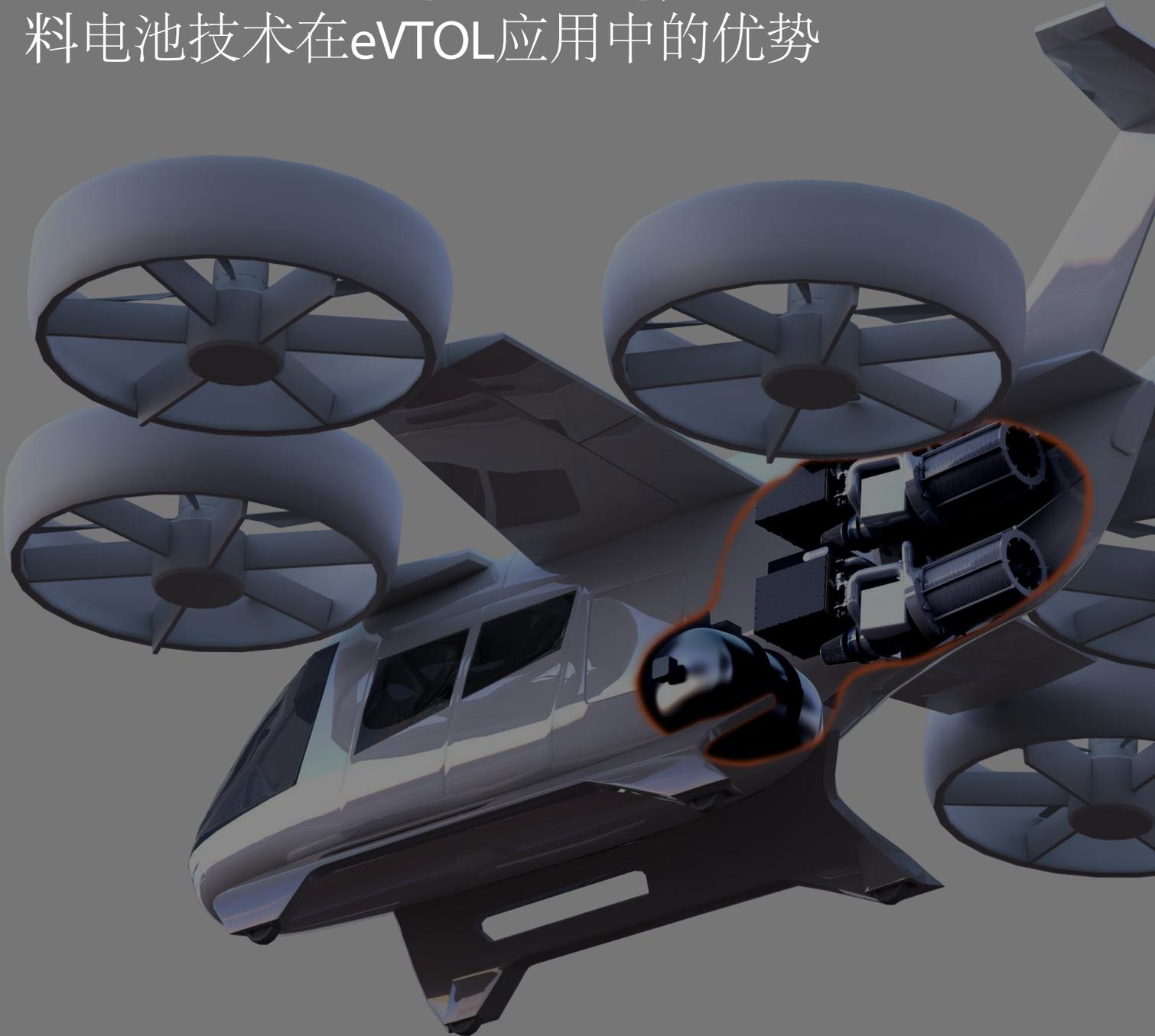




IE-FLIGHT

英泰力能（Intelligent Energy）PEM燃料电池技术在eVTOL应用中的优势



1. 执行摘要

本白皮书讨论了氢燃料电池在快速增长的电动垂直升降飞机（eVTOL）市场中的作用，以及英泰力能（Intelligent Energy）的技术如何解决在高温环境中飞行和悬停状态下的热散热挑战。本白皮书描述了燃料电池及英泰力能相关技术相较于纯电池驱动技术在降低总拥有成本方面的优势。

随着城市与人口的持续扩张，现有基础设施在运输人员和货物方面的需求日益增加。城市空中交通，特别是eVTOL的兴起，可以解决这些运输需求。通过使用氢燃料电池作为电力来源，与传统的内燃机技术相比，还可提供零排放和高效能的替代方案。

根据罗兰贝格（Roland Berger）和劳斯莱斯（Rolls-Royce）的eVTOL市场规模报告，到2050年，全球飞机机队将预计增加到约7万架，而新兴的eVTOL市场预计将在同一时期达到16.1万架（1）。整个行业都在推动航空航天部门的脱碳化，英国航空航天技术研究所FlyZero项目发表的研究表明，氢燃料电池是零碳排放解决方案的核心部分（2）。

在eVTOL市场中，氢燃料电池是电池和内燃机的直接替代动力来源，分别解决了它们固有的质量和排放问题。

目前，致力于传统燃料电池驱动eVTOL设计的集成商们正面临着燃料电池热管理系统体积过大的挑战，这些系统需要排放氢燃料电池（PEM燃料电池）产生的废热。燃料电池在发电过程中共生的热量需要持续排放，以防止燃料电池的局部过热和电池组件的热降解。然而，庞大的热管理系统显然会导致额外的质量和阻力损失。

本白皮书概述了PEM燃料电池技术在eVTOL飞机上的优势，特别是利用英泰力能开发并应用于IE-FLIGHT™航空燃料电池系统的专有技术，进一步增强了这些优势。本白皮书中的建模表明，使用IE-FLIGHT™燃料电池系统，一架4名乘客加一名飞行员的eVTOL飞机能够将飞机的续航范围延长至单次飞行645公里从伦敦飞往法兰克福，或在氢气补给之间进行10次30公里的飞行，而纯电池驱动的eVTOL需要在完成3次30公里的飞行后使用600千瓦的快速充电器重新充电。

在Argonne国家实验室的综合研究的基础上，本文进行了总拥有成本（Total Cost of Ownership, TCO）分析（3）。分析结果表明，与纯电池驱动飞机相比，燃料电池混动倾转旋翼eVTOL操作更经济，同时通过减少停机时间实现更多的潜在收入，并实现电池电动飞机由于航程限制而无法提供的更远程飞行路线。

2. 燃料电池技术在eVTOL应用中的优势

2.1 与电池相比，续航里程显著增加

氢的比能量密度为120MJ/kg，是除核燃料外能量密度最高的燃料。氢燃料远超传统的航空燃料（48MJ/kg）和商业上使用的锂电技术（1MJ/kg），每单位质量提供更多的能量。

由于飞机质量的关键性，氢的这种特性对飞机特别有利。通过利用氢，燃料电池驱动飞机可以携带更少质量的燃料，同时储存更多的可用能量，从而在不显著增加飞机质量的情况下实现更长的飞行时间。

与电池相比，IE-FLIGHT驱动的eVTOL通常可以将飞行时间和续航里程延长2到5倍，具体取决于储氢缸的大小。

锂离子电池技术已是一个成熟的商业领域，但随着技术革新逐渐接近理论和实际性能的极限，电池技术投资在全球汽车市场对电动汽车需求放缓的背景下也在下降（4）。

目前，全球大约有300家私营公司活跃在eVTOL的开发中，根据具体的设计配置，典型的eVTOL飞机航程为100-150英里（5）。卡内基梅隆大学（Carnegie Mellon University）（6）的一篇论文（下图1）说明了当前商用电池技术的性能和不同eVTOL飞机的电池性能要求，以满足eVTOL制造商指定的航程。英泰力能将其IE-FLIGHT™燃料电池系统与气态和液态氢燃料存储选项进行了比较。

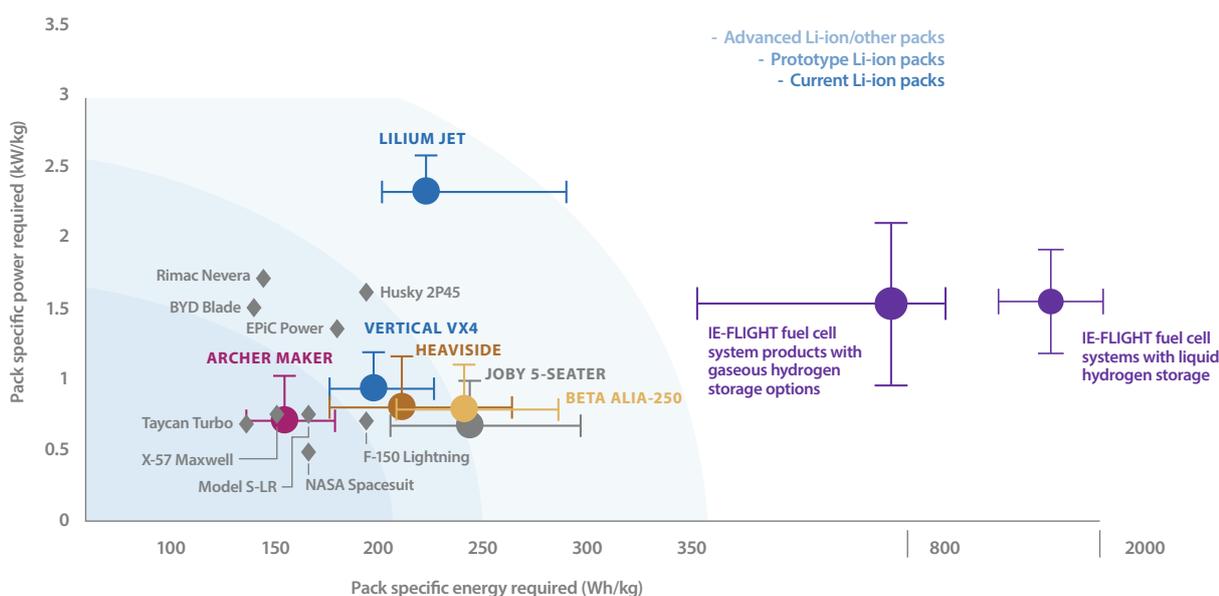


图1 - IE-FLIGHT 燃料电池系统使用气态和液态 H₂ 的性能，由英泰力能叠加到（6）中图2。

2.2 燃料电池提高了加注时间和运营效率

氢动力飞机的加油速度明显快于锂离子电池，这为运营效率带来了关键优势，特别是在垂直机场之间进行的常规飞行时可以减少eVTOL的停机时间。因为最小化地面时间对最大化飞行时间表和资产盈利能力所带来的加油或充电的周转时间差异对商业运营至关重要。

为车辆加氢只需几分钟 (7)，这与传统的航空燃料加油相似，因为它涉及将气体或液体泵入飞机油箱。相比之下，为电池驱动飞机充电可能需要几个小时，取决于电池的容量 (大小) 和可用的当地充电基础设施。当然，如果有相应的基础设施支持，某些电池化学成分可以更快充电。然而，这样做将不得不牺牲某些电池性能 (8)，包括缩短电池循环寿命，从而导致TCO的增加，如下图2所示。

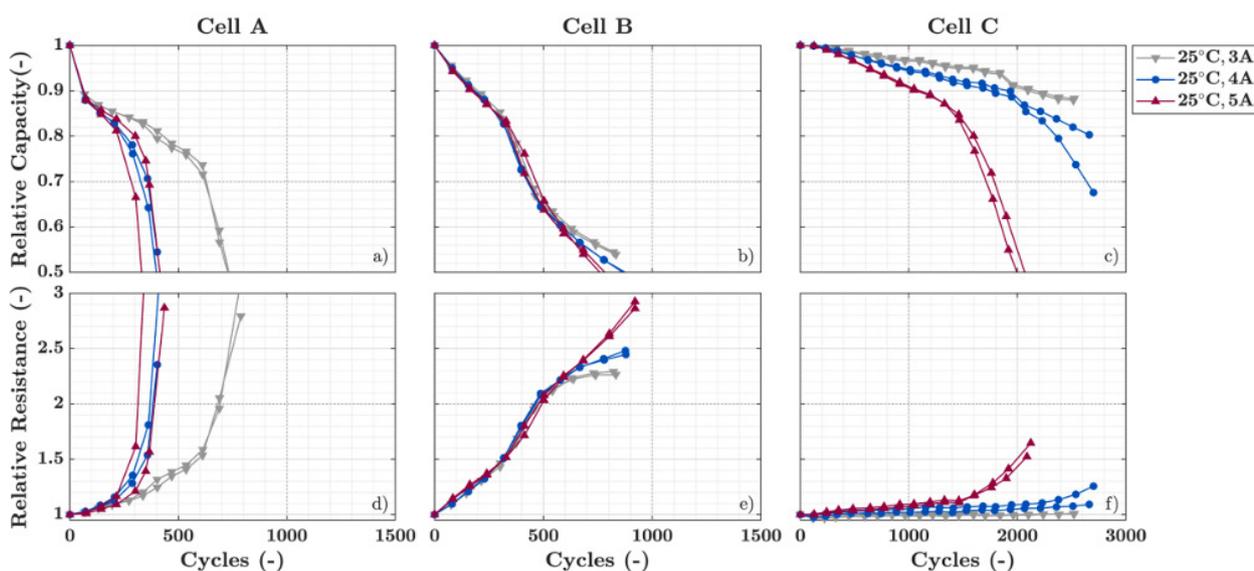


图2 - 三种不同类型的锂离子电池的电池循环寿命与充电电流的关系 (8)

与电池充电相比，氢气加气过程更快，减少了运营延误和相应的劳动力成本，进一步提高了高频运营的盈利能力。来自Argonne国家实验室 (3) 的研究表明，电池驱动的 eVTOL 的TCO 更昂贵的一个关键因素是每年16%的乘客里程损失，这主要是由于在电池充电状态降到允许的最低值 (60% SoC) 后，需要使用600kW超快速充电器进行完全充电所需的时间 (3)。

2.3 燃料电池在所有天气条件下的最大性能

众所周知，电池技术在寒冷（电池内部电化学反应动力学较慢）或炎热条件下（加速不良化学反应）工作时，性能会显著下降。在 -20°C 的环境下，大多数电池只能以其额定容量的50%进行操作，并且在这些低温下，电池的C-rate（衡量电池充放电电流的指标）显著降低，从而限制了电池的放电电流（9）。

从实际电动汽车的运营中收集的数据表明，与在 15°C 到 25°C 的适中环境温度下操作相比，在 0°C 到 15°C 的环境温度下驾驶电池电动汽车的续航里程减少了28%（10）。在约 40°C 的炎热气候下运行时，电池的循环寿命约下降了40%（9）。

IE-FLIGHT燃料电池技术在整个工作温度范围内提供额定性能，确保任务续航和使用寿命不受影响。

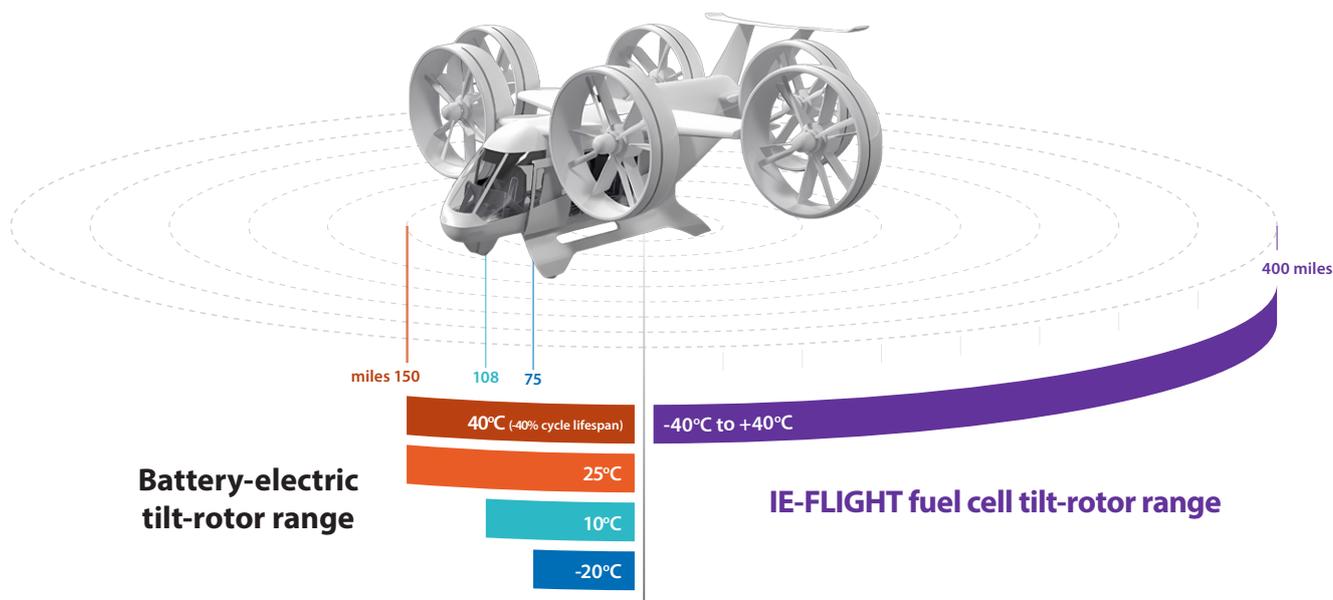


图3 - 环境温度对纯电池和燃料电池电源eVTOL 续航里程的影响比较。

2.4 燃料电池降低总拥有成本（TCO）

IE-FLIGHT燃料电池动力飞机的总拥有成本（TCO）相比于电池动力飞机具有显著优势，这主要得益于IE-FLIGHT燃料电池技术带来的运营效率提升和长期维护改善。

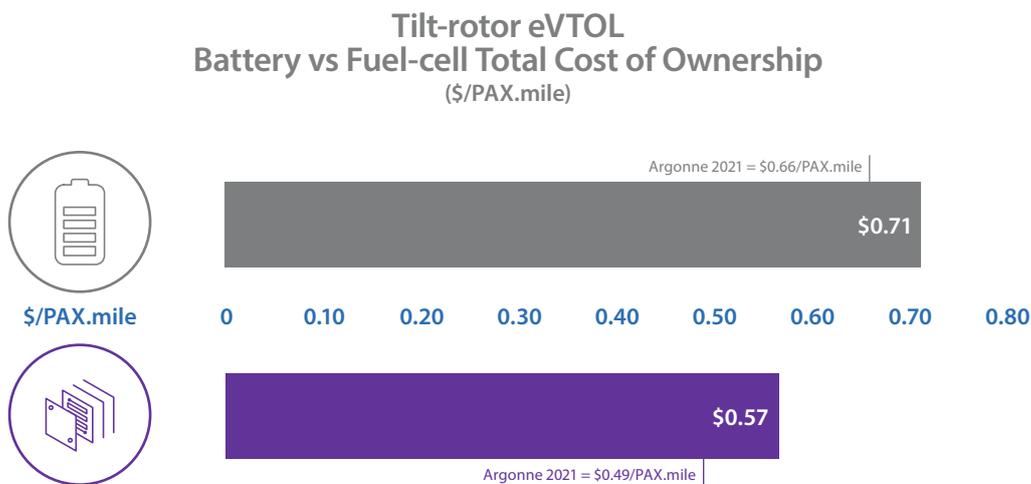
燃料电池相比于锂离子电池可以提供更高的能量密度，使得飞机更轻、续航能力更强、载荷能力更大。这使得飞机可以拥有更少的加油停靠和更短的停机时间，从而提高其商业可用性和利用率。

随着时间的推移，燃料电池更长的使用寿命（其退化速度比电池慢）可以使其降低的更换和维护成本。相比之下，电池面临着诸如在高C-rates下充电时热导致性能下降加剧等问题，导致更换频率更高，增加了生命周期成本与热失控的风险（11）。

如前文所述，Argonne国家实验室（3）的研究表明，电池动力eVTOL的TCO更高，运营延误的增加和额外的充电劳动成本使得每年乘客里程损失达16%（3）。该研究对纯电池动力eVTOL和燃料电池/电池混合动力eVTOL飞机进行了全面分析。英泰力能对此TCO模型进行了审查和更新以反映2024年的成本（通货膨胀增加16.4%（12）），并根据英国航空技术研究所的FlyZero项目的报告（13）更新了目标2035年的燃料电池系统成本，同时考虑了对电池充电周期的优化（14）。基线模型采用300次充电周期的电池组生命周期（原研究中给出的范围为100-500次充电周期），为了进行模型比较，IE现在将其增加到500次充电周期。

更新后的模型结果显示：

- 燃料电池动力eVTOL的TCO为每乘客每英里0.57美元（Argonne 2021 = 0.49美元/乘客·英里），
- 电池动力eVTOL的TCO为每乘客每英里0.71美元（Argonne 2021 = 0.66美元/乘客·英里）。



研究还显示，燃料电池动力eVTOL的TCO中最敏感的参数是比功率密度，因为这决定了飞机的最大起飞重量（MTOW），进而影响机身资本成本和液态氢（LH2）燃料成本。Argonne实验室计算得出，如果将燃料电池系统的比功率密度从858W/kg提高到2000W/kg，可以将TCO降低24%。IE-FLIGHT技术使燃料电池系统的功率密度在不久的将来超过2000W/kg，从而实现这一TCO优势。

随着氢气生产规模的扩大和成本的降低，燃料电池动力飞机的燃料成本优势也随之提高。美国能源部（DoE）预测，到2031年，氢气成本将降至每千克1美元（15），并正在投资数十亿美元以实现这一目标（16）。此外，联邦税收抵免也对这一目标有所帮助，Plug Power声称其已能够以接近每千克2美元的价格生产绿氢（17）。

假设氢气价格为每千克2-5美元，从伦敦飞往巴黎的一架5座eVTOL（225英里/360公里）的飞行成本约为：

- 燃料电池动力飞机的氢气加油费用为38-95美元，
- 为足够大的电池组充电的电力费用为68-114美元（0.15-0.25美元每千瓦时）。

2.5 燃料电池的供应链和可回收性优势

回收再利用是 eVTOL 电源生命周期中的关键组成部分，PEM 燃料电池和锂离子电池的回收利用都具有显著的经济和环境效益。

与电池相比，燃料电池在可回收性方面的显著优势也是 eVTOL 应用中值得考虑的方面。锂离子电池具有复杂的化学成分，这导致了电池其中的材料如钴、镍和锰的回收过程难度大或需耗费更多能源。还值得注意的是，锂离子电池在特定化学成分的使用和电池形式上存在显著差异，这使得在当前行业内供应商之间面临着标准化回收过程的挑战。此外，电池设计涉及多层结构和组件，进一步复杂化了高效自动化回收过程。

据悉，经济上可行的回收机会少于 3%，而针对每年预计有 9,500 次飞行周期的 eVTOL，必须实现多次更换以提高回收效率。相比之下，PEM 燃料电池主要由商业级铁合金、碳、氟化聚合物和电催化剂（如铂）组成。铂具有高度可重用性，其从燃料电池中的回收过程已得到良好验证，可随着时间的推移降低对环境的影响。

3. IE-FLIGHT 技术应用于eVTOL

自2020年以来，英泰力能一直致力于面向航空航天市场的燃料电池堆技术的研发。2024年7月，IE-FLIGHT™燃料电池系统产品线正式推出。与液冷燃料电池系统相比，新的IE-FLIGHT产品线提供以下优势：

3.1 英泰力能技术的更简化结构与更低设计成本

与液体冷却式燃料电池相比，蒸发冷却式（EC）燃料电池的结构更简单、组件更少。在液体冷却式（LC）电池中，热量通过隔板一侧的液体冷却通道排出，隔板另一侧是反应物通道。因此，各电池之间需要两块隔板，为整个电池区域的3种不同流体提供通道。液体冷却式电池堆中的隔板要求板片具有有效的夹紧力，还可能需要进行局部进行焊接，以减少界面接触电阻损失。

在蒸发冷却式电池中，单片流场板的两侧分别包含阴极和阳极反应通道。直接注水的局部设计功能使其无需像液冷电池内部那样额外设置整个电池区域的冷却板，同时减少了焊接需求，便能降低接触电阻和整体质量，这使得蒸发冷却式电堆的电池间距更小，质量更小，有助于缩小总体积，从而减少整个动力装置的重量。图4总结了整体优势。

在EC燃料电池系统的构造中，超过三分之二的组件与LC燃料电池系统相同，如下图5所示。这使得两者的供应链保持一致，并使英泰力能可以利用生产量和成本降低的优势，与燃料电池行业的其余部分保持一致。

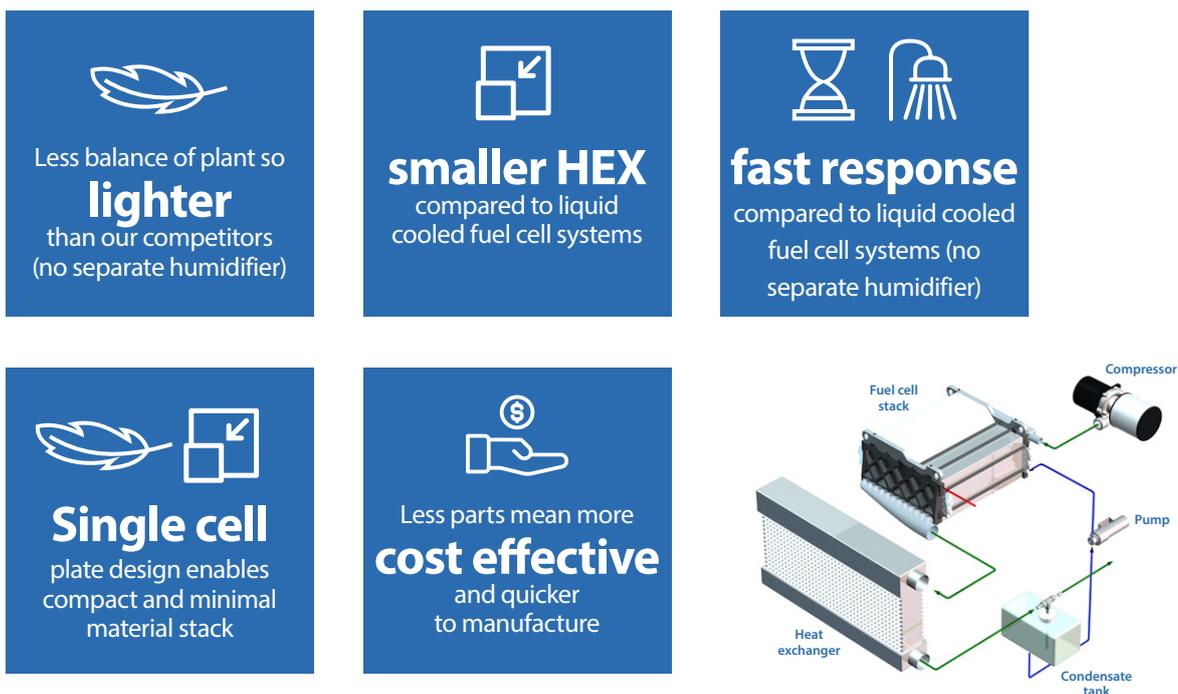


图4-蒸发冷却技术的核心优势

Part type commonality between EC and LC fuel cell systems

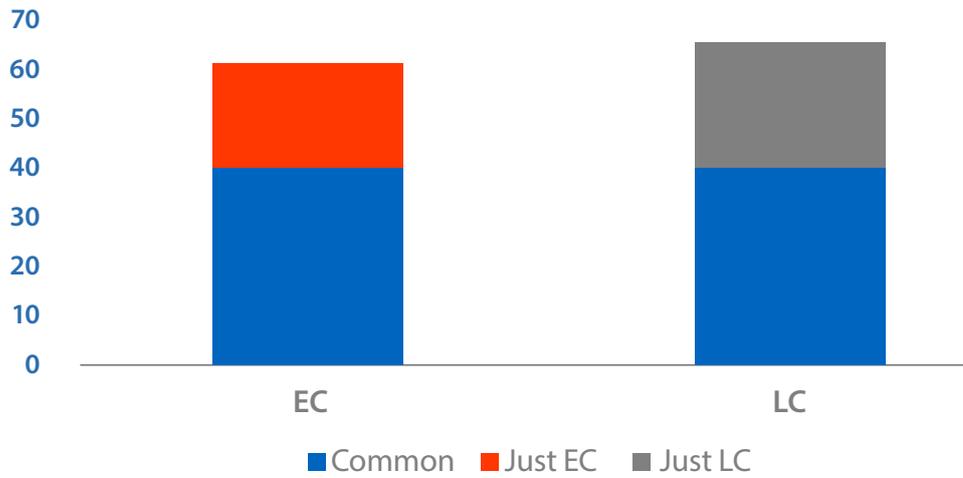


图5-蒸发冷却与液冷燃料电池系统的子系统组件数量比较

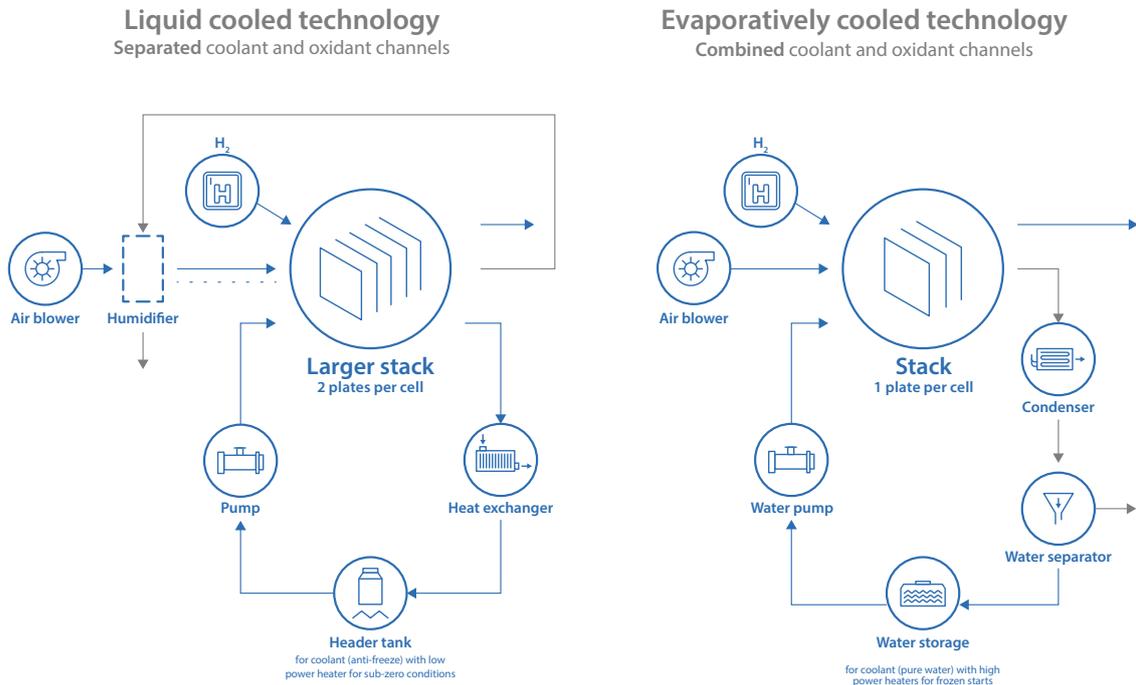


图6-蒸发冷却式和液体冷却式燃料电池技术的对比

3.2 快速瞬态响应减少了峰值负载下的电池尺寸

电驱动系统的瞬态响应是指系统对输入条件变化（如油门指令和负载波动）的反应能力。因此，燃料电池的瞬态响应在eVTOL电驱动系统中至关重要，它影响系统的性能、稳定性、效率和安全性。对这一响应的深入理解是优化系统设计、提高系统可靠性并确保安全的关键。图6展示了LC与EC阴极电路的对比，重点突出二者在冷却策略上的不同。

EC燃料电池采用直接喷水技术进行电池冷却和湿化（如图右所示），相比于传统的LC燃料电池系统（如图左所示），其瞬态响应明显更优。这种响应优势归因于EC燃料电池内部直接加湿过程，而LC系统则依赖外部增湿器，通过从阴极排气气体中转移蒸汽来实现湿化，存在一定的运输滞后。

在LC系统中，当遇到快速瞬态需求时，由于外部增湿器失去来自阴极排气的蒸汽输入，阴极进气反应气体会变干，因此电池内部的电池电压会暂时降低，从而限制功率输出。与此同时，电池电压降低会增加热损失，这些热量被排放到相邻的液冷却液中，进一步降低了系统的瞬态燃料效率。

相对而言，EC系统的液体泵在注水速度上具有天然的优势。在需求发生正向瞬态变化时，EC燃料电池通过直接喷水对电池进行迅速湿化，因此电池电压保持稳定，且电压随电流增大按预期方式下降。功率变化的速率仅受压缩机引入阴极反应空气的速率限制。因此，压缩机的加速响应速度是燃料电池系统能否迅速提供功率给电驱动系统的关键因素，而不受外部气体湿化系统的影响。稳定的电池电压不仅优化了瞬态响应，还提升了瞬时燃料效率。

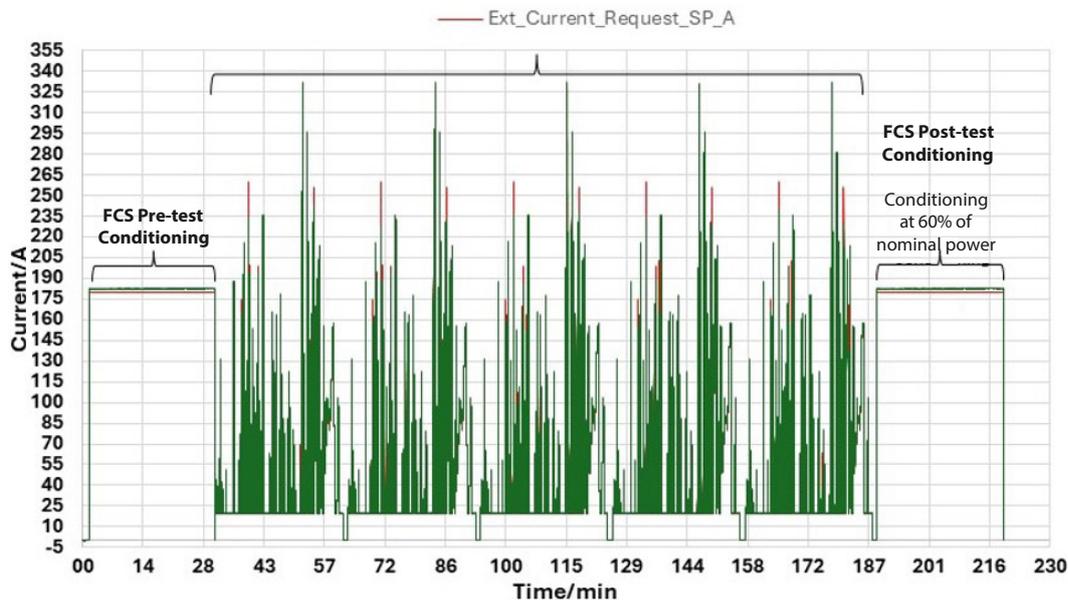


图7- EC燃料电池系统瞬态响应测试数据

EC燃料电池能够快速响应瞬态负载变化的优势，使其成为eVTOL飞行器的理想主要电源，进而减少了电池的尺寸和重量。EC系统能够承担更大的瞬态功率需求，而传统LC系统则严重依赖大型电池来管理启动和瞬态电流变化。通过采用EC燃料电池系统，eVTOL电驱动系统的能量管理效率得到提升，同时减少了总系统的重量。

图6右侧所示的EC架构已被应用到现有IE产品中。图7展示了近期IE-DRIVE HD产品在进行瞬态负载测试时的性能数据，该测试旨在模拟燃料电池为主要功率源时的极端工作条件。测试开始前，燃料电池经过标准的预测试调节阶段，接着一系列占空比负载峰值工作周期，负载峰值范围从0到85kW（净功率）和100kW（总功率），并重复进行五个周期。测试结果表明，该系统的加速速率达到了60kW/s及以上，远高于标准LC技术通常实现的20kW/s加速速率。这一显著差异突出显示了EC燃料电池系统在瞬态负载条件下的增强响应性能力与动态性能。英泰力能公司预计，通过其IE-FLIGHT产品线，系统的瞬态响应将进一步提升，达到80kW/s以上。

EC 燃料电池系统的集成显著提高了应用中电动传动系统的性能、稳定性、效率和安全性。燃料电池在瞬态条件下的稳定性至关重要，因为它能够确保系统在负载快速变化时的稳定运行，避免出现不稳定或振荡现象。此外，电驱动系统的效率与瞬态响应密切相关，快速响应输入指令有助于最大限度地减少动态操作过程中的能量损失，这对于最大化eVTOL的续航里程和能效至关重要。优化的瞬态响应对驱动系统的安全机制尤为重要，在紧急情况下，能够迅速、有效地做出系统反应，从而大幅提升eVTOL飞行器的整体安全性。

3.3 全功率贯穿任务周期，包括无迎风冷却悬停

在垂直起飞期间，eVTOL推进系统中的任何热源系统无法获得迎风冷却，因此，如果没有强制冷却，热量将被吸收进入所有冷却回路。

在LC燃料电池系统中，特殊的低电导率冷却液（减少电流在串联的电池组中流动时的电能损失，因为从一端到另一端的电势差逐渐增大）（通常是水与乙二醇的混合物）通过燃料电池堆内的冷却通道进行泵送（图6左）。随着电池堆放电，热量被吸收到冷却液中。如果没有强制冷却或迎风冷却，空气冷却热交换器（散热器）将无法排热，冷却液会升温，导致电池温度上升。根据悬停时间、环境温度和冷却液初始温度，温度可能会上升到影响电池电化学性能的程度。这可能是由于局部过热和反应物湿度的降低，增加了质子导电阻力，导致电池电压下降。

如果继续消耗更多电流以维持恒定的电功率，问题将进一步恶化，产生更多的热量，导致冷却液温度升高，进而导致电池的退化加剧，影响电池的使用寿命。如果继续运行，电池电压会进一步降额，电气系统的功率需求被迫减少以恢复电池性能。与电池的混合使用有一定帮助，但会增加系统中组件的总质量。在最坏的情况下，电池容量可能需要根据完全悬停功率和时间要求进行设计，而LC燃料电池则在零功率或非常低功率下工作，直到通过水平飞行运动确保迎风冷却可以排出电池中吸收的热量。最终，所需的电池尺寸可能会很大。

图6右侧所示的EC燃料电池系统中，阴极路径中注入的水会在电池内相变蒸发，从而为阴极反应物提供湿化并吸收电池放电时释放的反应热。在与上述LC系统相同的悬停条件下，由于缺乏迎风冷却，空气冷却冷凝器可能无法排热。随着蒸汽从冷凝器热侧排气出口排出，水箱中的水位将开始下降，但电池的入水量仍保持稳定中。随着功率的不断输出，升高的水温将导致电池温度非常缓慢地上升。由于水仍然以相同的速率蒸发并吸收反应热，温度上升的速率将远低于LC系统。由于反应物中的湿度得以维持，且热量在电池内部继续有效地排放，电池可以保持较高电压以继续高效供电。

例如，如果我们考虑燃料电池系统的300kW净功率输出，那么在使用寿命结束时，计算表明稳态热量排放约为324kW。一个拥有25升水/乙二醇冷却液的LC系统，如果起始温度为15°C，假设所有的热量都被冷却液吸收，且没有任何热量被排放到周围环境或燃料电池系统的其他部分，冷却液将在大约16秒内升温至75°C。在EC系统中，如果假设水箱中只有8升去离子水，经过16秒的恒定300kW净功率运行，水箱中的液体体积将下降至大约2升，在冷凝器没有热损失的情况下，仍能够在电池内保持适当的湿化和热量排放。在后续的平飞过程中，冷凝器的迎风冷却将增加热量排放，回收足够的冷凝水来补充水箱内的液位。

3.4 换热器尺寸小，高温（HT）散热来减小阻力

市场上成熟的PEM燃料电池通常具有高功率密度的耐用膜片，通常在75到80摄氏度的电池温度下运行。在LC系统中，由于电池之间的隔板存在对流和传导热传递，导致从电池电极到液体冷却液的温度下降，从而使得LC系统中热交换器的热侧入口温度将低于电池温度，约为70到75摄氏度。而在EC系统中，这种温差被大大减少，热侧入口温度更接近电池温度，这是由于注水使得热量直接通过对流传递到阴极废气中，阴极废气作为热传导通道将热量从电池中带走。研究表明，由于EC系统阴极流道中相变流的高热对流率，在相同功率和冷侧流量条件下，EC热交换器（冷凝器）的正面面积比LC热交换器（散热器）小约30%（18）。

此外，英泰力能的EC技术可以增强系统的散热温度，而不受电池温度的影响。图8左侧展示了现有IE-DRIVE产品中使用的低温（LT）EC解决方案。图8右侧展示了为IE-FLIGHT产品及未来更广泛的EC应用而开发的最新高温（HT）架构。通过对燃料电池堆和冷凝器之间的阴极废气进行加压，系统的散热温度会升高，同时保持燃料电池内的低温条件，以确保市场现有组件的最佳耐用性和性能。EC-HT架构通过增加热交换器热侧与冷侧之间的温度差来提高热效率。由此提高的温度推动了空气冷却热交换器尺寸的减小，从而减少设备平衡（BoP）质量，进而减少eVTOL飞机阻力。

有关英泰力能高温技术及其运行的详细信息，请参阅英泰力能的IE-FLIGHT白皮书（19）。

作为IE-FLIGHT产品线全面开发的一部分，英泰力能整理了开发未来零排放飞行器的客户的一系列要求，以形成具有市场导向性的需求文档。低空环境中的外部气温可能的变化范围为-60°C到+55°C，这与eVTOL应用中未加压的舱室条件相当，这一上限温度仅比最佳低温PEM电池工作温度低20°C，因此如果未来的氢燃料电池eVTOL使用LT-LC架构，所需的热交换器尺寸将会非常大。

EC-HT系统架构则提高了这一温差。例如，当飞行器在炎热环境下（如近海平面55°C）运行时，热侧入口温度可以通过加大第二级压缩机的运行力度来提高，从而提高下游压力和温度（如热侧入口温度达到97°C）。在海湾地区或美国西南部，尤其是在阳光照射强烈的混凝土停机坪或垂直起降场，可能会经常遇到这种情况。如果飞行器在近似国际标准大气条件（ISA）下运行（如10000英尺处-5°C），第二级压缩机可能关闭，冷凝器的温度可低至接近电池温度75°C。通过这种方式，随着温度接近ISA，BoP中的寄生功率减少，系统效率得以提高。

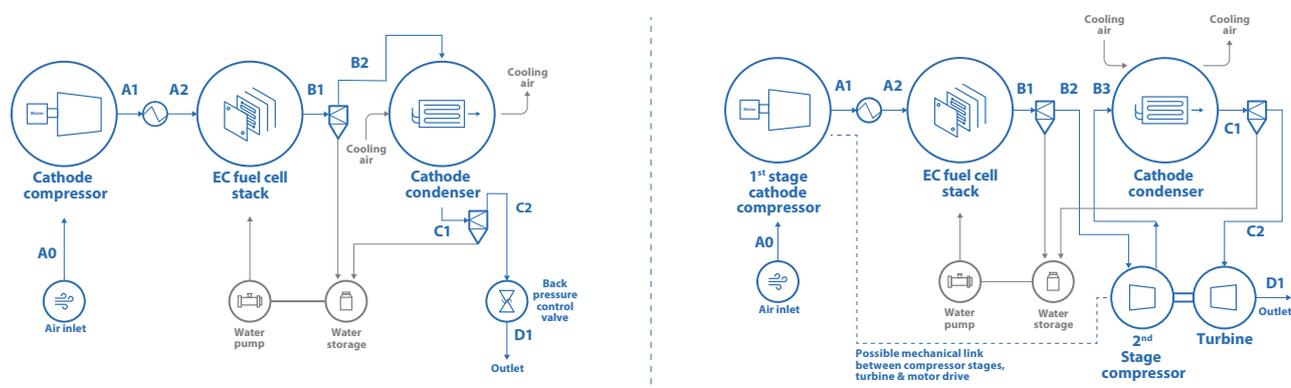


图8 - 英泰力能蒸发冷却LT-PEM解决方案（左）与高温运行系统（右）对比，高温系统可实现更小的冷凝器尺寸。

热侧压力和温度的变化，会导致空气冷却热交换器的尺寸发生变化。在LT-LC系统中，散热器需要根据eVTOL飞行器可能操作的实际环境中的最热条件来设计。因此，这种增大的前面积装置会一直存在于飞行器上，导致额外的阻力。

通过英泰力能的EC-HT架构，可以根据需求调整冷凝器的尺寸和操作条件，以确保通过冷凝回收足够的水分，而无需像LT架构那样在高温环境下受限于尺寸要求。英泰力能正在进行相关的技术研究，进一步理解这一尺寸选择，并预计在这一设计研究中，EC-HT热交换器相比于LT-LC热交换器将实现显著的尺寸缩减。

图9概念性地展示了这一效益。图中展示了飞行与ISA条件下外部温差的概率密度函数，随着温度的升高，第二级压缩增加，从而确保EC-HT中较小热交换器的有效散热。而LC系统中较大的热交换器会因增加的阻力导致较高的燃料消耗。在高温环境下，一些操作情景将不得不做出牺牲，例如较低的爬升率、较短的悬停时间等。图中显示的数字仅供参考 - 降额发生点将由设计与客户需求共同确定。

基于全球温度范围的飞机编队运营，大多数飞行任务将受益于EC-HT技术。

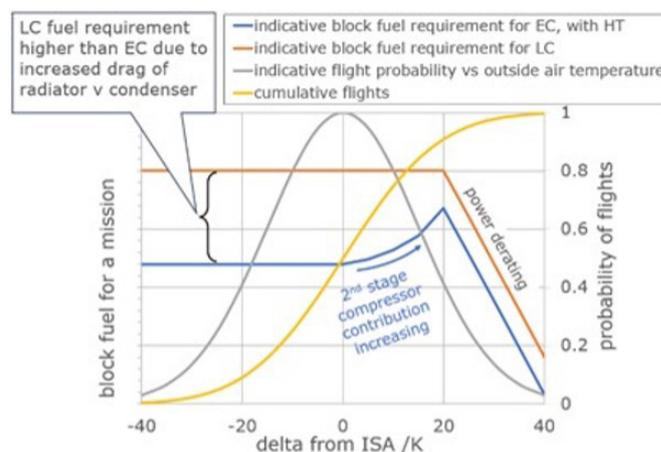


图9-EC-HT与LC相比，飞行器燃料使用潜在改进的示例

4. 概念eVTOL案例研究

在本工作案例中，基于 Bell Nexus 6HX 概念设计（如下图 10 所示），对一架载有 4 名乘客和一名飞行员的管道式倾转旋翼 eVTOL 飞行器进行了建模，以比较据称将于 2025 年上市的最新电动飞行器 EPiC 2.0 能源电池 (20) 与英泰力能 IE-FLIGHT 燃料电池方案（包含液氢储存）。米兰理工大学（Politecnico di Milano）计算了 Bell Nexus 6HX 的飞行特性，并将其用于此模型 (21)。

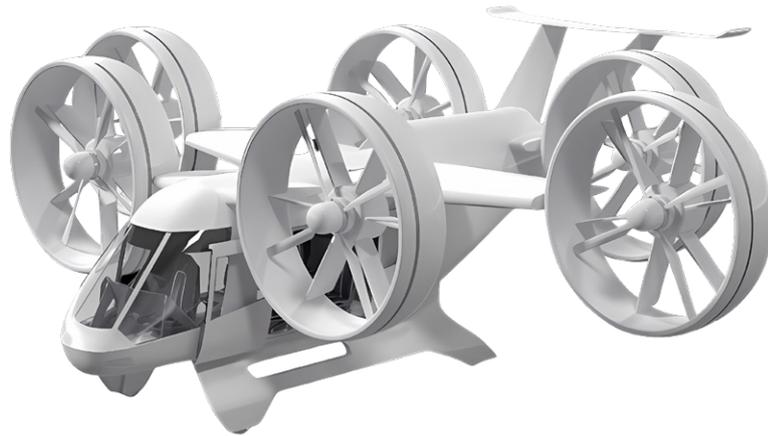


图10-概念型 eVTOL 飞行器：4 名乘客加一名飞行员

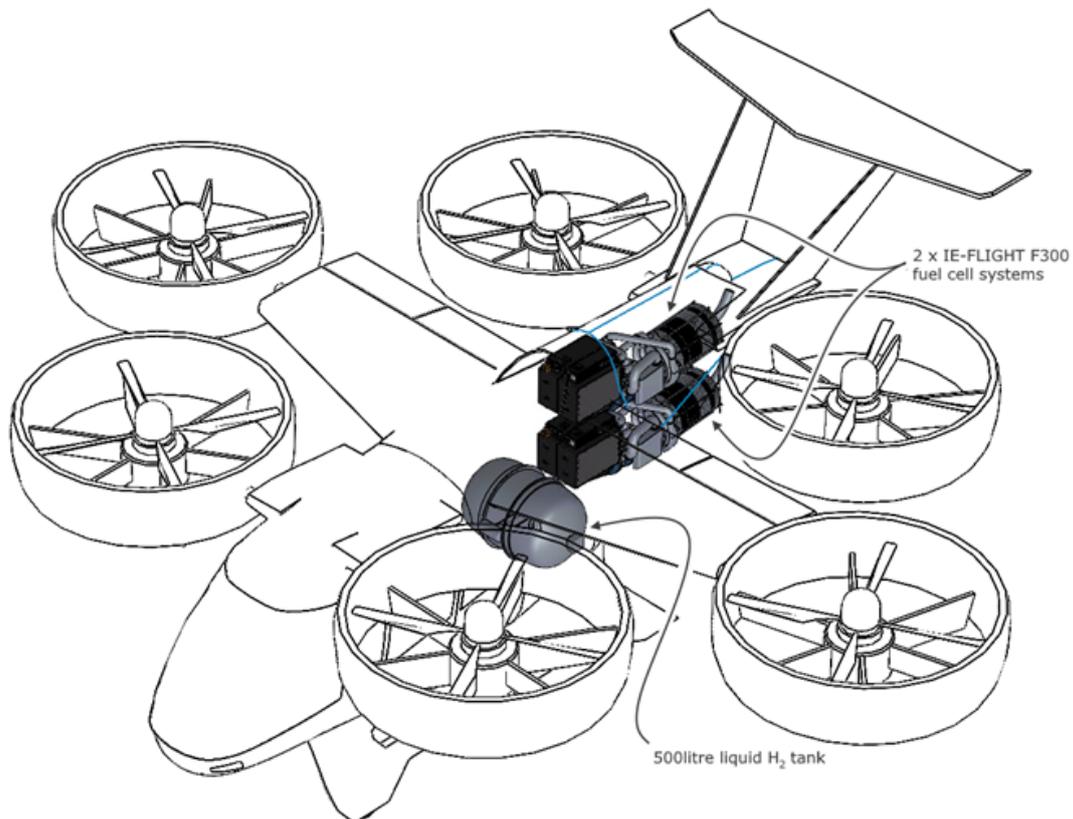


图11 - 2个IE-FLIGHT F300燃料电池系统（内含500升液氢）安装在尾部的示意图

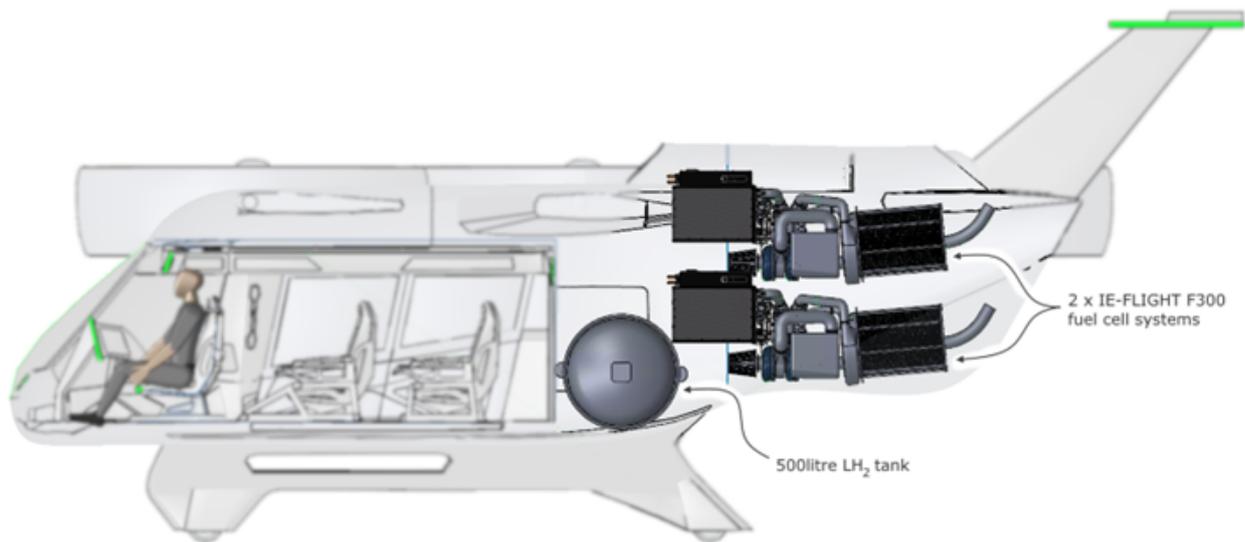


图12 – 2个IE-FLIGHT F300燃料电池系统（内含500升液氢）安装在尾部的侧视图

IE-FLIGHT燃料电池解决方案假设的动力系统包括2个IE-FLIGHT F300燃料电池系统（19），它们能够在飞行的所有阶段提供飞行器所需的全部功率，而相比之下，LC燃料电池系统更多依赖于混合动力电池。图 11 和图 12 显示了 2 个 IE-FLIGHT F300 燃料电池系统的概念布局，其中包含了 500 升液态氢储氢罐。

下表 1 显示了 Bell Nexus 6HX eVTOL 的计算功率分布，数据来自 (21)。

飞行阶段	功率需求 (kW)
起飞或悬停	663
爬升	515
巡航	234
下降	133
悬停或着陆	663

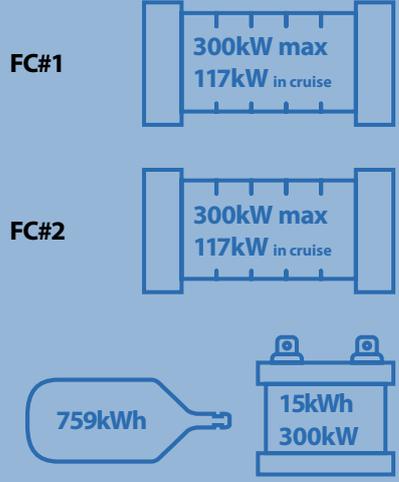
表1 – 概念性eVTOL在各飞行阶段的功率需求

此外，最初用于启动 F300 燃料电池系统的混合电池，其尺寸是针对在极端情况下，1 个 F300 燃料电池发生故障的情况而设计的，它可以确保在另一个正常工作的 300kW 燃料电池系统的支持下，混合动力电池具有足够的容量提供 300kW 的功率，以完成紧急着陆程序。

4.1 模型的主要发现

- 为了实现150英里航程，5座Bell Nexus 6HX概念设计中，电池的重量占飞行器总重的三分之二以上。
- 为了将电池驱动版的eVTOL飞行器的航程延长15倍，电池组的质量将增加一倍以上，因为随着增加更多电池来延长航程，收益递减效应会使飞行器尺寸和重量增加。
- 相比之下，由于液氢具有较高的比能量密度，仅增加飞行器重量的1%以上的液氢燃料，就能将飞行器的航程在加油之间翻倍。

4.2 案例研究结果

配置	纯电池	2个IE-FLIGHT 燃料电池系统
技术		
续航范围 (英里/公里)	150/241	625/1000
电池/燃料电池质量 (千克)	2,073	710
体积 (升)	1,825	900
30公里行程次数 (单次加油)	3	10
加油时间 (分钟)	46 (600kW超级快充)	12
运行阶段污染排放 (NOx) (克/千克燃料)	0	0
电池/燃料电池更换前的运行小时数*	608	>8,000 hours

*根据Argonne国家实验室研究 (3) 中的上限估算，基于500次充电周期的操作小时数。

5. 结论

英泰力能的IE-FLIGHT燃料电池系统独特的蒸发冷却设计有助于简化和轻量化结构，提高功率稳定性，从而降低成本并提高性能的一致性。

本案例研究表明，使用IE-FLIGHT驱动的eVTOL可以实现更长的航程和更短的加油时间，有望对城市空中交通产生变革性影响。这些进展突显了英泰力能在支持航空航天行业脱碳化努力中的重要作用，并将氢燃料驱动的eVTOL定位为可行、可扩展、可持续的航空运输解决方案。

总结而言，英泰力能的创新燃料电池技术为 eVTOL 应用提供了显著的优势，解决了电池和燃烧方面面临的关键挑战。通过利用氢燃料电池，IE-FLIGHT技术在以下三个主要领域相较于电池提高显著：

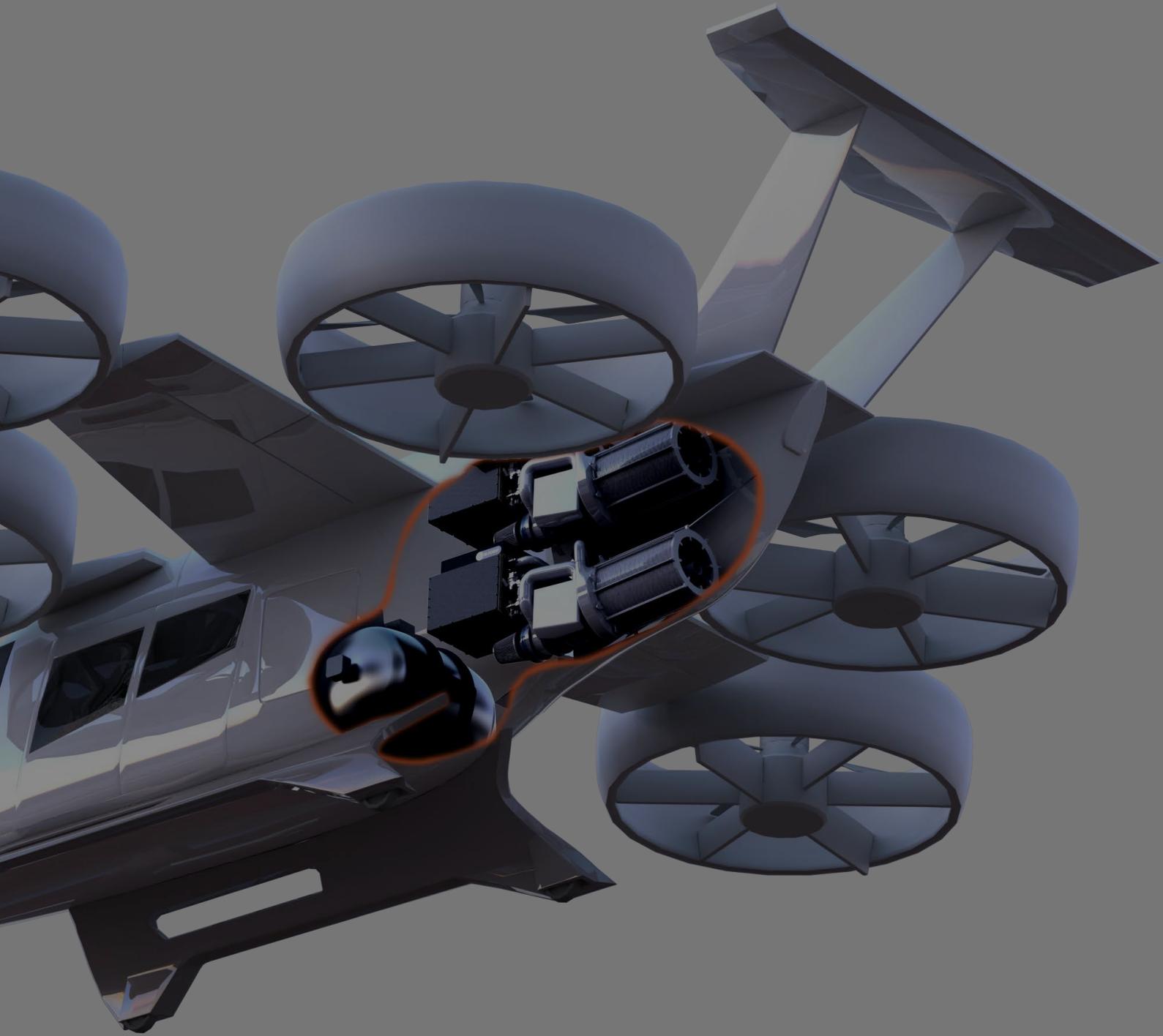
- 延长飞行器航程并解锁电池驱动飞行器无法实现的飞行路线：
伦敦飞巴黎（225英里）或伦敦飞法兰克福（400英里）
- 通过提高运营加油效率来降低总拥有成本和提高盈利能力：
由于加油时间更短，与电池相比，使用燃料电池的eVTOL每年可增加19%的乘客英里数。
- 在多种环境条件下运行而不降低性能：
与电池不同，燃料电池在温度降至15°C以下时不会出现航程缩短的情况，且在高温工作环境下也不会影响使用寿命。

参考文献

1. Roland Berger; Rolls-Royce. [Online] 2022. <https://www.rolls-royce.com/country-sites/hungary-en/discover/2022/rr-and-roland-berger-forecast-advanced-air-mobility-market-opportunity-for-the-asia-pacific-region.aspx>.
2. Institute, Aerospace Technology. [Online] <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-ALL-REP-0004-FlyZero-Our-Vision-for-Zero-Carbon-Emission-Air-Travel.pdf>.
3. Performance and Cost of Fuel Cells for Urban Air Mobility. Ahluwalia, R.K, et al. Lemont, Illinois : Argonne National Laboratory, 2021.
4. Energy, Rystad. [Online] 31 July 2024. <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/Slowing-EV-Demand-and-Rising-Costs-Weigh-On-Global-Battery-Investment.html>.
5. Zorpette, Glenn and Ackerman, Evan. [Online] IEEE Spectrum, 22 March 2024. <https://spectrum.ieee.org/evtol-air-taxi-industry>.
6. The promise of energy-efficient battery-powered urban aircraft. Sripad, Shashank and Venkatasurbramanian, Viswanathan. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA : PNAS, 2021, Vol. 118.
7. Hydrogen refuelling of a fuel cell electric vehicle. Sahin, Habip. Firat University, Elazig, Turkey : International Journal of Hydrogen Energy, 2024, Vol. 75.
8. Comparison of the impact of fast charging on the cycle life of three lithium-ion cells under several parameters of charge protocol and temperatures. Mathieu, Romain, et al. University of Bordeaux, France : Applied Energy, 2021, Vol. 283.
9. Discharging at High and Low Temperatures. [Online] Battery University. <https://batteryuniversity.com/article/bu-502-discharging-at-high-and-low-temperatures>.
10. Effects of ambient temperature and trip characteristics on energy consumption of an electric vehicle. Al-Wreikat, Yazan, Serrano, Clara and Sodr , José Ricardo. Aston University, Birmingham, UK : Energy, 2022, Vol. 238.
11. Effect of fast charging on degradation and safety characteristics of lithium-ion batteries with LiNi_xCo_yMn_zAl_{1-x-y-z}O₂ cathodes. Zhou, Hanwei, et al. Purdue University, West Lafayette, IN : Chemical Engineering Journal, 2024, Vol. 492.
12. US Inflation Calculator. [Online] <https://www.usinflationcalculator.com/>.
13. Institute, Aerospace Technology. Fuel Cells roadmap report. [Online] March 2022. <https://www.ati.org.uk/wp-content/uploads/2022/03/FZO-PPN-COM-0033-Fuel-Cells-Roadmap-Report.pdf>.
14. Aviation, Joby. Joby LinkedIn Post News Release. [Online] https://www.linkedin.com/posts/jobyaviation_we-recently-confirmed-the-performance-of-activity-708567242511121920-bNdU/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop.
15. Office, US Department of Energy - Hydrogen and Fuel Cell Technologies. Hydrogen Production. [Online] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>.
16. Demonstrations, US Office of Clean Energy. Regional Clean Hydrogen Hubs. [Online] <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>.
17. 'We are already getting US clean hydrogen tax credits to make H₂ for almost \$2/kg': Plug Power. Hydrogen Insight. [Online] <https://www.hydrogeninsight.com/production/we-are-already-getting-us-clean-hydrogen-tax-credits-to-make-h2-for-almost-2-kg-plug-power/2-1-1725346>.
18. A comparison of evaporative and liquid cooling methods for fuel cell vehicles. Fly, Ashley and Thring, Robert A. Loughborough University, UK : International Journal of Hydrogen Energy, 2016, Vol. 41.
19. Dudfield, Chris, et al. IE-FLIGHT White paper. Intelligent Energy. [Online] July 2024. <https://www.intelligent-energy.com/wp-content/uploads/2024/07/FLIGHT-Whitepaper.pdf>.
20. EPIC Propulsion Battery. EPS Energy. [Online] <https://epsenergy.com/products-services/epic-propulsion-battery-2/>.
21. eVTOL Aircraft Conceptual Design and Optimization. Balli, Mehmet Efe. Politecnico di Milano, Milan, Italy : (PhD thesis), 2020.



IE-FLIGHT®



 **Intelligent Energy®**

Charnwood Building, Holywell Park, Ashby Road, Loughborough,
Leicestershire, LE11 3GB, UK

+44 (0) 1509 271 271

intelligent-energy.com