

# 混合电推进系统关键技术研究进展

李 龙, 王 鹏

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**摘 要:** 介绍了混合电推进系统的类型及工作原理, 对比了串联、并联、串-并联三类混合电推进系统的优缺点。总结了美国、欧盟和俄罗斯混合电推进系统的发展现状。分析了不同飞机类型对混合电推进系统部件性能的要求, 以及混合电推进系统部件的技术现状和未来技术需求。重点阐述了美国和欧盟在混合电推进系统关键技术超导电机方面的研制进展, 并对超导电机的超导性保持技术, 即冷却系统的冷却剂和冷却方案的选取进行了探讨, 以期为国内混合电推进系统的研发思路和技术突破提供参考。

**关键词:** 航空发动机; 混合电推进系统; 超导电机; 低温恒温器; 超导性保持技术; 冷却剂

**中图分类号:** V23    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2620 (2021) 03-0049-05

## Development of key technologies for hybrid electric propulsion system

LI Long, WANG Peng

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The classification and working principle of hybrid electric propulsion systems were introduced, and merits and demerits of different hybrid electric systems including series hybrid, parallel hybrid, series/parallel partial hybrid were compared. The development status of hybrid electric systems in the United States, the European Union and Russia was summarized; the performance requirements of hybrid electric propulsion system components for different aircrafts were analyzed; and the technical status and future technical requirements of hybrid propulsion system components were summarized. Focusing on the research progress of superconducting motor, the key technologies of hybrid propulsion system in the United States and the European Union, the selection of coolant and cooling scheme of cooling system for superconducting motor superconducting maintenance technology was analyzed, in order to provide reference for the research and development of domestic hybrid propulsion system.

**Key words:** aero-engine; hybrid electric propulsion system; superconducting motor; cryostat; superconducting maintenance technology; coolant

## 1 引言

随着燃油成本的不断攀升以及越来越严苛的环保要求, 航空动力技术已经从不断提升涡扇发动机效率逐渐向提升航空动力循环效率发展, 且日益呈现出改变发动机构型、甚至是颠覆传统涡扇发动机构型的趋势。2019年巴黎航展上, 来自空客、波音等7家航空企业的首席技术官联合声明, 称航空业正迎来以数字化和电气化为典型特征的“第三时代”<sup>[1]</sup>, 飞机推进

系统的电气化是一种必然趋势<sup>[2]</sup>。与传统燃油飞机相比, 电推进和混合电推进飞机具有低噪声和低排放的优点。此外, 混合电推进系统可在传统航空发动机效率较低的起飞、爬升、着陆、滑行阶段, 让发动机始终运行在最佳效率状态。这无疑能显著节省燃油、降低噪声。为此, 尽管因电机功率密度和电池能量密度不足, 短期内飞机无法实现全电推进, 但融合了电推进和燃油动力系统优势的混合电推进系统, 将成为支线飞机, 乃至干线飞机的重要动力选项。

收稿日期: 2020-07-23

作者简介: 李 龙(1988-), 女, 湖南岳阳人, 工程师, 主要从事航空发动机战略情报和技术情报研究。

截止目前,美国、欧盟、俄罗斯等均组织开展了混合电推进系统的探索和研究,取得了丰硕的成果。美国NASA推出了带后置边界层推进器(风扇)的单通道涡轮电推进飞机;英国罗-罗开展了M250混合电项目,并于2019年宣布完成M250混合电版本的地面试验;俄罗斯在2017年展出了采用超导技术的500 kW混合电概念验证机,目标是开展2.0 MW级动力系统的飞行平台试验验证。但目前的技术尚不能达到商业应用水平,仍有诸多关键技术亟待突破,尤其是电池能量密度和电机功率密度问题。

本文针对目前混合电推进系统的研究进展以及需突破的关键技术,分析了国外混合电推进系统研究概况,主要部件技术需求,以及电动部件的发展现状与未来应用需求之间的差距;重点阐述了欧盟和美国在混合电推进系统关键技术——超导性保持技术方面的研究进展,以期为我国混合电推进系统研究提供参考。

## 2 电推进系统分类及对比分析

电推进系统按照结构和工作原理分为全电、涡轮电和混合电三类<sup>[3]</sup>。全电推进系统采用电池作为飞机唯一的推进动力来源,适合于轻型飞机。混合电推进系统采用燃气涡轮发动机作为推进系统和电池充电装置,在一个/多个飞行阶段,电池也提供部分推进动力。混合电推进系统按照结构,可分为串联混合电、并联混合电和串-并联混合电,其各自的优缺点见表1。

表1 三种混合电结构优缺点比较  
Table 1 Merits and demerits of hybrid structures

系统类型	优点	缺点
串联	<ul style="list-style-type: none"> <li>-内燃机通常以最大效率转速工作;</li> <li>-不需要传输系统,且相对于其他两种结构,齿轮副需求量更小,效率损失更低;</li> <li>-控制系统相对简单;</li> <li>-可以兼容分布式推进系统</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-高速时折损总效率;</li> <li>-电动机尺寸必须满足最大功率需求,增加了成本、质量和体积</li> </ul>
并联	<ul style="list-style-type: none"> <li>-巡航时总效率比其他两种结构高;</li> <li>-电动机尺寸比其他两种结构小;</li> <li>-设计灵活性比其他两种结构大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-机械传动系统复杂;</li> <li>-内燃机无法随时以最大效率工作</li> </ul>
串-并联	<ul style="list-style-type: none"> <li>-可灵活管理最大功率流量;</li> <li>-内燃机尺寸相对其他两种结构更小、效率更高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>相对于其他两种结构,系统更复杂,电路效率更低</li> </ul>

## 3 国外混合电推进系统项目研究概况

针对未来宽体客机,NASA于2011年推出了涡轮电分布式推进系统。该推进系统由两台安装在翼尖的涡轴发动机驱动超导发电机发电,再由发电机驱动15台嵌入机身的超导电动机带动风扇产生推力。后来由于该方案技术风险过大,NASA聚焦到常规布局混合电推进技术飞机方案——带后置边界层推进器(风扇)的单通道涡轮电推进飞机。该飞机机翼下方2台涡扇发动机驱动发电机为电动机供电,风扇由2.6 MW电动机驱动。

欧盟在“航迹”2050计划下探索了分布式混合电推进系统。其中,E-FanX<sup>[4]</sup>项目对英国BAE系统公司的AVRO RJ100支线飞机进行混合电推进改装。具体设计是将罗-罗公司的AE2100涡桨发动机的核心机与西门子公司研制的2.5 MW的发电机连接,为2 MW电动机和电能储存装置充电,系统电压高达3 kV,是目前研制的功率最大、电压最高的航空电推进系统。此外,罗-罗还开展了M250混合电项目,并于2019年11月宣布完成M250混合电版本的地面试验,试验测试了M250的串联混合电、并联混合电和涡轮电工作模式。该动力系统功率范围为0.5~1.0 MW,由M250发动机、高能量密度电池系统、发电机、功率转换电子装置和先进功率管理和控制系统组成,可以分布式电推进系统的形式装备混合电垂直起降飞行器、通航飞机和混合电直升机。后续,罗-罗将用APUS i-5<sup>[5]</sup>飞机验证混合电技术在传统起降飞行器上的实际应用。

法国赛峰公司于2018年9月在直升机发动机测试中心进行了首次混合电推进系统地面试验<sup>[6]</sup>。其两台功率达45 kW的ENGINEUS电动机在法国支线飞机初创公司VoltAero公司的卡西欧1号混合电验证机上进行了飞行试验。目前,赛峰公司正在开发一套名为BPMS<sup>[7]</sup>的简易智能电动机系统,该系统包含航空电动机和推进系统,理论输出功率达1.0 MW。

俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)在2017年年莫斯科航展上披露了其第一台涡轮电推进飞机发动机的研制计划,并展出了500 kW级概念发动机模型。该发动机将采用SuperOx公司的超导材料,计划在3年内完成500 kW验证机的飞行平台试验;随后开展用于19座飞机的2.0 MW级动力系统的飞行平台试验验证,其动力可能由4台0.5 MW发动机或1台2.0 MW发动机提供。

### 4 混合电推进系统部件技术需求及发展现状

混合电推进系统部件主要包括生成电能的发电机系统,进行能量转换、调节和分配的电子装置,电路保护装置,电动机和储能装置。美国国家科学院预测,未来20年内,为适应电气化推进系统需求,电动机和发电机的比功率应增加至约9 kW/kg,对应功率增加1.0~3.0 MW<sup>[8]</sup>。表2给出了不同飞机类型对电推进系统部件的性能要求。表3示出了混合电推进系统部件技术指标现状和未来需求。

### 5 混合电推进系统超导电机研制进展及关键技术

由表2可知,混合电推进系统对发电机和电动机的功率需求都在兆瓦级以上。传统的发电机和电动机,无法在满足飞机动力体积和质量要求下实现兆瓦级功率,为此必须降低导体的电阻。如果在电

机中使用超导线材或带材代替传统的铜导线,可降低损耗,提高电机的效率<sup>[9]</sup>,且超导带材的载流密度很高,还可降低电机设备的质量和体积。由此可见,超导电机是实现混合电推进的一个关键技术。目前,美国和欧盟都针对混合电推进系统超导电机展开了研究,取得了一定的进展。

#### 5.1 超导电机研制进展

##### 5.1.1 NASA 高效兆瓦电机项目

NASA 格林研究中心研制了一台1.4 MW的高效兆瓦电机(HEMM)。该电机为电励同步电机,采用自冷却超导转子<sup>[10]</sup>,转子有12极,其性能和几何参数见表4。为最大化电磁容量,超导线圈采用了独特的超导转子结构包容性设计。尽量减小转子和定子之间的空隙,同时尽可能把线圈朝转子表面向外移动,以实现最佳转子性能。图1示出了高效兆瓦电机超导转子结构示意图。

HEMM采用了第2代高温超导体(HTS)REBCO

表2 不同飞机对电推进系统部件的性能要求

Table 2 Performance requirements of electric propulsion system components for different aircrafts

飞机类型	动力类型	电系统功率容量/MW (包含功率转换电子装置)	比功率 (kW/kg)	电池比能量/(Wh/kg) (可重复充电)
通用航空和通勤飞机	并联混合电	< 1.0(电动机)	> 3	> 250
	全电	< 1.0(电动机)	> 6.5	> 400
	涡轮电	< 1.0(电动机和发电机)	> 6.5	未知
支线 and 单通道飞机	并联混合电	1.0 ~ 6.0(电动机)	> 3	> 800
	全电	1.0 ~ 11.0(电动机)	> 6.5	> 1 800
	涡轮电	1.5 ~ 3.0(电动机), 1.0 ~ 11.0(发电机)	> 6.5	未知
双通道飞机	并联混合电	无研究		未知
	全电	不可行		未知
	涡轮电	4.0(电动机), 30.0(发电机)	> 10	未知
大飞机	APU	0.5 ~ 1.0(发电机)	> 3	无研究

表3 混合电推进系统部件技术指标现状和需求

Table 3 Technical index status and demands of hybrid electric propulsion system components

技术指标	电动机和发电机		功率转换电子装置		电池(可重复充电) 比能量/(Wh/kg)	
	功率容量/MW	比功率/(kW/kg)	功率容量/MW	比功率/(kW/kg)		
当前水平	非低温(已服役系统数据)	0.25	2.2	0.25	2.2	200 ~ 250
	低温动力(超导电机)	1.50	0.2			
	俄亥俄州立大学3年目标	0.30	15.0			
	俄亥俄州立大学5年目标	2.00	15.0	2.00	23.0	
研究目标	空客15年目标		10.0 ~ 15.0			
	NASA 10年目标	1.00 ~ 3.00	13.0	1.00 ~ 3.00	15.0	
	NASA 15年目标	5~10	16.0	5.00 ~ 10.00	19.0	
	美国空军20年目标	1.00	5.0	1.00	5.0	400 ~ 600
美国国家科学院预测目标	未来20年内应用目标 (非低温)	约为1.00 ~ 3.00	约为9.0	约为1.00 ~ 3.00	约为9.0	约为400 ~ 600

表4 高效兆瓦电机超导转子的性能和几何参数

Table 4 Key characteristics and geometry of superconducting rotor for high efficiency MW motor

特性/参数	类型/数值	特性/参数	类型/数值
转速/(r/min)	6 800	超导体宽度/mm	4
电频/Hz	DC	超导体厚度/ $\mu\text{m}$	65
磁极数	12	超导体最小弯曲半径/mm	15
定子结构	半无槽	超导体最大磁通量密度/T	2
转子外径/cm	30	超导体工作温度/K	< 63
转子、定子轴向长度/cm	12.5	超导体DC工作电流/A	51.5
径向间隙/mm	3		

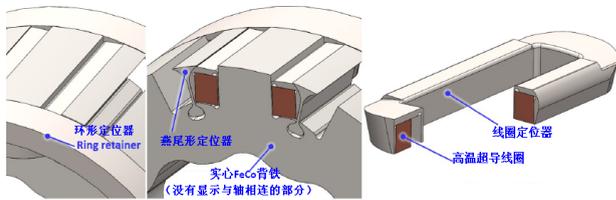


图1 高效兆瓦电机超导转子结构

Fig.1 Structural design of superconducting rotor for high efficiency MW motor

(钕铜氧化物)材料,在温度低于77 K环境下性能优良。导体横截面为矩形,给定体积下其堆积因数大。HEMM转子线圈为跑道形(图2),包含四层,由独立扁平形/跑道线圈组成。每个线圈包含230匝,采用相同HTS带材串联连接。层与层之间用低温环氧树脂粘结。每层之间和线圈顶端各有一块几何参数相同的不锈钢薄板,起机械支撑和轴向对准每层每匝的作用。

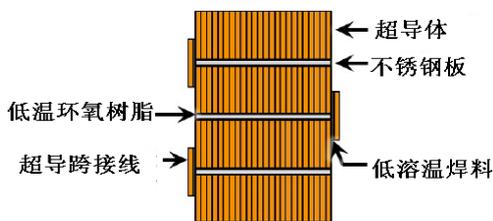


图2 高效兆瓦电机转子线圈的横截面几何形状

Fig.2 Scheme of the cross-sectional geometry of HEMM's rotor coils

HEMM采用超导线圈(图1)可使定子内部和周围的磁通密度最大化,但也存在断路风险——超导体温度过高、磁通量或传导电流过大,会导致超导体的超导性消失。采用限制电流的措施可以缓解断路

风险,但诸如分析误差、不可预测热源或瞬态工作等因素还是会造断路。为此,需采用控制器监控线圈的状态,一旦检测到断开前兆,立即减小电流。另外,还可以采用移除线圈匝间绝缘的方法避免断路。

### 5.1.2 欧盟先进超导电机验证机项目

欧盟先进超导电机验证机(ASuMED)项目<sup>[11]</sup>始于2017年,由德国电动机制造商Oswald Elektromotoren公司牵头,参与方包括剑桥大学、Demaco低温公司、Slovakian电气工程研究院等多家机构。该项目旨在研制功重比为20 kW/kg、效率大于99%、转速6 000 r/min、功率为1.0 MW的全超导电机。1.0 MW电动机只是验证超导技术的原理样机,后期可对该样机进行缩放设计,让功率达到10.0 MW以上。

ASuMED项目研制的电机为全超导同步电机,其转子和定子分别采用叠层式超导带材和超导线圈,以产生极高的磁通密度,实现大功重比。系统冷却采用了低温恒温器冷却系统。定子的低温恒温器为毛细管系统,以液氢作为制冷剂。转子的低温恒温器因冷却工作温度、冷却要求和包含密封件在内的旋转部件相关要求,其技术难度较大。在考虑了一系列可能的传热方案后,选择采用温度为25 K的氦气强制对流循环带走热量的形式实现转子冷却。转子超导叠层的工作温度为27~35 K,超导叠层与冷却剂之间的温差保持在2~10 K范围。电机采用了定制的功率控制电子软硬件,控制器中含有以满足适航要求为目标的反相器。ASuMED项目已经开发了一台1.0 MW超导电机,目前正在进行试验。

### 5.2 超导电机超导性保持技术

超导性是超导电机正常工作的关键,包含零电阻现象和完全抗磁性/迈斯纳效应两方面内容,涉及临界温度、临界电流密度和临界磁场三大参数。NASA在研制1.5 MW超导电机时,采用限制电流、实施线圈状态监控和移除线圈匝间绝缘的方式,保证超导体相关参数不超出规定范围。欧盟ASuMED项目则重点研究了低温冷却技术。ASuMED采用高效的低温恒温器冷却。其电机的超导材料为YBCO(钇钡铜氧化物)带材,工作温度必须低于93 K,可以选用氮、氖、氢、氦等制冷剂,采用冷却头主动冷却,且依据具体冷却温度不同,氢和氦可以是液态或气态。另外,为尽可能减少低温恒温器效率损失,选用多层反射膜反射热辐射,同时低温恒温器内的真空环境也可防止对流传热。图3示出了全超导电机低温恒温器的结构。

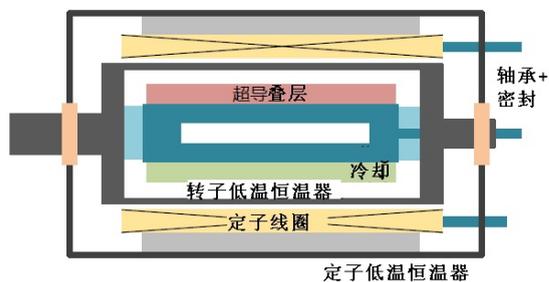


图3 超导电机低温恒温器

Fig.3 Cryostat of superconducting rotor

转子和定子的低温恒温器冷却技术有所不同。定子采用超导体,在交流电下的热损失高达系统功率的1%,冷却要求更高,需采用液态制冷剂浴和冷却回路。其中液态制冷方案存在铁耗,会产生额外损失,且需在气隙内增加低温恒温器,导致系统功率下降。而冷却回路方案设计灵活,不存在额外铁耗,也不需要气隙中设置低温恒温器。冷却回路包括闭环和开式冷却两种:在闭环冷却回路中,应选用氦等导热率好的气体作为制冷剂,且要有通风口。在开式冷却回路中,建议采用液态制冷剂。超导转子在直流电下工作,冷却需求不高。其低温恒温器的设计挑战在于部件,包括旋转系统和关键机械连接件。因轴承和旋转密封件只在室温下工作,需与制冷剂保持良好的隔热状态,必要时额外加热。超导转子低温恒温器可用设计方案包含热虹吸管环流(闭环冷却)、直接主动冷却、开环冷却。

## 6 结束语

混合电推进系统是未来航空动力的一个发展方向。综合分析国外混合电推进系统的研发思路和途径,建议国内从以下两个方面入手开展混合电推进系统的研发:

(1) 混合电推进系统研发所涉及的内燃机和电池、电机,航空动力研制单位应基于自身在航空发动机研制方面的丰富经验,联合在电池、电机等产品开发方面较出色的民间公司和高校多沟通,结合各自的优势,协同研制,反复磨合,共同进行混合电推进

系统研发。

(2) 国内混合电推进系统研发机构及研究人员应实时跟踪、关注国外超导电机的研制进展,积极协同飞机方进行需求对接,开发出功率、体积、稳定性、耐久性等均能满足飞机系统需求的超导电机。

## 参考文献:

- [1] 罗 彧. 混合电推进:推进技术发展的重要方向[J]. 航空动力, 2019, 2(5):60.
- [2] 廖忠权. 支线客机的混合电推进之路[J]. 航空动力, 2019, 2(5):61—64.
- [3] 廖忠权. 航空混合电推进系统发展研究[J]. 航空动力, 2018, 1(2):45—50.
- [4] Paul Stein. Our sustainability journey[EB/OL]. [http://www.rolls-royce.com/media/press\\_releases/2020/24-04-2020-our-sustainability-journey.aspx](http://www.rolls-royce.com/media/press_releases/2020/24-04-2020-our-sustainability-journey.aspx).
- [5] Brenon Melse. Rolls-Royce announces hybrid-electric flight i-5 demonstrator aircraft [EB/OL]. (2019-11-19). <https://billionairetoys.com>.
- [6] Pau-Pryness Airport. First ground test of Safran's hybrid electric propulsion system [EB/OL]. (2018-7-19). <https://www.defense-aerospace.com>.
- [7] Nicolas Zart. Safran's new aviation electric motor—clean technical interview[EB/OL]. <https://cleantechnica.com/2019/11/07>.
- [8] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Commercial aircraft propulsion and energy systems research: reducing global carbon emissions[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2016.
- [9] 杨 勇. 超导技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(9):48—50.
- [10] Scheidler J J, Talerico T F. Progress toward the critical design of the superconducting rotor for NASA's 1.4 MW high-efficiency electric machine[EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190030740> 2020-02-24T02: 53: 52+00:00Z.
- [11] Dr Jody Muelaner. Fully superconducting motor Prepares for testing[EB/OL]. (2019-8-20). <http://www.engineering.com/Author/ID/495667/Jody Muelaner>.