

NASA 亚声速大型飞机电推进技术研究综述



王妙香*

中国航空工业发展研究中心, 北京 100024

摘要:本文通过对近年来美国国家航空航天局(NASA)在亚声速大型电推进飞机(EAP)领域探索的研究,从飞机布局的变革、电推进系统技术成熟度的提高以及基础设施建设等几个方面进行总结分析。梳理了NASA研究的几种大型飞机可能的电推进布局形式,跟踪NASA在电机、功率变换器以及所采用的电推进材料等关键技术方面的研究进展,以及测试电推进飞机性能必需的地面试验台的建设情况。电推进技术的进步和发展,改变了传统的飞机设计思想,利用电推进的技术特征,考虑电推进与飞机机体的集成等设计理念,对我国大型飞机电推进技术的研究具有一定的参考和借鉴意义。

关键词:电推进飞机;分布式布局;飞机设计;边界层摄取;电推进飞机试验台;协同集成

中图分类号:V272

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.11.004

近年来,航空业巨头、各大研究机构以及初创企业等不断加快电推进飞机(EAP)研发脚步,各种设计概念不断推出^[1]。空客E-FAN、中国锐翔^[2]等多款电推进通用飞机已经问世,但受限于目前的技术水平,面向大型商用飞机的电推进系统目前还处于探索研究阶段。美国国家航空航天局(NASA)在这方面的研究起步较早,项目设置系统全面。在飞机布局方面,NASA研究了面向中期(2035年)服役的单通道电推进飞机概念,包括桶状机身和机翼布局、带有后部边界层推进器的单通道部分涡轮电推进飞机布局(STARC-ABL)等。在部件关键技术方面,NASA正在加大投资力度,提高核心部件高效电机、变换器和配电系统的技术成熟度,确定中期概念桶状机身和机翼布局所需的最佳涡轮系统和边界层抽吸系统。在基础设施方面,NASA格林研究中心正在建设电动飞机动力系统测试设施(NASA电推进飞机试验台(NEAT)),NASA阿姆斯特朗飞行研究中心正在建造电动飞机控制系统测试设施(混合动力电推进综合系统试验台(HEIST))。可以说,NASA电推进飞机研制所需要的各模块都已准备就绪,预计2025年前对大型飞机EAP构型进行测试,并有望于2035年投入使用。跟踪分析NASA的研究活动对我国开展大型飞机电推进技术研

究具有一定的借鉴意义。

1 运输类电推进飞机的布局形式

工业界、学术界、相关政府机构和NASA等科研机构进行了大量研究,探索了多种EAP飞机布局形式^[3-5]。鉴于当前的技术水平,现在提出的喷气支线飞机和干线飞机电推进构型通常包括三种:部分涡轮电、全涡轮电和混合电推进(见表1)。此外,电气化给飞机设计带来更多的设计自由度。例如,部分涡轮电或全涡轮电概念也可以适度采用混合推进形式,即允许飞机采用电动滑行或利用存储电能来完成其他需求能量相对低的飞行任务。表1总结了几种主要的电推进飞机概念方案,根据动力系统构型、电机数量以及电功率占总推进功率的比例分类。

涡轮电或部分涡轮电系统将所有能量存储在燃料中,并将其中的全部或一部分转换成电能驱动推进器。混合电推进系统将一部分能量存储在燃料中,其余部分存储在电池或等效能量存储系统中,具有多种可能的实施方案。并联混合电推进系统很有发展前景,使用来自涡轮机的机械能和来自电动机的电能来驱动风扇,并且已经进行了多项研究。涡轮发动机的并联混合不能改善飞机固有的气动特

收稿日期:2019-06-07; 退修日期:2019-06-28; 录用日期:2019-07-15

*通信作者. Tel.: 010-57827745 E-mail: avicwmx@163.com

引用格式: Wang Miaoxiang. Overview of NASA electrified aircraft propulsion research for large subsonic transports[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 22-29. 王妙香. NASA 亚声速大型飞机电推进技术研究综述[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 22-29.

表1 电推进飞机(EAP)构型
Table 1 Electrified Aircraft Propulsion (EAP) aircraft configurations

研究方案	座级	马赫数	气动布局	电推进构型	电力/MW
NASA STARC-ABL	154	0.8	桶状机身加机翼	部分涡轮电	两台涡扇发动机和一个后部电动风扇
波音 SUGAR Freeze	154	0.7	桶状机身和桁架支撑翼	部分涡轮电(燃料电池)	两台涡扇发动机和一个后部电动风扇
NASA N3-X	300	0.84	翼身融合体	涡轮电	16台尾部电机驱动风扇
ESAero ECO-150	150	0.7	桶状机身和分裂式机翼	涡轮电	16台机翼电机驱动风扇
波音 SUGAR Volt	154	0.7	桶状机身和桁架支撑翼	并联混合电动	两个电动助力涡轮风扇
罗罗	154	0.7	桶状机身加机翼	并联混合电动	两个电动助力涡轮风扇
UTRC	154	0.7	桶状机身加机翼	并联混合电动	两个电动助力涡轮风扇

性,然而,它可能提供任务运行优势,并且从易于实施的角度来看,可能是EAP概念可行的第一步。现有飞机已经从

带有嵌入式发电机的涡扇发动机轴发电,用起动发电机(起动/发电一体化)替换发电机可能是一个明智的选择。目前,全电动(即电池供电)飞机所需的储能技术在能源容量和能量密度方面还达不到驱动大型飞机的要求,无法在2045年之前用于大型跨声速飞机的运营,但对于机型较小、速度较慢和航程较短的飞机来说已经可以满足要求。以下是部分方案的简介。

(1)部分涡轮电:NASA的STARC-ABL方案,可降低油耗7%~12%

NASA通过对一系列单通道涡轮电推进飞机(STARC)概念的研究^[6],探索涡轮电推进方案。概念之一的STARC-ABL(见图1)设想在2035年投入使用,这种部分涡轮电推进结构包括两个带发电机的翼下涡轮风扇,发电机从涡轮风扇轴上提取动力,并将电传送到后机身的轴对称、边界层抽吸风扇,飞机推进动力由翼下燃油发动机和尾部风扇共同提供。结果表明,与常规构型相比,涡轮电动概念可使经济任务燃油消耗减少7%,设计任务燃料消耗减少12%。初步设计方案采用 Ma 0.7的巡航速度,后来对方案进行修改完善,将巡航速度提高到 Ma 0.8,同时仍显示出类似的燃油消耗减少值。

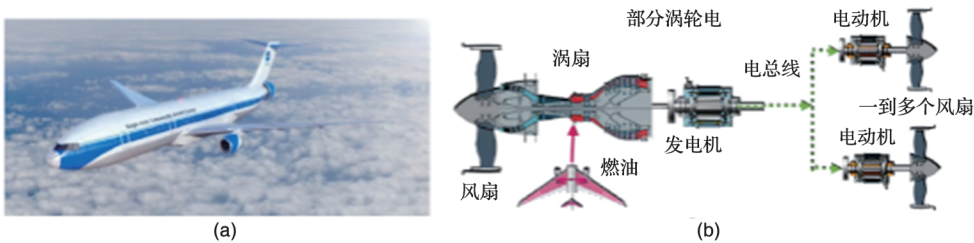


图1 采用尾部边界层抽吸的NASA单通道部分涡轮电动飞机(STARC-ABL)方案
Fig.1 NASA single-aisle turboelectric aircraft with aft boundary layer (STARC-ABL)

(2)部分涡轮电:波音SUGAR Freeze方案,可降低油耗56%

波音公司在NASA的亚声速超绿色飞机研究(SUGAR)项目支持下,进行了大量的飞机构型研究,并采用了不同的技术构型。其中的构型之一是混合动力电推进飞机SUGAR Freeze,如图2所示,此构型采用一系列先进技术,包括桁架支撑翼加上尾部的边界层抽吸风扇,最大限度地提高空气动力效率。尾部风扇由固体氧化物燃料电池循环(Topping Cycle)供电,由带有超导电源管理系统的超导电机驱动。采用这些先进技术,使900mile经济任务的能源消耗减少了56%。

(3)全涡轮电:NASA N3-X方案,可降低油耗70%

几年前,NASA提出了N3-X的概念(见图3)^[7,8],探索翼身融合体布局与基于超导电机和功率分配的全涡轮电和全分布式电推进系统相结合的新构型。此构型估计与波音777-200LR机型相比燃油消耗减少70%。具有边界层抽吸风扇的涡轮分布式推进系统的贡献占33%,翼身融合体结构占另外14%,燃油节省效益的其余部分由其他先进技术贡献。NASA将继续对此种布局积极进行技术开发,预计可带来更大的收益。此外,此构型在早期研究中做了一些简化假设,需要对其进行更新,以便与其他概念相适应。

(4)全涡轮电:试验系统航宇公司(EsAero)ECO-150R方案,油耗水平与目前基本相当

试验航宇系统公司研发支线喷气机和单通道EAP概

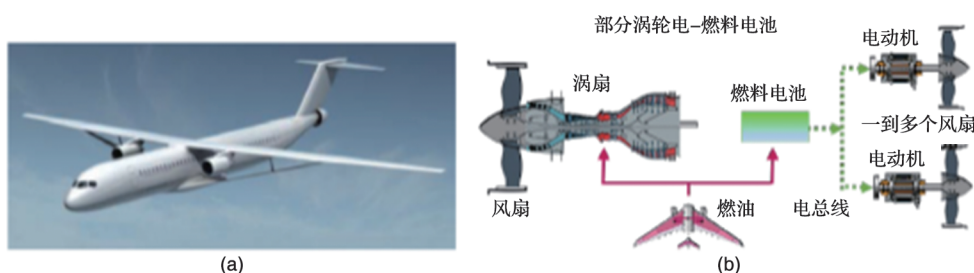


图2 波音亚声速超绿色飞机研究(SUGAR)Freeze方案

Fig. 2 Boeing subsonic ultra green aircraft research (SUGAR) Freeze

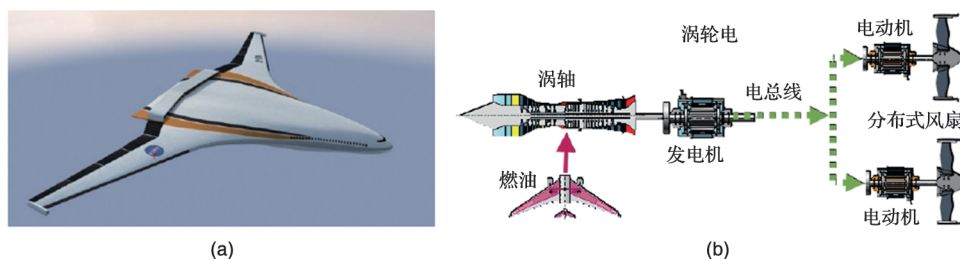


图3 NASA N3-X方案

Fig. 3 NASA N3-X

念,利用分裂机翼概念以及全分布推进系统。ECO-150研究已经考虑了电气系统的各种技术,从用液态氢冷却的超导电机到各种技术水平的传统电机。经过一系列的研究,改进了系统气动、推进、结构、电气和热性能的评估工具,获得更高的精度。根据基本技术假设,ECO-150的性能相当或显著超过当前飞机燃油消耗。最近研究的ECO-150R概念,采用中期电机技术可达到与现有飞机相似的性能(见图4)。

(5) 并联混合动力电推进:波音 SUGAR Volt 方案

波音 SUGAR Volt 设计采用并联混合电驱动概念^[9],通过电(池)带动电机驱动风扇来增强巡航性能。该构型为带有电动增强涡扇的先进桁架支撑翼飞机,与波音 737-800 基准飞机相比,基于 1667km 的飞行距离,桁架支撑翼技术可使飞机燃油和能源消耗减少 53%。波音在 1.3MW (1750hp) 和 5.3MW (7150hp) 两个功率水平下对 SUGAR Volt (见图5)概念方案进行了评估。相比先进的桁架支撑翼飞机,1.3MW 电机构型可使燃油消耗再降低 7%,从而达到 NASA 降低 60% 燃油消耗的目标。然而,因为 Volt 构型飞机更重一些,这两款飞机的总任务能耗相同(传统动力桁架支撑布局对比 EAP 桁架支撑布局)。5.3MW 构型提供了足够的动力,可以使涡轮风扇核心发动机在巡航阶段处于

怠速状态,使任务燃油消耗再降低 10%。然而,相对于桁架支撑翼技术,更大更重的电动机和更大的电池组导致任务能耗仅降低 8%。尽管这种并联混合结构改善了空中燃油消耗和排放,但对总的能源效率的影响可以忽略不计。

2 运输类电推进飞机关键技术研发

2.1 电机

电力领域的研究主要集中在制造重量轻、效率高的电机和兆瓦级功率转换器。NASA 资助开发的兆瓦级电动机正在伊利诺伊大学 (1MW) 和俄亥俄州立大学 (高达 10MW) 进行。NASA 格伦研究中心在设计一台 1.4MW 的电动机,这些电机的关键性能和设计参数见表 2。

2.1.1 永磁同步电机

伊利诺伊大学在研制一台功重比超过 13kW/kg、效率 96% 的永磁同步电动机。如图 6(a) 所示,该设计采用外转子,复合材料壳体和永磁铁。罗罗自由工场“电动变速发动机”(Electrically Variable Engine) 概念集成的电机如图 6(b) 所示^[10],转子原型如图 6(c) 所示。研究人员对电磁、结构和热设计进行了大量的分析和子组件测试,对转子进行了分析和优化,并进行了全速验证试验,以确保最佳的永磁/碳纤维外转子设计。电动机的基频相对较高,需要优化填料

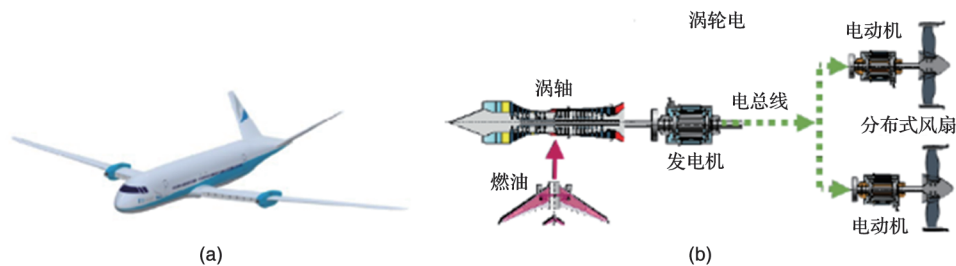


图4 ESAero 公司 ECO-150R方案
Fig. 4 ESAero ECO-150R



图5 波音亚声速超绿色飞机研究(SUGAR)提出的SUGAR Volt 方案
Fig.5 Boeing Subsonic Ultra Green Aircraft Research (SUGAR) Volt

表2 由NASA赞助的兆瓦级电机开发
Table 2 Megawatt-scale electric machine developments sponsored by NASA

研究机构	持续额定功率/MW	比功率目标/(kW/kg)	效率目标/%	电机类型	速度/(r/min)	尺寸
伊利诺伊大学	1	13	>96	永磁同步	18000	作动筒 0.45m×0.12m
俄亥俄州立大学	2.7	13	>96	感应异步	2500	环形1.0m×0.12m
NASA 格伦研究中心	1.4	16	>98	绕线异步	6800	作动筒 0.40m×0.12m

比例,使用成形绕线。在优化绕组、灌封工艺(Potting Process)以及对测试线圈进行热测量方面做了大量的工作,以确保预测的热点温度分析与试验结果一致。电机设计与伊利诺伊大学的设计和制造工作相协调,生产一种多电平逆变器,该逆变器有可能被用来驱动电机。

2.1.2 感应电机(异步电机的一种)

俄亥俄州立大学在研发一种环形感应电动机,采用创新的定子冷却方法,称为变截面湿线圈(Variable Cross-Section Wet Coil, VCSWC),以最大限度地提高电流密度。俄亥俄州立大学团队正在制造三台 300kW、1MW 和 2.7MW 的电机样

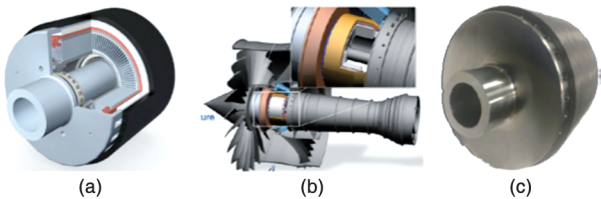


图6 伊利诺伊大学永磁电机
Fig. 6 University of Illinois permanent magnet motor

机,以验证关键技术,并完成了10MW 电机的概念设计。

VCSWC 技术利用扁导线,该扁导线与有源区槽宽一致,并且在端部变宽。扁导线通过槽并围绕定子外侧缠绕,并且在有源区外部的扁导线部分采用直接液体冷却(见图 7(a))。由于变截面的电阻降低,加上直接液体冷却,使得定子内的电流密度增大,从而提高电动机的功重比。10MW 的电机安装在涡轮风扇中,如图 7(b)所示。湿式线圈电机的第一个原型如图 7(c)所示。

这三种风险降低原型分别用来降低湿式线圈技术、变截面技术和全电动机集成技术的风险。第一台电机已完成,第二台在研制中,第三台电机正处于设计阶段。第三台电机计划 2.7MW,转子直径 1m,转速 2700r/min。

10MW 的环形电机设计利用相当多的电极来最小化定子和转子的横截面。电机额定速度为 5000r/min,气隙直径

约为1m。在大的气隙表面速度下运行可提高功重比,但会使结构设计复杂化并增加风阻损失。

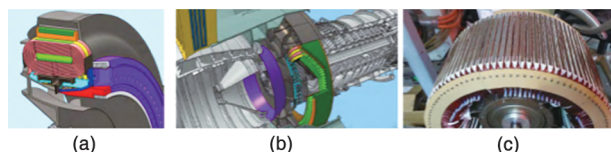


图7 俄亥俄州立大学10MW 环形电机

Fig. 7 The Ohio state university 10MW ring motor

2.1.3 绕线同步电机

NASA 格伦研究中心的一支小型团队在开发一种性能目标为16kW/kg,效率高于98%的绕线式同步电动机(见图8)。该电机结合了自冷却超导转子和无槽定子,使电机能够实现高的功重比和效率,而不存在像常规超导电机外部冷却的重量损失。选择同步绕线电机,在发电模式下,绕线电动机可以通过为励磁线圈断电来实现电机停转,而无需从驱动轴上分离。该设计励磁绕组使用高温直流超导体,提供永磁体或常规导体无法实现的磁场强度,从而实现高功重比和高效率。安装在转子上的超导体使用集成在转子中的低温冷却器进行冷却,因此飞机无须提供外部冷却系统。保持转子表面速度与其他两种电动机相比相对较低,多种飞机构型都可以采用直接电机驱动。

系统研究表明,将电机效率从目前的96%(现有技术水平)提高到98%或99%,可以减少STARC-ABL飞机的燃油消耗,相比于其7%~12%的基准效益,这一数字增加了1%~2%。另外,与基准相比,可以使废热量和相关热管理系统的热量分别减少到1/2或1/4。

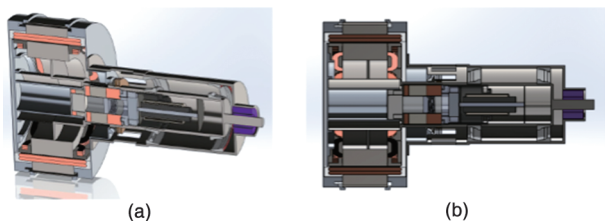


图8 NASA 格伦研究中心绕线同步电机

Fig. 8 NASA Glenn Research Center wound synchronous motor

2.2 变换器

功率变换器是大多数EAP飞机概念中的重要组成部分,用于实现交流电和直流电之间的转换。由于这种共性以及它们对动力系统重量的主要贡献,NASA赞助研究三个1MW级别变换器(直流到交流变换器)^[11]。假设直流输

入电压为1000V和2400V,每个输入电压都有一个三相交流输出,以解决在先进的EAP概念中为大型飞机的电动机供电通常需要的功率转换问题。虽然目前的航空动力系统被限制在540V直流($\pm 270V$)的最大电压水平,这些研究针对更高的总线电压,以确认增加电压对动力系统的整体尺寸和重量的积极效益。例如,与540V系统相比,2000V直流系统可以将直流电缆的重量从900kg减少到200kg,从而将1MW的电力输送到150ft距离外。

目前在研究两项针对19kW/kg功重比的传统液冷技术。通用电气(GE)正在建造一个使用碳化硅(SiC)电力电子技术的三相逆变器;伊利诺伊大学正在建造一个使用氮化镓转换的200kW多电平逆变器,该变换器支持扩展到1MW功率。此外,为支持可提供低温流体的飞机概念(例如,N3-X和SUGAR Freeze),波音公司正在开发一种低温冷却逆变器,其目标是26kW/kg、效率高于99.3%,已经进行了相当广泛的低温变换器特性测试,以了解低温对变换器性能的影响。表3对这些研究结果进行了总结。

表3 NASA赞助的兆瓦级变换器开发

Table 3 NASA-sponsored megawatt-scale converter developments

	持续额定功率/MW	比功率目标/(kW/kg)	效率目标/%	拓扑	切换材料	冷却
通用电气	1	19	99	3级	SiC/Si	液冷
伊利诺伊大学	0.2	19	99	7级	GaN	液冷
波音	1	26	99.3		Si	低温

2.3 电动飞机推进材料

NASA对磁性材料、绝缘材料和先进导电材料的投资研究,为电机、变换器和电力传输长期性能提升奠定了基础。为了支持这些努力,NASA 格伦研究中心建立了制造和特性研究能力,将下一代软磁材料从实验室转移到组件应用中。这种制造和加工技术的成熟大大提高了电感器、变压器和功率变换设备在更高频率和更高效率的使用,从而减少了系统级的磁损耗和组件尺寸。电缆是EAP系统质量的重要组成部分,也是材料研究至关重要的另一个重要领域。降低电缆质量的三种可能方法:高压传输、导电率高于铜(Cu)的正常导体以及超导体。通过对绝缘体的初步研究以及通过对铜碳纳米管(Cu-CNT)^[12]复合材料的研究,探索高导电率材料,实现了这些方法的成功。

NASA花了几年时间研究开发了一种很有前景的超导体,这种超导体能够以几百赫[兹]的频率携带交流电。该

超导体可用于电动机或配电电缆。NASA 的材料研究代表了一项长期投资,旨在广泛改善电力系统性能,并通过衍生到其他电力应用中产生广泛影响。

3 基础设施建设

为了在飞行测试之前验证EAP飞机的设计情况,目前NASA正在进行一些基础设施建设工作,为电推进飞机的研制提供必要的测试能力。在美国NASA格伦中心的梅溪站(Plum Brook)建设NASA电动飞机试验台(NEAT)^[13],以解决多兆瓦动力系统的全尺寸测试,将组件技术整合到整个系统中。在NASA的阿姆斯特朗飞行研究中心(AFRC)进行的混合电推进集成系统试验(HEIST),将探索低功率下的运行场景和飞行控制初步方法。

3.1 NASA 电动飞机试验台(NEAT)

NEAT用于实现未来单通道飞机全尺寸、实际飞行重量下的电推进系统地面试验。随着大型航空公司竞相减少排放、燃油消耗、噪声和维护成本,NASA预计将有更多的飞机系统转而使用电推进系统。电推进系统带来了电力和热管理、容错控制以及电磁干扰抑制等一系列问题,这些问题对于传统飞机和发动机设计者来说都是全新的,因此很有必要进行深入研究。初步研究表明,飞机电推进系统必须重量轻,并且能够在高功率、高电压和高空环境下工作,即使汽车和其他已经使用电驱动系统的行业也缺乏在这种复杂环境下使用电推进系统的经验,因此需要建设一个独特的电动飞机试验台。

NEAT的设计采用了可重构的架构,工业界、学术界和政府都可以利用这种架构进一步开发成熟的电动飞机技术。该试验台旨在与现有的其他设施互补,将电推进系统的技术成熟度(TRL)提高到6级,为飞行试验做好准备,NEAT全尺寸试验台如图9所示。

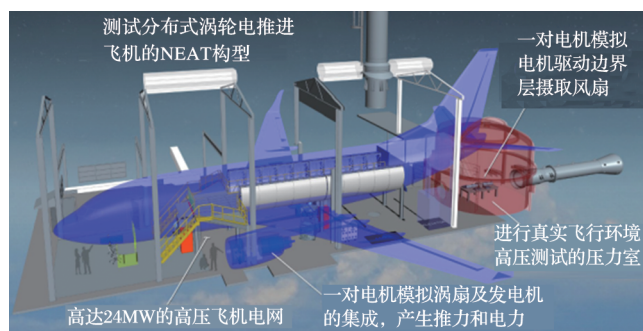


图9 NASA 电动飞机试验台(NEAT)

Fig. 9 NASA electric aircraft testbed(NEAT)

3.2 混合电推进集成系统试验台(HEIST)

混合电力集成系统试验台(HEIST)通过一些典型的硬件和飞行仿真来研究涡轮电力分布式推进技术的功率管理、功率转换、模块化架构和飞行控制律。即使对于适度采用分布式布局的飞机,在控制飞机、能量管理和安全性以及优化任务飞行剖面方面也有额外的自由度,以节省能源。ECO-150-R系统有16个机翼风扇,可充分利用其进行飞行控制研究。HEIST以铁鸟形式配置,功率可达到200kW级别,能提供涡轮电分布式飞机真实的交互、延迟、动态响应、故障条件和其他相互依赖性。与NEAT相比,HEIST的功率和电压水平被认为仅次于商用运输机,其试验能力可扩展到整个飞机系统,并可以执行包括驾驶舱操作在内的所有飞行控制。

图10说明了HEIST试验台的研究目标,通过4个嵌入式控制回路进行研究。

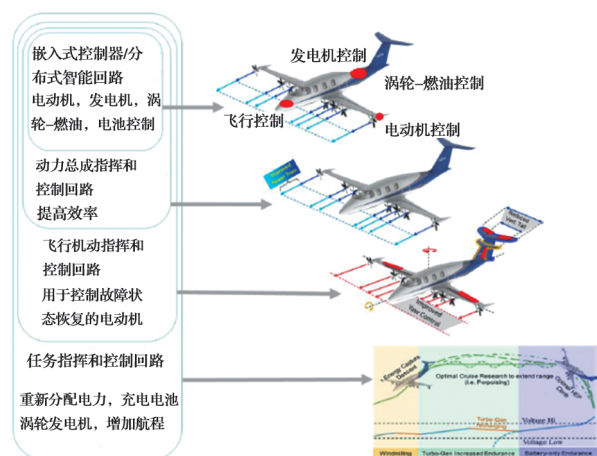


图10 混合电动集成系统试验台(HEIST)飞行控制研究目标

Fig. 10 Hybrid Electric Integrated System Testbed (HEIST) flight control research objectives

最内部回路是嵌入式控制器/分布式智能回路,包括用于管理风扇电机、涡轮发电机和电池系统的系统,以高效轻便的方式进行管理,具有足够的电磁干扰兼容性、足够的总线稳定性、故障管理和热管理。

动力总成指挥和控制回路在模拟飞机任务期间通过管理和分配各推进器的电气负载,优化飞机的气动和电气效率,分布式电动飞机的独特之处在于其固有的利用推进器进行飞行控制的能力。

飞行机动指挥和控制回路通过沿机翼的电动风扇进行偏航控制,提高稳定性,并提供从故障状态快速恢复的能力。通过模拟飞行剖面研究探索飞机的稳定性和性能极

限。如果能找到更好的方法来改善飞机的稳定性,就有可能减小飞机垂直尾翼的尺寸,进而大幅减少飞机的质量。

任务指挥和控制回路涵盖整个控制系统,通过控制电池和涡轮发电机系统来优化给定任务的燃油和电能的使用。通过这一外部回路进行任务剖面分析,以研究如何利用储能来增强涡轮电机的设计。涡轮发电机的尺寸可以满足巡航条件,电池在滑行/起飞、全功率爬升、动力着陆和着陆/滑行阶段期间提供助力动力。当涡轮发电机提供过多的功率时,电池也可以接收和储存能量,在下降阶段,机翼上安装的电机通过气流(风车)反向驱动并产生能量。

分布式电推进机翼的HEIST测试设备包括以下几个部分:螺旋桨、电池系统、涡轮发电机、测力计以及提供功率和通信的基础设施,都连接到核心飞行仿真系统(见图11)。机翼上安装18台高性能电动机,这些电动机最初由电池模拟驱动,最终会由200kW、350V电池系统,65kW涡轮发电机或两者组合提供电源。飞行控制算法通过与试验台交互的飞行模拟器开发和测试,并可扩展至兆瓦级飞机应用。螺旋桨提供静态推力载荷,利用4个测力计,可额外研究气动和风车效应,这些载荷会根据研究的任务剖面由飞行模拟控制。

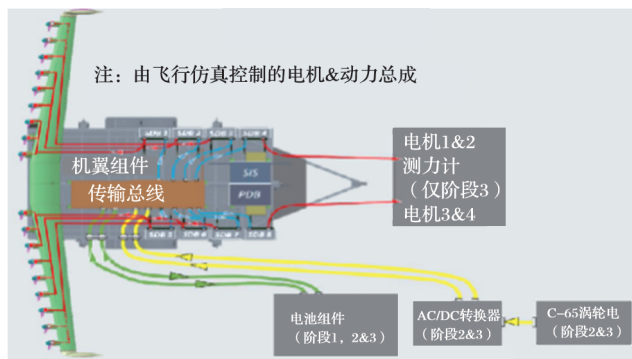


图11 混合电动集成系统试验台(HEIST)

Fig. 11 Hybrid-Electric Integrated Systems Testbed (HEIST)

4 结论

通过电动飞机概念和关键技术的研究,NASA在电动飞机(EAP)可行性方面取得了重大进展。在飞机系统领域,已经证明部分涡轮电动和并联混合电推进方案是可行的,可以在2035年投入使用,并且已经建立了具有极其重要的燃油消耗收益的全涡轮发电系统的长期愿景。NASA正在开发适用于各种大型飞机构型的关键动力传动系统技术,包括电机、变换器(逆变器/整流器)以及用于EMI滤波器和电缆的基础电气材料。

过去5年的研究大大提高了大型EAP系统的可行性,并且在未来5年内,将研究重点聚焦到最可行的概念上,准备这些概念飞行演示验证的手段。人们相信,已经具备在2025年前测试一个可行的大型飞机EAP构型,并有希望在2035年投入使用。

AST

参考文献

- [1] Welstead J, Felder J L. Conceptual design of a single-aisle turboelectric commercial transport with fuselage boundary layer ingestion[C]// 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA, Reston, VA, 2016.
- [2] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
Huang Jun, Yang Fengtian. Development and challenges of electric aircraft with new energies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 57-68. (in Chinese)
- [3] Papathakis K V. NASA turbo-electric distributed propulsion bench [C]// AIAA Propulsion and Energy Forum, AIAA 2016-4611, AIAA, Reston, VA, 2016.
- [4] Felder J L, Brown G V, Kim H D. Turboelectric distributed propulsion in a hybrid wing body aircraft[C]// 20th International Society for Airbreathing Engines, ISABE-2011-1340, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [5] Nalianda D, Singh R. Turbo-electric distributed propulsion opportunities, benefits and challenges [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86 (6): 543-549.
- [6] Ralph H, Jansen D, Cheryl B, et al. Overview of NASA electrified aircraft propulsion research for large subsonic transports[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [7] Berton J J, Kim H D, Singh R, et al. Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86 (6): 558-561.
- [8] Papathakis K V. NASA turbo-electric distributed propulsion bench [C]// AIAA Propulsion and Energy Forum, AIAA 2016-4611, AIAA, Reston, VA, 2016.
- [9] Bradley M K, Droney C K. Subsonic ultra green aircraft research: Phase II—Volume II—Hybrid electric exploration[R]. NASA/CR—2015-218704, 2015.

- [10] Perullo C, Trawick D, Armstrong M, et al. Cycle selection and sizing of a single-aisle transport with the Electrically Variable Engine (EVE) for fleet level fuel optimization[C]// 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2017-1923, AIAA, Reston, VA, 2017.
- [11] Liu S. Ultra-light highly efficient MW-class cryogenically-cooled inverter[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA, Reston, VA, 2017.
- [12] De Groh H C. Highly conductive wire: Cu carbon nanotube composite ampacity and metallic CNT buckypaper conductivity [R]. NASA/TM—2017-219480, 2017.
- [13] Dyson R W. NASA Electric Aircraft Testbed (NEAT) overview [Z]. IEEE Transportation Electrification Newsletter, 2017.
- (责任编辑 王昕)
- 作者简介**
王妙香(1977—)女,硕士,研究员。主要研究方向:民机情报研究、预先研究和技术论证。
Tel: 010-57827745
E-mail: avicwmx@163.com

Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion Research for Large Subsonic Transports

Wang Miaoxiang*

China Aviation Industry Development Research Center, Beijing 100024, China

Abstract: Over the past several years, NASA has been evaluating Electrified Aircraft Propulsion (EAP) configurations for regional jet and larger aircraft. A summary of the aircraft system studies, technology development, and facility development is provided. It sorts out the possible electric propulsion layouts and benefits of several large aircraft studied by NASA, and tracks the research progress of NASA on key technologies such as motors, power converters and electric propulsion materials used, as well as the construction of ground test beds necessary to test the performance of electric propulsion aircraft. The development of electric propulsion technology has changed the traditional aircraft design idea, fully utilized the technical characteristics of electric propulsion, considered the design concept of electric propulsion and aircraft body integration, which has certain reference significance for the research of electric propulsion technology of large aircraft in China.

Key Words: electrified aircraft propulsion; distributed configurations; aircraft design; boundary-layer ingestion; electric aircraft testbed; synergistic integration

Received: 2019-06-07; Revised: 2019-06-28; Accepted: 2019-07-15

*Corresponding author. Tel. : 010-57827745 E-mail: avicwmx@163.com