

4-14-2021

## Design and Electromagnetic Simulation of Split Switched Reluctance Dual-Rotor Motor

Deng Tao

*1. Institute of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; ;*

Deng Song

*2. School of Mechatronics & Automobile Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design and Electromagnetic Simulation of Split Switched Reluctance Dual-Rotor Motor

## Abstract

**Abstract:** There are some problems such as bad heat dissipation and electromagnetic coupling for the traditional dual-rotor motor of hybrid electric vehicles. *Two SRMs of same size are mechanically connected through a coupling to form a dual-rotor motor with two rotors and one stator. A split switched reluctance dual-rotor motor (SSR-DRM) is innovatively designed. The working principle and multi-operating mode of SSR-DRM are analyzed, and the parameters design, modeling and electromagnetic simulation are implemented. The parameters of design and simulation are compared and analyzed from the aspects of magnetic line distribution, magnetic density, transient torque and no-load back EMF.* The results show that under 560 V DC voltage, the split switched reluctance dual-rotor motor's rated torque is 80 N·m, rated speed is 3 000 r/min and rated output power is 25 kW. Simulation results meet the requirement of design.

## Keywords

split switched reluctance dual-rotor motor, structure design, parameter design, electromagnetic simulation

## Recommended Citation

Deng Tao, Deng Song. Design and Electromagnetic Simulation of Split Switched Reluctance Dual-Rotor Motor[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 935-942.

## 分体式开关磁阻双转子电机设计与电磁仿真

邓涛<sup>1</sup>, 邓崧<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 航空学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 为解决传统混合动力汽车用双转子电机同心永磁式结构存在散热不良和磁场耦合等问题, 将两个同尺寸开关磁阻电机通过联轴器机械连接起来, 设计成一种新型分体式开关磁阻双转子电机 (Split Switched Reluctance Dual-rotor Motor, SSR-DRM), 分析其工作原理和多工况运行模式, 进行参数设计、建模以及电磁静态和瞬态仿真, 从磁力线分布、磁密、瞬态转矩与空载反电势等对比分析设计和仿真。结果表明: SSR-DRM 的主、副电机在 560 V 直流电压下, 额定转矩为 80 N·m, 额定转速为 3 000 r/min, 额定输出功率为 25 kW, 满足设计要求。

**关键词:** 分体式开关磁阻双转子电机; 结构设计; 参数设计; 电磁仿真

中图分类号: TM35; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 04-0935-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0642

## Design and Electromagnetic Simulation of Split Switched Reluctance Dual-Rotor Motor

Deng Tao<sup>1</sup>, Deng Song<sup>2</sup>

(1. Institute of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Mechatronics &amp; Automobile Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** There are some problems such as bad heat dissipation and electromagnetic coupling for the traditional dual-rotor motor of hybrid electric vehicles. Two SRMs of same size are mechanically connected through a coupling to form a dual-rotor motor with two rotors and one stator. A split switched reluctance dual-rotor motor (SSR-DRM) is innovatively designed. The working principle and multi-operating mode of SSR-DRM are analyzed, and the parameters design, modeling and electromagnetic simulation are implemented. The parameters of design and simulation are compared and analyzed from the aspects of magnetic line distribution, magnetic density, transient torque and no-load back EMF. The results show that under 560 V DC voltage, the split switched reluctance dual-rotor motor's rated torque is 80 N·m, rated speed is 3 000 r/min and rated output power is 25 kW. Simulation results meet the requirement of design.

**Keywords:** split switched reluctance dual-rotor motor; structure design; parameter design; electromagnetic simulation

## 引言

应用较为广泛的混合动力系统主要是由电机与行星齿轮组成, 传输效率高, 但齿轮传动会造成磨损、噪音、润滑等一系列问题。

有学者提出一种基于电磁能量转换原理的双转子电机<sup>[1]</sup>, 是一种无齿轮机构, 取行星齿轮、电机和离合器, 可实现功率分流与耦合功能, 又减轻整车质量和节省空间。Maryam 等<sup>[2]</sup>设计一种新的双定子开关磁阻电机, 具有 E 型铁心定子和分

收稿日期: 2019-12-09 修回日期: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51305473); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jcsx-fxydX0028); 重庆市教育委员会科学技术研究重点项目(KJZD-K202000701)

第一作者: 邓涛(1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源汽车理论与应用。E-mail: d82t722@cqjtu.edu.cn

段转子,适用于高转矩应用。Li等<sup>[3]</sup>将同步磁阻和表面永磁转子采用“内-外”结构,合成一个具有公共轴的单电机,称作双转子混合同步永磁电机,可分离电磁转矩和磁阻转矩分量。Joachim等<sup>[4]</sup>将永磁体与直流磁场绕组在外转子上相结合,设计一种具有2个同心转子的旋转磁场电机。庄兴明等<sup>[5]</sup>提出一种辐型磁钢双机械端口电机,永磁体嵌于外转子上,呈辐型布置,是内外电机共用的,类似同一磁场双转子电机。高起兴等<sup>[6]</sup>在双转子永磁电机内外侧转子分别建立新型Halbach永磁体,使两部分转子同时获得理想单边磁场,有效优化气隙磁密,降低了转矩脉动。陈云云等<sup>[7]</sup>将双定子电机与定子永磁型双凸极电机相融合,开发出具有高转矩密度、高功率密度的双凸极永磁型双定子电机,不仅可靠性高,还拥有较宽的恒功率区和调速范围。徐奇伟等通过在外转子上安装隔磁环并设置了其磁轭厚度,解决了双转子电机内部电磁耦合问题,实现了内外电机的解耦<sup>[8]</sup>。

综上,国内外研究的双转子电机大多是属于同心永磁式的,不可避免地出现如下问题:高速旋转下永磁体的使用会导致其本身散热不良,出现退磁现象,且同心式的设计会出现磁场耦合,严重干扰内电机与外电机内部的磁场。因此,本文结合分体式双转子电机与开关磁阻电机,创新设计一款分体式开关磁阻双转子电机(Split Switched Reluctance Dual-rotor Motor, SSR-DRM),相较于与其相似的同心式开关磁阻双转子电机<sup>[9]</sup>和双凸极式永磁双转子电机<sup>[10]</sup>,其分体式结构由于2部电机并列布置,两磁场也呈并列分布,可杜绝磁场耦合现象的发生。而开关磁阻电机由于其定、转子皆无永磁体,故可以避免永磁体过热带来的退磁现象,解决了其冷却问题。

## 1 分体式开关磁阻双转子电机结构设计和工作模式

### 1.1 分体式开关磁阻双转子电机结构设计

如图1所示,传统的双转子电机大多是由内外

2个永磁同步电机构成,其内电机的转子与发动机相连,中间转子内外侧均内嵌有永磁体,并通过输出轴将动力传至车轮。绕组安装在定子与内转子上,通过滑环与蓄电池相连接。这样当内转子绕组与定子绕组共同励磁时,外气隙会有内转子绕组励磁产生的磁场,内气隙会有定子绕组励磁产生的磁场,两磁场相互干扰,会使电机出现剧烈的转矩波动。另外,中间转子内置于内转子与定子中,高速旋转会使其散热困难,造成永磁体退磁。

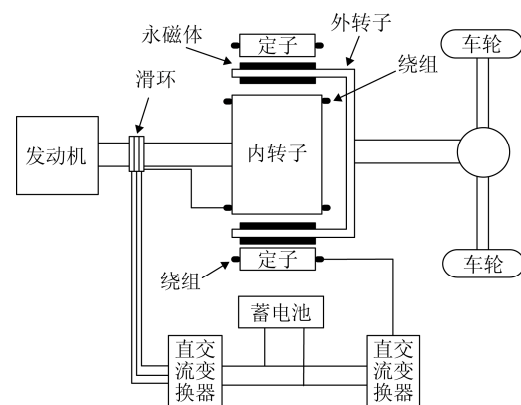


图1 双转子电机混合动力系统示意图

Fig. 1 Diagram of dual-rotor motor hybrid power system

基于开关磁阻电机设计基础,以混合动力汽车为应用对象,设计一款分体式开关磁阻双转子电机(SSR-DRM),如图2和3所示。双转子电机可看成由主、副2部开关磁阻电机组成;主电机的转子与发动机输出轴相连,且定子也可旋转;副电机转子与主电机定子之间通过联轴器连接<sup>[11]</sup>,一同构成双转子电机的外转子(呈高脚杯形状);双转子电机定子与内转子上缠绕有集中绕组,由于开关磁阻电机是直流电机,故可由车用直流蓄电池直接供电,无需逆变器中间转换;外转子上既无绕组也无永磁体。该电机不仅继承了单转子开关磁阻电机高可靠性、高功率密度等优点,还有效避免了外转子冷却与同心式双转子电机存在的磁场耦合问题,但开关磁阻电机固有的诸如转矩脉动大等问题仍然存在,且分体式的排列虽减小了电机径向尺寸,但增加了其轴向尺寸。SSR-DRM内转子与发动机机械连接,外转子与输出轴连接以驱动车辆。在系统中,定子

可被视为纯电气端口与蓄电池之间传递电能, 外转子可被视为纯机械端口输出机械能到车轮, 而内转子可被视为机械、电气双端口, 既可接受来自发动机的机械能, 又可与蓄电池之间传递电能。

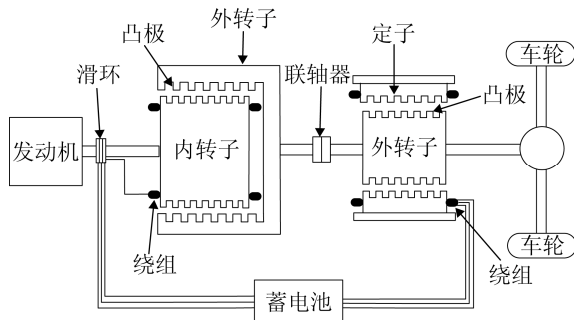


图 2 分体式双转子电机结构图  
Fig. 2 Structure diagram of split double-rotor motor

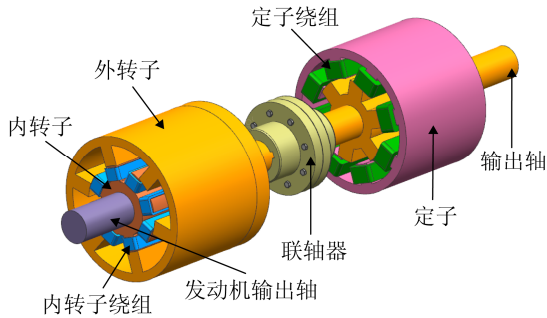


图 3 分体式开关磁阻双转子电机 3D 建模图  
Fig. 3 3D model of SSR-DRM

从功率角度来看, 发动机输出的功率输入给了内转子, 之后由于内转子功率分流的作用, 输入功率分两路传递, 一部分功率经内转子、气隙、外转子传递到输出轴, 一部分经内转子、电刷滑环、蓄电池储存起来, 其具体计算式为:

$$\begin{cases} P_{ICE} = \omega_{ICE} T_{ICE} = \omega_{m1} T_{m1} = \omega_{m1} T_{f1} \\ P_{ICE} = P_e + P_d \\ P_e = (\omega_{m1} - \omega_{m2}) T_{f1} \\ P_d = \omega_{m2} T_{f1} \\ T_{out} = T_{m2} = T_{f1} + T_{f2} = T_{ICE} + T_{f2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{ICE}$  为发动机功率;  $P_e$  为内电机转差功率;  $P_d$  为通过气隙电磁转矩传递到中间转子上功率;  $\omega_{ICE}$  为发动机转速;  $\omega_{m1}$  为内转子转速;  $\omega_{m2}$  为外转子转速即输出轴转速;  $T_{ICE}$  为发动机输出转矩;

$T_{m1}$  为内转子转矩;  $T_{f1}$  为内转子通过气隙传递到外转子的电磁转矩;  $T_{f2}$  为副定子通过气隙传递到外转子的电磁转矩;  $T_{out}$  为双转子电机输出转矩。

## 1.2 分体式开关磁阻双转子电机多工况运行模式

分体式开关磁阻双转子电机(SSR-DRM)其双机械端口、双电气端口特殊结构, 主副电机可作为电动机或发电机运行, 通过发动机输出功率和蓄电池功率相互配合来满足驱动所需功率, 进而实现多种工作模式, 如表 1 所示。表 1 中,  $\omega_N$ ,  $T_N$ ,  $P_N$  分别为整车所需转速、转矩和功率;  $\omega_{ICE}$ ,  $T_{ICE}$ ,  $P_{ICE}$  分别为发动机转速、转矩和功率。

表 1 SSR-DRM 多工况运行模式

Tab. 1 SSR-DRM multi-condition operating mode				
工作模式	适用工况	发动机	主电机	副电机
电启动	驻车启动	内转子带动启动	电动	电动
纯电动	低速轻载	关闭	不工作	电动
爬坡	低速重载	$\omega_N < \omega_{ICE}$ $T_N > T_{ICE}$	发电	电动
高速	高速轻载	$\omega_N > \omega_{ICE}$ $T_N < T_{ICE}$	电动	发电
高速加速	高速重载	$\omega_N > \omega_{ICE}$ $T_N > T_{ICE}$	电动	电动
无级变速	发动机单独驱动	$P_N = P_{ICE}$	发电	电动
制动回馈	减速制动	关闭	发电	发电

## 2 分体式开关磁阻双转子电机参数设计

参数设计时将分体式开关磁阻双转子电机当作 2 台传统单转子开关磁阻电机, 其中主电机由于其绕组绕在转子上, 定子(外转子)作为主要旋转部件, 参数设计过程中与传统开关磁阻电机有些差别。副电机则按照一台传统的单转子开关磁阻电机设计经验进行。参考丰田第三代普锐斯永磁同步电机指标, 稳态运行时, 主副电机额定功率皆为 25 kW, 额定电压为 560 V 直流电压, 额定转速为 3000 r/min。以下是对电机比较重要参数的选定原则。

## 2.1 相数、极对数的确定

开关磁阻电机相数是关键选定参数之一。由于四相 8/6 极结构相比于三相启动性能要好，转矩波动小，相比于五相其电机和控制器成本和复杂性低，故副电机选定四相 8/6 极结构，而主电机由于其特殊旋转需求，转子选定为 8 极，定子选定为 6 极。

## 2.2 极弧的确定

极弧也是影响电机电磁性能的重要参数，定子和转子极弧 $\beta_s$ ， $\beta_r$ 根据式(2)选择<sup>[12]</sup>：

$$\begin{cases} \min(\beta_s, \beta_r) \geq \frac{2\pi}{mN_r} \\ \beta_s + \beta_r \leq \frac{2\pi}{N_r} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $m$ 为电机相数； $N_r$ 为转子极数。

## 2.3 主要结构尺寸的确定

定、转子内外径以及轴长是电机主要的结构尺寸，采用类比法参考异步电动机相近容量相近转速的尺寸。其余尺寸式(3)计算<sup>[12]</sup>：

$$\begin{cases} l_{fe} = \lambda D_1 \\ D_{i1}/D_1 = 0.5 \sim 0.6 \\ D_2 = D_{i1} - 2\delta \end{cases} \quad (3)$$

式中： $D_1$ 为定子外径； $D_{i1}$ 为定子内径； $D_2$ 为转子外径； $\delta$ 为气隙宽度； $l_{fe}$ 为铁芯轴长； $\lambda$ 为主要尺寸比。

## 2.4 轭高的确定

轭高设计应避免轭部铁芯在最大磁通密度时出现过饱和，但厚度过大会导致凸极高度变小，不利于绕组嵌套。定、转子轭高 $h_{cs}$ ， $h_{cr}$ 计算为<sup>[12]</sup>：

$$\begin{cases} h_{cs} = [(1.2 \sim 1.4)D_{i1} \sin(\beta_s / 2)] / 2 \\ h_{cr} = [(1.2 \sim 1.4)D_2 \sin(\beta_r / 2)] / 2 \end{cases} \quad (4)$$

## 2.5 每相绕组匝数的确定

电机其定子绕组和内转子绕组皆采用集中绕组设计。考虑到齿槽空间有限及散热等因素，参考传统开关磁阻电机设计经验<sup>[12]</sup>，选取如式(5)所示：

$$N_{ph} = \frac{3.04N_r U \theta_c}{n_N B_\delta D_2 l_{fe}} \quad (5)$$

式中： $N_{ph}$ 为绕组匝数； $U$ 为电源电压； $\theta_c$ 为导通角； $n_N$ 为额定转速； $B_\delta$ 为气隙磁通密度。

根据以上分析，得到电机尺寸参数如表 2 所示。

表 2 样机主要尺寸参数

Tab. 2 Main dimension parameters of the prototype

参数	数值	参数	数值
主电机类型	四相 8/6 极	副电机类型	四相 8/6 极
额定功率/kW	25	额定电压/V	560
额定转速/rpm	3 000	主电机定子外径/mm	264
主电机定子内径/mm	156	主电机气隙宽度/mm	0.5
主电机转子外径/mm	155	主电机转子内径/mm	60
主电机定子极弧/(°)	20	主电机转子极弧/(°)	18
主电机定子轭高/mm	16.2	主电机转子轭高/mm	19.4
主电机轴长/mm	190	副电机定子外径/mm	264
副电机定子内径/mm	156	副电机气隙宽度/mm	0.5
副电机转子外径/mm	155	副电机转子内径/mm	60
副电机定子极弧/(°)	20	副电机转子极弧/(°)	24
副电机定子轭高/mm	16.2	副电机转子轭高/mm	19.4
副电机轴长/mm	190	硅钢片材料	DW360-50
定子绕组匝数	60	内转子绕组匝数	60

### 3 分体式开关磁阻双转子电机电磁仿真分析

选定好电机尺寸参数后, 进行建模与有限元分析。使用 Ansoft Maxwell 软件对电机进行建模与有限元分析, 分为前处理与后处理 2 个过程。

#### 3.1 前处理

前处理过程主要分为几个步骤: 绘制几何模型、添加 region 求解域与 band 运动域、选定材料、添加边界条件、设置激励源与建立外电路、划分网格、进行求解项的设定。经以上步骤, 得到的求解前的 2D 模型如图 4 所示。

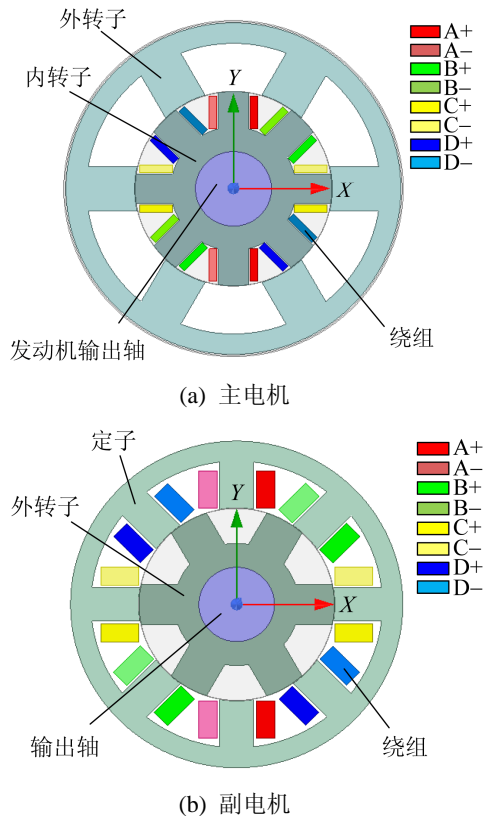


图 4 SSR-DRM 求解前 2D 模型图  
Fig. 4 2D model diagram before solving SSR-DRM

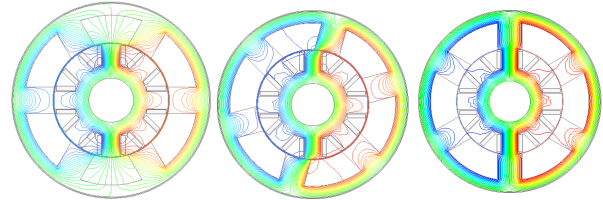
#### 3.2 后处理

##### 3.2.1 静态分析

###### (1) 磁力线分布

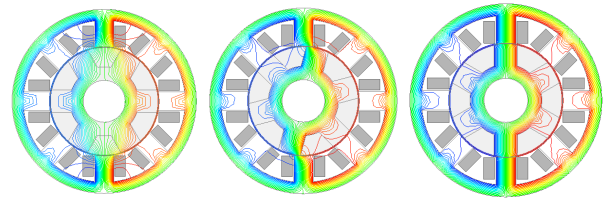
假设内转子齿轴线与外转子槽轴线重合、定子

齿轴线与外转子槽轴线重合为初始位置(电感最小位置)。将电机内转子绕组 A 相单独通电, 得到磁力线如图 5 所示。将定子绕组 A 相单独通电, 得到磁力线如图 6 所示。



(a) 初始位置 0° (b) 中间位置 15° (c) 对齐位置 30°

图 5 内转子绕组单独通电时典型位置磁力线分布图  
Fig. 5 Distribution of typical position magnetic force lines of inner rotor windings when individually activated



(a) 初始位置 0° (b) 中间位置 15° (c) 对齐位置 30°

图 6 定子绕组单独通电时典型位置磁力线分布图  
Fig. 6 Distribution of magnetic lines at typical positions when stator windings are powered on separately

根据磁阻最小原理可知, 磁通总是沿着磁阻最小路径闭合, 当定子绕组单独通电时, 磁力线经定转子凸极、定转子轭部、气隙形成闭合回路。在外转子处于初始位置时, 气隙磁阻最大, 相间漏磁与极间漏磁也最大; 随着外转子旋转, 主磁通逐渐增大, 漏磁通逐渐减小; 当旋转到中间位置时, 定转子齿极间的磁力线密度达到最大, 在齿尖处有可能达到磁饱和; 当旋转到定转子齿极轴线重合位置时, 主磁通达到最大值, 漏磁通几乎为 0。内转子绕组单独通电时的分析与定子绕组单独通电时类似。

###### (2) 磁密分布

根据图 7~8 所示, 当定子绕组 A 相单独通电时, 刚开始由于定转子凸极轴线相距较远, 故磁阻很大, 磁密非常小。

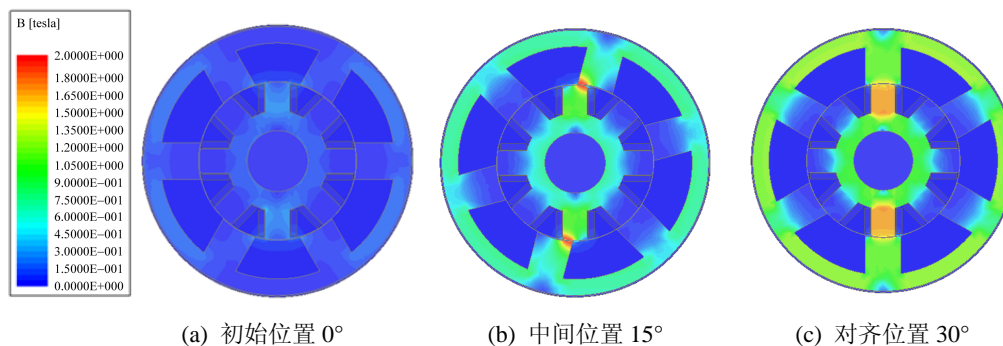


图 7 内转子绕组单独通电时典型位置磁密分布图

Fig. 7 Distribution of typical position magnetic density of inner rotor windings when individually activated

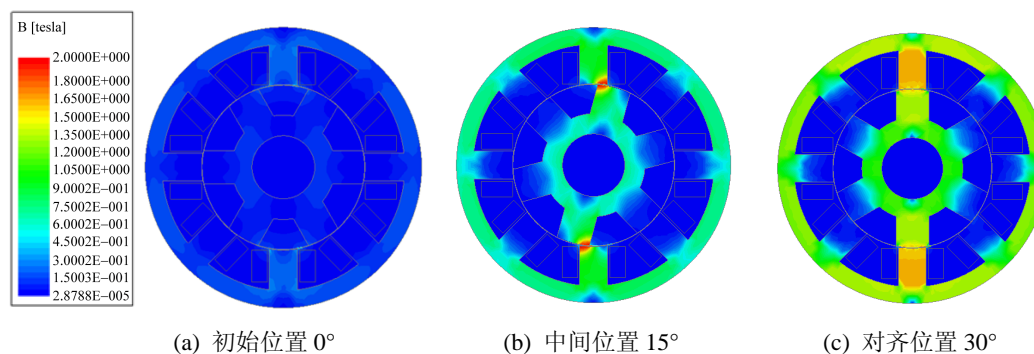


图 8 定子绕组单独通电时典型位置磁力线分布图

Fig. 8 Distribution of magnetic density at typical positions when stator windings are powered on separately

随着转子的转动，转子凸极不断靠近定子凸极，定转子轭部、齿部磁密不断增大，电机所产生的电磁转矩也不断增大。当转子转到中间位置时(15°)，在定转子凸极接触点附近磁密达到最大，在额定电流下最大磁密为 2.0 T 左右，合理值范围内，满足设计要求。随着转子继续旋转，定转子轭部、齿部磁密继续增大，但定转子凸极接触点附近磁密开始逐渐减小，这时电机所产生的电磁转矩也开始减小。当定转子凸极达到对齐位置时，电机内部磁阻最小，定转子轭部、齿部磁密达到最大(1.4 T 左右)，齿间气隙磁密减小到 1.8 T。内转子绕组通电时的磁密分析与定子绕组类似。从静态仿真来看，电机内部尤其是定转子齿部、轭部以及齿间气隙并未达到磁饱和，基本满足设计要求。

### 3.2.2 瞬态分析

#### (1) 输出转矩

图 9~10 所展示出的是主、副电机在额定转速

下瞬态转矩的输出曲线。根据已知条件，主副电机额定功率均为 25 kW，额定转速均为 3 000 r/min。

$$P = (T \cdot 2\pi n) / 60 \quad (6)$$

其额定转矩理论值应为 80 N·m，由图 9 仿真结果所得出的主电机瞬态转矩平均值为 82.25 N·m，图 10 仿真结果所得出的副电机瞬态转矩平均值为 83.20 N·m，其误差分别为 2.8%和 4%，故从瞬态仿真角度考虑，仿真值满足设计要求，初步验证了电机设计的正确性。

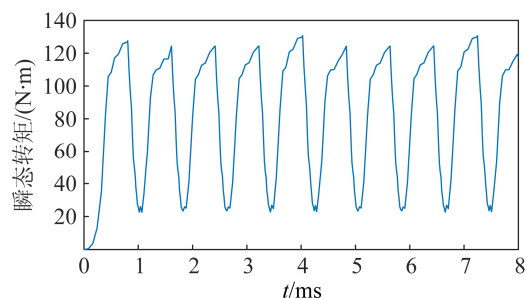


图 9 内转子绕组通电时外转子转矩随时间变化关系图  
Fig. 9 Relationship between the intermediate rotor torque and time when inner rotor windings are powered on separately



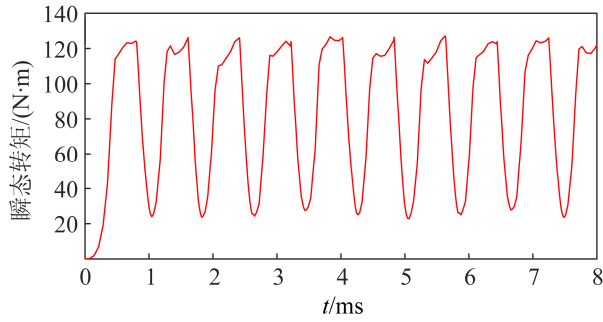


图 10 定子绕组通电时外转子转矩随时间变化关系图  
Fig. 10 Relationship between the intermediate rotor torque and time when stator windings are powered on separately

(2) 空载反电动势

空载仿真过程中, 使外转子运行在额定转速 3 000 r/min, 定子、内转子绕组中变化的永磁磁链在各自的绕组中产生感应电动势, 即空载反电动势。2 套绕组磁链曲线都具有对称性与线性的特点。根据磁链特性, 空载反电动势  $e$  可表述为:

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{d\theta} \cdot \omega \quad (7)$$

式中:  $\psi$  为绕组磁链;  $\theta$  为转子位置角;  $\omega$  为转子角速度。

结合图 11~14, 可知磁链上升区间对应空载反电动势的正区间, 下降区间对应其负区间。由图 13~14 可知, 定子、内转子绕组反电动势曲线为理想的方波, A, B, C, D 四相依次产生感应电动势, 与磁链曲线类似, 也具有对称性与线性的特点, 仿真值满足设计要求。

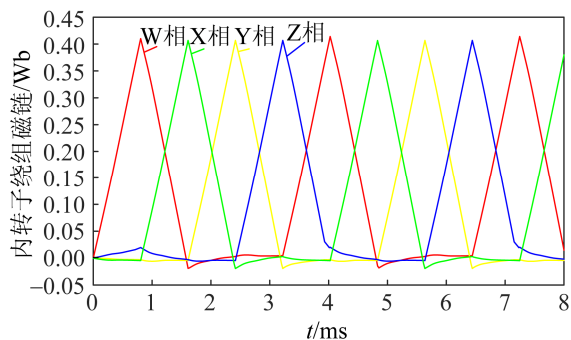


图 11 内转子绕组磁链波形图  
Fig. 11 Waveform of flux linkage of inner rotor winding

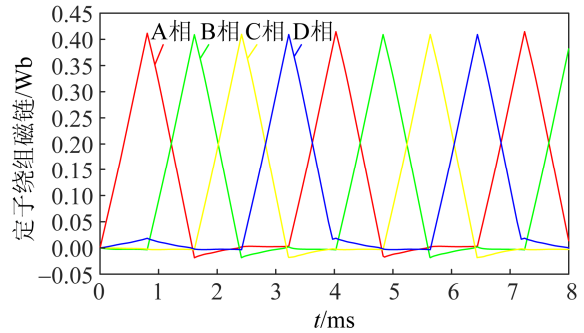


图 12 定子绕组磁链波形图  
Fig. 12 Waveform of flux linkage of stator winding

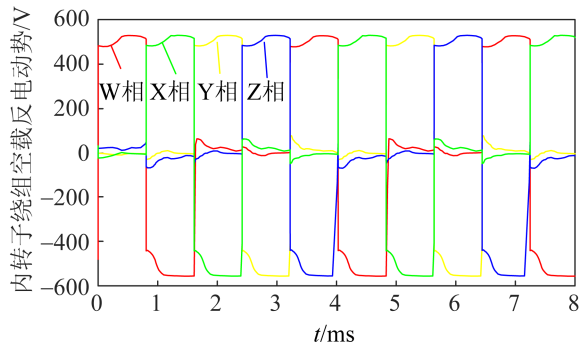


图 13 内转子绕组空载反电动势波形图  
Fig. 13 No load back EMF waveform of inner rotor winding

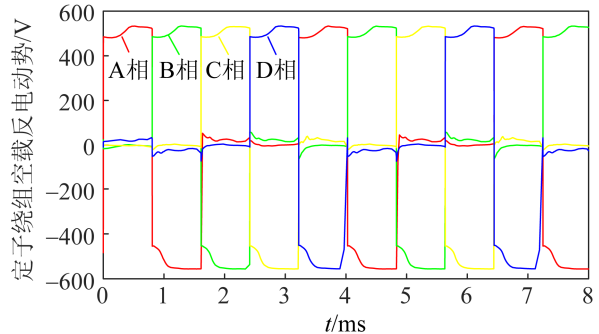


图 14 定子绕组空载反电动势波形图  
Fig. 14 No load back EMF waveform of stator winding

4 结论

以混合动力汽车为应用对象, 基于传统双转子电机进行了分体式开关磁阻双转子电机的创新设计, 主要结论如下:

(1) 分析了传统双转子电机的特性, 总结出其缺点, 提出了分体式开关磁阻双转子电机的方案, 并进行结构设计。

(2) 阐述了分体式开关磁阻双转子电机工作原

理以及在不同工况下主、副电机的运行模式,满足混合动力汽车功率需求情况下进行了参数设计。

(3) 运用 Ansoft Maxwell 软件对分体式开关磁阻双转子电机进行二维电磁场瞬态仿真,从磁力线分布、磁密、瞬态转矩以及空载反电势角度验证了电机参数设计的合理性。结果表明:分体式开关磁阻双转子电机的主、副电机在 560 V 直流电压下,额定转矩为 80 N·m,额定转速为 3000 r/min,额定输出功率为 25 kW,仿真结果满足设计要求。

后续的研究中,将建立 SSR-DRM 仿真模型,并搭载 HIL 和台架实验平台深入研究 SSR-DRM 在混合动力汽车领域的应用可行性和结构优化方案。

### 参考文献:

- [1] Hoeijmakers M J, Ferreira J A. The Electric Variable Transmission[J]. IEEE Trans. Ind. Appl. (S0278-0046), 2006, 42(4): 1092-1100.
- [2] Abdollahi M, Mirsalim M. Novel E-Core Double-Stator Two Phase Switched Reluctance Motor with Segmental Rotor[C]//2019 10<sup>th</sup> International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Shiraz, Iran, 12-14 February, 2019.
- [3] Li Y J. Design and Optimization of a Novel Dual-Rotor Hybrid PM Machine for Traction Application[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. (S0278-0046), 2018, 65(2): 1762-1771.
- [4] Joachim D, Hendrik V. Torque Analysis on a Double Rotor Electrical Variable Transmission with Hybrid Excitation[J]. IEEE Trans. Ind. Electron. (S0278-0046), 2017, 64(1): 60-68.
- [5] 庄兴明, 宋强, 温旭辉, 等. 辐型磁钢双机械端口电机的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5925-5933.  
Zhuang Xingming, Song Qiang, Wen Xuhui, et al. Decoupling Control of Dual Mechanical Ports Machine with Spoke Type Permanent-magnet Arrangement[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34(33): 5925-5933.
- [6] 高起兴, 王冲, 井立兵, 等. Halbach 阵列双转子永磁电机磁场分析与转矩计算[J]. 微特电机, 2018, 46(11): 51-54.  
Gao Qixing, Wang Chong, Jing Libing, et al. Magnetic Field Analysis and Torque Calculation of Dual-Rotor Permanent Magnet Motor with Halbach Array[J]. Micro-Special Motor, 2018, 46(11): 51-54.
- [7] 陈云云, 朱孝勇, 全力, 等. 基于参数敏感度的双凸极永磁型双定子电机的优化设计和性能分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 160-168.  
Chen Yunyun, Zhu Xiaoyong, Quan Li, et al. Optimum Design and Performance Analysis of Doubly Salient Permanent Magnet Double Stator Motor based on Parameter Sensitivity[J]. Journal of Electrical Technology, 2017, 32(8): 160-168.
- [8] 徐奇伟, 孙静, 赵蒙, 等. 混合动力车用电气无级变速器的电磁解耦优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2005-2014.  
Xu Qiwei, Sun Jing, Zhao Meng, et al. Electromagnetic Decoupling Optimal Design of Electric Variable Transmission Used for Hybrid Electric Vehicle[J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33(9): 2005-2014.
- [9] 韩守亮. 用于传动系统的开关磁阻式双转子电机的基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
Han Shouliang. The Basic Research of Switched Reluctance Double-rotor Applied to Transmission System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [10] 陈云云. 混合动力汽车用双凸极式永磁双转子电机的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.  
Chen Yunyun. Research on a Doubly-Salient Permanent-magnet Double-rotor Motor Applied for Hybrid Electric Vehicles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [11] 陈星, 苑士华, 胡纪滨, 等. 采用分体式双转子电机的混合动力系统的控制[J]. 华南理工大学学报, 2012, 40(7): 95-100.  
Chen Xing, Yuan Shihua, Hu Jibin, et al. Control of Hybrid Power System with Split Dual-rotor Motor[J]. Journal of South China University of Technology, 2012, 40(7): 95-100.
- [12] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 39-51.  
Wu Hongxing. Theory and Control Technology of Switched Reluctance Motor[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 39-51.