

现代新能源汽车主驱动电机及其发展趋势探讨

赵升吨^{1,2,3,4}, 曹杨峰^{1,2}, 马畅欣^{1,2}, 张传伟³, 黄晓鹏³, 李祥阳⁴

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 金属成形技术与重型装备全国重点实验室, 710049, 西安; 3. 陕西交通职业技术学院, 710018, 西安; 4. 西安航空学院, 710077, 西安)

摘要: 电机是新能源汽车电机、电池、电控“三电”中最重要部件,但是目前关于现代新能源汽车用主驱动电机类型及其关键技术问题缺乏系统深入的论述。基于此该文对新能源汽车驱动电机类型做了分类,其中的直流电机、交流永磁同步电机、磁阻电机以及交流异步感应电机这 4 种类型电机是目前新能源汽车使用的主流,并对每种驱动电机的现状及使用的关键技术等做了充分说明,进一步论述了这 4 种类型电机的具体机械结构、应用的汽车企业和车型、每种电机的优缺点等,充分地展示了新能源汽车电驱动及其相关技术的设计思想。研究表明:交流径向磁通永磁同步电机、轴向磁通永磁同步电机和交流异步电机具有更好的综合性能,是未来新能源汽车主驱动电机的主要类型。另外,对 4、8 极的变极交流异步铜转子感应电动机特性进行了简要的论述,结果表明该电机也有较好的使用前景。通过多方面系统深入分析主驱动电机的发展趋势后明确指出,未来的新能源汽车主驱动电机应朝着供电电压高压化、高转速化、低噪声振动和不平顺(NVH)化、高功率密度化、材料高强度高导磁化、电机减速机及驱动控制一体化、电机转速传感的低成本高可靠以及驱动控制器高频高效化方向发展。

关键词: 新能源汽车;交流永磁同步电机;高压化;高转速;高功率密度

中图分类号: TM30;U469.72 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202510001 **文章编号:** 0253-987X(2025)10-0001-21

Main Drive Motors of Modern New Energy Vehicles and Their Development Trend

ZHAO Shengdun^{1,2,3,4}, CAO Yangfeng^{1,2}, MA Changxin^{1,2}, ZHANG Chuanwei³, HUANG Xiaopeng³, LI Xiangyang⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Vocational and Technical College of Communications, Xi'an 710018, China; 4. Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The motor is the most critical component among the “three electric systems” (motor, battery, and electronic control) of new energy vehicles (NEVs). However, there is currently a lack of systematic and in-depth discussion and classification regarding the types of main drive motors used in modern NEVs and their key technical issues. To address this, this study first investigates and categorizes the types of drive motors for NEVs, identifying four dominant types

currently in use: DC motors, AC permanent magnet synchronous motors (PMSMs), reluctance motors, and AC asynchronous induction motors. Furthermore, a comprehensive explanation of the current status and key technologies of these four types of drive motors is provided. The specific mechanical structures of each motor, the automotive manufacturers and vehicle models that employ them, as well as their respective advantages and disadvantages are discussed. This detailed analysis thoroughly presents the design philosophy behind NEV electric drive systems and related technologies. The research results indicate that AC radial-flux PMSMs, axial-flux PMSMs, and AC asynchronous motors exhibit superior comprehensive performance and are likely to dominate as the main types of drive motors for future NEVs. Additionally, the characteristics of 4-pole and 8-pole variable-pole AC asynchronous copper-rotor induction motors are briefly examined, demonstrating their promising application prospects. Finally, through a systematic and in-depth analysis of the development trends of main drive motors, this study clearly concludes that future NEV drive motors should evolve in the following directions: higher supply voltages, increasingly higher rotational speeds, lower noise vibration and harshness(NVH), greater power density, use of high-strength and high-permeability materials, integration of motors with gear reducers and drive controllers, cost-effective and highly reliable motor speed sensing, and high-frequency, high-efficiency drive controllers.

Keywords: new energy vehicle; AC permanent magnet synchronous motor; high-voltage; high speed; high power density

电机是新能源汽车“三电”电机、电池、电控中最核心的部件^[1]。主驱动电机运行模式经常在驱动和发电之间切换,频繁的启停、高加减速率、低速时的高扭矩和车辆高速爬坡时的高功率、高功率密度、大高效工作面积、低振动和噪声、高可靠性和高性价比是汽车工业所要求的。另外,新能源汽车主驱动电机的电压选择^[2]以及速度反馈元件的耐久性、可靠性以及精度也格外重要。然而,目前关于现代新能源汽车主驱动应该研制和应用的先进电机类型及其关键技术问题缺乏系统深入的论述,严重阻碍了中国新能源汽车引领全球的步伐^[3]。

由于不同类型与工作原理的电机其输出特性不同,因此电动汽车主驱动电机会根据汽车的类型与服役工况选择不同的驱动电机,其中直流电机、交流永磁同步电机、磁阻电机以及交流异步感应电机是目前主流的应用类型^[4]。为此本文对新能源汽车主驱动电机的机械特性、实际车型与主要技术参数、具体机械结构、应用情况的优缺点等方面进行了系统的论述。并探讨现代新能源汽车驱动电机的驱动电压、转速、功率密度、使用材料、低噪声振动和不平顺(NVH)等的多个关键技术问题,进一步分析未来的新能源汽车主驱动电机具体发展趋势。

1 4 种类型电机用于电动汽车的现状及其特点

1.1 直流电机

为了更加直观地了解各类电机的输出特性,分别作电机的机械特性曲线,其中直流电机的输出机械特性曲线^[5]如图 1 所示。

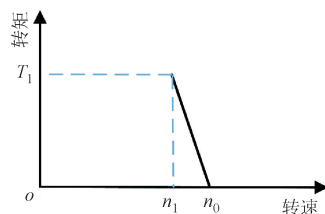


图 1 直流电机的输出机械特性曲线

Fig. 1 Mechanical characteristic curve of DC motor

图 1 中, n_0 为电磁转矩 $T_{em} = 0$ 时的转速,称为理想空载转速; T_1 和 n_1 分别为他励直流电动机转速为 n_1 时所对应的电磁转矩。由于该机械特性是硬特性,因此它有很强的输出转矩能力。

1.1.1 直流有刷电机

(1)使用该种类型电机的企业与车型。由于直流电机的驱动器只需要依靠 H 桥就能实现调速控制,所以驱动控制成本低,部分厂商选择用直流电机

作为主驱动电机。美国 Commuter Cars 公司生产的 Tango T600 小型电动汽车,就采用了直流有刷电机作为主驱动电机^[6],如图 2 所示,电机的额定电压为 120 V,最高转速为 8 000 r/min,并且在最高转速下可以迸发出 1 355 N·m 的扭矩,在低速时候最高可以迸发出 4 067 N·m 的扭矩,它从 0~96.5 km/h 只需要 3.2 s,最高行驶速度为 172 km/h。

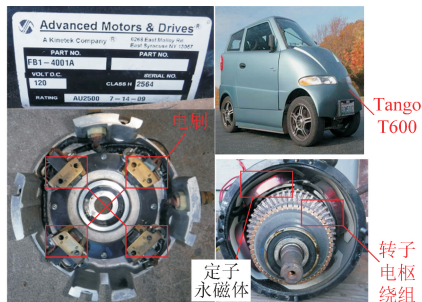


图 2 Tango T600 直流有刷电机
Fig. 2 Tango T600 brushed DC motor

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。此电机造价虽低,但有刷供电方式会降低使用寿命,维护成本高,此外该电机实际运行的效率较低,通常只有 80%~85% 左右。但是直流电机控制简单高效,另外直流有刷电机在低速阶段能获得最大的转矩,并且能获得较为理想的恒功率速度区间。

1.1.2 直流无刷电机

(1)使用该种类型电机的企业与车型。深圳市凯驰电动车有限公司主要生产速度较低的小型电动车^[7],如图 3 所示,它的额定电压大都采用 48 V,电机采用他励的直流无刷电机,最大功率可达 4 kW,主要应用在一些小规格的汽车上。



(a)8 座观光车 (b)电动巡逻车
(c)老爷车 (d)高尔夫球车

图 3 直流无刷电机应用场合
Fig. 3 Brushless DC motor applications

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。此电机通常应用在小型的车辆中,由于寿命比直流有刷电机

更长,整体的性能也优于直流有刷电机,效率更高,但也不足 90%。电机驱动器也是需要三相逆变器才能完成电机的驱动控制,所以造价较高。

1.2 交流永磁同步电动机

交流永磁同步电机较直流永磁电机而言有更大的输出功率,而且恒转矩区间和恒功率区间范围广,特别适合电动汽车实际运转的宽工况的场合。交流永磁同步电机的机械特性曲线^[5],如图 4 所示,其中 n_N 为电机的额定转速, T_N 为电机的额定转矩, n_{max} 为同步电机能达到的最高转速, T_M 为最高转速时能输出的转矩。最高转速 n_{max} 可达额定转速 n_N 的 3 倍,调速范围广。该种电机按照磁场方向可以分别径向磁通式和轴向磁通式两大类型。

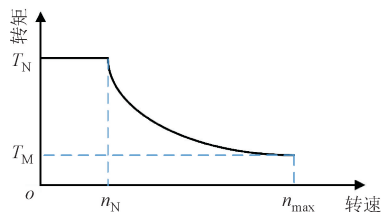


图 4 交流永磁同步电机的机械特性曲线
Fig. 4 Mechanical characteristic curve of AC permanent magnet synchronous motor

1.2.1 径向磁通式

(1)使用该种类型电机企业与车型。由于永磁电机高的功率密度和极好的控制性能,因此径向磁通永磁同步电机应用最多。在径向磁通的永磁同步电机之中,驱动电机大都采用的是内嵌式永磁体构型。

对于内嵌式永磁体的结构,其直轴的磁阻更小,直轴电感更大,内嵌式永磁体能产生更大的去磁磁链,有更好的去磁效果,所以弱磁调速性能优良。另外,内嵌式构型有更大的磁阻转矩,所以相同的电流下,内嵌式构型能产生更大的转矩^[8]。

特斯拉 Model S Plaid 电动汽车采用了三电机布局,最大功率可达 750.2 kW(1 020 马力)。其电机转子采用了内嵌式模块化布局,然后通过碳纤维缠绕固定住永磁体外层护套,电机转速达到 20 000 r/min,它为高速电机转子提供了更强的抗离心力能力,如图 5 所示。采用碳纤维复合材料护套不仅质量轻、强度高、耐用性强,还具备低电导率和高热导率的特点,另外对气隙的磁通影响小,进一步提高了整体的功率密度^[9-10]。此外,特斯拉电机绕组采用了传统的圆线而非扁线,定子的散热是依靠轴向分段分布的油孔,防止冷却油在定子散热流道中散热不及时而导致温度升高,冷却液与定子绕组之间通过密封胶圈密封隔离^[11]。

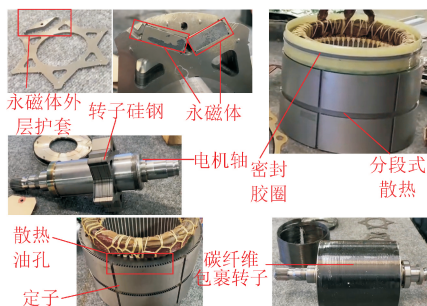


图 5 特斯拉 Model S Plaid 永磁电机

Fig. 5 Tesla Model S Plaid PMSM motor

上汽大众公司生产的 ID. 4 新能源汽车则采用了如图 6 所示的扁线绕组以及其优化后的散热流道,并且配置一个独立的水冷散热电机为电机的定子循环冷却。与特斯拉不同,ID. 4 采用了传统的冲裁方式加工了电机转子的永磁体槽^[12],可输出的最高功率达 150 kW,扭矩为 310 N·m,最大转速为 16 000 r/min。

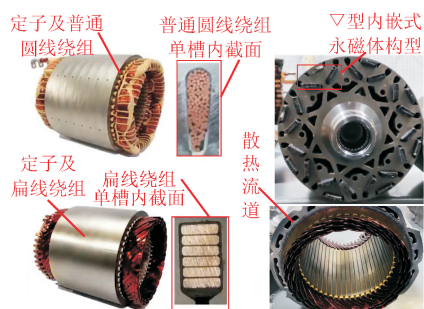


图 6 大众 ID. 4 驱动电机

Fig. 6 Volkswagen ID. 4 drive motor

对比图 6 中的圆线绕组和扁线绕组,可以看出扁线绕组的槽满率更高,能避免传统的多线并绕的布局,降低槽内绕组中导体之间的漏磁通,提高其能量转换率,从而进一步提高其效率^[13]。

发夹绕组由于每槽内导体数的限制在 8~10,所以设计灵活性降低。另外在高速的情况下由于高频交变磁通产生的紧邻效应和趋肤效应导致扁线电机的交流损耗会变得更加突出^[14]。

为了降低交流损耗,文献[15]提出采用混合扁线绕组的结构,如图 7 所示,在靠近气隙层的少数绕组采用了铜片压层绕组。这样做的好处是靠近气隙处的绕组磁感应较强,通过铜片压层结构能显著降低交流损耗并且能抵制绕组的温度升高,而其他绕组仍然采用扁线结构并保持高槽满率带来的优势。

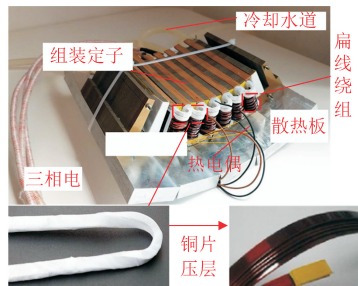


图 7 铜片叠压混合扁线绕组

Fig. 7 Copper laminated hybrid flat wire winding

永磁同步电机槽端漏磁场分布不均匀,导致并绕导体间存在电势感应差,产生环流损耗,通过绕组换位能减弱此影响,换位方法主要有端部换位和槽内换位。端部换位对减弱环流损耗的作用有限,槽内换位是一种更有效的降低环流损耗的方法^[16]。文献[17]采用槽内换位的方法如图 8 所示,通过 5 根并绕的扁线转置绕组对比了传统的发卡绕组,新型的扁线转置绕组通过改变导线位置来平衡漏电动势,从而减少了循环涡流损耗,提高了电机的效率。

文献[18]构建了圆线和扁线组合式的混合绕组构型如图 9 所示,圆线绕组采用了转置绕组的构型,仿真结果显示该构型在输出电流频率为 1 200 Hz、开关频率为 50 kHz 时候,交流损耗仅为传统同尺寸扁线绕组构型的 44%。

文献[18]深入研究定子绕组构型后,为了进一步优化磁路来获得更优的磁通利用率,不少学者研究转子永磁体的分布构型。按照转子拓扑的结构可以分为一字型、双一字型、单 V 型、双 V 型、∇型、U 型等。丰田公司为了实现驱动系统更高的功率密度以及更加高速化,从 Prius I 代到 Prius IV 代,转速从最初的 6 000 r/min 增加到 17 000 r/min,其转子拓扑结构变革如图 10 所示^[19-20]。

如图 10 所示,丰田 Prius I 代采用了一字型结构,较表贴式结构输出转矩有较大提升;Prius II 代采用了 V 型结构以获得更大的磁阻转矩,从而提高电机的输出转矩能力获得更大的功率密度;Prius III 代增加了 V 型结构中的磁桥,紧固了永磁体并且防止转子因旋转而解体,另外磁桥也是引导磁通的辅助手段,能降低转子的漏磁通并提高气隙磁通密度,从而提高电机的输出转矩能力;Prius IV 电机转子采用了 ∇型,减少了永磁体用量并进一步提高了功率密度。

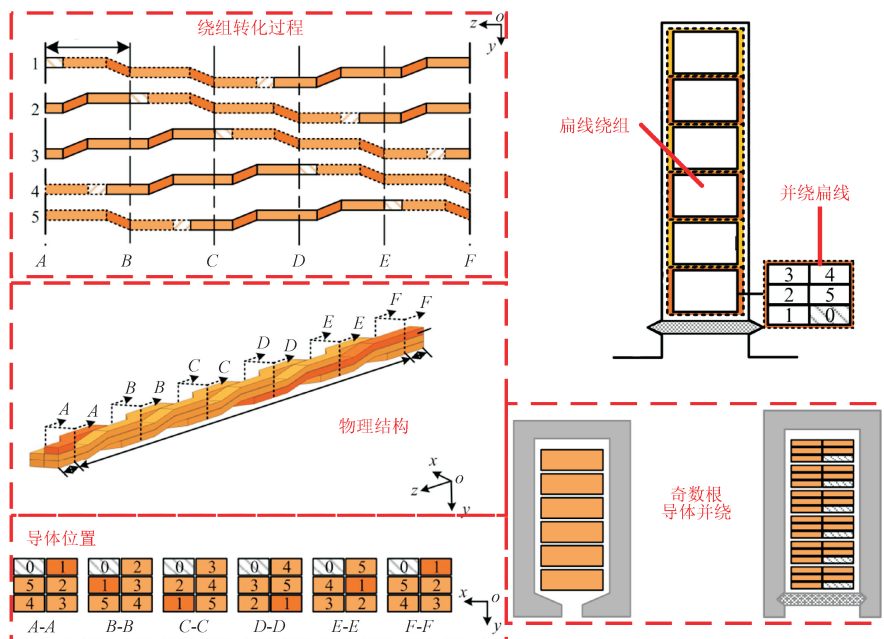


图 8 槽内换位扁线绕组

Fig. 8 Slot transposition flat wire winding

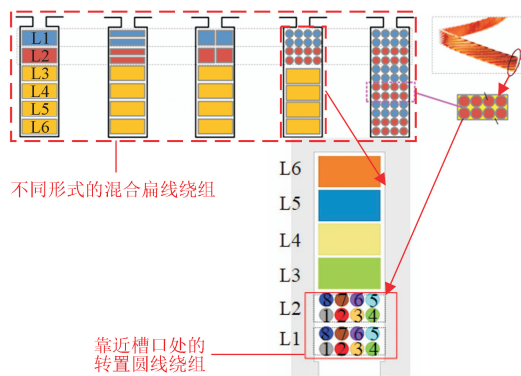


图 9 混合绕组构型

Fig. 9 Hybrid winding configuration

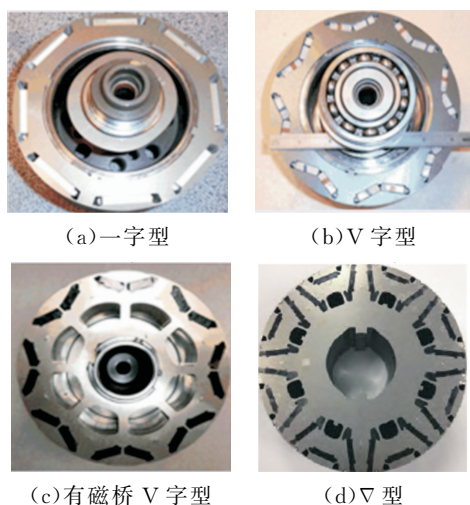


图 10 丰田 Prius I 代到 IV 代电机转子构型

Fig. 10 Rotor configuration of Toyota Prius I to IV generation

Cui 等^[21]针对∇型的永磁同步电机提出采用混合永磁体的结构,对比传统全钕铁硼的构型,经过遗传算法的寻优计算,当铁氧体与钕铁硼的用量分别占比为 60%和 40%时获得最佳的输出性能。

由于传统的径向磁通永磁同步电机绕组端部的漏磁较为严重,所以文献[22]提出了一种新的构型用于新能源汽车,该构型巧妙地在传统的径向磁通永磁同步电机两侧安装轴向磁通的转子结构,经过仿真计算,该构型较传统的内嵌式永磁体结构有更高的转矩密度、更高的功率因数以及更高的效率。文献[23]通过多目标算法 NSGA-II 对转子为双 V 型永磁体构型的永磁电机进行了优化设计,分别以双 V 型永磁体与转子之间的尺寸为自变量,仿真结果显示功率密度和转矩输出都有了较大的提高,验证了双 V 型构型的有效性及其可靠性。

比亚迪海狮 07EV,其额定转速为 23 000 r/min,两驱版本提供 170 kW 和 230 kW 两种,四驱版提供 390 kW 双电机,其采用了高转速低漏磁转子结构,双 V 分段磁钢,92%超高槽满率扁线绕组,0.25 mm 超薄硅钢片,因其转动惯量低,转速、功率密度以及效率都得到了提高,最高转速超 23 000 r/min^[24]。

红旗 EH7 的前驱电机峰值功率 202 kW,峰值扭矩 306 N·m;后驱电机峰值功率达 253 kW,峰值扭矩 450 N·m;系统综合功率高达 455 kW,最大扭矩 756 N·m;电机最高转速达到 22 500 r/min。采用了

碳纤维包裹的转子结构以及低损耗高强度硅钢材料克服高转速时的离心力,转子绕组采用了 8 层扁线绕组的构型让铜耗更低,使得电机最高效率可达 96%^[25]。

小米 SU7 Ultra 搭载两台 V8s 电机,一套 V6s 电机组成三电机四驱系统,V8s 电机输出最高转速达 27 200 r/min,输出最高功率达 425 kW,效率最高达 98.11%,功率密度也达到 10.14 kW/kg。V6s 电机最高转速为 21 000 r/min,输出功率为 220 kW,输出扭矩达 400 N·m。V8s 电机采用了双 V 型永磁体构型,转子采用了 0.35 mm 的取向硅钢片,避免使用外层的碳纤维材料导致气隙的变厚从而降低电机的输出功率。它采用屈服强度超过了 960 MPa 的硅钢片,在兼顾导磁性能的同时也满足了高强度的要求^[26]。散热采用了双向循环冷却的方式,散热流道与轴向有一定的夹角,是为了与定子铁芯有更大的接触面积,以提高散热能力。电机结构如图 11 所示。

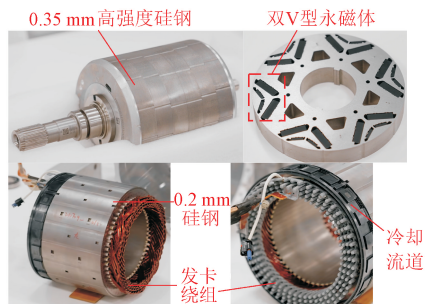


图 11 小米 SU7 Ultra 电机结构

Fig. 11 Xiaomi SU7 Ultra motor structure

对于内嵌式永磁体构型, Lucid Air 公司在内嵌永磁体后的两边间隙中充入了粘结永磁体,提高了磁通量,也增加了永磁体与叠片之间的连接强度,使得电机的输出特性曲线全面向外扩展,实现同体积下更高的输出转速与最大输出转矩^[27]。另外,为了进一步提高其功率密度,该公司利用定子齿部分电磁感应“死角”设计了冷却流道,让定子线圈最大程度的降温,不仅提高了整体的效率还提高了功率密度。

保时捷公司 Taycan 超跑由两台永磁同步电机提供动力,其中 Turbo 车型中前桥驱动电机功率达 170 kW,输出扭矩 300 N·m;后桥驱动电机功率大 330 kW,输出扭矩为 550 N·m。Turbo S 车型中前后桥峰值功率达 560 kW,总输出扭矩为 1 050 N·m,最高转速达 16 000 r/min,它的驱动电机均采用了发卡绕组配合定子外层环形的散热流道使得整体的功率密度提高,流道的外侧通过密封圈密封避免冷却液进入电机腔体。其转子采用了传统的永磁体内

嵌式构型,提高了直轴的电感,从而增大了弱磁扩速的能力^[28]。

文献[29]提高径向磁通永磁同步电机功率密度的方式是通过加强电机的冷却结构,对转子冷却是冷却剂流过背板后进入转子腔体,从而形成循环如图 12 所示,背板与转子腔体间通过密封圈密封,以防止冷却剂泄露。

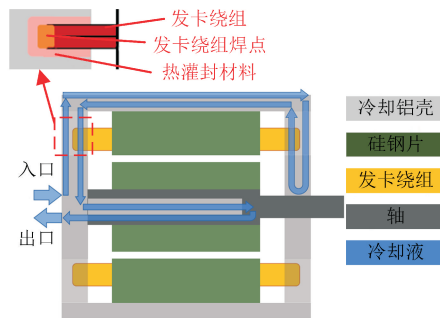


图 12 加强电机冷却的结构

Fig. 12 Strengthen the cooling structure of the motor

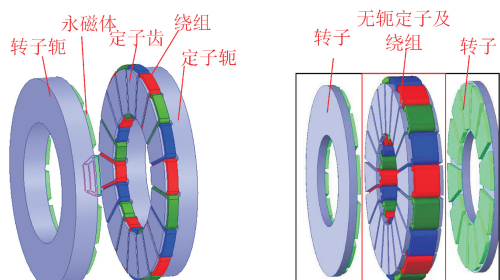
西安交通大学赵升吨教授团队开发的四电机与 WW 轮系组合轮毂电机原理样机,电机峰值功率为 8 kW,最高转速为 20 000 r/min,最大输出扭矩为 8 N·m。该样机有着更灵活的功率分流,通过不同模式的切换实现多电机的转矩耦合,使轮毂电机的高效运行范围覆盖多变的路况,提高了能量利用率^[30]。

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。此种电机结构及控制技术更加成熟,功率密度高、弱磁调速性能好,恒功率运行区间宽,低速的时候扭矩较大,使得该种类型电机成为众多车厂的首选。中国占有全球 70% 的稀土资源,为永磁同步电机在新能源汽车的应用奠定基础。但是高温容易导致转子永磁体退磁,所以需要设计散热系统来达到更优越的性能。

1.2.2 轴向磁通式

(1)使用该种类型电机的企业与车型。有轭部轴向磁通永磁同步电机由于沿径向开槽困难,加工难度大,因此较少使用在电动汽车领域^[31]。图 13 所示为有轭部轴向磁通永磁电机与无轭部轴向磁通永磁同步电机的区别。

轴向磁通电机的体积比径向磁通的电机小 50%、质量轻 50%,最早应用于电动汽车的轴向磁通电机采用有轭部轴向磁通的结构,其定子需要沿着硅钢片的径向开槽,并且有厚厚的定子轭,加工难度高且下线困难^[32-33]。所以无轭部轴向磁通电机成为研究的重点,但是其定子齿的固定方法及散热成为亟待解决的问题。



(a) 有轭轴向磁通电机 (b) 无轭轴向磁通电机

图 13 有轭部与无轭部轴向磁通永磁同步电机

Fig. 13 Axial flux permanent magnet synchronous motor with and without yoke

盘毂动力科技有限公司生产的无轭部轴向磁通电机如图 14 所示,它采用了给整个定子绕组油冷的方式进一步加大了电机的功率密度^[34]。

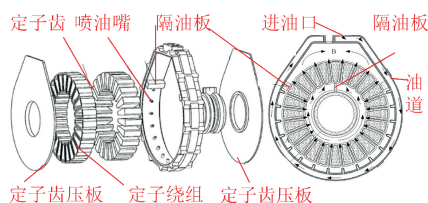


图 14 盘毂动力油冷电机

Fig. 14 PanGood oil cooled motor

奔驰公司发布的 Vision One Eleven 概念车采用 YASA 公司的无轭部轴向磁通电机,是一种分瓣无轭部的定子铁芯技术^[35]。从图 15 可以看出,它采用了无轭部的定子齿结构,使用薄薄的、模块化的定子压板代替传统的齿轭,使得电机下线变得更加简单,并且定子齿斜槽可以通过模具加工^[36],替代永磁体斜极从而降低齿槽转矩。

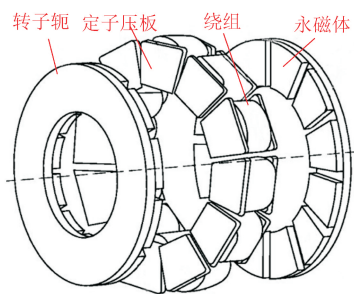


图 15 YASA 无轭部轴向磁通电机

Fig. 15 YASA yokeless axial flux motor

图 16 所示是 YASA 电机采用的定子齿固定方法,使用了轻且强度高的定子齿保持架在其周向铣削出齿槽,这样就可从定子齿的两侧将定子紧紧的

固定^[37]。

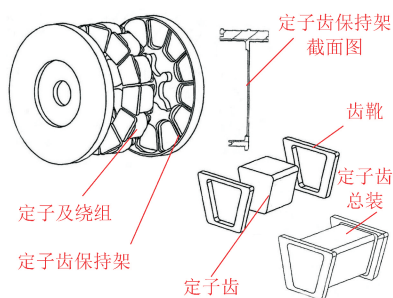


图 16 YASA 电机定子齿固定方法

Fig. 16 YASA motor stator tooth fixing method

法拉利的 296GTB 搭载了 YASA 公司的电机作为该插电混动车辆的驱动电机,放置在车辆的后桥,能输出最高 130 kW 的功率^[38]。

另外,YASA 电机也与兰博基尼汽车合作,将三电机与 V8 发动机结合应用在 Temerario 跑车上,最高可输出超 661.5 kW 功率。其中采用双电机前置驱动前桥,后电机与 V8 集成驱动后桥如图 17 所示^[39]。

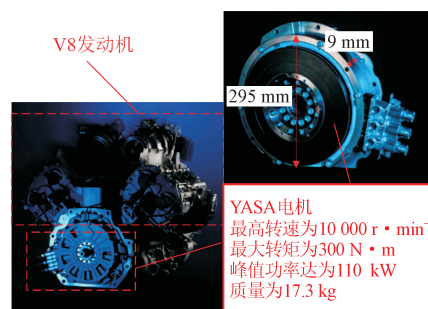


图 17 兰博基尼 Temerario 驱动电机

Fig. 17 Lamborghini Temerario drive motor

Infinitum 公司生产的轴向磁通电机体积小、重量轻,与传统的电机不同,它的电机定子中不使用铁芯和铜绕组,而是和印制电路板 (PCB) 一样将铜绕组刻蚀在 PCB 中,这样逆变器输出的电流通过 PCB 形成轴向磁通,带着轴向的转子转动从而驱动车辆,这种构型使得其铜的用量比传统轴向磁通电机少 66%。另外,由于 PCB 超强的稳定性使得该电机能获得 10 倍于传统电机的寿命,并且电机的质量和尺寸比传统设计少 50%,它安装方便,便于维修^[40]。

Aircore Mobility 公司采用模块化设计,通过将 PCB 定子与转子依次排列组合获得不同的功率,这种多定子多转子的结构可以满足不同的使用场合,如图 18 所示^[41]。例如,特斯拉的 Semi 重型卡车采用了 Infinitum 公司生产的 PCB 电机,并且采用 1 000 V

的高压架构,其中驱动电机的额定功率为 150 kW,额定扭矩 190 N·m,峰值功率为 300 kW,额定转速为 7 500 r/min,峰值转速达到 10 000 r/min,最高的运行效率达 95%,而整个电机只有 20 kg,其额定功率密度达到 15 kW/kg,峰值功率密度可达 30 kW/kg。但在电机紧凑空间中的热量管理方面也存在挑战,Infinitum 采用油基系统取代空气冷却来优化其整体的热量。

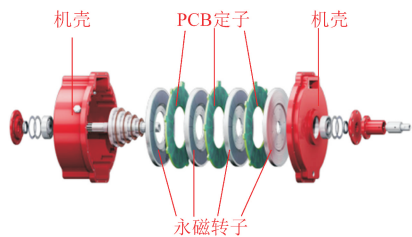


图 18 Infinitum 公司的 Aircore mobility 定子叠加

Fig. 18 Infinitum's Aircore mobility stator stack

Magnax 公司生产的高速轴向磁通电动机可以提供 15 kW/kg 甚至更高的峰值功率密度,其采用双永磁转子,可实现最大的转矩质量比,另外采用了无轭部的定子结构如图 19 所示,使得定子磁通的路径最短,最大化地降低磁通的损失,使得整体的效率最佳。再通过扁线绕组的方式进一步提高定子齿的槽满率,降低槽内漏抗,最后采用集中绕组使得绕组端部尽可能短,降低其端部漏抗同时也降低了每相绕组的整体长度从而降低了绕组的电阻,这样使得整体的铜耗降低。为获得大的峰值功率密度,该公司通过专利^[42],实现了定子的温度最低,在满足绕组电负荷的同时获得最大化的输出电流,输出最大扭矩。

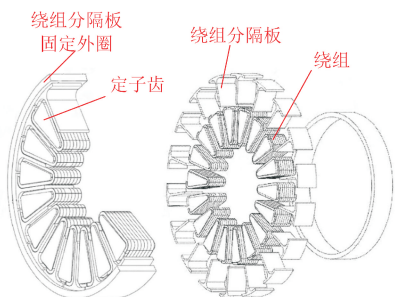


图 19 Magnax 高速轴向磁通电机定子固定方法

Fig. 19 Magnax stator fixing method for axial flux motor

为了固定住定子齿, Magnax 公司在定子外层

采用了沿轴向堆叠的方式,即在冲压其定子绕组的保持架叠片时,把绕组隔板也一并冲压,解决了定子齿之间的定位问题,如图 20 所示^[43]。

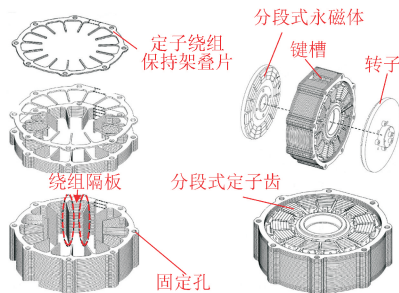


图 20 Magnax 高速轴向磁通电机定子齿固定架的构型

Fig. 20 Configuration of stator tooth fixer of Magnax high speed axial flux motor

在文献[44]中,YASA 电机的定子齿通过绕组分隔板实现定位,定子齿通过定子外壳设计 U 型水道的方法实现散热,定子齿的轴向定位依靠灌封环氧树脂来实现如图 21 所示。

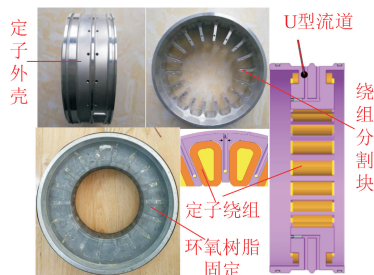


图 21 绕组分割板定位绕组

Fig. 21 Winding splitter locates the winding

文献[45]中,YASA 电机的定子绕组依靠螺栓连接在外圈对应的相绕组上,定子齿及绕组最终依靠环氧树脂灌封导致轴向尺寸大于定子齿端部尺寸并且依靠固定板实现了轴向定位,在定子齿的外侧有散热铜管实现对定子绕组的散热,如图 22 所示。

文献[46]通过定子齿固定板以及沿轴向分布的拉杆实现了定子齿的轴向定位,转子固定在转子外侧压板上如图 23 所示。

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。轴向磁通电机具有结构紧凑、扁平超薄、体积小、质量轻、功率密度高的技术特性,所以应用于新能源汽车有很大的优势,但是目前主要技术难点在于热管理、先进材料研发和批量生产工艺。

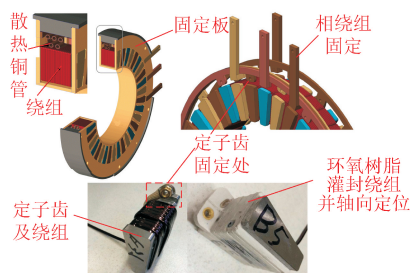


图 22 依靠固定板固定的灌封环氧树脂定子齿

Fig. 22 Potting epoxy stator teeth are fixed by a fixed plate

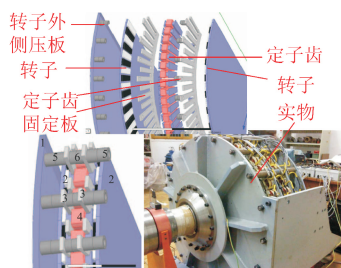


图 23 依靠固定板及轴向拉杆固定的定子齿

Fig. 23 Stator teeth are fixed by a fixed plate and an axial tie rod

1.3 磁阻电机

1.3.1 开关磁阻电机

(1)使用该种类型电机的企业与车型。开关磁阻电机最大的优点是它避免使用永磁体,能工作在更高的频率下,所以有很宽的恒功率运行区间,工作温度甚至可以高达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[47],另外它也易于加工制造。事实上,开关磁阻电机已经有了 180 年的历史,它结构简单,制造成本低,更是确保供应链安全的重要选择^[48]。美国 Turntide 公司(原名 Software Motor Company)生产的开关磁阻电机已经应用于电动汽车,其分别采用单定子单转子及双定单转子的构型^[49]。

文献[50]通过非支配遗传算法(NSGA-II)设计了新的轴向磁通型开关磁阻电机,兼顾了轴向磁通电机的优点。经过与径向磁通型开关磁阻电机对比研究,其转矩密度有了一定程度的提升。

Nasir 等^[51]综述了开关磁阻电机各种技术的特点及局限性,并综合了每种拓扑结构中的容错的实现办法,为新能源汽车驱动电机的容错设计及控制提供了借鉴。Sun 等^[52]针对目前电机尺寸参数多目标优化设计中,有限元模型设计参数过多、计算量巨大的

问题,提出采用顺序子空间优化方法(SSOM)。由于电机的几何形状尺寸以及定子和转子之间的气流仍会影响电机的散热,所以创新性的通过该方法将电机温度纳入到电机的多目标优化中,使得电机的设计更加合理。

文献[53]研究了开关磁阻电机不同定转子极数组合的优劣,结果表明,定子极数越多,定转子的组合越自由,越可能出现最优的组合方案。在这些极数组合中,转子为 10 极和 14 极的电机反电动势更加正弦,并且转矩密度也高于转子 8 极的开关磁阻电机,并进一步提出了加倍定转子极数的组合能消除不平衡磁拉力。

值得注意的是,开关磁阻由于其双凸极的结构所以会有较大的转矩波动。Zhang 等^[54]提出采用带有定子齿尖的开关磁阻电机,通过仿真结果显示,该方法可以让其转矩波动降低,另外齿槽转矩降低了 90.66%。

文献[55]提出采用转子斜极的方法来大幅减小开关磁阻电机的直流感应电动势以降低其输出转矩波动,同时能满足定子绕组的反电势仍然高于输入基础电压的 95%,另外不同电机的最优的转子偏转角 θ_s 可由下式获得

$$\theta_s = \frac{2\pi}{N_p} \quad (1)$$

式中: N_p 为每电周期的感应电压周数。

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。新能源汽车用该类电机最突出的特点是避免使用永磁体,所以其耐高温、耐振动,适合用在一些特种车辆中。但是,由于其输出扭矩波动较大,所以一直以来有大量的学者在不断的研究。另外,开关磁阻电机在长时间大功率运行时,电机温升很大,这也阻碍了其在电动汽车上的应用。

1.3.2 开关磁通电机

(1)使用该种类型电机企业与车型。开关磁通电机在 1955 年被发明,作者详细介绍了开关磁通切换的原则,分析了常用的结构、产生的电压以及频率等参数^[56]。然而,受限于当时加工的技术以及昂贵的永磁体材料,其发展受限。直到后来,C 型定子铁芯^[57]、E 型定子铁芯^[58]、多齿的定子铁芯^[59]以及混合励磁的定子铁芯^[60]分别被提出,开关磁通电机不断的进入人们的视线,由于其高功率密度以及结合了永磁电机与开关磁阻电机的双重优点,所以它被提及应用于电动汽车^[61]。

Fei 等^[61]设计了一种 12 槽 10 极三相开关磁通

永磁同步电机,并对其在新能源汽车实际使用中进行了研究。文献[62]主要针对 I 型永磁体的 12 极 22 槽开关磁通电机的齿形参数以及永磁体厚度进行优化,考虑气隙和转子侧的磁通密度谐波用于研究转矩输出所利用的磁能。根据谐波转矩的贡献,选择有用的谐波,提出综合谐波减小率,并将其用于电机转矩的优化。作者通过多目标优化的算法设计了单定子双转子的开关磁通电机^[63],实现了高转矩能力、低转矩脉动、内外电机之间低磁耦合的设计目标。

文献[64]对比分析了内嵌式永磁体型永磁同步电机与开关磁通电机的优缺点,结果显示,相同功率、相同外形尺寸、相电流和电流密度时,开关磁通电机的永磁体用量是内嵌式永磁体型的永磁同步电机的 2.29 倍,量化每 kg 永磁体输出的扭矩,内嵌式永磁体型的输出扭矩是开关磁通电机的 2.53 倍。文献[65]对定子永磁体型开关磁通电机与开关磁阻电机做了对比研究,通过有限元分析方法,确定了转子凸极的最优偏转角,在额定转速和额定电流密度下,斜转子开关磁通电机的转矩容量较大,转矩脉动较小,抗饱和能力较强。与 12/8 极开关磁阻电机相比,开关磁通电机的功率因数要高得多,效率略低,这为电动汽车用开关磁通电机提供了借鉴。

苏鹏^[66]将永磁体设置在转子之上,构建了如图 24 所示的一种新型结构的转子永磁型磁通切换电机,从兼顾低速大扭矩和恒功率宽调速的新型切换电机拓扑结构着手,建立了转子永磁型开关磁通电机的设计准则和优化设计方法,有效解决了定子永磁型开关磁通电机应用于新能源汽车的问题,为开关磁通电机在新能源汽车的应用奠定了基础。

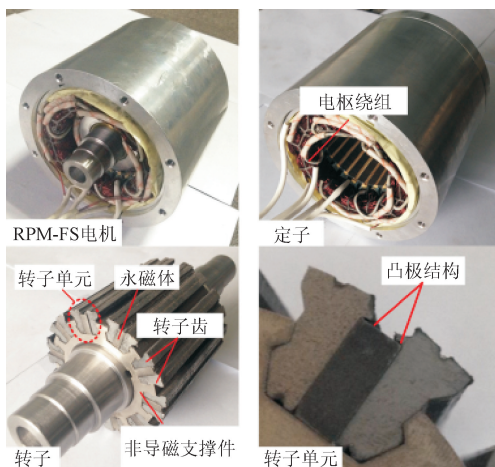


图 24 转子永磁型开关磁通电机

Fig. 24 Rotor permanent magnet switching flux motor

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。新能源汽车用此类电机最突出的优点在于其结合了开关磁阻电机与永磁同步电机的优点,另外开关磁通电机的反电动势更加正弦,所以输出转矩波动低,适合高速的场合,但是对比内嵌式永磁体构型的永磁同步电机,其永磁体的利用率较低,所以同功率时该种电机的成本更高。另外,定子永磁型开关磁通电机易饱和、转矩过载不足,定子电枢绕组包裹永磁体也易引起永磁体高温退磁。

1.4 交流异步感应电机

不同于交流永磁同步电机,交流异步感应电机的输出的机械特性^[5]如图 25 所示。图中, T_m 和 s_m 分别对应最大转矩和对应的滑差率,最大转矩时对应的滑差率 s_m 又被称为是临界滑差率; n_N 和 T_N 分别为额定转速和额定的输出转矩; T_{st} 为异步电动机的启动转矩,它代表了电动机的启动能力; n_1 为异步电动机的空载最大转速。

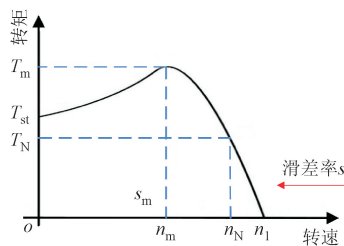


图 25 异步感应电机的输出机械特性

Fig. 25 Mechanical characteristics of induction motors

从图 25 可以看出,当异步感应电机的滑差率大于临界滑差率时,随着滑差率的增加,异步电机输出的转矩呈递减态势,所以它并不能像同步电机那样输出恒定的负载。

(1)使用该种类型电机的企业与车型。传统的鼠笼式感应电机采用离心浇筑的方式让鼠笼导条与端环一次成型,但是需要为电机开模,费用昂贵。特斯拉采用了模块化的方式将导条与端环分开,如图 26 所示。当导条插入到转子中时,用导条铜夹板

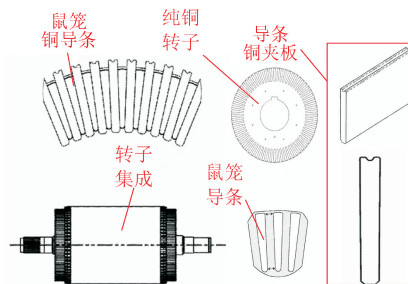


图 26 特斯拉异步电机铜转子构成

Fig. 26 Tesla asynchronous motor copper rotor composition

将它两边的导条连接起来,外层再通过固定外圈将导条铜夹板固定则可实现导条之间的短路,这样能显著降低加工成本。该技术被特斯拉应用在其首款量产的电动汽车 Model S 中^[67],后来应用于特斯拉的 Model X 车型中。

奥迪 E-Tron 的驱动电机^[68]如图 27 所示,其采用了扁线绕组及铸铝转子,端环在端部刚好类似于轴流风扇,进一步加强了散热。该电机的冷却循环系统是冷却液从入口直接进入该电机的转子空心轴,接着到定子外侧的散热流道对定子进行冷却,所以奥迪 E-Tron 驱动电机是对定转子同时冷却的,该技术较为先进。其前桥的驱动电机与后桥的驱动电机都采用了感应异步电机,前电机峰值功率为 135 kW,最大输出扭矩为 309 N·m,电机最高转速为 15 000 r/min。后电机峰值功率为 165 kW,最大输出扭矩为 355 N·m,最高转速为 15 000 r/min。

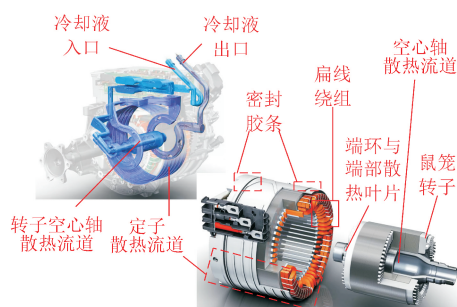


图 27 德国奥迪 E-Tron 铸铝转子异步电机

Fig. 27 Audi E-Tron cast aluminum rotor induction motor

国产蔚来汽车公司最早的 ES8 在 2018 年也采用了铜转子异步感应电机配合发卡绕组,最大输出功率为 240 kW,在 0~5 500 r/min 的转速范围内可以输出 420 N·m 的最大扭矩,最大的输出转速为 15 000 r/min。2022 年,其采用双电机驱动的架构,前桥电机采用了永磁同步电机,最大功率输出 180 kW;后桥驱动电机为异步感应电机,最大输出功率为 300 kW,最大输出总扭矩为 850 N·m^[69]。定子外侧是有闭环的 S 型水道,冷却液通过循环冷却给电机降温提高其功率密度。

奔驰 EQC 是奔驰在纯电领域的第一款产品,其前后桥驱动电机与奥迪 E-Tron 一样,均采用了感应异步电机配合铸铝转子水冷技术,提高其散热性能及功率密度。前后电机的峰值功率均为 150 kW,最大输出扭矩为 382 N·m,电机最高转速为 12 000 r/min^[70]。

为了显著降低车辆的能耗,必须尽量减少电机

的损耗并尽可能提高效率。论文[71]提出了一种异步电动机整体优化损耗方程,采用修正粒子群算法,得到电机损耗最小的定子基准磁通、电磁转矩和运行速度。这些值可以作为参考控制信号来实现电动汽车动力系统的控制策略,通过从 JMAG 软件获得所需的商用电机参数,对优化结果进行了实际验证,以获得良好的精度和可靠性。

为提高当前感应电机的性能,文献[72]设计了一种 200 kW、370 N·m 的电动汽车牵引系统用感应电机,通过力学分析和实验数据对合适的材料进行了分析和选择,采用了转子压铸、发夹定子绕组和特定的冷却系统。文献[73]依据电动汽车不同转速转矩的需求研究了多相感应电机,通过外部的多相逆变器实时调节电机不同相绕组的输入电流的相位特征,使得电机获得不同的极对数,该极相调制方式经验证合理并且转速调节范围更宽,但是其控制算法较为复杂。文献[74]讨论了一个新型六相绕组感应电动机转子设计方案,提出了一种伪集中绕组结构,它既不是传统意义上的集中式绕组也不是分布式的绕组,并论述了该设计如何可靠、低成本,并有助于提高效率。文章还提到对模型进行算法优化和分析建模,以及采用变量导体数量对线圈进行优化,最后该电机的效率得到有效提升。

(2)该电机应用于汽车上的优缺点。由于全球稀土资源较为紧缺,所以永磁材料较为昂贵,不少厂商选择研发高性能的异步感应电机取代永磁电机,这样成本低,价钱便宜,没有退磁的风险,但是由于转子磁通是由感应而产生的,所以异步感应电机增加了转子铜耗而导致其效率没有永磁电机高^[75]。采用各种优化方法后异步电机的效率难以超过 94%,而采用铜转子的电机效率通常会比铝转子的效率高出 2%左右^[76]。另外由于滑差的存在,导致异步感应电机的控制性能不如永磁同步电机。

2 新能源汽车主驱动电机的发展趋势

2.1 供电电压高压化

2.1.1 400 V 平台

就目前市场的情况来说,其电压架构通常为 400 V 或者 800 V,一些接近 400 V 的也被称为 400 V 架构,比如特斯拉的 Model 3、Model X 的电压为 350 V,Model S 的电压为 375 V,Model Y 的电压为 400 V。

2.1.2 800 V 平台

目前来说,800 V 的架构也是一个比较宽泛的

概念,比如在 550~930 V 之间都可以称为是 800 V。最初使用 800 V 高压架构的是保时捷的 Taycan 跑车,800 V 架构对电动汽车而言,好处更多,同功率下由于电压的提高,其额定电流则降低,那么对于超级快充而言,最制约的就是快充下的大电流难题,所以在 800 V 的架构下其电动汽车的充电时间将大幅缩小。另外,电流降低则可以让整个系统的热量产生减低,对整个系统的热管理也更有好处。相比较上一代的 400 V 架构,电力电子的集成减少了 60% 的质量和体积,同时提高了 25%~50% 的负载能力^[77]。

目前使用 800 V 架构的新能源汽车包括了智己 LS6、比亚迪、腾势、极狐、阿维塔、极氪、保时捷 Taycan、现代 Ioniq 5、起亚 EV6 以及奥迪 E-Tron GT 等。

2.1.3 900 V 平台

Lucid Air EV 采用了 900 V 的架构,目前来说,较为豪华的汽车领域才有 900 V 的应用。在 900 V 的高压平台下,该公司量产的电机功率密度更是达到了 6.66 kW/kg,每台电机功率高达 493 kW,但是质量仅为 74 kg,在径向磁通永磁同步电机作为主驱动电机的整个行业也属于领先水平。

2.1.4 1 000 V 平台

2022 年末,特斯拉正式交付其 Semi 卡车,它采用了 1 000 V 的高压平台,最大的充电功率可达 1 MW。由于母线电压直接决定着电机的电压输入水平,所以母线电压也直接决定着电机的弱磁控制能力。理想情况下,电机能达到的最大转速取决于电压和电流的输出极限,具体计算公式为

$$\Omega_{\max} = U_{\lim} / \sqrt{(\rho\psi_f)^2 + \left(\frac{T_e L_q}{\psi_f}\right)^2} \quad (2)$$

式中: $U_{\lim}$ 为最大基波相电压有效值; $\Omega_{\max}$ 为在 $i_d = 0$ 的控制方法且满足电压和电流输出极限的情况下电机能输出的最大转速,它为机械角速度,单位为 rad/s; ρ 为电动机的凸极率, $\rho = L_q/L_d$; L_q 为交轴电感; L_d 为直轴电感; T_e 为电机输出的电磁转矩,单位为 N·m; ψ_f 为永磁体产生的磁链,即为转子磁链,可以由下式获得

$$\psi_f = e_0 / \omega \quad (3)$$

其中: e_0 为电机的空载相反电动势幅值, V; ω 为电角速度, rad/s。

当采用 $i_d = 0$ 控制方式且电机已经输出最高转速,则需要增加 i_d 来削弱转子的磁场来保证在更高的转速下反电势不会超过逆变器输出的极限电压。所以在这个时候电机能输出的最大转速为

$$\Omega_{\lim} = u_{\lim} / p \sqrt{(\psi_f + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (4)$$

式中: p 为电机的极对数。

综上,逆变器输出的电压极限都显著影响着电机能达到的最高转速^[78],而这也恰恰验证了为何如今高性能电动汽车驱动电机的电压都逐渐变高且最高转速基本都高于 20 000 r/min。

但是,高压化带来了诸多挑战,尤其对整体设计过程中的耐压等级、车内用电设备绝缘能力、电机的绕组绝缘等级提出更高要求。比亚迪最新的 1 000 V 超级 E 平台通过自主研发高压漆膜应对绝缘挑战。该漆膜介电常数降低 41%,局部放电起始电压提升 13%,击穿电压提升 8%,漆膜厚度降低 15%,成功解决了高压绝缘难题,为实现高功率密度奠定基础^[79]。

2.2 高转速化

由电机学相关的公式可知

$$n = 60f/p \quad (5)$$

式中: n 为电机的转速, r/min; f 为输出电压的频率, Hz。

由上一章节可知,越高的电压等级越有利于扩展最高转速,那么当电压等级确定的情况下,为了获得更宽广的转速,只能调频或者改变电机的极对数。

另外,电机的电枢直径与电机的转速成反比。所以转速越高,其电机的本体尺寸就可以做到更小,这样整体的质量降低,转动惯量降低,成本缩小^[80]。表 1 是不同车型的电机的转速,可以看出其电机的转速基本都高于 20 000 r/min,所以对转子铁芯的强度及导磁性能提出了更高的要求。

表 1 不同车型的主驱动电机转速

Table 1 Motor speed of different car models

车型及电机	转速/(r·min ⁻¹)
比亚迪超级 E 平台电机	30 511
红旗 EH7	22 500
智界 S7	22 000
特斯拉 Model 3	18 000
保时捷 Taycan	16 000
蔚来 ES6	16 000
Xiaomi 超级电机 V8s	27 200
小米 SU7	21 000
比亚迪海狮 07EV	23 000
特斯拉 Model Y 3D6 电机	20 000
智己 LS6	21 000
比亚迪易四方平台电驱	20 500
极氪 001FR	20 600

2.2.1 确定极数

对于确定的极数,为了获得更高的转速则需要将输出的电流频率调到更高,电流频率越高,则铁耗会越大。另外,转速越高则电机的转子会有更大的离心力,这对转子的强度以及轴承都提出了更高的要求。

由电机学公式可知,电机的铁耗计算式如下

$$P_{Fe} = K_h f B_m^2 + K_e f^2 B_m^2 + K_c f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (6)$$

式中: K_h 是磁滞损耗系数; K_e 为涡流损耗系数; K_c 为附加损耗系数; α 为斯坦梅茨系数,一般取 1.2 ~ 1.6; B_m 为硅钢磁通密度幅值。

由式(6)可知,频率增高时铁耗会指数级增加,所以为了在高转速下获得更小的铁耗往往需要将硅钢片做到更薄,但是太薄又会影响到其强度。

目前国内新能源汽车驱动电机材料主要采用无取向硅钢,其生产企业有宝钢、武钢、首钢、马钢等^[81]。为了减小铁耗,硅钢片厚度从传统的 0.35、0.5 mm 减薄至 0.2、0.25、0.27 mm 等。例如,小米 SU7 Ultra 的定子铁芯则采用了 0.2 mm、由首钢生产的无取向硅钢^[26]。比亚迪研发了高强度硅钢比普通硅钢片材料的屈服强度提高了 138%,硅钢片粘结技术让轴向刚度提升了 161%^[79]。

2.2.2 不确定极数

电机可以通过改变极对数而获得不同的转速。由于传统的变极电机设计是在一种极数设计完再去验证另一种极数下的性能,不仅设计繁琐而且不能保证最终的设计能同时满足电机在不同极数下的性能,所以从电机设计原理出发,需要对倍极比的变极电机设计提出新的理论。

由电机设计式(7)可知,不同的额定转速其电枢直径的计算值并不相同,所以如何让同一电枢直径下同时满足电机在不同极数时的性能是倍极比变极电机设计的重中之重。交流电机定子内径为

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{17.24 p m E I_N}{\pi \lambda n_N A B_\delta K_{dp}}} \quad (7)$$

式中: D_i 为交流电机定子内径, m; n_N 为交流电机同步额定转速, r/min; A 为线负荷, A/m; B_δ 为电机的气隙磁密, T; K_{dp} 为绕组系数; m 为定子相数; I_N 为定子额定相电流, A; E 为满载时定子相电动势, V; 主要尺寸比 λ 定义为铁芯有效长度 l_{ef} 与极距 τ 之比。

假定倍极比变极电机的视在功率相等,则结合式(7)与电机线负荷相关的定义可以确定变极电机在不同极对数下的电枢直径比为

$$\frac{D_{iL}^2}{D_{is}^2} = \frac{a_L}{a_s} \quad (8)$$

式中: 下标 L 表示较大的极对数; 下标 s 表示较小极对数(下文所有公式中的下标同此意义); a 为绕组并联支路数。

由式(8)可知,电枢直径的比与并联支路数直接相关,另外为了获得相同的功率因数,应该满足下式

$$\frac{\cos \varphi_L}{\cos \varphi_s} = \frac{a_s A_s}{a_L A_L} \quad (9)$$

在上述基础上,西安交通大学赵升吨教授团队开发了适用于紧凑型 SUV 的纯电动汽车的驱动总成,电机采用了纯铜转子的 4 极/8 极变极交流异步感应电机,并且开发了驱动控制器^[82]。采用 WW 轮系的构型为电动汽车最高能提供 3 000 N·m 的扭矩,电机最大功率为 160 kW,最高转速 20 000 r/min。经试验台测试结果表明,该电机具备了较为出色的切换响应性能^[83]。可见,通过变极调速也可以让电机获得更为宽广的转速以适应当下新能源汽车驱动电机对高转速的追求。

2.3 低 NVH 化

随着驱动电机的转速越来越高,电磁振动成为影响乘坐与驾驶舒适性的关键因素,电磁振动噪声是电机噪声的主要噪声源,直接影响电机的 NVH 性能,而电磁力是影响电磁振动噪声的主要原因。

Gieras 等^[84]提出了电机的电磁噪声的机理,认为噪声是由定转子之间的电磁力产生的。文献[85]全面阐述了永磁同步电机的 NVH 特性,将电机振动的源头归为切向电磁力和定转子之间的径向电磁力,所以将有两方面优化设计的思路来提高电机的 NVH 性能。

第一是从优化电磁力的大小入手,文献[86]提出了采用转子隔磁桥来降低定子齿部的电磁力从而有效降低电磁噪声。文献[87]采用了多目标优化的方法降低电机本体电磁力所带来的噪声,结果显示该优化方法能显著降低目标电磁力,从而降低了车用永磁同步电机的电磁噪声。

第二则是尽可能地提高定转子槽的力学性能,使其即使在较大的电磁力下也难以振动。汇川联合动力通过高精度模具注塑固化技术,使铁芯槽齿与工程塑料形成分子级结合,彻底消除传统叠片工艺导致的(0.3~0.5)mm 级翘曲变形,同时注塑体特有的阻尼特性可吸收电机电磁振动,提升了驱动电机在使用过程中的 NVH 性能^[88]。比亚迪超级 E 平台的驱动电机采用了硅钢片粘结技术,NVH 降低了 2 dB^[79]。

未来驱动电机的 NVH 性能将会采用强化定转子铁芯以及结构优化等途径来提高其力学性能,从而降低高速时候带来的 NVH 影响。

2.4 向功率密度化

新能源汽车为了让续航里程更长,在不断轻量化整车系统。作为电动汽车的核心,主驱动电机的质量以及整体的功率密度水平对整车的性能起了决定性作用,所以全球各大汽车商的主驱动电机都在追求电机具有更高的功率密度^[89]。表 2 是目前主流的几种车型的驱动电机的功率密度。

表 2 不同车型驱动电机的功率密度

Table 2 Power density of drive motors for different car models

车型及电机	质量/kg	功率/kW	功率密度/(kW · kg ⁻¹)
智界 S7	78	148	1.90
特斯拉 Model 3	134	316	2.36
保时捷 Taycan	170	330	1.94
蔚来 ES8	135	320	2.37
Lucid Air	73	493	6.75
小米 V8s	42	425	10.12
YASA 电机	24	353	14.71

为了获得更高的导磁性能与强度,国内的钢厂都在不断研发新的硅钢材料,以满足新能源汽车更高速更高功率密度的需求,硅钢材料的导磁性能越高,则传递相同的磁能需要更小的硅钢片,那么功率密度自然提高。

另外为了获得更高的功率密度,国内外新能源汽车厂商大都开始采用扁线绕组代替传统的圆线绕组以提高电机的槽满率,但采用扁线绕组会降低电机设计的灵活性,而且由于较大的矩形截面导致绕组的涡流损耗大幅增加,所以不少学者研究采用混合的扁线绕组技术,以降低绕组的损耗提高整体的效率。另外在兼顾转子强度性能的同时,将硅钢片做薄可以让铁耗降低,从而提升效率的同时减小了热量的产生,为高功率密度奠定基础。

比亚迪超级 E 平台采用的 N50EH 高性能磁钢的剩余磁密比行业采用的通用磁钢提升了 18%,并运用了磁钢分段的技术降低了 44% 涡流损耗,配合 AI 大模型优化的 6 极 72 槽短距绕组设计提高绕组系数及利用率,使功率密度达到 16.4 kW/kg,进一步提高了效率以及功率密度^[79]。

由于功率密度与最大输出功率直接相关,而最大输出功率与散热情况紧密相连,随着功率密度的不断提升,电机的散热系统设计将更加重要,稍有不慎可能会有泄露等故障风险。如果选择感应电机作

为驱动电机的话,那么需要对旋转的转子进行散热以降低转子的铜耗,这也是奥迪 E-Tron 和奔驰 EQC 的异步电机均采用转子散热的原因。另外, LUCID Air 则精心设计定子散热结构,让绕组尽可能地直接与冷却液接触,以最大程度地提高散热性能从而提高功率密度^[89]。

2.5 新型电机材料

由于电机的转速设计越来越高且功率密度越来越大,所以研发强度更高、导磁性能更好的硅钢将尤为重要。当前新能源汽车所采用的无取向硅钢主要采用固溶强化、析出强化以及位错强化来提高其强度,通过不同的工艺可以获得不同的材料性能^[90]。

朱诚意等^[91]提出降低硅钢铁耗最有效的方案是提高钢中 Si 含量和将硅钢片薄规格化,他们采用日本钢铁工程控股公司(JFE)开发的 0.2、0.25、0.30、0.35 mm 规格的商用电动车用无取向硅钢已做成原型机并测试了输出性能,并进一步提出了提高合金元素含量,认为改善钢的加工性能是实现电工钢厚度减薄的基础条件。

日本金属株式会社开发出了 0.08 mm 的极薄无取向硅钢并将其应用于世界最高等级磁密度小型高效率电机,在 10 000 r/min 下其铁耗比 35W300 无取向硅钢片降低了 53%^[92]。比亚迪超级 E 平台的驱动电机采用 1 000 MPa 高强度硅钢片、航空铝短板等创新材料,实现了更高功率的输出。

另外,采用新型合金材料代替原有的硅钢材料提高电机效率已经成为一个重要的方向,非晶合金材料具有低损耗、高磁导率的特征备受国内外学者关注。硅钢电机与非晶电机的铁芯损耗如图 28 所示,可见非晶电机在不同频率时的损耗都显著低于硅钢电机^[93]。为了进一步提升非晶合金的饱和磁感强度,清华大学团队设计和研发了少量添加钴的铁基非晶合金成分体系,最终的饱和磁感强度已非常接近无取向硅钢,但损耗远低于硅钢。

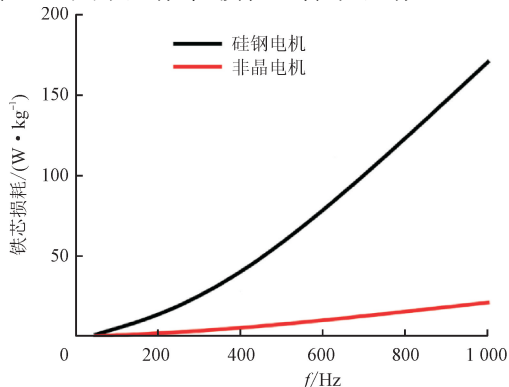


图 28 硅钢电机与非晶电机铁芯损耗

Fig. 28 Core loss between silicon motor and amorphous motor

文献[94]研究了 1J22 铁磁材料、非晶材料与通用硅钢片的输出性能,根据定子铁耗随负载变化的曲线分析,3 种材料的定子铁耗排序为硅钢片>1J22>非晶合金,但在高过载的情况下,用 1J22 材料的效率更高。颜昌昊等^[95]对非晶和硅钢材料性能进行了对比,其饱和磁密相比较硅钢材料来说较低,但是当磁通密度为 1.5 T、频率为 600 Hz 时,非晶材料的铁耗仅为硅钢材料的 19.2%。所以,超薄高牌号无取向硅钢未来将成为新能源驱动电机的核心材料,但其生产流程工序冗长、工艺窗口狭窄,而且磁性能受诸多因素交叉影响,其整个加工工艺需要对微细夹杂物、晶粒尺寸、织构行为等协同控制,是制造新能源汽车用无取向硅钢需要解决的关键科学问题。目前业界的生产工艺都处于商业机密阶段,另外非晶合金材料的研制为新能源汽车用电机提供了高性能候选的材料。

2.6 电机及其他装置高度集成化

通过电机与减速器直连可以避免使用传统的联轴器,让结构更加紧凑,所以整体的质量将减小,而且提高了同轴度,减小了噪声。另外集成度越高其零部件发生失效的几率越小,所以整体的方案会更加安全可靠。电机通常与控制器也集成一体,以省去中间的多余电缆传输,降低干扰,提高响应的速度。

采埃孚作为全球汽车零部件供应商百强榜稳居前三名的公司,图 29 所示为该公司生产的三合一电驱总成^[96],它集成了电机、驱动控制器、减速器以及外壳等于一体,保证了高可靠性。

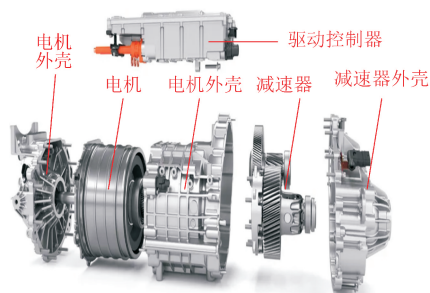


图 29 采埃孚电驱总成

Fig. 29 ZF electric drive assembly

然而,在结构紧凑的同时,电机、驱动系统、减速器装置、其他的类似充电器与直流变换器以及电池管理器等也是新能源汽车中至关重要的一环。集成度越高,则系统整体的散热设计将更加重要,稍有不慎可能会有泄漏等故障风险。另外,如何平衡电机的热与效率也将会是研究的热点之一,比亚迪从最

初的三合一平台提高到八合一平台^[97]。

比亚迪为了进一步提高集成度与高效的热管理提出了十二合一的更高集成度平台,包括了电机、碳化硅驱动控制器、高效减速器、车载充电器、直流变换器、高压配电模块、整车控制器、电池管理器、能量管理智控系统、智能升压模块、智能升流模块以及智能自加热模块。采用集成度更高的平台有利于降低体积和改善整车布局,降低整体的质量,提升轻量化的水平,省去更多的传动机构让整体系统效率更高,静音性更强,响应更快,已成为新能源汽车发展的主要方向。

但是,高度集成化也带来了一系列的挑战,包括系统复杂性的增加、单点故障风险的提高、系统兼容性的难题以及系统安全性的考虑。解决这些问题需要行业内的专业技术团队不断创新,并采用先进的技术手段和标准,以确保集成化的推进既不损害系统的可靠性,又能充分发挥其在提升能效、简化结构等方面的优势。

2.7 电机转速传感的低成本高可靠

2.7.1 驱动电机的速度反馈元件分类

电动机参与传动时都需要速度反馈,常用的速度反馈元件有旋转编码器、霍尔速度传感器以及旋转变压器(简称旋变)。旋变耐震动,分辨率较高,寿命长,但是需要额外的解码器才能被控制器读取;编码器分辨率更高,但是不耐震动,寿命较低;霍尔传感器则分辨率最低。

2.7.2 新型的磁编码构型

传统的速度测量通常采用编码器或者旋转变压器,但它们很昂贵,而基于霍尔效应的磁编码器成本是传统反馈元件的 1/10。它的核心原理是由一对极永磁体产生的旋转磁场随着角度的变化,经芯片计算出相差 90°的一个周期的正余弦信号,和旋转变压器类似,再经芯片的解析可以获得增量编码器信号或者绝对式编码器信号,而一对极永磁体通常直径只有 10 mm,所以需要嵌装在旋转轴上。永磁体的选择根据使用目的,可以从温度特性良好的钕钴系、小型轻量化的钕铁硼系,及价格低廉的铁氧体系磁铁中选择,其具体的设计及测试结果参考文献[82]。

综上,新能源汽车驱动电机的转速反馈装置应朝着低成本、高可靠、高精度的方向发展,这样可为新能源汽车普及及广泛应用奠定成本优势。

2.8 驱动控制器高频高效化

半导体材料经过几十年的发展,第一代硅材料半导体已经接近完美晶体,对于硅材料的研究也非常透彻。它以其优异性能、低廉价格和成熟工艺,在

IC 领域占据绝对额地位,它更适合于低压、高频场景。第二代半导体代表为 GaAs,它主要作为射频器件的材料。第三代半导体 SiC 以及 GaN 则适合不同的应用场景,SiC 基的功率器件适用于高频、高压的情况,比如新能源汽车、光伏逆变等,其输出功率 P_{out} 可达 10 MW,开关频率 f_{sw} 接近 1 MHz;GaN 则适合于低压高频应用场合,所以在汽车的高功率的 DC/DC 转换器上广泛应用^[98]。

SiC 基功率器件及 GaN 基功率器件在新能源汽车上广泛使用,不仅体积缩小,其开关损耗也降至更低。对比德国英飞凌公司的不同工艺功率器件损耗可知,新能源汽车驱动器采用硅基元件加 SiC 二极管则整体损耗较全硅基元件降低约 30%,而采用全 SiC 半导体的损耗降低约 80%,效率大幅提升^[98-99],如图 30 所示。

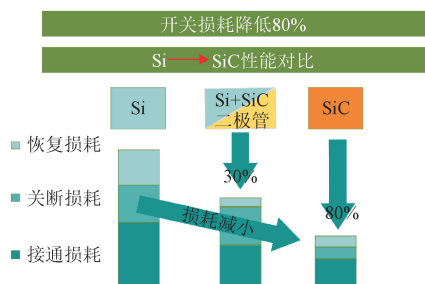


图 30 半导体厂商德国英飞凌功率器件不同工艺损耗对比
Fig. 30 Semiconductor manufacturer Germany Infineon power devices different process loss comparison

未来,新能源汽车驱动控制器将更多地采用 SiC 与 GaN 元件,朝着更加高频化高效化方向发展。

3 结 论

(1)不同类型的电机有不同的输出特性,目前的电动汽车厂家广泛使用的电机包括直流电机、交流异步电机、交流永磁同步伺服电动机、开关磁阻电机这 4 种类型。

(2)径向磁通交流永磁同步电动机在电动汽车中广泛使用,国内外不少学者及厂商研究了不同的构型用于电动汽车,其功率密度也是随着硅钢材料及永磁材料的发展逐步提高。发卡绕组技术同样为了提高功率密度而出现,但其带来的电机设计灵活性变差以及高频率下的较高的交流损耗等问题。YASA 结构的轴向磁通永磁同步电机由于更小的尺寸以及更大的功率密度逐渐被一些豪华轿车所采用。另外其模块化的定子齿也解决了传统轴向磁通

永磁同步电机加工难度大、成本高等难题,该电机已经成为新能源汽车未来主要的应用电机类型。

(3)交流异步感应电机没有使用永磁体所以耐振动、耐高温。如今国内不少汽车厂商也加大投入研发更高性能的感应电机,旨在降低整体的成本,提高电动汽车的整体性能,但其效率低、质量大、调速难度大,而定转子均要采用水冷技术及热管理技术是保证新能源汽车驱动电机高功率下长时间运行的重要保障,结构复杂,维护成本高。变极交流铜转子异步电机通过新的理论设计,可以在不同极对数下输出相同的功率以及具备较为接近的功率因数。具备低转子铜损耗,通过改变极对数就可获得不同的转速而使其调速范围更广,效率更高,在新能源汽车驱动电机中有较好的应用前景。

(4)电动汽车驱动电机的电压逐渐提高可达 800~1 000 V,这不仅为主驱动电机的设计最高转速带来技术保障,而且随着母线电压的不断提高,电机的转速设计会更高,电机本体尺寸减小,质量轻。另外相同功率下的电流将减小,损耗更低,效率将更高,碳纤维包裹技术、高强度高磁导率硅钢片技术为电机设计更高转速提供重要保障,所以高电压、高速化成为未来新能源汽车主驱动电机的发展趋势。但是高转速带来的高频率以及振动效应等需要从材料强度、结构优化等方面降低电机的 NVH,从而提高驾驶与乘坐的舒适性。

(5)现代新能源汽车电机驱动器中整流、逆变以及 DC/DC 电源的传统的硅基 IGBT 半导体朝着耐高温、耐高压、高开关频率、低损耗的 SiC 技术方向发展。GaN 则适合于低压高频应用场合,所以在汽车中的一些高功率的 DC/DC 转换器上广泛应用。

(6)未来的新能源汽车主驱动电机应朝着供电电压高压化、高转速、低 NVH、高功率密度、材料更高磁导更高强度、电机减速机及驱动控制一体化、电机转速传感的低成本高可靠以及驱动控制器高频高效化的方向发展。

参考文献:

- [1] YU Ke, ZHANG Weimei, ZHANG Yalian. Carbon performance evaluation of automobile manufacturing industry in green supply chain [C]//2019 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 405-408.
- [2] CONLON B, ANWAR M, SEVEL K, et al. Switch-

- able 400 V/800 V high voltage architecture for Ultium battery electric trucks [C]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2022; 1-6.
- [3] LÓPEZ I, IBARRA E, MATALLANA A, et al. Next generation electric drives for HEV/EV propulsion systems: technology, trends and challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 114: 109336.
- [4] 郭建龙, 陈世元. 电动汽车驱动用电机的选择 [J]. 汽车电器, 2007(1): 9-12.
- GUO Jianlong, CHEN Shiyuan. How to choose driving motor for electric vehicle [J]. Auto Electric Parts, 2007(1): 9-12.
- [5] 阎治安, 崔新艺, 苏少平. 电机学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
- [6] XIAO Y, NEMEC M, BORLE L J, et al. Regenerative braking of series-wound brushed DC electric motors for electric vehicles [C]//2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2012; 1657-1662.
- [7] 凯驰电动车. 2 座高尔夫车 [EB/OL]. [2024-08-08]. <https://www.kcdd.cn/h-pd-117.html>.
- [8] 时维国, 桑尧尧. 空间矢量调制的 PMSM 变磁链直接转矩控制 [J]. 大连交通大学学报, 2019, 40(6): 98-103.
- SHI Weiguo, SANG Yaoyao. Direct torque control with variable of PMSM magnetic flux based on space vector modulation [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2019, 40(6): 98-103.
- [9] SpaceXSF. 特斯拉 Model S Plaid 电机拆解内部结构详细分析: PART 2 [EB/OL]. (2022-10-21) [2024-08-20]. https://www.bilibili.com/video/BV14d4y127nd/?vd_source=9d77e150138e0e355a5de5506a9ff05a.
- [10] WILEY C, TALEBI D, SANKARRAMAN S V, et al. Design of a carbon fiber rotor in a dual rotor axial flux motor for electric aircraft [C]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2022; 1-8.
- [11] HUFFMAN J P. Dossier: 2022 Tesla Model S Plaid [J]. Road and Track, 2022, 72(9): 128-136.
- [12] Tomiefox. 大众 ID.4 电机拆解 [EB/OL]. (2021-08-15) [2024-08-26]. https://www.bilibili.com/video/BV1bo4y1U72Z/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&-vd_source=9d77e150138e0e355a5de5506a9ff05a.
- [13] LIU Chuan, XU Zeyuan, GERADA D, et al. Experimental investigation on oil spray cooling with hairpin windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7343-7353.
- [14] BERARDI G, NATEGH S, BIANCHI N, et al. A comparison between random and hairpin winding in e-mobility applications [C]//The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2020; 815-820.
- [15] DONG Tenghui, ZHU Chong, ZHANG Xi, et al. Hybrid-strand winding topology with improved power density in automotive electric machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(6): 6036-6045.
- [16] 梁艳萍, 柳杨, 王晨光. 大型水轮发电机定子绕组新型组合换位方法分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3092-3100.
- LIANG Yanping, LIU Yang, WANG Chenguang. Analysis on a new method of combination transposition for the stator windings of the hydro-generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3092-3100.
- [17] LIU Jia, LIANG Yanping, YANG Peipei. Research on novel flat wire transposed winding of PMSM for electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 771-781.
- [18] JU Xiaowei, CHENG Yuan, DU Bochao, et al. AC loss analysis and measurement of a hybrid transposed hairpin winding for EV traction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3525-3536.
- [19] SARLIOGLU B, MORRIS C T, HAN Di, et al. Driving toward accessibility: a review of technological improvements for electric machines, power electronics, and batteries for electric and hybrid vehicles [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2017, 23(1): 14-25.
- [20] SANO S, YASHIRO T, TAKIZAWA K, et al. Development of new motor for compact-class hybrid vehicles [J]. World Electric Vehicle Journal, 2016, 8(2): 443-449.
- [21] CUI Wei, REN Lingchen, ZHOU Jincheng, et al. A new IPMSM with hybrid rotor structure for electrical vehicle with reduced magnet loss [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 1-6.
- [22] CHEN Hao, DEMERDASH N A O, EL-REFAIE A M, et al. Investigation of a 3D-magnetic flux PMSM with high torque density for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 1442-1454.
- [23] HAN Chunlei, ZHU Xiaoyong, FAN Deyang, et al. Multilevel and multi-objective optimization and design

- of double V-shaped in-wheel permanent magnet motor for high torque density and quality [C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 3227-3231.
- [24] 天马行空. 工程师科普系列: 比亚迪海狮 07EV 三电技术解读 [EB/OL]. (2024-05-11) [2024-08-28]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/697245825>.
- [25] 汽车之家 Live. 安心驾享 红旗 EH7 上市发布会 [EB/OL]. (2024-03-20) [2024-08-30]. <https://live.autohome.com.cn/live/902411/>.
- [26] 智能制造 IM. 小米汽车核心技术: 高速电机技术 [EB/OL]. (2024-06-05) [2024-08-30]. <https://www.eet-china.com/mp/a320331.html>.
- [27] DLALA E. Hybrid rotor assembly; US 2020/0412190 A1 [P]. 2020-12-31.
- [28] DLALA E, BISKUP R J, MOSELEY D, et al. Motor cooling system utilizing axial cooling channels; US 10, 128,701 B2 [P]. 2018-11-13.
- [29] 保时捷(中国)汽车销售有限公司. 高电压: 详解保时捷电驱动系统 [EB/OL]. (2021-09-22) [2024-09-01]. <https://newsroom.porsche.com/zh/2021/technology/cn-porsche-electric-motors-taycan-high-voltage-christophorus-398-25829.html>.
- [30] ST-JACQUES B B, SHI Ruisheng, PILLAY P. An enhanced PMSM cooling design for traction of an electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3845-3854.
- [31] 西安交通大学. 一种四电机与 WW 轮系组合式轮毂电机装置: CN 202411571780.5 [P]. 2024-12-17.
- [32] 冯佳. 车用定子无磁轭模块化轴向磁通轮毂电机设计与优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [33] JIA Lun, LIN Mingyao, LIN Keman, et al. Design and analysis of axial-flux modular spoke-type permanent magnet machines with segmented stators for traction applications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 4290-4301.
- [34] ZHANG Guangquan, TANG Lei, PENG Liang. Cooling system, stator assembly, and axial magnetic field motor; US 2022/0115924 A1 [P]. 2022-04-14.
- [35] GENG Weiwei, WANG Yu, WANG Jing, et al. Comparative study of yokeless stator axial-flux PM machines having fractional slot concentrated and integral slot distributed windings for electric vehicle traction applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 155-166.
- [36] HILLMAN T, PHILLIPS R, WOOLMER T. Axial flux machine shoe optimisation; US 2022/0239210 A1 [P]. 2022-07-28.
- [37] YASA 有限公司. 电机过模制构造: CN 201180050741.5 [P]. 2016-08-03.
- [38] 电动生活. 法拉利首款 2.9T V6 插混超跑 296GTB 亮点及技术解析 [EB/OL]. (2021-10-13) [2021-10-13]. <https://news.qq.com/rain/a/20211013A031EI00>.
- [39] YASA Limited. The Lamborghini Temerario: twin-turbo V8 hybrid powertrain [EB/OL]. [2024-09-09]. <https://yasa.com/applications/lamborghini-temerario/>.
- [40] ANVARI B, GUEDES-PINTO P, LEE R A. Printed circuit board stator axial field rotary energy device with ferromagnetic yoke; US 2023/0352999 A1 [P]. 2023-11-02.
- [41] SCHULER B L, LEE R, RASMUSSEN J. System and apparatus for axial field rotary energy device; US 11,177,726 B2 [P]. 2021-11-16.
- [42] LEIJNEN P. Stator for an axial flux machine; US 2022/0302773 A1 [P]. 2022-09-22.
- [43] HENDRIK V, PETER S, PETER L. Stator for an axial flux machine and method for producing the same; EP 3 485 558 B1 [P]. 2019-12-18.
- [44] CHANG Jiujian, FAN Yanen, WU Jinglai, et al. A yokeless and segmented armature axial flux machine with novel cooling system for In-Wheel traction applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4131-4140.
- [45] ZHANG B, SEIDLER T, DIERKEN R, et al. Development of a yokeless and segmented armature axial flux machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2062-2071.
- [46] DI GERLANDO A, FOGLIA G M, IACCHETTI M F, et al. Parasitic currents in stray paths of Some topologies of YASA AFPM machines: trend with machine size [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2746-2756.
- [47] BHAUSAHEB R M. Speed control of SRM for hybrid electric vehicle using artificial intelligence [C]//2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-5.
- [48] AJIE I K, FURQANI J, FADILLAH A. Optimization of switched reluctance motor for two wheels electric vehicle [C]//2023 International Conference on Electrical Engineering and Informatics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 1-6.
- [49] Turntide. Driving the future [EB/OL]. [2024-09-18]. <https://turntide.com/industries/light-vehicles>.
- [50] YU Fengyuan, CHEN Hao, YAN Wenju, 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.
- [51] ALI N, NARIMANI M. Fault-tolerant SRM drives; a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(8): 10261-10275.
- [52] SUN Xiaodong, WAN Bingkuan, LEI Gang, et al. Multiobjective and multiphysics design optimization of a switched reluctance motor for electric vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3294-3304.
- [53] LIU X, ZHU Z Q. Stator/rotor pole combinations and winding configurations of variable flux reluctance machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 3675-3684.
- [54] ZHANG Wentao, WU Zhongze, HUA Wei, et al. Reduction of open-circuit DC winding induced voltage and torque pulsation in the wound field switched flux machine by stator axial pairing of tooth tips [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 1976-1990.
- [55] WU Z Z, ZHU Z Q, WANG C, et al. Reduction of Open-circuit DC-winding-induced voltage in wound field switched flux machines by skewing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1715-1726.
- [56] RAUCH S E, JOHNSON L J. Design principles of Flux-Switch alternators [includes discussion] [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers: Part III Power Apparatus and Systems, 1955, 74(3): 1261-1268.
- [57] CHEN J T, ZHU Z Q, IWASAKI S, et al. Influence of slot opening on optimal stator and rotor pole combination and electromagnetic performance of Switched-Flux PM brushless AC machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1681-1691.
- [58] CHEN J T, ZHU Z Q, IWASAKI S, et al. A novel E-core switched-flux PM brushless AC machine [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1273-1282.
- [59] ZHU Z Q, CHEN J T, PANG Y, et al. Analysis of a novel multi-tooth flux-switching PM brushless AC machine for high torque direct-drive applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4313-4316.
- [60] HUA Wei, CHENG Ming, ZHANG Gan. A novel hybrid excitation flux-switching motor for hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4728-4731.
- [61] FEI Weizhong, LUK P C K, SHEN Jianxin, et al. A novel permanent-magnet flux switching machine with an outer-rotor configuration for in-wheel light traction applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(5): 1496-1506.
- [62] PU Yun, XIANG Zixuan, JIANG Min, et al. Investigation on electromagnetic torque of a flux-switching permanent magnet motor from perspective of flux density harmonic reduction ratio [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 1-6.
- [63] XIANG Zixuan, ZHU Xiaoyong, QUAN Li, et al. Multilevel design optimization and operation of a brushless double mechanical port flux-switching permanent-magnet motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6042-6054.
- [64] CAO Ruiwu, MI C, CHENG Ming. Quantitative comparison of flux-switching permanent-magnet motors with interior permanent magnet motor for EV, HEV, and PHEV applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(8): 2374-2384.
- [65] ZHAO Guishu, HUA Wei, QI Ji. Comparative study of wound-field flux-switching machines and switched reluctance machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2581-2591.
- [66] 苏鹏. 电动汽车用模块化转子永磁型磁通切换电机分析与设计 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [67] LYONS D, STRAUBEL J B, SHAHOIAN E, et al. Rotor design for an electric motor: US 2013/0069476 A1 [P]. 2013-03-21.
- [68] Lea1251. 奥迪 e-Tron 电机展示 高清无码 [EB/OL]. (2020-07-02) [2024-10-10]. https://www.bilibili.com/video/BV1Uz411e7Cr/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=9d77e150138e0e355a5de5506a9ff05a.
- [69] 蔚来_NIO. 直播回放: 蔚来碳化硅电机全网首拆 [EB/OL]. (2022-07-20) [2024-10-19]. https://www.bilibili.com/video/BV1ZW4y1m7gx/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=9d77e150138e0e355a5de5506a9ff05a.
- [70] EDT 电驱时代. 国内外电驱汇总: (1) 奔驰 EQC/宝马 IX3/奥迪 etron [EB/OL]. (2021-02-12) [2024-10-19]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1691502647615703778>.
- [71] CHOUREY S, BOSE S, SUNDARAM S. An induction motor loss optimization approach using JMAG and MATLAB for an electric vehicle [C]//2022 Interdisci-

- plinary Research in Technology and Management, Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2022; 1-5.
- [72] POPESCU M, DI LEONARDO L, FABRI G, et al. Design of induction motors with flat wires and copper rotor for E-vehicles traction system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3889-3900.
- [73] UMESH B S, SIVAKUMAR K. Multilevel inverter scheme for performance improvement of pole-phase-modulated multiphase induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2036-2043.
- [74] REZAZADEH G, TAHAMI F, CAPOLINO G A, et al. Improved design of an outer rotor six-phase induction motor with variable turn pseudo-concentrated windings [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(2): 1020-1029.
- [75] HULYY M. Comparison of the energy efficiency of induction and PMSM electric drives with a 7.5 kW output power for ventilation systems [C]//2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2023; 1-4.
- [76] THOMAS R, GARBUIO L, GERBAUD L, et al. Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor [C]//2020 International Conference on Electrical Machines. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2020; 495-501.
- [77] ANWAR M, BAVILI A, BADAWI R, et al. High voltage DC bus architecture for ultium battery electric vehicles [C]//2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2022; 1-6.
- [78] OZCELIK N G, ERGENE L T. An improved method for reduction of voltage distortion in IPM EV motors for a better flux weakening capability [J]. IEEE Access, 2024, 12: 20125-20137.
- [79] 宇六合. 比亚迪 3 万转电机总成发布, 量产最快电机! [EB/OL]. [2024-12-20]. https://www.bilibili.com/video/BV1iSXXYEEuF/?spm_id_from=333.1391.0.0&vd_source=9d77e150138e0e355a5de5506a9ff05a.
- [80] 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.
- [81] 程朝阳, 钟柏林, 倪正轩, 等. 新能源汽车驱动电机用高强无取向硅钢力、磁性能调控研究进展 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1482-1492.
- CHENG Zhaoyang, ZHONG Bailin, NI Zhengxuan, et al. Research progress on simultaneous control of mechanical and magnetic properties of high-strength non-oriented silicon steel for new energy vehicle driving motors [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1482-1492.
- [82] CAO Yangfeng, ZHAO Shengdun. Control and design of pole-changing motor driver [C]//2023 IEEE 9th International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2023; 335-340.
- [83] 曹杨峰, 刘大洲, 赵升吨, 等. 变极电机与双联行星减速组合式电动汽车驱动传动新原理及动态特性 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(4): 27-39.
- CAO Yangfeng, LIU Dazhou, ZHAO Shengdun, et al. New principle and dynamic characteristics of electric vehicles drive transmission combining variable-pole motor and duplex planetary reducer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(4): 27-39.
- [84] GIERAS J F, WANG Chong, LAI J C. Noise of poly-phase electric motors [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [85] DENG Wenzhe, ZUO Shuguang. Electromagnetic vibration and noise of the permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles: an overview [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 59-70.
- [86] 王晓远, 贺晓钰, 高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919-4926.
- WANG Xiaoyuan, HE Xiaoyu, GAO Peng. Research on electromagnetic vibration and noise reduction method of V type magnet rotor permanent magnet motor electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4919-4926.
- [87] 陈致初, 史俊旭, 周洋, 等. 车用永磁同步电机的电磁噪声优化研究 [J]. 微电机, 2023, 56(10): 77-82.
- CHEN Zhichu, SHI Junxu, ZHOU Yang, et al. Research on the NVH optimization of vehicle IPM motor [J]. Micromotors, 2023, 56(10): 77-82.
- [88] 汇川联合动力. 定子一体化注塑技术可以解决哪些行业难题? [EB/OL]. [2024-12-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/n-OY6d8-w1wBPxsoY3LNQQ>.
- [89] HAIYAN Zhang, DAWEI Chen, YU Liu. Research on key influencing factors of endurance mileage of battery electric vehicle [C]//2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2022; 235-239.
- [90] 刘阳, 徐党委, 王海燕, 等. 新能源汽车驱动电机用无取向硅钢现状与发展趋势 [J]. 河南冶金, 2024, 32

- (6): 11-13.
- LIU Yang, XU Dangwei, WANG Haiyan, et al. Status quo and development trend of non-oriented silicon steel for new energy vehicle drive motors [J]. *Henan Metallurgy*, 2024, 32(6): 11-13.
- [91] 朱诚意, 鲍远凯, 汪勇, 等. 新能源汽车驱动电机用无取向硅钢应用现状和性能调控研究进展 [J]. *材料导报*, 2021, 35(23): 23089-23096.
- ZHU Chengyi, BAO Yuankai, WANG Yong, et al. Research progress on application status and property control of non-oriented silicon steel for traction motor of new energy vehicles [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(23): 23089-23096.
- [92] UENO S, ENOKIZONO M, MORI Yuji, et al. Vector magnetic characteristics of ultra-thin electrical steel sheet for development of high-efficiency high-speed motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(11): 1-4.
- [93] 姚可夫. 高效节能材料非晶软磁合金及其在电力和电机中的应用研究 [J]. *中国科技成果*, 2024, 25(7): 4-7.
- YAO Kefu. Research on high efficiency and energy saving materials amorphous soft magnetic alloy and its application in electric power and motor [J]. *China Science and Technology Achievements*, 2024, 25(7): 4-7.
- [94] 赵元胜, 唐德佳, 潘卫东, 等. 新材料对外转子永磁同步电机输出特性影响分析 [J]. *微特电机*, 2021(12): 29-34.
- ZHAO Yuansheng, TANG Dejia, PAN Weidong, et al. Analysis of the influence of new materials on the output characteristic of permanent magnet synchronous motor with external rotor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2021(12): 29-34.
- [95] 颜昌昊, 樊庆林, 马德稷, 等. 不同转速永磁同步电机非晶合金和硅钢选材分析 [J]. *电工钢*, 2024, 6(1): 52-58.
- YAN Changhao, FAN Qinglin, MA Deji, et al. Analysis of material selection of amorphous alloy and silicon steel for PMSM at different speeds [J]. *Electrical Steel*, 2024, 6(1): 52-58.
- [96] 采埃孚. 采埃孚 eDrive: 超高效电动汽车驱动的系统化系统 [EB/OL]. [2024-12-20]. <https://www.zf.com/products/zh/cars/edrive/edrive.html>.
- [97] 燃擎. 从八合一到十二合一, 比亚迪电驱集成度的上限在哪里? [EB/OL]. (2024-06-01) [2024-12-20]. <https://news.qq.com/rain/a/20240601A07HVVU00>.
- [98] Infineon. CoolSiC™: why SiC? [EB/OL]. [2024-12-20]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CoolSiC-Why-SiC-ProductPresentation-v04_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c8e7ead30018e8350189d1645&da=t.
- [99] ZHAO Wenkai. The application status of the third generation of semiconductor materials in the field of electric power [J]. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, 53: 194-198.
- (编辑 刘杨 陶晴)