

超导氢电推进系统研究进展*

Development of Superconducting Hydrogen Electric Propulsion System

■ 白明亮 杨文将 闫炬壮 张若璞 曲子冰 / 北京航空航天大学 姚轩宇 蒋承志 / 中国航发研究院

超导氢电推进系统结合了超导技术、氢能技术和低温冷却技术，具有高功率密度、高能源转换效率和节能减排等多重优势，目前处于深入研究和设计开发阶段。

超导技术和低温冷却技术是提升电气部件性能的关键解决方案，尤其超导部件在功率密度和效率方面具备显著优势。液氢适用于机载超导材料和电气部件的冷却，氢气可以作为涡轮机或燃料电池的燃料，从而实现氢能源在机载系统中的循环使用。因此，超导氢电推进系统整合

了超导技术、氢能技术和低温冷却技术，成为解决大功率航空电推进系统现有问题的潜力方案。超导氢电推进系统是一种面向大功率、高效率航空电推进的创新动力系统，按基本架构可分为燃料电池电推进系统（FCEPS）、燃料电池混合电推进系统（FCHEPS）、涡轮电推进系统（TEPS）和涡轮混合电推进系

统（TEHPS）。表1总结了不同架构的氢电推进系统应用于不同类型飞行器的研究进展，相关研究团队开展了超导技术和冷却技术探索，评估了不同类型系统架构的技术成熟度和可行性。此外，如德国氢燃料电池航空电驱总成（BALIS）、英国零碳飞行（FlyZero）和空客公司ZEROe等在研氢电推进项目涉及到

表1 超导氢电推进系统研究进展

类型	研究单位	应用机型	功率级别	研究内容		研究阶段	
				冷却技术	超导技术	仿真	试验
燃料电池电推进系统	挪威科技大学	ATR 72-600	4.1 MW	氢气态/气液两相冷却	半超导/全超导电动机、超导线缆	√	
	空客公司	—	500 kW	制冷机/液氢冷却	超导电动机、超导交直流线缆、超导故障限流器	√	√
燃料电池混合电推进系统	美国伊利诺伊大学	波音 737-800	28 MW	液氢冷却	超导电动机	√	√
	英国吉凯恩公司	小型支线	1.5~2 MW	氢-氢燃料热交换	超导电动机	√	√
	韩国昌原国立大学	空客 A320	45 MW	氢-氢燃料热交换	转子半超导电动机、超导线缆	√	
涡轮电推进系统	德国斯图加特大学	空客 A320	44 MW	液氢冷却	全超导发电机/电动机	√	
	罗罗公司	空客 A321XLR	41 MW	液氢冷却	全超导发电机/电动机、超导线缆	√	
	美国佛罗里达州立大学	N3-X	50 MW	氢液态/气态/气液两相冷却	超导发电机/电动机、超导线缆	√	
涡轮混合电推进系统	俄罗斯中央航空发动机研究院	雅克-40LL	500 kW	液氮冷却	超导电动机	√	√
	俄罗斯莫斯科航空学院	—	5 MW	氢气液两相冷却/液氮冷却	半超导发电机、全超导电动机	√	√

*基金项目：先进航空动力创新工作站项目（HKCX2020-02-014）

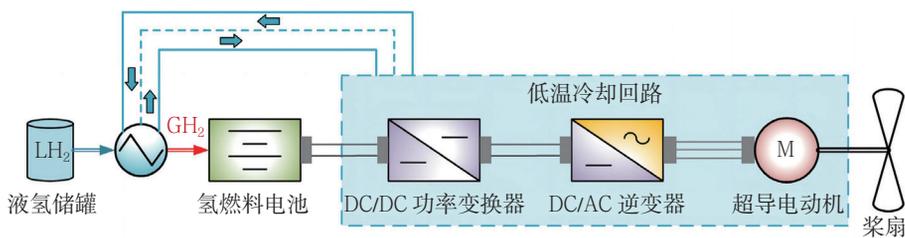


图1 燃料电池电推进系统架构

低温冷却、燃料电池推进技术，但目前并未考虑应用超导技术。

燃料电池电推进系统

FCEPS利用液氢作为燃料和冷却介质，通过燃料电池产生电能驱动超导电动机推进飞行器。FCEPS主要由液氢储罐、燃料电池、DC/DC功率变换器、DC/AC逆变器、超导电动机和浆扇等部件组成，如图1所示。

液氢作为冷却介质为低温冷却回路提供低温环境，蒸发后的液氢与氧气在燃料电池中反应产生电能，实现超导电动机机载冷却和氢能源循环利用。FCEPS具备高功率密度、高能源转换效率和环境友好等优势。然而，燃料电池的工作效率和功率水平直接决定系统整体功率等级，目前主要适用于小型通勤飞机（航程 < 500 km）和支线飞机（航程 < 2000 km）等规模较小的应用。

挪威科技大学研究团队开展了燃料电池电推进系统在4.1 MW级ATR 72-600支线飞机的应用研究，比较了氢饱和蒸汽/液态冷却形式、超导电动机直驱/齿轮驱动浆扇形式对系统功率密度和效率的影响，并在保守、基线和乐观等3个发展水平下计算分析^[1]。研究表明，氢以液态形式进入冷却回路时，超导电动机可选择MgB₂或REBCO材料，而以饱和蒸汽形式只能选择REBCO材

料。FCHPS在乐观预测水平下具有较高的功率密度 ($PTW_{tot} > 1.5 \text{ kW/kg}$) 和效率 ($\eta_{tot} > 45\%$)，而基线和保守水平功率密度约为0.79 kW/kg和0.3 kW/kg。

空客公司先进超导和低温动力总成系统（ASCEND）用于演示500 kW级纯电/混合电推进方案^[2]，如图2所示。研究结果表明1 kW冷量的

布雷顿制冷机可以满足ASCEND的冷却需求，然而考虑到系统可能应用于大功率氢燃料电池/氢涡轮推进飞行器，液氢冷却被认为是最佳解决方案。ASCEND演示装置预计将于2023年年底进行测试和评估，并计划在2025年完成飞行验证。

燃料电池混合电推进系统

FCHEPS利用液氢作为燃料和冷却介质，氢燃料电池和能源转换装置共同产生电能驱动超导电动机推进飞行器。FCHEPS在FCEPS基础上增加锂电池以提供额外的动力输出，如图3所示。由DC/AC逆变器、超导交流线缆、超导电动机和浆扇组成的超导电推进单元具备拓展性，

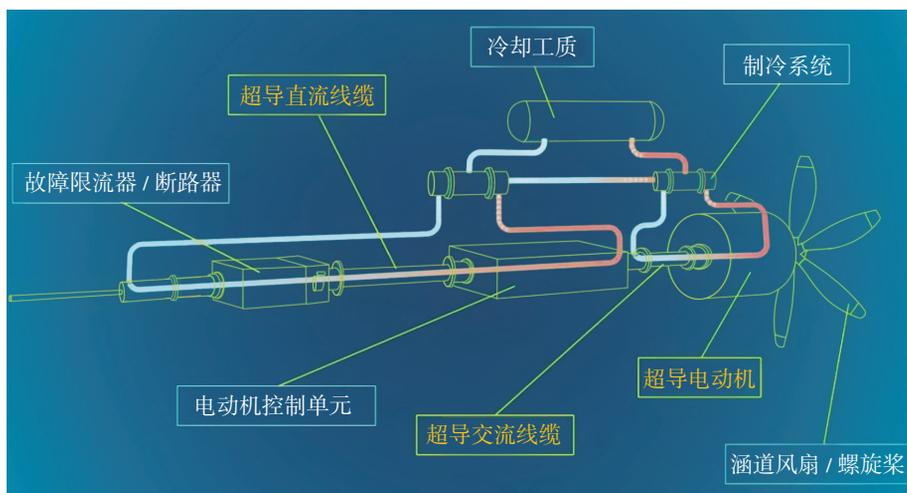


图2 空客公司先进超导和低温动力总成系统^[2]

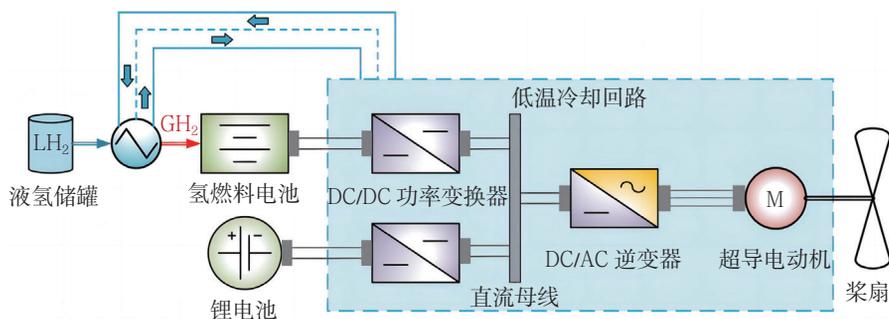


图3 燃料电池混合电推进系统架构

可以根据需求功率设计分布式推进架构。

FCHEPS具有高效、多能源协同工作和环保等优势，燃料电池和锂电池的组合可提供灵活的动力输出，适应不同工况并节约能源。根据系统部件当前发展水平，FCHEPS主要适用于通勤飞机和支线飞机（航程 < 2000 km）。

美国伊利诺伊大学飞行器高效电气技术中心（CHEETA）研究团队以波音公司的737-800为基线，联合多家科研单位共同设计了28 MW级燃料电池混合电推进系统^[3]，如图4所示。研究表明，FCHEPS相比于传统的涡扇动力系统具有分布式电推进、高电化学效率以及低推力衰减率等优势，但液氢储罐和燃料电池的存在会增加飞机起飞质量。

英国吉凯恩（GKN）公司开发的氢电混合动力系统（H₂GEAR）采用低温氦冷却回路维持部件工作温度，并与低温氢燃料回路进行换热^[4]。研究表明，低温氢/氦协同冷却方案可保障系统冷却的安全性和稳定性，相同推进功率下综合功率转换效率由84%提高至94%，同时能减轻约12%的质量。固定最大起飞质量时质量减轻可以转化为额外的燃料分配和储存，从而将飞机的航程提高约3倍。预计到2025年，H₂GEAR演示装置将完成系统验证。

韩国昌原国立大学以空客A320商用飞机为基线，设计了总功率为45 MW的燃料电池混合电推进系统^[5]。FCHEPS包含9个并联单元，主动力源为40 MW氢燃料电池，辅助能源为5 MW锂电池。单个超导电动机额定功率为5 MW、额定电压3.3 kV、转速为7000 r/min。研究表明，应用

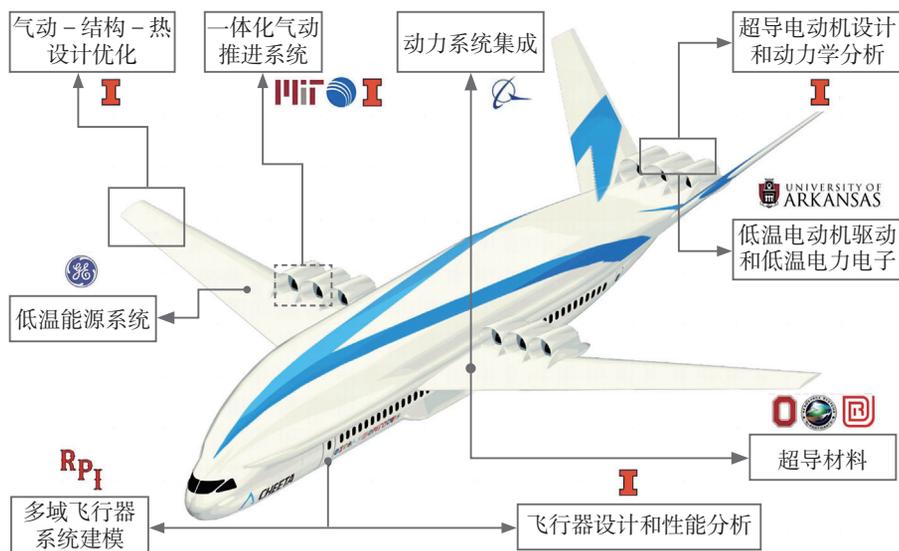


图4 美国伊利诺伊大学CHEETA飞行器^[3]

超导技术和液氢冷却技术可将电动机的功率密度由3.03 kW/kg提升至6.25 kW/kg。实验室规模的5 kW超导电动机使用氢-氦换热器实现了氢稳定液化，并将高温超导（HTS）线圈温度保持在30 K。

涡轮电推进系统

TEPS利用液氢作为低温冷却回路的冷却介质，将蒸发后的氢气与空气混合燃烧驱动涡轮发动机，并通过超导发电机将机械能转化为电能。TEPS主要由液氢储罐、涡轮机、超导发电机/电动机、超导线缆、低温电力电子器件和桨扇组成，如图5所示。超导电推进单元仍具备拓展

性，可根据涡轮燃烧室的设计选择是否保留原有的航空燃油供给路径。

TEPS具有高功率密度、高能量密度和节能减排等优势，且系统功率水平可根据涡轮机的发展迭代不断增加，适用于支线飞机（航程 < 2000 km）和短航程飞机（航程 < 4500 km）。

德国斯图加特大学在2018年提出了液氢冷却涡轮电推进运输级概念飞机“北极星”（Polaris），动力系统总功率为44 MW^[6]，如图6所示。液氢用于中冷换热式涡轮压缩机的冷却，同时在作为燃料燃烧之前冷却超导发电机/电动机和超导线缆。Polaris利用液氢冷却、超导电力传输和燃气轮机中冷等协同效应，在

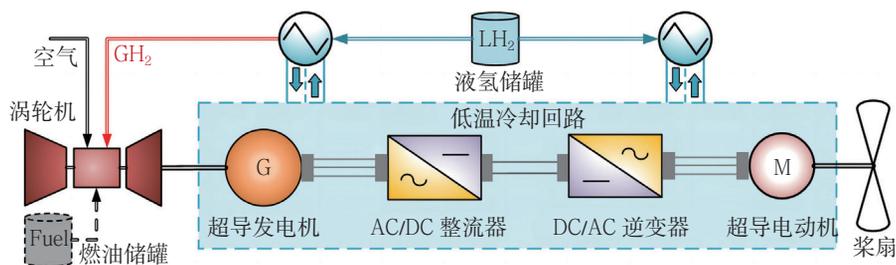


图5 涡轮电推进系统架构

相同的设计任务下，与A320相比可降低61.39%的能耗、80%的氮氧化物排放。

罗罗公司的研究团队开展了涡轮电推进系统在220座、4630km的A321 XLR中程飞机的应用研究，系统总功率为41 MW，电气部件全部采用液氢冷却^[7]。研究分析了直流母线电压（1000 ~ 4000 V）、超导电动机转速（3500 ~ 15000 r/min）和交流电频率（175 ~ 1000 Hz）对系统质量和效率的影响。研究表明，母线电压为1500 V、交流电频率为350 Hz时，TEPS质量最小，但整体效率较低。高转速（15000 r/min）超导电动机在质量上最具优势，但额外的变速箱和冷却系统会牺牲推进效率，因此低转速（3500 r/min）超导电动机直驱桨扇是最佳推进方案。HTS线缆所占的系统质量份额较小，而超导发电机/电动机总质量份额约为30%，低温电力电子质量份额约为44%。

美国佛罗里达州立大学针对美国国家航空航天局（NASA）的N3-X涡轮电推进飞行器开发了热网络模型，模拟由超导发电机/电动机、超导线缆和低温电力电子组成的低温冷却回路^[8]，如图7所示。采用氢作为制冷剂，在液态、气态和气液两相等3种情况下模拟计算了维持部件工作温度所需的冷却剂质量流率。研究表明，气液两相冷却方式对于TEPS冷却需求的液氢质量流率最小，采用终端部件代替电力电子器件可以显著降低总体热负荷和减少冷却剂需求。

涡轮混合电推进系统

TEHPS以涡轮发动机为主动动力装置、

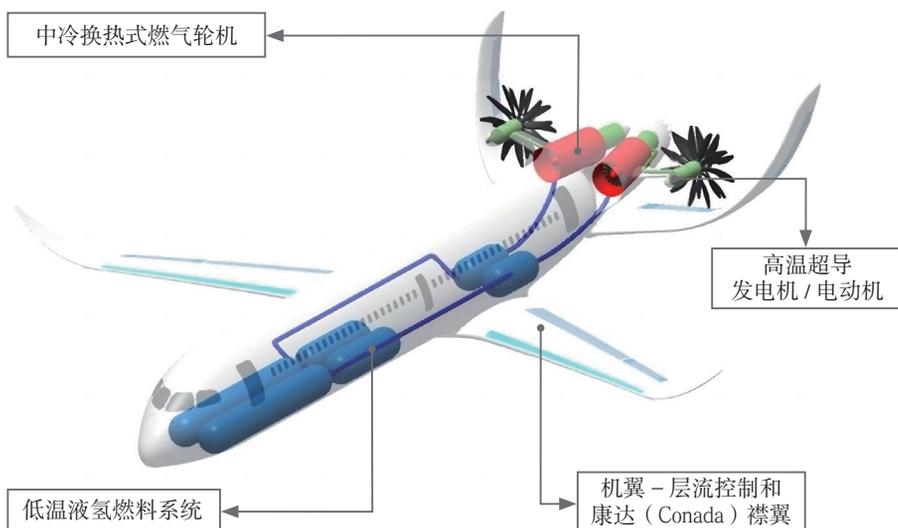


图6 德国斯图加特大学Polaris涡轮电推进运输级概念飞机^[6]

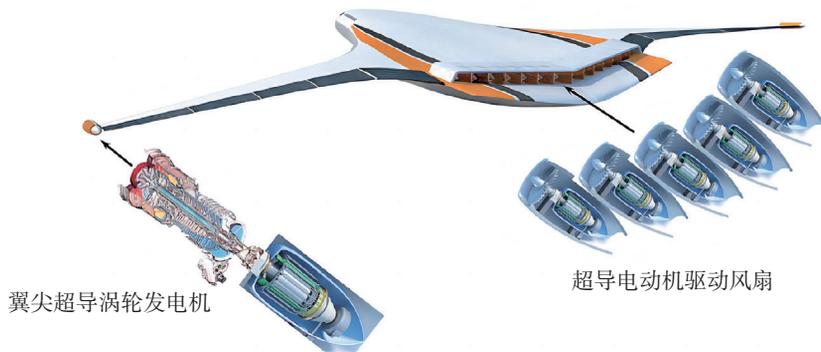


图7 N3-X涡轮电推进飞行器^[8]

氢燃料电池或锂电池为辅助动力装置，液氢作为燃料和冷却介质，蒸发后的氢气供给涡轮燃烧室或氢燃料电池产生机械能或电能。图8（a）表示串联式TEHPS架构，超导发电机、氢燃料电池/锂电池提供电能输出，通过直流母线和低温电力电子器件驱动分布式超导电推进单元，实现高压传输以减少整体质量；图8（b）表示并联式TEHPS架构，氢燃料电池/锂电池输出的电能通过超导电动机转化为机械能，与涡轮发动机输出轴联结齿轮箱驱动桨扇产生推力。

TEHPS通过改进燃气涡轮循环，

使涡轮发动机始终运行在最佳工作点，降低总体功耗，适用于支线飞机（航程 < 2000 km）、短程飞机（航程 < 4500 km）和中程飞机（航程 < 10000 km）。

俄罗斯中央航空发动机研究院于2021年7月完成了涡轮混合电推进验证机雅克-40LL首次试飞。涡轮发电机功率为400 kW，转速为12000 r/min，效率可达96%，锂电池为辅助动力装置。超导电动机质量约为100 kg，转速为2500 r/min，可以产生400 ~ 500 kW功率，液氮冷却剂流量为6 L/h。

俄罗斯莫斯科航空学院设计的

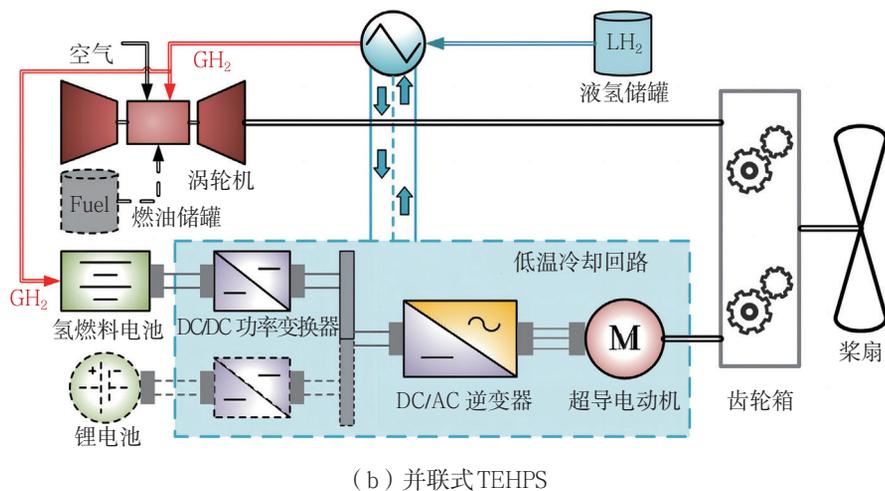
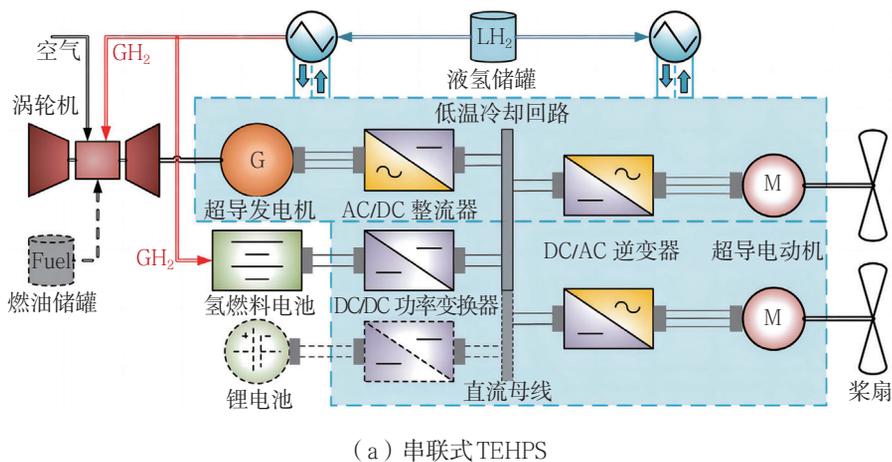


图8 涡轮混合电推进系统架构

涡轮混合电推进系统中半超导发电机额定功率为5 MW，转子为永磁材料，定子为HTS线圈，理论功率密度可达36.5 kW/kg。全超导电动机额定功率为2.5 MW，方案1中电动机的定子和转子材料均为HTS线圈，功率密度可达23 kW/kg；方案2中电动机定子绕组采用MgB₂材料，转子采用HTS线圈，功率密度约为16 kW/kg^[9]。氢气液两相冷却可以实现超导发电机/电动机和低温整流器连续且稳定的冷却。超导发电机原理样机为100 kW、12000 r/min，理论功率密度为2.4 kW/kg，液氮冷却流量需求为3.2 L/h。

关键技术发展

为促进超导氢电推进系统在航空电推进领域的广泛应用，需要在多个技术层面持续进行发展和创新，包括液氢储存、超导电机、超导配电、低温电力电子技术、氢涡轮燃烧室和能量储存等领域。

机载液氢储存技术

机载液氢储存技术需要在储罐材料、结构和密封等方面进行创新与突破，发展轻量化、高强度和耐腐蚀的储罐罐壁材料和绝缘材料，同时优化储罐的几何结构、机械结构和热结构。此外，液氢供给支路应配备防火和泄漏探测装置、压力

释放装置等安全措施，同时改善密封和隔热技术以减少液氢蒸发和能量损失。

兆瓦级高功率密度超导电机技术

实现兆瓦级高功率密度超导电机关键要在超导材料、冷却系统和验证样机等方面进行创新和突破。探索高性能、易制备的超导材料以提高临界电流密度，如REBCO、MgB₂等高温超导材料。氢/氦协同冷却、氢气液两相冷却以及固氮蓄冷等冷却技术具备机载应用前景。目前，实验室级超导电机多为小型缩比样机，实际功率密度与理论值存在差距。因此，亟须推动大功率超导电机样机的研制、加工以及地面测试平台的建立，验证超导电机技术和冷却技术的可行性和成熟度。

超导配电技术

超导配电技术需要在超导材料、高效冷却和故障保护等领域展开创新与突破。YBCO和MgB₂等高温超导材料具备低损耗、低成本和高效制冷等优势，有望逐步取代目前广泛采用的BSCCO材料。采用液氮冷却、液氢冷却以及相变冷却等高效冷却方式可以满足超导配电装置的冷却需求。同时，优化超导输配电装置的电流控制策略，并建立高效的故障检测和保护机制。中高压HTS电缆的技术成熟度不断提高，为其快速应用于超导氢电推进系统提供了巨大可能性。

兆瓦级低温电力电子技术

低温电力电子器件需要开发轻量化和紧凑化的解决方案以减轻部件质量，半导体器件的选择和拓扑结构的设计至关重要。Si MOSFET、IGBT和GaN HEMT等器件在低温下具有较

低的导通损耗和开关损耗。对于兆瓦级DC/DC功率变换器,多级飞行电容器拓扑结构和多电平Buck/Boost型非隔离拓扑结构具有高效率、高功率密度等优势。对于兆瓦级DC/AC逆变器,3L-NPC、3L-ANPC、混合型多级ANPC-H等拓扑结构具有低谐波输出、高效率等优势。此外,器件封装、栅极驱动和保护、EMI滤波器等技术也是低温电力电子器件应用于兆瓦级超导氢电推进系统的关键因素。

氢涡轮燃烧室技术

氢涡轮燃烧室需要在燃烧室设计与控制、材料创新和氢损伤防护等方面进行创新与突破。为满足氢燃料发动机的长期使用需求,优先考虑奥氏体合金用于高压氢管路,并探索耐高温氢腐蚀的材料以保障燃烧室和涡轮等高温高压部件的稳定性。

高效储能技术

氢燃料电池需要高效、安全的燃料储存和配送系统,同时加强开发更具活性和廉价的催化剂材料,以及稳定性和导电性更优的膜电解质材料。质子交换膜燃料电池具有高功率密度、快速启动时间和较低工作温度等优势,目前更适合应用于超导氢电推进系统。高能量密度锂电池需要开发性能更佳的电池管理系统实时监测和控制电池参数,同时改进电池材料和电解液的设计以提高离子传输速率和承载功率。锂离子电池、锂聚合物电池的能量密度为 $150 \sim 350 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,而固态锂电池具有能量密度高、安全性高和使用寿命长等优势,在高能量密度电池领域具有重要前景。

结束语

融合高效和高功率密度的超导技术、高比能量和优异冷却能力的氢能技术以及轻质小型化的低温冷却技术,超导氢电推进系统具备实现机载大功率、高效率推进和能源重复利用的潜力。根据通勤、支线、短程和中程飞行器的性能指标和节能减排目标,超导氢电推进系统可考虑燃料电池/涡轮、电推进/混合电推进等架构配置。然而,机载液氢储存、兆瓦级高功率密度超导电机、超导输配电、兆瓦级低温电力电子、氢涡轮燃烧室和高效能量储存等关键技术仍需要持续创新和突破。随着超导电机和超导线缆等部件技术的日益完善,超导氢电推进系统将是面向零碳发展目标的重要解决方案。

航空动力

(白明亮,北京航空航天大学,博士研究生,主要从事超导氢动力系统设计和空天智能电推进技术研究)

参考文献

- [1] HARTMANN C, NOLAND J K, NILSSEN R, et al. Dual use of liquid hydrogen in a next-generation PEMFC-powered regional aircraft with superconducting propulsion[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4760-4778.
- [2] YBANEZ L, COLLE A, NILSSON E, et al. ASCEND: The first step towards cryogenic electric propulsion[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2022, 1241(1): 012034.
- [3] ANSELL P J. Hydrogen-Electric Aircraft Technologies and Integration: Enabling an environmentally sustainable aviation future[J]. IEEE Electrification Magazine, 2022, 10(2): 6-16.
- [4] HALES M O, WOOD N, HARRISON S, et al. H2GEAR Hydrogen Electric Powertrain - System Architecture[C]. AIAA AVIATION 2023 Forum. 2023: 3874.
- [5] DA SILVA F F, FERNANDES J F P, DA COSTA BRANCO P J. Barriers and challenges going from conventional to cryogenic superconducting propulsion for hybrid and all-electric aircrafts[J]. Energies, 2021, 14(21): 6861.
- [6] NAM G D, SUNG H J, HA D W, et al. Design and analysis of cryogenic cooling system for electric propulsion system using liquid hydrogen[J]. Energies, 2023, 16(1): 527.
- [7] BOLL M, CORDUAN M, BISER S, et al. A holistic system approach for short range passenger aircraft with cryogenic propulsion system[J]. Superconductor Science and Technology, 2020, 33(4): 044014.
- [8] BARNOLA I, FREEMAN D, CHEETHAM P, et al. Exploring options for integrated cryogenic circulation loop of superconducting power devices on electric aircraft[C]. 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). IEEE, 2019: 1-8.
- [9] DEZHIN D S, DEZHINA I N. Development of the future aircraft propulsion system based on HTS electrical equipment with liquid hydrogen cooling[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(4): 1-5.