

纯电动客车大功率大转矩扁线电机设计

潘岱松, 朱 鹤, 夏贤保, 魏潇翔
(安徽安凯汽车股份有限公司, 合肥 230051)

摘要:本文针对纯电动客车对驱动电机的特殊需求,设计了一款大功率、大转矩的扁线绕组电机,重点阐述了扁线绕组构型、水油复合冷却方式及关键制造工艺等核心技术方案。仿真验证结果表明,该电机峰值转矩达 2 500 N·m,最高效率超过 98%,额定工况温升低于 30 K,实现了高效率、低温升和高功率密度的设计目标,论证了方案的可行性。

关键词:电动客车; 驱动电机; 扁线绕组; 高效率; 低温升; 高功率密度

中图分类号:U469.72; TM351 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.04.007

Design of the High-power Large-torque Hairpin Motor of the Electric Buses

PAN Daisong, ZHU He, XIA Xianbao, WEI Xiaoxiang
(Anhui Ankai Automobile Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract:To meet the specific requirements of pure electric buses, the authors design a high-power, high-torque hairpin winding motor. They focus on core technical solutions, including the hairpin winding configuration, the water-oil composite cooling method, and key manufacturing processes. The simulation verification results show that the motor achieves a peak torque of 2 500 N·m, a maximum efficiency of over 98%, and a temperature rise less than 30 K under rated conditions. These results demonstrate that the design attains the objectives of high efficiency, low temperature rise, and high power density, thereby validating the feasibility of the proposed solution.

Key words:electric bus; drive motor; hairpin winding; high efficiency; low temperature rise; high power density

相较于传统圆线电机,扁线电机凭借其高效率、高功率密度和优良的散热性能等优势,已成为新能源驱动系统的重要发展方向^[1]。然而,受限于当前的技术成熟度与电机成本,其应用范围仍主要集中在乘用车、微型面包车及物流车等对功率和转矩要求相对较小的车型^[2]。为突破这一应用局限,本文针对 10~12 m 城市客车的大载荷、大爬坡度应用需求,提出一款适用于纯电动客车的大功率、大转矩扁线绕组直驱电机设计方案。该方案的核心指标如下:额定功率 120 kW,峰值功率 200 kW,峰值转矩 2 500 N·m,最高效率 98%,功率密度 1.25 kW/kg,额定温升低于 30 K。设计重点突破了绕组排布、散热结构、工艺设计等关键技术,打破了传统电机的性能瓶颈,实现了高效率、低温升和高功率密度的设计目标。仿真分析结果验证了该设计方案的有效性。

1 大功率大转矩扁线电机设计方案

大功率、大转矩输出要求电机在有限的空间内产生极强的磁场与力矩,这对电磁负荷与热负荷提出了严峻考验。扁线电机虽在散热及功率密度方面具有优势,但其设计难点在于如何在高频下抑制交流损耗,并确保极端工况下的热稳定性。针对上述难点,本章从绕组拓扑优化、复合散热系统、工艺路线与关键工序三个方面阐述设计方案。

1.1 绕组拓扑优化设计

扁线电机的电磁设计核心在于其绕组设计。发卡式线圈采用内外层拓扑结构,同一定子槽内不同层位的导体与槽口距离各异,导致各导体所经磁路长度不同,进而使各线圈总成的漏电抗产生偏差,破坏并联支路间的电流均衡,诱发环流与附加交流损耗,最终制约电机效率的提升^[3]。

收稿日期:2025-10-21。

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。

为解决上述环流及附加交流损耗问题,本文采用叠绕组与波绕组匹配连接的特殊设计。其中,叠绕组部分采用短距与长距结合的同心式排布,每个支路仅包含跨距为 5 和 7 的 U 型线圈;波绕组部分选用内侧进线内侧出线或外侧进线外侧出线的进出线方式^[4]。该绕组的局部布线如图 1 所示。

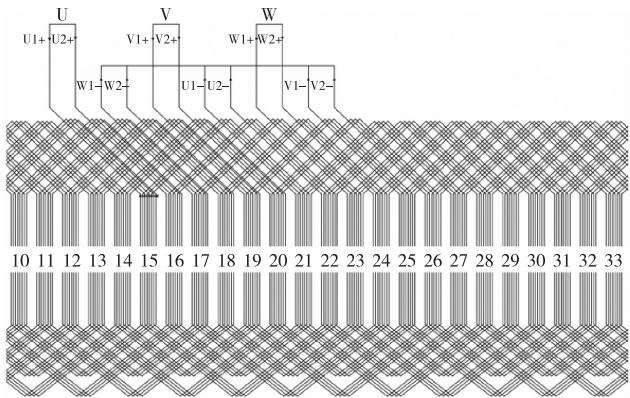


图 1 绕组布线的局部展示图

电机采用图 1 中的绕组排列方式,可使相同绕组的不同并联支路在槽层分布与相位上保持统一,从而有效提高各支路间的电势均衡性。此方式既可避免环流的产生,降低附加交流损耗,又能进一步提升电机的整体效率。

为将上述排布策略转化为具体设计方案,并实现峰值功率与峰值转矩的设计目标,本文在外径 368 mm 的冲片平台上,设计了一套采用两路并联支路的 8 层 U 型发卡扁线绕组方案^[5],具体参数见表 1。据此设计出的定子总成结构如图 2 所示。

表 1 扁线绕组参数表

参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	368	定子内径/mm	260
铁芯长度/mm	214	连接方式	Y 型
定子槽数	72	导体层数	8
并联支路数	2	极对数	6

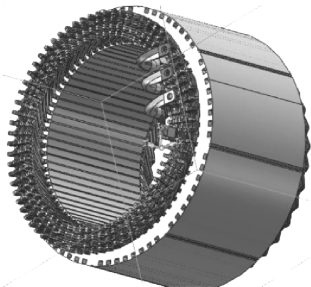


图 2 两路并联 8 层扁线绕组定子总成结构

1.2 复合散热系统设计

为解决高温导致的功率受限问题,扁线电机采用了定子水冷与转子油冷相结合的复合散热方案,以同时降低定子和转子的热负荷^[6]。该复合散热系统包含定子水冷与转子油冷两个部分,各自优化设计如下:

1) 定子水冷结构优化。定子水冷部分基于传统轴向“之”字形水道进行优化:①对水道布局进行加密,以增强水道与机壳间的换热能力;②在水道内部结构中加入翅片支路以实现水流二次分配,从而减小死水区与回流区的面积,避免水道单侧流动,使冷却液流场更均匀地覆盖定子总成表面。上述优化措施均有助于降低电机铜耗并控制温升^[7]。传统轴向水道与加密带翅片水道的流场分别如图 3 和图 4 所示。

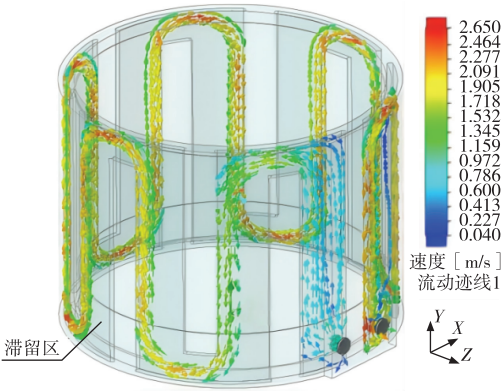


图 3 传统轴向水道流场

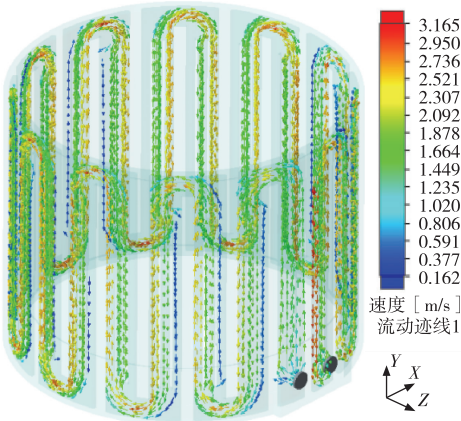


图 4 加密带翅片水道流场

2) 转子油冷结构设计。转子油冷部分采用空心轴结构。冷却油进入转轴后,经径向支路流入转子铁芯内部,其中大部分冷却油直接对铁芯及磁钢进行冷却;另有部分冷却油被引至转子铁芯两端的平衡压板,在转子高速旋转中被甩向定子绕组端部,从而实

现对扁线绕组的二次冷却^[8]。该油冷方案有助于降低电机铁耗与铜耗、改善永磁体性能,进而提升电机效率与功率密度。转子总成结构如图5所示。

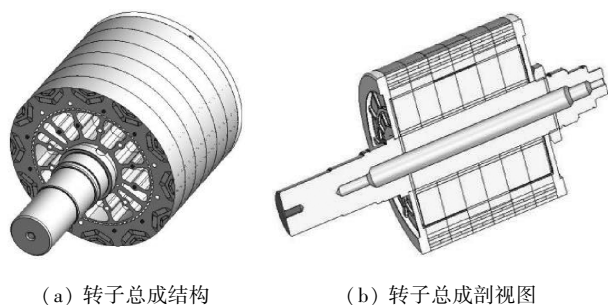


图5 油冷空心轴转子总成结构及剖视图

1.3 工艺路线与关键工序设计

扁线电机的绕组层数越多,其制造过程对线圈绝缘、成型精度及端部焊接质量的要求越高。因此,本文所述8层扁线电机的工艺路线依据图6设计。

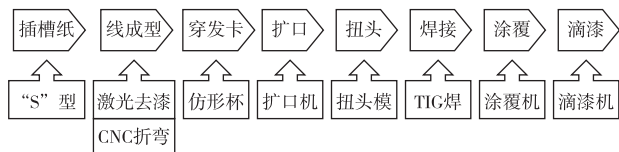


图6 扁线电机关键工艺路线图

工艺设计的要求如下:①定子槽绝缘采用S型绝缘纸,以兼顾绝缘耐压要求与槽满率;②绕组制造环节采用激光去漆结合数控折弯的成型工艺,该工艺兼具柔性高、损伤小及尺寸一致性好的优势^[9];③总装焊接工序选用钨极惰性气体保护焊,配合高导热夹具与强化气体保护,有效抑制焊点不饱满、氧化发黑、飞溅等焊接缺陷,保障连接质量的稳定性。

2 设计仿真验证

为验证上述设计方案的有效性,全面评估本文提出的8层扁线电机在电磁性能、热负荷能力及集成密度上的综合表现,本章综合运用电磁场有限元仿真、集总参数热网络法及三维参数化建模技术,逐项求解并分析了电机的效率特性、额定温升及功率密度。

2.1 效率仿真验证

绕组扁导线的规格需满足 GB/T 5585.1—2018《电工用铜、铝及其合金母线 第1部分:铜和铜合金母线》^[10]的要求,并与定子槽的实际尺寸及绝缘厚度匹配,最终选定宽3.15 mm、厚2.24 mm(不含漆膜)的导线,其布置方案如图7所示。

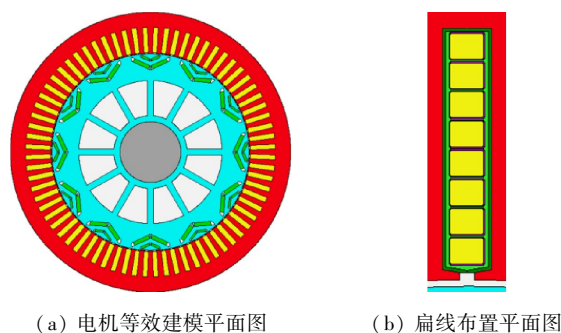


图7 电机等效建模与扁线布置平面图

电磁仿真所得到的定子和转子磁密分布云图如图8所示。由图8可知,各部件磁密均处于材料饱和曲线合理区间内,表明磁路设计裕度适当,材料选型合理。基于该电磁方案,仿真得出电机的外特性曲线(见图9)及全转速范围内的效率MAP(见图10),以评估其驱动与调速性能。

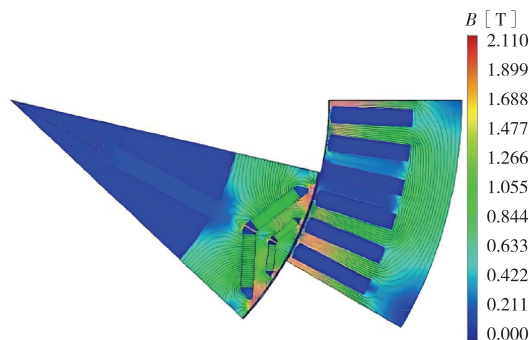


图8 定子和转子磁密分布云图

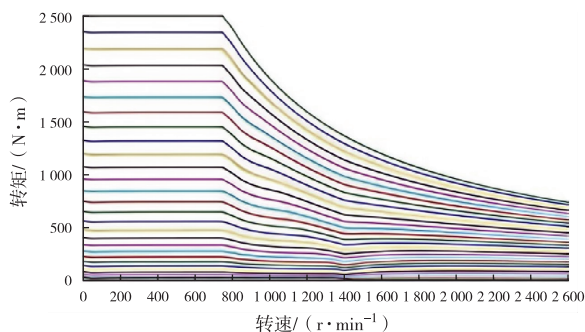


图9 电机外特性仿真结果

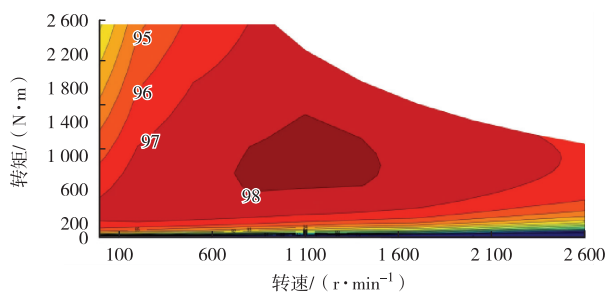


图10 电机效率MAP仿真结果

由图 9 可知,电机峰值转矩达 2 500 N·m,由式(1)计算出峰值功率为 200 kW,满足该款电机的核心设计目标。

$$P_{\max}=T_{\max}\cdot n_k/9\,550\tag{1}$$

式中: $P_{\max}$ 为电机峰值功率,kW; $T_{\max}$ 为电机峰值转矩,N·m; n_k 为电机拐点转速,r/min。

由图 10 可知,电机本体最高效率超过 98%,且在全转速范围内均具有优异的能效表现。两项仿真结果共同验证了该设计方案达成了预期性能指标。

2.2 温升仿真验证

采用集总参数热网络法,以冷却水温度 23 ℃,流量 20 L/min 为边界条件^[11],得到额定运行点下电机各部件的温升曲线(见图 11)。

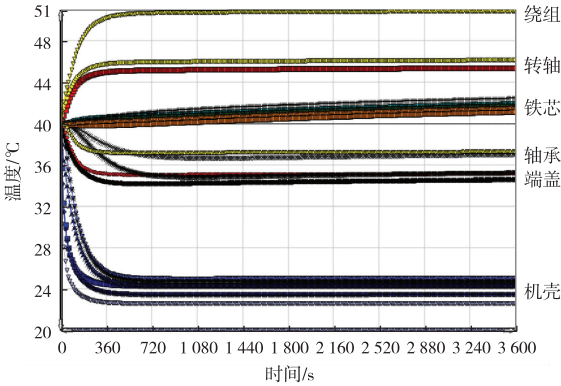


图 11 额定点温升模拟曲线

由图 11 可知,仿真启动约 1 800 s(30 min)后电机达到热稳定状态,绕组最高温度为 51 ℃,计算得出额定温升为 28 K,满足前期设计的温升限值要求。

2.3 功率密度计算

采用 CATIA 建立扁线电机的三维简化模型,并对其定子、转子及磁钢等磁路相关部件赋予材料属性,各部件密度参数见表 2。

表 2 电机有效部件材料密度参数

部件名称	牌号或材料	密度/(kg·m ⁻³)
铁芯	B35AV1900	7 650
绕组	Cu	8 930
永磁体	N38UH	7 600

完成参数设置后,由三维模型统计得到电机有效部件的总质量约为 91.94 kg(见图 12)。将该值代入式(2),计算得到电机的功率密度为 1.305 kW/kg,该结果满足设计指标^[12]。

$$E=P_p/m_e\tag{2}$$

式中: E 为电机的功率密度,kW/kg; P_p 为额定功率,kW; m_e 为电机有效部件质量,kg。

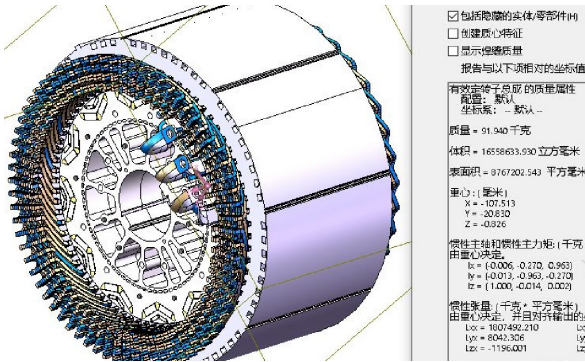


图 12 120 kW 扁线电机有效部件总重量测量结果

仿真结果有效验证了设计目标的达成情况,所得量化数据不仅为后续样机试制提供了直接支撑,也揭示了关键性能参数的潜在优化方向。

3 结束语

本文针对纯电动客车的大功率动力需求,设计了一款 8 层扁线电机,重点阐述了其电磁方案、冷却结构及关键制造工艺。仿真结果表明,该电机峰值功率 200 kW,峰值转矩 2 500 N·m,最高效率超过 98%,额定温升 28 K,功率密度 1.305 kW/kg,各项指标均达到设计要求。同时,槽绝缘选型、扁线成型及焊接等工艺环节均具备明确的工程实施方案。该设计方案为扁线电机在纯电动商用车领域的工程化应用提供了参考。

参考文献:

[1] 兰鹏宇. 新能源汽车扁线电机技术分析[J]. 内燃机与配件,2022(6):212-214.
[2] 鞠孝伟,张凤阁,程远,等. 车用驱动电机扁线绕组关键问题研究综述[J]. 中国电机工程学报,2024,44(15):6181-6199.
[3] 姜华. 扁铜线电机交流损耗的计算方法[J]. 微特电机,2019,47(12):32-34.
[4] 孔军. 电动机绕组全彩色图集:嵌线·布线·接线展开图[M]. 北京:化学工业出版社,2013:51-66.
[5] 湖州南洋电机有限公司. 发卡式扁线电机绕组:CN202421160542.0[P]. 2025-02-25:6-8.
[6] 高银桥. 新能源汽车驱动电机冷却技术的发展现状研究[J]. 内燃机与配件,2020(12):249-250.

个区间,确保压缩机激励频率与发动机激励频率的频率比不落入拍振产生范围。

3 结束语

本文针对某出口中型客车怠速开空调工况下出现的车内拍振噪声问题进行了系统研究。通过主观评价、理论分析与客观测试相结合的方法,明确了拍振现象的产生机理,确定产生该现象的根本原因为空调压缩机 2 阶、4 阶激励频率与发动机 3 阶、6 阶激励频率相近,导致这两组频率调制形成拍振。基于上述分析,通过调整过渡轮规格改变压缩机速比,使压缩机激励频率与发动机激励频率的频率比不在拍振产生范围内,从而消除了车内拍振噪声。该问题的分析思路、测试方法及解决方案,对后续车型在空调压缩机安装方式选择及速比匹配方面具有重要的借鉴意义,可为同类 NVH 问题的预防与处理提供参考。

参考文献:

- [1] 王文波. 客车舒适性主观评价[J]. 客车技术与研究,2022,44(2):54-56.
- [2] 孙效杰,顾鹏飞,李培刚. 铁路客车乘坐舒适性评价研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(3):642-648.
- [3] 刘兆海,张波,贺志恒,等. 基于人耳生理结构的车内噪声声品质预测[J]. 仪器仪表学报,2024,45(12):284-294.
- [4] 胡海华,齐洪磊,韩经鲁,等. 客车空调压缩机的对比试验与分析[J]. 客车技术与研究,2024,46(6):45-48.
- [5] 陈述,范让林,梁策. 大客车空调压缩机悬置机构优化仿真[J]. 噪声与振动控制,2015,35(5):97-101.
- [6] 饶晓华. 析客车空调压缩机布置型式的探讨与分析[J]. 客车技术,2018(5):14-17.
- [7] 孟国庆,黄建刚,张忠东,等. 某救护车传动系统异响及共振研究[J]. 客车技术与研究,2023,45(3):52-54.
- [8] 潘公宇,王功强,陈清爽,等. 基于 TPA 的发动机悬置系统开发及其主观评价[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2022,43(2):125-130.
- [9] 张忠东,王珂,刘鑫明. 客车外后视镜振动研究与改进[J]. 客车技术与研究,2022,44(6):38-40.
- [10] 谭祥军. 从这里学 NVH 噪声、振动、模态分析的入门与进阶[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2021:142-175.
- [11] 谭祥军. 从这里学 NVH:旋转机械 NVH 分析与 TPA 分析[M]. 北京:机械工业出版社,2021:5-16.
- [12] 张忠东,周后昌,位华,等. 某增程式客车进气口噪声消声器的设计与优化[J]. 客车技术与研究,2025,47(3):43-47.
- [13] 陈江艳,杨兴国,杨诚. 电动汽车拍振问题分析及改进[J]. 声学技术,2023,42(3):338-345.
- [7] 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.
- [8] 丽水方德智驱应用技术研究院有限公司,方地应用技术(上海)有限公司. 一种高效油冷电机:CN202310170230.1[P]. 2024-09-03:5-7.
- [9] 韩明达. 发卡式电机定子线圈成型方法研究[J]. 装备制造技术,2020(5):76-79.
- [10] GB/T 5585.1—2018 电工用铜、铝及其合金母线 第 1 部分:铜和铜合金母线[S].
- [11] 刘旺. 低速大转矩永磁同步电机设计与热计算[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018:24-31.
- [12] 沈启平. 车用高功率密度永磁同步电机的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012:26-38.

(上接第 36 页)