

航空永磁推进电机冷却技术综述

张卓然, 薛涵*, 高华敏, 林秋雨, 华雨茜

(多电飞机电气系统工信部重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 211106)

Overview of Cooling Technologies for Aviation Permanent Magnet Propulsion Motors

ZHANG Zhuoran, XUE Han*, GAO Huamin, LIN Qiuyu, HUA Yuxi

(Center for More-electric-aircraft Power System (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),

Nanjing 211106, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The permanent magnet (PM) propulsion motor is a critical power component in aviation electric propulsion systems, where efficient cooling technology is essential for enhancing motor performance and ensuring reliable operation. Compared with ground-based motors and conventional aviation motors, the cooling technologies for aviation PM propulsion motors face more stringent and specialized requirements and challenges, necessitating further research and breakthroughs. This paper first summarizes the characteristics, requirements, and classifications of cooling technologies from multiple dimensions. Considering the unique characteristics of aviation propulsion motors and their cooling systems, it systematically discusses the mechanisms, current research progress, applicability of thermal conduction, convective heat transfer, and phase-change heat transfer technologies for high power/torque density PM propulsion motors across various types of aviation electric propulsion systems. On this basis, the development trends of new cooling technologies for propulsion motors, integrated cooling of propulsion motors and inverters, and comprehensive thermal management for propulsion motors and propulsor units are systematically reviewed.

KEY WORDS: electric propulsion aircraft; permanent magnet propulsion motor; high power/torque density; cooling technology; thermal management

摘要: 永磁推进电机是航空电推进系统的核心动力装置, 其高效冷却技术对推进电机的性能提升和可靠运行至关重要。与地面电机和传统航空电机相比, 航空永磁推进电机的冷却

技术面临着更加严峻且特殊的要求和挑战, 亟待进一步研究与突破。该文首先从多个维度归纳了推进电机冷却技术的特征、要求与分类。由航空推进电机及其冷却系统的特殊性出发, 系统讨论高功率/转矩密度永磁推进电机传导传热技术、对流传热技术及相变传热技术的作用机理、研究现状以及在不同航空电推进系统中的适用性; 在此基础上, 对推进电机新型冷却技术、推进电机及逆变器集成化冷却技术及推进电机与桨扇动力装置综合热管理技术发展趋势进行系统展望。

关键词: 电推进飞机; 永磁推进电机; 高功率/转矩密度; 冷却技术; 热管理

0 引言

电推进飞机将飞机动力系统电气化, 能够大幅提升飞机能量利用效率、降低碳排放, 是航空业绿色发展的重要途径^[1-5]。欧美各国已全面实施电推进飞机发展战略^[6-8]。近年来, 我国大力推动电推进飞机发展, 工信部、科技部等部门先后印发《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)》、《通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)》, 指出要“加快绿色航空制造业发展”, “到2027年, 以无人化、电动化、智能化为技术特征的新型通用航空装备在城市空运、物流配送、应急救援等领域实现商业应用”。电推进飞机是我国航空业绿色发展的必然选择, 是实现与世界航空强国并驾齐驱的重要领域^[9]。

推进电机系统是电推进飞机中的核心动力单元, 取代传统飞机中的发动机直接为飞机提供推进动力, 决定了电推进系统的能源利用率和推进效能。电推进飞机对推进电机系统的安全性、轻量化和效率等方面提出了相比传统航空电机更为严苛的性能要求^[10-12]。永磁电机具有高功率密度和高效率的突出优势, 是目前研究和应用中飞机推进电机

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”联合基金重点项目(U2141223); 江苏省科技重大专项项目(BG2025041); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24_0574)。

The Key Project of the National Natural Science Foundation of China “Ye Qisun” Joint Fund (U2141223); Major Science and Technology Projects in Jiangsu Province (BG2025041); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX24_0574).

的主流类型^[13-15]。

随着近年来永磁推进电机的快速发展, 其电磁拓扑设计规律趋于明晰, 进一步的拓扑优化对推进电机功率/转矩密度等关键性能的提升空间有限。而推进电机的冷却技术直接决定其功率/转矩密度水平和安全运行能力, 对推进系统输出能力、轻量化、复杂度、可靠性等方面均具有重要影响, 亟需进一步研究和突破^[16-18]。

推进电机中, 较高的温升会造成绕组铜损增加和永磁体磁能积降低, 引起电机功率密度、效率等性能的下降; 而过高的温升则会导致绕组绝缘损坏、永磁体不可逆退磁等问题, 影响系统安全运行。因此, 高效冷却技术对航空推进电机的性能提升和可靠运行至关重要。相比于地面电机与传统航空电机, 航空永磁推进电机的冷却技术面临着更加严峻且特殊的要求和挑战, 在发展现状和设计规律上呈现出显著差异^[19]。

基于此, 本文首先归纳推进电机冷却技术的特征、要求与分类, 重点阐述其与地面电机和传统航空电机冷却技术相比的特殊性; 随后, 分别对航空推进电机的传导传热技术(拓扑与线型优化、灌封传导传热、延伸结构传导传热、附加装置传导传热等)、对流传热技术(风冷、水冷、油冷等)及相变传热技术(热管冷却、蒸发冷却、固液相变冷却等)进行梳理和讨论; 最后, 对推进电机新型冷却和综合热管理技术发展趋势进行展望。

1 推进电机冷却技术的特征、要求与分类

1.1 推进电机冷却技术的特征与要求

与电动汽车、多电/全电飞机等应用场合的电机相比, 航空永磁推进电机的冷却技术具有以下特殊的特征与要求:

1) 技术指标极限化。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在航空电推进系统评估中要求, 百千瓦级推进电机功率密度高于 6 kW/kg, 兆瓦级推进电机功率密度高于 13 kW/kg, 效率高于 96%^[20]。航空推进电机的大功率、高功率/转矩密度要求使得推进电机具有高电磁负荷特征, 导致其单位体积的损耗和发热量较传统航空电机显著增加, 对冷却技术提出更高挑战。此外, 推进电机在飞机起飞阶段常工作于过载状态, 此时电机系统的损耗密度迅速升高, 温升问题更加严峻。

2) 应用条件严苛化。航空推进电机冷却系统面临严苛的重量与安装空间限制, 设计自由度显著受限。此外, 不同于多电飞机中的发动机起动/发电机、燃油泵驱动电机等应用场合, 纯电推进系统缺乏可直接利用的滑油介质和燃油热沉, 无法借助现有热管理资源实现冷却功能; 涡轮电或混合电推进系统中虽然仍配备发动机滑油/燃油系统, 但推进电机通常布置较远, 需通过复杂管路与之连接, 不利于冷却部件复用与系统集成。因此, 推进电机冷却系统需要在满足轻量化、紧凑化及冷却介质可用性等多重约束条件下, 进行综合权衡设计。

3) 系统要求多样化。航空推进电机冷却技术的具体要求与飞机类型及大小等级、动力系统布局等密切相关, 在不同电推进系统中的要求存在显著差异。例如, 目前大多数小型电推进飞机仍采用常导冷却技术, 但随着高温超导电机在航空领域的研究推进, 部分小型电推进验证机也已开始探索超导冷却方案。相比之下, 大型电推进飞机则更有可能采用系统复杂、成本较高的低温超导冷却技术。集中式电推进飞机可采用较为复杂的冷却系统, 而分布式电推进飞机由于配备多个分散布置的推进电机, 其冷却系统通常更加注重简易化要求。

4) 热控系统容错化。推进电机作为电推进飞机的核心动力单元, 其可靠性要求远高于地面电机或传统航空电机。为满足冗余容错要求, 推进电机大多采用双通道或多通道设计, 当某一通道发生故障时, 其余通道仍能通过过载运行输出额定功率^[21], 此时推进电机易出现温升增大和热点集中的问题。此外, 高可靠推进电机需具备热隔离能力, 即在某一相或某一通道发生故障时, 避免或减轻对其余相或通道绕组热特性的影响, 防止故障扩散。

5) 热点分布集中化。在严苛的航空电推进系统高功率/转矩密度和轻量化要求下, 永磁推进电机面临显著的热点集中问题。定子方面, 航空电推进系统倾向于采用高电压设计以降低线缆重量, 目前小型电动飞机的电压等级常为 400~800 V, 中大型电推进飞机则可高达 1~3 kV。高负荷运行使定子损耗高度集中, 而电压等级提升使得永磁推进电机的绕组设计趋向于更多匝数和更厚的绝缘层, 这势必对绕组导热性能产生不利影响, 进一步增大了定子部分的冷却散热难度。转子方面, 丰富的谐波和脉宽调制(pulse width modulation, PWM)高频驱动同样导致热点集中。尤其在高速电机中, 电机基频较

高,且转子空间受限、常规冷却手段难以布置,进一步加剧了热管理挑战。

6) 冷却结构精细化。由于推进电机冷却系统面临严苛的冷却散热要求以及重量尺寸限制,其冷却结构更宜采用精细化设计。集成化自冷却系统有助于简化整体系统架构,并进一步降低系统重量,但同时也对冷却结构提出了更高的精细化要求。高性能热管理材料^[22]及增材制造^[23]等先进工艺的发展为精细化冷却结构提供了关键技术支撑。

1.2 推进电机冷却方式分类

永磁推进电机的冷却方式可按照不同维度进行分类,如图 1 所示。按照冷却部件,推进电机冷却方式可分为定子绕组冷却、定子铁心冷却、转子和转轴冷却等^[24-25]。由于航空推进电机与传统电机相比具有更高的损耗密度和热密度,因此不宜采用简单的机壳冷却方式,而需针对热源特点进行匹配的热管理设计。对于高功率/转矩密度永磁推进电机,较高的电磁负荷使电枢绕组与定子铁心损耗集中,显著增加散热难度,对定子部分的热管理方案提出严苛要求;转子部分常通过永磁体损耗抑制等措施避免温升带来的永磁体性能下降和退磁问题,但对于高速推进电机仍需对转子和转轴摩擦损耗发热进行着重考虑和抑制。

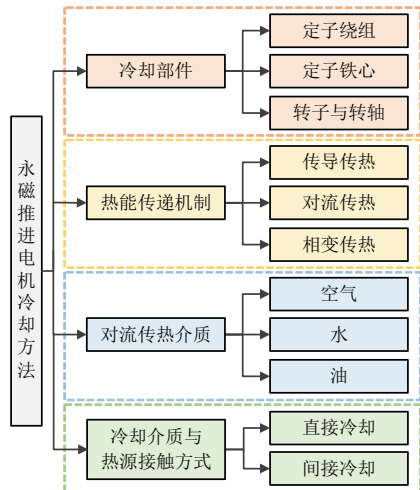


图 1 永磁推进电机冷却方式分类
Fig. 1 Classification of cooling methods for PM propulsion motors

按照热能传递机制,推进电机冷却方式常分为传导传热、对流传热两类(忽略热辐射作用),实际冷却系统中常由二者共同作用完成热量传递。热传导又称传导传热,指物体无相对位移时依靠微观粒子热运动而导致的热量传递;热对流又称对流传热,指流体宏观运动引起相对位移而导致的热量传

递。热对流仅能发生在流体中,且必然伴随有热传导现象^[26]。除传导传热、对流传热外,推进电机还可采用相变传热冷却方法,通过物质吸收或释放潜热发生相态变化进行热量传递。

按照对流传热介质,推进电机冷却方式可分为风冷、水冷、油冷等^[27-29]。常见对流传热介质在标况下的热物理性质如表 1 所示。空气是一种可简单利用的冷却介质,但其热导率较低,对冷却效率造成限制。液冷介质中,水与油相比具有更高的热导率和比热容,热交换效果更好,但其低绝缘性和低沸点导致其无法与绕组等热源直接接触,仅能作为间接冷却方式使用。为了克服水介质沸点较低的不足,实际使用中往往采用水-乙二醇混合溶液以提高沸点,提高水冷系统的环境适应性。油因其较低的热导率和比热容,作为间接冷却方式效果欠佳,但可与热源直接接触,从而实现高效直接冷却。在涡轮电推进或混合电推进飞机中,发动机通常配备有滑油/燃油系统,可供电机冷却系统共享使用。

表 1 常见对流传热介质热物理性质
Table 1 Thermophysical properties of typical convective heat transfer media

介质	密度/(kg/m ³)	热导率/(W/K/m)	比热容/(kJ/kg/K)	沸点/℃
空气	1.205	0.025 9	1.005	-196
水	998.2	0.6	4.183	100
水-乙二醇溶液	1073	0.38	3.281	107.8
滑油(4050 航空滑油)	971	0.152 4	1.91	>200
燃油(RP-3)	757	0.112	2.1	185

按照冷却介质与热源是否直接接触,推进电机冷却方式可分为直接冷却和间接冷却,其传热路径示意图如图 2 所示。直接冷却方式中,直接冷却介质(空气、油等)与热源直接接触,通过热对流进行热量传递;间接冷却方式中,热源热量首先通过内部热传导传递至冷却介质接触面,再由间接冷却介质(空气、水、油等)通过热对流传递至热沉。由于定子槽内导体间隙的影响,定子内部热传导系统的热导率通常较低。因此,即便采用强对流传热方法,间接冷却系统的冷却效果仍会很大程度上受到内部热传导效率的限制,造成温度分布不均和局部严重热点。为增强热传导效率,间接冷却系统可采用具有高热导率的附加导热系统缩短电机内部热传导路径。热源热量首先通过内部热传导传递至附加导热系统,随后,由该系统以更高的导热效率向外传递至冷却介质接触面,最后,由间接冷却介质

通过热对流传递至热沉。

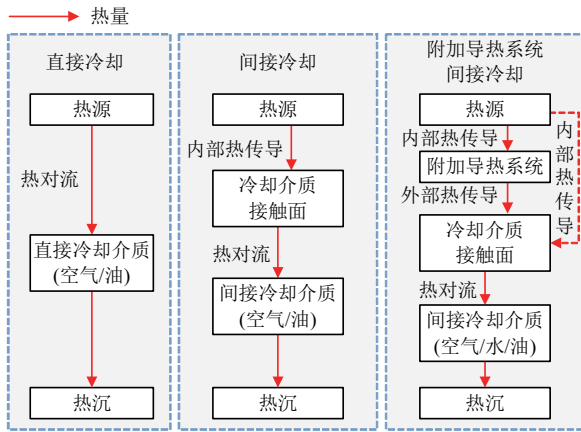


图 2 直接冷却与间接冷却系统传热路径示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of heat transfer paths of direct and indirect cooling systems

2 推进电机传导传热技术

热传导又称传导传热，是推进电机热传递的关键环节。导热能力与材料热导率和尺寸直接相关，可由导热热阻 R_{cond} 表征：

$$R_{\text{cond}} = L / (kA_{\text{cond}}) \quad (1)$$

式中： L 为导热方向长度； k 为材料热导率； A_{cond} 为垂直于热流方向的截面积。

受限于定子槽内较差的热传导能力，永磁推进电机的冷却散热即使在强对流传热方法下，仍然会很大程度上受到内部导热效率限制，这一影响在间接冷却方式下尤为显著。为突破推进电机热传导效率，可采用以下方式实现增强导热型冷却系统。

2.1 拓扑与线型优化

推进电机在无特殊导热设计下的内部热传导效率直接由电机结构拓扑和材料热特性决定。文献[30]研究了定子槽数对电机热性能的影响，表明槽数增多虽然会导致槽满率降低，但槽宽的减小有利于电机内部导热效率提升，电机温升随槽数的增加先降低后增高。

绕组槽满率与线型也是影响电机内部导热能力的重要参数，导线绝缘和间隙易导致其等效热导率大大降低。若圆线绕组在槽内分布均匀，且铜占比在径向、切向方向上分布无明显差异，则绕组等效热导率可表示为

$$\begin{cases} \lambda_{\text{winding_ax}} = (1 - \sqrt{\zeta_{\text{Cu}}})\lambda_{\text{in}} + \sqrt{\zeta_{\text{Cu}}}\lambda_{\text{Cu}} \\ \lambda_{\text{winding_ra}} = \lambda_{\text{Cu}}\lambda_{\text{in}} / ((1 - \sqrt{\zeta_{\text{Cu}}})\lambda_{\text{Cu}} + \sqrt{\zeta_{\text{Cu}}}\lambda_{\text{in}}) \\ \lambda_{\text{winding_ta}} = \lambda_{\text{Cu}}\lambda_{\text{in}} / ((1 - \sqrt{\zeta_{\text{Cu}}})\lambda_{\text{Cu}} + \sqrt{\zeta_{\text{Cu}}}\lambda_{\text{in}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\lambda_{\text{winding_ax}}$ 、 $\lambda_{\text{winding_rx}}$ 、 $\lambda_{\text{winding_tx}}$ 分别为绕组轴向、径向与切向的等效热导率； ζ_{Cu} 为纯铜槽满率， λ_{Cu} 为纯铜热导率； λ_{in} 为绝缘热导率。

与传统圆线相比，扁线绕组可以显著提高槽满率和等效热导率，但在高频下易产生较大的涡流损耗[32-34]。单股绝缘、多股绞合的利兹线可有效抑制绕组涡流损耗，但其槽满率相对较低[35-37]。采用预压制绕组[37]或成型绕组[38-39]等方法能够提高圆线或利兹线绕组的槽满率，从而提升槽内热传导效率，但预应力过高可能导致绕组绝缘损坏。

为了实现兼具高槽满率和低涡流损耗的绕组构型，多所高校对不等截面扁线绕组进行了研究，如图 3(a)所示。该方法通过优化槽内不同位置扁线绕组的截面积，使得绕组损耗和发热分布更加均匀，从而降低损耗并抑制局部热点温升[40-42]。此外，南京航空航天大学提出了扁线-圆线混合绕组构型，如图 3(b)所示，该绕组由以一定角度差排列的槽底单套三相扁线绕组和槽口单套三相圆线绕组构成，油道置于两套绕组间以提供散热路径，与纯圆线绕组相比槽满率提高超 10%，与纯扁线绕组相比交流铜损大大降低，兼顾了电磁及热特性[43]。

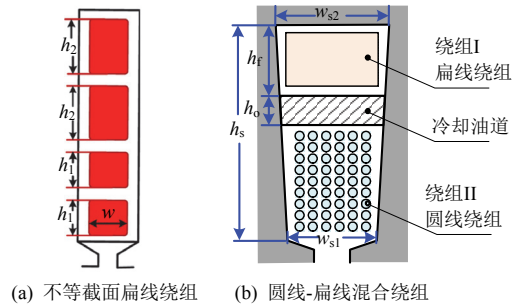


图 3 高槽满率低涡流损耗绕组线型

Fig. 3 Winding configurations with high slot fill factor and low eddy current loss

2.2 灌封传导传热

定子灌封是一种常见的电机增强导热技术，通过在定子部件间填充灌封材料，可显著提升电机内部热传导效率。此外，灌封还可起到定子固定补强作用，有利于增强电机结构可靠性。

常用的电机灌封材料有环氧树脂、有机硅等[44-46]，热导率通常为 0.2~5 W/(m·K)。随着相关工艺技术的进步，ALN 填料[47]、Ceramacast 复合材料[48]等高热导率灌封材料开始被应用，热导率可高达 40~100 W/(m·K)。目前灌封工艺仍在不断优化，包括灌封过程中的温度控制、材料固化过程的精确调节等，以保证灌封效果的稳定性和均匀性。

然而,灌封技术在航空推进电机应用中仍面临一些挑战,如灌封材料的选择需综合考虑导热性能、机械性能及环境适应性等因素,同时过高的灌封压力可能会导致绕组绝缘损坏。此外,灌封材料的附加重量可能不利于航空推进电机的轻量化设计。尽管灌封材料可提高电机内部等效热导率,但其热导率相较于导热金属等仍然偏低,因而对电机热传导效率的提升效果有限。

2.3 延伸结构传导传热

从电机自身结构拓扑角度出发,可采用电机延伸结构缩短槽内热传导路径,从而增强内部导热效率,其原理与增多槽数类似。诺丁汉大学^[49-50]和南京航空航天大学^[51]对铁心延伸结构(又称辅助齿结构)结合水冷或风冷方法进行了研究,如图4(a)所示,该方法具有显著的降低温升效果,且结构简单,易于实施。文献[52-53]中的轴向磁场 YASA 永磁电机分别采用机壳延伸结构与水道延伸结构,如图4(b)、(c)所示,表明二者构成的槽内翅片同样有助于加强散热。

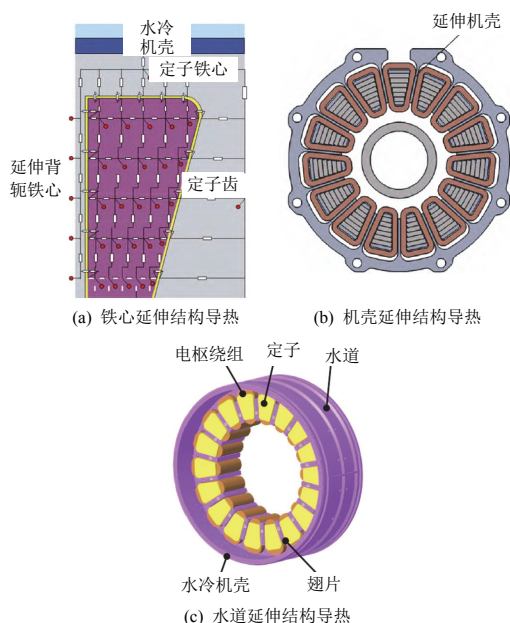


图4 延伸结构导热系统

Fig. 4 Extended structure heat conduction systems

2.4 附加装置传导传热

附加装置传导传热技术是另一种增强电机热传导效率的常见方法,导热装置材料通常为高热导率金属,如铜、铝等。诺丁汉大学针对窄、宽两种槽形分别提出了不同构型的槽内附加铜/铝板导热方法,如图5(a)所示,可将热点温度降低40%^[54],并研究了槽内T形铜板导热结构对飞机起落架驱动电机的增强散热效果^[55]。文献[56]针对单转子-单定

子轴向磁场永磁电机提出了定子铁心内置铜管与定子灌封相结合的强化导热系统,如图5(b)所示,相比单一水冷方法可将电机温升降低25℃~35℃。

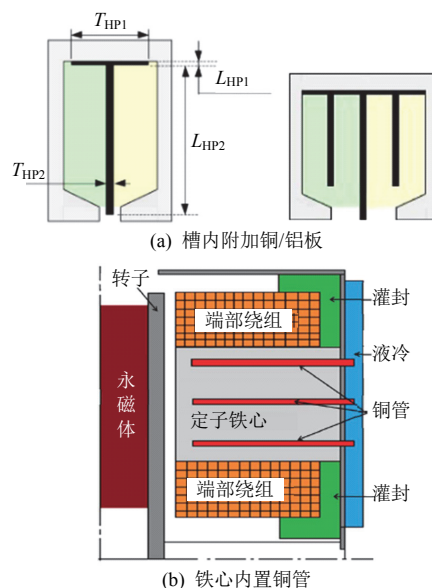


图5 附加装置导热系统

Fig. 5 Auxiliary device heat conduction systems

需要注意的是,虽然附加装置导热可以有效增强电机热传导效率、降低温升,但其通常会占用电机槽内或铁心空间,可能导致电机电磁输出能力降低和附加装置的额外涡流损耗等问题,因此在设计过程中应进行多物理场综合考虑。

3 推进电机对流传热技术

热对流又称对流传热,对流传热效率可由对流传热阻 R_{conv} 表征:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA_{\text{conv}}} \quad (3)$$

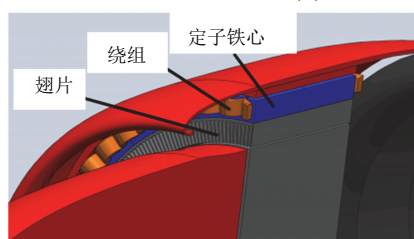
式中: h 为对流换热系数; A_{conv} 为换热面积。在航空推进电机应用中,强迫风冷的对流换热系数约为15~250 W/(m²·℃)^[18],强迫液冷的对流换热系数约为50~20 000 W/(m²·℃)^[27]。

3.1 风冷

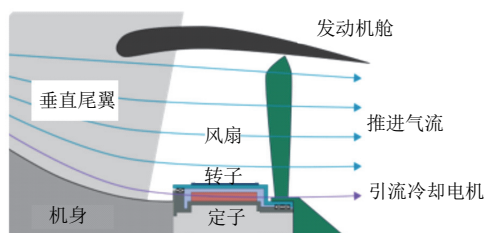
飞机推进电机的风冷方法有桨叶气流风冷和附加装置风冷两类。

利用桨叶气流进行推进电机冷却可以省去额外的冷却散热装置,从而获得较高的系统功率密度,具有系统架构简单、结构集成度高的突出优势。NASA X-57 飞机的60 kW 巡航推进电机和11 kW 高升力推进电机均通过桨叶气流进行直接冷却,其中60 kW 推进电机的平均对流换热系数为98 W/(m²·℃),电流密度达11 A/mm²^[57],如图6(a)所示。

NASA 和伊利诺伊大学为 STARC-ABL 飞机设计的 2.6 MW 推进电机也采用了桨叶气流风冷, 并采用散热翅片增大散热面积, 如图 6(b)所示^[58]。



(a) NASA X-57 飞机 60 kW 永磁推进电机



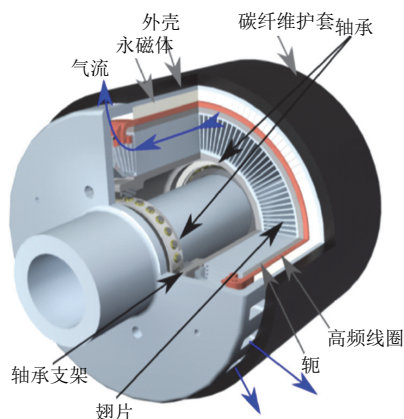
(b) NASA STARC-ABL 飞机 2.6 MW 推进电机

图 6 桨叶气流风冷系统

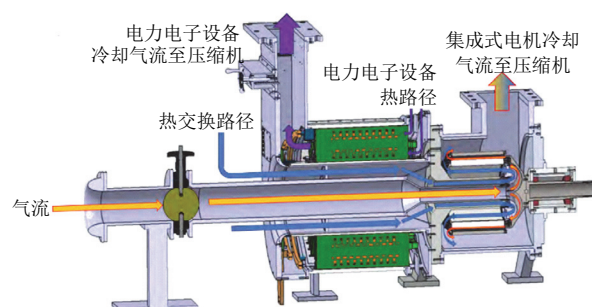
Fig. 6 Propeller-induced airflow cooling systems

然而, 冷却气流取决于桨叶转速与外部飞行环境, 冷却性能不易独立调控, 不适合精细温控需求; 且电机直接暴露在高速气流中, 对绕组绝缘可靠性造成挑战; 此外, 若为冷却目的额外开设导流或引流结构, 会干扰气动布局、产生不必要的飞行阻力、降低推进效率。

与桨叶气流风冷相比, 附加装置风冷方式虽然增加了系统重量和复杂度, 但冷却效果更为稳定, 且不会对飞机空气动力学产生影响, 更加适用于大功率、复杂工况的航空电推进系统。伊利诺伊大学研制的 1 MW 外转子永磁推进电机采用了自带风扇风冷方法, 轴向风速最高可达 30~40 m/s, 通过定子内侧散热翅片增大散热面积, 如图 7(a)所示^[59]。麻省理工学院的 1 MW 永磁推进电机通过压缩机产生的吸力驱动空气流经电机及控制器, 结合电机内



(a) 伊利诺伊大学 1 MW 永磁推进电机自带风扇风冷



(b) 麻省理工学院 1 MW 永磁推进电机压缩机吸气风冷

图 7 附加装置风冷系统

Fig. 7 Additional device air cooling systems

侧散热翅片实现高效冷却, 设计电流密度达 13.3 A/mm^2 , 如图 7(b)所示^[60]。

与液冷方式相比, 附加装置风冷方式虽然仍需配套的风扇、散热翅片等冷却部件, 但相较液冷所需的泵组、管路、散热器等组件重量较轻, 对系统功率密度的折损较小。此外, 风冷系统无密封问题, 相比液冷系统具有更高的可靠性和易维护性。然而, 风扇气流经由散热翅片对电机定子进行冷却, 属间接冷却方式, 其冷却效率受到一定限制。

3.2 水冷

水是一种优异的对流传热介质, 相比空气、油等介质具有更高的热导率和比热容。电动飞机中常采用水冷方式用于电池与电力电子设备的冷却散热, 在此情况下推进电机水冷可以实现冷却部件的复用, 从而降低系统复杂度^[61]。然而, 由于水的绝缘性较差, 因而不能与热源直接接触, 仅可作为间接冷却方式使用, 一定程度上限制了其冷却效果。

机壳水套冷却是应用最为广泛的水冷方法^[62-64]。诺丁汉大学针对小型全电飞机设计的 550 kW 永磁推进电机采用周向螺旋型水套冷却, 额定电流密度为 9.5 A/mm^2 , 如图 8(a)所示^[65]。文献^[66]对周向水套和轴向水套进行了对比研究, 表明轴向水套相比周向水套具有更高的对流换热系数, 但由于机壳水冷方式下电机温升主要受内部热传导效率限制, 因此优化水套结构对温升的抑制效果并不显著。单定子-单转子^[67]或双定子-单转子^[68]轴向磁场永磁电机同样可以采用机壳水套冷却方式, 于定子轴向外侧布置机壳水套, 如图 8(b)所示; 而双转子-单定子轴向磁场永磁电机的定子轴向两侧均由转子围绕, 无法采用机壳水套冷却方式。总体而言, 机壳水套冷却方法的冷却结构较为简单, 但水套与绕组热源距离较远, 冷却效果受电机内部热传导效率限制严重。

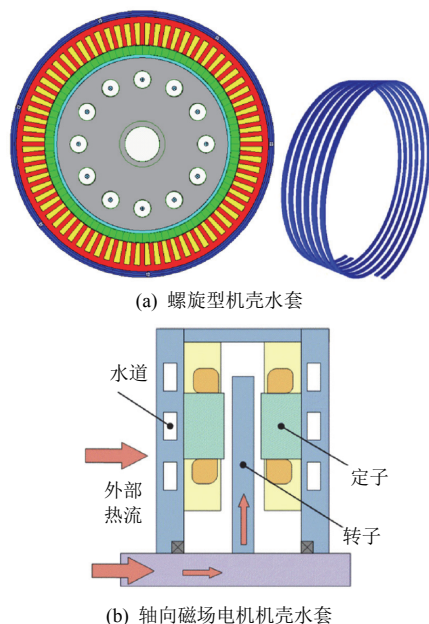


图8 机壳水套冷却系统

Fig. 8 Casing water jacket cooling systems

为了缩短水道与热源间的传热距离,可采用水冷板冷却方法,将水冷板贴近定子铁心或绕组以实现更高效的传热。华中科技大学提出了多层定子铁心水冷板方法,多层水冷板与定子铁心直接接触,与机壳水套方法相比可将额定工况温升降低 20°C 以上,如图 9(a)所示^[69]。沈阳工业大学针对双转子轴向磁场永磁电机提出了槽内内外循环水冷结构,与轴向内外循环水冷结构相比具有散热面积大、散热效果好、进出口压降小的优势,如图 9(b)所示^[70]。水冷板冷却系统相比机壳水套能够显著提高冷却

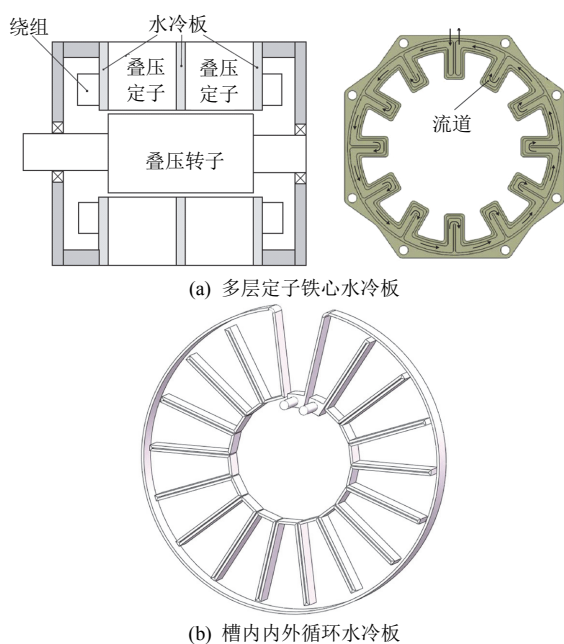


图9 水冷板冷却系统

Fig. 9 Water cold plate cooling systems

效率,但仍属于间接冷却系统,冷却效果与直接冷却相比欠佳,且水道布置在结构复杂或尺寸要求严格的推进电机中受到限制。

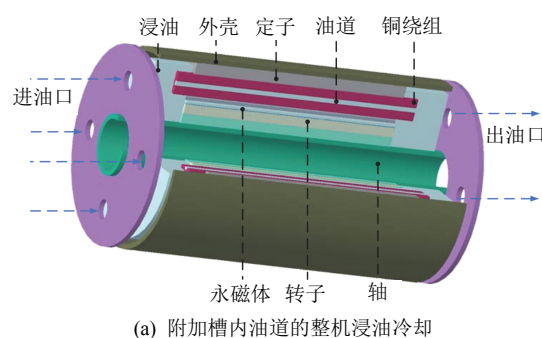
3.3 油冷

油具有良好的绝缘性,可以与电机内部部件直接接触。直接油冷方法与风冷、水冷方式相比通常具有更强的冷却效果,有利于提高推进电机的功率/转矩密度,是近年来航空电推进永磁电机产品常用的冷却方法之一。

定子油冷包括循油、喷油、浸油等方式。其中,循油冷却通过定子外侧的循油油道对定子铁心进行冷却,结构较为简单,但冷却油未与定子内部部件接触,无法充分发挥直接冷却的优势。

定子喷油冷却可于电机轴向两端或壳体顶端开设喷油孔,对端部绕组冷却效果较强^[71]。诺丁汉大学及伦敦玛丽女王大学针对发卡绕组永磁电机设计了喷油冷却系统^[72-73],并通过实验对比了不同喷嘴形式和数量对电机温度分布的影响,表明喷油冷却电机电流密度可达 23 A/mm^2 以上。然而,喷油冷却方式油量分散,对大功率电机易造成发热不均和严重的局部热点问题^[74]。

浸油冷却方法可分为整机浸油和定子浸油两类。整机浸油冷却将电机的定子与转子整体浸没于油中,冷却效果优异,且不易漏油,但转子旋转会导致气隙部分产生搅油损耗,在电机高速运行时尤为显著,造成发热增加和效率下降。诺丁汉大学研制的 9.7 kW 、 $8\,700\text{ r/min}$ 永磁电机采用了整机浸油结合槽内油道冷却方法,如图 10(a)所示,长时间运行电流密度可达 $25\sim 30\text{ A/mm}^2$ ^[75]; 10 kW 、 $19\,000\text{ r/min}$ 永磁电机同样采用该冷却方式以实现 27.2 A/mm^2 电流密度^[76]。北京航空航天大学针对飞机电液作动器设计的 15 kW 、 $20\,000\text{ r/min}$ 永磁电机同样采用了整机浸油冷却,如图 10(b)所示,并对其搅油损耗进行了研究,表明 $20\,000\text{ r/min}$ 下搅油损耗占电机总功率高达 20% ^[77]。



(a) 附加槽内油道的整机浸油冷却

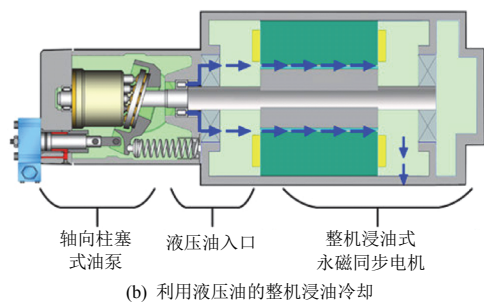


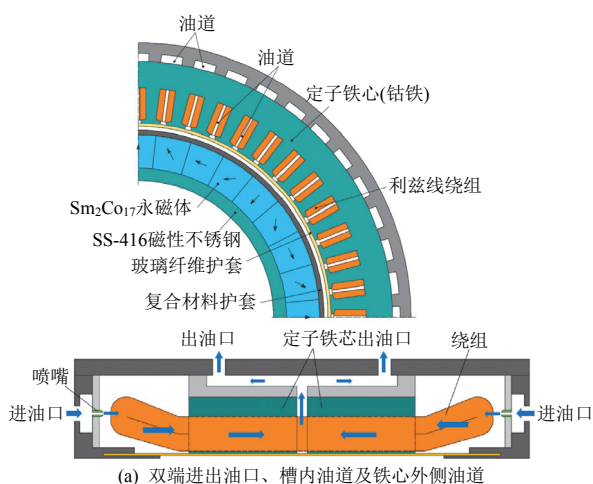
图 10 整机浸油冷却系统

Fig. 10 Full-machine oil-immersed cooling systems

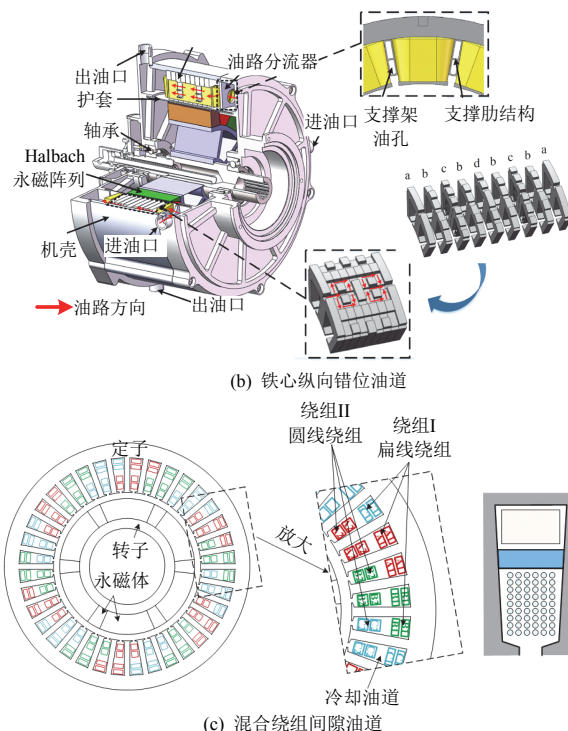
为了避免转子搅油损耗, 可通过隔油套将定子密封浸没于油中, 即为定子浸油冷却。该冷却方法在实现定子高效冷却的同时避免了高速转子造成的大量油摩擦损耗, 尤为适用于损耗主要集中于定子部分的永磁推进电机, 但需对其密封问题格外关注, 防止漏油故障。密封隔油套需具有较强的耐高温性、耐腐蚀性和机械强度, 且厚度需较薄, 以避免电磁气隙增大造成电磁性能下降, 目前多选用玻璃纤维、凯夫拉等材料。

诺丁汉大学针对混合电推进飞机设计的 4 MW 高速永磁发电机采用定子密封浸油冷却, 结合双端进出口、槽内油道和铁心外侧油道设计, 预计电流密度可达 27.5 A/mm^2 , 如图 11(a)所示^[78]。华中科技大学提出了一种结合定子浸油和铁心纵向错位油道的冷却结构, 可实现 30 A/mm^2 的高电流密度, 如图 11(b)所示^[79]。南京航空航天大学研制的 100 kW 定子浸油永磁电机在 19.2 A/mm^2 电流密度下实测绕组温升仅 28°C ^[21], 在此基础上对 360 kW 永磁推进电机进一步提出基于混合绕组间隙油道的浸油冷却系统, 额定工况下双通道绕组温升均不超过 25°C , 如图 11(c)所示^[43]。

轴向磁场电机也可采用定子浸油方法实现高效冷却散热^[80-81]。YASA 公司和牛津大学研制的轴



(a) 双端进出口、槽内油道及铁心外侧油道



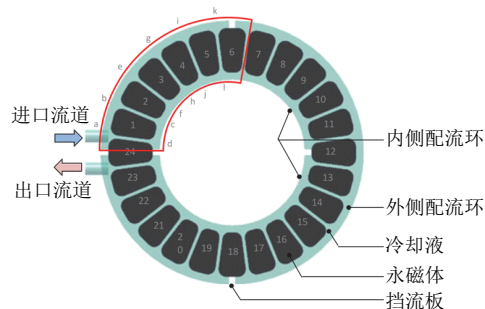
(b) 铁心纵向错位油道

(c) 混合绕组间隙油道

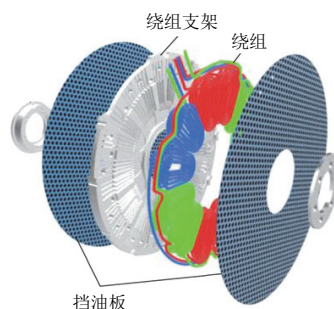
图 11 径向磁场永磁电机定子浸油冷却系统

Fig. 11 Stator oil-immersed cooling systems of radial-flux PM machines

向磁场 YASA 结构永磁电机产品即采用定子密封油冷, 如图 12(a)所示, 已应用于 Spirit of Innovation 电推进飞机^[82]。南京航空航天大学的 50 kW 轴向磁场定子无铁心永磁电机^[83]和南京理工大学的 120 kW 轴向磁场无轭永磁电机^[84]均通过定子浸油冷却实现了高电流密度设计, 冷却架构分别如图 12(b)、(c)所示。华中科技大学针对轴向磁场无轭永磁电机提出了具有针翅热交换结构的增材制



(a) YASA公司轴向磁场无轭永磁电机定子浸油系统



(b) YASA公司轴向磁场无轭永磁电机定子浸油系统

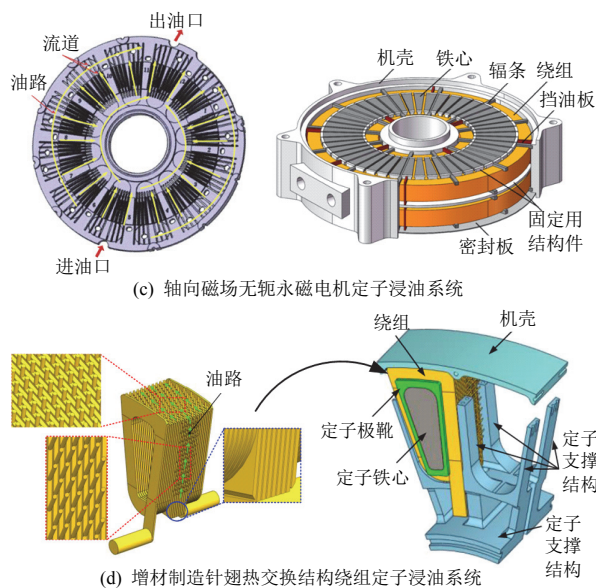


图12 轴向磁场永磁电机定子浸油冷却系统

Fig. 12 Stator oil-immersed cooling systems of axial-flux PM machines

造绕组定子浸油冷却系统,如图12(d)所示,相比常规矩形绕组浸油冷却可降低 27.6°C 温升^[85]。

对于高速永磁推进电机或次谐波丰富的分数槽集中绕组电机,其转子损耗相对较大,因此通常也需对转子部件进行针对性冷却设计,以应对高频高谐波下转子涡流损耗、风摩损耗、机械损耗等引起的发热。转子空心轴通油冷却是一种可靠高效的转子冷却方案,在对转子部件进行直接冷却的同时,也可利用转子离心力对轴承喷油进行润滑与冷却,从而提高轴承可靠性,适配连续高速运转的航空电推进系统应用场景。

转子空心轴油冷主要有两种方式:直接空心轴油冷和循环空心轴油冷。直接空心轴油冷在轴两侧分别设置进出口,油路结构简单,但转子两端均须设置动密封,泄漏风险更高^[86-87]。而循环空心轴油冷方式采用内-外双层通道设计,冷却油在转子内部完成闭环流动,使得进出油口集中在轴的同一端^[88-89]。华中科技大学研制的130 kW永磁电机即采用了循环空心轴油冷系统,如图13(a)所示^[88]。相比直接空心轴油冷,循环空心轴油冷方式具有更高的对流换热系数,这一优势在低转速、低流量条件下更加显著。另一方面,该方式降低了转子动密封要求,同时,便于在电机非驱动端集中布置油冷系统配件,可靠性更高。此外,可利用空心轴油冷系统同时向定子组件喷油提供辅助冷却。天津大学对带辅助喷油的空心轴油冷系统进行了研究,如图13(b)所示,冷却油经径向油道进入空心轴腔内,

同时在离心力作用下向端部绕组喷油,相比传统喷油冷却方式能够降低电机温升15%以上^[90]。

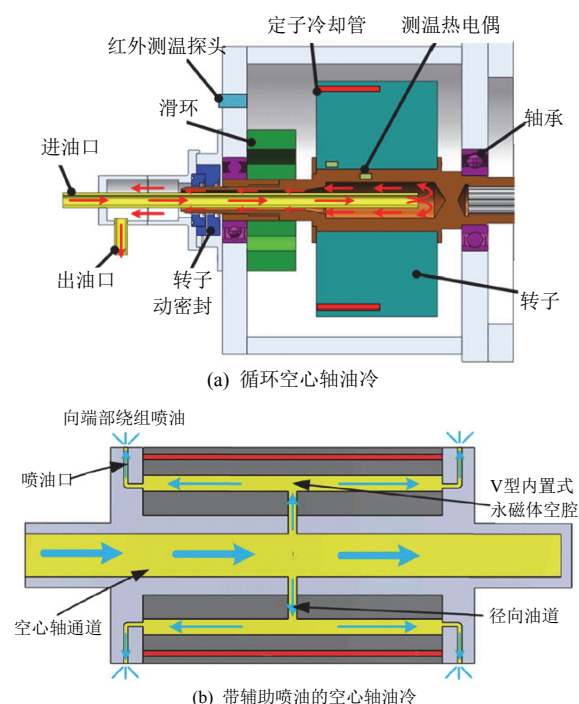


图13 空心轴通油冷却系统

Fig. 13 Hollow shaft oil cooling systems

在推进电机油冷系统的实际应用中,可将多种油冷方式组合使用,以满足不同发热部件的冷却需求,降低局部热点。例如将定转子的冷却油路进行耦合设计,通过进油口“一分二”结构实现定子浸油与转子空心轴油冷的集成。

传统多电/全电飞机中的发电机、燃油泵驱动电机等通常可利用系统中原有的燃油和滑油进行冷却,无需额外的冷却液和散热系统。然而,纯电推进飞机一般无机载油供直接利用,因此需要额外的泵组、管路、散热器等配套组件,这些附加组件不可避免地造成系统功率密度下降;涡轮电或混合电推进飞机中虽然仍配备发动机滑油/燃油系统,但推进电机通常与之距离较远,需通过复杂管路与之连接,不便于冷却部件复用与系统集成。基于此,油冷系统可与风冷方式结合使用,构建油-气复合冷却系统,从而在实现高效直接冷却的同时降低配套冷却部件的重量和复杂度。目前,油-气复合冷却方式已在一些电机产品中获得了初步应用,但其在航空电推进系统中的作用机理和设计规律尚不明晰,仍需进一步研究突破。

4 推进电机相变传热技术

除上述传导传热、对流传热冷却方法外,相变

传热技术作为一种新型热管理方法正逐步应用于推进电机冷却中。相变传热是指物质通过吸收或释放潜热发生相态变化所伴随的热量传递现象，包括液-气、固-液、固-气等相变形式。推进电机适用的相变传热技术主要包括热管冷却、蒸发冷却、固液相变冷却等。

4.1 相变传热系统特征与分类

相变传热通常为复合传热系统，不仅包含潜热的吸收与释放，还常伴随着相界面热传导、传质(如蒸发时的汽化分子扩散)、对流耦合以及毛细作用、表面张力驱动流动等多物理过程。相比单纯的显热传导或对流传热，相变传热具有高热通量密度、强温控能力和良好热稳定性的特点。

尽管热管冷却、蒸发冷却、固液相变冷却均涉及工质的相变过程，并借助潜热实现热量调控，但其本质作用与工程目标存在显著差异：

1) 热管冷却通过封闭腔体内工质的蒸发-冷凝循环实现热源与冷端之间热量的快速传递，从而显著提升等效热导率，降低热源区域的稳态热平衡温度，本质属于一种强化导热手段。

2) 蒸发冷却通过液体在汽化时吸收潜热，并依赖周围的气流或风扇系统带走水蒸气热量，从而直接降低热源区域温度，是一种适用于高瞬时热负荷的冷却方法。

3) 固液相变冷却则通过相变材料在相变温度附近吸收大量潜热，提升系统的热容和热稳定性，从而在温度基本恒定的条件下延缓被冷却对象的温升，其作用类似于“热能缓冲器”。

综上，从传热机制来看，热管冷却属于强化导热型技术，通过加速热量传递间接降低热源温度；蒸发冷却则通过液体蒸发带走热量，直接降低热源温度；而固液相变冷却则属于控温型热储存技术，通过吸热延缓温升、平衡热波动。3 者虽均涉及相态变化，但在热管理系统中的应用目标与适配场景存在根本性差异，可归纳为表 2 所示。

4.2 热管冷却

热管是一种利用相变工质的蒸发、冷凝过程实现高效传热的特殊导热装置，其相变传热原理如图 14 所示。热管由外壳、毛细芯、蒸汽腔 3 部分组成，外壳通常选用高热导率金属材料，如铜、铝、不锈钢等。毛细芯通过在气液相界面产生毛细力来驱动液体工质回流，直接影响热管内部工质的循环效率和整体传热能力。其中，沟槽型毛细芯具有制

表 2 电机相变传热技术(热管冷却、蒸发冷却、固液相变冷却)特征对比

Table 2 Comparison of motor phase change heat transfer technologies(heat pipe cooling, evaporation cooling, solid-liquid phase change cooling)

相变传热技术	热管冷却	蒸发冷却	固液相变冷却
相变类型	液-气相变 (蒸发-冷凝)	液-气相变 (蒸发)	固-液相变 (熔化-凝固)
主要目标	强化导热， 降低温升	蒸发散热， 降低温升	提供热缓冲， 延缓温升
是否降低 热源温度	是	是	否
是否储热	否	否	是
适用场合	持续运行工况	短时间 高热负载工况	短时间 高热负载工况
优势	超高等效 热导率、低能耗	快速降温能力强、 适应高热密	温度稳定、结构 简单、低能耗
缺陷	依赖冷端散热 条件，结构集成 难度较高	系统复杂且存在 漏液和绝缘风险， 环境敏感	适应工况单一， 连续高负荷 下易热饱和和失效

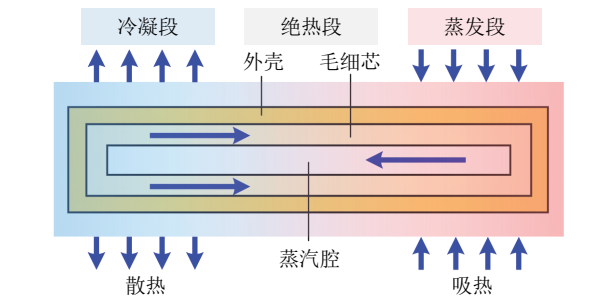


图 14 热管相变传热原理

Fig. 14 Phase change heat transfer principle of heat pipes

造工艺简单、流动阻力小的优点，但其毛细力较弱，抗重力性能有限；相比之下，烧结型毛细芯能够提供更强的毛细驱动力和更均匀的液体回流通道，因而具有更优的传热性能。热管内部液体工质的选取需综合考虑有效温度范围、热稳定性、蒸汽压、汽化潜热、表面张力及热导率等因素。相比各种有机工质，水凭借较高的汽化潜热和表面张力，通常能实现更高的传热效率和更稳定的循环性能^[91]。

热管等效热导率可达 $10^3\sim10^6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 数量级，远高于常用的金属材料，具有传热性能好、传热距离远的优势，近年来在电机冷却中得到了广泛研究和应用^[92-93]。其冷凝端通常可由散热翅片风冷或水套水冷等方式进行冷却，吸热端可灵活安装于电机机壳、绕组、铁心等部位，也可安装于转子铁心作为旋转热管增强导热^[94]。对于发热集中于定子部分的永磁推进电机，以槽内绕组热管和定子铁心热管两种形式最为有效。

槽内热管与绕组直接接触,尤为适合发热集中于定子绕组的直驱式高转矩密度推进电机。哈尔滨工业大学^[95]、清华大学^[96]、诺丁汉大学^[97]、海军工程大学^[98]均对电推进飞机用永磁电机的槽内热管结合散热翅片风冷方法进行了研究,槽内绕组通常嵌于双层集中绕组间隙。诺丁汉大学研究表明该方法可将电机电流密度由 7.9 A/mm^2 提升至 14.7 A/mm^2 ,如图 15(a)所示^[97]。南京理工大学对比了 35 kW 轴向磁场 YASA 永磁电机的传统风冷、附加铜管风冷和槽内热管风冷方法,电机在 3 种风冷方式下的最高温度分别为 220.9°C 、 181.4°C 和 149.9°C ,表明了热管冷却的优越性^[99];此外对 25 kW 永磁起动发电机的槽内热管水冷方法进行了研究,相比传统水套冷却可将电机输出功率提升 25%,如图 15(b)所示^[100]。

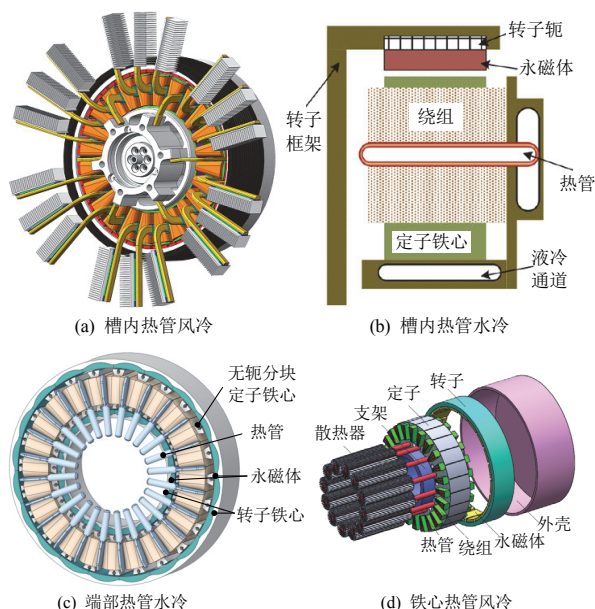


图 15 热管冷却系统

Fig. 15 Heat pipe cooling systems

槽内热管能够显著提升对绕组的冷却效果,但同时占用了有限的槽内空间,降低了槽满率,且槽内漏磁场会在热管金属管壁中产生额外的涡流损耗,导致电机效率降低。因此,在实际应用中,应权衡热管在冷却性能提升与潜在电磁性能影响之间的关系。为了在实现高效冷却的同时最小化对电磁性能的不利影响,南京航空航天大学与南京师范大学提出了端部热管冷却方法,将热管贴合布置于集中绕组端部,如图 15(c)所示,尤为适用于轴长较短的扁平式高转矩密度永磁推进电机^[101]。

铁心热管一般放置于定子铁心轭部,在增强定子冷却效果的同时避免占用槽内面积和主要磁通

路径。哈尔滨工业大学^[102]和沈阳工业大学^[103-104]对铁心热管风冷方法进行了研究,如图 15(d)所示,表明该方法对定子铁心冷却效果极佳,但对绕组相对较差。南京师范大学设计的 110 kW 永磁电机将铁心热管与槽内热管水冷相结合,有利于进一步改善温度分布不均,降低整体温升,电机电流密度达 15 A/mm^2 ^[105]。

超薄平板热管工作原理与上述热管相同,主要区别在于其结构更为扁平紧凑,适用于狭小空间中的冷却需求。目前,随着制造工艺的不断进步,超薄平板热管的厚度已可低至 $0.4\sim 1.0 \text{ mm}$,显著优于常规热管的空间利用率,能够满足航空推进电机在尺寸、重量和集成度方面的严格约束要求。湖南大学将超薄平板热管布置于定子槽底,与绕组和定子铁心直接接触,使得热点温度降低超 14°C ,电机功率密度提高约 10%^[106]。

均温板是一种特殊的热管技术,同样利用相变工质的蒸发-冷凝-毛细回流原理实现传热,但在几何结构、热流传输路径和应用场景等方面与传统热管存在明显区别。热管通常呈圆柱状或扁平状,具备明确的蒸发端与冷凝端,热流主要沿管轴方向一维传输,适合狭小空间内热源到热沉的高效热传导;而均温板则为扁平二维结构,能够在平面内实现快速的二维横向热扩散,进而实现热量的均匀分布,更契合大面积发热组件的均热化应用需求。

4.3 蒸发冷却

蒸发冷却技术通过低沸点、高绝缘性的工质在蒸发过程中吸收大量潜热,并借助周围气流或风扇系统带走热量,从而有效降低热源区域温度。威斯康星大学^[107]、哈尔滨工业大学^[108]均对浸没式蒸发冷却技术进行了研究。将电机定子部件直接浸入绝缘液体(如去离子水、Novec 7000 等)中,电机运行产生的热量驱动液体相变为蒸汽,从而高效带走热量并显著提升传热速率。威斯康星大学实验结果表明,该方法可使电机在高达 40 A/mm^2 的电流密度下实现热安全运行,且绕组平均温度始终保持在 110°C 以下。相比传统风冷与液冷方式,蒸发冷却的单位面积传热能力显著提高,已在兆瓦级发电机中得到广泛应用^[109],展现出在高功率密度和高瞬时热负荷电推进电机中的应用潜力。

然而,蒸发冷却在推进电机的工程应用中仍面临诸多挑战。首先,该系统结构复杂,涉及工质管理、压力调控、密封设计以及气液分离等多个环节,

设计与制造难度较高。其次, 该技术存在工质泄漏、腐蚀和蒸发器干烧等潜在故障风险, 对密封性和材料性能提出较高要求, 同时在启动和非稳态运行阶段也面临工质再分布及热稳定性控制等问题。此外, 蒸发冷却高度依赖外部气流条件, 气流速度不足或湿度过高将抑制工质的蒸发速率, 降低换热效率。再加之成本较高, 该技术在推进系统中的实际应用仍需在性能提升、系统复杂性、环境适应性与经济性之间进行综合权衡。

4.4 固液相变冷却

固液相变材料因其较高的潜热、较小的相态体积变化和良好的储能特性而得到广泛应用^[110], 其传热原理如图 16 所示。在吸收/释放潜热过程中, 系统温度保持相对恒定, 而系统能量发生变化。

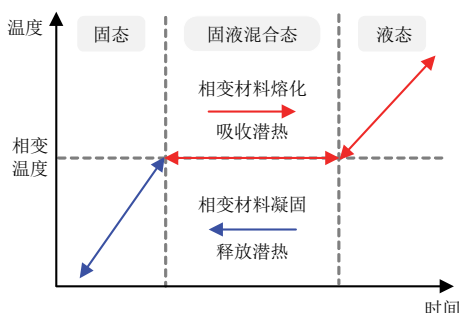


图 16 固液相变传热原理

Fig. 16 Solid-liquid phase change heat transfer principle

石蜡是最具代表性的固液相变材料, 具有储热密度高、相变温度适宜、无腐蚀、安全可靠、价格低廉等优点。文献[111-113]均对石蜡相变冷却进行了研究, 北京航空航天大学将石蜡灌注在电机机壳内部, 使得电机运行时间延长约 32.7%, 峰值温度降低约 7.8℃^[111]。

总体而言, 固液相变材料因其高潜热特性, 能够有效延缓电机温升, 提升电机过载运行能力, 适合用于短期或间歇性过载工作的推进电机, 但在实际推进电机应用中仍面临以下缺陷与挑战:

1) 热响应速度慢。相变材料在吸热过程中需完成从固态到液态的转变, 这一过程相对较慢, 导致其在快速热负荷变化下的响应滞后, 难以应对推进电机短时大功率运行时产生的瞬态热冲击。

2) 热导率低。多数相变材料(如石蜡)具有较低的热导率, 限制了其传热效率, 因此仅能作为推进电机的过载能力提升手段, 而难以有效降低稳态运行温度。

3) 附加重量高。相变材料为实现足够的热吸收能力通常需要较大质量和体积, 不利于高功率/

转矩密度推进电机对轻量化与紧凑结构的需求, 在大功率推进电机中的应用尤其受限。

4) 相变过程控制复杂。相变过程存在过冷、相分离等不稳定现象, 实际工况下难以实现理想的恒温吸/放热, 对系统设计与热控提出更高要求。

5) 重复使用性能衰减。部分相变材料在长时间循环使用后可能出现性能退化, 如相变温度漂移、潜热降低、材料泄漏或分层, 影响系统的长期稳定性与可靠性。

5 推进电机热管理技术发展趋势

基于上文分析, 构建永磁推进电机冷却技术的综合评价框架, 如表 3 所示。传导传热技术中, 灌封导热方法简单常用, 但传热效率较低, 且灌封材料会造成附加重量和高温熔化风险; 延伸结构导热方法具有低附加重量、简单、可靠的优势, 但传热效率仍然受限; 附加装置导热可通过金属装置增强传热效率, 但需关注高海拔、低气压飞行环境下金属传热装置的局部放电和绝缘损坏风险。风冷技术中, 桨叶气流风冷方法具有低附加重量和系统复杂度的突出优势, 但冷却效率相对较低, 且桨叶气流对可靠性和环境适应性造成较大挑战; 与之相比, 附加装置风冷以牺牲系统简易度为代价, 实现冷却效率、可靠性和稳定性的提升。液冷技术中, 水冷方法的可靠性更高, 但在高空低温特殊环境下需考虑防冻问题; 油冷在极端环境下的环境适应性更佳, 但密封与可靠性挑战大; 浸油冷却和喷油冷却方法相比循油冷却可显著提高冷却效率, 但同时会导致系统复杂度提高; 空心轴油冷可作为辅助冷却方法用于转子和轴承冷却, 但轴的密封和结构强度问题尤为关键。相变传热技术中, 热管冷却方法兼具强冷却效果和低附加重量及复杂度, 但其冷却能力强依赖于冷端散热条件, 且需关注热管在高温、振动和内部高压下的损坏风险; 蒸发冷却方法具有实现极高电流密度的潜力, 但在附加重量、系统复杂度、可靠性、环境适应性、成本等方面均面临严峻挑战; 固液相变冷却方法可延缓温升, 适合用于短期或间歇性过载工作的推进电机, 但其附加重量不容忽视, 且在相变过程和相变材料方面存在不稳定风险。在实际应用中, 应综合考虑航空电推进系统的具体要求和特殊挑战, 选取最适宜的推进电机冷却技术。

随着新技术、新工艺的不断发展, 推进电机冷

表 3 航空永磁推进电机冷却技术综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of cooling technologies for aviation PM propulsion motors						
冷却方式	电机电流密度	冷却效率	低附加重量与能耗	系统简易度	可靠性与维护性	环境适应性
灌封导热	仅用于辅助冷却方法	—	0	++	+	+
延伸结构导热	仅作为辅助冷却方法	—	++	++	++	++
附加装置导热	仅作为辅助冷却方法	0	+	+	+	+
桨叶气流风冷	8~11 A/mm ²	—	++	++	0	—
附加装置风冷	10~13 A/mm ²	0	+	+	++	0
水冷	10~15 A/mm ²	0	—	0	+	0
循油冷却	10~15 A/mm ²	0	—	0	0	++
喷油冷却	20~24 A/mm ²	+	—	—	0	++
整机浸油	25~30 A/mm ²	++	—	—	0	++
定子浸油	25~30 A/mm ²	++	—	—	0	++
空心轴通油	仅作为辅助冷却方法	0	0	—	—	++
热管冷却	12~18 A/mm ²	+	++	+	0	0
蒸发冷却	25~40 A/mm ²	++	—	—	—	—
固液相变冷却	仅作为延缓温升方法	—	0	0	—	0

注：“+”代表较优，“0”代表中等，“—”代表较差。

却系统正朝着精细化与集成化的方向演进。新型冷却和综合热管理技术有望进一步提升冷却效率、简化系统架构，并在未来应用于航空电推进系统。

5.1 推进电机新型冷却技术

航空推进电机冷却系统面临着愈发严苛的冷却散热要求及重量尺寸限制，推动了新型冷却技术的研究与发展。高性能热管理材料^[22]以及增材制造^[23]等先进工艺的进步为新型热管理技术提供了有力的技术支撑。

空心导体冷却技术通过在导体内部直接流通冷却液，实现对绕组的高效散热，可大幅提高电机电负荷。谢菲尔德大学研制的 62.7kW 永磁电机采用空心导体油冷结合机壳液冷方法，如图 17(a)所示，6.7L/min 空心导体油冷方案下的绕组平均温度相比 12L/min 机壳液冷方案降低约 30℃^[114]。威斯康星大学设计的 1MW 高速永磁推进电机对空心导体油冷方法进行了研究，如图 17(b)所示，表明空心导体油冷方法具有优异的冷却性能，但会导致显著的交流铜损^[115]。马凯特大学提出了将空心导体与热管冷却方法相结合^[116-117]。其设计的 250kW 永

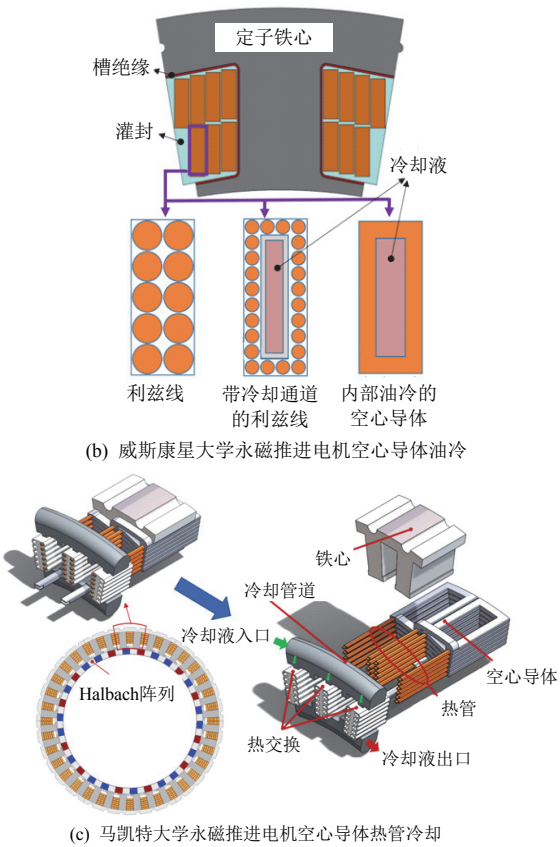
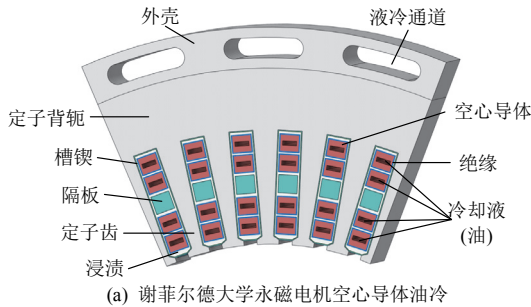


图 17 空心导体冷却系统

Fig. 17 Hollow conductor cooling systems

磁推进电机采用空心导体热管冷却，热管吸热端置于空心导体内部，冷凝端置于热交换器内由水-乙二醇冷却，AlSi₁₀Mg 空心导体和热交换器均采用增材制造，如图 17(c)所示。电机电流密度可达 13.9 A/mm²，但空心导体及热管的交流损耗较高^[116]。工艺制造难度、绕组交流损耗、冷却液泄露风险是目前



限制空心导体冷却技术应用于航空推进电机的主要因素。

微通道冷却通过在微小通道内(通常为毫米级以下)流通冷却介质,实现有限空间内散热面积的显著增加和热交换效率的提升,契合航空推进电机对结构紧凑性和轻量化的严苛要求。随着增材制造、复合制造等高精度先进制造技术的突破,微通道冷却有望广泛应用于航空推进电机。普渡大学将增材制造微通道冷却结构嵌入分段定子线圈中,实现了 30.4 A/mm^2 的峰值电流密度,如图 18 所示^[118]。此外,微通道冷却还可与其他冷却技术,如热管、相变材料等结合,构建高效复合冷却系统,协同增强传热、储热能力。

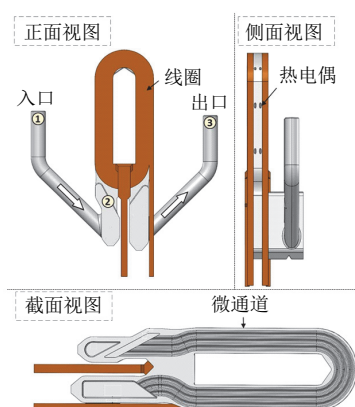


图 18 增材制造嵌入式微通道冷却系统

Fig. 18 Additively manufactured embedded microchannel cooling systems

在大型电推进飞机中,低温燃料冷却正逐渐成为推进电机热管理的重要解决方案,不仅能够显著提升常导电机的冷却效果,更是超导电机安全稳定运行的前提和保障^[119]。

液氢燃料凭借其高能量密度、零碳排放、强冷却能力(沸点仅 20 K)以及可再生能源等突出优势,近年来受到了全球范围内的广泛关注与研究,被视为未来大型电推进飞机发展的关键方向。我国工信部、科技部等四部门于 2023 年发布的《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035 年)》中明确指出要“积极布局氢能航空关键技术研发”。

在氢动力飞机中,液氢可以在提供推进能量的同时,用于推进电机和电缆的冷却,从而减少冗余设备,大幅提高系统集成性。NASA、空客等航空机构正积极推进氢动力飞机和液氢冷却超导电机系统的研究;ZeroAvia 和 H2Fly 等公司已完成基于液氢燃料的试验飞行验证,展示了将燃料冷却与推进系统集成的可行性^[120]。然而,液氢的体积能量

密度较低,储存和运输技术复杂且易燃,对相关技术提出了较高要求。

相比之下,液氮虽然成本低、安全性高,但其冷却能力较液氢弱(沸点约 77 K),主要适用于常导推进电机的冷却散热,而在超导电机的低温冷却应用中相对受限。液氮虽然冷却能力极强(沸点仅 4.2 K),能够满足低温超导材料的冷却需求,但其过高的成本和储存难度严重限制了在民用航空中的应用前景。

在未来航空业向氢能源转型的大趋势下,随着液氢航空推进技术的成熟,低温燃料冷却技术将成为航空电推进系统的主流解决方案之一,有望随着氢能航空的部署逐步落地。

5.2 推进电机与逆变器集成化冷却

推进系统由推进电机及其逆变器,以及推进装置(螺旋桨或涵道风扇)构成。随着电机及其逆变器的一体化、集成化发展,通过集成化冷却设计使二者共用一套冷却系统,可以简化冷却架构,提高系统功率密度,是未来航空电推进系统热管理的重要发展趋势^[121]。但推进电机与逆变器的集成化设计也会导致系统热点分布更为集中,这对系统热管理提出了更高要求^[122]。

在航空电推进领域,推进电机及逆变器的集成化冷却已得到初步应用。例如, MAGicALL 公司研发的电推进系统采用了电机与逆变器集成化冷却架构,冷却介质在总成外壳内部的闭合回路中循环,实现电机、逆变器(及减速器)的一体化冷却。H3X 公司研发的 200 kW 集成化电推进系统将逆变器径向集成安装于电机表面,液冷机壳采用增材制造,一体成型的内部冷却管道可同时冷却电机与逆变器,如图 19(a)所示。马凯特大学研制的 250 kW 永磁推进电机集成化冷却架构如图 19(b)所示,逆变器集成于电机端面,二者共用冷却部件,包括冷却流道、电机绕组热管及逆变器热管。其中逆变器热管在起到冷却作用的同时还兼具固定安装功能,最终逆变器运行温度不超过 95.2°C ^[123]。威斯康星大学研制的 1 MW 永磁推进电机将逆变器径向集成于定子表面的液冷板上,如图 19(c)所示^[124]。麻省理工学院研制的 1 MW 永磁推进电机中,逆变器在电机端面外与电机同轴安装,并共用集成化风冷系统,冷却系统由压缩机吸气驱动,如图 7(b)所示^[60]。

5.3 推进电机与桨扇动力装置综合热管理

推进电机直接驱动螺旋桨、涵道风扇等动力装

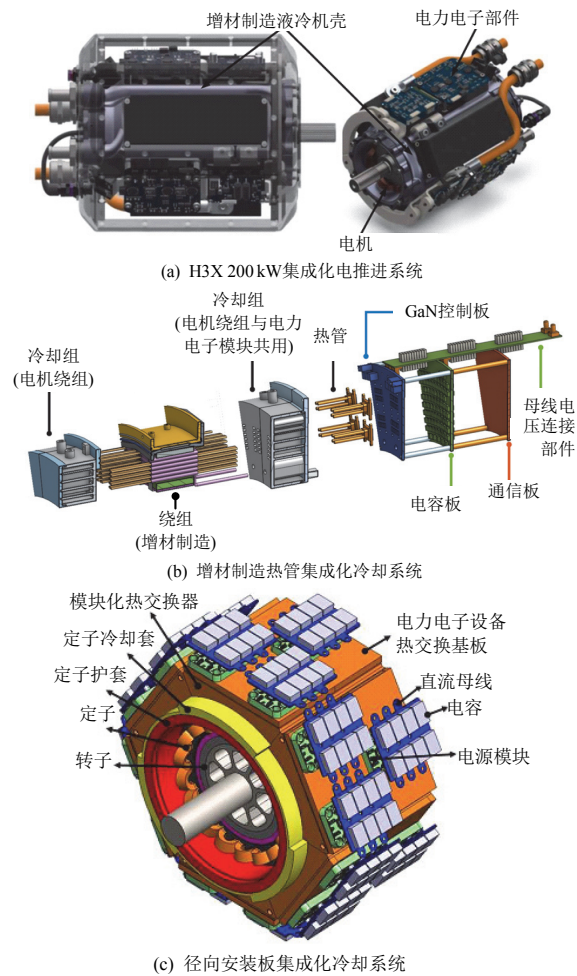


图 19 推进电机与逆变器集成化冷却系统

Fig. 19 Integrated cooling systems for propulsion motor and inverter

置，其冷却系统应紧密结合动力装置特征进行配合设计。例如，桨叶气流风冷系统不但具有较强的冷却效果，而且可避免额外的冷却风道或风扇部件，具有系统架构简单、集成度高的突出优势，尤其适合具有多个推进装置的分布式电推进系统。在桨叶气流风冷系统中，电机相对于桨叶的布置方式会对冷却效率、电机性能乃至飞行器整机性能产生显著影响。常见的两种配置方式分别为前置电机(电机位于桨叶前，气流先经过电机后经过桨叶)和后置电机(电机位于桨叶后，气流先经过桨叶后经过电机)，如图 20 所示，二者各有优势，如表 4 所示。

前置电机配置具有显著的冷却优势。由于电机直接暴露在未经扰动的自由来流中，冷却空气温度更低、流场更稳定，且不存在桨叶叶片对电机冷却通道的遮挡，因此冷却气流能够更有效地流经电机绕组，提升散热效率。此外，前置配置确保了桨叶与尾翼之间的安全间距，降低了潜在

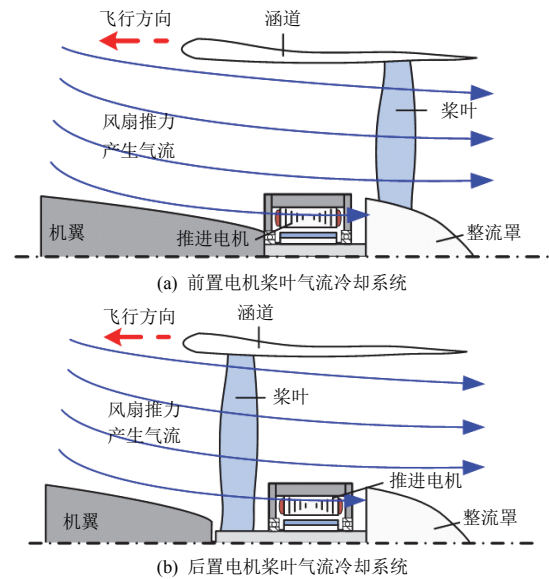


图 20 前置电机与后置电机配置桨叶气流冷却系统

Fig. 20 Blade airflow cooling systems for front-mounted and rear-mounted motor configurations

表 4 前置电机与后置电机配置桨叶气流冷却方式对比

Table 4 Comparisons of blade airflow cooling methods for front-mounted and rear-mounted motor configurations

项目	前置电机	后置电机
冷却气流特征	自由来流，稳定、温度低、静压高、速度低	高速尾流，紊乱、温度高、压差小、速度高
电机冷却效果	较强	较差
桨叶气动效率	较低	较高
结构安全性	较高	较低
维护便利性	较易	较难
轴承布置方式	复杂	简单

的结构风险，且桨叶更易于维护。相比之下，后置电机配置在气动效率方面更具优势。桨叶前方气流未受电机干扰，使得螺旋桨或风扇能够在更理想的流场和更低的进气温度下工作，从而提升推力效率。此外，该结构有利于推力的直接传递、轴承布置简洁，并能更好地适应电机的热膨胀。然而，由于电机位于风扇后的高扰动、高速气流中，冷却气流的获取受到限制，且流场不稳定，导致电机冷却效率较低。因此，在系统设计中应综合权衡冷却需求、气动性能与结构布置，选择最适合的电机安装方式和桨叶气流冷却方法，以达到最佳集成化冷却效果。

对于结合桨扇气流的冷却方式，需重点关注复杂飞行工况下不同气流条件对推进电机全工况散热的影响。气流冷却性能在空中飞行环境中受到飞行高度与速度的显著影响，主要表现在空气密度、温度与来流速度等气动参数的变化。随着飞行高度的升高，空气密度和气压逐渐降低，导致单位体积

空气所携带的热容减小,不利于冷却气流的获取和对流换热效率的维持;然而,高空环境温度相对较低,又可在一定程度上提升冷却效果。另一方面,飞行速度的提高通常伴随动压的增加,有助于提高冷却气流速度、增强强制对流效果,但同时也可能引发压缩加热与尾迹扰动等不利因素,尤其在后置电机配置中更为显著。因此,在高空高速飞行条件下,需综合考虑气流参数变化对冷却系统性能的影响,合理设计进气路径和桨扇布置方式,以保障电机的冷却效果与系统稳定性。

在推进电机系统与桨扇动力装置的综合热管理技术方面,目前已有部分研究与应用。如 Archer 公司研发的 Midnight eVTOL 飞行器采用了电机、逆变器和减速器与桨扇气流高度集成的冷却结构^[125]。系统利用螺旋桨旋转产生的高速气流协同飞行时的自然对流,通过电机和逆变器外壳上的散热翅片实现高效对流冷却。同时,系统还配备油冷回路,冷却油在电机内部通道中循环,兼具润滑与冷却功能。Joby 公司研发的 eVTOL 飞行器推进系统如图 21 所示,液冷泵驱动冷却液在电机定子和逆变器冷却板之间循环,热量通过冷却液高效传递并最终汇集至散热器。飞行器巡航工况下,散热器依靠风扇气流实现强制对流冷却。在悬停或垂直起降等高功率高热负荷工况下,推进系统组件随倾转结构旋转,使散热器暴露于螺旋桨桨叶产生的高速气流中。此时,桨叶气流与风扇气流协同作用,不仅增强了散热器表面对流传热效率,还可随桨叶转速和飞行状态动态调节散热强度,实现热管理与飞行状态的最优匹配。

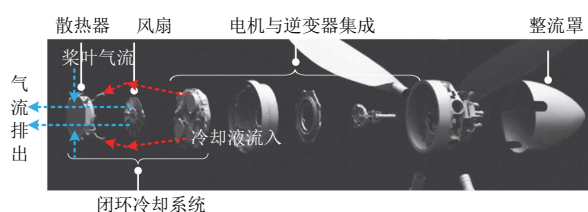


图 21 推进电机与桨扇动力装置综合热管理系统

Fig. 21 Comprehensive thermal management system for propulsion motor and propulsor unit

此外,航空电推进系统中除推进电机外还包括多种热源,若单独处理每个部件的热管理问题,将面临冷却系统架构复杂且重量过重的挑战。因此,需要充分考虑推进电机与其他电推进系统部件的紧密耦合特性,从系统层面进行综合热管理设计与优化,最大限度地减小附加重量,并从飞行器整体

和各系统协同角度优化能量利用。

6 结论

随着航空电推进技术的持续发展,推进电机系统在安全性、轻量化和高效率等方面面临日益严苛的技术挑战。作为制约系统功率密度提升和运行安全边界的关键因素,永磁推进电机冷却技术亟需深入研究与突破。本文系统梳理了航空永磁推进电机冷却技术的研究现状与发展趋势,主要结论如下:

1) 相较于传统航空电机,永磁推进电机冷却系统具有技术指标极限化、应用条件严苛化、系统要求多样化、热控系统容错化、热点分布集中化、冷却结构精细化等特征和要求。

2) 永磁推进电机的冷却性能高度依赖于内部热传导效率。通过拓扑与线型优化、定子灌封、电机延伸结构及引入附加导热装置等手段,可有效构建增强导热型冷却系统。

3) 推进电机对流冷却方式主要包括风冷、水冷与油冷。风冷系统可利用桨叶气流冷却,从而省去额外冷却装置,降低系统复杂度,但需兼顾推进桨扇工作状态与整机气动集成;水冷具有良好的换热性能,但受限于绝缘性仅能用于间接冷却;油冷则可实现对电机热源的直接冷却,定子浸油冷却的冷却效果极佳且无搅油损耗,尤为适用于损耗主要集中于定子的永磁推进电机。在液冷系统设计中,需统筹考虑机体其他冷却回路的部件复用与整体管路布局的合理性。

4) 相变传热技术相较常规显热传热具备特殊优势。热管冷却具有传热性能好、传热距离远的突出优势,已在航空电推进领域获得广泛研究;蒸发冷却具有高单位面积传热能力,固液相变冷却具备瞬态热冲击缓冲能力,但在实际推进电机应用中仍面临技术挑战。

5) 新技术与新工艺的持续发展不断为推进电机热管理技术的优化与创新提供新的路径。增材制造与复合材料工艺为精细化冷却结构提供技术支撑,并促进推进电机与逆变器的集成化冷却发展。低温燃料冷却技术在未来兆瓦级电推进系统中极具应用潜力。航空电推进系统也对推进电机-逆变器-桨扇动力装置的系统级综合热管理提出更高要求,为永磁推进电机冷却技术带来新的挑战与机遇。

参考文献

- [1] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021651.
KONG Xianghao, ZHANG Zhuoran, LU Jiawei, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 021651(in Chinese).
- [2] ANSELL P J, HARAN K S. Electrified airplanes: a path to zero-emission air travel[J]. IEEE Electrification Magazine, 2020, 8(2): 18-26.
- [3] WHEELER P, SIRIMANNA T S, BOZHKO S, et al. Electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(6): 1115-1127.
- [4] FARD M T, HE Jiangbiao, HUANG Hao, et al. Aircraft distributed electric propulsion technologies—a review [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4067-4090.
- [5] BUTICCHI G, WHEELER P, BOROEYEVICH D. The more-electric aircraft and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(4): 356-370.
- [6] JANSEN R H, BOWMAN C, JANKOVSKY A, et al. Overview of NASA electrified aircraft propulsion(EAP) research for large subsonic transports[C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta: AIAA, 2017.
- [7] DARECKI M, EDELSTENNE C, ENDERS T, et al. Flightpath 2050 Europe's vision for aviation [R]. Belgium: European Union, 2011.
- [8] SWAMINATHAN N, REDDY S R P, RAJASHEKARA K, et al. Flying cars and eVTOLs — technology advancements, powertrain architectures, and design [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4105-4117.
- [9] 孙侠生, 程文渊, 穆作栋, 等. 电动飞机发展白皮书[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 1-7.
SUN Xiasheng, CHENG Wenyuan, MU Zuodong, et al. White paper on the development of electric aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 1-7(in Chinese).
- [10] ZHANG Xiaolong, BOWMAN C L, O'CONNELL T C, et al. Large electric machines for aircraft electric propulsion[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(6): 767-779.
- [11] JANSEN R H, BROWN G V, FELDER J L, et al. Turboelectric aircraft drive key performance parameters and functional requirements[C]//51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Orlando: AIAA, 2015.
- [12] 张卓然, 陆嘉伟, 张伟秋, 等. 飞机电推进系统高效能电机及其驱动控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6610-6631.
ZHANG Zhuoran, LU Jiawei, ZHANG Weiqiu, et al. High-performance electric machine and drive technologies for aircraft electric propulsion systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6610-6631(in Chinese).
- [13] 陈起旭, 王群京, 钱喆, 等. 小型全电/混动飞机技术路线与动力系统综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4966-4986.
CHEN Qixu, WANG Qunjing, QIAN Zhe, et al. Overview of the technical roadmap and powertrain system for small all-electric or hybrid aircraft[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4966-4986(in Chinese).
- [14] SAYED E, ABDALMAGID M, PIETRINI G, et al. Review of electric machines in more-/hybrid-/turbo-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2976-3005.
- [15] BIRD J Z. A review of electric aircraft drivetrain motor technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2): 1-8.
- [16] DEISENROTH D C, OHADI M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond[J]. Energies, 2019, 12(19): 3594.
- [17] 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.
- [18] 张卓然, 张健, 胡光源, 等. 多电机高功率密度高效电机系统热管理技术[J]. 航空学报, 2025, 46(6): 531380.
ZHANG Zhuoran, ZHANG Jian, HU Guangyuan, et al. Thermal management technologies of high-power-density high-efficiency electric machine systems for more electric aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(6): 531380(in Chinese).
- [19] LI Bo, KUO Huang, WANG Xuehui, et al. Thermal management of electrified propulsion system for low-carbon vehicles[J]. Automotive Innovation, 2020, 3(4): 299-316.
- [20] JANSEN R H, BOWMAN C, JANKOVSKY A. Sizing power components of an electrically driven tail cone thruster and a range extender[C]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington: AIAA, 2016, AIAA 2016-3766.
- [21] 陆嘉伟, 张卓然, 李进才, 等. 电推进飞机移相双绕组永磁电机特性分析[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 325230.
LU Jiawei, ZHANG Zhuoran, LI Jincai, et al. Characteristic analysis of dual-winding permanent magnet synchronous machine with phase-shifted windings for electric propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 325230(in Chinese).
- [22] 何鹏, 耿慧远. 先进热管理材料研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(4): 1-11.

- HE Peng, GENG Huiyuan. Research progress of advanced thermal management materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4): 1-11(in Chinese).
- [23] WU Fan, EL-REFAIE A M. Toward additively manufactured electrical machines: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1306-1320.
- [24] 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.
- [25] XU Ziyi, XU Yongming, GAI Yaohui, et al. Thermal management of drive motor for transportation: analysis methods, key factors in thermal analysis, and cooling methods — a review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4751-4774.
- [26] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006(in Chinese).
- [27] POPESCU M, STATON D A, BOGLIETTI A, et al. Modern heat extraction systems for power traction machines—a review[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2167-2175.
- [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] ZHU Ziqiang, LIANG Dawei. Perspective of thermal analysis and management for permanent magnet machines, with particular reference to hotspot temperatures[J]. Energies, 2022, 15(21): 8189.
- [30] ZHANG Fengyu, GERADA D, XU Zeyuan, et al. Slot number thermal effects on electrical machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 23-35.
- [31] CAI Wei, FULTON D, CONGDON C L. Multi-set rectangular copper hairpin windings for electric machines: USA, 20050130641A[P]. 2006-04-25.
- [32] NUZZO S, BARATER D, GERADA C, et al. Hairpin windings: an opportunity for next-generation e-motors in transportation[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2022, 16(4): 52-59.
- [33] 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.
- [34] ACERO J, ALONSO R, BURDIO J M, et al. Frequency-dependent resistance in Litz-wire planar windings for domestic induction heating appliances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 856-866.
- [35] JARITZ M, HILLERS A, BIELA J. General analytical model for the thermal resistance of windings made of solid or Litz wire[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 668-684.
- [36] LI Zhaozong, XU Zeyuan, ZHANG Fengyu, et al. Analytical calculation and experimental validation of Litz wires axial thermal conductivity[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1167-1179.
- [37] JACK A G, MECROW B C, Dickinson P G, et al. Permanent magnet machines with powdered iron cores and pre-pressed windings[C]//1999 IEEE Industry Applications Conference (IAS). Phoenix: IEEE, 1999: 97-103.
- [38] YI Xuan, YANG Tianyu, XIAO Jianqiao, et al. Equivalent thermal conductivity prediction of form-wound windings with Litz wire including transposition effects[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1440-1449.
- [39] 刘治鑫, 姜亚鹏, 陈斌, 等. 永磁电机成型利兹线绕组高频铜耗解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(S1): 299-311.
- LIU Zhixin, JIANG Yapeng, CHEN Bin, et al. Analytical calculation of high-frequency copper loss in shaped Litz-wire windings of permanent magnet electrical machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(S1): 299-311(in Chinese).
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] NOTARI R, NUZZO S, SAVI F, et al. An asymmetrical additively manufactured hairpin winding for increased efficiency and sustainability[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 9529-9538.
- [43] GAO Huamin, ZHANG Zhuoran, LIU Ye, et al. Development and analysis of dual three-phase PMSM with phase-shifted hybrid winding for aircraft electric propulsion application[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 6497-6508.
- [44] CRESCIMBINI F, DI NAPOLI A, SOLERO L, et al. Compact permanent-magnet generator for hybrid vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1168-1177.
- [45] SUN Yalong, ZHANG Shiwei, YUAN Wei, et al. Applicability study of the potting material based thermal

- management strategy for permanent magnet synchronous motors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 1370-1378.
- [46] NATEGH S, BOGLIETTI A, BARBER D, et al. Thermal and manufacturing aspects of traction motors potting: a deep experimental evaluation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(2): 1026-1035.
- [47] YAO Yi, GU Lingyun, FAN Tao, et al. Evaluation of heat transfer characteristic of aluminum nitride(AlN) potting compound for the end windings of permanent magnet synchronous machines[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang: IEEE, 2011: 4498-4501.
- [48] PYRHÖNEN J, LINDH P, POLIKARPOVA M, et al. Heat-transfer improvements in an axial-flux permanent-magnet synchronous machine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 76: 245-251.
- [49] ZHANG Fengyu, GERADA D, XU Zeyuan, et al. Back-iron extension thermal benefits for electrical machines with concentrated windings[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(3): 1728-1738.
- [50] ZHANG Fengyu, GERADA D, XU Zeyuan, et al. Electrical machine slot thermal condition effects on back-iron extension thermal benefits[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2927-2938.
- [51] LIAO Chendong, ZHANG Zhuoran, YAO Yiming, et al. Multiphysics analysis and optimization of air-cooled high-speed concentrated winding PMSMs with auxiliary teeth[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(3): 7357-7366.
- [52] VANSOMPEL H, LEIJNEN P, SERGEANT P. Multiphysics analysis of a stator construction method in yokeless and segmented armature axial flux PM machines[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(1): 139-146.
- [53] CHANG Jiu Jian, 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.
- [54] GALEA M, GERADA C, RAMINOSOA T, et al. A thermal improvement technique for the phase windings of electrical machines[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012, 48(1): 79-87.
- [55] XU Z, GALEA M, TIGHE C, et al. Mechanical and thermal management design of a motor for an aircraft wheel actuator[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Hangzhou: IEEE, 2014: 3268-3273.
- [56] POLIKARPOVA M, PONOMAREV P, LINDH P, et al. Hybrid cooling method of axial-flux permanent-magnet machines for vehicle applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7382-7390.
- [57] DUBOIS A, VAN DER GEEST M, BEVIRT J, et al. Design of an electric propulsion system for SCEPTOR's outboard nacelle[C]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington: AIAA, 2016.
- [58] YOON A, ARASTU F, LOHAN D, et al. Direct-drive electric motor for STARC-ABL tail-cone propulsor[C]//2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium(EATS). Indianapolis: IEEE, 2019: 1-10.
- [59] YI Xuan, SANCHEZ R, HARAN K, et al. Self-pumped air-cooling design for a high-speed high-specific-power motor[C]//2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo(ITEC). Long Beach: IEEE, 2018: 274-279.
- [60] CHEN Yuankang, SPAKOVSKY Z S, GREITZER E M, et al. Novel channel-type heat exchanger for a megawatt-class integrated motor drive technology demonstrator[C]//AIAA AVIATION 2023 Forum. San Diego: AIAA, 2023, AIAA 2023-4159.
- [61] 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). Indianapolis: IEEE, 2019: 1-12.
- [62] DU Guanghui, XU Wei, ZHU Jianguo, et al. Power loss and thermal analysis for high-power high-speed permanent magnet machines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(4): 2722-2733.
- [63] FAN Xinggang, ZHANG Bin, QU Ronghai, et al. Comparative thermal analysis of IPMSMs with integral-slot distributed-winding(ISDW) and fractional-slot concentrated-winding(FSCW) for electric vehicle application[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(4): 3577-3588.
- [64] FAN Xinggang, LI Dawei, QU Ronghai, et al. A dynamic multilayer winding thermal model for electrical machines with concentrated windings[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6189-6199.
- [65] HEBALAA, NUZZO S, CONNOR P H, et al. Improved propulsion motor design for a twelve passenger all-electric aircraft[C]//2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis(WEMDCD). Modena: IEEE, 2021: 343-348.
- [66] LIANG Peixin, CHAI Feng, SHEN Ke, et al. Water jacket and slot optimization of a water-cooling permanent magnet synchronous in-wheel motor[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(3): 343-352.

- 2431-2439.
- [67] BI Yunlong, CHAI Feng, CHEN Lei. The study of cooling enhancement in axial flux permanent magnet motors for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(5): 4831-4839.
- [68] LAI Junquan, LI Jian, XIAO Tianzheng. Design of a compact axial flux permanent magnet machine for hybrid electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6630-6639.
- [69] FAN Xinggang, LI Dawei, QU Ronghai, et al. Water cold plates for efficient cooling: verified on a permanent-magnet machine with concentrated winding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5325-5336.
- [70] 武岳, 张志锋, 平佳齐. 高功率密度轴向磁通永磁电机新型水冷结构与温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8295-8304.
- WU Yue, ZHANG Zhifeng, PING Jiaqi. New type water cooling structure design and temperature field analysis of high power density axial flux permanent magnet motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8295-8304(in Chinese).
- [71] DI LORENZO G, ROMANO D G, CAROZZA A, et al. Cooling of 1 MW electric motors through submerged oil impinging jets for aeronautical applications [J]. Aerospace, 2024, 11(7): 585.
- [72] 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.
- [73] MADDUMAGE W, POLLOCK R, MEHRAN K, et al. Experimental evaluation of axial multinozzle impinging oil jets for end-winding cooling in electric vehicle hairpin traction motors[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(6): 12951-12963.
- [74] GHAFHAROKHI P S, PODGORNOVS A, KALLASTE A, et al. The oil spray cooling system of automotive traction motors: the state of the art[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 428-451.
- [75] ZHANG Fengyu, GERADA D, XU Zeyuan, et al. Improved thermal modeling and experimental validation of oil-flooded high-performance machines with slot-channel cooling[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 312-324.
- [76] AL-TIMIMY A, GIANGRANDE P, DEGANI M, et al. Design and losses analysis of a high power density machine for flooded pump applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3260-3270.
- [77] XU Jinqun, JIN Wenbo, GUO Hong, et al. Design and analysis of a high-speed wet-type fault-tolerant permanent magnet motor considering oil frictional loss for aerospace electrohydrostatic actuator application[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 4667-4677.
- [78] GOLOVANOV D, GERADA D, SALA G, et al. 4-MW class high-power-density generator for future hybrid-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2952-2964.
- [79] WANG Runyu, FAN Xinggang, LI Dawei, et al. Convective heat transfer characteristics on end-winding of stator immersed oil-cooled electrical machines for aerospace applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4265-4278.
- [80] 林明耀, 乐伟, 林克曼, 等. 轴向永磁电机热设计及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(06): 1914-1929.
- LIN Mingyao, LE Wei, LIN Keman, et al. Review of thermal design and research development for axial flux permanent magnet motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(06): 1914-1929(in Chinese).
- [81] JENKINS C, JONES-JACKSON S, ZAHER I, et al. Innovations in axial flux permanent magnet motor thermal management for high power density applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 9(3): 4380-4405.
- [82] CAMILLERI R, BEARD P, HOWEY D A, et al. Prediction and measurement of the heat transfer coefficient in a direct oil-cooled electrical machine with segmented stator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 94-102.
- [83] LIU Ye, ZHANG Zhuoran, WANG Chen, et al. Design and analysis of oil-immersed cooling stator with nonoverlapping concentrated winding for high-power ironless stator axial-flux permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 2876-2886.
- [84] WANG Yu, ZHU Ting, GENG Weiwei, et al. Cooling system analysis of an enclosed yokeless stator for high-power axial flux PM motor with distributed winding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2789-2799.
- [85] TAN Hui, FAN Xinggang, LI Dawei, et al. Additively manufactured winding design for thermal improvement of an oil-cooled axial flux permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1): 1911-1922.
- [86] GAI Yaohui, WIDMER J D, STEVEN A, et al. Numerical and experimental calculation of CHTC in an oil-based shaft cooling system for a high-speed high-power PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4371-4380.

- [87] LEE K H, CHA H R, KIM Y B. Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 348-356.
- [88] WANG Runyu, FAN Xinggang, LI Dawei, et al. Comparison of heat transfer characteristics of the hollow-shaft oil cooling system for high-speed permanent magnet synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(5): 6081-6092.
- [89] 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.
- [90] GERSTLER W D, RUGGIERO E J, GHASRIPOOR F, et al. A liquid-cooled rotor for high density electric machines[C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego: AIAA, 2011, AIAA 2011-5560.
- [91] DUNN P D, REAY D A. Heat pipes[M]. 4th ed. Oxford: Pergamon Press, 1994.
- [92] BRADFORD M. The application of heat pipes to cooling rotating electrical machines[C]//4th International Conference on Electrical Machines and Drives. London: IEEE, 1989: 145-149.
- [93] ZHAO Han, ZHANG Xiaochen, ZHANG Fengyu, et al. A comprehensive review and experimental investigation on heat pipes application in electrical machines[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(2): 2267-2281.
- [94] WANG Huimin, ZHANG Chujie, GUO Liyan, et al. Novel revolving heat pipe cooling structure of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121641.
- [95] ZHANG Chengming, ZHANG Xintong, ZHAO Fei, et al. Improvements on permanent magnet synchronous motor by integrating heat pipes into windings for solar unmanned aerial vehicle[J]. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2022, 1(1): 100011.
- [96] DONG Chaofan, HU Xuanyang, QIAN Yuping, et al. Thermal management integrated with flat heat pipes for in-slot stator windings of electric motors[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(1): 699-711.
- [97] ZHAO Han, ZHANG Xiaochen, LI Jing, et al. An advanced propulsion motor with enhanced winding cooling system for a solar-powered aircraft[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(1): 2034-2044.
- [98] CHEN Zutao, YU Zhongjun, FU Jia, et al. Analysis and design of air-heat pipe composite cooling of high power density motor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121495.
- [99] GENG Weiwei, ZHANG Yuqing, GE Shirong, et al. 3-D thermal network modeling and thermal analysis of an air-cooled yokeless stator axial flux PM motor with heat pipes[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(1): 961-971.
- [100] GENG Weiwei, ZHU Ting, LI Qiang, et al. Windings indirect liquid cooling method for a compact outer-rotor PM starter/generator with concentrated windings [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 3282-3293.
- [101] XUE Han, ZHANG Zhuoran, LIU Ye, et al. Analysis of lightweight dual-rotor yokeless-stator PMSM for electrified aircraft propulsion considering thermal benefits of heat pipes[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(5): 11030-11040.
- [102] LI Liyi, ZHANG Jiangpeng, ZHANG Chengming, et al. Research on electromagnetic and thermal issue of high-efficiency and high-power-density outer-rotor motor [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 5204805.
- [103] YU Zhanyang, LI Yan, JING Yongteng, et al. Cooling system of outer rotor SPMSM for a two-seater all-electric aircraft based on heat pipe technology [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(2): 1656-1664.
- [104] YU Zhanyang, ZHUANG Pengzhe, HU Xuyang, et al. Research on heat-transfer characteristics of cooling system with heat pipe technology for outer rotor SPMSM[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(1): 2866-2876.
- [105] LIU Ye, WEI Ziqiang, MA Kang, et al. Improved thermal management and analysis for high-power heat pipe cooled FSCW PMSM for HEV auxiliary power unit application[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2024, 39(2): 1154-1167.
- [106] MA Bo, XING Jinming, HUANG Sheng, et al. Cooling system design for high-power-density permanent magnet synchronous motor based on micro heat pipe array [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(2): 6719-6730.
- [107] CAKAL G, SARLIOGLU B. Two-phase immersion cooling of high-performance electric traction motors [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, 11(2): 6866-6874.
- [108] LIU Yuqing, CAO Jiwei, SONG Yuchen, et al. Immersion evaporative cooling for high-power density motors in future aircraft[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 278: 127036.
- [109] 汤勇, 孙亚隆, 郭志军, 等. 电机散热系统的研究现状与发展趋势[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(10): 1135-1150.
- TANG Yong, SUN Yalong, GUO Zhijun, et al.

- Development status and perspective trend of motor cooling systems[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1135-1150(in Chinese).
- [110]邱书恒, 王海峰, 熊斌, 等. 面向短时/断续工作制的电机系统固-液相变热管理技术及应用发展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(01): 280-293.
- QIU Shuheng, WANG Haifeng, XIONG Bin, et al. Development and application of thermal management technology based on solid-liquid phase change materials for motor systems under short-term/intermittent duty [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(01): 280-293(in Chinese).
- [111]LIU Xiangyang, SHI Yaohui, CHU Jianchun, et al. A new phase-change cooling method for the frequent start- stop electric motor[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 198: 117504.
- [112]BROUMAND M, YUN Sean, HONG Zekai. A novel phase change material-based thermal management of electric machine windings enabled by additive manufacturing[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 244: 122802.
- [113]WANG Jixing, LI Yunze, WANG Shengnan, et al. Experimental investigation of the thermal control effects of phase change material based packaging strategy for on-board permanent magnet synchronous motors[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 123: 232-242.
- [114]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.
- [115]BOBBA D, YAO Zhaoxi, SWANKE J, et al. Multi-physics based analysis and design of stator coil in high power density PMSM for aircraft propulsion applications[C]//2021 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium(EATS). Denver: IEEE, 2021: 1-9.
- [116]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.
- [117]CHOWDHURY T, KOUSHAN S, AL-QARNI A, et al. Thermal management system for an electric machine with additively manufactured hollow conductors with integrated heat pipes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(3): 3763-3772.
- [118]REGAN R, SAVIERS K, ZHAO Wenping, et al. Thermal characterization of two-phase cooling using embedded microchannels in a high current density electric motor[C]//2024 23rd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems(ITherm). Aurora: IEEE, 2024: 1-7.
- [119]宋东彬, 闫炬壮, 杨文将, 等. 面向电动航空的高温超导电机技术研究发展[J]. 航空学报, 2023, 44(9): 27469.
- SONG Dongbin, YAN Juzhuang, YANG Wenjiang, et al. Technology development of high temperature superconducting machine for electric aviation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(9): 27469(in Chinese).
- [120]SIRIMANNA S, BALACHANDRAN T, SALK N, et al. Electric propulsors for zero-emission aircraft: partially superconducting machines[J]. IEEE Electrification Magazine, 2022, 10(2): 43-56.
- [121]WROBEL R. A technology overview of thermal management of integrated motor drives: electrical machines[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 29: 101222.
- [122]ABEBE R, VAKIL G, LO CALZO G, et al. Integrated motor drives: state of the art and future trends[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(2): 300.
- [123]SABZEVARI S I H, KOUSHAN S, EBRAHIMIAN A, et al. Heat-pipe-based thermal management system design for a 250-kW GaN-based integrated modular motor drive[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025, 13(4): 4474-4487.
- [124]SWANKE J, ZENG Hao, BOBBA D, et al. Design and testing of a modular high-speed permanent-magnet machine for aerospace propulsion[C]//2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Hartford: IEEE, 2021: 1-8.
- [125]Archer Aviation. Vertical takeoff and landing aircraft electric engine configuration: US, 11787551B1 [P]. 2023-10-17.



张卓然

在线出版日期: 2026-01-07。

收稿日期: 2025-06-27。

作者简介:

张卓然(1978), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为多电/全电飞机电气系统、新能源发电与电驱动技术, apsc-zzr@nuaa.edu.cn;

*通信作者: 薛涵(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为飞机电推进系统永磁电机技术, xuehan2000@nuaa.edu.cn。

(责任编辑 陈娟, 李新洁)