

# 分布式电推进飞机设计技术综述

王 勇

牧羽航空科技(江苏)有限公司 214111

**摘要:** 随着我国科技实力的不断增强,各种先进的科学技术手段应运而生,为我国航空航天领域的现代化发展起到了极大的促进作用。分布式电推进系统是航空领域中的一项重大突破,该技术主要是利用多个电力驱动推进器为飞机提供飞行动力,具有良好的环保性与鲁棒性,能够在显著提升飞机气动效率的同时进一步增强飞机的运载能力,从而切实保障飞机工程的设计质量与飞行安全。对此,为了推动我国分布式电推进飞机设计技术深入发展,本篇文章将依据国内外的相关研究,从飞机总体设计、气动设计、结构设计、系统与支持设施设计四个维度对分布式电推进飞机设计技术进行分析。

**关键词:** 分布式电推进; 飞机设计; 设计技术

## Overview of the design technology of distributed electric propulsion aircraft

Yong Wang

Muyu Aviation Technology (Jiangsu) Co., Ltd. 214111

**Abstract:** With the continuous enhancement of China's scientific and technological strength, various advanced scientific and technological means have emerged, which has played a great role in promoting the modernization of China's aerospace field. The distributed electric propulsion system is a major breakthrough in the aviation field. This technology mainly uses multiple electrically driven thrusters to provide flight power for aircraft. It has good environmental friendliness and robustness and can significantly improve the aerodynamic efficiency of aircraft while further enhancing the aircraft's carrying capacity, thus effectively ensuring the design quality and flight safety of aircraft engineering. To promote the deep development of China's distributed electric propulsion aircraft design technology, this article will analyze the design technology of distributed electric propulsion aircraft from four dimensions: overall design, aerodynamic design, structural design, and system and support facility design, based on relevant research at home and abroad.

**Keywords:** distributed electric propulsion; aircraft design; design technology

### 引言

截止至今,距离莱特兄弟成功完成人类历史上的首次飞机试飞已经过去了 100 多年,在这 100 多年的时间内,人类探索生存空间的脚步从未停歇。航空航天事业是人类文明持续发展与进步的重要标志,随着人类科技水平的不断提升,飞机性能与航空技术突飞猛进,飞机不仅成为了世界各国国防及国民经济建设中的重要支柱,更是在人类社会的发展历史中留下了浓墨重彩的一笔。目前,活塞式或者喷气式燃气涡轮发动机是绝大多数服役和在产飞机的主要动力装置,这样虽然能够为飞机提供充足的飞行动力,但是,由于这些动力装置是以石油作为燃料,而石油在燃烧过程中会因燃烧不完全而产生大量污染颗粒,不仅容易对环境造成严重污染,而且一些排量更大的活塞式发动机甚至会在飞行过程中排放出有毒重金属铅,从而对当地居民的身体健康构成极大的威胁,因此,为了有效减少航空污染,加大对生态

环境的保护力度,以电力作为主要动力的电动飞机逐渐成为了世界各国在航空发展过程中的研究重点,而分布式电推进飞机这一极具颠覆性的新型航空器也就由此诞生。

### 一、总体设计技术

#### 1. 分布式电推进飞机设计的可行性研究

从大型飞机发展的角度来看,早在 2000 年就有研究显示,将分布式电推进飞机技术与飞机设计有机结合到一起能够帮助该项技术有力突破在应用过程中所面临的阻碍,并通过推进机体集成、附面层吸入以及推力矢量与环量控制深入挖掘出分布式电推进飞机技术在商用、无人机以及军用领域的应用潜力。而据分布式电推进小型飞机相关研究显示,在飞机设计过程中引入购置成本,能够根据飞机起飞重量与成本之间的比例设计出适当的设计条件,这样一来电动飞机就可以根据电动能量密度情况作为依据来飞行,电池能量密度与起飞总重

的关系如下图 1 所示, 按需航空每天的航程分布如下图 2 所示。针对分布式电推进飞机应用于低雷诺数小型无人机的有关研究资料表明, 在对分布式电推进飞机系统集成于小型固定翼的前缘分别进行全螺旋桨、单翼尖螺旋桨、单翼以及双单翼螺旋桨四种模式的风洞试验时该系统可以表现出优异的法向力和续航能力<sup>[1]</sup>。

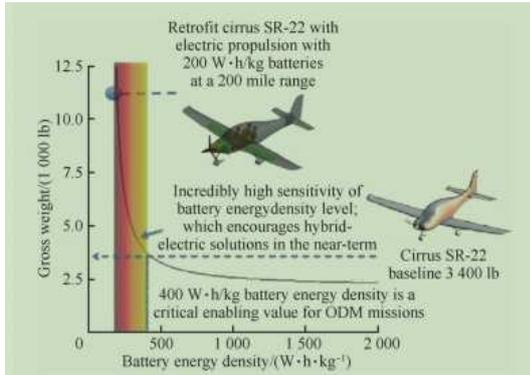


图 1. 电池能量密度与起飞总重的关系

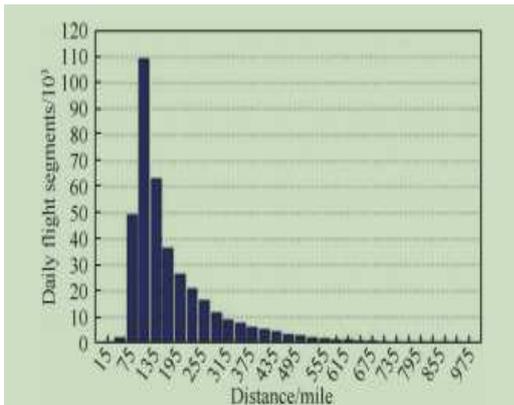


图 2. 按需航空每日的航程分布情况

## 2. 分布式电推进飞机设计的总体设计方案

总体设计方案是分布式电推进飞机设计工作的根本, 要保障分布式电推进飞机的设计效果, 就应根据分布式电推进飞机的设计要求和飞行需求制定科学合理的总体设计方案。有关以常规燃气轮机和电池驱动电机作为动力的支线飞机混合推进运行的研究表明, 是否按照飞行任务的实际要求选择与之相匹配的电池功率能量比是影响分布式电推进飞机设计效果的重要因素。而据美国在小型纯电飞机领域的研究显示, 通过捕捉并分析螺旋桨与机翼之间所产生的双向影响, 能够有效利用螺旋桨与机翼之间的协同作用来进一步提升空气动力效率, 从而为分布式电推进飞机设计的多学科优化夯实基础。

## 3. 分布式电推进飞机设计的飞行性能分析

深入分析飞行性能有利于提高飞机设计方案与设计要求之间的一致性, 从而在最大程度上保障飞机设计的实际效果。据分布式电推进飞机起飞着陆性能的相关研究显示, 分布式混电推进技术对飞机终端区运行效率有着极大的帮助。通过已改装成分布式混电飞机的起飞性能测试后发现, 16 螺旋桨构型的起飞距离要比 2 螺旋桨

构型短一半以上, 飞越 15 米障碍物的最短起飞距离可达到 20 米。而在允许范围内的噪声强度下降十分贝的条件下, 8 螺旋桨构型较 2 螺旋桨和 16 螺旋桨的表现最优, 能够比 2 螺旋桨构型的起飞距离短百分之四十。根据美国 NASA 利用 X-57 试验机所开展的分布式纯电推进飞机研究显示, 利用分布式电推进技术对燃油动力飞机的高升力系统进行改装, 能够将原有的机翼面积缩小 2.5 倍, 从而在降低飞机总体重量和阻力的同时提高升力, 为飞机的低速性能及巡航速度提供有力保障<sup>[2]</sup>。

## 二、气动设计技术

### 1. 分布式混合电推进气动设计

分布式混合电推进气动设计可以借助分布式推进器和飞机机体之间的耦合作用来优化飞机的气动性能, 从而在提升飞机的推进效率的同时降低飞行油耗。根据美国航空技术公司在分布式推进综合气动上的研究可知, 对比之前的飞机翼下发动机, 在相同推进环境下, 分布式推进系统所带来的跨声速效率增量可以达百分之八。而针对分布式推进飞机机翼外形的研究证明, 在机翼上加装分布式推进系统能够大大提高分布式推进飞机在飞行过程中所受到的升阻比, 对提升空气动力效率提供了极大的促进作用<sup>[3]</sup>。

### 2. 分布式纯电推进气动设计

分布式纯电动推进飞机的作用原理是利用螺旋桨在飞机机体机构中的分布式安装所产生的滑流效应和推力矢量来达成气动增升效果, 以便促使气动效率得以明显提高, 从而在优化飞机性能的同时有效降低飞行能耗。在分布式纯电推进的减阻效应研究中, 通过对采用前缘异步推进技术的分布式纯电推进机翼进行计算流体动力学实验发现当设计速度为 115 千米每小时该实验结果与预计的分析结果存在百分之十的差异, 而飞机的最大升力系数则比预期的设计值高出 4.3, 由此不难看出, 将前缘异步推进技术应用于分布式纯电推进机翼中有利于降低飞机在巡航过程中受到的阻力, 促进飞机乘坐质量提升。在关于同转与对转螺旋桨旋转方向对动力提升性能的影响研究中表示, 在飞机着陆时, 翼尖涡转相反旋转的螺旋桨能够在将飞机含动力增升的最大升力系数提升至 5.61 的同时使无动力增升机翼的面积缩小百分之五十以上。

### 3. 气动噪声与气动设计

由于分布式电推进技术能够通过提高推进器涵道比的方式降低风扇和推进系统所发出的噪声音量, 并且, 即便是电机在运转过程中会发出一定的噪音, 但是其噪音的音量也远比低压机、燃烧室以及涡轮部件低的多, 所以, 与传统配置的飞机相比, 分布式电推进飞机在起飞、着陆时所造成的区域噪声更小, 环保性能更为出色。根据分布式电推进飞机机电系统噪声的有关研究显示, 分布式电推进飞机机电系统所产生的噪声音量要较喷气式支线飞机风扇所产生的噪声少八至二十分贝, 并且比

单通道结构商用货运飞机的风扇噪声少十七至二十九分贝。英国 University of Southampton 通过研究 A320 型管状机身加机翼概念对分布式电推进飞机的噪声效果进行了评价, 通过统计采用涡轮发电机和电池这两个主要动力设备以及不同数量的推进器在工作时的噪声辐射来检验不同飞机在起飞时所产生的噪声效果, 研究结果证明, 与纯电推进飞机相比, 分布式混合电推进飞机所产生的噪声音量更小, 并且, 推进器的数量是影响分布式电推进飞机噪声大小的关键因素, 合理控制推进器的数量有利于优化分布式电推进飞机的环境性能, 达成降噪效果<sup>[4]</sup>。

### 三、结构设计技术

#### 1. 翼面结构设计

据分裂机翼支线客机超导分布式电推进结构集成与设计研究显示, 由于分布式涡轮电推进系统由多个不同的部件共同组成, 这样才能使涡轮发动机中燃料能量充分转化成分布式风扇所需要的能量, 但是, 系统则需要依靠变流电机转化成直流电, 并使用经过冷却后的绝缘电缆来为超导电机提供能量, 如此一来, 才能让机翼上的电机驱动风扇获取足够的动力, 因此, 每个电机都要安装直流电转换器来为电机提供交流电源, 由此我们不难看出, 对于飞机设计与结构集成而言, 动力系统中各个部件的重量、体积都是影响其最终效果的重要因素。

#### 2. 机翼气动弹性设计

针对分布式电推进飞机气动弹性设计方面, 一些研究显示: 飞机在飞行时可以根据机翼的柔韧性来改变分布式推进飞机的机翼状态, 以此来提高空气动力效率。经试验分析表明, 虽然该种控制法能够在一定程度上提高升阻比, 但是, 由于机翼的自然频率会在翼梢推进器的影响下而下降, 因此, 在此过程中存有一定的颤振风险。在分布式纯电推进通用飞机的研究领域, 通过分析分布式电推进机翼的气动弹性发现分布式纯电飞机的原型机翼并未出现震荡不稳定的现象, 仅在动态压力为三倍震颤间隙条件下产生发散现象。

### 四、系统与支持设施设计技术

#### 1. 分布式电推进飞机系统设计

我国上海交通大学在使用翼身融合和超导分布式推进系统的高效巡航短距起降飞机方案中设计出了一种翼身融合飞机分布式涡轮电推进系统, 研究结果证明, 电机的尺寸大小、展长以及进气口是影响推进器数量多少的主要条件, 单元重量会随着推进器数量的增多而下降, 并且, 附面吸层所起到的吸入效果对进气道的压力损失

#### 2. 分布式电推进飞机组件设计

分布式电推进飞机组件主要包括电池、电控、电机、螺旋桨或者涵道风扇。据分布式电推进分裂机翼螺旋桨设计研究显示, 一种嵌在分体机机翼内的分布式涡轮电推进系统与机翼空气动力学存在强耦合, 并且总压恢复与内翼性能之间存在以下关联: 进气道压力恢复是风扇

性能的主要支撑, 机翼的厚度会随着风扇直降的减小而降低, 而机翼阻力和重量又是影响机翼性能及效率的重要因素。

#### 3. 仿真系统及试验台设计

在分布式电推进飞机仿真系统领域, 国外专家所开发出的分布式涡轮电推进飞机的推进电网模拟器能够利用在小型电机中配备控制器的方式来模拟分布式涡轮电推进动力系统中的全部部件, 经该模拟实验证明, 电动驱动系统的闭环控制能够帮助该系统达成动态特性。而在对燃气轮发动机驱动发电机的仿真系统研究中显示, 利用两个永磁电机和驱动器能够模拟出驱动推进风扇电机, 从而将常规的电机系统转化升级为一个具有独特性的分布式涡轮电推进电网仿真程序, 为硬件在环提供实时仿真优势。在分布式电推进飞机试验台设计领域, 德国专家设计并研发出了一个功率为 200 千瓦的分布式涡轮电推进试验台, 该试验台通过研究电源管理、过渡复杂性、模块化结构以及分布式涡轮电推进技术的飞行控制规律评估出了分布式混合、纯电飞机构型的飞行准备情况<sup>[5]</sup>。

### 五、结论

总体设计、气动设计、结构设计以及系统与支持设施设计技术为分布式电推进飞机设计工作的顺利推进提供了良好的技术基础。总体设计技术可以根据分布式电推进飞机的实际设计要求制定出兼具完备性和可行性的设计方案; 气动设计技术能够在空气动力学的基础上从混合电推进、纯电推进以及气动噪声与启动设计分析三个方面全面提升分布式电推进飞机设计的环保性能和推进效率; 结构设计技术可以通过优化翼面结构和机翼启动弹性设计的方式有效降低因推进器在机体结构上的分布安装所导致的分布式电推进飞机与传统飞机结构设计之间的差异; 而系统与支持设施设计技术则能够从分布式电推进飞机系统、系统组件、仿真系统及试验台等方面全面保障分布式电推进飞机设计的实际效果以及飞机在实际投入使用时的整体性能。

#### 参考文献:

- [1] 雷涛, 孔德林, 王润龙, 等. 分布式电推进飞机动力系统评估优化方法 [J]. 航空学报, 2021, 42(6): 33-52.
- [2] 张星雨, 高正红, 雷涛, 等. 分布式电推进飞机气动-推进耦合特性地面试验 [J]. 航空学报, 2022, 43(8): 400-410.
- [3] 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): 46-62.
- [4] 佟刚, 薛奎举, 戴佳哲, 等. 分布式电推进系统与机翼的综合设计 [J]. 机械设计与制造, 2020(2): 56-59, 64.
- [5] 王鹏, 鞠新, 郑天慧, 等. 航空混合电推进系统的发展现状及应用前景 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 34(2): 52-57.