

# 轨道交通新型永磁同步牵引电机的设计与比较

钱曙杰

(苏州市轨道交通集团有限公司, 215004, 苏州//高级工程师)

**摘要** 在满足轨道交通使用的原有异步电机的外特性和结构约束的条件下,基于一种新型永磁同步牵引电机的转子磁路的拓扑结构,设计了一款新型少磁化永磁同步电机。通过对电机转子结构、转矩特性、损耗和线路能耗进行比较和综合评价表明,通过合理设计电机的磁路,可以充分利用永磁转矩和磁阻转矩实现更宽的工作区,同时对比现轨道交通运行的电机耗能。该新型少磁化永磁同步牵引电机节能效果显著。

**关键词** 轨道交通;新型永磁同步牵引电机;转子拓扑

**中图分类号** U264.1;TM351

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.07.024

## Design and Comparison of Novel Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for Rail Transit

QIAN Shujie

**Abstract** In accordance with satisfying the external characteristics and structural constraints of original induction motor in rail transit, a novel less magnetized permanent magnet synchronous motor is designed based on the topology structure of the rotor magnetic circuit of a new type permanent magnet synchronous traction motor. By comparing and comprehensively evaluating the rotor structure, torque characteristics, loss and line energy consumption of the motor, the results show that by designing the magnetic circuit of motor reasonably, the permanent magnet torque and reluctance torque can be fully utilized to realize a wider working area. At the same time, compared with the energy consumption of the current motor operated in rail transit, the energy saving effect of the novel less magnetized permanent magnet synchronous traction motor is evidently more remarkable.

**Key words** rail transit; novel permanent magnet synchronous traction motor; rotor topology

**Author's address** Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215004, Suzhou, China

## 0 前言

牵引电机是轨道交通车辆牵引系统的核心部

件之一。由于电气化牵引技术的无污染、零排放性能受到了越来越多的关注,因而对牵引电机也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。

目前,轨道交通行业使用的牵引电机类型主要有直流电机、交流异步电机和永磁同步电机。早期直流电机因为其控制简单而处于主流地位。随着电机控制技术的发展,交流异步电机逐渐取代了直流电机。交流异步电机以其结构简单、应用成熟,成为了目前轨道交通车辆牵引电机的主流。然而,交流异步电机工作时转子励磁电流会产生转子铜耗,导致电机整体运行效率较低<sup>[2]</sup>。

随着轨道交通列车对节能减排要求的不断提高,永磁同步牵引技术也在快速发展当中。永磁同步电机转子使用永磁体励磁,无需额外的励磁电流,通过合理设计磁负荷,可以提高永磁同步电机的功率密度,因此其具有广域高效、高功率密度、高功率因数、质量轻和体积小等特点<sup>[3-4]</sup>。

永磁同步电机从永磁体的安装位置可进一步分为表贴式和内置式两种。对于表贴式电机有以下几个特点:①永磁体固定在转子表面,制造相对容易;②在高速工况下永磁体的线速度大、离心力大,永磁体固定的机械强度设计难度大;③表贴式电机永磁体直接位于气隙中,丰富的谐波磁场在永磁体中产生的涡流发热加剧永磁体退磁风险,同时各种故障工况可能引起的反向退磁磁场没有旁路而直接作用在永磁体上,更容易引起永磁体的退磁;④从电机参数看, $d$ 、 $q$ 轴磁路磁阻相同,电感相同,磁阻转矩几乎为零,弱磁扩速能力较弱。相比之下,内置式电机将永磁体嵌入铁心内部,虽然永磁磁路中因为隔磁桥的设计导致磁路存在一定的漏磁,但此时永磁同步电机中 $q$ 轴和 $d$ 轴电感差异较大,导致磁阻转矩较高,因此,能在高速弱磁区提供更大的转矩,同时机械强度方面更容易适应高速工况<sup>[5-6]</sup>。内置式永磁电机的以上特点在轨道交通应用工况中都具有极大的优势,现已成为轨道交通

车辆电机的主流形式。

基于上述背景,本文在传统永磁牵引电机(内置式)转子结构的基础上,设计了一种新型双层转子磁路拓扑,通过设置多层磁路充分利用磁阻转矩,以提高转矩电流比。该类电机被称为新型少磁化永磁同步电机。此外,由于该电机无需励磁电流建立磁场,实现了牵引工作区的广域高效,同时可以降低永磁体引起的反电势。对比组选择现有的异步电机方案,在保持外特性和外形结构尺寸的约束下,通过磁路优化,比较分析电机各方面性能。

### 1 设计参数对比

线路工况的外特性要求如图 1 所示。新型永磁牵引电机的外形尺寸要求不超过异步电机,具体的主要设计参数对比如表1所示。设计时,控制器输

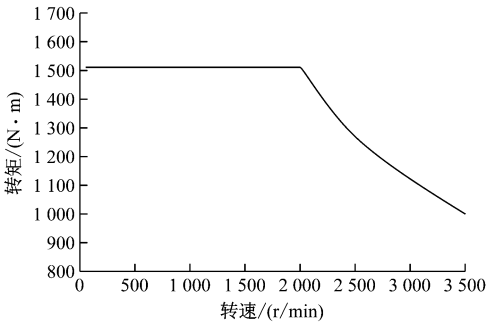


图 1 转矩转速特性

表 1 新型少磁化永磁同步电机和传统永磁电机参数对比

参数分类名称	关键电磁参数	参数值对比	
		新型少磁化永磁同步电机	传统永磁电机内置式
控制器参数	母线电压/V	1 500	1 500
	峰值电流/A	240	240
	峰值转速/(r/min)	3 500	3 500
外特性参数	峰值转矩/(N·m)	1 500	1 500
	额定功率/kW	190	190
	额定转速/(r/min)	1 800	1 800
定子参数	定子参数/个	48	48
	定子外径/mm	460	460
	定子内径/mm	300	293
	叠高/mm	210	230
	相数	3	3
绕组参数	绝缘等级	200	200
	跨距/m	5	10
转子参数	转子极对数/对	4	2

入参数,使外特性参数保持一致;电枢直径的变化主要考虑到新型少磁化永磁同步电机极对数增加;定子轭厚度可以适当减小,对应可适当提高电枢直径来增加转矩密度。

### 2 新型少磁化永磁同步电机的关键电磁参数选择设计

#### 2.1 新型反电势的设计

新型少磁化永磁同步电机的反电势是联系逆变器和电动机之间的桥梁,它对电机的性能和系统参数的选择影响较大。一方面,为合理选择电机的反电势,须从反电势对逆变器控制的影响、电动机的电流、外特性工作区,效率、功率因数分布、逆变器容量和电动机体积等多角度进行分析比较。另一方面,为保护逆变器功率器件的安全,电机最高转速下的反电势峰值不得超过直流母线过电压保护动作设定值。满足该约束时,有时需要考虑降低永磁体用量来降低永磁磁链,这样对应的转矩电流比下降会导致逆变器容量的增加。因此从电机设计角度需要考虑,应通过增加磁阻转矩来提高转矩电流比的方式来避免提高逆变器的容量。

#### 2.2 转子结构设计

新型少磁化永磁同步电机的转子拓扑的主要参数化变量如图 2 所示。相比传统内置式永磁同步电机,新型少磁化永磁同步电机影响磁路的参数较多。其一大优势即通过多层磁路的合理布局来提高  $q$  轴磁路的顺畅性  $L_q$ ,降低  $d$  轴磁路的顺畅性  $L_d$ ,来增加磁阻转矩。

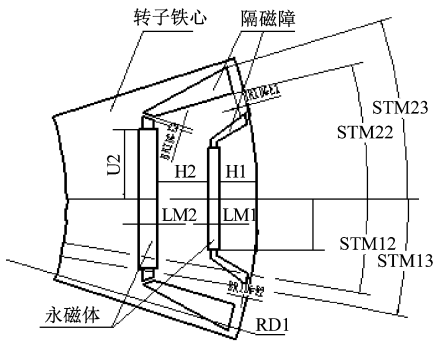


图 2 新型少磁化永磁同步电机的转子拓扑结构参数化模型

永磁体尺寸的选择既要考虑反电势不超过逆变器的最大允许值,又要考虑磁负荷的合理性以及抗退磁能力。隔磁障的形状优化十分关键,直接影响磁路的磁阻参数,进而影响电感参数和磁阻转矩的大小。其设计的基本原则是: $q$  轴磁路尽量均匀、

通畅,同时隔磁桥厚度选取也要综合考虑转子的机械强度约束。整个转子的优化是通过多变量、多目标反复迭代的过程。

### 3 综合性能比较

#### 3.1 电机转子构造比较

新型和传统的两种电机转子径向构造如图 3 所示。轨道交通驱动用异步电机转子需要能够承受高速旋转产生的离心力和温度上升产生的热应力。其焊接铜转子的加工通常采用如下方式:首先,将铜导体插入转子槽;然后,将导体压紧使其固定在转子上;接着把短接环作为导体的两端进行再钎焊、表面切削和平滑;最后保持环嵌合,形成能够承受离心力的构造。因此,轨道交通驱动用异步电机的转子与一般工业用铸铝转子相比,制造工序较为复杂。而永磁转子采用内置式构造,只需将永磁体嵌入槽内并做相应固定,故制造较为简单。

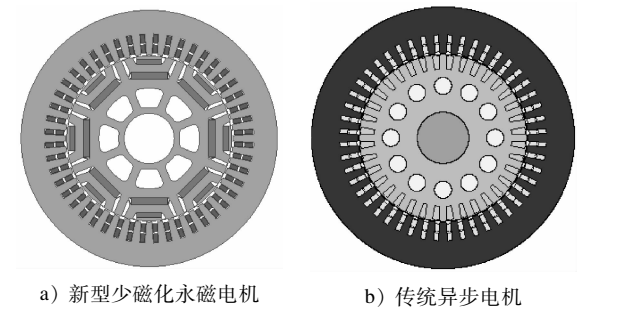


图 3 新型和传统的两种电机转子的径向结构对比

在传统异步电机中,鼠笼导条伸出转子铁心部分随着转子的高速旋转搅拌空气会产生较大机械损耗和噪音。而永磁电机转子结构完整的圆柱状表面和平整的端面减少了空气摩擦,其机械损耗和噪音都有所降低。两种电机的电磁物料质量对比如表 2 所示。传统异步电机定子铜重较大的原因是跨距增加 1 倍以及叠高大 20 mm 导致。传统异步电机转子伸出铁心端的额外质量导致整体转子质量要比永磁电机大 40%,使其总质量要比永磁电机大 21%。

#### 3.2 空载反电势分析

新型少磁化永磁电机在最高转速下的空载反电势如图 4 所示。相比配套的牵引逆变器,其工作电压留有裕量,以保证逆变器的安全性。另外,设计时转子采用斜极方式来降低反电势的谐波畸变和降低转矩脉动。

表 2 两种电机的电磁物料质量对比 单位:kg

对比项目	新型少磁化 永磁电机	传统异步电机
定子铜质量	33	40
转子铜质量		37
定子铁心质量	122	144
转子铁心质量	64	74
永磁体质量	15	
定子总质量	155	184
转子总质量	79	111
电机总质量	234	295

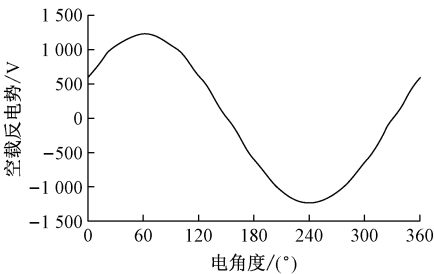


图 4 空载反电势分析

#### 3.3 转矩特性分析

新型少磁化永磁同步电机的电磁转矩可表示为:

$$T_{em} = \frac{3}{2}p[\Psi_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (1)$$

式中:

- $T_{em}$ ——电磁转矩;
- $p$ ——极对数;
- $\Psi_m$ ——永磁磁链;
- $L_d、L_q$ ——分别为  $d、q$  轴电感;
- $i_d、i_q$ —— $d、q$  轴电流。

两种电机的转矩电流特性基本相同,如图 5 所示,其转矩大致与电流成正比例。其中新型少磁化永磁电机随着电流的增加,转矩增加的比例略大。其主要原因是式(1)中磁阻转矩分量中的  $i_d i_q$  随电流的提高呈平方增加而导致的。

图 6 给出了两种电机在峰值电流下的转矩转速曲线以及对应的设计目标,同时对新型少磁化永磁电机的永磁转矩和磁阻转矩分量进行分解。

比较新型少磁化永磁电机转矩分量发现,两种电机工作区均能满足技术要求,恒转矩区永磁转矩占比约为 45% 左右。随着转速的增加电机的反电势增加,当达到控制器电压的限制值后,开始弱磁;

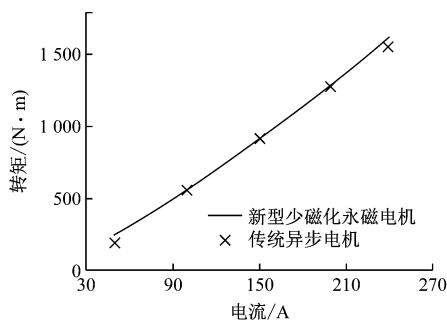


图5 两种电机的转矩电流特性

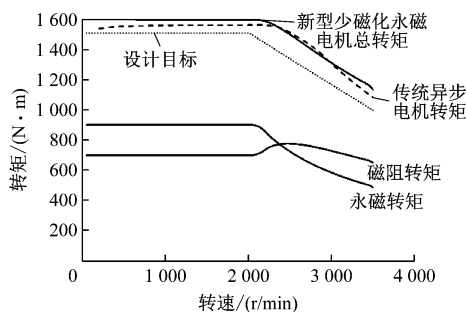
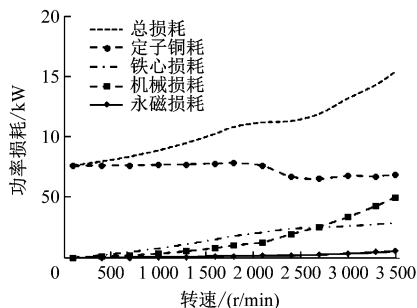


图6 两种电机的转矩-转速特性及转矩分量

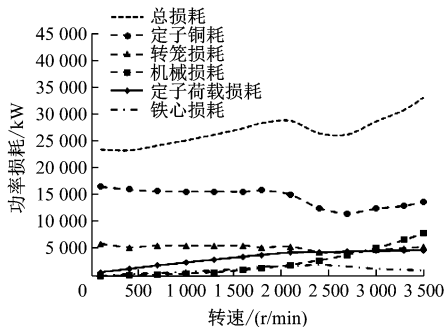
此时永磁合成磁链的下降导致永磁转矩分量下降，同时反向弱磁电流磁场降低了磁路的饱和程度， $L_d$ 、 $L_q$ 、 $(L_q - L_d)$ 均有提高，并且  $i_d i_q$  随着负载电流角的增加同样有所增加，因而导致磁阻转矩在发生弱磁后上升。随着转速继续增加以及弱磁深度增加， $(L_q - L_d)$ 也继续增加，但同时  $i_d i_q$  随着内功率因数角的增加而减小，并且幅度超过  $(L_q - L_d)$ ，此时磁阻转矩呈下降趋势。在峰值转速时磁阻转矩占比接近 60%，说明多层磁路结构有利于增加磁阻转矩含量。

### 3.4 损耗比较

两种电机在转矩-转速曲线上对应的功率损耗分布见图7所示。首先，传统异步电机的转子铜耗将近 5 kW，约占总损耗的 20%。该损耗直接导致异步电机产生较高的转子温升。其次，传统异步电机定子铜耗将达约新型少磁化永磁电机的 2 倍。其主要原因是电阻的影响：传统异步电机总体叠高长，同时跨距较大，导致电阻增加，匝数增加也直接导致电阻增加，故对应定子铜耗较大。另外，机械损耗方面如上文所述，传统异步电机转子的开口槽和伸出转子铁心的铜条在旋转时产生的额外机械损耗均要大于新型少磁化永磁电机。总体上看，在实际牵引工况下，新型少磁化永磁电机的总损耗约是传统异步电机的一半左右。



a) 新型少磁化永磁电机功率损耗分布



b) 传统异步电机功率损耗分布

图7 两种电机的损耗分布比较

### 3.5 两种电机在实际线路上运行能耗比较

在上述基础上，对比了两种电机在典型实际线路上运行时的能耗情况。图8为某地铁线路AW3（超载）工况下对应的电机转矩-时间-转速-时间曲线图。其总运行时间为 2.2 h，列车速度为 40 km/h，行程 90.4 km。

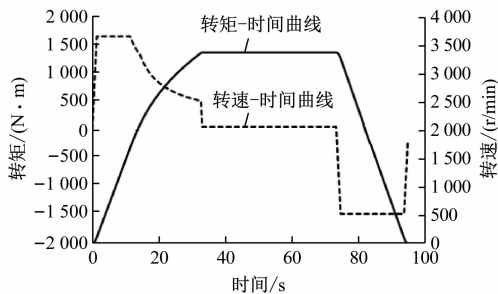
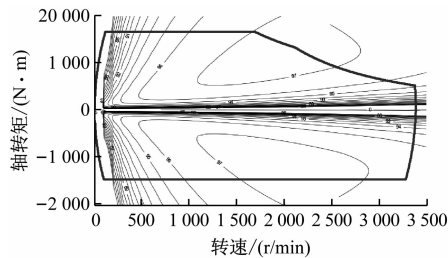
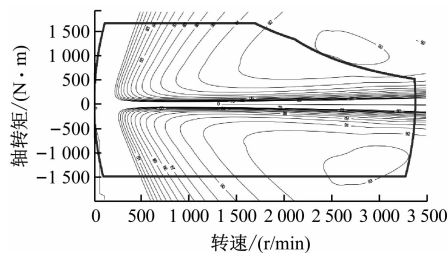


图8 AW3 工况对应的传统电机转矩-时间、转速-时间曲线

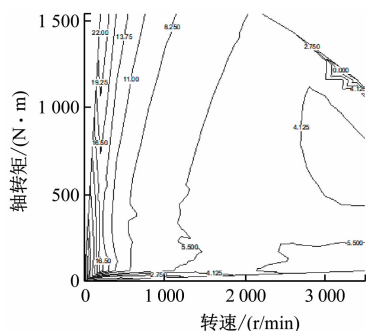
图9 a)、图9 b)列出了两种电机的效率分布图，并在图中标示出了线路工作点。可以发现牵引电机的实际工作区域相对比较固定。恒转矩区属于大负载工况，高速区集中在高速低转矩的惰行工况为主。图9 c)绘制了两种电机的效率差值分布图。可以发现新型少磁化永磁电机实际工作点对应效率均要优于传统异步电机，尤其在恒转矩区效率要优于传统异步电机 5% ~ 13%。这个区域也属于耗能占比较大的区域。以上对比均表明，新型少



a) 新型少磁化永磁电机效率分布图



b) 传统异步电机效率分布图



c) 新型少磁化永磁电机与传统异步电机效率差值

图9 牵引和电制动下效率分布图对比

磁化永磁电机广域高效的特点在实际的地铁线路中有较好的发挥。

由表3可以发现:通过对比单电机的全程线路能耗,在可再生能量100%回收的情况下,新型少磁化永磁电机的平均能量利用率比传统异步电机提高了7%左右,全程线路能耗相比传统异步电机低32%,但全程线路节能效果还需要考虑控制器和齿轮箱的损耗差异再进行综合评估。

表3 单电机全程线路能耗对比

项目	不同类型电机和能耗对比	
	新型少磁化永磁电机	传统异步电机
平均能量利用率/%	94.25	87.44
牵引输入电能/kWh	157.60	170.30
电制动输出电能/kWh	113.70	106.00
总耗电/kWh	43.90	64.20

## 4 结论

1) 相同外特性下新型少磁化永磁电机总电磁材料质量可以减轻21%左右。

2) 新型少磁化永磁电机固有的低转子损耗,达到整个牵引工作区广域高效的目的,工作点的总损耗约是传统异步电机的50%。通过对比单电机的全程线路能耗,可再生能量在100%回收的情况下,平均能量利用率提高约7%;综合线路工况、能量回收等情况,可使地铁列车综合节能率预测达20%~30%。

3) 新型少磁化永磁电机通过特殊的磁路设计,具有较高的凸极比,可以充分利用磁阻转矩实现少磁化设计,减少对稀土材料的依赖程度,有效降低了电机成本。

## 参考文献

- [1] MATSUOKA K. Development trend of the permanent magnet synchronous motor for railway traction[J]. Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2010,2(2):154.
- [2] 冯江华. 铁道车辆牵引系统用永磁同步电机比较[J]. 铁道学报,2007(5):111.
- [3] KAWAI H, SUNOHARA T, TASAKA Y, et al. A permanent-magnet synchronous motor propulsion systems for Tokyo Metropolitan Ginza Line trains[J]. Toshiba Rev, 2008,63:78.
- [4] KONDO M, KAWAMURA J, TERAUCHI N. Performance comparison between a permanent magnet synchronous motor and an induction motor as a traction motor for high speed train[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2006, 126(2):168.
- [5] 唐任远. 现代永磁电机:理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997:37.
- [6] KLOCKOW T,王渤洪. 永久磁铁励磁的牵引电动机[J]. 变流技术与电力牵引,2003(4):37.

(收稿日期:2021-03-05)