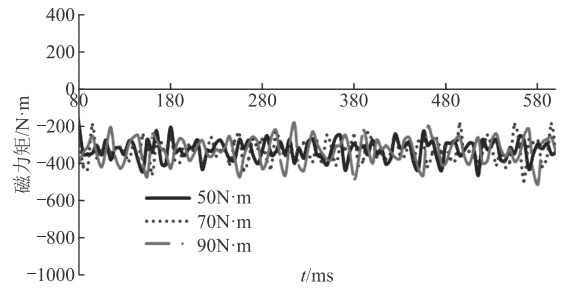


图 3 不同外负载下从动转子稳态过程的速度响应曲线

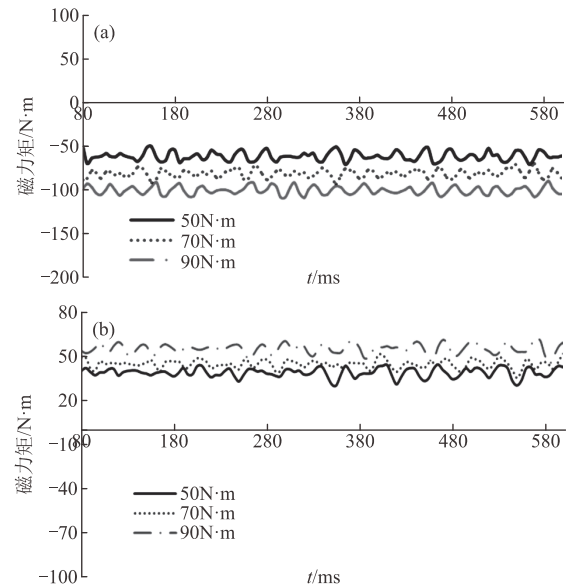


图 4 稳态过程转矩响应曲线：(a) 从动转子；(b) 主动转子

图 4 给出了从动和主动转子稳态过程的转矩响应曲线，稳定运行时，从动转子的平均磁力矩分别为 $61.3\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $50\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $81.2\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $70\text{ N}\cdot\text{m}$)和 $100.5\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $90\text{ N}\cdot\text{m}$)，主动转子的平均磁力矩分别为 $33.9\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $50\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $44.8\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $70\text{ N}\cdot\text{m}$)和 $55.2\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $90\text{ N}\cdot\text{m}$)，从动、主动磁力矩之比分别为 1.81、1.81 和 1.82，即输出与输入电磁转矩之比与转速之比基本吻合。考察不同负载下磁转矩的波动性大小，随着外负载的增大，从动转子磁力矩的最大波动幅值(即稳态过程中磁力矩的瞬时值与平均值相差最大的值)分别为 $11.1\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $50\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $19.3\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $70\text{ N}\cdot\text{m}$)、 $23.6\text{ N}\cdot\text{m}$ (负载 $90\text{ N}\cdot\text{m}$)，即负载越大，磁力矩波动越大。

当外负载进一步增大到 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 时，从动转子仍然可以按照确定的传动比工作，但当外部载荷增大到 $110\text{ N}\cdot\text{m}$ 时，从动转子无法正常工作，转速失步，如图 5 所示，因此，模型在阶跃负载下能够产生的最大磁力矩为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右，单位体积的输出转矩称为转矩密度，故其转矩密度

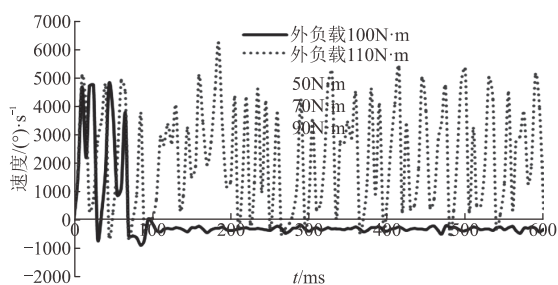


图 5 最大负载时从动转子速度响应曲线

$$S_t = \frac{T_{\max}}{V} = \frac{T_{\max}}{\pi r^2 h} \quad (3)$$

式中， T_{\max} 为磁阻齿轮能够产生的最大磁力矩， r 为磁阻齿轮最大半径， h 为磁阻齿轮的轴向长度，则有：

$$S_t = \frac{T_{\max}}{V} = \frac{T_{\max}}{\pi r^2 h} = 17.55 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^3$$

3.2 线性负载条件下

本小节将讨论磁阻永磁齿轮在线性负载下的动态传动特性，主、从动转子的瞬态过程和最大电磁转矩与负载类型的关系。为此，对从动转子施加三种不同斜率的线性外负载，如图 6 所示，主动转子仍然施加阶跃速度约束，对磁阻齿轮的动态响应过程进行了分析，图 6 中外负载一的斜率为 480 N·m/2200 ms，外负载二的斜率为 480 N·m/4400 ms，外负载三的斜率为 480 N·m/6600 ms。

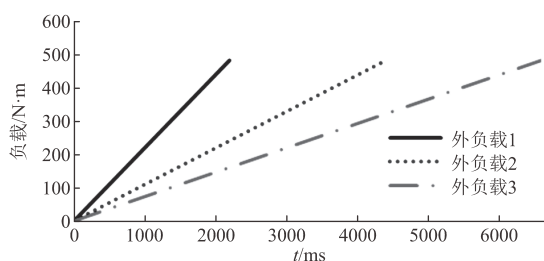


图 6 不同线性负载速率

图 7 为三种线性负载下从动转子的瞬态和整个过程的速度响应曲线。由图 7a 可以看出，线性负载下从动转子的速度冲击小于阶跃负载下的速度冲击，当外负载的斜率分别为 480 N·m/2200 ms、480 N·m/4400 ms 和 480 N·m/6600 ms 时，其最大正向速度分别为 2028、2665 和 2536 °/s，小于阶跃负载下的 2600、3607.8、4500 °/s，说明对于不同类型的负载，磁阻永磁齿轮的速度冲击差别很大。从瞬态过程持续的时间来看，线性负载与阶跃负载几乎相同，均为 80 ms 左右。

整个运动过程的速度响应曲线(图 7b)表明，经过短暂启动后，进入稳态过程，从动转子在稳定运行

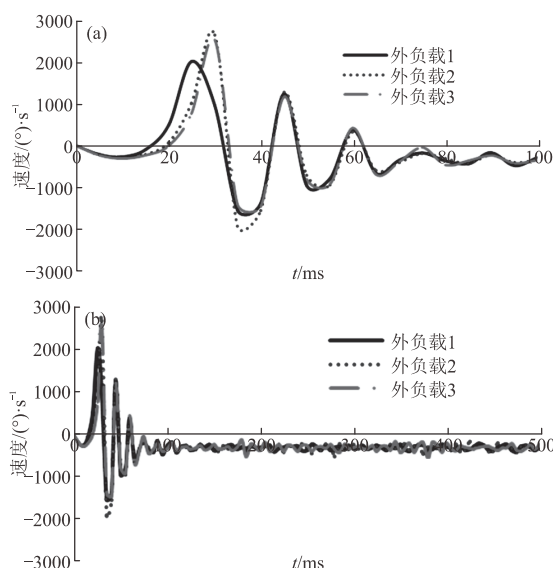


图 7 不同线性负载从动转子的速度响应曲线：(a) 启动阶段，(b) 整个过程

时，平均转速分别为 -322、-324.8 和 -327.1 °/s，传动比分别为 1.86、1.85 和 1.83，说明磁阻永磁齿轮的传动比受到负载加载速率的影响，且加载速率越小，传动比越大，但在上述三种加载速率下，传动比的变化不到 2%，因此，可以认为磁阻永磁齿轮的传动比是稳定的。

图 8 为三种线性负载下从动转子的磁转矩响应曲线，可以看出，负载加载速率不同时，从动转子磁力矩变化的斜率也不相同，负载加载速率越大，从动转子磁力矩的斜率也越大，但其磁力矩的最大值却是相同的，均为 130 N·m 左右，其转矩密度约为 22.81 kN·m/m³。

对启动过程中的正向转矩最大值进行比较，负载加载速率越小，正向转矩最大值越小，即启动过程的转矩冲击越小，从稳定运行阶段的转矩波动性来看，负载加载速率对其几乎没有影响。

综上所述，磁阻永磁齿轮从动转子在线性负载下的磁转矩大于阶跃负载下的磁转矩，即在线性负载下磁阻永磁齿轮具有更大的负载能力，故磁阻永

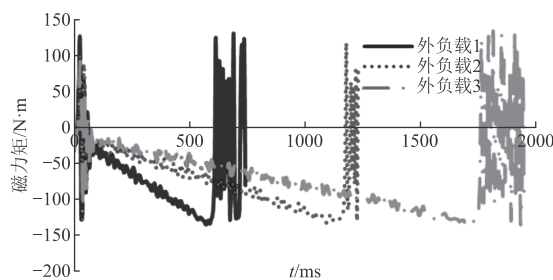


图 8 不同线性负载下从动转子的转矩响应曲线

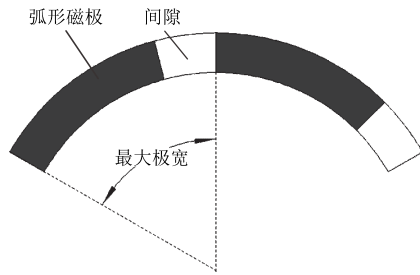


图 9 最大极宽示意图

磁齿轮更适用于启动阶段近似线性负载的场合。

4 极弧比的影响

4.1 极弧比的概念

如图 9 所示，弧形磁极所对应的圆心角称为极弧，相邻两个弧形磁极对应径向截面之间的圆心角称为最大极弧，弧形磁极的实际极弧小于最大极弧，实际极弧与最大极弧之比称为极弧比。如图 1 所示，磁阻永磁齿轮拓扑结构有 n (n 为偶数) 块均匀分开排布的弧形磁极，所以每块弧形磁极的极弧要小于 $360^\circ/n$ ，最大极弧为 $360^\circ/n$ 。

4.2 极弧比对转矩传递能力的影响

在对磁阻永磁齿轮的结构分析时，通过研究极弧比对转矩密度的影响，对齿轮拓扑结构参数的确定和研究磁体的利用率有重要的指导作用。该拓扑结构体积一定，通过研究其输出转矩的大小可以得到转矩密度的大小。

图 1 所示的磁阻永磁齿轮拓扑结构有 6 个磁极，其传动比为 11/6，在该拓扑结构其他结构参数不变的前提下，分别建立极弧比为 11/12、5/6、3/4、2/3、7/12、1/2 和 5/12 的有限元模型，此时弧形磁极的极弧分别为 55° 、 50° 、 45° 、 40° 、 35° 、 30° 和 25° 。

对于不同的极弧比结构模型进行动态特性仿真分析，仿真时，给主动转子一个恒定速度 $600^\circ/\text{s}$ ，阻尼系数为 2，通过给从动转子一个匀速增大的外部载荷，其增大速率为 120/1100，得到其能够稳定传动时的最大磁力转矩。图 10 给出了极弧比为 11/12 时的磁力转矩响应曲线，从图中可以看出，从动转子经过 100 ms 的启动阶段后，其磁力转矩匀速增大，当增大到 131 N·m 附近时，出现失步现象，可以得出其最大转矩能力为 131 N·m。通过取不同极弧比模型的最大磁力转矩，进行分析，得到如图 11 所示的不同极弧比下的最大磁力转矩。

图 11 表明，随着模型极弧比的增大，磁力转矩

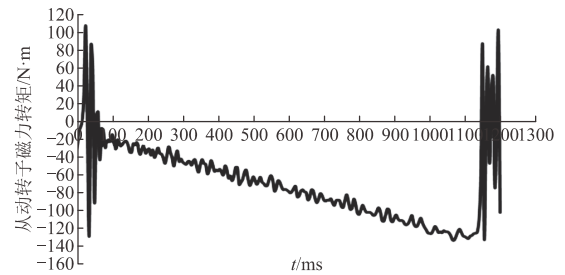


图 10 极弧比为 11/12 时的磁力转矩响应曲线

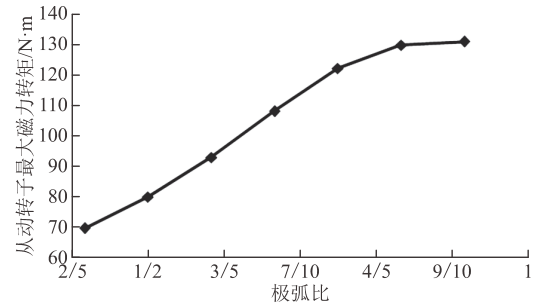


图 11 不同极宽比下的最大磁力转矩

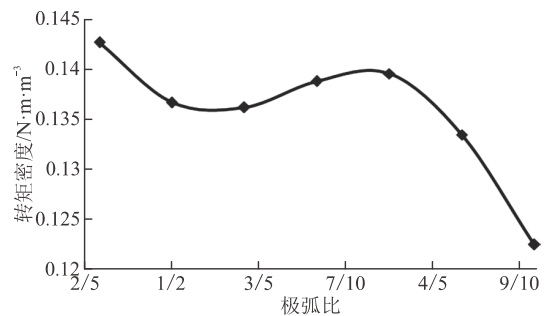


图 12 转矩密度与极弧比的关系

也不断增大，当极弧比为 5/12 时，此时该拓扑结构的最大磁力转矩最小，为 69 N·m，当极弧比为 11/12 时，该拓扑结构的最大磁力转矩最大，为 131 N·m，但随着极弧比的增大，磁力转矩增大的幅值并不是越来越大，为此，研究了不同极弧比对应的转矩密度的函数关系，如图 12 所示，从图中可以看出，当极弧比最小时，转矩密度最大，随着极弧比的增大，转矩密度出现先减小后增大、再减小的趋势。综合分析后，当极弧比为 3/4 时，此时转矩传递能力和转矩密度都较大，称为最佳极弧比，为磁极的尺寸确定起指导作用，有助于提高磁极的利用率。

5 结论

对磁阻永磁齿轮在阶跃负载和线性负载作用下的动态传动特性进行了研究。阶跃负载时，启动阶段存在很大的正向(与负载方向相同)速度和转矩冲

(下转 72 页)