

# 电推进飞机促进航空业变革

## Electric Propulsion Aircraft Promoting New Changes of Aviation Industry

■ 李洪亮 康元丽 回彦年 / 中国商飞北京民用飞机技术研究中心

与传统燃油飞机相比，电推进飞机高效节能、排放低、噪声低、系统简单，正开启航空领域新一轮变革，引领航空技术创新，推动航空绿色发展。

在能源革命的背景下，中国提出“二氧化碳排放力争2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。在航空运输领域，目前性能最优的涡扇发动机的燃油效率在40%左右<sup>[1]</sup>，且已经很难再进一步提升，以传统的航空煤油为燃料的飞机在减排降噪上可挖掘的潜力已经非常有限，为实现航空领域节能减排目标，必须寻求新的解决方案。与此同时，新能源技术作为我国七大战略性新兴产业之一，目前已经初具规模：电机、电控、电池等技术得到了迅速发展，在工业领域锂电池能量密度上升到300W·h/kg，电机的功率密度达到4kW/kg以上，支撑电推进飞机研制的技术基础已经具备。除了新能源技术本身的发展，电推进飞机的成熟还需要结合多电/全电技术，开展系统结构、气动布局和飞行控制等方面的研究，以提高推进系统的效率，减少能源消耗，更需要为未来电推进飞机制定全新设计标准，建立适航体系方法，推动航空领域电气化进程。

### 电推进飞机的发展现状

目前，全球有200多项在研电推进飞机项目，包含传统固定翼飞机改造、新构型设计、全电推进系统和混合电推进等。近年来，电推进飞

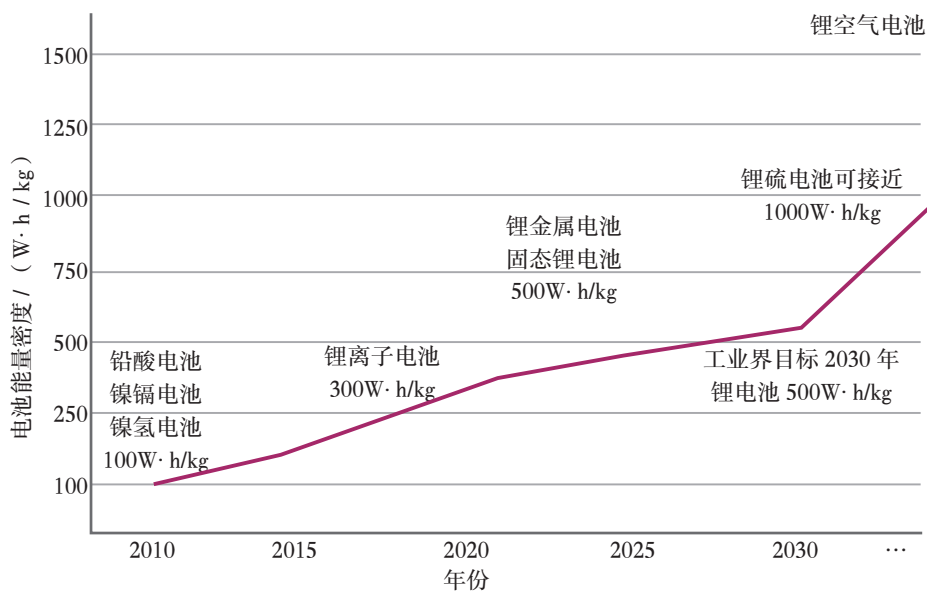


NASA 的X-57高升力螺旋桨飞机

机的发展方向可分为纯电动固定翼(eCTOL)、电动垂直起降(eVTOL)和混合电推进(HEA)3类。尽管各个机型的技术路线不同，但一般侧重两个方面的研究：一是电推进核心技术研究，包括高功率密度电驱动技术、电力电子技术，以及能源架构设计、综合能量管理、新型推进系统设计等；二是与气动、结构、飞控等融合设计，进行推进系统的整体创新，如美国国家航空航天局(NASA)的X-57高升力螺旋桨飞机和极光飞行科学公司的“雷击”飞

机的分布式涵道风扇，利用分布式动力降低阻力、提高升力，获得较高的气动效率，使飞机性能得以较大提升，最大程度地减小了电池的限制。

总的来看，目前电推进飞机的发展主要是以电气化技术为核心，促进能源行业持续进步，并不断促进与能源、气动、结构、动力和飞控等相关技术的深度融合，在当前电推进技术水平最大程度地实现气动、噪声、推进效率的全面提升<sup>[2]</sup>。此外，当前的新能源、自动驾驶、智能网联、增



锂电池技术发展预测

材制造和新型材料等技术的积累及市场化应用也为开展电推进飞机研制提供了条件保证，其设计与最新技术的结合也能促进航空业发展并形成新的生态圈，为航空业持续健康发展提供了难得的产业机遇。

### 电推进飞机的技术变革

电推进飞机的技术变革（或关键技术）主要体现在能源系统、飞机推进系统、飞机总体设计/气动布局和飞行控制等几个方面。

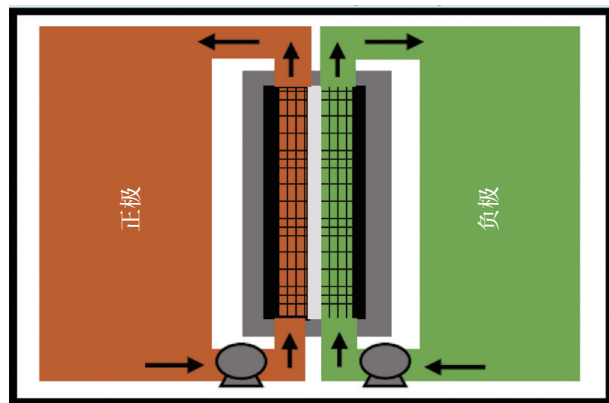
### 能源动力系统持续发展

电推进飞机最显著特点是能源架构简洁、动力系统效率高，这主要得益于省去了复杂传动机构，从电池到电驱动、电机端的传输效率可达90%以上。而电池和电机是电推进飞机的核心技术，其性能的优劣将直接影响飞机的整体性能。

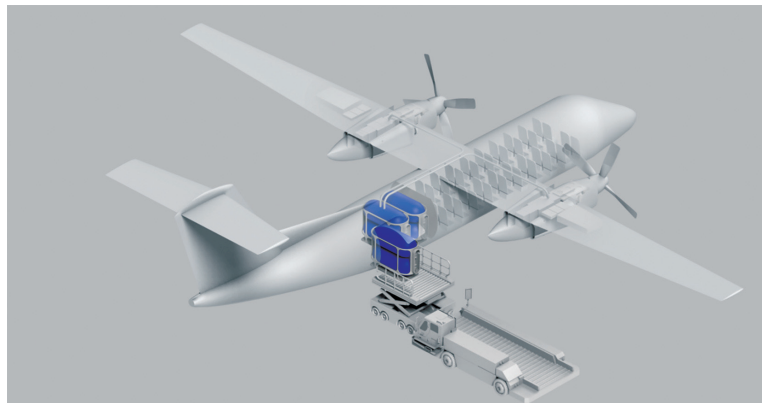
NASA的研究表明，400W·h/kg的电池能量密度足以支持有意义的电动和混合电动飞机<sup>[9]</sup>。基于固态电池、锂硫电池高能量密度电池也不断取得

技术突破，当前的电池技术已具备开展电推进系统试验验证的基础。如NASA正在研究的“纳米电燃料液流电池”，其目标是可像燃油一样供能，从而为飞机提供安全、清洁、安静的储能系统，该液流电池比一般的锂电池的能量密度高，且热性能稳定<sup>[4]</sup>。其他的绿色能源还包括超级电容、可持续航空燃料（SAF）和氢能等。特别是以SAF和氢能为代表的绿色能源形式，将有助于降低航空碳排放——SAF有望将二氧化碳净排放降低75%以上，氢燃料有望实现航空业净零排放。

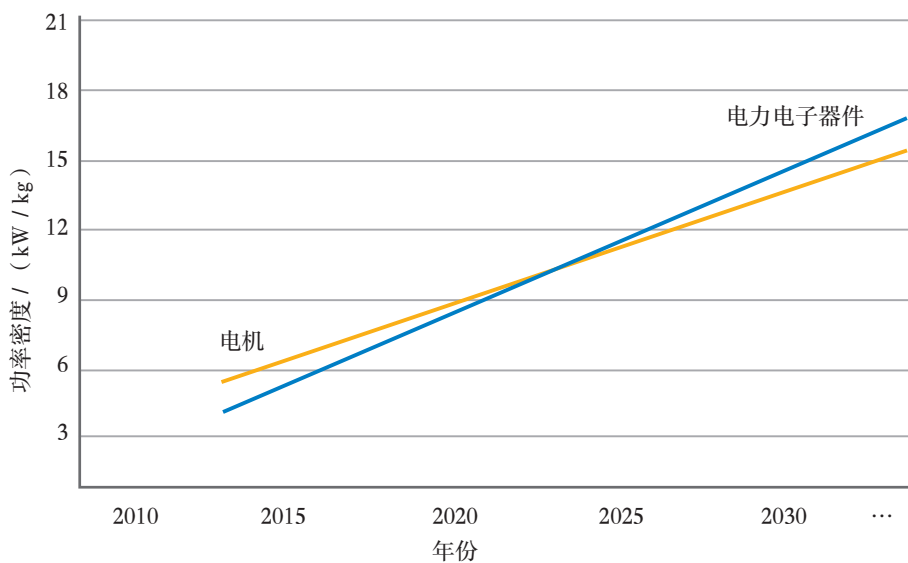
在电机方面，目前的功率密度已经普遍接近4kW/kg。西门子公司在Extra 330L飞机中使用的电机总功率260kW，功率密度为5.2kW/kg；伊利诺伊大学已经完成13kW/kg的电机设计，效率大于96%；诺丁汉大学设计的另一种Halbach结构外转子超高功率密度永磁电动机，功率密度为15.8kW/kg，效率能达到96.8%；俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)正在开发一种基于高温超导体的新型电机的功率为500kW，已于2021年2月5日开始进行测试，并利用雅克-40飞机完成搭载试飞。



纳米电燃料液流电池(NEF)



氢能飞机



电机和电力电子系统发展预测



雅克-40飞机和其超导电机

此外，功率密度大于10kW/kg的宽禁带（禁带宽度在2.3eV以上）半导体器件可大幅提高工作电压和开关频率，从而提高功率密度，实现兆瓦级电驱动，GE公司和NASA已经基于SiC等器件制造了出兆瓦级的电推进飞机驱动系统，探索其未来应用于大型支线客机的可能性。

由此可见，电推进飞机和能源动力行业正在相互促进，不断进步和发展。电推进飞机的研制在促进能源动力行业发展的同时，也必须匹配当前以及未来电气化工业的水平，并合理制订电推进方案，提高电推进飞机

的续航时间及性价比，最终实现满足市场化需求和应用的产品。

### 飞机推进系统的创新

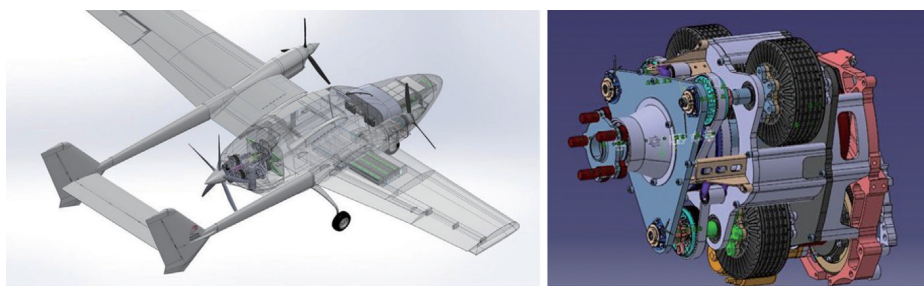
电推进技术给飞机推进系统带来的创新主要有两点：一是简化推进系统结构，使飞机更加简洁可控，有效提高推进系统效率，增大能量控制的灵活性和容错性，提高系统安全性；二是由于电推进的尺寸无关特性，推进系统可根据飞机的用途灵活安置，设计空间变得更为自由。

电推进技术对飞机推进系统的最佳创新实践体现在分布式推进上。相比传统集中式推进，采用分布式推进可优化飞行空气流场，降低阻力和噪声，提高了系统安全性，也可以实现垂直起降等特殊功能。例如，乔比（Joby）航空公司推出的2座S2飞机和5座S4飞机采用16组分布式推进，其中12组用于垂直起降、4组用于巡航。S4飞机最高速度可达322km/h，而电能消耗只有汽车的1/5，飞行里程可达240km，巡航时分布式螺旋桨可折叠，减少了气动阻力，而降落后甚至可利用风能充电。

飞机推进系统的创新还体现在混合电推进上。2019年6月，基于6座赛斯纳337改型的混合动力飞机进行了首次飞行，该飞机采用了并行



S4飞机



Cassio 1飞机和同轴并联式混动



NASA无轴轮缘电机

混合动力设计，它的前部有1台汽油发动机，后部有1个由轻型电池系统供电的电推进系统，两个动力装置完全独立，但能协同工作以优化能量输出。2020年，法国沃特（Volt）航空公司的Cassio 1混合动力飞机首飞，两侧机翼上各加装了1台赛峰集团研制的ENGINEUS型电机，总功率近440kW，还在尾部采用了同轴并联式混合电推进装置，由1台270kW的内燃发动机和3台60kW电机通过1个动力输出轴带动1个螺旋桨。

NASA近期通过借鉴潜艇等装备，推出一种无轴轮缘电机<sup>[4]</sup>，将螺旋桨和电机一体设计，减少了电机运行的扭矩并消除了中心轮毂带来的阻力，该方案需要进一步试验验证。

### 飞机总体设计和气动布局

电推进对飞机总体和气动性能改进主要是通过动力系统合理分配，改变飞机飞行时气动流场，主要体现在与机翼的集成设计，采用涵道风扇、前缘异步推进技术（LEAPTech）、边界层吞吸技术（BLI）

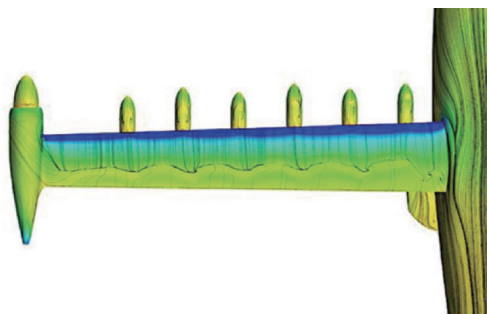
等设计减少阻力和噪声，提高效率。

例如，X-57飞机前缘异步推进技术<sup>[5]</sup>，在起降阶段由多个分布在机翼前缘的小螺旋桨利用滑流效应提高空气动力效率，而在巡航阶段则采用两端大螺旋桨提供动力，这种方式优化了机翼设计，使机翼面积减少一半，升阻比超过20。NASA为减少混合动力飞机发电机、发动机和动力分配系统的总体质量，开展前缘嵌入式分布（STARC-LEED）概念的混合动力飞机的研究<sup>[6]</sup>，对机翼和推进器进行有效结构整合，将电动推进器嵌在机翼内部或双翼之间。STARC-ABL飞机采用涡轮电推进形式，尾部风扇采用2.6MW电机驱动，基于边界层抽吸技术对机身低速边界层进行抽吸和加速，提高飞机升阻比，预计能够减少10%的燃油消耗。

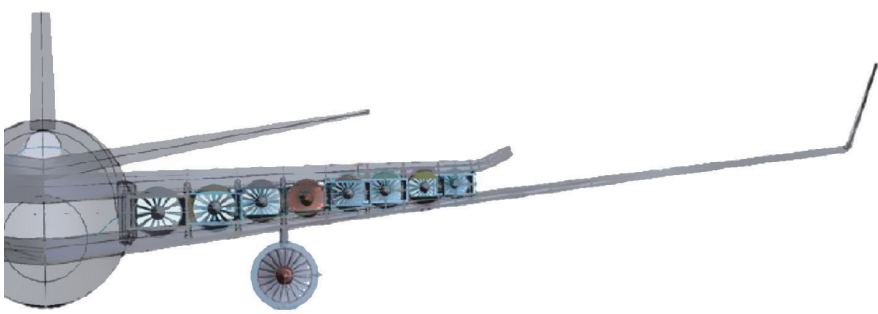
### 飞行控制的改变

电推进飞机的飞行控制的改变主要体现在两个方面：一是由于电气系统具有线性化的特点，将复杂执行机构进行了解耦，而且动态响应较快，提升了飞行控制性能；二是基于电推进带来的构型设计革新，使得传统控制方式发生改变，例如，可能会取消或减少传统的水平或垂直尾翼，从而减少飞机质量和阻力。

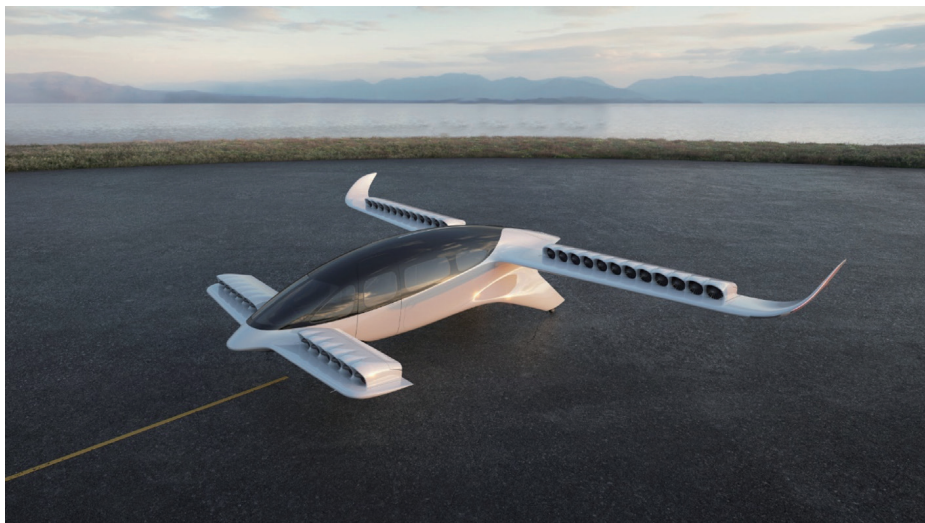
德国的百合（Lilium）飞机公司



X-57机翼设计



STARC-LEED飞机机翼分布式电机一体设计



“百合”飞机

于2019年5月完成了5座“百合”飞机的试飞测试。“百合”飞机采用了36个电动风扇，取消了传统飞机的装置运动控制，包括垂尾、副翼和升降舵等，在飞行控制上进行了大胆的技术创新。该飞机依靠飞控系统对电机进行控制，以改变飞行状态，前向电机控制飞机的俯仰运动，机翼上的电机控制滚转运动，而通过两侧电机差动速度实现偏航运动，并可以通过改变旋翼的速度来绕轴盘旋。

## 发展前景与挑战

电推进技术目前已成为推动航空业绿色发展，应对全球环境挑战的重要举措。当前的新能源飞机发展面临的主要挑战包括：一是续航时间短，目前纯电动飞机极限航程小于300km，还很难走向市场化；二是飞行安全性存疑，由于众多新构型产生，技术应用不明朗，缺少相关设计标准规范，飞机的动力系统安全不能得到有效保证；三是众多电推进飞机很难通过美国联邦航空局（FAA）、欧洲航空安全局（EASA）

和中国民航局（CAAC）的适航认证，由于电推进飞机技术尚不成熟，缺少有针对性的适航条款；四是核心技术难题亟待突破，受限于电池、电机和电力电子系统的技术瓶颈，电推进飞机的功重比亟待提高。

## 安全性的解决方案

电推进飞机相比燃油飞机简化了能源动力系统架构，为预测和排除故障带来了便利。目前，电推进飞机能源和动力架构多采用分布式，理论上更具有安全性，但新技术成熟度还不高，为飞行安全带来挑战。西门子公司的eFusion飞机、波音公司的PAV飞机和小鹰（Kitty Hawk）公司的HeavisideL飞机都发生过坠毁，让人们对于电推进飞机的安全性提出了质疑。

在电推进飞机的设计中，锂电池和氢能最具应用前景。但锂电池热失控的问题一直是困扰整个工业领域的难题。例如，NASA的X-57飞机的锂离子电池在2016年12月的热失控测试中失败，为此NASA不得不将重新设计电池模块。而“百合”

飞机也在地面维护时发生过燃烧。同样，氢能在存储和运输等方面也存在一系列安全问题，目前距离完全成熟应用还有一定距离。如何提高电推进飞机的系统安全性，提高技术成熟度，解决能源难题，防止故障产生和蔓延，是电推进飞机不得不面临的挑战。

## 标准规范和适航认证

目前的电动飞机在技术路线具有很大的差异，客观上造成了缺乏适航文件和指导设计、生产、制造的相关标准等困难，以致于很多机型难以通过适航认证。

具体来说，电推进飞机多为19座以下，该类飞机主要按CCAR-23部或FAR-23部适航标准设计和取证。中国民航局发布修订的CCAR-23部《正常类飞机适航规定》，专门增加了H章“电动飞机补充要求”，对电推进系统、电池和配电系统，以及电池和电动系统的防火增加了补充要求。EASA在2019年7月发布了新型垂直起降机型（VTOL）的适航审定框架，并于2020年1月发布了纯电和混合电推进系统（EHPS）适航审定征求意见稿SC-E19，开启电动飞机适航审定之路。尽管如此，电动飞机的标准规范仍是缺乏的。当前，电推进装置的设计与制造一般是执行美国试验和材料标准协会（ASTM）制定的ASTM F2840标准，不能够完全适应和促进电推进飞机的发展。

针对以上情况，需要进一步利用行业资源，针对电推进飞机的构型设计、电池测试、系统集成和相关设计制定标准，推进飞机电动化产业的发展。

## 商业化进程

根据电推进技术攻关和成熟度

分类	未来发展	2020年	2025年	2030年
全电垂直起降飞机		航程：150km 座级：1 ~ 4座 功率：150kW	航程：250km 座级：4 ~ 6座 功率：500kW	航程：400km 座级：6 ~ 9座 功率：1MW
全电传统起降飞机		航程：200km 座级：1 ~ 4座 功率：50kW	航程：400km 座级：4 ~ 6座 功率：200kW	航程：600km 座级：19座 功率：1MW
混合电推进飞机		航程：400km 座级：4 ~ 6座 功率：200kW	航程：800km 座级：1 ~ 19座 功率：1MW	航程：1000km 座级：19 ~ 50座 功率：2MW

### 电推进飞机发展趋势

提升的情况分析，大型电推进飞机目前尚不具备商业化应用的可能，而19座以下电推进飞机的应用条件已初具雏形，其商用场景主要可分为3类。

第一类是城市空中交通(UAM)，也是目前热度最高的应用场景，NASA将其描述为可载人和载物的安全高效的空中交通系统。例如，Vooptter公司目前已经在欧洲城市开展空中出租车计划；中国亿航公司与作为空中交通试点城市的广州开展了相关合作；空客公司基于Skyways飞机正与新加坡合作开展无人机货运服务。基于现有技术的UAM飞机初步具备1.5h航时、200km航程的能力，可满足城市服务要求，有望于2025年投入商业运营。UAM需要解决的难题是飞机的安全性、城市基础设施建设和单次运行的成本等。

第二类是6 ~ 19座的通勤类飞机，航程为400km以上，可实现低污染的短途运输。目前全电动飞机还很难做到，一般只能采用混合动

力方式实现兆瓦级驱动。大型电推进飞机有望于2035年左右推出，但真正的商业化运营也面临适航认证等诸多难题。

第三类为特殊场景应用，如灾害救援、紧急医疗服务、电力巡检和农林植保等，这也是电推进飞机市场化容易取得突破的地方。由于技术和成本要求不高，电推进飞机可在该领域实现应用，最终推广到载人飞行领域。

总之，尽管还处于起步阶段，但作为绿色航空发展的主要方向，电动飞机代表飞机发展的未来。当前，1 ~ 4座的电推进飞机技术方案已基本成熟。今后4 ~ 6座电推进飞机随着技术升级会得到快速发展并不断推出新的飞机构型。19座电推进支线客机的市场化运营预计会在2030年以后，大型飞机的电推进上机应用预计会在2035年以后。

### 结束语

电推进作为一种新的技术变革呈现多样性和交叉性的特点，为航空业

带来了新的机遇和挑战，也为开展多学科融合尝试、推动航空业绿色持续发展提供了契机。电推进飞机的商业化应用绝不是一朝一夕的事，既面临技术难题，也面临适航法规的限制，电推进飞机作为航空业的新发展方向，需要各界的共同努力。

**航空动力**

(李洪亮，中国商飞，工程师，主要从事多电、混合电推进技术研究)

### 参考文献

- [1] 李玲,祝世兴.浅析提高民用航空发动机燃油经济性的技术途径[C].中国航空维修论坛,2008.
- [2] 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.
- [3] 王妙香,王元元.电动飞机的误解分析与研究综述[J].航空科学技术,2019,30(5):3-8.
- [4] Lechniak J A, Salazar M, Abigail W, et al. Nano-electro fuel energy economy and powered aircraft operations[C]. AIAA scitech 2020 forum, 2020.
- [5] Patterson M D, Borer N K. Approach considerations in aircraft with high-lift propeller systems[C]. 17th AIAA aviation technology, integration, and operations conference, 2017.
- [6] Mukhopadhyay V, Mcmillin M L, Ozoroski T A. Structural configuration analysis of advanced flight vehicle concepts with distributed hybrid-electric propulsion[C]. 2018 AIAA aerospace sciences meeting, 2018.