

# 电动客车永磁电机效率提升方法的设计与验证

潘岱松, 朱鹤, 魏潇翔

(安徽安凯汽车股份有限公司, 合肥 230051)

**摘要:**以降低电动客车能耗为目的,从多个方面对永磁电机进行效率提升,并进行仿真分析及整车测试验证。

**关键词:**电动客车; 永磁电机; 效率提升

中图分类号:U469.1; TM302 文献标志码:A DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.04.005

## Design and Verification Efficiency Improvement Methods for Permanent Magnet Motor of Electric Buses

PAN Daisong, ZHU He, WEI Xiaoxiang

(Anhui Ankai Automobile Co., Ltd., Hefei 230051, China)

**Abstract:**To reduce the energy consumption of electric buses, the authors improve the efficiency of permanent magnet motors from multiple aspects and verify by simulation analysis and vehicle test.

**Key words:**electric bus; permanent magnet motor; efficiency improvement

作为电动客车驱动系统的核心部件,永磁电机较高的效率可降低能耗,有利于整车经济性。目前我国行业内的永磁驱动电机的最高效率已达到96.5%左右,在全负载工作区域内,效率达到90%及以上的工作区域占比不低于90%(简称为高效区占比“双90”)。相较于国际同行业,该指标仍有提升空间,国际上永磁电机的最高效率可达97.2%,高效区占比接近“双92”水平。因此,如何进一步提高永磁电机的实际运行效率,是当前国内驱动电机产业的重要攻关目标。

影响永磁电机效率的因素众多,本文从以下4个角度对其效率提升展开研究:①高效区落点匹配;②冷却散热设计;③转子轻量化;④转子磁路结构优化。这些方法相互独立,互不干扰。最终,通过台架性能测试,验证了永磁电机效率的提升效果。

## 1 效率提升方法

### 1.1 高效区落点匹配

根据GB/T 38146.2—2019《中国汽车行驶工况

第2部分:重型商用车》<sup>[1]</sup>中的中国城市客车行驶工况(CHTC-B)和中国普通客车行驶工况(CHTC-C),客车行驶过程中的平均车速 $v$ 的范围为15~75 km/h。

以某款8 m客车为例,其驱动电机的装配额定功率为80 kW、峰值扭矩为1 500 N·m,电机峰值功率对应的最高转速为3 000 r/min,假设车轮滚动半径 $r$ 为0.45 m,后桥速比 $i$ 为5.6,则由式(1)求得整车平均车速 $v$ 对应的驱动电机转速 $n$ 在500~2 500 r/min区间内。

$$n = 1\,000 \cdot v \cdot i / (2\pi \cdot 60 \cdot r) \quad (1)$$

因此,电机的高效区落点应尽可能选在该转速范围(500~2 500 r/min)的中间,即电机最高效率点对应的转速应在1 500 r/min附近。当整车在CHTC-B或CHTC-C工况下正常行驶时,应尽量让电机保持在高效率运行状态。

某款8 m客车原先匹配的电机方案的效率MAP图如图1所示。如虚线所示,电机最高效率点落在1 800 r/min转速附近,即原方案中的1 500 r/min位

收稿日期:2024-12-12。

第一作者:潘岱松(1989—),男,工程师,主要从事电动客车永磁同步电机设计开发工作。E-mail:pds2513@126.com。

置点的效率并非最高。因此,整车实际运行时的电耗效果并非最佳。通过调整绕组参数,即将原方案中的15匝绕组改为17匝绕组,可在不改变电机外特性曲线的情况下,将电机最高效率点从1 800 r/min附近前移至1 500 r/min附近,如图2中虚线位置所示。调整后的电机方案更适合该款8 m客车的实际运行工况,尤其是当调整前后的电机均处于500~1 000 r/min的低速区间时,整车车速处于15~30 km/h的范围,此转速区域的电机最低效率从图1中的90%提升到图2中的94%,达到了期望的目标状态,对整车能耗控制具有较为显著的正向作用。

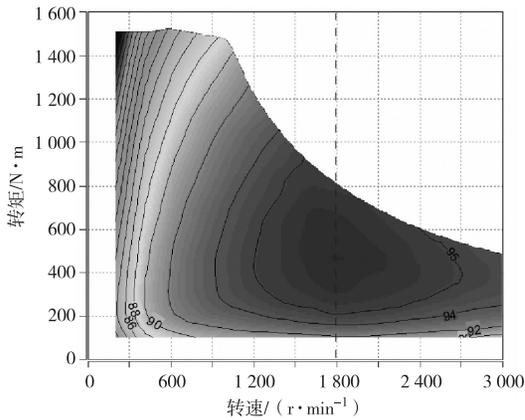


图1 原电机的效率MAP及高效区落点图

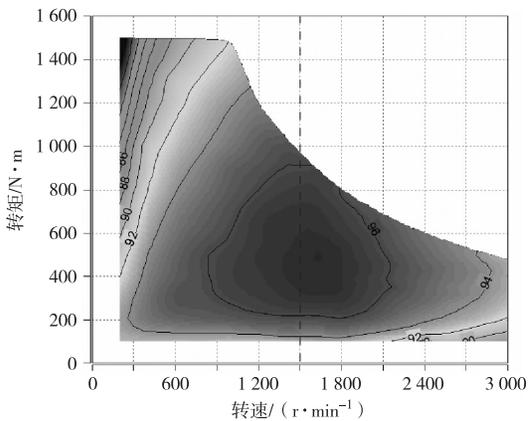


图2 调整后电机的效率MAP及高效区落点图

## 1.2 冷却散热设计

对实际应用而言,电机效率一般是指电机热态下运行时的能量转换率。由于电机铜耗同时受到电阻和电流影响,若降低电机带载运行时的绕组温度,则可减少电机热态下的铜耗,即定子绕组(由铜线组成)通入电流后发热产生的损耗<sup>[2]</sup>。因此,优化电机

冷却水路的设计,以提升电机本身的散热能力,是提升电机效率的有效途径之一。

传统结构的电机外壳采用轴向串联水道,这种水道存在较多滞留区,会导致流阻较大、流量较小,从而降低了整个电机外壳的热交换能力。而新型的螺旋水道水阻较小、散热效果较好,流阻比传统轴向串联水道低50%以上,较低的水道流阻不仅可以降低供液压力,还可以提高机壳散热能力。

仿真分析时,设定电机相关部件的材料属性(见表1);将冷却介质的流量设为15 L/min,入口温度和环境温度均设为40℃,流体的流动状态设为湍流;合理划分网格,使冷却介质与散热体之间进行充分的热交换<sup>[3]</sup>。

表1 电机各部件材料参数

部件名称	材料或牌号	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热容/ [ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	导热系数/ [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]
机壳	ZL101A	2 700	896	167
定子铁芯	B35AV1900	7 850	450	30
定子绕组	Cu	8 900	397	388
槽绝缘	NHN纸	2	1 000	1
冷却介质	50%防冻液	1 088	3 173	0.37

结合电机定子铁芯外径(365 mm)和厚度(178 mm)相关尺寸,设定水道宽度(10 mm)和机壳壁厚(6 mm),在尽可能减轻机壳质量的同时,增大水道容积和表面积,以最大程度降低水道水阻。

分配好额定工况下热耗值后,分别赋给定子铁芯0.9 kW和定子绕组2.3 kW,仿真稳态下额定工况的压力场和温度场如图3和图4所示。结果显示:水道静压差约为6.3 kPa,绕组最高温度约为69.8℃,冷却介质流动均匀,水道内几乎不存在滞留区。

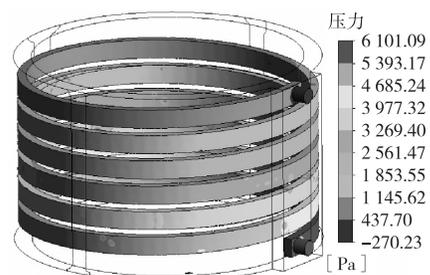


图3 螺旋水道水路压力场图

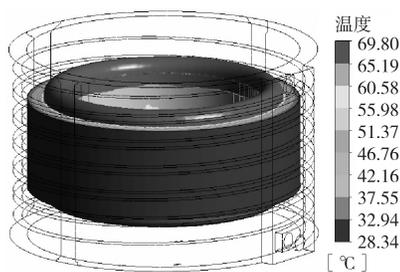


图4 螺旋水道定子温度分布图

新型的螺旋水道冷却水路可使电机绕组始终处于较低温度状态,降低了电机运行时的绕组阻值及损耗,从而通过提高散热效果来提升电机运行效率。

### 1.3 转子轻量化

从降低机械损耗的角度,可对电机的转子进行轻量化设计。本文主要对转子铁芯做精细化减重处理,从而提高转子总成功率密度,减少转子的转动惯量,进而可降低电机的机械损耗,提高电机的输出效率<sup>[4]</sup>。

由于转子轭部对磁力线走向的作用可忽略不计,在不影响转子总成整体刚度、强度和动平衡的前提下,对转子铁芯轭部区域进行阵列扇形挖孔,以实现最大化减重<sup>[5-6]</sup>。同一款电机转子在轻量化设计前后的仿真结果分别如图5和图6所示。

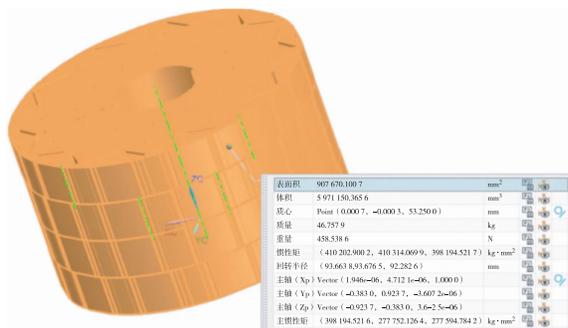


图5 转子铁芯轻量化前的仿真结果

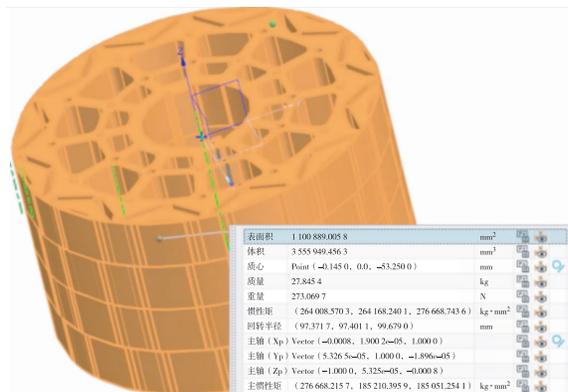


图6 转子铁芯轻量化后的仿真结果

由图5和图6可知,该款电机的转子铁芯轻量化设计前的质量为46.7 kg,对轴向中心线的转动惯量为0.398 kg·m<sup>2</sup>;转子铁芯轻量化设计后的质量和转动惯量分别为27.8 kg和0.276 kg·m<sup>2</sup>。电机转子质量降低了约40%,转动惯量降低了约30%。

由转矩 $T$ 与转动惯量 $J$ 之间的公式 $T=J \cdot w/t$ ( $w$ 为角加速度; $t$ 为时间)可知,轻量化设计后转子从静止状态加速至目标转速时,需要克服的机械功率减少了30%左右。

以上结果表明,轻量化设计在降低机械损耗、提高电机效率方面效果显著。

对轻量化设计后的转子总成进行瞬态场的刚度和强度仿真验证,在转子外表面施加峰值扭矩对应的径向载荷,得到的仿真结果如下:刚度方面,转子总成外表面的变形量为25.49 μm(图7),这仅仅是微米级的形变量;强度方面,转子总成受力最大点的应力为5.09 MPa,远小于材料本身的抗拉强度值和屈服强度值。因此,以上数值均可忽略不计,即转子轻量化后,其总成刚度和强度的影响可忽略不计。

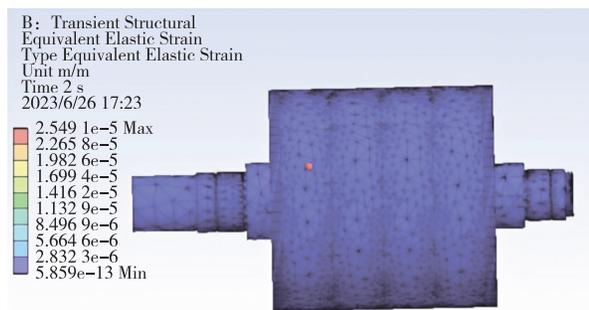


图7 转子铁芯减重后瞬态场转子外表面形变图

### 1.4 转子磁路结构优化

永磁电机的永磁转矩和磁阻转矩的大小直接影响电机效率。通常情况下,当永磁转矩和磁阻转矩较小时,电机需要更大的电流才能产生相同的转矩,这会增大铜耗,从而降低效率。而通过优化转子槽型设计,能够改善磁路的饱和程度,提高永磁材料和导磁材料的利用率,进而提升电机的输出扭矩和能量转化效率<sup>[7]</sup>。

目前市面上大多数电机仍采用传统“V”型转子磁路结构,其具备一定的聚磁效果,但漏抗较大,即参与能量转换的磁通占比较小。新型“V+一”型转子磁

路结构的电机保留了传统“V”型结构,并在转子冲片外圆边缘处增加了一圈永磁体(图8),从而大幅提高聚磁效果。

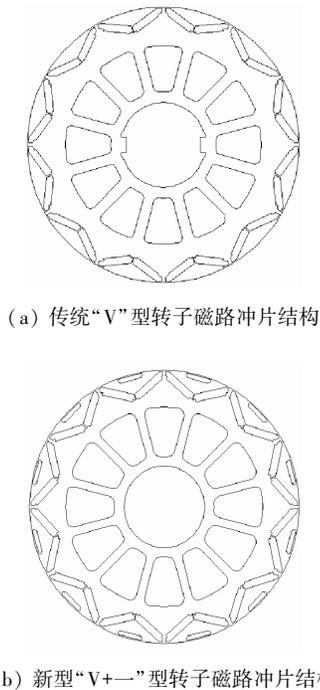


图8 两种转子磁路结构对应的转子冲片示意图

因此,当极槽比和气隙长度相同时,新型“V+”型转子磁路结构的气隙磁密谐波幅值比“V”型转子磁路结构的小。气隙磁密谐波幅值小不仅可以提高永磁体利用率、反电动势正弦化程度、电机整体效率;还可以降低定子铁耗和涡流损耗,提升电机在峰值扭矩拐点后的高速弱磁性能,使电机高效区范围向高速段延伸,扩大电机全速段下的高效区占比<sup>[8-10]</sup>。

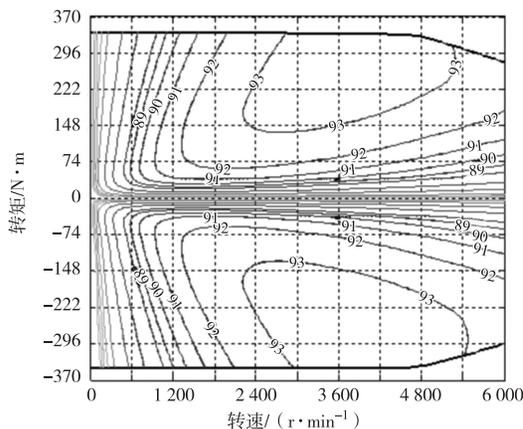


图9 “V”型转子磁路电机的效率仿真MAP图

为了更好地展现转子磁路结构对电机高速区效

率的影响,下面对比一款6000 r/min高速永磁电机分别采用“V”型转子磁路结构和“V+”型转子磁路结构时的效率仿真结果,分别如图9和图10所示。

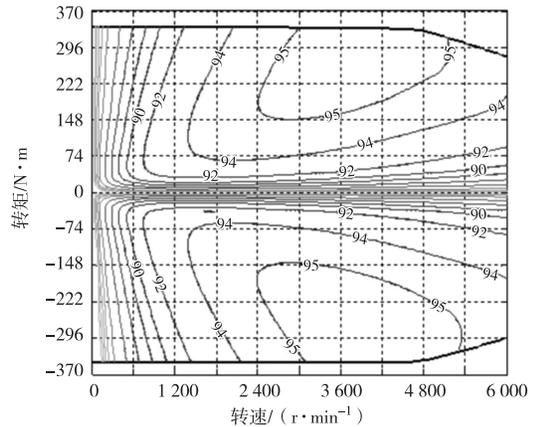


图10 “V+”型转子磁路电机的效率仿真MAP图

由图9和图10可以看出,转子磁路由“V”型向“V+”型优化升级后,高速段的效率明显提升,其中,2000~6000 r/min转速段内的最高效率由92%提升到94%,电机整体高效区占比明显扩大。

## 2 效率提升试验验证

综合以上4种电机效率提升的设计方法,采用新型“V+”型转子冲片结构、螺旋水道机壳设计方案,进行电机高效区匹配和转子铁芯轻量化设计后,制作出一款额定功率为80 kW、峰值扭矩为1800 N·m的新型永磁电机。相关试验项目均按照GB/T 18488.2—2015《电动汽车用驱动电机系统 第2部分:试验方法》在台架上进行验证<sup>[11]</sup>。测试得到的电机效率MAP图如图11所示。

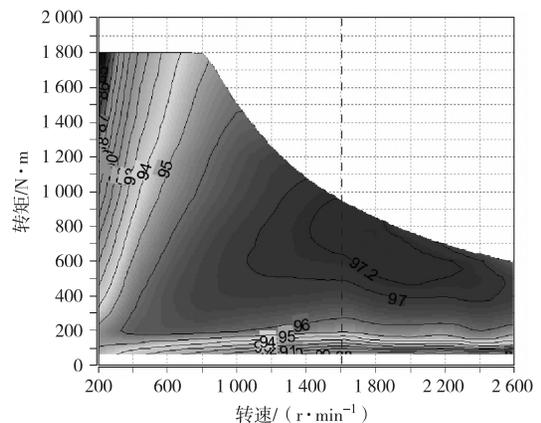


图11 额定功率80 kW高效版电机效率MAP图

对该款电机的效率和温升等性能指标和国际领先的电机产品进行对比(2款电机功率相同), 结果见表2。

表2 新型电机与国际领先的电机的测试结果

测试项目	新型电机	国际领先的电机
最高效率/%	97.2	97.2
≥92%高效区占比/%	92.05	91.96
≥90%高效区占比/%	95.45	95.58
额定功率点的温升/K	30	35

该款电机装配在8 m整车上的综合能耗测试结果见表3<sup>[12]</sup>。

表3 效率提升前后的整车能耗测试结果

测试项目 及次序	耗电量/(kW·h)		能耗/[ (kW·h)·km <sup>-1</sup> ]		
	CHTC-B	CHTC-C	CHTC-B	CHTC-C	
	工况	工况	工况	工况	
效率提升前	测试1	8.018	6.774	1.51	1.21
	测试2	8.001	6.751	1.50	1.20
效率提升后	测试1	7.163	5.898	1.25	1.06
	测试2	7.035	5.909	1.24	1.06

由表3可知, 采用以上效率提升方法设计出的永磁电机, 其最高效率、高效区占比、额定点温升等性能得到显著改善, 可达到国际领先水平。电机效率的提升, 很大程度上促进了电动客车整车在实际综合工况下的能耗降低。

### 3 结束语

本文针对纯电动客车永磁电机运行效率提升的问题, 重点研究并介绍了冷却优化、转子轻量化、转子磁路优化、高效区匹配4种方法。经过台架性能验证, 电机最高效率达到了97.2%、高效区占比达到了

“双92”的高水平。经实车测试, 能耗性能得到显著改善。本文提出的效率提升方法均基于行业内主流的径向磁通圆线永磁电机, 实用性和通用性较强。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车行驶工况 第2部分: 重型商用车辆: GB/T 38146.2—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 3-5.
- [2] 梁会人, 张兴军, 王恩前, 等. 电动客车冷却系统计算与测试[J]. 客车技术与研究, 2018, 40(3): 41-43.
- [3] 高海, 黄靖. 永磁同步电机散热仿真分析及优化[J]. 客车技术, 2020(1): 30-33.
- [4] 邱国平. 永磁同步电机实用设计及应用技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020: 115-119.
- [5] 段志诚, 晁明男, 陆永为. 提高电动机综合效率方法措施研究[J]. 科技信息, 2010(34): 317.
- [6] 孙荣军, 陈慧清. 新能源客车轻量化技术探究[J]. 汽车测试报告, 2022(16): 78-79.
- [7] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 24-31.
- [8] 盛义发, 喻寿益, 洪镇南, 等. 内置式永磁同步电机驱动系统效率优化研究[J]. 电气传动, 2011, 41(6): 14-18.
- [9] 许家群, 朱建光, 邢伟, 等. 电动汽车驱动用永磁同步电动机系统效率优化控制研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 81-84.
- [10] 吴钦木, 韦书龙, 李捍东, 等. 永磁同步电机驱动系统效率优化控制参数变化影响研究[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(6): 18-23.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用驱动电机系统 第2部分: 试验方法: GB/T 18488.2—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 7-13.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车 能量消耗率和续航里程 试验方法: GB/T 18386—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 6-8.