电动飞机推进电机发展及关键技术



张典,梁培鑫

西北工业大学,陕西西安 710072

摘 要:电推进电机是电动飞机发展的关键,国内外开展了大量研究,但是研究成果较为分散,缺乏对推进电机发展的总结。 本文综述了电动飞机电推进电机的研究成果,分别从结构拓扑、永磁体排布、绕组拓扑、极槽配合和散热等几个方面总结了 电推进电机的关键技术,并对未来数十年内电动飞机电推进电机的发展趋势进行了展望,为未来电推进电机的发展提供技术参考。

关键词:电动飞机; 电推进电机; 功率密度; 散热

中图分类号:TM301

文献标识码:A

随着航空工业领域的发展和环境问题的日益突出,全球 对于飞机电动化的需求与日俱增。电推进电机作为电动飞 机的核心动力部件,其综合能力的好坏直接影响飞机的性 能^[1-4]。与传统燃油航发相比,电推进电机具有能源转化效 率高、无污染、噪声小的显著优点,早在20世纪各国就开始 了研究。

随着电推进电机技术的不断更新和换代,围绕高性能 电推进电机的相关研究逐渐聚焦在如何提高电机功率密度 上^[5-7]。功率密度与电机的结构、工艺、材料等多种因素有 关,相关研究提出提升功率密度的思路也呈现出多样性,但 是未见对电推进电机关键技术综述的报道。本文结合国内 外电推进电机的研究成果,从电机结构拓扑、永磁体排布、 极槽配合、定子绕组拓补、高效散热和高温超导技术6个方 面,综述电动飞机电推进电机的关键技术,为未来电推进电 机的发展提供技术参考。

1 高性能推进电机国内外研究现状

近20年来,随着大功率永磁同步电机(PMSM)的发展, 电推进电机在航空领域的应用逐渐增多。虽然其搭载平台 仍以无人机为主,但已有一些研究机构和企业对载人飞机

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.03.001

电推进电机进行了研究并取得了诸多进展。2003年,首架 全电载人飞机Lange Antares 20E完成飞行,其搭载了42kW 的电推进电机^[8]。随后几年,一大批电动飞机试验机陆续 完成试飞,如Diamond DA36 e-Star^[9]、波音HK-36^[10]燃料电 池示范机、空客的 e-Genius 电动滑翔机^[11]和 E-Fan 系列电 动飞机^[12]等。针对民航客机领域,空客还推出了混合动力 民航客机 E-Fan X,该型号使用燃气轮机发电,驱动4台罗 罗 2MW 电机,最多可搭载 70人^[13]。这些试验机展示了航 空电推进电机的可行性,并为后续技术的开发做出了贡献。

2010年以来,随着电机极对数技术的不断进步,西门 子、Emrax、YASA、Rotex Electric和MGM COMPRO等公司 也推出了自己的电推进电机。与前述的测试型号相比,这 些电机在功率密度、转矩密度和效率等技术指标上堪称优 秀,已经拥有了实用价值,可以用于驱动小型载人飞机。 2015年,西门子为Walter Extra公司的330LX特技飞机提供 了SP260D电机,该电机采用液冷散热,重量(质量)50kg,功 率可达260kW,由参数可得其最大功率密度为5.2kW/kg^[14]。 电机采用两套独立绕组的冗余式设计,保证了可靠性。斯 洛文尼亚Emrax公司推出了Emrax268航空电推进电机,该 电机为轴向磁通结构,体积控制极佳,外径仅268mm,轴向 长度仅91mm,重量仅19.9kg,而最大转矩可达500N·m,峰值

基金项目: 航空科学基金 (20180836003, 2019ZC053013);陕西省自然科学基金 (2021JQ-113)

引用格式: Zhang Dian, Liang Peixin. Overview of the development and key technologies of electric aircraft propulsion motors [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(03):1-10. 张典, 梁培鑫. 电动飞机推进电机发展及关键技术综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(03):1-10.

收稿日期: 2023-09-04;退修日期: 2024-01-05;录用日期: 2024-02-02

功率达230kW,功率密度理论上高达11.5kW/kg,而最大效率 超过了 98%^[15]。英国 YASA 公司为 General Aviation Cessna 337 Super Skymaster 电动飞机研制了型号为 YASA-750 R 的 电推进电机,采用轴向磁通结构,油冷散热,其外径368mm, 轴向长度98mm,重量37kg,而峰值转矩为790N·m,最大功 率200kW,功率密度可达5.4kW/kg^[6]。捷克高性能永磁同步 电动机制造商Rotex Electric专门为电动小型飞机(EPOS)项 目设计了REB 90 电推进电机,其具备紧凑的设计,重量 23kg,持续功率30kW,最大功率为80kW,功率密度可达 3.47kW/kg。捷克MGM COMPRO公司为空客、美国国家航 空航天局(NASA)等机构配置了高性能电推进系统。该系 统采用直驱方式,电机型号为REB 50 series,采用外转子结 构,外径266.8mm,轴向长度76mm,电机功率为50kW,而重 量仅12.5kg,功率密度可达4kW/kg^[16]。以上几个电驱动电 机型号的功率密度都接近或超过了4kW/kg,已经属于高功 率密度电机。这些型号标志着电驱动电机技术已初步满足 载人飞行的要求,证明了轻型有人电动飞机的可行性。

通过对研究现状的总结和分析可知,电动飞机电推进 电机已取得了显著的进展,并展现出了良好的发展前景和 应用潜力。与此同时,大多数研究将重点放在以下方面:首 先,相关研究最关注的指标是电机的功率密度;其次是电机 温升的抑制;最后,电机的可靠性和适配性设计也受到了重 视。下面将对这六大关键技术分别展开论述。

2 电推进电机关键技术

功率密度是飞机电推进电机最重要的指标。功率密度 又称比功率或功重比,物理意义是电机的功率*P*和质量*M* 的比值。在电动飞机电推进电机中,大多数关键技术的发 展都是以提升功率密度为目的。

电机的功率密度可由式(1)表示[17]

$$\frac{P_{\text{out}}}{M} = \frac{1}{1 + K_{\phi}} \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} \frac{D_g^2 L_e}{M} \tag{1}$$

式中, K_{ϕ} 为转子和定子的电负荷之比;m为相数, m_1 为每个 定子的相数; K_e 为是电动势系数; K_i 为电流波形系数; K_p 为电 功率波形系数; η 为电机效率; B_g 为气隙磁密;A为电流线负 荷;f为电流频率;p为极对数; D_g 为气隙直径; L_e 为铁芯有效 长度;M为电机的质量。式(1)可化简为^[18]

$$\frac{P_{\text{out}}}{M} \propto B_{\text{g}} A \frac{f}{p} \frac{D_{\text{g}}^2 L_{\text{e}}}{M} \propto B_{\text{g}} A n \frac{D_{\text{g}}^2 L_{\text{e}}}{M}$$
(2)

式中,n为电机转速。由此可见,功率密度与电机气隙磁密、 电流线负荷两个变量分别成正比,因此,为了提升电机功率 密度,应该设法提升其电负荷与磁负荷。为了达到这一目的,常见的措施包括优化电机结构拓扑、设计合理的永磁体 阵列、选择最佳极槽组合、改进绕组拓扑和工艺,以及提升 散热效率等。

2.1 **电机结构拓扑**

航空电推进永磁电机按照结构和气隙磁通方向可分为 径向磁通(RFPM)和轴向磁通(AFPM)两种,目前,两种电 机都广泛应用于航空推进系统中,并且各有优劣。

径向磁通电机的定转子为圆柱形,包括内转子、外转子 和双转子三种构型,如图1所示^[19]。



作为一种永磁同步电机,径向磁通电机拥有良好的动态性能,且效率和功率密度高于其他励磁方式的电机^[20-21]。 卡尔斯鲁厄工学院的内置式永磁体(IPM)径向磁通电机, 功率密度达到了5kW/kg,是目前公认的功率密度最高的径 向磁通电机之一。

在所有径向磁通电机中,内转子电机是最常用的类型,结构也最简单;与之相比,外转子电机的功率因数和功率密度稍高一些;而双转子电机相对前两种具有更明显的性能优势:在同等的电机外径、长度和效率下,双转子电机构型拥有最低的整机质量和最高的功率密度,其功率因数接近1。然而,由于其结构复杂,双转子电机并不如其他两种电机常用^[19]。

轴向磁通电机的定转子为盘形,分为单转子和双转子 两种构型,如图2所示^[22]。

轴向磁通电机不但拥有永磁同步电机高效率、高功率密 度的优点,还有一些独特的优势。首先,与径向电机相比,轴 向磁通电机的盘式结构对铁芯导磁材料的利用更充分,在相 同尺寸下,轴向磁通电机的输出功率更高;其次,轴向磁通电 机有利于增加电机极对数。这些优点使得轴向磁通电机在 功率密度上相对径向磁通电机具有优势^[23]。此外,在尺寸相 当的前提下,轴向磁通电机转子的转动惯量小于径向磁通电 机,因此动态响应更快,客观上有助于设计更高带宽的控制



器,这样的控制器能有效地驱动整个工作范围内的风扇推进器,防止其在运行过程中出现失速现象^[24]。由于轴向磁通电机在中转速高功率条件下的良好性能,随着交流永磁同步电机在交通工具领域逐渐取代了直流电机,轴向磁通电机也越来越多地用于汽车轮毂电机和轻型电动飞机电推进电机,其中一些型号的功率密度高于径向磁通电机^[25-28]。

虽然轴向磁通电机在相同尺寸条件下性能优于径向磁 通电机,但其也存在一些明显的缺点。一方面,轴向磁通电 机的转子直径较大,所需电机轴承更加复杂,因此难以提高 转速;另一方面,轴向磁通电机的结构不利于散热冷却。由 于上述缺陷,轴向磁通电机的功率目前还无法达到民航燃 油航发的兆瓦级别,只能用于轻型载人飞机,再加上定子绕 组的电流承载能力有限,轴向磁通电机在开发的目标上主 要还是针对低功率范围(数百千瓦级别)^[28]。

2.2 永磁体排布

在永磁同步电机中,永磁体的排列方式对电机的磁场 分布和性能影响很大。航空电推进电机常用的永磁体排列 方式可分为表贴式(SPMSM)和内置式(IPMSM),而内置 式又可分为V形、D形和平形,如图3所示^[29]。

上述所有排列方法中,表贴式结构最简单也最常见,其 永磁体贴在转子气隙一侧表面。表贴式永磁电机用于航空 电推进电机时,为了帮助永磁体对抗高转速产生的离心力, 需用保持环额外加固^[30-31]。

与表贴式相比,内置式电机磁阻转矩更大,气隙磁密较低,大电流下的磁化风险较小。其中V形和D形在起动转 矩和输出转矩方面明显优于表贴式电机,而F形转矩性能



Fig.3 Four magnet arrangement configurations

在4种排列中最差[29]。

此外,內置式排列的铁芯过厚,转子体积比其他结构更 大,且相邻永磁体间的磁桥漏磁现象显著。这导致了内置 式电机的功率密度低于表贴式和其他排列方式^[19]。

与几种经典排列方式不同,Halbach阵列由多个不同充 磁方向的永磁体组成,目的是产生具有谐振特性的磁场,磁 场在一个方向上强,而在另一个方向上相对较弱或消失^[32]。 其磁路比内置式电机更为通畅,且等效磁路更长,但是消耗 永磁材料更多。如图4(a)所示,完全Halbach阵列由一系列 充磁方向渐变的永磁体紧密相接而成,该结构大幅节约了转 子轭的体积,但是成本是同尺寸表贴式电机的三倍以上。图 4(b)展示了一种简化版Halbach阵列,其中只有径向充磁和 切向充磁两种永磁体离散分布。该结构成本仅比表贴式电 机高10%,而转矩性能优于V形和双层V形内嵌式电机^[33]。

Halbach阵列的应用范围很广,在交通领域广泛用于驱动电机中^[34-35]。



图 4 网种 Haibach 平列 Fig.4 Two arrangements of Halbach arrays

2.3 磁极对数和极槽配合

电动飞机电推进电机的极对数和极槽配合都会影响电机功率密度。其中,极对数与功率密度的关系最为明显。 以一台额定转速4800r/min、每极每相槽数q=0.5、电流密度 15A/mm²的电机为例,其损耗和功率随极对数变化的规律 见表1^[36]。

表1 不同极对数电机的性能 Table 1 Performance of motors with different number of pole pairs

极槽配合	定子 铁损/W	转子轭 铁损/W	永磁体 损耗/W	功率/kW	输出转 矩/(N·m)
12极18槽	387	978	1164	25.5	50.8
18极27槽	1117	260	342	31.4	62.5
20极30槽	1263	191	273	32.1	63.9

由表1可见,在尺寸和每极每相槽数不变的前提下,随 着永磁体极对数的增加,电机的输出转矩将会提升,与此同 时电机转子永磁体中的涡流损耗呈现快速下降的趋势,电 机转子铁耗也出现了显著降低。因此,在驱动器频率范围 和电机所需调速范围允许的情况下,可以通过增加永磁体 极对数来提高电机转矩密度(即转矩和体积的比值),从而 提高功率密度。但是,极对数的增加会导致电机定子铁耗 快速上升,对散热冷却系统造成很大压力;此外,转速不变 时增加极对数就会同时增加所需驱动电路的频率,导致电 机难以控制。因此极对数并非越大越好。

在槽数方面,永磁同步电机可分为整数槽和分数槽。 为了设计方便和避免谐波,设计电机时一般优先采用整数 槽^[37-38]。然而,Golovanov等^[39]提出,电机最大功率密度对 应的极槽配合不一定是整数槽。因此,航空电推进电机若 想追求尽可能高的功率密度,则应选用分数槽结构,通过多 组试验,分别测得不同极槽配合的输出功率和损耗,从而找 出最合适的极槽组合。

2.4 定子绕组拓扑

定子绕组形态对航空电推进电机的性能影响较大,其 优化措施也呈多样化。

首先,在绕组的分布方面,永磁电机定子绕组可分为分 布式和集中式两种,它们各有优劣。每种构型的单层和双 层接线如图5所示。若采用集中式绕组,则绕组端部更短, 铜线体积减少,电机的质量减轻,铜损降低;若选择分布式 绕组,则转矩脉动减少,电机效率提高,平均转矩提高^[40-42]。

其次,在绕组的工艺方面,常采用 Hairpin 工艺进行绕 线^[43]。该结构由预先形成发卡形的矩形截面导体组成,插 入定子槽中,并最终焊接固定,如图6所示^[44-45]。相较于普 通绕组,使用 Hairpin 绕组可以提高槽满率,进而改善提升 电机的功率密度^[46];Hairpin 绕组内各导线相对位置固定,线 圈之间电压差较小;此外,Hairpin 绕组可以节约绝缘层涂



图 6 Hairpin绕组示意图 Fig.6 Illustration of Hairpin winding

料,提高导体向铁芯的传热效率;最后,Hairpin绕组便于采 用机器绕线,提高生产效率^[45]。

Hairpin绕组的主要缺点是交流损耗较高^[47-51]。该问题 可以通过采用Litz线代替圆线来解决。Litz线是一种由多 股独立绝缘线缠绕而成的导线结构,相邻绝缘线之间会经 过交错换位。该结构可以有效减小交流电的集肤效应,从 而减少交流损耗。Litz线常用于电机、变压器等高频率器 件,也适用于制造Hairpin绕组^[51]。

2.5 高效散热技术

电机散热冷却性能对功率密度有着重要影响。散热冷却 性能决定了电机在高功率运行时的热量排散能力,进而影响 其功率密度的提高^[52]。高功率密度电机由于体积小、单位体 积的功率大,而表面积小,因此需要高效散热技术以防止温升 过快。电机散热技术包括风冷、油冷、水冷、导管冷却技术。

法国赛峰集团为混合动力小型支线客机推出了 ENGINeUS 45电机,其额定功率为45kW,功率密度达到 2.5kW/kg,转速为2500r/min。该电机采用风扇冷却,图7为 其风扇叶片。



图 7 ENGINEUS 45风扇 Fig.7 ENGINEUS 45 fan

美国国家可再生能源实验室提出了一种主动对流油冷 技术,其主要是利用主动对流液体(ATF)对电机进行喷雾或 直接冷却,被广泛应用于汽车行业的变速器系统中。ATF具 有低黏度、抗氧化和防腐蚀等特性,使得它适合用于传导和 冷却电机部件。由于ATF大多绝缘,在电机冷却中,ATF可 以通过射流的方式直接接触电机的线圈。通过将ATF射流 喷射到电机的导线绕组表面上,可以迅速地将导线表面的热 量带走。这是因为射流中的ATF能够带走导线绕组产生的 热量,并将其传递到周围环境中。在这个过程中,ATF的温 度和射流的速度是重要的因素。温度的变化可以影响到 ATF的传热性能,而射流的速度则可以影响到ATF的冷却效 果。图8展示了一个典型的车载电机冷却装置设计,其同时 包括了ATF冷却和一个使用冷却套传统冷却装置^[53]。

美国通用电气全球研发中心提出了一种关于高功率密 度电机的转子水冷却方案。该方案能够在平衡旋转摩擦损 失、流体泄漏和系统压降的同时,为电机提供良好的散热效 果。其结构最大的特点是在转子每个绕组槽和磁极体中分 别开辟了径向偏置的轴冷却剂通道,如图9所示。电机工作 时,冷却液由特制旋转液体传送装置流入中空的芯轴,由径 向通道流入转子各轴通道,穿过绕组槽(磁场绕组热在此处 产生)和磁极体(高频涡流发热和风阻损耗可以在此处从磁 极面上带走)。这种布置方案将冷却剂通道放置在最靠近各 种分立发热源的部位,从而比起常规的冷却剂只流过线圈槽 的单一冷却通道结构,大大降低了热传导温度梯度^[54]。







哈尔滨工业大学提出了一种关于高功率密度电机在定 子齿根与轴的接口处安装热管的导管冷却方案。由于热管 的管壁很薄,可以有效降低热通道的热阻,以迅速带走电机 内热量,达到良好的散热效果^[55]。

黄元峰^[56]针对大功率密度低体积电机,提出了一种采 用蒸发冷却技术。电机定子采用半封闭槽,径向槽与轴向 槽用于导入导出冷却剂。电机内部的排气管与排气压力可 调的阀板连接,一旦电机内部的冷却剂达到沸点(60°C),压 力推动阀门打开,(绝缘)冷却剂喷到减速器上带走热量。

2.6 高温超导技术

高温超导也是目前航空电推进电机的技术路线之一。 超导电机大量使用高温超导(HTS)材料,直流损耗可以忽 略^[57-58]。此外,超导电机最突出的特点在于磁负荷。普通 电机的气隙磁密一般在0.4~1T之间^[59-61],而超导电机的气隙磁密可达17.6T^[62-64],其功率密度的提升潜力巨大。近年来,超导电机逐渐成为热门研究趋势。

2005年,NASA格伦研究中心提出了一种超导电机的 拓扑结构,如图10所示^[65]。其转子和定子导线都用超导材 料制成。根据超导线圈和集成式制冷机在不同温度和磁场 方向下的临界电流测量结果,NASA提出了一种确定超导 线圈和集成式制冷机热需求的方法;同时,设计了一种具有 正应力裕度的安全壳结构,以实现系统磁最优。为了达到 超导现象所需的温度,该研究项目初期计划使用液氮冷却 的BSSCO材料,缺点是作为超导体的承载电流有限。故后 期计划待新超导材料单域钇钡铜氧(YBCO)成熟后可用其 替代。此外,针对以液氢为燃料的驱动系统,还提出了硼化 镁材料线圈、使用液氢冷却的超导电机方案。



图 10 超导电机 Fig.10 Superconductor motor

同年,NASA的Masson等^[66]为其全电飞机项目研制了 一款高性能超导电机。该型号采用了YBCO材料和全新构 型。电机的定子磁极由薄饼状的环形线圈和大块超导板按 顺序叠加构成,且可以自由地选择线圈数量。以三个线圈 的情况为例,组合排列顺序为薄饼状环形线圈-超导板-薄 饼状环形线圈-超导板-薄饼状环形线圈,如图11所示。

当电机有多个线圈时,则所有线圈同轴放置,相邻线圈 通入电流方向相反,从而在大块超导板上产生径向磁场,该 磁场均匀分布在绕轴的线圈之间,大块超导板的数量决定 了磁极对数。

超导板通过磁通捕获来改变电感线圈磁场角,其材料 YBCO冷却后能捕获非常高的磁通量密度(在30K下,用树脂 浸渍的直径为24mm的YBCO颗粒中截留磁密超过15T)。超 导材料运用两步冷却法进行冷却:首先在工作温度下冷却线 圈,使得电流上升;再将YBCO板在线圈径向场的作用下冷却



图 11 线圈和超导板的排列方式 Fig.11 Arrangement of coils and superconduct plates

到工作温度。

系统的状态如图 12 所示:粗箭头表示捕获场,细箭头 表示场线圈提供的场。当超导板未达到饱和时,其磁通量 只会随着电流深入而略有变化,磁密分布接近图 12 里箭头 的分布。产生的磁场呈现出 8 个极,4 个由捕获场的磁通量 产生,4 个由磁场线圈产生。



Fig.12 Distribution of magnetic field

有限元分析的结果验证了方案的可行性,电机功率密 度达到了5.86kW/kg。电机外观如图13所示。

3 结论与展望

提高功率密度是电动飞机电推进电机的主流研究方向。通过改进结构拓扑、永磁体排布、极槽配合、绕组拓扑、 散热冷却等关键技术,以及高温超导技术的使用,可以有效 提高电动飞机电推进电机的功率密度。在结构拓扑方面, 轴向磁通电机展现出了更高功率密度的优势;在永磁体排 布方面,Halbach阵列的排布方式得到了广泛应用;在极槽 配合方面,分数槽集中式绕组更有利于提高功率密度;在散 热冷却技术方面,风冷、油冷、水冷和导管冷却几种方法均



Fig.13 Appearance of the motor

有应用,其中风冷因不需要附加冷却系统,而被广泛关注。 除此之外,高温超导材料也因零电阻低损耗的特性,被逐渐 应用到大功率电推进电机的研究中。

随着电推进技术的成熟,未来大型电动飞机对电推进 电机的需求越来越迫切。兆瓦级电推进电机是下一阶段的 主流发展方向,关键技术将聚焦于以下几个方面:(1)优化 电机(尤其是轴向磁通电机)的散热和转动机构强度,使其 适应更高转速;(2)改进定转子冲片结构,在不破坏结构强 度的前提下利用辅助槽减重;(3)改进永磁体阵列,使用远 少于Halbach阵列的永磁体用量实现相近的性能;(4)采用 软磁材料IJ22和取向电工钢(GOES)等新型铁芯材料^[67]; (5)改进绕线工艺,以提高槽满率、减小端部绕组长度,如一 体成形的绕组线圈;(6)针对HTS电机研发全新的工艺和结 构拓扑,显著提升功率密度,同时降低成本。

参考文献

- [1] Bolam R C, Vagapov Y, Anuchin A. Review of electrically powered propulsion for aircraft [C]. 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2018: 1-6.
- Schäfer A W, Barrett S R, Doyme K, et al. Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft
 [J]. Nature Energy, 2019, 4(2): 160-166.
- [3] Wheeler P. Technology for the more and all electric aircraft of the future[C]. 2016 IEEE International Conference on Automatica, 2016: 1-5.
- [4] 李开省.碳中和目标下航空能源转型研究 [J].航空科学技术, 2021, 32(9): 1-11.
 - Li Kaisheng. Research on the transformation of aviation

energy under the goal of carbon neutrality [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 1-11. (in Chinese)

[5] 王森.无人机主推进高力能密度永磁电动机关键技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学, 2014.Wang Sen. The key technology research on main propulsion

high energy density permanent magnet motor of unmanned aerial vehicle [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014. (in Chinese)

- [6] Bolam R C, Vagapov Y, Anuchin A. A review of electrical motor topologies for aircraft propulsion[C]. 2020 55th International Universities Power Engineering Conference, 2020: 1-6.
- [7] Kovalev K, Nekrasova J, Ivanov N, et al. Design of allsuperconducting electrical motor for full electric aircraft[C].
 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2019: 1-5.
- [8] Steffen D. Aerorevue Antares 20E : Ein Elektro-Segelflugzeug im Steigflug [EB/OL]. (2011-07-19). https://www. langeaviation.com/aerorevue-antares-20e/.
- [9] Diamond Aircraft Industries. Diamond aircraft proudly presents the world's first serial hybrid electric aircraft "DA36 E–Star" [EB/OL].(2011-06-23).https://www.diamondaircraft.com/en/aboutdiamond/newsroom/news/article/diamond-aircraft-proudly-presents-the-worlds-first-serial-hybrid-electric-aircraft-da36-e-star/.
- [10] Lapeña-Rey N, Mosquera J, Bataller E, et al. First fuel-cell manned aircraft [J]. Journal of aircraft, 2010, 47(6): 1825-1835.
- [11] University of Stuttgart. E-Genius [EB/OL]. (2022-09-11). https:// www.ifb.uni-stuttgart.de/en/research/manned aircraft/e-genius/.
- [12] Airbus. Hybrid and electric flight Low-carbon aviation [EB/ OL]. (2021-07-01). https://www.airbus.com/en/innovation/lowcarbon-aviation/hybrid-and-electric-flight.
- [13] Airbus. E-Fan X: Electric flight [EB/OL]. (2021-07-01). https:// www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-andelectric-flight/e-fan-x.
- [14] Tacke W, Boric M. World directory of light aviation 2015-2016 [EB/OL]. (2023-12-12). http://viewer. zmags. com/services/ htmlviewer/content/13488368?pubVersion=37&locale=en_us&viewerID=66219aac#/13488368/254.
- [15] Fornaro E, Cardone M, Dannier A. A comparative assessment of hybrid parallel, series, and full-electric propulsion systems

- [16] Siadkowska K, Czajka B, Ścisłowski K, et al. Analysis of propulsion units dedicated to test stands for aviation systems
 [J]. Combustion Engines, 2021, 185(2): 39-43.
- [17] Huang Surong, Luo Jiang, Leonardi F, et al. A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1): 92-97.
- [18] Alvarez P, Satrústegui M, Elósegui I, et al. Review of high power and high voltage electric motors for single-aisle regional aircraft [J]. IEEE Access, 2022, 10: 112989-113004.
- [19] Mitsuda H, Miyama Y, Ito K, et al. Design of electric machine for electric aircraft: A case study of rotor-stator configurations and magnet arrangements[C]. 2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2020: 1-12.
- [20] El-Refaie A, Osama M. High specific power electrical machines: A system perspective [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(1): 88-93.
- [21] Adib A, Afridi K K, Amirabadi M, et al. E-mobility— Advancements and challenges [J]. IEEE Access, 2019, 7: 165226-165240.
- [22] Bojoi R, Cavagnino A, Miotto A, et al. Radial flux and axial flux PM machines analysis for more electric engine aircraft applications[C]. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010: 1672-1679.
- [23] Benzaquen J, He J, Mirafzal B. Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(3): 177-193.
- [24] Connolly J W, Chapman J W, Stalcup E J, et al. Modeling and control design for a turboelectric single aisle aircraft propulsion system[C]. 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2018: 1-19.
- [25] Sitapati K, Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1219-1226.
- [26] Capponi F G, de Donato G, Caricchi F. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2190-2205.

- [27] Cavagnino A, Lazzari M, Profumo F, et al. A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1517-1524.
- [28] Gieras J F, Wang R J, Kamper M J. Axial flux permanent magnet brushless machines [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media, 2008.
- [29] Zhou Chenxi, Huang Xiaoyan, Fang Youtong, et al. Comparison of PMSMs with different rotor structures for EV application[C]. 2018 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2018: 609-614.
- [30] Mekhiche M, Kirtley J L, Tolikas M, et al. High speed motor drive development for industrial applications[C]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 1999: 244-248.
- [31] Munteanu G, Binder A, Schneider T, et al. No-load tests of a 40kW high-speed bearingless permanent magnet synchronous motor[C]. SPEEDAM 2010, 2010: 1460-1465.
- [32] Ofori-Tenkorrang J, Lang J. A comparative analysis of torque production in Halbach and conventional surface-mounted permanent-magnet synchronous motors[C]. the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 1995: 657-663.
- [33] Lindh P, Petrov I, Pyrhönen J, et al. Comparison of Halbach rotors with other PM structures [C]. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019: 721-726.
- [34] Mecrow B C, Jack A G, Atkinson D J, et al. Design and testing of a four-phase fault-tolerant permanent-magnet machine for an engine fuel pump [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 671-678.
- [35] Atkinson G J, Mecrow B C, Jack A G, et al. The analysis of losses in high-power fault-tolerant machines for aerospace applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1162-1170.
- [36] Wolnik T, Opach S, Cyganik Ł, et al. Design methods for limiting rotor losses in a fractional slot PMSM motor with high power density [J]. Archives of Electrical Engineering, 2022, 71 (4): 963-979.
- [37] Liwschitz M. Electric machinery[Z]. D. Van Nostrand Company,

1950.

- [38] Bianchi N, Pre M D, Grezzani G, et al. Design considerations on fractional-slot fault-tolerant synchronous motors[C]. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005: 902-909.
- [39] Golovanov D, Gerada D, Xu Zeyuan, et al. Designing an advanced electrical motor for propulsion of electric aircraft[C].
 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2019: 1-12.
- [40] Lee J J, Kim W H, Yu J S, et al. Comparison between concentrated and distributed winding in IPMSM for traction application[C]. 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2010: 1172-1174.
- [41] Zhang Peng, Ionel D M, Demerdash N A. Saliency ratio and power factor of IPM motors with distributed windings optimally designed for high efficiency and low-cost applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4730-4739.
- [42] Ahsanullah K, Dutta R, Rahman M. Analysis of low-speed IPMMs with distributed and fractional slot concentrated windings for wind energy applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-10.
- [43] Popescu M, Goss J, Staton D A, et al. Electrical vehicles— Practical solutions for power traction motor systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2751-2762.
- [44] Berardi G, Nategh S, Bianchi N, et al. A comparison between random and hairpin winding in e-mobility applications[C].
 IECON 2020 the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020: 815-820.
- [45] 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.
- [46] Berardi G, Bianchi N. Design guideline of an AC hairpin winding[C]. 2018 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2018: 2444-2450.
- [47] Hämäläinen H, Pyrhönen J, Nerg J. AC resistance factor in onelayer form-wound winding used in rotating electrical machines
 [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(6): 2967-2973.
- [48] 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), 2018: 4398-4405.

- [49] Morisco D P, Rapp H, Iepure I L, et al. Extended modelling approach of hairpin winding eddy current losses in high power density traction machines[C].2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020: 874-880.
- [50] Noerenberg C, Redlich J, Ponick B. Novel method for considering AC copper losses in traction motors[C]. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020: 947-953.
- [51] Otomo Y, Igarashi H, Sano H, et al. Analysis of litz wire losses using homogenization-based FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(8): 1-9.
- [52] Kellermann H, Lüdemann M, Pohl M, et al. Design and optimization of ram air-based thermal management systems for hybrid-electric aircraft [J]. Aerospace, 2020, 8(1): 3.
- [53] Bennion K, Moreno G. Convective heat transfer coefficients of automatic transmission fluid jets with implications for electric machine thermal management[C]. International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, 2015.
- [54] Jarczynski E D. Liquid cooling the rotor of an electrical machine [Z]. PatentsGoogle. 1993
- [55] 王洋, 索双富, 李锦林, 等. 基于冷热中和方式的高功率密度 电机短时过载散热方案设计[J]. 机械工程与技术, 2021, 10 (5): 547-554.

Wang Yang, Suo Shuangfu, Li Jinlin, et al. Design of heat dissipation for temporary overload of high power density motor based on neutralization of high and low temperature [J]. Mechanical Engineering and Technology, 2021, 10: 547-554. (in Chinese)

- [56] Huang Yuanfeng, Wang Haifeng, Gu Guobiao. Design of highpower density and low-volume motor based on evaporationcooling technology[C]. 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012: 1-4.
- [57] Masson P J, Breschi M, Tixador P, et al. Design of HTS axial flux motor for aircraft propulsion [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1533-1536.
- [58] Pienkos J E, Masson P J, Pamidi S V, et al. Conduction cooling of a compact HTS motor for aeropropulsion [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 2150-2153.

- [59] Stumberger G, Aydemir M T, Zarko D, et al. Design of a linear bulk superconductor magnet synchronous motor for electromagnetic aircraft launch systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(1): 54-62.
- [60] Dezhin D, Ivanov N, Kovalev K, et al. System approach of usability of HTS electrical machines in future electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 28(4): 1-5.
- [61] Corduan M, Boll M, Bause R, et al. Topology comparison of superconducting AC machines for hybrid electric aircraft [J].
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(2): 1-10.
- [62] Gruss S, Fuchs G, Krabbes G, et al. Superconducting bulk magnets: Very high trapped fields and cracking [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(19): 3131-3133.
- [63] Durrell J H, Dennis A R, Jaroszynski J, et al. A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with

shrink-fit steel [J]. Superconductor Science and Technology, 2014, 27(8): 082001.

- [64] Oka T, Hirayama E, Kanai T, et al. Strong magnetic field generator containing HTS bulk magnets and compact refrigerators
 [J]. IEEE transactions on Applied Superconductivity, 2013, 24 (3): 1-4.
- [65] Brown G V, Kascak A F, Ebihara B, et al. NASA Glenn Research Center Program in high power density motors for aeropropulsion [R]. NASA/TM-2005-213800, 2005.
- [66] Masson P J, Luongo C A. High power density superconducting motor for all-electric aircraft propulsion [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 2226-2229.
- [67] Fang Shuhua, Liu Huan, Wang Haitao, et al. High power density PMSM with lightweight structure and high-performance soft magnetic alloy core [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.

Overview of the Development and Key Technologies of Electric Aircraft Propulsion Motors

Zhang Dian, Liang Peixin

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: The electric propulsion motor is the key to the development of electric aircraft. A lot of research has been carried out at home and abroad, but the research results are relatively scattered, and there is a lack of summary of the development of the propulsion motor. This paper reviews the research results of the electric propulsion motor of the electric aircraft, and summarizes the key technologies of the electric propulsion motor from the aspects of structural topology, permanent magnet arrangement, winding topology, pole slot matching, and heat dissipation, and looks forward to the development trend of the electric propulsion motor of the electric aircraft in the next few decades. This research provides technical reference for the future development of electric propulsion motors.

Key Words: electric aircraft; electric propulsion motor; power density; heat dissipation

Received: 2023-09-04; Revised: 2024-01-05; Accepted: 2024-02-02

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20180836003, 2019ZC053013); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(2021JQ-113)