

混合电推进支线客机的可行性分析

Feasibility Analysis on Regional Aircraft with Hybrid Electric Propulsion System

李开省 / 中国航空工业机载系统有限公司

电推进技术是航空领域当前和未来发展的重要方向之一，但在电池能量密度没有得到大幅提高之前，混合电推进技术是航空运输业在目前及可预见的未来减少排放的最重要的手段之一。

随着人类社会的进步和航空业的快速发展，航空运输的需求在未来20年将增加两倍以上，乘坐飞行器将成为人们日常生活的一部分。航空运输在提供快速、便捷的出行方式的同时，也带来了严重的污染问题。针对这一挑战，业界开展了大量的技术创新研究，提出了多种减排方案。这些方案大致可分为两类：一是持续改进传统技术；二是采用下一代创新的技术。而据2016年国际民航组织（ICAO）环境报告估计（如图1所示），传统技术改进能够减少约35%的CO₂排放，而采用替代燃料和电气化等下一代新技术可以减少60%的CO₂排放，是航空运输业减少污染物排放和航空对环境的其他负面影响的最佳解决方案之一。

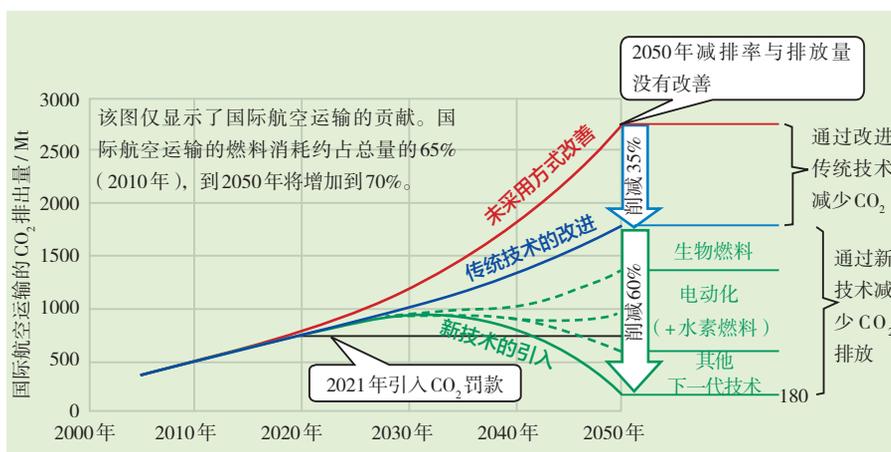


图1 不同减排方案对CO₂减排目标贡献预估

电推进技术方案对比

目前电气化技术的发展主要有三种方法：纯电动技术、串联混合电推进技术和并联混合电推进技术等。

几种技术各有其优缺点，可以根据飞机的不同需求和不同布局，来选择不同的技术方案（如图2所示）。从效果来看，纯电动无疑是飞

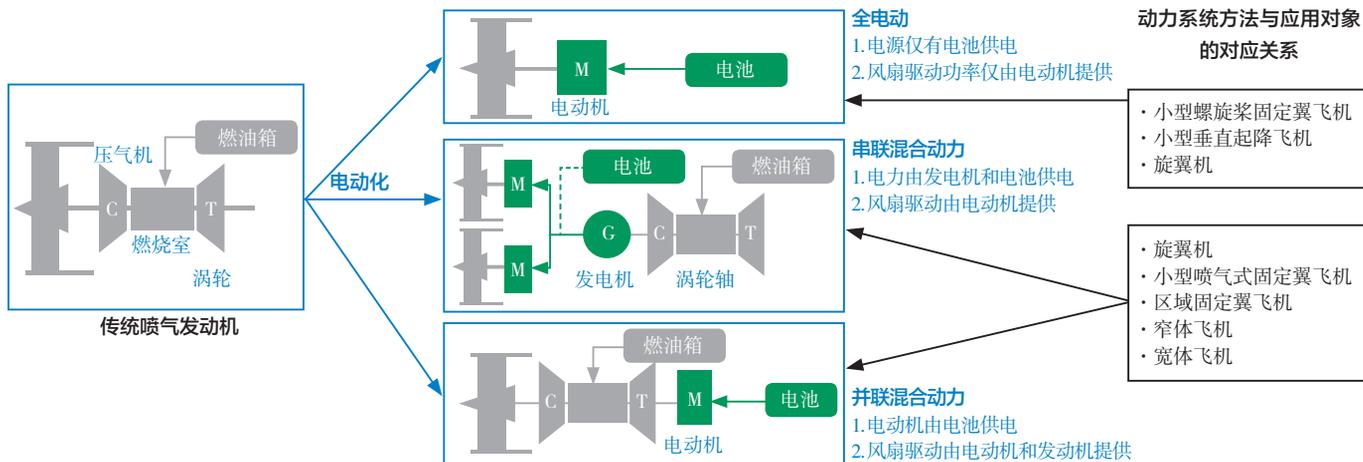


图2 各种方案的优缺点比较图

机实现减排的最好的方案，但现阶段锂离子电池能量密度最大能够达到 $0.4 \text{ (kW} \cdot \text{h) / kg}$ ，远不及飞机燃油约为 $12.7 \text{ (kW} \cdot \text{h) / kg}$ 的能量密度。尽管如此，电动推进系统的能量利用效率却是传统燃油发动机的 $2 \sim 3$ 倍，所以在当前电池技术水平下，综合了燃油高能量密度和电推进系统高效率优势的混合电推进技术是解决航空运输业排放和噪声问题的最优方案。

据统计，典型的支线飞机基本以 $350 \sim 500 \text{ km/h}$ 的速度飞行 1 h 左右，包括爬升、巡航和下降，平均完成任务所需的能量为 $2000 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，加上所需能量储备，每次典型飞行任务需要约 $3500 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的能量。考虑当前的燃气涡轮发动机能量转换效率大约为 30% ，因此，支线客机携带的燃料能量最少为 $12000 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。如果仅用电池的储能为支线客机提供能源，假设电推进系统转换效率为 85% ，考虑电池系统自身需要散热、各种保护、热均匀布局、充放电和其他电池管理功能，以及实现电池电芯的质量约为电池系统的质量的 35% 。按目前锂离子电池电芯能量密度 $0.3 \text{ (kW} \cdot \text{h) / kg}$ 计算，电池系统总质量为 16471 kg 。则支线客机需求电池系统的质量就将超过飞机的最大起飞质量。因此，用纯电动推进方案在目前的情况下是不能满足需求的。

相关资料显示，支线飞机采用全电力推进的电池能量密度预计至少须达到 $1.8 \text{ (kW} \cdot \text{h) / kg}$ ，而采用混合电推进系统的电池能量密度则须达到 $0.8 \text{ (kW} \cdot \text{h) / kg}$ 以上。另外，根据美国国家航空航天局（NASA）和麻省理工学院（MIT）联合进行的电池研究结果显示，在未来 $10 \sim 15$ 年

内会有不同材料的化学电池可能达到 $1 \sim 1.5 \text{ (kW} \cdot \text{h) / kg}$ 的能量密度水平。随着高性能高功重比电动机、高能量密度电池、新型超导材料、网络互联、能量管理和安静的螺旋桨设计等关键技术的不断发展，采用全新构型和任务剖面的混合电推进的支线飞机最有可能实现成功应用。

并联混合电推进技术分析

混合电推进系统主要有串联和并联混合动力两种方案，本文主要针对应用前景较广的并联混合电推进技术进行简要分析。

并联混合电推进原理

在巡航和下降阶段，飞机需要的推力较小，发动机效率较高；在起飞和爬升时，飞机需要较大推力，发动机效率较低，其间存在推力、效率与需求不匹配的问题。并联混合电推进系统可以很好地解决这个问题：巡航和下降阶段，由燃气涡轮单独提供推力，并保持高效率状态，将多余的功以电能的形式存储在电池中；在起飞和爬升阶段，由燃气涡轮和电动机共同提供推力。并联混合电推进系统工作原理如图3所示。

并联混合电推进关键技术

实现并联混合电推进系统的实

际应用，应重点关注以下关键技术。

一是并联混合电推进的控制。实际上，并联混合电推进并不只是简单地将电动机直接连接到涡轮发动机的低压轴上。当加入电动机功率之后，燃气涡轮核心机的输出功率降低，发动机的工作点也会随之改变。此时低压压气机压缩的空气量大于涡轮的需求，需要相应的调节装置来进行管理，包括放气和可调导叶、可变桨距风扇等。因此，设计新的控制律是一项相当复杂的工作，而且每台传统的燃气涡轮发动机都不完全相同，需要对每台发动机进行仔细调试。

二是并联混合电推进的热管理。热管理是决定该系统能否成功的关键问题。即使效率很高，兆瓦量级的电动机也会产生大量的热。传统电动机散热的方法是将热量直接传给燃油来满足电动机散热需求。但当电动机功率显著增加时，就很难保障有足够的热沉来满足电动机高热量的散热要求，这时候将会需要其他冷却的方法，如空气冷却等。

三是并联混合电推进的功率管理。功率管理是提高整个系统效率的关键。已经有许多研究机构开始在电力系统方面投入大量科研力量，并在缩小电动机的尺寸方面取得了

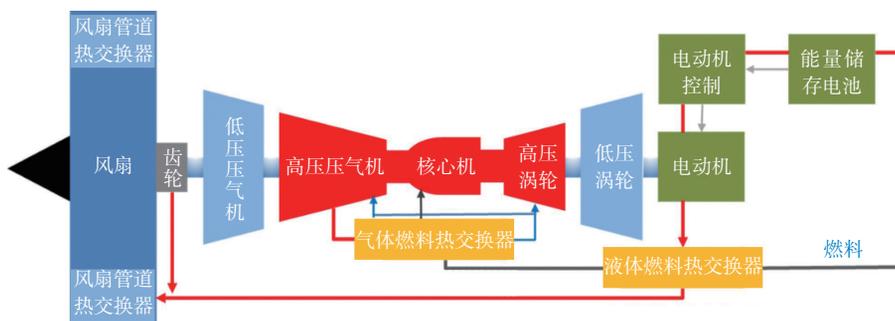


图3 并联混合电推进原理

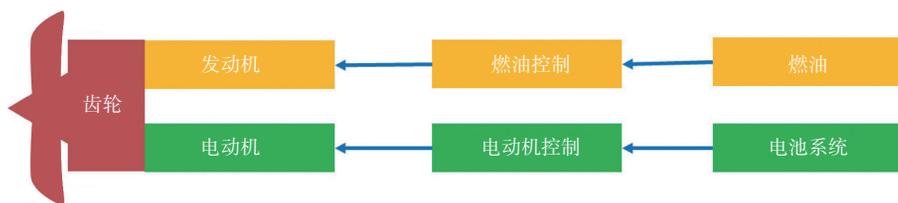


图4 “新舟”600 并联混合电推进架构

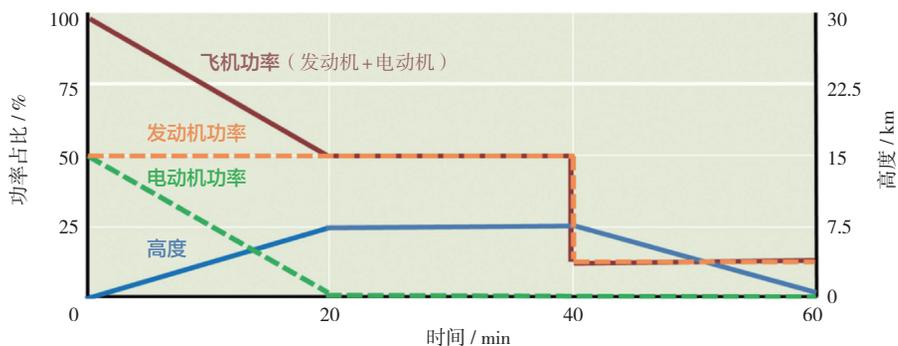


图5 “新舟”600 混合电推进功率分配

进展。例如，NASA 已经与波音公司、GE 公司和伊利诺伊大学签订了研制合同，研发可以高效精密控制的电动机电子变换器，从而减小推进系统质量和体积，提高系统的转换效率。目前，应用前景较好的永磁直流同步电动机依然面临减轻质量和高温退磁等方面的挑战。

四是高空高压用电的安全性。因并联混合电推进系统减轻质量的需要，系统要使用更高的直流电压（ $\pm 500V$ ），要比当前飞机所使用的 $\pm 270V$ 直流电压更高。在减轻系统质量的同时，电压升高也会带来电弧放电引起的安全性问题。

支线客机并联混合电推进收益分析

以“新舟”600 涡桨飞机为例，对支线客机改成混合电推进的收益进行分析。

“新舟”600 采用传统发动机的

总功率为 2021kW、最大巡航功率为 1567kW、飞机最大载荷为 4082kg；航程为 1000km。假设以并联混合电推进系统（如图 4 所示）替代“新舟”600 的涡桨发动机，发动机和电动机之间采用 1:1 的功率分配。推进系统替换之后，“新舟”600 的螺旋桨推进要两个能量链来驱动，电动机具有大功率和短时间工作的功能。新的推进系统具有如下特点：提高飞机能源架构的容错性；可在飞机最大起飞质量范围内管理能量存储电池的尺寸和质量；新动力架构允许发动机仅针对飞行的巡航部分进行优化。

结合“新舟”600 的典型飞行任务曲线，得到并联混合电推进系统的预期飞行任务曲线和功率分配如图 5 所示，起飞和爬升阶段由电动机和发动机共同提供动力，在巡航和下降阶段仅由燃气涡轮来提供动力。在飞机质量方面，新架构混合

动力系统方案中增加了飞机的空载质量，但同时飞机的燃油容量减少了约 50%，可用于安装储能电池和电推进系统等，总的质量和载客量保持不变。

通过对并联混合电推进“新舟”600 的飞行任务进行计算可知，采用混合电推进系统替代后的航程为 600km（减少了 400km），整个任务组合的燃油经济性平均提高了 30%，并能减少约 50% 的污染排放。

由于上述替代方案是对现有的“新舟”600 进行改进的，如果按照并联混合电推进系统方案、采用飞发一体化的理念重新设计飞机，可以显著减轻飞机质量、增加飞机航程。并且，在典型的 400km 短途飞行中，采用混合电推进后，每座每千米的燃油消耗比原来的飞机更低，更接近城市间运行的长途客车，具有显著的经济效益。鉴于“新舟”600 在实际运营中的 99% 的飞行任务短于 1000km，采用并联混合电推进系统既具有降低污染的技术意义，也具有巨大的运营价值。

结束语

在目前的电池能量密度下，相比于大型客机，支线飞机实现混合电推进的可行性很高。混合电推进可通过提高飞机的能源利用率，为支线客机带来显著的经济效益，并减少大量的污染排放。但混合电推进的实际应用仍需要在控制、功率管理、热管理以及飞发一体化设计等关键技术上持续投入。

航空动力

（李开省，中国航空工业机载系统有限公司，研究员，主要从事航空机载机电系统、多电、全电及电动飞机、能量优化系统等技术研究）