

IE-FLIGHT

白皮书





1. Executive summary 执行摘要

英泰力能 (Intelligent Energy) 公布了一项在航空燃料电池技术方面的突破，推出基于其独有专利冷却技术的 IE-FLIGHT™ 先进高温燃料电池系统。

本白皮书评估了新型 IE-FLIGHT 质子交换膜 (PEM) 燃料电池系统在应对零排放飞行挑战、特别是应对燃料电池散热对大型重型热管理系统需求方面的潜力。大型换热器会增加重量和阻力，这一问题成为燃料电池飞机的主要制约因素，是行业亟需解决的关键问题。

此款新型 IE-FLIGHT 燃料电池系统不仅有助于缩小机载换热器的尺寸、减小空气动力阻力，同时还能保持高重量功率密度并充分利用高电流密度低温质子交换膜 (LT-PEM) 燃料电池经过验证的优势。本白皮书中进行的初步建模结果表明，对于一架 9 PAX 飞机而言，与传统燃料电池系统相比，基于高温架构的 IE-FLIGHT 燃料电池系统通过减少推进阻力，可将飞机航程燃料消耗量降低 5%。在未来的飞机设计中，推进阻力在总空气动力阻力中占比预计更大，因而节省的燃料会更多。

有了这一突破，氢燃料电池动力系统将成为对未来零排放飞机更具吸引力的选择，可服务于电动垂直升降飞机 (eVTOL)、支线和地方航线市场以及未来氢燃烧动力宽体飞机内的氢燃料电池辅助动力系统 (APU)。这一专利高温架构是英泰力能 IE-FLIGHT 航空燃料电池系统产品的基石，开启了可持续航空技术的全新时代。

作者：

Chris Dudfield 博士 (首席技术官)

Tim Booth (IE-FLIGHT 技术主管)

Jonathan Cole 博士 (高功率技术开发负责人)

Jonathan Douglas-Smith (IE-FLIGHT 系列产品销售负责人)

Martin Goodwin 博士 (资深项目经理)



2. Fuel cell overview 燃料电池简介

氢燃料电池通过电堆内氢与氧的电化学反应产生电能，生成水蒸气和废热两种副产物。这种发电方法以绿氢为燃料，清洁且高效。

氢燃料电池是一种零碳排放技术，因此，是目标市场各应用场景实现净零排放目标的途径之一。蓄电池与内燃机本身分别存在质量和排放问题，而氢燃料电池可被直接用作二者的替代电源。

燃料电池种类繁多，可根据质量、工作温度、灵活性、功率密度和尺寸等应用要求，适用于不同的应用场景。燃料电池技术用途广泛，被用于汽车、航空航天、固定式动力、便携式电源、轨道、航海和材料搬运等各种应用环境。

附件 1 是各种燃料电池技术的比较，仅供参考。

PEM 燃料电池因其重量和体积功率密度被普遍认为是最适合航空航天应用环境的燃料电池技术，因此本报告聚焦于 PEM 燃料电池。



3. Fuel cells within aviation 航空领域的燃料 电池

氢燃料电池是未来可持续发展飞机的零排放电源解决方案之一，也是一种具有竞争力的适用于 eVTOL、CS-23 和 CS-25 级飞机（可能多达 100 座）以及未来宽体飞机 APU 的技术。飞机制造巨头空中客车公司（Airbus）和巴西航空工业公司（Embraer）分别启动氢燃料电池飞机开发项目 ZEROe 和 Energia，旨在充分利用氢能的优势。英国航空航天技术研究所（Aerospace Technology Institute, ATI）已经确定燃料电池和热管理是实现零碳飞机的关键技术。作为“零目标”战略的一部分，FlyZero 项目在 ATI 立项。为保证燃料电池技术在航空航天推进系统中切实可行，燃料电池系统功率密度必须大于 1.5 kW/kg。

然而，目前致力于研究先进燃料电池飞机概念的航空航天领域集成商面临着 LT-PEM 燃料电池热管理系统尺寸的挑战，该系统用于消散燃料电池产生的低品位热能。燃料电池内部伴随电力产生的热量需要持续耗散，以防止电池过热和电池组件热降解。航空用燃料电池等高功率燃料电池系统中的热输出明显，需要集成特定的冷却子系统。大型热管理系统会导致质量和阻力显著增加，飞机体积越大，挑战越为艰巨。

对于飞机这一应用场景，特别关注点在于燃料电池的功率密度。然而，随着开发继续朝着可行产品的方向发展，拥有成本、效率、寿命、稳健性和可靠性也有待改进。飞机整体效率的优化需要一种全面的综合方法，即减小质量的同时通过改善热管理来减少飞机阻力。



4. Fuel cell thermal management 燃料电池热管理

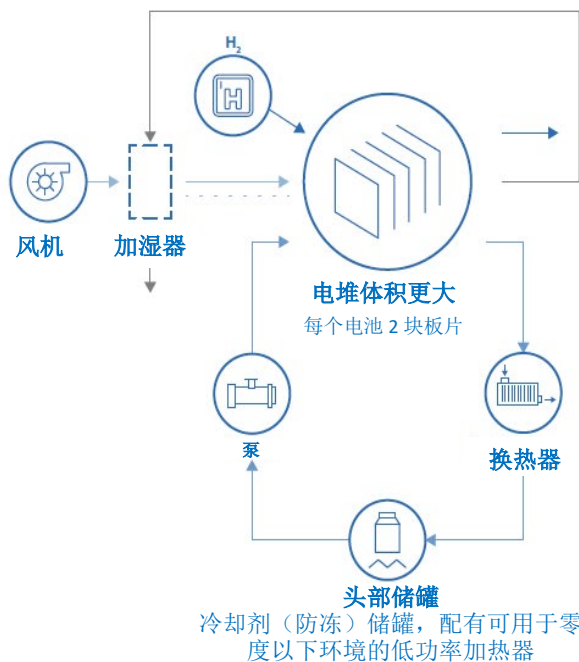
电化学反应中产生的副产物热能需要被耗散。随着电力输出的增加，产生的热能会更多，导致散热面临更大的挑战。多种燃料电池技术在不同的应用场景中，对冷却和配置的要求不尽相同。根据应用和辅助系统 (BoP) 要求，PEM 燃料电池有五种不同的热管理方法：

- 空气冷却 (AC)
- 液体冷却 (LC-LT)
- 蒸发冷却 (EC-LT)
- 蒸发冷却与高温热管理 (EC-HT)
- 液冷高温膜 (LC-HT)

空冷式燃料电池的相关辅助系统最为简单，其中，在阴极处为氧化剂提供的空气也被用于去除反应所产生的热量。此类系统往往在 kW 以下到 20-30kW 的区域正常运行。而在某些情况下，特别是在要求封装紧密的场景中，对空气流量的要求变得尤为苛刻。而这些要求往往不适合航空航天应用场景的高功率输出。

液体冷却 (LC) 技术

相互独立的冷却剂和氧化剂通道



蒸发冷却 (EC) 技术

冷却剂和氧化剂联合通道

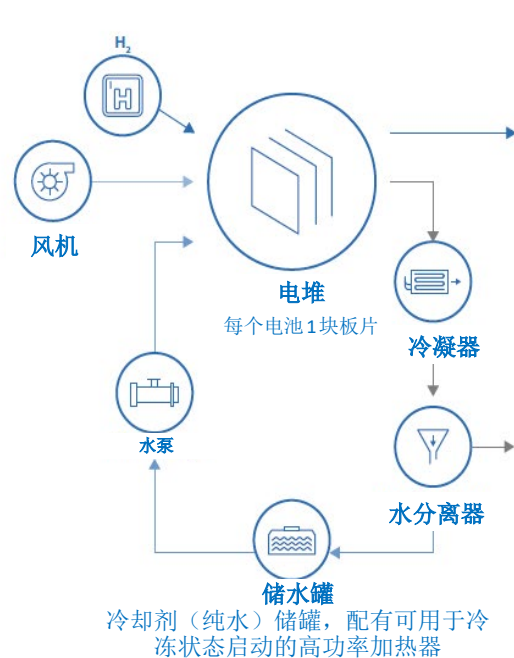


图1-蒸发冷却式和液体冷却式燃料电池技术的对比



对于载客飞机来说，零碳技术想要在航空航天推进方面发挥优势，就需要高功率的燃料电池系统。与使用环境中的空气进行冷却的低功率燃料电池不同，高功率燃料电池系统对热管理和水管理的要求更高，因此其系统架构也更为复杂。对于体积较大的燃料电池系统，不仅需要有效地去除废热，还需要严格控制反应物空气的湿度。高功率燃料电池系统主要使用液冷或蒸发式冷却两种技术（[图1](#)）。

液体冷却（LC-LT）技术以热管理系统的设计为基础，其中，冷却剂流体（通常是水/乙二醇基混合物）通过双极板中形成的通道，然后通过换热器将吸收的热量排出。在单独的工艺回路中，电堆废气中的水蒸气通过加湿器收集，并返回电堆进气流。

蒸发冷却（EC）技术是将液态水直接注入燃料电池电堆的每个活性电池中。随着这些水的蒸发，电化学反应产生的热能在水的相变过程中被吸收。蒸发的水和生成的水以及贫氧空气通过换热器，使水冷却回液相，并返回储水罐，以便随后被继续注入电堆中，这也是连续冷却循环的一部分。剩余的湿空气通过排气口排出。

蒸发冷却式燃料电池系统不含加湿器，因为注入电堆内阴极流中的水可以对每个电池进行局部加湿。因此，在瞬态负载条件下蒸发冷却式电池中的湿度可得性远高于配有外部加湿器的液体冷却式系统，从而提高快速瞬态负载变化下的电池性能，在减少机载电池容量、管理电源瞬态方面具有显著优势。

液冷高温（LC-HT）技术与 LC-LT 类似，但采用高温膜电解质，使电堆能在更高的温度（ $>120^{\circ}\text{C}$ ）下运行。由于换热器冷热两侧之间的温差较大，热管理系统的尺寸得以减小。

采用高温热管理（EC-HT）的蒸发冷却与液冷高温膜（LC-HT）均通过增加整个换热器上的温差来提高热效率。由此提高的换热器效率有助于缩小换热器尺寸，从而减少辅助系统（BoP）质量和飞机阻力。

然而，与商用低温质子交换膜（LT-PEM）产品相比，高温质子交换膜（HT-PEM）电池和电解质材料的技术成熟度（TRL）和制造成熟度（MRL）较低，电性能（电流密度和寿命）较低，且铂电催化剂含量较高，抵消了小型换热器带来的优势。HT-PEM 的商业化时间表以及最终对航空航天的适用性，仍是风险所在。英泰力能的 EC-HT 解决方案采用经过验证的商业膜技术，结合经改进的热管理系统，是一种风险较低且切实可行的航空航天解决方案。



Simpler construction 结构简单

与液体冷却式燃料电池相比，蒸发冷却式燃料电池的结构更简单、组件更少。在液体冷却式电池中，热量通过隔板一侧的液体冷却通道去除，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。液体冷却式电池中的隔板要求板片具有有效的夹紧力和/或局部进行焊接，从而减少整体接触电阻损失。

在蒸发冷却式电池中，单块流场板包含阴极和阳极反应物，两者位于单块双极板的任一侧。无需增加冷却板，便能减小接触电阻。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。下 [图2](#) 是对前述优势的总结。



与友商的产品相比，辅助系统少从而重量**更轻**
(无独立加湿器)



与液体冷却式燃料电池系统相比，**换热器更小**



单块电池板设计确保材料堆叠紧凑且最小



零件少，意味着**性价比**
高，生产速度快

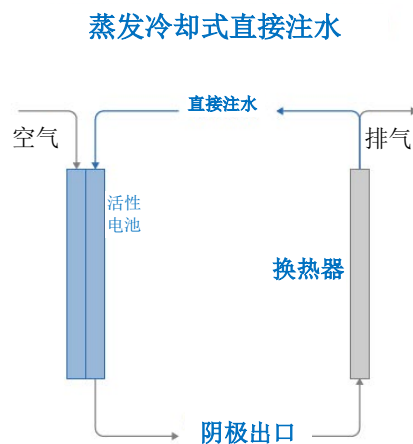
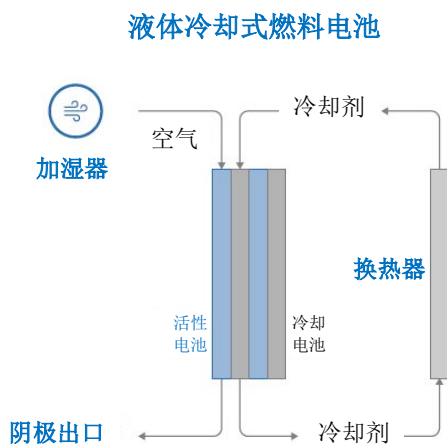
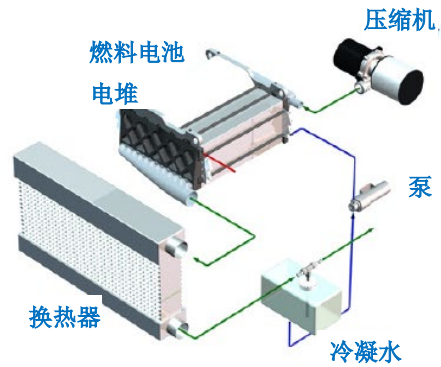


图2-蒸发冷却技术的优势

5. High temperature architecture 高温架构

英泰力能的 IE-FLIGHT 氢燃料电池产品采用最新的高温散热架构，具有以下特点：

- 换热器尺寸小
- 空气动力阻力小
- 重量功率密度高

英泰力能通过压缩燃料电池电堆和换热器之间的阴极废水，提高散热温度，从而增加换热器内部的压力和温度，与其他燃料电池系统相比，能够提高热效率且减小换热器尺寸。[图3](#) 为一种可能的引擎机舱布局示例。

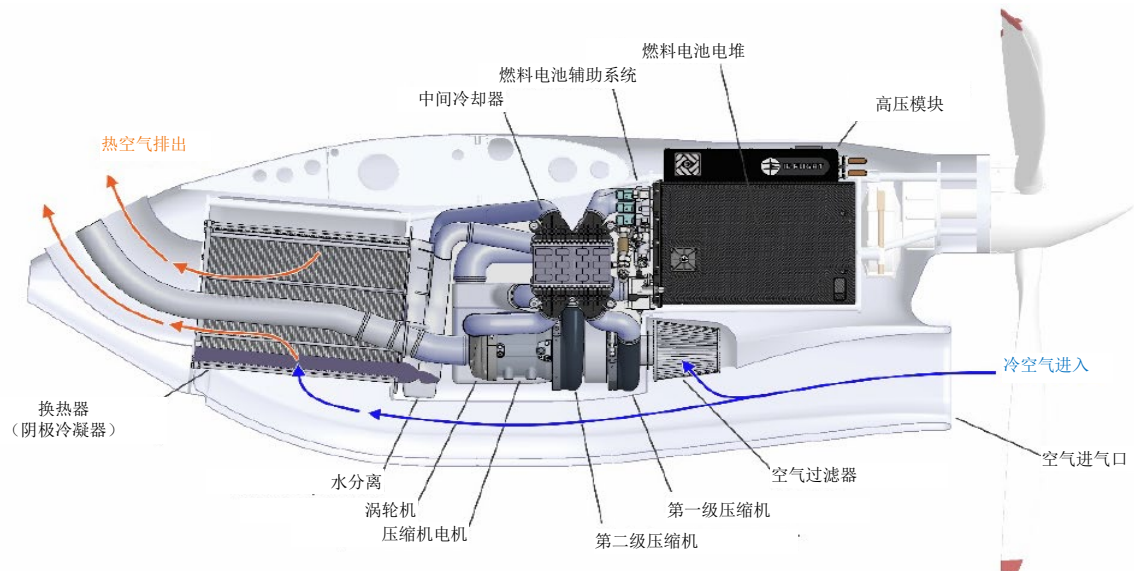
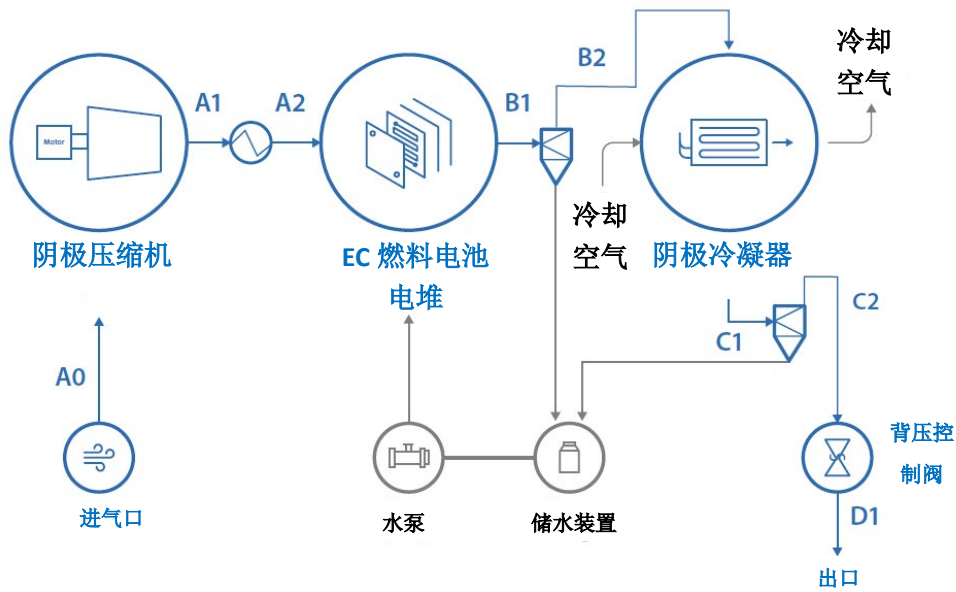


图3-IE-FLIGHT F300 燃料电池产品在未来固定翼推进系统中的概念集成

两级式阴极过程压缩与换热器下游的涡轮机互补，从阴极流回收能量，确保总体效率的有效性。[图4](#) 显示了现有 EC-LT 和 EC-HT 架构之间的差异。



LT—现有 IE-DRIVE HD100 等产品使用的典型阴极侧结构



HT——适用于未来 IE-FLIGHT F300 产品的最新拟定系统架构（取决于进一步研究）

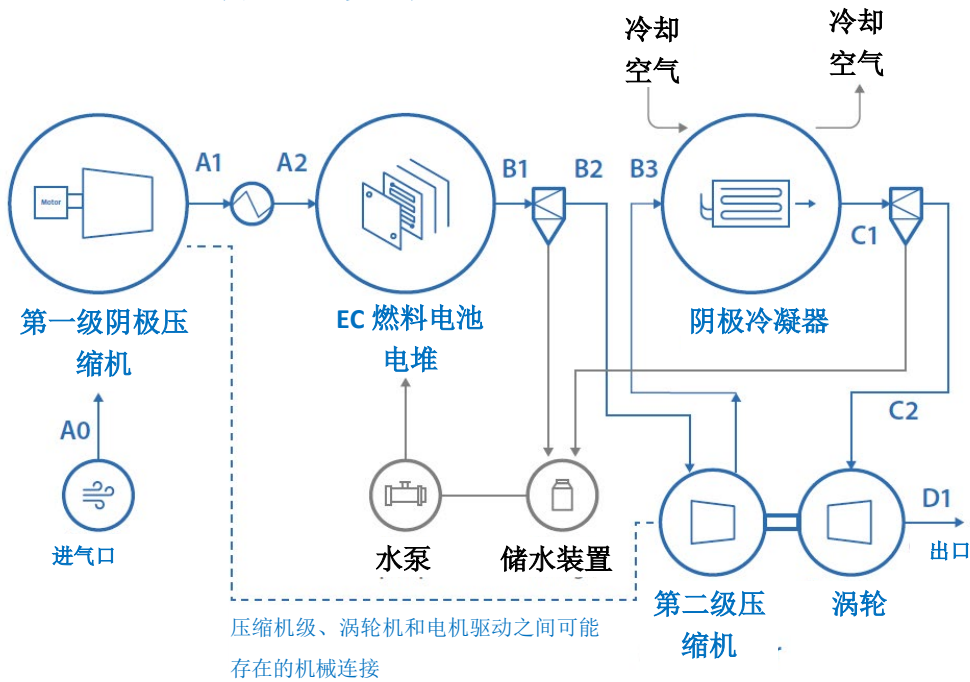


图4—传统EC和ECHT架构的对比



6. Benefits for aircraft integration 飞机集成优势

英泰力能架构可减小换热器尺寸

将 300kW 系统视为适用于航空航天领域的可扩展构件，我们对 EC-HT 和 LC-LT 架构的换热器尺寸进行了比较分析（表 1）。为简单起见，保持恒定压降，分析比较了方形单程换热器的浸湿面积变化。对于同等系统，与 LC-LT 相比，EC-HT 架构的传热面积可减少 23%。这是因为 EC-HT 系统中换热器进口温度更高，并且换热器热侧的相变产生的传热系数更高。拉夫堡大学的另一项研究表明，对于同等系统，EC 系统可以在换热器正面面积减少 27%的情况下运行¹。

	LC-LT	EC-HT
换热器尺寸——相对于 LC-LT 的传热面积	100%	77%
质量 (kg)	34	26 (-8kg)

表 1-换热器尺寸和质量的对比

考虑到面积变化与换热器质量成正比，则 EC-HT 换热器的干质量相对于 LC-LT 系统减少 8kg。这是基于干重的评估。一旦冷却剂被添加到 LC 系统中，EC 系统的增量可能会超过 50%，因此，从飞机层面讲，这种评估还是比较保守的。

在考虑环境运行条件时，高温架构的优势得到进一步证明。第二级压缩机可用于优化整个飞行剖面的热管理，从而使换热器最小化。压缩机可以动态控制换热器进口温度，在正常运行条件下最大限度地降低寄生功率，并且在炎热的天气条件下，压缩机可以提高进口温度。然而，在热侧进口温度固定不变的 LC 系统中，换热器的尺寸由最坏情况下的炎热天气条件（例如>ISA+28）决定，因此，这种尺寸对典型操作而言并非最优，会导致阻力增加。

高温蒸发冷却式架构对飞机整体性能的影响

飞机建模方法

权衡质量、性能（功率与效率）以及阻力等关键参数，优化燃料电池系统与飞机的集成。

¹燃料电池车用蒸发冷却法和液体冷却法的对比, A. Fly*, R.H. Thring, 2016 年 6 月 28 日



原则上，最轻的燃料电池即是在接近最大功率点工作的电池。然而，随之产生的效率更低，产出的废热更多，而在飞机层面，这会使得燃料箱更大、换热器更大、阻力更大，因而航程燃料消耗量更高。由于电池运行困难，还会导致电堆寿命缩短。

我们的目标是找到一个良性循环，即提高效率，以缩小热管理系统，减少阻力，从而降低电力需求和燃料消耗量，进而减小燃料箱的尺寸。系统运行灵活性的提高也有助于延长电堆和系统寿命以及应对紧急情况。

航空业的初始目标是实现 1.5kW/kg 的系统。然而，为获得最佳整体飞机解决方案，需推导出质量、效率和热管理均衡的最优燃料电池系统。EC-HT 架构正是为适应客户需求而研发。虽然级外压缩机的存在致使这种结构具有额外的寄生损失，但是涡轮机能量回收和换热器尺寸减小可抵消这种损失，从而减少飞机的整体阻力。

我们使用双引擎 9 座客机模型进行了飞机层面的评估，从而对系统的各方面进行权衡。这种飞机应该是燃料电池动力飞机应用场景的最佳代表，在对不同燃料电池技术各项指标逐一对比的同时将飞机设计本身的影响降至最低。建模时，飞机推进系统被安装在两个引擎机舱内，氢气被储存在重量效率 10% 的 1m^3 储罐内。机翼和机身固定。研究重点在于 LC、EC-LT 和 EC-HT 技术在推进系统效率（含寄生损失）、质量与阻力等方面的差异，从而找出这些差异在飞机层面对完成指定飞行任务所需航程燃料消耗量的影响。EC-LT 系统的质量基准为 1.5kW/kg ，并根据相关技术的换热器尺寸施加增量。在此阶段，假设 LC-LT 和 EC 电堆性能相似。

本研究假定推进阻力占飞机总阻力的比例为 20%。这是一个合理的近似值，因为燃料电池系统的引擎机舱和热管理系统较大。这种机型没有公开数据，但是，对于更大的飞机，引用的数值在 10% 到 40% 之间。

飞机敏感性

对飞机的参数研究着重显示了飞机对燃料电池系统选定参数的敏感性。通过隔离这些参数，可以更深入地了解并比较不同燃料电池技术的性能。事实上，这些参数相互关联，调整一项参数会对其他参数造成影响。本研究已根据航程燃料消耗量对每项参数进行了评估。

变更推进阻力所占飞机总阻力的比例，保持质量和效率不变。结果表明，飞机阻力每增加 1%，航程燃料消耗量便会增加约 1%。

推进系统质量的变化对飞机燃料消耗量的影响更小。质量增加 50%，航程燃料消耗量仅增加 0.8%。这是因为两台 200kg 的系统相当于飞机质量的 10% 左右。为此，本研究假设 LC 和 EC 系统的基准重量相等。

燃料电池系统效率提高 1%，航程燃料消耗量降低 1%。

这是由于相应的储备燃料重量减少，因为对于完成相同的任务来说，推进系统效率越高，所需燃料越少。值得注意的是，在本研究中，燃料箱的尺寸固定不变。在设计优化的全过程中，推进系统效率的影响将更大，节省燃料 1 kg，燃料箱质量可能减少 9 kg(假设重量效率为 10%)。

表 2 是对参数研究所得设计权衡的总结。

	增量	航程燃料消耗量变化
阻力	+1%飞机阻力	+1%
质量	+50 kg	+0.8%
效率	+1%燃料电池效率	-1.01%

表 2-燃料电池参数对飞机航程燃料消耗量的影响

巡航速度是一项与燃料电池设计无直接联系的参数，但是，最大着陆重量 (MLW) 和燃料电池飞机阻力的增加意味着这两个参数对巡航速度更为敏感。图 6 表明巡航速度和航程燃料消耗量之间的关系。本评估采用 140kn 的巡航速度来比较各种技术，因其对应的任务航程比较合理，无需加大燃料箱尺寸，否则更大尺寸的燃料箱会超出飞机的最大着陆重量 (MLW)。

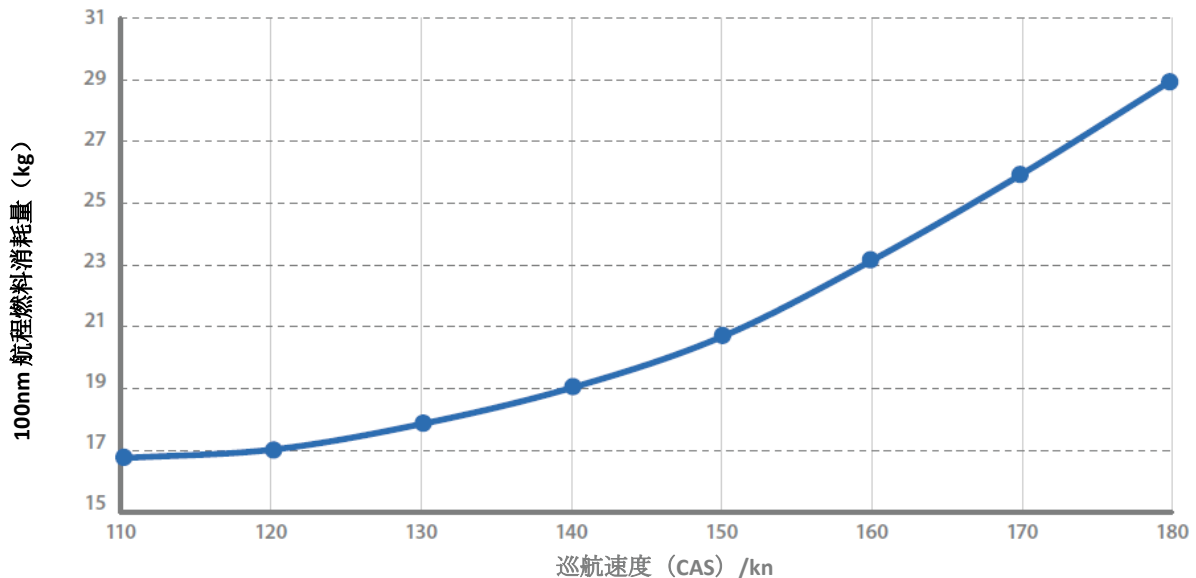


图 6-根据航程燃料消耗量比较巡航速度

我们运用参数研究从飞机层面对不同的燃料电池技术进行比较，生成了每项技术的燃料流量图 (包括压缩机和电功率的各种寄生损失)。EC-HT 确实具有更高的寄生载荷，但可以通过在特定工作条件下运行第二级压缩机来减轻。此外，换热器尺寸的减小以及相应的阻力减小会对飞机航程燃料消耗量造成显著影响。对换热器的评估表明，采用高温架构，可使换热器尺寸缩小 23%，从而使推进阻力大致减少 23%。因此，当推进阻力为 20%的飞机采用 EC-HT 系统时，其阻力可能减少 4%。

进一步调整第二级压缩机，会使航程燃料消耗量减少几个百分点。[表3](#)展示了相关研究结果。初步分析表明，EC-HT 架构可实现 1.5kW/kg 的功率密度目标，并且可将所分析任务的航程燃料消耗量降低多达 5%。

	EC-LT/LC-LT	EC-HT	EC-HT+20%电池
燃料电池额定功率/飞机 (kW)	600	600	600
推进系统质量/飞机 (kg)	400	400	420
飞机阻力百分比	20%	16%	< 16%
航程燃料消耗量 (相对 LC 的百分比)	0%	-1%	-5%

表3-根据不同蒸发冷却式燃料电池系统比较飞机主要参数

飞机燃料电池系统优化

本项权衡研究强调了整体系统优化的重要性。更重要的是，对于将气态氢作为首选机载储存技术的应用场景，EC-HT 架构的优势更大。这是由于燃料储存的重量密度低。从航程燃料消耗量、寿命和运行适应性等方面为运营商优化飞机层面的解决方案，会影响目标系统的比功率密度。EC-HT 架构具有数项优势，可被用于获取最佳的飞机解决方案。

EC 燃料电池仅使用一块轻量的双极板，意味着与 LC 系统相比，EC 电堆的尺寸可以更大，而系统总重所占比例更小。这种方案会提高燃料电池效率，延长燃料电池寿命，并降低给定功率条件下的热负荷。多数情况下，从飞机层面讲，效率的提升可大幅减少燃料箱质量，从而降低运营成本。[图7](#)表明，电池数量增加 20%可使航程燃料消耗量降低 5%。这仍然是基于假设燃料箱尺寸固定不变的保守估计。此外，在 EC 燃料电池电堆中采用单块板片设计，可以降低电池数量增加对体积和质量的影响。

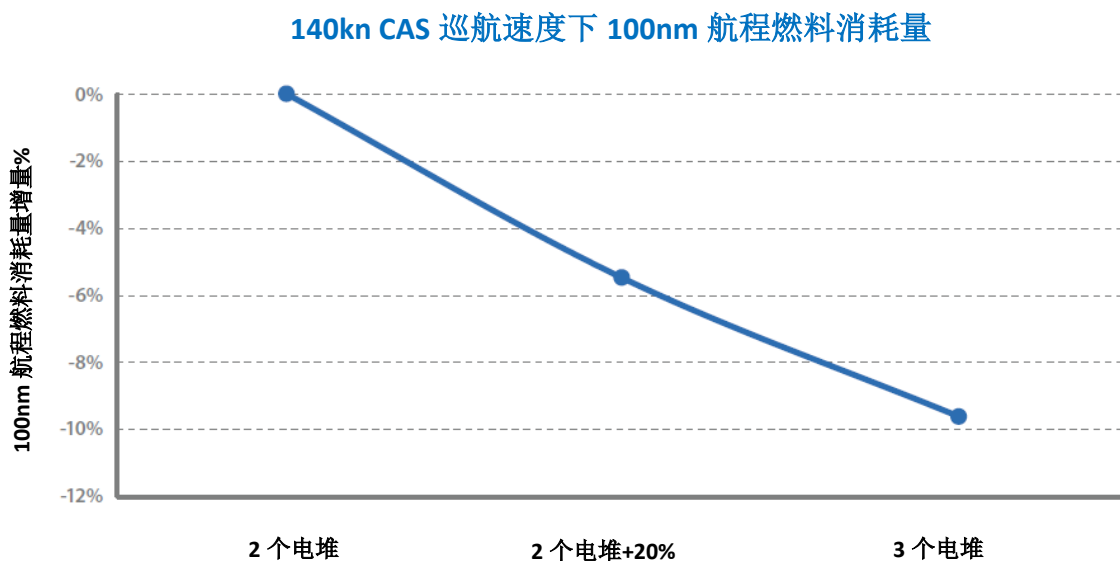


图7-根据航程燃料消耗量比较燃料电池堆尺寸



EC-HT 架构还可以为飞机提供进一步的运行优势。第 6 节主要讨论高温系统的动态控制，既能确保换热器的尺寸适合更标准的工作条件，还可利用高温系统适应温度更高的工作条件。尽管在温度更高的工作条件下，寄生能耗会增加，但是在更标准的工作条件下，寄生能耗会降低，从而为飞机提供整体运行优势。

本项权衡研究以 140 kn 的巡航速度为基础。高温系统所用换热器尺寸越小，阻力就越小，这一点会随着巡航速度的增加而变得越来越重要。

当前新型飞机的开发主要围绕燃料电池系统进行，并嵌入了轻量化、大展弦比机翼等新技术，减少推进热管理系统的阻力也变得愈发重要。EC-HT 热管理将有助于降低对飞机阻力的影响。

7. IE-FLIGHT™ fuel cell system and battery technology

IE-FLIGHT™ 燃料电池系统和蓄电池技术

对于 eVTOL 等小型航空航天的应用场景，燃料电池和蓄电池技术被认为是两种可行的电源选择。但是，当前蓄电池技术的比能量密度是 eVTOL 飞机航程以及有效载荷的限制因素之一。下图 8 展示了蓄电池技术在不同成熟度下的性能以及各种 eVTOL 制造商为达到其规定航程与有效载荷而必须满足的性能要求。

图 8 展示了 IE-FLIGHT 燃料电池系统解决方案搭配多种尺寸 350 巴气体储存装置的选项，以显示燃料电池技术相对于蓄电池的显著优势。英泰力能燃料电池系统的高比能量有助于实现更大的有效载荷及更长的航程，从而提供更强的运行灵活性。

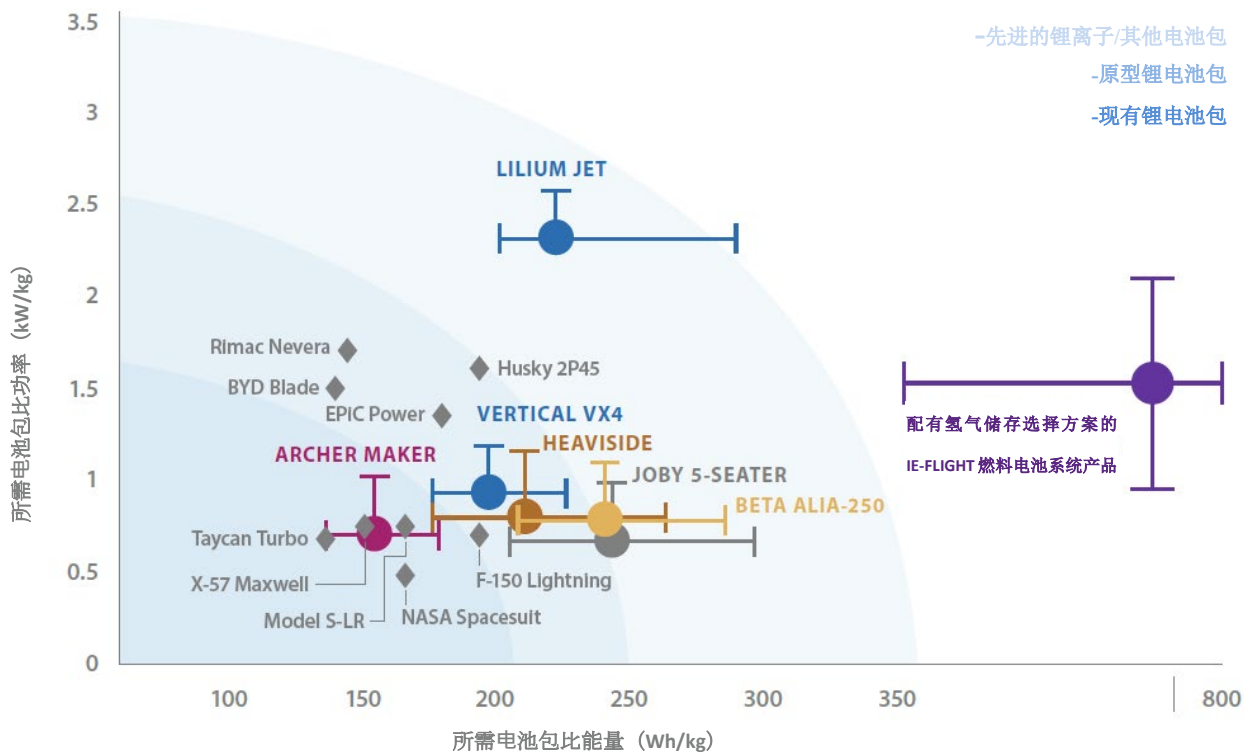


图 8—卡内基梅隆大学对蓄电池技术性能、eVTOL 制造商为达到其航程要求而对蓄电池所提要求以及 IE-FLIGHT™ 燃料电池系统性能的研究

8. Latest developments 最新进展

英泰力能是英国航空航天技术研究所 (Aerospace Technology Institute, ATI) H2GEAR 项目的合作伙伴，致力于研究新一代航空航天用功率密集与耐用型蒸发冷却式燃料电池。

得益于 H2GEAR，英泰力能的最新电池设计取得良好进展，实现了卓越的电流密度和优化的封装，为未来航空航天推进领域的应用奠定了有效的基础。如图 9 所示，H2GEAR 项目正在对电池性能进行进一步改进，旨在推动这一技术成为符合 ATI 燃料电池路线图、可支持燃料电池在航空航天领域应用的功率密集型解决方案。

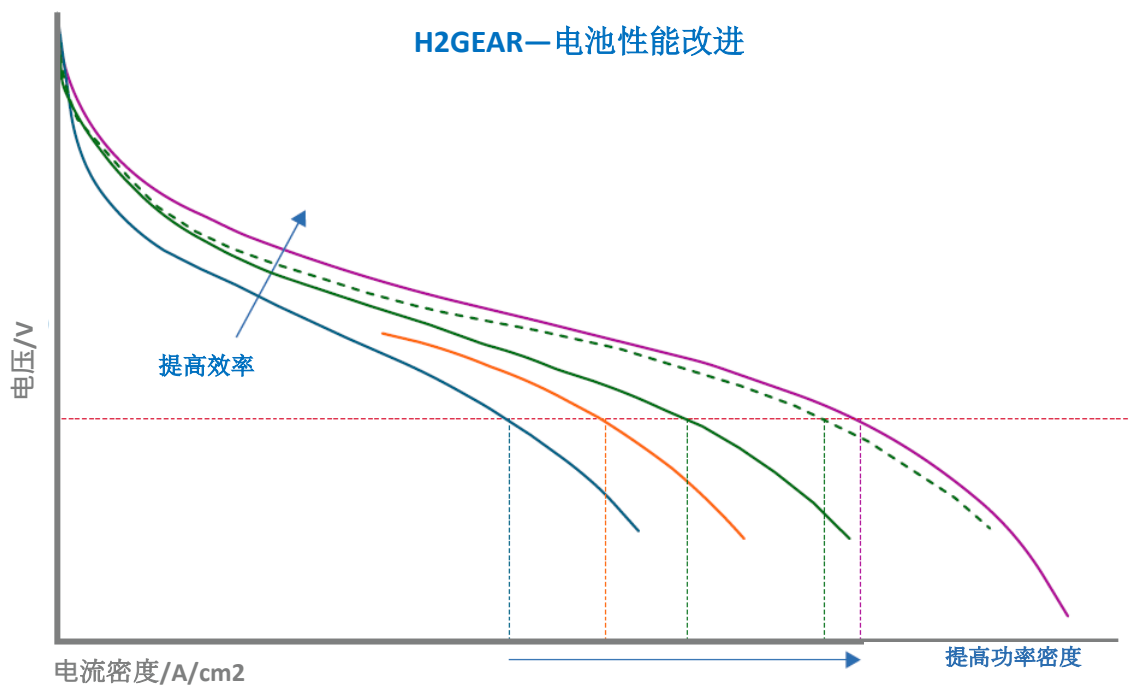


图 9—电池极化曲线 (表明 H2GEAR 项目期间持续进行的性能改进)

H2GEAR 项目将重点放在封装创新和质量减重方面，旨在提高电堆模块的功率密度，如下图 10 所示。此项技术进步将为电堆模块在完整系统中的集成以及在航空航天领域的应用奠定基础。

H2GEAR 电堆模块



航空用燃料电池电堆

汽车用燃料电池电堆

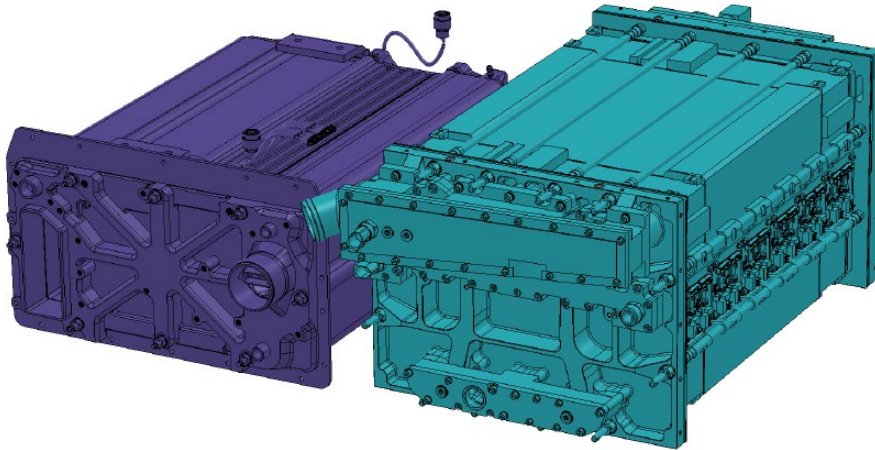


图10-H2GEAR 项目下电堆模块的开发以及同车用电堆的尺寸对比

我们正在开展上文中讨论的飞机级评估，旨在评估电堆的最佳尺寸与效率，并同时进行飞机级集成，以确定适合未来采用的核心吊舱安装系统布局。图11展示了一种可能的布局示例。这种新型高温系统的概念性硬件演示将作为全面系统开发项目的先导。



图11-EC 氢燃料电池系统的飞机级集成



9. Applications for IE-FLIGHT™ Technology

IE-FLIGHT™ 技术的应用

英泰力能通过市场预测研究，将 eVTOL、支线和地方航线市场确定为最有可能率先采用零碳推进技术的市场，并拟于 2030 年之前完成首次交付。

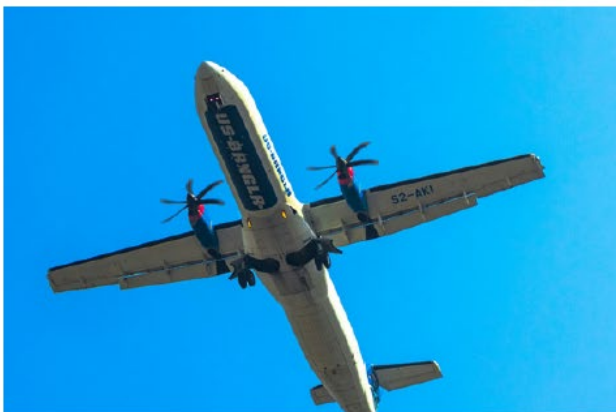
IE-FLIGHT 燃料电池系统被设计为一个可扩展的构件，可用于图 12 所示的各种应用，并为我们的客户提供竞争优势。目标市场如下所列；英泰力能正与客户合作，利用 IE-FLIGHT 技术的优势，实现零碳飞行。



电动垂直升降飞机



地方航线飞机



支线飞机



辅助动力系统 (APU)

图 12-IE-FLIGHT 目标应用



10. Conclusion 结论

本白皮书介绍了英泰力能高温燃料电池系统的结构并概述了 1.5kW/kg IE-FLIGHT 系统的重要优势（该系统适用于 eVTOL、CS-23 和 CS-25 级飞机推进以及未来大型飞机的 APU）。这种新型高温散热架构具有以下特点：

- 换热器尺寸小
- 空气动力阻力小
- 重量功率密度高

该系统通过压缩燃料电池电堆和换热器之间的阴极废水，提高散热温度，从而增加换热器内部的压力和温度，与其他燃料电池系统相比，能够提高热效率且减小换热器尺寸。

建模总结：

- 应用场景——最初评估是围绕一架在 5000 英尺巡航高度以 140kn 速度执行 100nm 飞行任务的 9 座飞机进行。
- 优化——围绕阻力、质量和效率等方面开展系统优化，实现最佳飞机解决方案。
- 关键的建模权衡——1%的阻力变化会引起 1%的航程燃料消耗量变化。

结果

- 换热器尺寸缩小——高温架构使得换热器区域缩小 23%，从而减小阻力
- 航程燃料消耗量降低——初步分析表明，EC-HT 架构将达到 1.5kW/kg 的功率密度目标，并且与传统燃料电池系统相比，可将被分析任务的航程燃料消耗量降低多达 5%。
- 工作效率提高——蒸发冷却式高温架构可动态调节，进一步优化工作效率，确保无需为最差炎热天气条件调整换热器尺寸。
- 巡航速度加快——EC-HT 架构的阻力减小，使得巡航速度更快，相关燃料消耗降低。
- 未来飞机的优势——在新型飞机设计中，推进阻力占飞机总阻力的百分比预计更高，因此，EC-HT 架构的阻力减小，会给业内带来更多优势。
- eVTOLs 有效载荷和航程优势——与未来蓄电池预期性能相比，IE-FLIGHT 燃料电池系统能提供更高的比能量，有助实现更大的有效载荷及更长的航程，为运营商提供更高的投资回报（ROI）潜力。



继续对两级压缩机性能、换热器配置和涡轮机尺寸进行权衡研究，以优化适用于各种应用环境的系统组件选择。目前，正在考虑几种不同的任务和高度条件。

通过与合作伙伴、客户和集成商的合作，IE-FLIGHT 系统现已进入下一设计阶段，旨在服务于固定翼发动机替换和最新 eVTOL 机身应用。英泰力能计划在未来的 IE-FLIGHT 燃料电池系统产品中采用这种高温架构。

欲了解更多关于 IE-FLIGHT™ 技术的信息及其在您应用场景中的优势，敬请联系 sales@intelligent-energy.com。



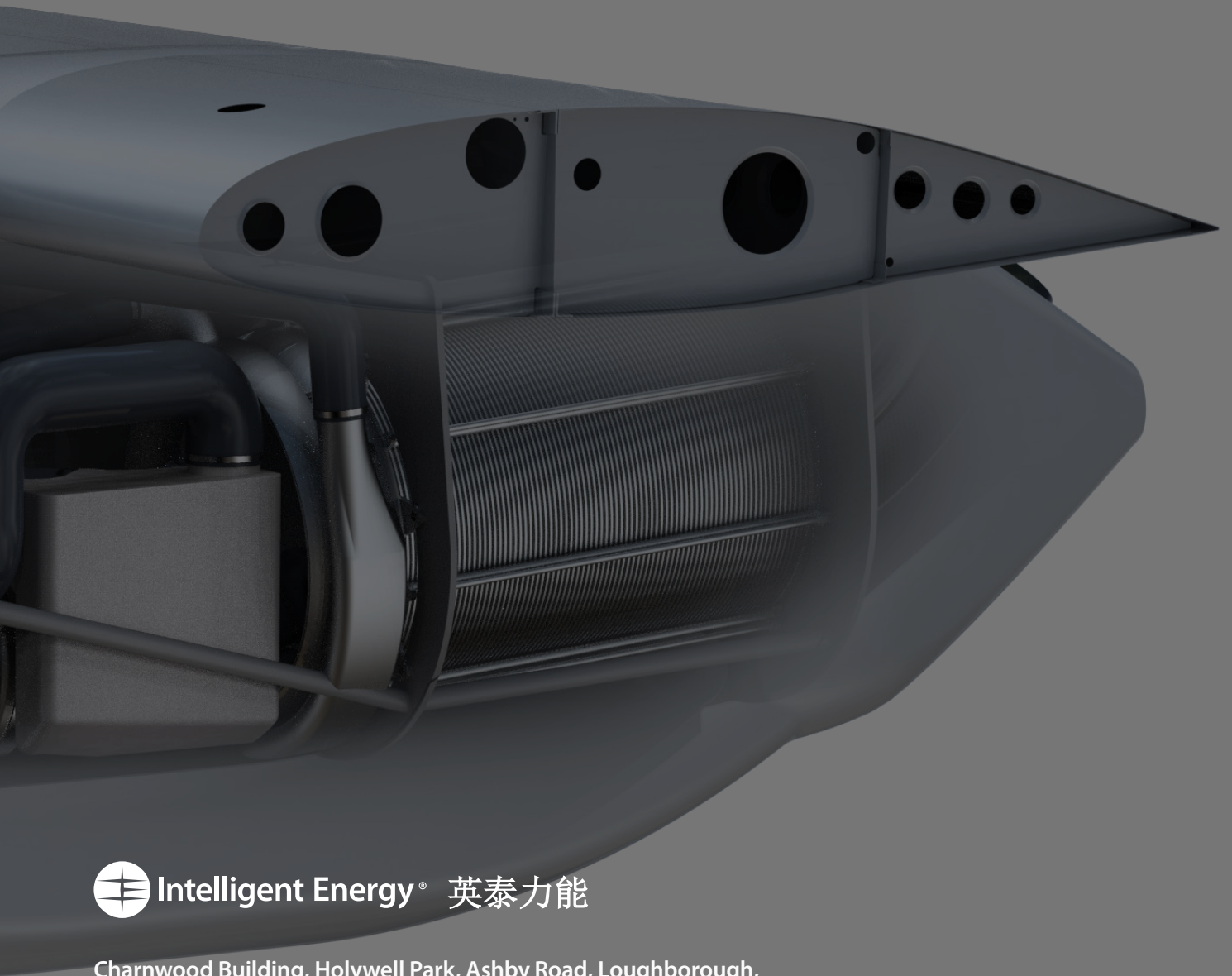
11. Appendix 附件

不同类型燃料电池的比较

	质子交换膜	固体氧化物	碱性	磷酸
电解质	聚合物膜	陶瓷	氢氧化钾	磷酸
阳极催化剂	Pt	Ni + YSZ (陶瓷)	Ni、Pt、Pd	Pt
阴极催化剂	Pt	LSM (陶瓷)	Pt、Pd、Ag、MnO ₂	Pt
典型燃料	氢气	天然气、乙醇、沼气	氢气、氨气	氢气、甲醇
典型工作温度	50-100°C	500-1000°C	40-75°C	150-200°C
电池效率	50-60%	60%	60-70%	40-50%
典型应用功率	1W至+1MW	10W至+1MW	500W至+200kW	100W至+400kW
电池功率密度 / Wcm ⁻²	2	1	1	0.3
优点	启动快速 瞬态响应 小巧 轻量	燃料灵活性高 效率高	启动快速 效率高 成本低 工作温度低	工作稳定 技术成熟 结构简单 杂质容忍度高
限制条件	氢气纯度 湿度敏感性 催化剂费用	启动时间 瞬态响应 原材料昂贵	体积相对较大 CO ₂ 敏感性 液态电解质管理	功率密度 液体与蒸汽具有腐蚀性 催化剂费用
应用场景	汽车 航空航天 无人机 航海 移动式轨道 固定式电源 物料搬运设备 (MHE)	发电厂 航海 热电联产系统	备用电源 空间 军事 固定式电源	固定式电源 热电联产系统



IE-FLIGHT®



 **Intelligent Energy® 英泰力能**

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

+44 (0) 1509 271 271

intelligent-energy.com