

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.246010

电动汽车轴径向混合磁通同齿极开关磁阻电机设计与分析

闫文举¹, 杨宏伟¹, 辛俊¹, 陈昊¹, 于丰源¹, 王青²

(1. 中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 针对传统开关磁阻电机由于转矩脉动大、转矩密度低等缺点限制其在电动汽车驱动电机领域发展的问题, 提出了一种新型电动汽车轴径向磁通分段转子开关磁阻电机结构。首先, 阐述了新型电机的拓扑结构和工作原理。然后, 根据功率方程给出主要设计参数。其次, 选取4个结构参数, 通过有限元进行正交试验矩阵分析, 结合多目标影响程度的权重矩阵选取最佳的参数组合, 进一步提高电机性能。最后, 通过仿真实验对比和静、动态特性分析, 分别验证了轴径向磁通分段转子开关磁阻电机模型的准确性和所提电机结构对于性能提升的有效性。

关键词: 电动汽车; 轴径向磁通开关磁阻电机; 分段转子结构; 有限元分析; 多目标优化

Design and analysis of an axial and radial hybrid flux switched reluctance motor with identical poles for electric vehicles

YAN Wenju¹, YANG Hongwei¹, XIN Jun¹, CHEN Hao¹, YU Fengyuan¹, WANG Qing²

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. College of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To address the shortcomings of traditional switched reluctance motors in electric vehicle drive applications, such as large torque pulsation and low torque density, a novel axial radial flux segmented rotor switched reluctance motor (ARFSRSRM) for electric vehicles is proposed. First, the topology and working principle of the motor are introduced, followed by the derivation of design parameters based on the power equation. Next, four structural parameters are selected for optimization using orthogonal test matrix analysis through finite element methods. The optimal parameter combination is determined by combining the weight matrix of multi-objective influence factors to further enhance motor performance. Finally, the accuracy of the ARFSRSRM model and the effectiveness of the proposed motor structure on performance enhancement are verified by comparing simulation experiment and the static and dynamic characteristics analysis, respectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007191).

Key words: electric vehicles; axial radial flux switched reluctance motor; segmented rotor structure; finite element method; multi-objective optimization

0 引言

近年来, 能源短缺和环境污染问题成为世界关注的焦点问题^[1-4], 为缓解能源危机并减少有害气体的排放, 需大力发展低碳节能的电动汽车作为人们出行的主要交通工具^[5-8]。

与传统汽车不同, 电动汽车的动力系统核心包

含动力电池、电机以及控制单元。其中, 电机作为电动汽车核心部件, 目前主要采用永磁同步电机、感应电机、无刷直流电机和开关磁阻电机。相较于其他类型电机, 开关磁阻电机具有启动转矩大、结构坚固、可靠性高和高效范围宽等优势^[9], 但因其转矩脉动大、转矩密度低等缺点限制其在新能源汽车、工业方面的大规模应用^[10]。因此为实现开关磁阻电机在电动汽车领域的广泛使用, 需要对其进行深入研究设计。

为了提升开关磁阻电机的市场竞争力, 降低转矩脉动、提高转矩密度显得尤为重要^[11]。有学者通

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007191); 徐州市科技创新基础研究计划项目资助(KC23021); 中国博士后基金项目资助(2023M733749)

过优化方法(如单参数优化、多目标优化和响应面优化等)和新的设计策略提升开关磁阻电机的性能,实现高转矩、低转矩脉动等优势^[12-16]。此外,从目前国内外学者们的研究来看,轴向磁通、双定子、分段转子开关磁阻电机等新型结构电机在改善转矩脉动和密度方面具有显著效果^[17-20]。文献[21-22]对径向磁通双定子开关磁阻电机进行设计分析,分别研究绕组极性对铁芯损耗与输出转矩的影响。相较于传统的定转子结构,文献[23-24]尝试将模块化定子、分段转子结构和内外定子均为U型分块结构应用于双定子开关磁阻电机,提出一种新型的双定子分段转子模块式开关磁阻电机和一种磁场解耦型双定子开关磁阻电机,提高了电机的功率密度。对于转子极数对电机的影响在文献[25]也进行了分析,通过对比同一定子极数下不同转子极数的开关磁阻电机的性能,发现转子极数相对较小情况下,转矩出力得到进一步提高。还有学者将双定子结构、分段转子结构应用于轴向磁通开关磁阻电机,提出了一种新型轴向磁通双定子开关磁阻电机,该电机采用全节距绕组结构,并且通过一种多层目标优化策略,有效提升平均转矩,降低转矩脉动^[26]。目前国内外对开关磁阻电机的研究大部分为单轴向/单径向磁通电机,对轴向径向复合结构的研究很少。

目前学者们已经对轴径向混合永磁同步、无刷等电机进行了研究,在文献[27]中,提出一种具有轴向和径向磁通的新型混合磁通永磁同步电机,并与仅具有径向磁通的永磁同步电机的性能进行对比,发现新型电机的效率在不同转速下都有良好的提升。基于轴径向复合结构建模难度高,为简化电机的设计以适用特定应用,文献[28]提出一种利用坐标变换理论对永磁同步电机进行等效变换的方法可将轴向和径向永磁电机相互等效,然后通过实验机对所提出理论进行验证,有限元和实验结果都与所提出方法的结果吻合。此外,轴径向复合结构还应用于无刷混合励磁电机和磁滞电机^[29-30],都建立了径向-轴向等效磁路模型和三维有限元模型,并制造样机进一步验证分析的准确性。

本文在对文献[14,16,26,31]所提结构、设计方法与优化方法深入研究的基础上,结合轴向双定子开关磁阻电机与径向分段转子开关磁阻电机的优势,提出了一种新型轴径向磁通分段转子开关磁阻电机(axial radial flux segmented rotor switched reluctance motor, ARFSRSRM),并对其性能进行了优化和分析。

1 新型 ARFSRSRM 拓扑结构与工作原理

图 1 给出了三相 12/14/12 轴径向磁通短磁路分

段转子开关磁阻电机拓扑结构。轴向和径向的相邻定子极为相同结构,称为同齿极定子极。该电机分为轴向和径向两部分,轴向部分采用轴向双定子、分段转子结构和集中式绕组布置,轴向左定子、分段转子和轴向右定子沿轴向依次排列。径向部分采用径向定子、分段转子结构和集中式绕组布置,外定子和内分段转子径向同心分布,轴向和径向共 3 个 12 槽定子,共用一个 14 节分段转子块。

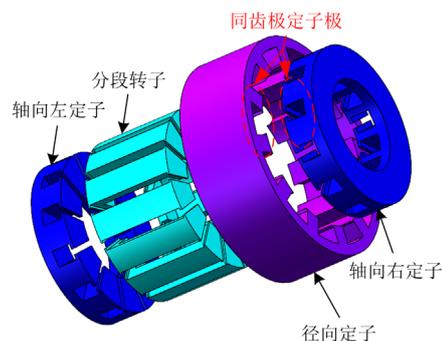


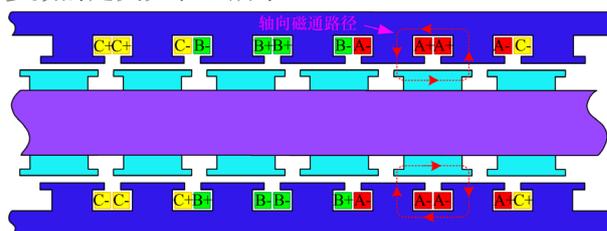
图 1 提出的 ARFSRSRM 拓扑结构图

Fig. 1 The proposed ARFSRSRM structure topology

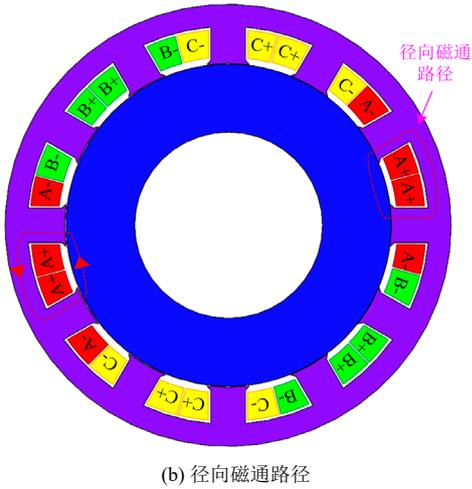
提出的 ARFSRSRM 轴向左右定子结构相同,绕组线圈缠绕在定子槽内,采用集中式绕组结构。每个定子槽中穿过两组绕组,绕组的极性在一个槽内相同,但在定子槽左右两侧极性相反,可以获得较短的磁通路径。通过将 ARFSRSRM 沿圆周方向展开,得到电机轴向平铺图如图 2(a)所示。图 2(a)描述了电机轴向的绕组极性分布以及在对齐位置的磁通路径,一侧定子极性分布为 NSNSNSNSNSNS,另一侧定子极性为 SNSNSNSNSNSN,上下定子磁通方向相同,可有效激励转子转动。

径向定子采用传统的凸极结构,绕组缠绕方式与轴向绕组缠绕方式相同,也可获得较短的磁通路径。图 2(b)为 ARFSRSRM 的径向平面图,描述了其径向外定子的绕组极性分布图以及在对齐位置的磁通路径,其极性分布为 NSNSNSNSNSNS,磁通路径方向显示左右定子线圈有着相同的激励。

为更加清晰地显示电机结构的磁路特性,建立了如图 3 所示的 ARFSRSRM 等效磁路模型,其中参数的定义如表 1 所示。



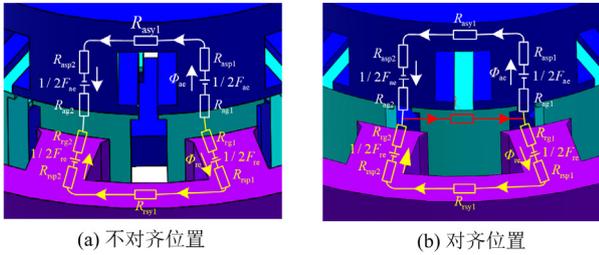
(a) 轴向磁通路径



(b) 径向磁通路径

图 2 对齐位置磁通路径示意图

Fig. 2 Magnetic flux path diagram of alignment position



(a) 不对齐位置

(b) 对齐位置

图 3 等效磁路模型

Fig. 3 Equivalent magnetic circuit model

表 1 等效磁路参数定义

Table 1 Parameters definition of equivalent magnetic circuit model

参数	定义
F_{ac}/AT	轴向定子励磁绕组磁动势
F_{re}/AT	径向定子励磁绕组磁动势
Φ_{ac}/Wb	轴向定子磁通
Φ_{re}/Wb	径向定子磁通
R_{ag}/H^{-1}	轴向气隙磁阻
R_{asp}/H^{-1}	轴向定子极磁阻
R_{asy}/H^{-1}	轴向定子轭部磁阻
R_{rg}/H^{-1}	径向气隙磁阻
R_{rsp}/H^{-1}	径向定子极磁阻
R_{rsy1}/H^{-1}	径向定子轭部磁阻
R_r/H^{-1}	分段转子磁阻

结合图 2 轴向和径向对齐位置磁通路径和图 3(a)不对齐位置等效磁路,发现轴向和径向定子具有相反的励磁,因此其具备与传统开关磁阻电机不同的磁路特性。此电机在对齐位置磁通路径与传统轴向或径向磁通开关磁阻电机相似,但在不对齐位置,轴向和径向的磁通会相互抵消。由于磁通抵消,将获得更低的最小电感,使得电机的磁共能进一步

增大,因此可以进一步提升电机的输出转矩。

基于线性假设,新型 ARFSRSM 在对齐位置的等效磁路模型如图 3(b)所示,同时简化的等效磁路如图 4 所示。其中轴向定子等效磁阻 R_{as} 和径向定子等效磁阻 R_{rs} 计算表达式为

$$\begin{cases} R_{as} = R_{ag1} + R_{ag2} + R_{asy1} + R_{asp1} + R_{asp2} \\ R_{rs} = R_{rg1} + R_{rg2} + R_{rsy1} + R_{rsp1} + R_{rsp2} \end{cases} \quad (1)$$

根据图 4,所提出的 ARFSRSM 在对齐位置的基本磁路方程可以写为

$$\begin{cases} F_{ac} = \Phi_{ac} R_{as} + (\Phi_{ac} + \Phi_{re}) R_r \\ F_{re} = \Phi_{re} R_{rs} + (\Phi_{ac} + \Phi_{re}) R_r \end{cases} \quad (2)$$

因此,径向和轴向磁通 Φ_{ac} 、 Φ_{re} 的计算表达式为

$$\begin{cases} \Phi_{ac} = \frac{(R_{rs} + R_r) F_{ac} - R_r F_{re}}{R_r (R_{as} + R_{rs}) + R_{as} R_{rs}} \\ \Phi_{re} = \frac{(R_{as} + R_r) F_{re} - R_r F_{ac}}{R_r (R_{as} + R_{rs}) + R_{as} R_{rs}} \end{cases} \quad (3)$$

结合图 3(b)、图 4 及式(2)和式(3),通过对所提出的 ARFSRSM 在对齐位置的磁路分析,表明径向磁通和轴向磁通都通过分段转子、径向定子和轴向定子产生的磁通在分段转子处相互叠加,实现增大电机有效转矩的效果。

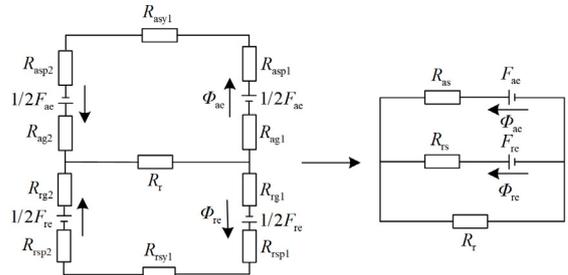


图 4 简化等效磁路

Fig. 4 Simplified equivalent magnetic circuit

综上,提出的 ARFSRSM 具有以下特点:

- 1) 转子由环氧树脂制成的固定盘固定,有效减小风阻;
- 2) 轴向双定子能很好地提供磁力平衡,增加电机寿命;
- 3) 分段转子和相邻齿极同相绕组结构,缩短磁通路径,提高电机电磁利用率;
- 4) 轴向、径向共用转子段,增加电机有效转矩,提高电机性能。

2 ARFSRSM 设计原则与多目标优化

2.1 设计原则

根据所提出的 ARFSRSM 拓扑结构,将电机

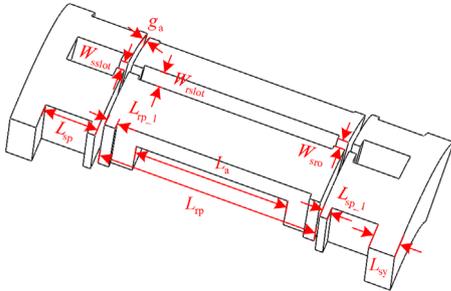
分为轴向双定子分段转子开关磁阻电机和径向分段转子开关磁阻电机。首先, 根据开关磁阻电机的设计要求, 确定轴、径向电机的拓扑结构、功率、转矩、电负荷、磁负荷和磁通密度等。由此推导出轴向功率 P_a 和径向功率 P_r 的方程分别为

$$P_a = \pi K_e K_d \omega_o A_a B \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) D_{\text{avg}} (D_o^2 - D_i^2) \quad (4)$$

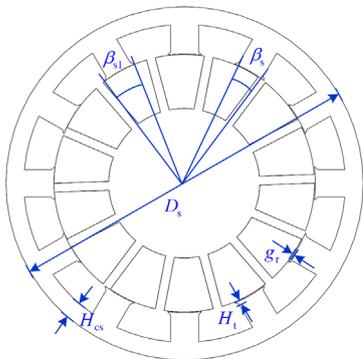
$$P_r = K_e K_d \left(\frac{\pi^2}{120}\right) \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) A_r B D_o^2 L_a \omega_o \quad (5)$$

式中: K_e 为电机效率; K_d 为占空比; ω_o 为额定角速度; A_a 为电机轴向定子电负荷; B 为磁负荷; σ 为最大电感和最小电感的比例系数; D_{avg} 为电机轴向的外径(径向转子外径) D_o 和内径 D_i 的平均值; A_r 为电机径向定子电负荷; L_a 为径向定子极轴向长度。

电机轴向的平均转矩与内外径之比有关, 当内外径比值为 0.577 时, 可获得最大平均转矩^[32]。由此将 ARFSRSM 轴向的外径(径向转子外径) D_o 取值 175 mm, 内径 D_i 取值 101 mm, 为节省铁芯材料, 径向转子内径 D_{i1} 取值 147 mm。另外, ARFSRSM 设计过程的一些设想和常规系数由文献[14]和文献[26]得到。图 5 给出了 ARFSRSM 的几何参数示意图, 其中参数定义如表 2 所示。



(a) 轴向电机参数示意图



(b) 径向电机参数示意图

图 5 ARFSRSM 的参数示意图

Fig. 5 Parameters diagram of ARFSRSM

表 2 ARFSRSM 的电气规格和初始设计参数

Table 2 Electrical specifications and initial design parameters of ARFSRSM

参数	定义	数值
U	额定电压/V	96
P	额定功率/kW	1.5
n	额定转速/(r/min)	1000
N_s	定子极数	12
N_r	转子极数	14
D_s	径向定子外径/mm	240
D_o	轴向定/转子外径/mm	175
D_{i1}	径向转子内径/mm	147
D_i	轴向定/转子内径/mm	101
L_a	径向定子轴向长度/mm	80
L_{rp}	转子轴向长度/mm	100
L_{rp1}	转子极靴长度/mm	2
L_{sp}	轴向定子极长度/mm	25
L_{sp1}	轴向定子极靴长度/mm	3.5
L_{sy}	轴向定子轭厚度/mm	12
H_{cs}	径向定子轭厚度/mm	14
H_t	径向定子极靴长度/mm	2.5
W_{sslot}	轴向定子槽宽度/mm	18
W_{rslot}	转子槽宽度/mm	11
W_{sro}	轴向定/转子极靴间距宽度/mm	6
β_{s1}	径向定子极带极靴极弧角/(°)	18
β_s	径向定子极不带极靴极弧角/(°)	14
g_r	径向气隙长度/mm	0.4
g_a	轴向气隙长度/mm	0.4
N	每槽绕组匝数	24

由此, ARFSRSM 的轴向总长度 L 可以表示为

$$L = L_{rp} + 2(L_{sy} + L_{sp} + g_a) \quad (6)$$

总结径向磁通开关磁阻电机^[14]和双定子轴向开关磁阻电机^[26,32]设计准则, 本文所提出的 ARFSRSM 的设计准则如下所述。

1) 为确保轴、径向共用一组转子段, 轴向磁通和径向磁通的定子极中心线在同一水平面。

2) 为便于磁通在磁极中流动, 增大定子极与转子极的接触面积, 在轴、径向定子极和转子极靠近气隙处增加极靴。

3) 为便于电机轴向部分绕组的缠绕, 其定子槽设计为平行槽结构, 定子槽宽度 W_{sslot} 在不同圆周半径处相等。

4) 为了转矩波形更加平滑, 转子槽宽度 W_{rslot} 在不同圆周半径处相等。

2.2 设计目标

本文选取平均转矩 T_{av} 、转矩平滑系数 τ 和转矩密度 T_p 作为目标函数。其中转矩平滑系数 τ 为

$$\tau = \frac{T_{av}}{T_{max} - T_{min}} \quad (7)$$

式中, T_{max} 和 T_{min} 分别为最大、最小转矩。为提高电机的效率, 需考虑单位体积上电机输出的转矩即转矩密度 T_p , 如式(8)所示。

$$T_p = \frac{T_{av}}{V_s + V_r} \quad (8)$$

式中: V_s 为电机定子体积; V_r 为电机转子体积。

从电机设计以及文献[26]的优化变量选取经验来看, 结构参数(电机径向定子极靴长度 H_l 、径向定子极带极靴极弧角 β_{sl} 、轴向相邻定/转子极靴间宽度 W_{sro} 和转子槽宽度 W_{rslot})会对平均转矩、转矩平滑系数和转矩密度产生较大影响。

2.3 田口法优化

田口法正交试验矩阵分析是一种简单易操作的优化方法, 它通过统计学中的统计原理来设计变量的一系列组合, 然后通过仿真、计算和组合选取出最佳组合, 这种方法目前广泛应用在电机设计的领域^[24]。因其独特优势, 比较适合本文选取变量的优化。对于这4个优化变量, 各选取4个水平的影响因素。若采用传统的排列组合方式进行试验, 总共需要进行256次试验, 但通过正交试验设计只需16次试验, 大大减少了工作量并节省了优化时间。

4个优化变量的水平值选取如表3所示。通过正交试验后, 需计算出待优化参数的各个水平值对第 k 个待优化目标影响程度的权重 y_k 为

$$y_k = S_i \times T_i \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} S_i = s_i / \sum_{i=1}^l s_i \\ T_i = 1 / \sum_{j=1}^m K_{ij} \end{cases}$$

式中: S_i 为优化目标均值的极差在第 i 个待优化参数下占有极差之和的比例; s_i 为优化目标的均值在第 i 个待优化参数的极差; l 为待优化参数个数; m 为每个待优化参数水平值个数; K_{ij} 为优化目标在第 i 个待优化参数的第 j 个水平值下的值。

在求出平均转矩 T_{av} 、转矩平滑系数 τ 、转矩密度 T_p 在不同优化变量下不同水平值的均值与其在不同优化变量下的极差后, 根据式(9)可计算出待优化

表3 设计变量水平值

因素	变量	水平1	水平2	水平3	水平4
1	H_l	1.5	2	2.5	3
2	β_{sl}	15	16	17	18
3	W_{sro}	6	7.5	9	10.5
4	W_{rslot}	11	13	15	17

参数的水平值对平均转矩影响的权重矩阵 y_1 、对转矩平滑系数影响的权重矩阵 y_2 和对转矩密度影响的权重矩阵 y_3 。然后, 通过将3个优化目标权重矩阵进行加权求和得到总目标矩阵 y , 如式(10)所示。

$$y = w_1 y_1 + w_2 y_2 + w_3 y_3 \quad (10)$$

式中, w_1 、 w_2 和 w_3 分别为平均转矩、转矩平滑系数和转矩密度的加权因子, 三者之和为1, 本文中 $w_1 = 0.4$, $w_2 = 0.3$, $w_3 = 0.3$ 。

通过式(10)得到的各优化变量在不同水平下的多目标权重变化, 如图6所示。其中, 选取各优化变量的最大权重比对应的水平值所组成的组合为最优组合, 本文为“1244”, 充分考虑到优化变量对3个优化目标的共同影响。初始设计和最终设计的转矩波形比较如图7所示, 优化目标比较结果如表4所示。由表4可知, 电机的平均转矩提升了23.4%, 转矩平滑系数和转矩密度提升了19.54%和32.7%。并且由于本文提出的优化方法显著减少了迭代次数, 有效缓解了三维有限元模型计算量和时间成本的压力, 远优于传统排列组合法与有限元相结合的优化方法。

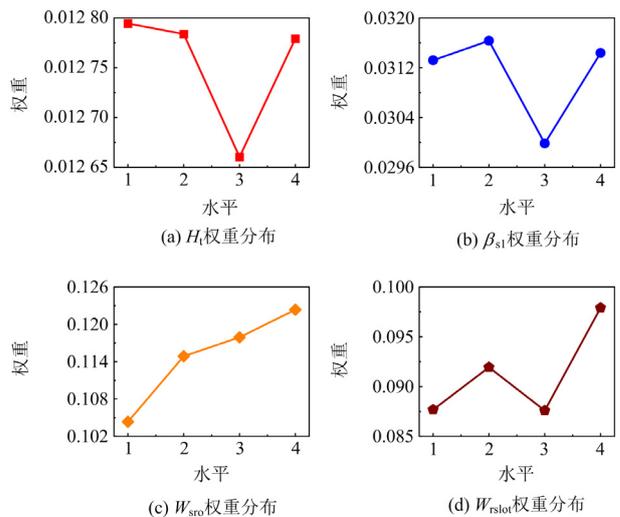


图6 优化变量的多目标权重

Fig. 6 Multi-objective weights of optimal variables

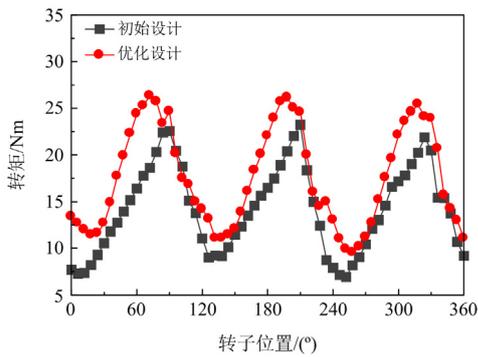


图 7 转矩波形比较

Fig. 7 Torque waveform comparison

表 4 设计变量水平值

Table 4 Horizontal values of design variables

设计变量	初始设计	优化设计
H_r/mm	2.5	1.5
$\beta_{s1}/(^{\circ})$	18	16
W_{sro}/mm	6	10.5
W_{rslot}/mm	11	17
T_{av}/Nm	14.1	17.4
τ	0.87	1.04
$T_p/(\text{N}/\text{m}^3)$	5.38×10^3	7.14×10^3

3 ARFSRSM 模型验证与性能分析

3.1 ARFSRSM 模型验证

为验证 ARFSRSM 模型的准确性,在文献[31]中,提出了一种 12/10/12 的宽窄极 ARFSRSM,其拓扑结构示意图和样机如图 8 所示,该电机在 ARFSRSM 模型的基础上,将轴向和径向定子极都配置为宽-窄极结构形式。对样机进行单相通电的静态实验,得出磁链数据与仿真对比结果如图 9 所示。

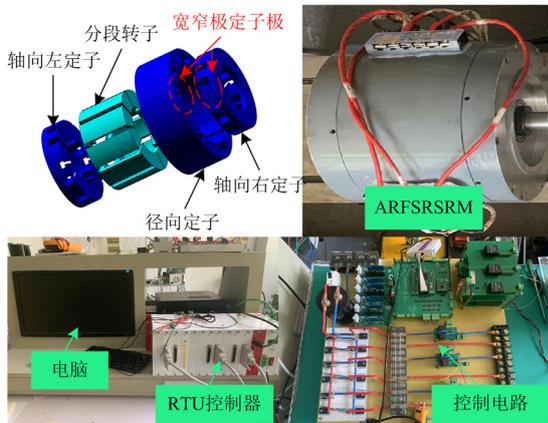


图 8 ARFSRSM 拓扑结构与样机

Fig. 8 Topology and prototype of ARFSRSM

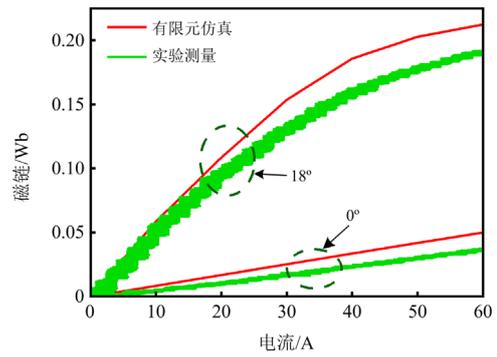
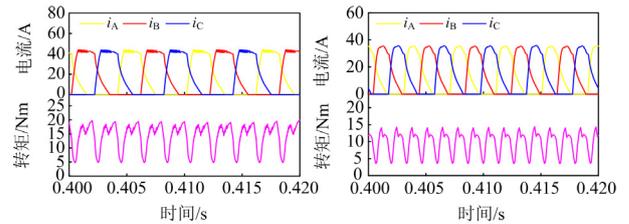


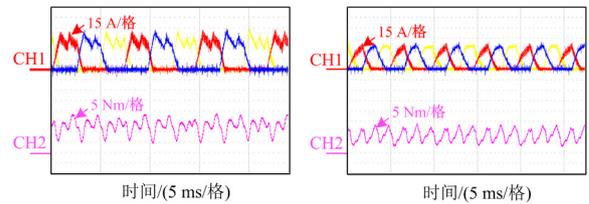
图 9 磁链仿真和实测结果

Fig. 9 Simulation and measured results of flux linkage

示,表明实测磁链特性和仿真结果基本一致;并且对样机进行电流斩波控制(current chopping control, CCC)和角度位置控制(angle position control, APC)模式下的实验,得到的仿真与实验结果如图 10 和表 5 所示,表明动态仿真与实验结果基本相符,验证了 ARFSRSM 模型的准确性与可行性。



(a) CCC和APC模式下的仿真电流和转矩波形



(b) CCC和APC模式下的实测电流和转矩波形

图 10 动态仿真和实测结果

Fig. 10 Dynamic simulation and measured results

表 5 仿真与实测结果对比

Table 5 Comparison of simulation and measured results

参数	仿真		实验	
	CCC	APC	CCC	APC
速度/(r/min)	1000	1500	1000	1500
均方根电流/A	30.73	25.39	30.95	25.49
平均转矩/Nm	14.12	9.65	14.02	9.48
最大转矩/Nm	19.82	14.34	19.17	14.15
最小转矩/Nm	4.81	3.55	4.73	3.22
转矩脉动/%	106.3	111.8	111.8	115.3
输出功率/W	1481	1516	1468	1489

对于本文提出的新型 12/14/12 ARFSRSM, 与文献[31]提出的 12/10/12 宽窄极 ARFSRSM 对比, 改变了定子极形状、绕组缠绕方式与转子块数量, 但两者在短磁路工作原理与有限元建模仿真方面基本一致, 保障后续电机性能分析的准确性。

3.2 静态特性分析

结合表2和表4可以确定最终的电机尺寸参数, 建立 ARFSRSM 三维模型, 图 11 给出了当 A 相绕组通电流时的对齐位置与不对齐位置的磁通密度分布。如图 11(a)所示, 除了轴向和径向的定转子极靴处磁通密度比较大以外, 其余定子极处的磁通密度只有 0.8 T, 表明电机在不对齐位置的磁通密度是互相抵消的。由图 11(b)看出, 在对齐位置的轴向和径向两个同相线圈的磁通路径只通过其绕过的相邻定子齿极和转子齿极, 形成闭合区域。并且轴向和径向定子极处的磁通密度大概为 1.6 T, 转子区域的磁通密度在 1.3 T 左右。

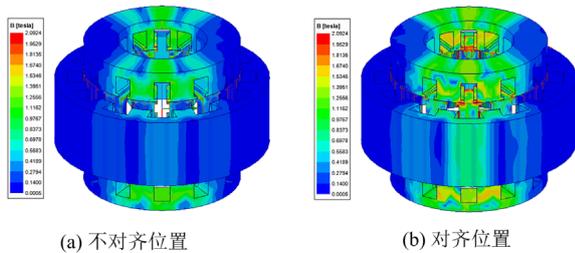


图 11 ARFSRSM 的磁通密度分布
Fig. 11 ARFSRSM flux density distribution

为探究 ARFSRSM 相比于径向分段转子开关磁阻电机(radial flux segmented rotor switched reluctance motor, RFSRSM)的性能优势, 在定转子极数、定转子内外径、轴向长度、绕组匝数与径向气隙长度等结构参数一致的前提下建立 RFSRSM 模型, 进行有限元仿真并得到相关数据。图 12 给出了 ARFSRSM、RFSRSM 以 10 A 为步长从 10 A 增长到 100 A 的电感波形。当电流为 10 A 时, ARFSRSM 的最大电感为 2.68 mH, 最小电感为 1.04 mH, 不饱和情况下最大、最小电感比为 2.58; RFSRSM 的最大电感为 1.71 mH, 最小电感为 0.88 mH, 不饱和情况下最大、最小电感比为1.94。因此, ARFSRSM 具有更高的最大、最小电感比, 表明本文所提出的 ARFSRSM 结构有效地提高了最大、最小电感比。

在图 13(a)中描述了 A 相以 10 A 为步长从 0 A 增加到 100 A 的静态转矩波形。由于此电机轴向和径向定子都采用单齿绕组结构, 其磁通路径在不对齐位置相互抵消, 降低了电机的最小电感, 对转矩

出力有提升效果。电机磁通路径在对齐位置拥有较短的磁通路径, 提升了输出转矩。图 13(b)给出了 ARFSRSM 在单轴向、单径向和轴径混合下对 A 相通电的静态转矩波形。由图 13(b)可知, 单轴向和单径向转矩相加值比轴径混合下的转矩要低, 证明了轴径向复合结构增加电机有效转矩的有效性, 并且进一步提升了电机的转矩出力。

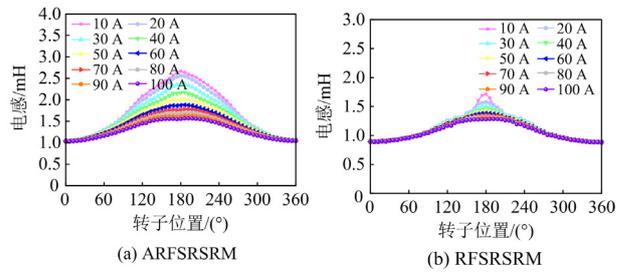


图 12 静态电感波形
Fig. 12 Static inductance waveforms

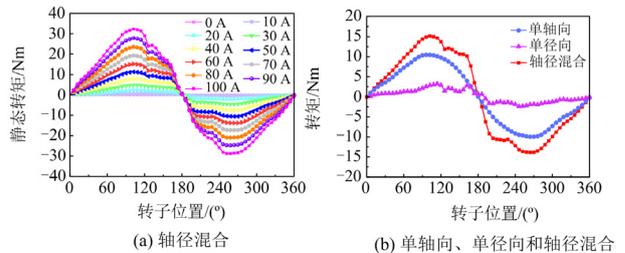


图 13 静态转矩波形
Fig. 13 Static torque waveforms

3.3 动态特性分析

为更好地研究所提 ARFSRSM 的性能特性, 采用 Matlab/Simulink 软件对其进行动态特性仿真。分别在 CCC 和 APC 模式下仿真 ARFSRSM 在 96 V 直流电压下电流和转矩波形, 负载转矩分别给定 14.3 Nm 和 9.55 Nm, 结果如图 14 所示。图 14(a)给出了在 CCC 模式下 1000 r/min 下的电流和转矩波形, 导通角和关断角分别是 0°和 11.57°, 得出最大转矩、最小转矩和平均转矩分别为 20.19 Nm、7.57 Nm 和 14.39 Nm, 此时转矩平滑系数为 1.13, 转矩脉动得到进一步抑制。图 14(b)给出了在 APC 模式下 1500 r/min 下的电流和转矩波形, 其中关断角固定为 11.57°, 仅改变开通角。可以发现其中最大转矩、最小转矩和平均转矩分别为 15.2 Nm、3.65 Nm 和 9.54 Nm, 此时转矩平滑系数为 0.83。

采用 Matlab/Simulink 软件对 RFSRSM 进行动态特性仿真。分别在 CCC 和 APC 模式下仿真 RFSRSM 在 96 V 直流电压下电流和转矩波形, 负载转矩分别设置为 10 Nm 和 9 Nm 时的仿真结果如

图 15 所示。ARFSRSM 与 RFSRSM 在 CCC 和 APC 模式下仿真结果对比如表 6 所示, 表明所提出的 ARFSRSM 具有更高的转矩出力 and 转矩密度。

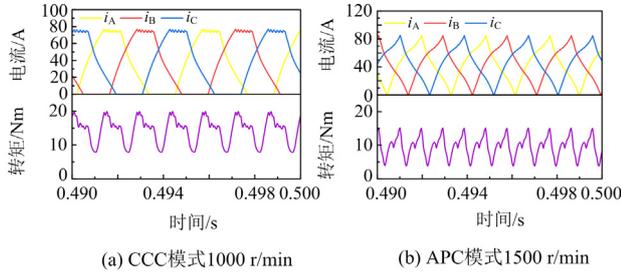


图 14 CCC、APC 模式下 ARFSRSM 的电流和转矩波形

Fig. 14 Current and torque waveforms of ARFSRSM under the CCC and APC modes

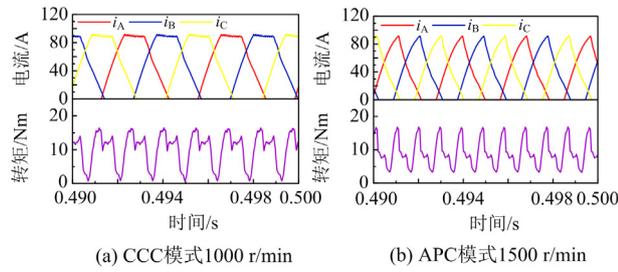


图 15 CCC、APC 模式下 RFSRSM 的电流和转矩波形

Fig. 15 Current and torque waveforms of RFSRSM under the CCC and APC modes

表 6 ARFSRSM 与 RFSRSM 仿真结果对比
Table 6 Comparison of simulation results between ARFSRSM and RFSRSM

参数	ARFSRSM		RFSRSM	
	CCC	APC	CCC	APC
速度/(r/min)	1000	1500	1000	1500
平均转矩/Nm	14.39	10	9.55	9
最大转矩/Nm	20.19	16.41	15.2	16.79
最小转矩/Nm	7.57	0.59	3.65	3.19
转矩脉动/%	87.7	158.2	120.9	151.1
转矩密度/(N/m ³)	5.9×10 ³	3.1×10 ³	3.92×10 ³	2.79×10 ³

为进一步研究电机的动态性能, 对电机进行恒负载变速和恒速变载仿真, 如图 16 所示。恒负载变速模式给定负载转矩 10 Nm, 转速在 2 s 内由 700 r/min 升至 900 r/min; 恒速变载模式给定转速为 1000 r/min, 负载转矩在 2 s 内由 8 Nm 升至 12 Nm。从图 16 可以看出, 恒负载变速和恒速变载模式转速都在 0.15 s 内稳定, 因此提出 ARFSRSM 具备良

好的动态响应性能。

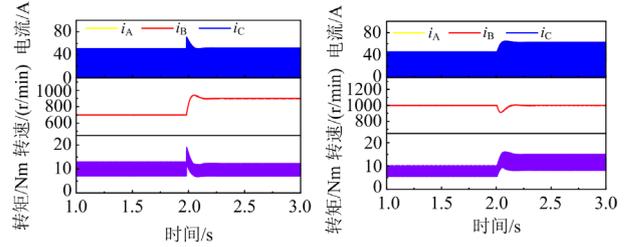


图 16 变速和变载工作模式下的电流、转速和转矩波形

Fig. 16 Current, speed and torque waveforms in variable speed and variable load operating modes

4 结论

本文从设计、多目标优化和性能三方面对三相 12/14/12 短磁路 ARFSRSM 进行研究。通过对其静态特性和动态特性进行评价, 结论如下所述。

1) 由于采用相邻齿极同相绕组结构和分段转子结构, ARFSRSM 可以获得一种短磁通路径。通过三维有限元分析表明, 磁通路径经过定子轭、定子极和分段转子形成闭合回路, 验证其短磁路特性。

2) 采用轴径向复合结构, ARFSRSM 增加电机有效转矩。通过静态三维仿真表明, 轴径向混合磁通电机的转矩比单轴向和单径向磁通电机叠加转矩高, 验证轴径向复合结构的高转矩特性。

3) 采用了田口法中的正交试验矩阵分析对 ARFSRSM 进行多目标优化, 优化后平均转矩、转矩平滑系数和转矩密度分别提升了 23.4%、19.54% 和 32.7%。将优化后的 ARFSRSM 与同尺寸的 RFSRSM 进行动态仿真性能对比, 得出 ARFSRSM 具有高转矩密度特性。

参考文献

- [1] 王亚军, 王继东, 曹曼, 等. 光伏电站理论发电功率的优化计算模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 144-153.
WANG Yajun, WANG Jidong, CAO Man, et al. Optimization calculation models and methods for the theoretical power of a photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 144-153.
- [2] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 181-187.
HOU Hui, TANG Junyi, WANG Yifan, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 181-187.
- [3] 皇金锋, 杨振宇, 李帅杰. 基于混合储能的光储直流微网改进型滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 144-153.

- 2023, 51(23): 151-159.
- HUANG Jinfeng, YANG Zhenyu, LI Shuaijie. Improved sliding mode self-disturbance resistance control of an optical storage DC micro-grid based on hybrid energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(23): 151-159.
- [4] 李耐心, 文艺林, 杜鹏, 等. 配电网与电动汽车光储充电聚合商的协调互动策略[J]. *智慧电力*, 2023, 51(12): 38-44.
- LI Naixin, WEN Yilin, DU Peng, et al. Coordinated interaction strategy between distribution network and aggregators of photo-voltaic, energy storage and electric vehicles[J]. *Smart Power*, 2023, 51(12): 38-44.
- [5] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(4): 801-813.
- [6] 肖丽, 谢尧平, 胡华锋, 等. 基于 V2G 的电动汽车充放电双层优化调度策略[J]. *高压电器*, 2022, 58(5): 164-171.
- XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(5): 164-171.
- [7] 叶宇剑, 袁泉, 汤奕. 面向双碳目标的交通网-电网耦合网络中电动汽车负荷低碳优化方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(5): 72-79.
- YE Yujian, YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle charging demand low carbon optimization in traffic-grid coupling networks towards "dual carbon" goal[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 72-79.
- [8] 张怡, 郝思鹏. 电动汽车充电站变压器容量及储能优化配置[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(7): 19-25.
- ZHANG Yi, HAO Sipeng. Optimized configuration of transformer capacity and energy storage for electric vehicle charging stations[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(7): 19-25.
- [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] 闫文举, 陈昊, 刘永强, 等. 一种用于电动汽车磁场解耦型双定子开关磁阻电机的新型功率变换器[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(24): 5081-5091.
- YAN Wenju, CHEN Hao, LIU Yongqiang, et al. A novel power converter on magnetic field decoupling double stator switched reluctance machine for electric vehicles[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(24): 5081-5091.
- [11] DING W, YANG S, HU Y. Development and investigation on segmented-stator hybrid-excitation switched reluctance machines with different rotor pole numbers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(5): 3784-3794.
- [12] SUN Q, WU J, GAN C, et al. DSSRM design with multiple pole arcs optimization for high torque and low torque ripple applications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 27166-27175.
- [13] QIAO W, DIAO K, HAN S, et al. Design optimization of switched reluctance motors based on a novel magnetic parameter methodology[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 104: 4125-4136.
- [14] ZHU Y, WEI W, YANG C, et al. Multi-objective optimisation design of two-phase excitation switched reluctance motor for electric vehicles[J]. *IET Electric Power Applications*, 2018, 12(7): 929-937.
- [15] ABUNIKE C E, OKORO O I, APHALE S S. Intelligent optimization of switched reluctance motor using genetic aggregation response surface and multi-objective genetic algorithm for improved performance[J]. *Energies*, 2022, 15(16): 6086.
- [16] ASGAR M, AFJEI E, TORKAMAN H. A new strategy for design and analysis of a double-stator switched reluctance motor: electromagnetics, FEM, and Experiment[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(12): 1-8.
- [17] TORKAMAN H, GHAHERI A, KRYHANI A. Axial flux switched reluctance machines: a comprehensive review of design and topologies[J]. *IET Electric Power Applications*, 2019, 13(3): 310-321.
- [18] ZHU J, CHENG K, XUE X. Design and analysis of a new enhanced torque hybrid switched reluctance motor[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33(4): 1965-1977.
- [19] GUPTA T D, CHAUDHARY K. Finite element method based design and analysis of a low torque ripple double-stator switched reluctance motor[J]. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2021, 111: 191-206.
- [20] ABDEL-AZIZ A A, AHMED K H, MASSOUND A M, et al. SRM power density improvement utilising rotor conducting screens and DC-link voltage boosting for EV applications[J]. *IET Electric Systems in Transportation*, 2021, 11: 148-160.
- [21] GUPTA T D, CHAUDHARY K, ELAVARASAN R M, et al. Design modification in single-tooth winding double-stator switched reluctance motor for torque ripple mitigation[J].

- IEEE Access, 2021, 9: 19078-19096.
- [22] CHENG H, LIAO S, YAN W. Development and performance analysis of segmented-double-stator switched reluctance machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(2): 1298-1309.
- [23] KONDELAJI M A J, MIRSAJIM M. Segmented-rotor modular switched reluctance motor with high torque and low torque ripple[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1): 62-72.
- [24] 闫文举, 陈昊, 马小平, 等. 不同转子极数下磁场解耦型双定子开关磁阻电机的研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2945-2956.
- YAN Wenju, CHEN Hao, MA Xiaoping, et al. Development and investigation on magnetic field decoupling double stator switched reluctance machine with different rotor pole numbers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2945-2956.
- [25] SUN X, DIAO K, LEI G, et al. Study on segmented-rotor Switched reluctance motors with different rotor pole numbers for BSG system of hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5537-5547.
- [26] YU F, CHEN H, YAN W, et al. Design and multiobjective optimization of a double-stator axial flux SRM with full-pitch winding configuration[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4348-4364.
- [27] ISHIKAWA T, FUKUDA K. A novel radial- and axial-flux permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 27(1): 2-7.
- [28] GUO B, PENG F, KHEDDA Z D, et al. Transformation between axial-and radial-flux permanent-magnet machines[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022.
- [29] WANG X, FAN Y, CHEN Q, et al. Magnetic circuit feature investigation of a radial-axial brushless hybrid excitation machine for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 382-393.
- [30] WANG X, FAN Y, YANG C, et al. Multi-objective optimization framework of a radial-axial hybrid excitation machine for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 1638-1648.
- [31] YAN W, WANG W, LI H, et al. Performance analysis of a novel axial radial flux segmental rotor switched reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1031-1042.
- [32] MA J, LI J, FANG H, et al. Optimal design of an axial-flux switched reluctance motor with grain-oriented electrical steel[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6): 5327-5337.

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-05-16

作者简介:

闫文举(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电动汽车新型驱动系统; E-mail: yanwenju09@126.com

陈昊(1969—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电动汽车动力系统、电力电子与电机变流控制。E-mail: hchen@cumt.edu.cn

(编辑 张颖)