

飞机电动化研究进展

刘奕* 杨鑫 兰力 阮黎明

(四川西南航空职业学院民航安全学院 四川 成都 610000)

【摘要】本文介绍了多电飞机(MEA)/全电飞机(AEA)的发展历史,并对近年来各研究机构和公司推出的混动/电动机型进行了总结。通过总结既有研究,梳理以下技术突破路线:电池能量密度升级、混合动力推进系统、分布式电力推进技术、高效电推进系统和智能能量管理技术。

【关键词】电动化;多电飞机;全电飞机;能量密度;分布式电推进

一、引言

在“双碳”目标的发展与驱动下,航空动力领域的节能减排越来越受到关注。绿色环保成为主题,绿色航空动力正逐步向我们走来。为解决气候问题,完成“双碳”目标,我们必须朝着更清洁、更高效的运输方式迈进,许多研究人员将注意力集中在多电飞机(MEA)/全电飞机(AEA)概念上。全电飞机是次级能源全部为电能的飞机。目前,大飞机处于由多电向全电过度的阶段;而在小型飞机中,已经出现了使用电动机代替发动机推进的商品化全电飞机。在民用小型飞机,用电池作为能源,对高空环境没有污染。全电飞机已成为下一代先进飞机的发展方向^[1-3]。

二、发展历史

电动飞行并不是一个新的创意,早期限制它发展的因素是飞机的质量问题^[4]。1940年,Fred Militky是第一个使用电动机操作飞机模型的人,电机和铅电池的沉重重量使得这次试验无法获得良好的效果。直到1960年,经过不断改进他终于能够推出小型飞机模型。在这个模型中,有高效的电动马达和小型铅电池。随着具有更高功率密度的镍镉电池的引入,他成功地制作了第一个商业化生产的无线电控制飞机模型^[5]。1973年,Heino Brditschka首次驾驶一架载人飞机(HB-3动力滑翔机的改进版)在韦尔斯上空近300米处飞行。Fred Militky和Heino Brditschka所做工作使得电动飞行这一目标的实现成为可能。在当时的技术背景下,由于缺乏更好的电池系统,这方面的进一步发展受到限制。

从20世纪80年代开始,全电飞机的探索也逐渐展开。不同研究机构就多电/全电飞机开展的研

究项目涵盖了整机各个系统,并对多架机型进行部分技术认证^[6-7]。

目前,MEA技术多应用于民航客机,其中以波音B787和空客A380为典型代表。传统民航客机上更多的使用镍镉电池,随着锂电池技术发展和对环境可持续发展的要求,大容量锂电池将进一步满足新一代多电以及全电民用飞机的需求^[8-9]。波音公司的B787机型成为了全球第一款在飞机安全关键系统中采用锂离子电池技术的民航客机(锂离子电池由日本汤浅公司提供)。同期空客A350机型就拟在部分系统中采用锂离子电池,但受限于2013年B787先后发生两次辅助动力电池起火事件的影响,于2016年A350机型才正式装载锂电池且交付使用。空客与赛峰公司也在多电技术领域开展合作,包括电滑行和多电辅助动力装置(eAPU)等方案,以用于A320neo/ceo,目标投入使用时间为2022年。各国在通用航空领域由锂电池作为动力的电动飞机方案也在不断研发中,近年来出现了一些环境友好的混动/电动滑翔机、试验机和概念机,如图1所示。

三、飞机电动化需求

(一)绿色航空

目前,我国正处在经济高速发展阶段,是CO₂排放大国。2020年我国CO₂年排放量高达106.7亿吨,居世界首位。自2020年9月22日,习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标以来,航空工业的绿色环保转型之路迫在眉睫。与其他运输方式相比,航空业的碳排放量占总排放量的3%,是一个较大碳排放来源。美国国家航空航天局(NASA)研究认为,电推进飞机可实现节能超过60%、减排超过90%、降噪超过65%的潜在收益^[10]。

基金项目:四川西南航空职业学院2021年度院级科研项目(XNHY-2021-09)。

作者简介:刘奕(1996-),男,四川人,四川西南航空职业学院民航安全学院教师,研究方向:锂离子电池热安全,民航安全管理。

欧盟认为，电推进飞机是实现欧洲 2050 年碳排放要求的唯一途径。因此，在未来规则和市场的引领下，各主要航空大国普遍把发展绿色低碳航空技术，当成抢抓新一轮科技革命和产业变革的历史性机遇。

（二）电动垂直起降器的发展

电动垂直起降（electric vertical take-off and landing, eVTOL）器是一种利用电能实现盘旋、起飞和降落的垂直起降飞机^[11]。相比其他类型飞行器，eVTOL 飞机使用电池作为能源，飞行时噪音更小，操作系统更加安全可靠，不依赖跑道并且体积较小，飞行和停放的时候自由度更大，更有利于在城市内进行交通作业。截至 2021 年底，就亚太地区已有 14 家 eVTOL 厂商发布了原型信息，大多数是初创公司。包括 XPeng、吉利和现代汽车。其中中国大陆有八家，占原始设备制造商总数的 57%，在该地区处于领先地位。中国也发生了许多里程碑式的事件，包括 2019 年亿航在美国证券交易所上市，并由此成为世界上第一家上市的 eVTOL 制造商。2021 年，小鹏汇天筹集了超过 5 亿美元的资金，这是亚洲 eVTOL 制造商迄今为止获得的最大单笔融资。

（三）城市空中交通发展

城市空中交通（Urban Air Mobility, UAM）概念取决于 eVTOL 飞机的研发，这些飞机使用没有跑道的“垂直起降场”（类似于直升机停机坪）运行，因此特别适合城市环境，而且 eVTOL 飞机所带来的点对点的机动性相比地面交通快 2-6 倍。

UAM 产业的发展对我国航空产业也有积极促进作用。一方面，UAM 将带动上下游产业链创新。它涉及飞行器研发制造、城市基础设施规划建设、飞行器维护、客户服务等众多产业，其发展将带动全产业链不断创新。另一方面，UAM 将满足我国当前通航需求。近年来，我国陆续出台政策支持通航发展，并不断完善通航领域基础设施建设。2022 年 6 月，

我国民航局印发《通用航空发展“十四五”专项规划》，《规划》中涉及中短途交通需要、民航机场与通航深化融合、实现通航辐射化等建议。UAM 将突破通航公司和消费者之间的信息瓶颈，助力解决通航产业快速发展。

四、未来发展与挑战

各主要航空大国和研究机构普遍把发展绿色低碳航空技术，当成抢抓新一轮科技革命和产业变革的历史性机遇。在不断增长的电动飞机领域，面临的挑战不少。包括电池能量密度升级和安全性能、电动飞机材料和结构设计和高效电力推进系统的设计等问题。

（一）电池能量密度升级

电池能量密度和功率密度是电动航空领域的主要障碍之一，限制了当前全电动飞机的尺寸和航程，仅适用于短距离飞行和垂直起降。目前，最好的锂离子电池的能量密度为 200~300Wh/kg，而喷气燃料的能量密度为 11.95kWh/kg，可以看出两者不在同一数量级。同时，不少研究学者聚焦于氢燃料电池和发动机直接燃氢技术的研发。赖耀胜等研究表明，氢燃料电池理论能量密度可突破 300Wh/kg，并且对气候有 75% 以上的正向效益；若采用直接燃氢技术，可以有效节能减排，对气候的影响降低 50%~75%。

（二）混合动力推进系统

开发混合动力推进系统作为过渡方案，以弥补电池能量密度的缺陷，从而有效改善传统推进系统的排放性能和燃油经济性，是未来飞机电动化发展的可行之路。Wheeler 等国内外学者已经开展不同架构混合动力推进系统研究。目前，较为成熟的混合动力推进系统架构分为：1. 串联式；2. 并联式；3. 串-并联混合式。

（三）分布式电力推进技术

Armstrong 等在飞机分布式电力推进（DEP）中

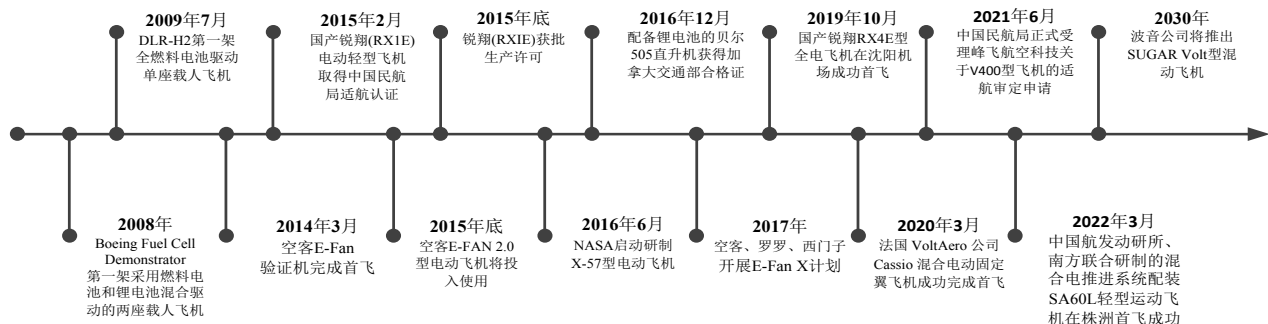


图 1 各国电动飞机发展趋势图

的组件构成和仿真模拟进行了相关研究。采用分布式电力推进技术使得飞机在设计阶段表现出良好的灵活性和前所未有的性能增强,但也会伴随一些问题,如:1. 电气安全问题。使用大量电池系统进行能量存储的DEP系统,给配电系统设计工作带来了挑战性,尤其需要考虑电池包的热安全;2. 噪音问题。目前DEP技术主要应用于电动垂直起降器,推进系统对周围建筑物和广大社区产生的噪音会给城市环境带来影响;3. 气动问题。分布式推进系统和机体气动表面形成紧密集成,如果紧密安装的推进器发生一个或多个推进器故障,则故障推进器会对周围区域造成不希望的扰流,不仅影响相邻推进器的性能,还会影响相邻机翼或其他机身表面的气动性能。

(四) 高效电推进系统

高效电推进系统需要通过高功率密度电动机带动,为整机提供部分或全部飞行需要的推力,并且在降噪和减排方面有不可替代的优势。国内外等团队在高功率密度永磁同步电机开发设计和仿真领域中展开大量研究。但针对乘用级飞机的推进电机功率密度至少在10kW/kg以上,因此实现民航客机的全电化还任重道远。

(五) 智能能量管理技术

Fermín等已经通过开发控制算法以提高飞机电力系统安全性和可靠性。但以热失控为核心的锂电池安全事故频发,图2是美国联邦航空管理局(FAA)针对锂电池的烟雾、火灾和爆炸事件数统计。截至2022年6月1日,自2006年1月23日以来,共有373起涉及作为货物或行李携带的锂电池的航空相关事件记录。随着电力被用作电动飞机的一次能源,飞机的电网容量迅速增加,负载特性变得更加复杂,这对能量分配系统的效率提出了更高的要求,尤其是电动飞机的动力设备和电气设备的热管理更为明显。

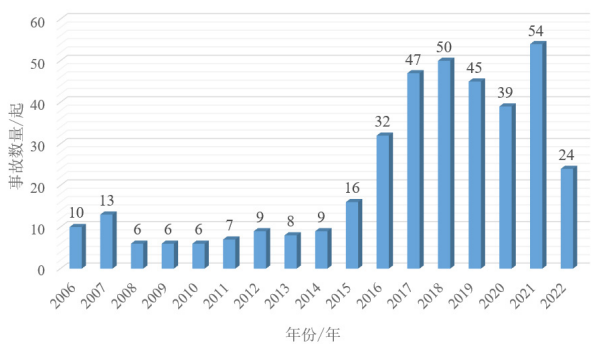


图2 全球航空锂电池事故统计

五、总结与展望

虽然大量研究人员在飞机电动化领域已经取得不少突破,但事实上,在我们可以自豪地说航空业已经完全电动化,并且变得更加绿色清洁之前,还有很长的路要走。本文梳理了多电/全电飞机发展历史,并对近年来各研究机构和公司推出的混动/电动机型进行了总结。分析了飞机电动化的巨大市场需求和我国当前通航需求。在不断增长的电动飞机领域,许多因素制约其发展。通过总结既有研究,梳理以下技术突破路线:(1) 电池能量密度升级、(2) 混合动力推进系统、(3) 分布式电力推进技术、(4) 高效电推进系统、(5) 智能能量管理技术。

参考文献:

- [1]Cronin M. The all-electric aircraft[J]. Ice Review, 1990, 36(8):309-311.
- [2]Cao W . Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA)[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2012, 59(9):3523-3531.
- [3]Wheeler P , Bozhko S . The More Electric Aircraft: Technology and challenges.[J]. IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(4):6-12.
- [4]Thapa N , Ram S , Kumar S , et al. All electric aircraft: A reality on its way[J]. Materials Today: Proceedings, 2021(1).
- [5]Hepperle M . Electric Flight - Potential and Limitations[C]// Avt-209 Workshop on Energy Efficient Technologies & Concepts Operation. 2012.
- [6]田伟. 全电飞机发展综述[C]//.Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (IEEE CGNCC2016).Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance,2016:3126-3129.
- [7]刘文明. 发展多电/全电飞机的关键技术分析[C]//.航空安全与装备维修技术——航空安全与装备维修技术学术研讨会论文集,2014:759-764.
- [8]王顺利, 尚丽平, 屈维, 等. 机载锂电池SOC估算方法研究与实现[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(5): 45-49.
- [9]王春晓. 低温高倍率充放电下锂电池内部热应变特性研究[D].中国民用航空飞行学院, 2020.
- [10]范振伟,杨凤田,项松,赵为平.我国电动飞机发展现状及建议[J].航空科学技术,2019,30(11):18-21.
- [11]王翔宇.电动飞行与推进系统变革[J].航空动力,2019(03):43-47.