

车用驱动电机扁线绕组关键问题研究综述

鞠孝伟¹, 张凤阁¹, 程远², 刘光伟¹, 崔淑梅²

- (1. 特种电机与高压电器教育部重点实验室(沈阳工业大学), 辽宁省 沈阳市 110870;
2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Overview of Key Issues of Flat Wire Winding of Traction Motor for Electric Vehicles

JU Xiaowei¹, ZHANG Fengge¹, CHENG Yuan², LIU Guangwei¹, CUI Shumei²

- (1. Key Laboratory of Special Electric Machines and High Voltage Apparatus of Ministry of Education (Shenyang University of Technology), Shenyang 110870, Liaoning Province, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Flat wire winding has emerged as a leading winding form for traction motors in electric vehicles (EVs) owing to its advantages such as high slot fill factor, good heat transfer performance, and low vibration and noise. However, as electric drive systems progress towards higher frequencies and voltages, flat wire winding encounters many challenges. This paper summarizes the status of flat wire winding from the aspects of structure, AC loss, thermal management, cooling, insulation and manufacturing technology. First, the topology and design principle are introduced, the mechanisms of AC loss are expounded, and the calculation model and suppression method are summarized. Subsequently, the heat distribution of flat wire winding motor is given, and different cooling schemes are compared. Furthermore, based on the research status of insulation problem, a high reliability design method for flat wire winding considering the effect of thermal and voltage stress coupling is proposed. Finally, the next generation of flat wire winding manufacturing technology including the potential integration of 3D printing is prospected, and concluded by outlining future development trends of flat wire winding.

KEY WORDS: flat wire winding; AC loss; cooling design; winding insulation; 3D printing; development trends

摘要: 扁线绕组具有槽满率高、导热性能好和振动噪声低等优点, 目前已成为电动汽车驱动电机主流绕组形式之一。然而, 随着电动汽车用电驱动系统高频高压化发展, 扁线绕组也面临诸多挑战。该文从扁线绕组结构、交流损耗、热和冷却、绝缘和制造工艺等方面, 综述电动汽车驱动电机扁线绕

组的国内外研究现状。首先, 介绍现有扁线绕组拓扑结构及其设计原则, 阐明扁线绕组交流损耗产生机理, 在此基础上, 综述交流损耗计算模型和抑制方法; 其次, 给出扁线绕组电机的热分布特点, 并对不同冷却方案进行对比; 然后, 基于扁线绕组绝缘问题的研究现状, 提出考虑电热应力耦合作用下的扁线绕组高可靠设计方法; 最后, 结合绕组 3D 打印制造工艺研究现状, 对下一代扁线绕组制造技术进行展望, 并指出未来发展方向。

关键词: 扁线绕组; 交流损耗; 冷却设计; 绕组绝缘; 3D 打印; 发展趋势

0 引言

电动汽车已成为实现新能源发展和应用的重要技术载体, 大力发展电动汽车以保障能源安全和早日实现双碳目标已成为国际共识^[1], 作为电动汽车核心动力源的驱动电机需要满足高功率密度、高效率、高可靠性和轻量化的设计要求。我国在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》^[2]中提出突破新能源汽车高效驱动电机关键技术, 推动汽车产业高端化、智能化和绿色化发展。美国能源部 2025 计划指出: 计划到 2025 年, 将驱动电机的功率密度从 2020 年的 1.6 kW/kg 提升至 5.7 kW/kg^[3]。由此可见, 发展高性能驱动电机已成为新能源电动汽车的重点关注方向, 对国民经济发展和保护环境具有重要意义。

近年来, 扁线绕组以其高槽满率、良好的导热性能和低振动噪声等优点在电动汽车驱动电机中得到越来越广泛的应用^[4]。与此同时, 为了提高功

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作研究项目(51920105011); 辽宁省自然科学基金项目(2021-YQ-09)。

Key International Cooperation of National Natural Science Foundation of China (51920105011); Natural Science Foundation of Liaoning Province (2021-YQ-09).

率密度,驱动电机转速不断增加,我国《节能与新能源汽车技术路线图2.0》^[5]中指出的2025年乘用车驱动电机最高转速将突破18000 r/min,目前,美国Lucid Air驱动电机的最高转速已达20000 r/min,我国比亚迪易四方平台电机最高转速达到了20500 r/min。“十四五”新能源汽车驱动系统规划目标指出:至2035年,驱动电机峰值转速将达到25000 r/min以上,从而使得车用驱动电机进一步向轻量化方向迈进。然而,高速工况下,扁线绕组的交流损耗问题凸显。降低了电机效率的同时,靠近槽口导体的高损耗密度将导致绝缘局部温度过高,增加绝缘热应力水平。此外,为了解决电动汽车的里程焦虑问题,实现快速充电,电驱动系统母线电压等级不断提高,由600 V提升至800 V,如华为Drive ONE即采用了800 V电压平台。目前已有车企开始规划900 V以上电压平台,从充电侧来看,当电压提升至1000 V时,可望实现5 min快速充电。因此,基于耐高温高压的第三代宽禁带半导体碳化硅(SiC)器件的控制器逐渐成为车用电驱动系统主流技术方案之一。母线电压等级的提高^[6]和SiC器件较短的开关上升时间^[7](一般小于50 ns)使得电机激励具有高电压变化率(dv/dt)的特点,导致电机绕组将承受更大电压应力作用^[8-9],在电-热应力双重作用下,绝缘安全面临较大威胁^[10]。

针对这些问题,国内外学者从绕组拓扑结构优化、新型冷却技术、新型材料和制造工艺等方面进行了广泛的研究,提出了如不等面积扁线绕组、混合换位扁线绕组、端部优化X-pin绕组、免焊接连续波绕组等新型拓扑结构,开展了先进油冷、槽内直冷和复合式分布冷却等相关技术研究,还开发了耐高温、耐电晕或耐变速器油(ATF油)等绝缘材料。此外,专家学者们还提出了基于3D打印技术的绕组和冷却结构智能制造工艺等。这些新材料、新技术和新工艺的应用为下一代高功率密度高可靠扁线绕组的研发带来了新的灵感和更大的设计空间。

此外,扁线绕组的研究集合了诸多关键基础科学问题,如高频供电下扁线绕组交流损耗问题^[11-14]、扁线绕组匝间电压分布不均问题^[15-17]、电-热应力耦合作用下扁线绕组的匝间绝缘初始放电问题^[18-20]等。目前,对于电动汽车驱动电机扁线绕组关键问题的整体发展情况还没有比较全面的总结和归纳,研究内容也呈现碎片化和多学科交叉属性。为此,本文将对扁线绕组各方面的研究现状进

行系统梳理,总结扁线绕组电机相关的关键技术,并展望其未来发展方向。

1 扁线绕组拓扑结构与分类

1.1 扁线绕组结构与分类

按结构不同,电机扁线绕组一般分为叠绕组^[21]、Hair-pin^[22]、I-pin、X-pin、连续波绕组^[23]等5种形式。不同形式扁线绕组的线圈形状、焊接结构以及定子嵌入方式如表1所示。5种绕组在装配工艺上有所区别,其中叠绕组通常用在大型发电机中,而Hair-pin是目前最为常见的扁线绕组形式,因形如“发卡”,又被称为“发卡绕组”,于2006年由蔡蔚提出^[4],并首次应用于通用雪佛兰电动汽车中。目前其应用最为广泛,且制造工艺更加成熟,如丰田Prius2017、Tesla Model Y、BWM i7等车型都配备了该种绕组形式,现有成型和焊接设备满足其批量化制造需求。Hair-pin绕组与其他形式扁线绕组在槽内的结构无异,仅因为端部焊接工艺的不同而造成端部长度存在差异。不同“pin式”扁线绕组通常将一匝线圈沿轴向插入槽内,然后在端部进行换位和焊接,因此需要大量焊点保持线圈间的电气连接。I-pin/X-pin绕组由于需要在两端进行焊接,焊点数量约是Hair-pin绕组的两倍。Hair-pin和I-pin均采用表1所示的直线延伸段焊接工艺,导致端部长度较长。I-pin绕组由于不存在成型端的绕组应力回弹问题,因此槽内导体间隙更小,提升了槽满率。根据联合电子发布的数据,其研发的Hair-pin绕组槽满率为69%,I-pin绕组的槽满率可达到74%,但是I-pin绕组的双端焊接结构导致其端部较长。X-pin是I-pin绕组的升级方案,通过优化端部线型,缩短了端部长度,联合电子研发X-pin相比于I-pin绕组端部长度缩短了27 mm,其端部焊接结构如表1所示,目前已应用于广汽埃安的驱动电机中。连续波绕组在嵌入定子前就已成型,几乎消除了焊点,但需要沿径向嵌入槽内,定子铁心需采用开口槽设计,齿槽转矩较大^[24],且绕组自动化成型装置较为复杂,Lucid Air驱动电机即采用该种绕组形式。

总体而言,目前车用驱动电机多采用Hair-pin绕组,叠绕组和连续波绕组驱动电机应用案例相对较少。与上述3种扁线绕组相比,I-pin和X-pin绕组具有更高的槽满率优势,但是仍面临着多焊点导致工艺复杂、自动化成型和焊接设备昂贵等问题,

表 1 不同结构扁线绕组优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different structures of flat wire winding

绕组类型	叠绕组	Hair-pin	I-pin	X-pin	连续波绕组
槽满率	低	较高	高	高	较高
焊点数	2mp	QL/2	QL	QL	0
槽开口	不限	不限	不限	不限	全开口
焊接端长	长	长	中	短	短
线圈形状					
焊接结构					
嵌入方式	槽口径向压入	端部轴向插入	端部轴向插入	端部轴向插入	槽口径向压入
典型应用	本田 iMMd	丰田 Prius2017、 Tesla Model Y、BWM i7	博世、联合电子	联合电子、广汽埃安	博格华纳、Lucid Air

注： p 为电机极对数； m 为电机相数； Q 为槽数； L 为导体层数。

而且焊接过程容易导致绝缘碎屑进入冷却油(ATF油)中,从而威胁齿轮箱可靠性。因此,“pin式”扁线绕组依然存在较多工艺和技术难点,在这方面,无焊点连续波绕组形式更具优势。

1.2 扁线绕组层间换位设计原则

扁线绕组导体截面较大,受到高频涡流效应和电枢反应影响,各层和不同极相槽内导体电流密度分布差异较大,导致导体阻抗不同。为了避免支路间环流,扁线绕组需满足如下换位原则^[25-26]: 1) 当并联支路数 $a=1$ 时,需满足一个支路遍历每一个极相槽内的每一层导体; 2) 当并联支路数 $a>1$ 且每极每相槽数 $q>1$ 时,在满足条件 1) 的基础上,需要同时满足各支路导体数相同; 3) 保持绕组端部长度尽可能相同,尽量减少不等跨距绕组数量。现有扁线绕组电机方案一般为分布式绕组结构, q 通常为 2 或 3, q 越大,反电势正弦度越好, Tesla Model 系列即采用该种极槽方案(6 极 54 槽),但是绕组端部长度增加,嵌线难度增大。而丰田 Prius 系列和 BWM i 系列等采用的是 $q=2$ 的方案。图 1 为一台 4 极 24 槽 6 层扁线绕组不同并联支路数时的层间和槽间换位连接图。

由此可见,扁线绕组是一种采用复杂换位结构

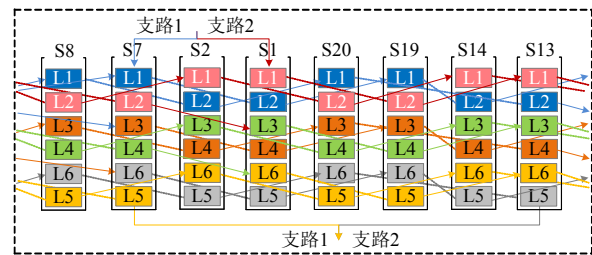
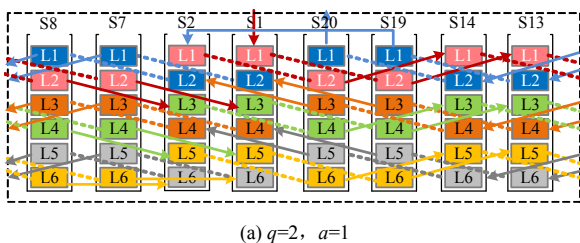


图 1 4 极 24 槽 6 层扁线绕组一相换位连接示意图

Fig. 1 Connection schematic of one phase flat wire winding with 4 poles, 24 slots and 6 layers

的绕组形式,匝间导体需要结合端部焊接和成型技术组成连续线圈。通常支路间需要采用母排(BusBar)插接方式实现电气连接^[27],如图 2 所示,BusBar 结构需满足高强度、耐高温和高压的设计需求。

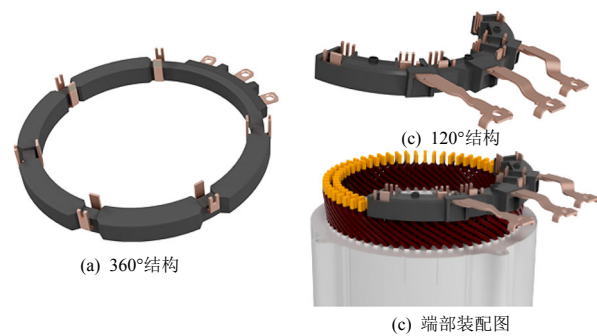


图 2 扁线电机母排结构

Fig. 2 Structure of busbar of flat wire winding

1.3 扁线绕组电机与圆线绕组电机设计对比

从设计角度看,圆线绕组通常采用平行齿,而扁线绕组通常采用平行槽。扁线绕组导体间隙较小,因此槽满率较高,纯铜槽满率可达 0.6 以上,而传统圆线绕组一般在 0.45 以下。这种结构上的差

异也衍生出适用它们各自特点的不同冷却方案,如采用平行齿定子的圆线绕组电机,槽内存在空隙,便于采用槽内直接冷却方式,热源位置也处于槽内中间位置。而扁线绕组采用平行槽设计,此时定子齿靠近气隙侧宽度较窄,而靠近槽底侧宽度较宽,这为定子开油路设计提供了空间,如美国 Lucid Air 即采用定子齿部开油路设计进行定子油冷。不同的冷却方式也使得圆线绕组和扁线绕组的额定电流密度选取范围有较大差异,圆线绕组导体间存在绝缘和气隙,散热效果不如扁线绕组。因此在电机电磁设计阶段,如果采用机壳水冷方案,电机绕组电流密度取值约为 $7\sim 20\text{ A/mm}^2$; 如果采用直接冷却,绕组电流密度取值范围可达 $10\sim 30\text{ A/mm}^2$ [28]。从冷却方案角度,扁线绕组由于可选用冷却效率更高的直接油冷方案,因此其电流密度选取值更大,如表 2 所示。但因为高频涡流效应的存在,高速区扁线绕组的电流密度分布十分不均匀,可能使得某些区域(靠近槽口)电流密度最大值超过设计值,从而产生局部热点。

表 2 圆线和扁线设计对比

Table 2 Comparison of design between round wire winding and flat wire winding

线型	圆线绕组	扁线绕组
定子槽型	平行齿	平行槽
槽满率	0.35~0.45	0.6~0.7
冷却方式	机壳水冷	机壳水冷/端部油冷
电流密度/(A/mm ²)	7~20	10~30
绕组常用形式	叠绕组	波绕组
匝数	多	少

此外,车用驱动电机通常采用整数槽分布式绕组结构,圆线绕组一般采用叠绕组形式,因为圆线绕组的线径较细(一般在 1 mm 以下),绕组线圈较软,端部容易进行后期整形处理。而扁线绕组属于硬绕组,需要特殊成型设备完成端部换位和整形,因此,为了避免端部发生干涉,扁线绕组通常采用波绕组形式。圆线绕组匝数选取范围更大,可以选择多匝线圈,而扁线绕组匝数相对较少,目前常用的每槽导体数一般为 $4\sim 10$ 层,更多层数的扁线绕组由于工艺难度大、损耗抑制效果不明显等问题较少采用。这也导致扁线绕组电感值较多匝数圆线绕组更低,低电感也意味着在相同逆变器开关频率驱动下,绕组电流谐波更多,进而导致更大的谐波损耗[29],高频涡流损耗问题需要在扁线绕组电机设计阶段进行重点关注。

综上,因为扁线绕组各层和同极相下不同槽内导体损耗分布不均匀,基于低损耗的设计思想,为了避免支路间发生环流损耗,目前现有扁线绕组多采用层间换位和槽间换位拓扑结构。但是这种换位会导致匝间电压分布不均匀,且随着 SiC 逆变器的应用,高频高压激励下扁线绕组的电压应力问题尚缺乏充分认识,如何设计出兼具低损耗和低电应力的扁线绕组换位拓扑是进一步提高扁线绕组电机效率和可靠性的关键问题。

2 扁线绕组交流损耗问题

2.1 扁线绕组损耗产生机理与影响因素

导体通入交变电流或处在交变磁场中时,会引起涡流效应,单根导体会产生集肤效应,而两根相邻的导体间会产生邻近效应。图 3 给出不同涡流效应下的扁线导体电流密度分布情况。

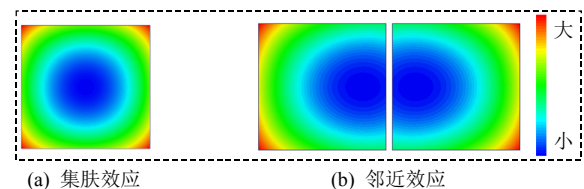


图 3 扁线导体中的涡流效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of eddy current effects in flat wire conductors

然而,实际电机中槽内漏磁场十分复杂,其中包含电枢磁场和转子磁场分量,常见绕组损耗解析计算模型通常忽略转子磁场的作用,损耗计算精度不高。图 4 为在相同幅值和频率电枢电流作用下有无转子磁场时导体电流密度分布情况。由图 4 可以发现,受转子永磁磁场的影响,槽口漏磁场中包含很大部分的径向分量,导致导体电流密度沿径向和切向分布都不均匀。研究发现,当槽口较大时,转子磁场作用产生的损耗甚至超过定子电枢磁场作用[30-31]。因此,转子磁场对扁线绕组交流损耗的影响不可忽略。

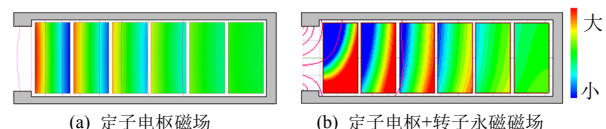


图 4 不同磁场作用下槽内导体电流密度分布

Fig. 4 Current density distribution of conductors in the slot under action of different magnetic field

2.2 扁线绕组交流损耗计算模型

现有绕组损耗计算方法包括解析法和有限元法。解析法按模型维度可分为 Dowell 一维模型[32-33]

和基于磁矢位方程的二维子域法^[34]。相比于 Dowell 模型，子域法考虑了开槽导致的槽口磁场畸变问题，具有更高的计算精度。然而，两种方法均忽略了转子磁场的影响，子域方法较难对内置式永磁同步电机进行解析计算。目前，车用驱动电机多采用高凸极率的永磁-磁阻式转子结构，导致以上两种方法均不适用。对此，有学者提出采用基于冻结磁导率技术的静磁场有限元-解析方法^[30,35]考虑内置式永磁转子对绕组损耗的影响。这种方法与有限元相比，可以保证较高精度，同时减小了计算时间。此外，利用该模型可以将电枢磁场和转子磁场作用损耗进行分离，以便深入剖析损耗产生机理和影响因素，指导扁线绕组的优化设计。

2.3 扁线绕组交流损耗抑制方法

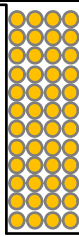

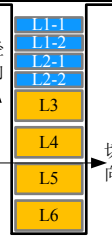


从拓扑结构角度看，目前扁线绕组交流损耗的抑制方法主要有：增加导体层数^[36-37]、导体远离槽口设计^[38-39]、分割绕组(不等面积绕组)^[40-41]、股间换位利兹扁线绕组^[42-43]、混合绕组^[30,44]等方案，如表 3 所示。目前扁线绕组层数可多达 10 层，如美国 Tesla 在 2019 年的 Model Y 系列车型中采用了 10 层扁线绕组，国内大连豪森于 2023 年突破了 10 层扁线绕组的量产能力^[45]，但是扁线绕组的多层化不利于槽满率的提升，而且会导致制造难度升级，工艺成本增加。采用增加层数和分割绕组方案，本质是减小了导体径向尺寸，这对切向漏磁场产生的交流损耗有抑制作用，但对径向漏磁场无效。远离槽口设计方案虽然使得导体规避了槽口漏磁场作用，但是牺牲了槽满率，不利于电机功率密度的提升。股间换位利兹扁线绕组对高频损耗抑制作用明显，但增加了工艺难度，股间绝缘的存在使得槽满率降

低。混合换位扁线绕组在兼顾较高槽满率的前提下，在槽口采用股间换位利兹扁线，而在其它层仍采用传统实心扁线，具有宽频域低损耗特点。但随着绕组拓扑复杂化，制造工艺难度增加，如何降低制造成本成为关键。表 3 给出驱动电机的 5 种主要绕组结构，在保持槽型尺寸和单层绕组外形尺寸不变的前提下，以 6 层(匝)导体为例：一为传统常规等截面扁线绕组；二为传统圆线绕组，其各层绕组股间存在换位，也称为利兹扁线；与这两种绕组相比，另外 3 种绕组为了规避槽口漏磁场作用，在靠近槽口两层采用分割和换位绕组结构，如 L1 层被分割为 L1-1 和 L1-2，主要分为径向、切向和径-切向 3 种形式，依次对应表中后 3 种绕组，因为矩形导体结构，不便于进行股间编织换位。因此，为了简化股间换位工艺，文献^[30]提出一种将槽口实心扁线替换为利兹扁线的利兹-实心变截面换位扁线绕组。对应绕组拓扑在单槽内 6 层导体的总损耗频变规律，如图 5(a)所示。其中，利兹扁线绕组在高频段损耗最低，在低频段损耗最高，而实心扁线绕组与之相反，采用径向或切向分割变截面换位扁线绕组的方案虽然可以抑制高频交流损耗，同时保持较低的低频损耗，但是其宽频域损耗抑制效果不如利兹-实心变截面换位扁线绕组，如图 5(b)所示，当工作频率为 1200 Hz 时，扁线绕组的交直流损耗比可达 10.2，而利兹-实心变截面换位扁线绕组的交直流损耗比仅为 2.12。如图 5(a)所示，其在 200 Hz 工作频率以上，损耗均显著低于实心扁线绕组，具有显著的宽频域低损耗优势。

综上，现有扁线绕组交流损耗抑制方案的技术特点是将槽口导体分割，并进行股间换位，本质上

表 3 不同扁线绕组方案优缺点对比

Table 3 Comparison of advantages and disadvantages of different flat wire winding schemes(Copyright © 2023, IEEE)

绕组类型	利兹扁线绕组	实心扁线绕组	径向分割变截面换位扁线绕组	切向分割变截面换位扁线绕组	利兹-实心变截面换位扁线绕组
结构					
槽满率/%	40.7	64	61.9	62.9	56.2
直/交流损耗	高/低	低/高	较低/较高	较低/较高	较低/较低
散热	差	优	良	良	良
电应力	难控	易控	易控	易控	较易控

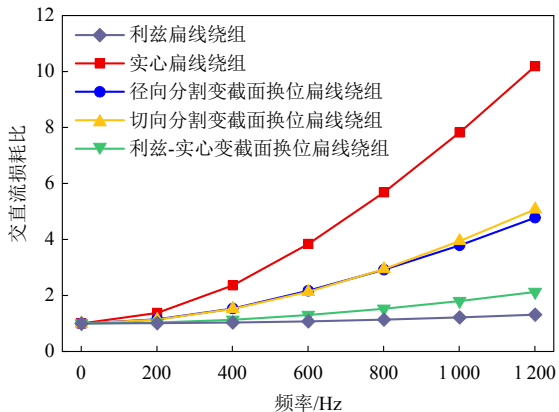
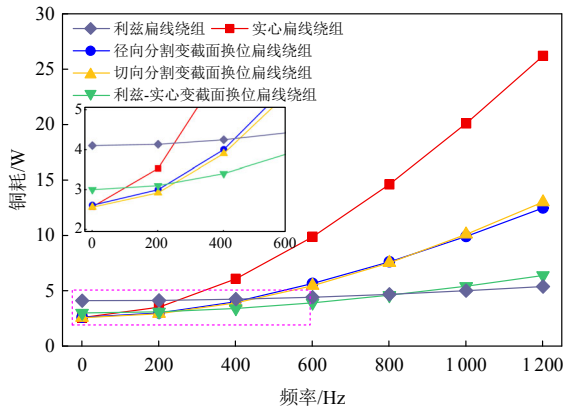


图5 不同扁线绕组方案铜损耗频变规律

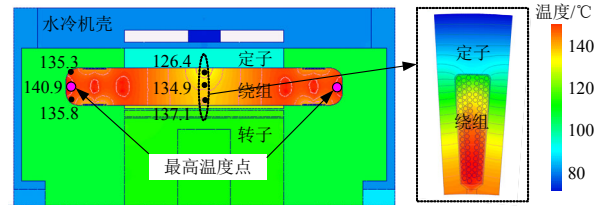
Fig. 5 Frequency variation of copper loss of different flat wire winding schemes(Copyright © 2023, IEEE)

是为了抑制靠近槽口的扁线绕组损耗，这样可以保证较高槽满率，实现宽频域低损耗设计，难点在于随着扁线绕组结构的复杂化，解决此类绕组的加工工艺问题成为其成功应用的关键。

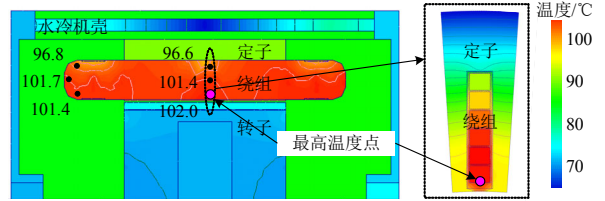
3 扁线绕组电机热和冷却问题

3.1 扁线绕组电机热分布特点

受散热条件限制，传统机壳水冷圆线绕组最高温度通常出现在绕组端部位置，如图6(a)所示。然而，扁线绕组在高频激励作用下，槽内导体损耗分布不均，靠近槽口导体损耗密度最大。此外，端部喷油冷却使得扁线绕组端部温度显著降低，因此，采用机壳水冷和端部油冷的扁线绕组电机槽内靠近槽口侧更易出现局部最高温度，如图6(b)所示。针对扁线绕组电机这一温度分布特点，一方面可通过主动损耗抑制技术^[40,46]，降低热源功率，进而降低槽内温度；另一方面，进行合理的冷却设计，加强对槽内绕组局部热点的冷却散热^[28,47-48]，也可以进一步提升绕组热负荷，增加电机功率密度^[49]。



(a) 机壳水冷圆线绕组电机



(b) 机壳水冷/端部油冷扁线绕组电机

图6 不同类型绕组电机轴向和槽内温度分布情况

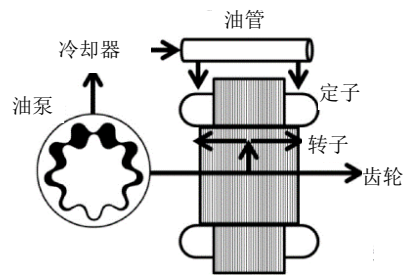
Fig. 6 Axial and in-slot temperature distribution of motors with different cooling types of winding

3.2 冷却设计

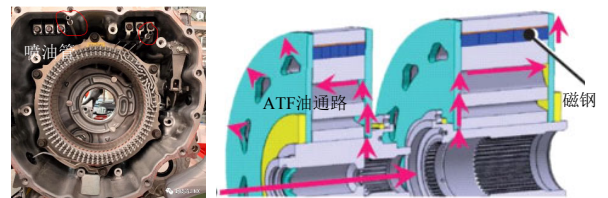
电动汽车驱动电机常用的冷却方案包括：机壳水冷、端部油冷、转子油冷和槽内直接冷却等技术方案，亦或是两种或多种冷却方案的组合。传统机壳水冷方案^[49-50]，机壳水路距离绕组热源较远，冷却效率不高。为了提升散热效率，扁线绕组端部油冷技术被提出和应用^[47,51]。

3.2.1 油冷方案

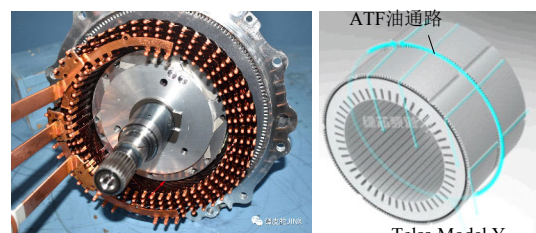
图7为几个车型驱动电机所采用的油冷方案示意图。其中，丰田 Prius 采用了端部油管喷油冷却



(a) 丰田 Prius



(b) 本田 iMMd



(c) Tesla Model Y

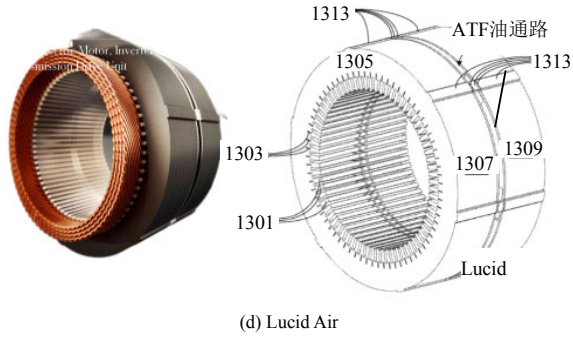


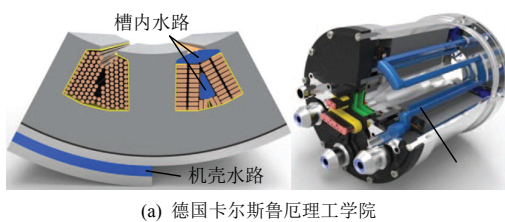
图 7 不同制造商的喷油冷却电机方案
 Fig. 7 Schemes of oil-cooling motor from several different manufacturers

方式，通过改变喷油速度和喷嘴数量实现冷却优化^[51-52]；本田 iMMd 采用转子甩油方案，通过空心轴将油液注入高速旋转转子，利用离心力将油液甩至绕组端部。Tesla 和 Lucid 均采用定子铁心开槽或开孔方案，通入 ATF 油对绕组端部进行冷却。我国比亚迪 DM-i、上汽智己 L1、华为 DriveONE 等驱动电机产品也都采用了油冷技术。然而，因为油冷电机通常利用齿轮箱油(ATF 油)进行冷却，ATF 油需要经过高精密齿轮实现驱动总成一体化冷却，对于冷却油品质量要求极高，而扁线绕组通常需要在端部进行焊接，在焊接过程中，高温烧蚀绕组易产生绝缘碎屑，进而污染油质，并进一步通过冷却系统带入齿轮箱内部，损伤齿轮机构，对其可靠性造成威胁。因此，绝缘材料与 ATF 油的兼容性也是需要研究的关键技术问题^[53-54]。此外，冷却油对高速转子的阻尼作用也更加明显，这是油冷电机需解决的又一技术难点。

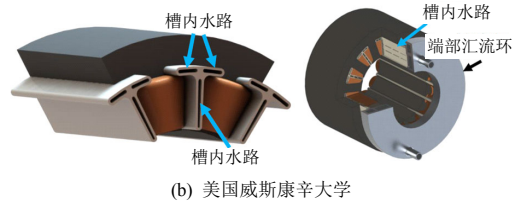
3.2.2 槽内直接冷却方案

随着驱动电机功率密度要求的提高，绕组电负荷需求也逐渐提升，加之损耗不均导致的温度分布不均问题，尤其对于扁线绕组槽内的局部热点问题，近年来，槽内直接冷却方案逐渐被提出^[55-58]。德国卡尔斯鲁厄理工学院和美国威斯康辛大学都提出了基于 3D 打印技术的槽内直接冷却方案^[58-59]，实现了对电机进行槽内直接冷却，如图 8 所示。

目前，槽内直接冷却方案多针对分数槽集中绕组电机，因为该类绕组电机槽内绕组间存在较大空



(a) 德国卡尔斯鲁厄理工学院



(b) 美国威斯康辛大学

图 8 槽内直接冷却结构

Fig. 8 In-slot direct cooling structure

(Copyright © 2015, IEEE, Copyright © 2021, IEEE)

隙位置，给置入冷却通路提供了空间。但是整数槽分布式扁线绕组电机的槽内空间几乎被全部占满，并不便于直接进行槽内冷却。对此有学者提出空心导体直接冷却方案^[48, 60]，如美国马奎特大学提出如图 9 所示的热管直接冷却 3D 打印式绕组，用于电动飞机驱动系统中，其功率密度高达 20 kW/kg^[61]。英国谢菲尔德大学提出将扁线绕组导体中间挖空，形成绕组直接液冷通道的冷却方案^[62]，如图 10(a)所示，但是空心导体在成型过程中，容易造成弯折位置堵塞。此外，瑞典隆德大学提出了凹槽式 3D 打印扁线绕组冷却方案^[63]，将扁线表面挖槽，形成冷却介质通路，但是成型后也面临绕组焊接问题，需要更加精密的金属铜 3D 打印技术和绝缘涂覆技术。意大利拉奎拉大学提出扁线绕组电机槽内直接冷却方案，如图 10(b)所示，并对不同工况下的温升进行了对比，结果表明：将靠近槽口部位植入冷却水路，且保持槽深不变的设计方案具有更好性能，可显著提升高速区输出功率^[64]。

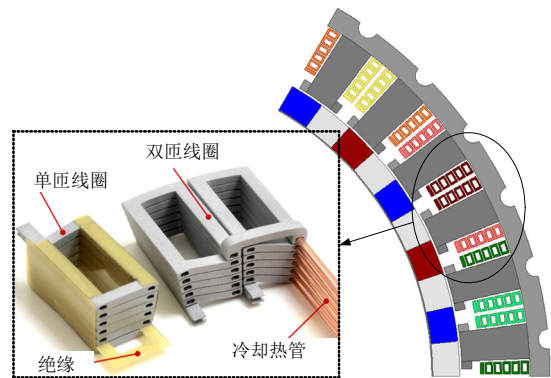
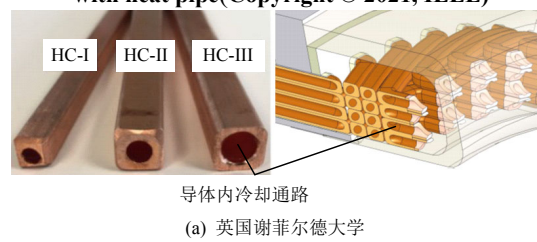
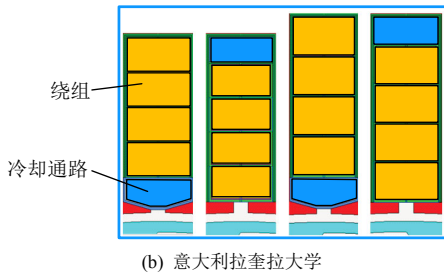


图 9 3D 打印热管直接冷却式扁线绕组

Fig. 9 3D printing direct cooling flat wire winding with heat pipe (Copyright © 2021, IEEE)



(a) 英国谢菲尔德大学



(b) 意大利拉奎拉大学

图 10 扁线绕组直接冷却结构
Fig. 10 Direct cooling structure of flat wire winding (Copyright © 2019, IEEE)

现有几种典型车用驱动电机冷却方式汇总如表 4 所示。综合看来，机壳水冷方案在上二代车用驱动电机中应用较多，技术工艺相对成熟，但是对绕组局部热点的冷却效率较低。而扁线绕组端部油冷方案以其高效冷却优势已被新一代车用驱动电

机广泛采用，但对扁线绕组槽内局部热点冷却效果不佳，且存在易受焊接时绝缘碎屑影响等问题。

综上，目前车用驱动电机的冷却设计特点主要是槽内冷却、绕组直接冷却(端部油冷、空心导体冷却和浸油冷却)等分布式冷却方式。本质在于扁线绕组槽内靠近槽口侧易出现局部热点，降低电机效率的同时，威胁绝缘可靠性。槽内冷却和绕组直接冷却方式相比于传统机壳冷却方式冷却效率高，成为高功率密度驱动电机分布式冷却的发展方向之一，而且驱动电机用整数槽分布式扁线绕组槽内空间有限，空心导体或浸油冷却有望成为解决方案之一。但复杂的冷却结构成为实现分布式冷却的难点问题，结合先进材料和 3D 打印工艺的绕组直冷技术有待进一步研究。

表 4 驱动电机不同冷却方案对比

Table 4 Comparison of different cooling schemes of traction motors

冷却类型	适用绕组类型	应用案例	优缺点对比
机壳水冷	圆线/扁线	Prius 2010、Nissan Leaf 2012、BMW i3	优点：工艺简单成熟，成本低 缺点：冷却效率较低
绕组端部油冷	扁线	丰田 Prius 2017、Lucid Air、Tesla Model Y、 本田 iMMd、英国诺丁汉大学	优点：冷却效率高 缺点：冷却系统复杂、转子高速风摩擦大，成本较高
槽内直接冷却	圆线/扁线	德国卡尔斯鲁厄理工学院(扁线)、美国马奎特大学(扁线)、 美国威斯康辛大学(圆线)、意大利拉奎拉大学(叠绕组扁线)	优点：冷却效率较高 缺点：占用槽内空间，成本较高
空心导体直接冷却	圆线/扁线	英国谢菲尔德大学(扁线)、 瑞典隆德大学(扁线)	优点：冷却效率高 缺点：制造工艺难度大，成本高
浸油式冷却	扁线	华为 Drive ONE、美国俄亥俄州立大学	优点：冷却效率高 缺点：冷却油路复杂、成本高

4 扁线绕组绝缘问题

SiC 逆变器输出激励具有高 dv/dt 的特点，相比传统 Si 基逆变器系统而言，过电压问题更加突出。此外，由于脉冲过电压的振荡频率高达几兆赫兹到几十兆赫兹^[65-67]，此时电机内部的寄生参数将不可忽略^[68]，寄生参数的存在和扁线绕组特殊的层间换位结构将导致绕组匝间电压分布不均匀，使得某几匝线圈间出现电压最大值。一旦匝间电压超过绝缘初始放电电压(partial discharge inception voltage, PDIV)，就会引起绝缘发生局部放电，威胁电机运行安全。因此，基于 SiC 逆变器驱动下的扁线绕组电机设计与传统基于电磁-热的电机优化设计流程不同，需要在电磁-热设计的基础上，加入对于绝缘安全的分析，从而形成针对驱动电机的电磁-热-电应力的多物理域设计流程^[69-70]，如图 11 所示。整个过程中，电机绕组高频等效电路建立、高频寄生参数提取、匝间电压计算和初始放电分析等都是在

电机设计阶段判断电机绕组绝缘安全的关键科学问题^[71-72]。国内外学者对此开展了广泛且深入的研究工作，国外的代表性研究单位包括美国俄亥俄州立大学^[15,73-76]、德国亚琛工业大学^[77-78]、意大利博洛尼亚大学^[6,79]等。我国主要研究单位有哈尔滨工业大学^[80-81]、上海交通大学^[20,82]、四川大学^[83-84]、宁波诺丁汉大学^[85-86]等。内容涵盖电机绕组高频等效电路模型、绕组绝缘初始放电分析与监测、低电压应力扁线绕组拓扑优化、绝缘可靠性设计与寿命预测等方面。

4.1 电机绕组高频模型和电压应力计算

对于电机绕组匝间电压计算模型的研究主要集中在高频寄生参数提取和高频等效电路模型建立两个方面。匝间电压计算方法包括解析和有限元方法，解析方法通过建立绕组等效电网络模型，基于基尔霍夫定律，进行电路求解^[87-88]，但是由于电机绕组的电感参数与电机铁心饱和效应密切相关，

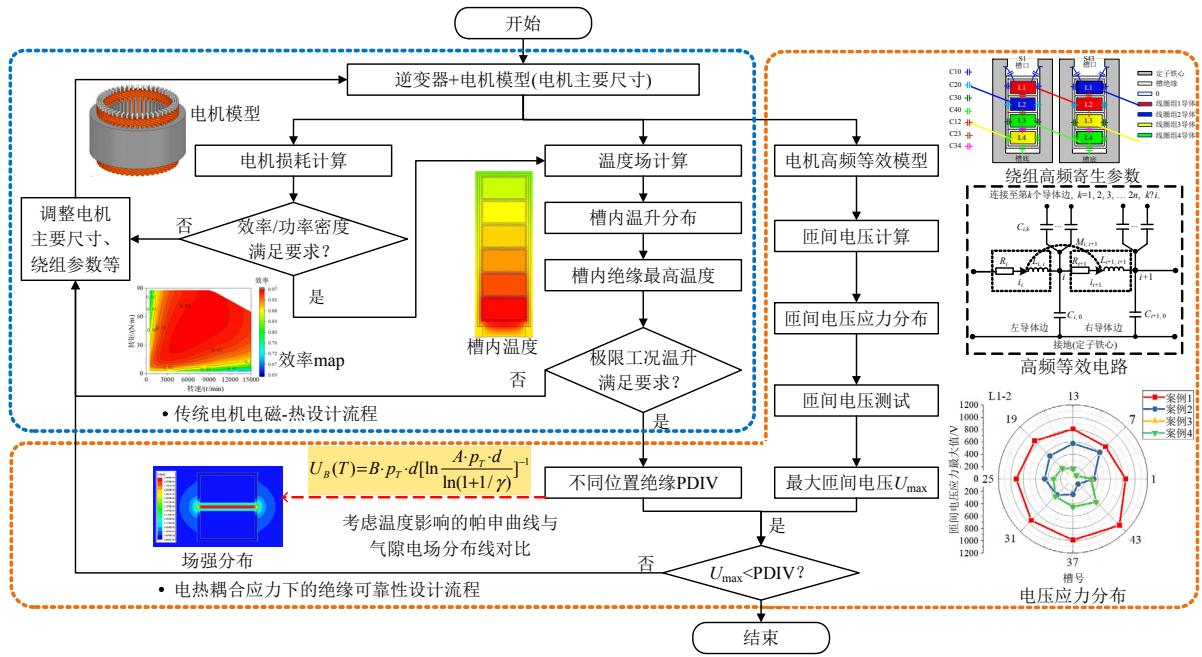


图 11 考虑电热耦合作用下的绝缘安全分析流程

Fig. 11 Safety analysis of insulation under the influence of electric-thermal coupling stress

基于静态参数的解析方法精度不高，而且电机绕组包含很多匝线圈，使得电网络方程十分复杂，难于进行解析求解。近年来，基于瞬态电磁场耦合外电路的场路耦合有限元方法在求解电机绕组匝间电压时得到广泛应用^[16,89]，该方法可以求解复杂的绕组模型，同时可充分考虑绕组电感参数非线性，具有较高的计算精度。

针对绕组高频等效电路模型问题，现有研究多围绕传统散嵌圆形叠绕组^[90-92]，而对于层间换位扁线绕组的相关研究较少。与传统圆线叠绕组相比，扁线绕组的导体形状、连接方式和参数特性都有很大不同。例如，传统叠绕组一个线圈组的若干匝线圈的两个导体边全部分置于两个槽内，而扁线绕组采用的波绕组形式，一个线圈组的若干匝线圈均匀分布在圆周方向，如图 12 所示，这导致属于不同线圈组的匝线圈间存在双边导体耦合效应。叠绕组线圈的两个导体与其他线圈组的导体间不存在耦

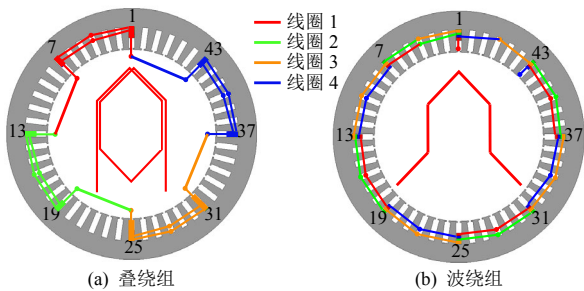


图 12 不同形式绕组线圈连接图
Fig. 12 Coil connection diagram of different types of winding

合效应，所以高频等效电路模型一般可采用“π”型等效电路^[15,17]，如图 13(a)所示。但是扁线绕组的导体间存在双边耦合效应，此时“π”型等效电路将不适用，为此有学者建立了针对扁线绕组特殊结构的双“1”型高频等效电路模型^[81]，如图 13(b)所示，具有较好的计算精度，可以准确评估匝间电压应力分布情况。

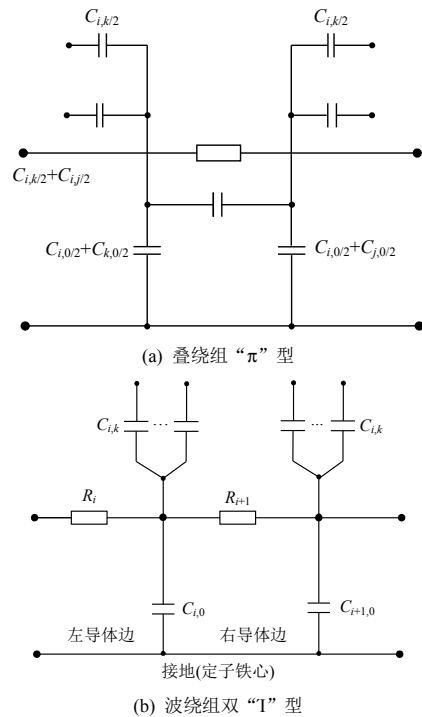


图 13 单匝线圈高频等效电路模型
Fig. 13 High frequency equivalent circuit of single turn coil

目前，随着扁线绕组拓扑结构的复杂化和多样化发展，建立与之对应的高精度等效电路模型是在电机设计阶段确定匝间最大电压应力，从而辅助设计人员实现绕组绝缘低电压应力设计的有效方法。因此，研究适用于更多场景的通用化高频等效电路模型是具有重要意义的。

4.2 初始放电模型与测量

绕组的初始放电模型是在电机设计阶段判断绕组绝缘安全的主要方法，其准确性直接影响电机的高可靠设计成功与否。由于电机内部复杂的电磁-热环境使得初始放电计算模型精度不高。目前，国外研究单位包括英国诺丁汉大学、德国亚琛工业大学等在绕组绝缘局部初始放电方面做了较多研究工作，建立了线圈级的匝间初始放电电压测量平台^[18,78]，分析了温度对于汤森公式的修正关系模型^[93]。大量实验结果表明，绕组的初始放电电压(PDIV)会随着温度的增加而下降，根据德国亚琛工业大学和日本古河电工的研究结果可知，其原因有^[93-94]：1) 随着温度增加，绕组绝缘材料的相对介电常数 $\epsilon_{r,T}$ 增加。2) 根据 Dunbar 修正模型^[95]，导体绝缘间气隙压强随温度增加而下降。不同温度下的 Paschen 曲线和临界初始放电气隙电场线分布情况如图 14 所示，随着温度增加，PDIV 将显著下降，对图 14 中所示案例，相比于 20℃时的 2670 V，当温度增加到 200℃时，PDIV 下降到 1450 V，降幅约为 45.7%。

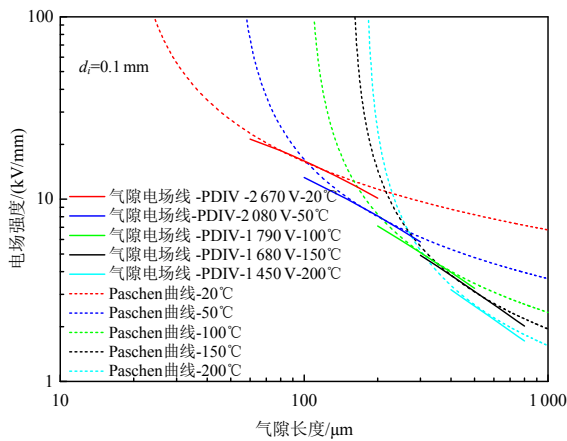


图 14 考虑温度修正的 Paschen 曲线和气隙电场线
Fig. 14 Paschen curves and air-gap electric field lines considering temperature correction

在越来越高的功率密度需求和可靠性指标的要求下，电机的绝缘安全限度逐渐逼近材料参数容许极限，绕组绝缘将承受较大电、热应力的双重作用^[96]，初始放电的准确测量成为研究绝缘安全并进

行可靠设计的前提之一。一方面，对于初始放电的检测可以从实验方面验证理论模型的准确性，便于后续对匝间电压和绝缘安全性的评估和预测；另一方面，也可以指导不同耐高温和耐高压绝缘材料的研发和应用。对此，美国俄亥俄州立大学 2021 年搭建考虑环境温度、压强影响的扁线绕组 PDIV 测试平台(参见图 15)^[75]，为了模拟电机实际工作环境，将扁线绕组定子放置在控压控温箱中，以模拟温度和压强等环境参数对 PDIV 的影响。同时，为了屏蔽 SiC 逆变器高频脉冲引起的信号干扰问题，将测试电机置入一个法拉第笼中。

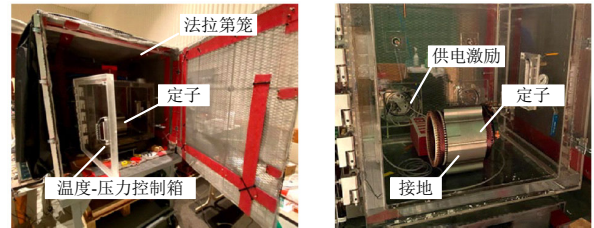


图 15 考虑温度和压力扁线绕组电机 PDIV 测试
Fig. 15 PDIV test of hairpin winding considering temperature and pressure effect

我国四川大学、上海交通大学和宁波诺丁汉大学等也都相继开发了相应的绕组初始放电检测装置。图 16 为四川大学所研制的高频脉冲下绕组线圈初始放电测试装置^[84]，其开发了一种宽带、高增益、高指向性的天线，解决了在 SiC 等快开器件驱动下强电磁干扰影响测试精度的问题。

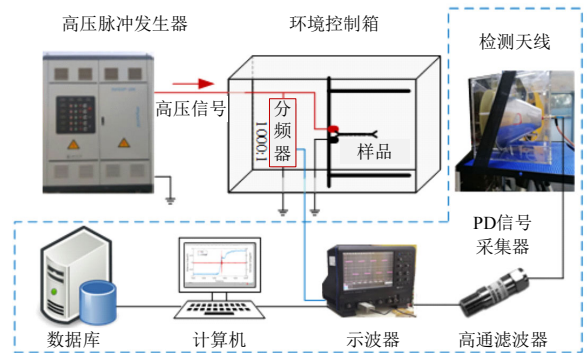


图 16 高频脉冲电压下绕组线圈初始放电实验系统
Fig. 16 PD test system of coils under high-frequency pulse voltage (Copyright © 2022, IEEE)

4.3 新型绝缘材料

在进行驱动电机绕组的高压化设计时，一般可以通过增加绝缘厚度、采用更高耐高温等级、耐电晕绝缘材料的方法避免绕组绝缘过早失效^[97-98]。但是，增加绝缘厚度意味着降低槽满率，不利于电机功率密度的提升，而且较厚的绝缘会影响绕组散热。因此，开发新型耐高温高压绝缘材料成为进一

步提升电机功率密度的必要选项^[72]。2016 年，本田 iMMD 驱动电机所用的日本古河电工研制的耐电晕线^[97]，采用了内部漆包层和外部挤压层的两层绝缘结构，挤压层材料为聚醚醚酮(polyether ether ketone, PEEK)树脂，耐温 240 °C，漆包层材料为耐温 220 °C 的聚酰胺酰亚胺(polyamide-imide, PAI)，两层材料的组合实现更高的 PDIV 和更优的导热性能，图 17 所示为几种典型绝缘材料分类情况，其具体厂商和优缺点如表 5 所示。

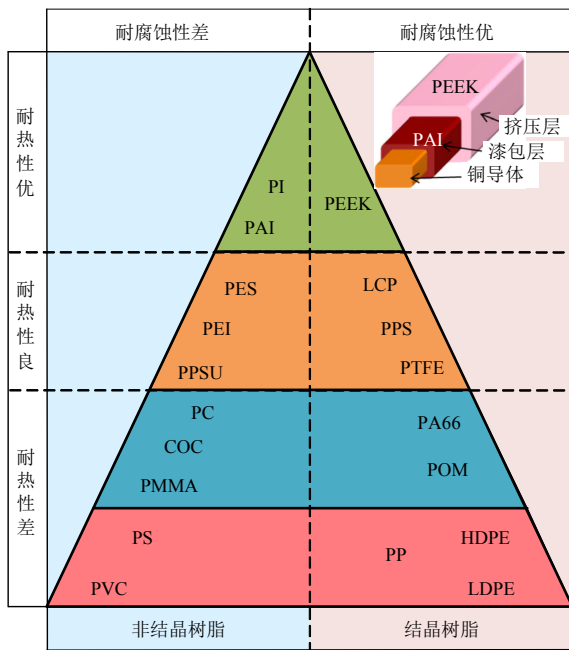


图 17 几种电机绕组用主要绝缘材料

Fig. 17 Several insulating materials of motor winding

表 5 主要绕组绝缘材料对比

Table 5 Comparison of main winding insulation material

绝缘材料	主要生产厂商	特点
聚酰胺酰亚胺(PAI)	大通、精达、先登高科	耐温 220 °C、PDIV 较低、成本较低
聚醚醚酮(PEEK)	日本古河、住友、中国佳腾电业	耐温 240 °C、PDIV 较高、成本较高
复合型电阻分级绝缘 (PEEK/PAI+导电介质薄膜)	美国能源部与通用公司	耐温 180 °C、PDIV 高、成本高

在美国能源部支持下，通用公司于 2017 年提出了用于新一代宽禁带器件变频器供电电机的电阻分级绝缘系统^[99]，如图 18 所示。在绝缘空洞周围加入应力分级导电涂层，起到分压和电屏蔽作用，从而有效提高绝缘击穿电压，防止绝缘孔隙部位局部放电的发生。因此其具有更高的 PDIV，但是目前通用公司研制的电阻分级绝缘耐温等级仅

为 180 °C，更高耐温等级的绝缘材料正在研发中。我国苏州巨峰股份公司于 2021 年提出关于电动汽车电机绝缘材料及系统技术发展路线图的描述中指出^[100]：2025 年电机绝缘系统对地 PDIV 大于 1.2kV，耐温 200 °C；至 2030 年 PDIV 提升至大于 1.4kV，耐温 220 °C；至 2035 年最低 PDIV 将突破 1.6kV。

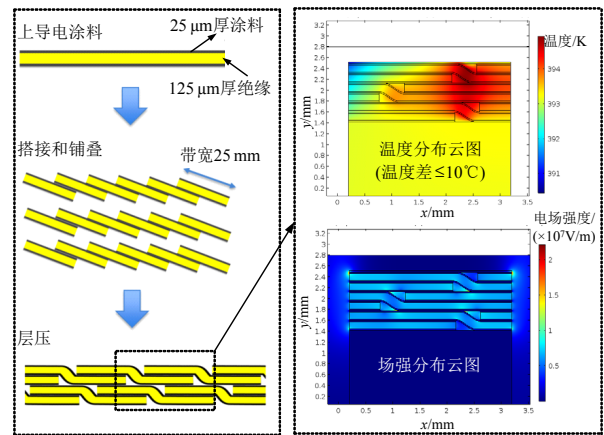


图 18 电阻分级绝缘系统制备过程及其电热性能

Fig. 18 Preparation process and electric-thermal performance of resistance grading insulation materials system

综上所述，对于扁线绕组电机的绝缘问题研究，主要有以下技术要点：其一为匝间电压的计算；其二为绝缘 PDIV 的确定；其三为绝缘的高可靠设计。本质是在电机设计阶段判断绕组匝间电压是否会超过 PDIV，如果超过就会发生绝缘局部放电，威胁绝缘安全。然而，目前不论是匝间电压和初始放电电压计算模型的精度提升，还是绝缘测试手段和仪器设备的标准化，亦或是开发耐电晕、高 PDIV、高导热、耐高温和耐 ATF 油的高性能绝缘材料的研发等均需进一步深入研究，这也是目前扁线绕组研究方面的热点和难点问题，是研发适用于下一代车用驱动电机的 800 V(直流)甚至更高电压等级的高可靠绕组的关键。

5 新一代扁线绕组制造技术

近年来，采用不等截面导体、新型换位方式、槽内直接冷却等新结构的高密度扁线绕组不断涌现，导致绕组加工工艺更趋多样化和复杂化，传统加工工艺很难再满足设计需求。3D 打印技术^[101-104]由于具有很好的加工精度和自由度，缩短了样机制造周期，非常适合高密度复杂拓扑绕组的制造，但目前仍处于样机研发阶段，相信随着批量化需求的

增加,应用这种制造技术进行驱动电机的大批量生产是可能的。国内外对此已进行了广泛研究,如瑞士洛桑联邦理工学院^[105]基于3D打印技术制造了变厚度高导热扁线绕组,如图19所示。类似的,英国布里斯托尔大学提出了基于拓扑优化3D打印扁线绕组^[106],如图20所示,其结合槽内磁场分布特点,确定各层导体形状和尺寸,提高槽满率的同时,具有较好的高频涡流损耗抑制效果。

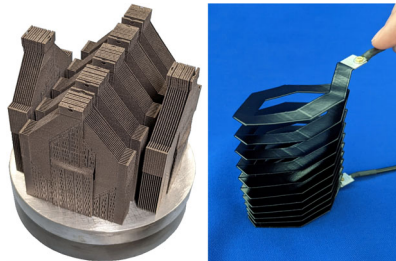


图19 3D打印变厚度高导热扁线绕组

Fig. 19 3D printing flat wire winding of variable thickness and high thermal conductivity(Copyright © 2023, IEEE)

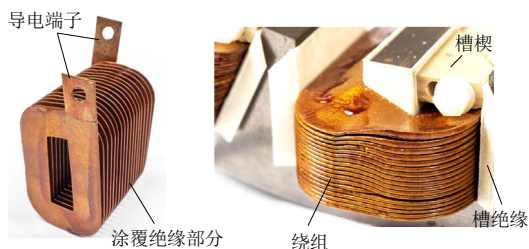


图20 基于磁场分布拓扑优化的3D打印扁线绕组

Fig. 20 3D printing flat wire winding based on topology optimization of magnetic field distribution (Copyright © 2020, IEEE)

美国初创公司H3X将这种3D打印绕组用于其HPDM-250型号驱动电机中,并与美国NASA公司合作,研发了适用于电动飞机的高功率密度驱动电机,如图21所示,可实现30kW/kg的有效材料功率密度,足见这种绕组的高功率密度优势。

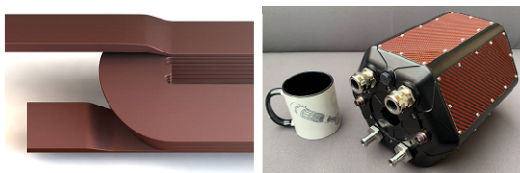


图21 H3X的3D打印扁线绕组及其集成电机

Fig. 21 H3X's 3D printed flat wire winding and its integrated motor

以上3D打印绕组方案均针对分数槽集中绕组结构,然而,为了追求低振动噪声,电动汽车驱动电机用扁线绕组电机通常采用整数槽分布式绕组结构,与分数槽集中绕组相比,分布式绕组的端部更长,一个线圈通常需要跨越几个槽,从而使得这

种绕组的3D打印具有更高工艺难度。

对此,哈尔滨工业大学2022年提出了分段式3D打印混合换位扁线绕组^[30],如图22所示,与表3中的第5种绕组结构对应,将利兹扁线段的端部通过3D打印技术制造为实心扁线导体形状,这可以保证利兹扁线与实心扁线的焊接依旧采用传统扁线绕组制造工艺流程,降低了制造成本,避免了焊接和成型过程中,利兹扁线的股间散花和应力回弹问题。此外,德国Additive Drive公司采用3D打印技术制造了如图23(a)所示的无需成型工具、无焊点式扁线绕组定子^[107],与传统方式制造的扁线绕组电机相比,功率提升45%,制造交付周期仅为4周。而传统自动化产线生产,仅产线交付周期就需要约4个月时间,如果实现小批量量产再需约1个月时间。进一步地,基于罗贝尔换位思想,Additive Drive公司提出了全换位型变截面换位扁线绕组^[108],如图23(b)所示。铜导体打印完成后进行绝缘浸漆处理,以保证较高槽满率。因此与传统模压和自动化成型制造方法相比,采用3D打印制造的方法不仅可以实现非标制造,同时还可以大幅缩短新产品交付时间。

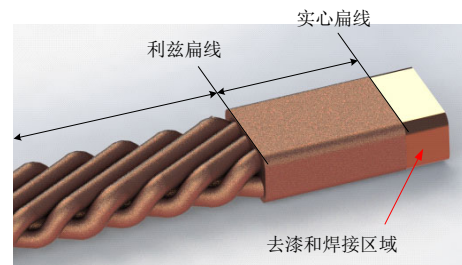
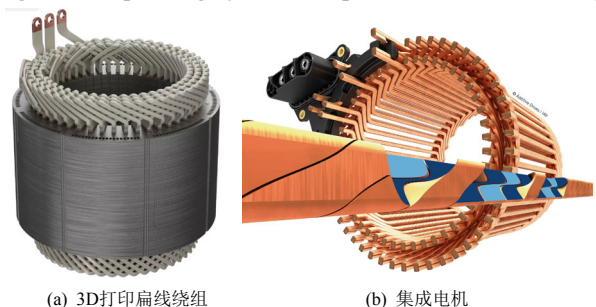


图22 3D打印混合换位扁线绕组

Fig. 22 3D printing hybrid transposition flat wire winding



(a) 3D打印扁线绕组

(b) 集成电机

图23 德国Additive Drive公司提出的3D打印扁线绕组

Fig. 23 3D printing flat wire winding proposed by German Additive Drive corporation

综上,新型高功率密度扁线绕组及其冷却结构,即不等截面扁线绕组、层间/槽间/股间混合换位扁线绕组、分布式直接冷却等,这些结构利用传统制造手段很难实现,但基于3D打印技术的制造方法或可

成为有效手段之一。然而，目前还存在高成本问题，未来如果通过大批量制造或可弥补其在成本上的劣势，与此同时，利用 3D 打印技术制造的绕组电性能、机械性能和冷却通路密封性等均需要进一步研究，以保证绕组优良的电性能和可靠性。

6 总结与展望

本文详细阐述了电动汽车驱动电机用扁线绕组关键问题与发展现状，从扁线绕组拓扑结构、交流损耗、热和冷却设计、绝缘问题与制造工艺等 5 个方面，综述了扁线绕组电机的关键技术发展情况，总体来看：

1) 车用驱动电机高速化带来的扁线绕组交流损耗问题日趋严重，亟需开发下一代具有宽频域低损耗特性的新型拓扑结构扁线绕组，如变截面扁线绕组、分段式混合换位扁线绕组等。并据此进行基于整车工况的宽频域绕组优化设计，从而提出整车工况下损耗最小的下一代扁线绕组，以实现驱动电机的高效率和高功率密度指标。但随着绕组结构的复杂化，其制造工艺问题成为制约其进一步发展的关键问题。

2) 高损耗密度及其不均匀分布导致扁线绕组槽内靠近槽口部位出现局部热点，增加绝缘热应力水平，威胁电机可靠性。槽内冷却和绕组直接冷却方式相比于传统机壳冷却方式冷却效率高，成为高功率密度驱动电机分布式冷却的主要特征之一。空心导体或浸油冷却方式可为车用驱动电机扁线绕组进一步提升功率密度助力。此外，结合先进材料和 3D 打印工艺的绕组分布式直冷技术有待进一步研究。

3) SiC 逆变器高频高 dv/dt 激励下，扁线绕组匝间绝缘电压应力水平增加，绝缘面临初始放电风险。如何从绕组结构优化和绝缘增强设计角度降低匝间电压应力，从而提高扁线绕组可靠性成为保证扁线绕组绝缘安全的重要前提。下一步需要继续深入开展扁线绕组匝间电压应力高精度计算、考虑电-热-压力等多因素作用下的初始放电测量、新型低电压应力绕组换位拓扑和新型耐电晕耐热耐油绝缘材料等方面的研究，并开发适用于下一代车用驱动电机的 800 V(直流)甚至更高电压等级的高可靠扁线绕组。

4) 3D 打印制造技术为新型复杂结构扁线绕组的制造提供了有效手段。但电机绕组及其绝缘不同

于传统结构件，需要同时满足高导电率、高导热率和高介电能力等需求。因此，如何结合 3D 打印技术，完善该类新结构绕组的制备流程，并最终实现低成本标准化制造仍具有较大挑战性。虽然目前大多数 3D 打印绕组仍处于样件研发阶段，但可以预见，下一代高功率密度高可靠扁线绕组技术可能通过 3D 打印技术得以实现。

参考文献

- [1] HUSAIN I, OZPINECI B, ISLAM M S, et al. Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(6): 1039-1059.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. 北京: 新华社, 2023[2023-04]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
The Central People's Government of the People's Republic of China. The fourteenth five-year plan for the national economic and social development of the people's republic of China and the outline of the long-term goals for 2035 [EB/OL]. Beijing: Xinhua News Agency, 2023[2023-04]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm(in Chinese).
- [3] US. Department of Energy. Electrical and electronics technical team roadmap[R/OL]. Washington: Energy Efficiency and Renewable Energy(EERE). 2023 [2023-04]. <https://www.energy.gov/sites>. 2017-10.
- [4] CAI Wei, FULTON D, CONGDON C L. Multi-set rectangular copper hairpin windings for electric machines: US, 07034428B2[P]. 2006-04-25.
- [5] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 52-53.
China Society of Automotive Engineering. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles 2.0 [M]. Beijing: China Machine Press, 2021: 52-53(in Chinese).
- [6] SERI P, MONTANARI G C. A voltage threshold in operating condition of PWM inverters and its impact on reliability of insulation systems in electrified transport applications[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(1): 69-77.
- [7] FRITZ N, ENGELMANN G, STIPPICH A, et al. Toward an in-depth understanding of the commutation processes in a SiC mosfet switching cell including parasitic elements [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(4): 4089-4101.
- [8] XU Yipu, YUAN Xibo, YE Fei, et al. Impact of high switching speed and high switching frequency of

- wide-bandgap motor drives on electric machines[J]. IEEE Access, 2021, 9: 82866-82880.
- [9] SUNDEEP S, WANG Jiabin, GRIFFO A, et al. Antiresonance phenomenon and peak voltage stress within PWM inverter fed stator winding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 11826-11836.
- [10] GIANGRANDE P, MADONNA V, NUZZO S, et al. Moving toward a reliability-oriented design approach of low-voltage electrical machines by including insulation thermal aging considerations[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1): 16-27.
- [11] PRECI E, VALENTE G, GALASSINI A, et al. Experimental statistical method predicting AC losses on random windings and PWM effect evaluation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2287-2296.
- [12] CHANG Le, JAHNS T M, BLISSENBACH R. Estimation of PWM-induced iron loss in IPM machines incorporating the impact of flux ripple waveshape and nonlinear magnetic characteristics[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1332-1345.
- [13] MILLINGER J, WALLMARK O, SOULARD J. Investigation of harmonic losses in a two-pole slotless permanent-magnet motor due to wide bandgap inverter supply[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6280-6289.
- [14] ZHU Sa, WANG Hao, ZHANG Jingwei, et al. Fast calculation of carrier harmonic loss in permanent magnet of IPMSM under PWM VSI supply over entire working range[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1581-1592.
- [15] XIE Yanyan, ZHANG J, LEONARDI F, et al. Voltage stress modeling and measurement for random-wound machine windings driven by inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4): 3536-3548.
- [16] FERREIRA R S, FERREIRA A C. Analysis of end-windings influence on the transient voltage distribution in machine stator windings by a three phase model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2110-2119.
- [17] HOFFMANN A, PONICK B. Method for the prediction of the potential distribution in electrical machine windings under pulse voltage stress[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1180-1187.
- [18] PAULI F, KILPER M, DRIENDL N, et al. Modeling of the partial discharge process between the winding and the stator of low voltage machines for traction applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2310-2318.
- [19] MADONNA V, GIANGRANDE P, GALEA M. Influence of insulation thermal aging on the temperature assessment in electrical machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 456-467.
- [20] WANG Yalin, BALACHANDRAN T, HOOLE Y, et al. Partial discharge investigation of form-wound electric machine winding for electric aircraft propulsion[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1638-1647.
- [21] ISHIGAMI T, TANAKA Y, HOMMA H. Motor stator with thick rectangular wire lap winding for HEVs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2917-2923.
- [22] ZHAO Yu, LI Dawei, PEI Tonghao, et al. Overview of the rectangular wire windings AC electrical machine [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(2): 160-169.
- [23] Drive Unit: Motor[Tech Talks][Lucid Motors [EB/OL]. (2022-09-13)[2023-04-23]. <https://youtu.be/U7IHZxNC6hc>.
- [24] LIU Huaicong, LEE H J, SEOL H S, et al. Optimal slot design of IPMSM in railway with independently rotating wheelsets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(2): 8200404.
- [25] ZOU Tianjie, GERADA D, LA ROCCA A, et al. A comprehensive design guideline of hairpin windings for high power density electric vehicle traction motors [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3578-3593, doi: 10.1109/TTE.2022.3149786.
- [26] BIANCHI N, BERARDI G. Analytical approach to design hairpin windings in high performance electric vehicle motors[C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 4398-4405.
- [27] Interplex. New-generation e-mobility traction motor stators are enabled by advanced busbar technologies [EB/OL]. [2023-04-23]. <https://power.interplex.com/resources/technical-bulletin/new-generation-e-mobility-traction-motor-stators-are-enabled-by-advanced-busbar-technologies/>.
- [28] GAI Yaohui, KIMIABEIGI M, CHONG Y C, et al. Cooling of automotive traction motors: schemes, examples, and computation methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1681-1692.
- [29] EL-REFAIE A M F, KING R D. Low-inductance, high-efficiency induction machine and method of making same: US Patent 685900 B2[P]. 2017-06-20.
- [30] 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.
- [31] PARK S H, CHIN J W, CHA K S, et al. Investigation of AC copper loss considering effect of field and armature excitation on IPMSM with hairpin winding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12102-12112, doi: 10.1109/tie.2023.3234154.
- [32] DOWELL P L. Effects of eddy currents in transformer windings[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(8): 1387-1394.
- [33] 柳百毅, 陈为. 改进的磁元件圆导线绕组高频损耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2795-2802. LIU Baiyi, CHEN Wei. Improved high-frequency winding loss model for round conductors of magnetic components [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2795-2802(in Chinese).
- [34] ZHANG Wanjun, JAHNS T M. Analytical 2-D slot model for predicting AC losses in bar-wound machine windings due to armature reaction[C]//2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo(ITEC). Dearborn, MI, USA: IEEE, 2014: 1-6.
- [35] ZHANG Jian, ZHANG Zhuoran, XIA Yiwen, et al. Thermal analysis and management for doubly salient brushless DC generator with flat wire winding[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 1110-1119.
- [36] MOMEN F, RAHMAN K, SON Y. Electrical propulsion system design of Chevrolet Bolt battery electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 376-384.
- [37] 调皮的 JINX. 特斯拉 Tesla 首款 10 层油冷扁线电机终于来了[EB/OL]. (2021-11-09)[2024-04-23]. <https://mp.weixin.qq.com/s/WDeWwWijV9bGTNtXXXnBwYg>. Tiaopi JINX. Tesla Tesla's first 10-layer oil cooled flat wire motor arrived[EB/OL]. (2021-11-09)[2024-04-23]. <https://mp.weixin.qq.com/s/WDeWwWijV9bGTNtXXXnBwYg>(in Chinese).
- [38] DU-BAR C, WALLMARK O. Eddy current losses in a hairpin winding for an automotive application[C]//2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Alexandroupoli, Greece: IEEE, 2018: 710-716.
- [39] STEIER A I, MUNDAY Alan. Advanced strong hybrid and plug-in hybrid engineering evaluation and cost analysis [EB/OL]. (2017-04-25)[2024-04-23]. https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-04/advanced_strong_hybrid_and_plug_in_hybrid_engineering_evaluation_and_cost_analysis_ac.pdf.
- [40] PRECI E, NUZZO S, VALENTE G, et al. Segmented hairpin topology for reduced losses at high-frequency operations[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 688-698.
- [41] ISLAM M S, HUSAIN I, AHMED A, et al. Asymmetric bar winding for high-speed traction electric machines [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1): 3-15.
- [42] 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.
- [43] WANG Dongmei, LIANG Yanping, GAO Lianlian, et al. A new global transposition method of stator winding and its loss calculation in AC machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 149-156.
- [44] 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.
- [45] 大连豪森设备制造股份有限公司. 突破! 豪森掌握 10 层扁线电机定子生产关键技术, 加速客户商业化步伐 [EB/OL]. (2023-03-22)[2024-04-23]. <http://www.haosen.com.cn/?news/438.html>. Dalian Hausen Equipment Manufacturing Co., LTD. Breakthrough! Hausen master 10-layer flat wire motor stator production key technology, new energy customer commercialization faster[EB/OL]. (2023-03-22)[2024-04-23]. <http://www.haosen.com.cn/?news/438.html> (in Chinese).
- [46] BERARDI G, BIANCHI N. Design guideline of an AC hairpin winding[C]//2018 XIII International Conference on Electrical Machines(ICEM). Alexandroupoli, Greece: IEEE, 2018.
- [47] 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.
- [48] CHEN Xiao, WANG Jiabin, GRIFFO A, et al. Thermal modeling of hollow conductors for direct cooling of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 895-905.
- [49] GRONWALD P O, KERN T A. Traction motor cooling systems: a literature review and comparative study [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2892-2913.
- [50] CARRIERO A, LOCATELLI M, RAMAKRISHNAN K, et al. A review of the state of the art of electric traction motors cooling techniques[J]. SAE Technical Paper, 2018(1): 0057.
- [51] 杨宁. 电动汽车扁线油冷式永磁同步电机研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

- YANG Ning. Study on oil-cooled permanent magnet synchronous motor of electric vehicle with flat wire[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).
- [52] WANG Huimin, LIU Xiaochen, KANG Ming, et al. Oil injection cooling design for the IPMSM applied in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3427-3440.
- [53] 陈林, 杜玉春, 安笑妍, 等. 油污环境对变频电机芳纶绝缘 PDIV 影响研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(3): 67-71.
- CHEN Lin, DU Yuchun, AN Xiaoyan, et al. Effect of oil contaminated environment on PDIV of aramid insulation for inverter-fed motor[J]. Insulating Materials, 2022, 55(3): 67-71(in Chinese).
- [54] 董涵, 王鹏, 马世金, 等. 冷却油对变频电机匝间绝缘电气性能影响研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(11): 38-44.
- DONG Han, WANG Peng, MA Shijin, et al. Effect of cooling oil on electrical properties of interturn insulation for inverter-fed motor[J]. Insulating Materials, 2020, 53(11): 38-44(in Chinese).
- [55] ACQUAVIVA A, SKOOG S, THIRINGER T. Design and verification of in-slot oil-cooled tooth coil winding PM machine for traction application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 3719-3727.
- [56] DONG Chaofan, QIAN Yuping, ZHANG Yangjun, et al. A review of thermal designs for improving power density in electrical machines[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1386-1400.
- [57] SCHIEFER M, DOPPELBAUER M. Indirect slot cooling for high-power-density machines with concentrated winding[C]//2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference(IEMDC). Coeur d'Alene, ID, USA: IEEE, 2015: 1820-1825.
- [58] SIXEL W, LIU Mingda, NELLIS G, et al. Ceramic 3-D printed direct winding heat exchangers for thermal management of concentrated winding electric machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 5829-5840.
- [59] LANGHECK A, REUTER S, SABUROW O, et al. Evaluation of an integral injection molded housing for high power density synchronous machines with concentrated single-tooth winding[C]//2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Schweinfurt, Germany: IEEE, 2018: 1-6.
- [60] AYAT S, SERGHINE C, KLONOWSKI T, et al. The use of phase change material for the cooling of electric machine windings formed with hollow conductors[C]//2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference(IEMDC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2019: 1195-1201.
- [61] WU Fan, EL-REFAIE A M, AL-QARNI A. Additively manufactured hollow conductors integrated with heat pipes: design tradeoffs and hardware demonstration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3632-3642.
- [62] REINAP A, ANDERSSON M, MÁRQUEZ-FERNÁNDEZ F J, et al. Performance estimation of a traction machine with direct cooled hairpin winding[C]//2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo(ITEC). Detroit, MI, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [63] WOHLERS C, JURIS P, KABELAC S, et al. Design and direct liquid cooling of tooth-coil windings[J]. Electrical Engineering, 2018, 100(4): 2299-2308.
- [64] VENTURINI G, VOLPE G, VILLANI M, et al. Investigation of cooling solutions for hairpin winding in traction application[C]//2020 International Conference on Electrical Machines(ICEM). Gothenburg, Sweden: IEEE, 2020, 1: 1573-1578.
- [65] HAN Di, LI Silong, WU Yujiang, et al. Comparative analysis on conducted CM EMI emission of motor drives: WBG versus Si devices[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8353-8363.
- [66] ZHAO Hongbo, SHEN Zhan, DALAL D N, et al. Parasitic capacitance modeling of inductors without using the floating voltage potential of core[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(3): 3214-3222.
- [67] GHASSEMI M. Accelerated insulation aging due to fast, repetitive voltages: A review identifying challenges and future research needs[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1558-1568.
- [68] RYU Y, YEA M, KIM J, et al. Stator impedance modeling platform for the electromagnetic compatibility aware design of 3.7- to 7.5-KW squirrel-cage induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 11255-11265.
- [69] JI Yatai, GIANGRANDE P, MADONNA V, et al. Reliability-oriented design of inverter-fed low-voltage electrical machines: potential solutions[J]. Energies, 2021, 14(14): 4144.
- [70] AGHABALI I, BAUMAN J, KOLLMEYER P J, et al. 800-V electric vehicle powertrains: review and analysis of benefits, challenges, and future trends[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 927-948.
- [71] MANCINELLI P, STAGNITTA S, CAVALLINI A. Qualification of hairpin motors insulation for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 3110-3118.

- [72] 马林泉, 周成, 黄苏融, 等. 电动汽车驱动电机用绝缘材料现状与发展趋势[J]. 电器工业, 2020(4): 52-57.
MA Linqun, ZHOU Cheng, HUANG Surong, et al. Current situation and development trend of insulating materials for electric vehicle drive motor[J]. China Electrical Equipment Industry, 2020(4): 52-57(in Chinese).
- [73] XIE Yanyan, ZHANG Julia, LEONARDI F, et al. Investigation of surge voltage propagation in inverter-driven electric machine windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 9811-9822.
- [74] WEI Zhuo. Partial discharge characteristics under square-wave voltage pulses with ultra-short rise times under various pressures[D]. Ohio: Ohio State University, 2022.
- [75] KELLY B J. Experimental and simulated analysis of voltage stress within a bar-wound synchronous machine excited by a silicon carbide inverter[D]. Ohio, US: Ohio State University, 2021.
- [76] XIE Y. Investigation of electric stress on the insulation systems of inverter-driven electric machines[D]. Ohio, US: Ohio State University, 2020.
- [77] PENG Hujun, STEVIC S, LUO Ze, et al. Voltage Distribution Modeling Along Stator Windings in Permanent Magnet Synchronous Machines Using Coil-Based Grey Box Models[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, Early Access.
- [78] DRIENDL N, PAULI F, HAMEYER K. Influence of ambient conditions on the qualification tests of the interturn insulation in low-voltage electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 7807-7816.
- [79] RUMI A, LUSUARDI L, CAVALLINI A, et al. Partial discharges in electrical machines for the more electrical aircraft. Part III: preventing partial discharges[J]. IEEE Access, 2021, 9: 30113-30123.
- [80] 鞠孝伟, 程远, 杨明亮, 等. SiC 逆变器高频脉冲电压对 Hairpin 绕组绝缘安全的影响分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5115-5124.
JU Xiaowei, CHENG Yuan, YANG Mingliang, et al. Influence analysis of high frequency pulse voltage of SiC Inverter on Insulation Safety of Hairpin Winding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5115-5124(in Chinese).
- [81] JU Xiaowei, CHENG Yuan, YANG Mingliang, et al. Voltage stress calculation and measurement for hairpin winding of EV traction machines driven by SiC MOSFET[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 8803-8814.
- [82] WANG Yalin, YI Xuan, WANG Yani, et al. Partial discharge investigation of form-wound electric machine winding for electric aircraft propulsion[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(1): 78-90.
- [83] 赵文焕, 王鹏. 工频正弦和重复方波电压下间位芳纶局部放电起始电压测试[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2858-2866.
ZHAO Wenhuan, WANG Peng. Partial discharge inception voltage tests of meta-aramid paper under sinusoidal and repetitive square voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2858-2866(in Chinese).
- [84] WANG Peng, MA Shijin, AKRAM S, et al. Design of an effective antenna for partial discharge detection in insulation systems of inverter-fed motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13727-13735.
- [85] JI Yatai, GIANGRANDE P, ZHAO Weiduo, et al. Partial discharge investigation under humidity conditions via dissipation factor and insulation capacitance Tip-Up test[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1483-1490.
- [86] JI Yatai, GIANGRANDE P, ZHAO Han, et al. Electrical machine design considering corona-resistant wire for more electric aircraft applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 3192-3202, doi: 10.1109/tte.2022.3230055.
- [87] 佟来生, 吴广宁, 林同光, 等. 变频牵引电机定子绕组内部电压分布特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 134-138.
TONG Laisheng, WU Guangning, LIN Tongguang, et al. Study on voltage distribution in windings of inverter-fed traction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 134-138(in Chinese).
- [88] PASTURA M, NUZZO S, IMMOVILLI F, et al. Partial discharges in electrical machines for the more electric aircraft—Part I: A comprehensive modeling tool for the characterization of electric drives based on fast switching semiconductors[J]. IEEE Access, 2021, 9: 27109-27121.
- [89] XIE Yanyan, ZHANG Julia, LEONARDI F, et al. Modeling and verification of electrical stress in inverter-driven electric machine windings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5818-5829.
- [90] MOHAMMED O A, GANU S, ABED N, et al. High frequency PM synchronous motor model determined by FE analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1291-1294.
- [91] ZHANG Jun, WANG Shuhong, QIU Jie, et al. Finite element analysis and evaluation of stator insulation in high voltage synchronous motor[J]. IEEE Transactions on

- Magnetics, 2012, 48(2): 955-958.
- [92] MIHAILA V, DUCHESNE S, ROGER D. A simulation method to predict the turn-to-turn voltage spikes in a PWM fed motor winding[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1609-1615.
- [93] PAULI F, DRIENDL N, HAMEYER K. Study on temperature dependence of partial discharge in low voltage traction drives[C]//2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). Athens, Greece: IEEE, 2019: 209-214.
- [94] MUTO D, OYA M, AOI T, et al. A study on partial discharge phenomena of winding wires[J]. Furukawa Review, 2014, 45: 13-21.
- [95] DUNBAR W G, SEABROOK J W. High voltage design guide for airborne equipment[R]. Seattle Washington: Boeing Aerospace CO, 1976: 26-30.
- [96] JUNG C. Power Up with 800-V Systems: the benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles[J]. IEEE Electrification Magazine, 2017, 5(1): 53-58.
- [97] ITO K, SHIBATA T, KAWASAKI T. Development of high voltage wire for new structure motor in full hybrid vehicle[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2016, 5(2): 272-277.
- [98] RAMESH P, LENIN N C. High power density electrical machines for electric vehicles—comprehensive review based on material technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(11): 0900121.
- [99] CALEBRESE C, SMITH D, ZHANG Lili, et al. Resistively graded insulation system for next - generation converter - fed motors[R]. Niskayuna: General Electric, Global Research Center, 2018.
- [100] 今日电机. 电动汽车驱动电机先进绝缘材料及系统研究 [EB/OL]. (2021-06-21)[2023-06-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/WIoi9T7nLbdCM6qLs-hvlg>. Electric machines Today. Research on advanced insulation materials and systems for traction motors of EVs [EB/OL]. (2021-06-21)[2023-06-11]. <https://mp.weixin.qq.com/s/WIoi9T7nLbdCM6qLs-hvlg>(in Chinese).
- [101] THISMUS H, KALLASTE A, VAIMANN T, et al. State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machine [J]. Additive Manufacturing, 2022, 55(10): 102778.
- [102] 王润宇, 李大伟, 范兴纲, 等. 增材制造技术在电机中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 385-405.
WANG Runyu, LI Dawei, FAN Xinggang, et al. A review on application of additive manufacturing technology in electrical machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 385-405(in Chinese).
- [103] SZABÓ L, FODOR D. The key role of 3D printing technologies in the further development of electrical machines[J]. Machines, 2022, 10(5): 330.
- [104] WROBEL R, MECROW B. A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 1054-1064.
- [105] THABUIS A, REN Xiaotao, PERRIAR Y. Enhanced electric motors using multi-functional 3D printed winding with integrated heat sinks[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 849-858, doi: 10.1109/tec.2022.3221189.
- [106] SIMPSON N, NORTH D J, COLLINS S M, et al. Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2510-2519.
- [107] NONE N. Hairpin stator-from traction drives to electrified power take-offs[EB/OL]. Dresden, German: Additive Drive. [2023-04-23]. <https://www.additive-drives.de/en/hairpin-stator/>.
- [108] JUNG J, HELM A, LIEBOLD J. Improved efficiency of electric drives with additively manufactured roebel bar windings[J]. MTZ Worldwide, 2021, 82(4): 54-58.



鞠孝伟

在线出版日期: 2023-08-28。

收稿日期: 2023-04-27。

作者简介:

鞠孝伟(1991), 男, 工学博士, 讲师, 研究方向为新型特种电机及其控制、电气化载运装备用高功率密度驱动电机的设计及控制, juxiaowei@sut.edu.cn;

张凤阁(1963), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型特种电机及其控制、可再生能源发电系统、电气传动与电机智能控制, zhangfg@sut.edu.cn;

程远(1979), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括电动汽车驱动电机设计、控制、优化, 新材料新结构电机, 宽禁带半导体驱动控制系统, chengyuan@hit.edu.cn;

刘光伟(1983), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向永磁及特种电机领域基础理论和应用基础, liugw@sut.edu.cn。

(编辑 陈娟)