

IATA航空净零排放发展路线图分析

Roadmap of IATA Net Zero Carbon Emissions for Aviation

■ 王翔宇 / 中国航空发动机研究院 张平平 / 中国航发湖南动力机械研究所

国际航空运输协会（IATA）发布的航空净零排放发展路线图详细阐述了为实现可持续航空愿景所需的关键步骤，通过综合利用所有可能的技术、基础设施、运营、金融和政策手段，确定了前进道路上不同时期的重要里程碑，指明了通往绿色航空未来的方向。

随着国际民航组织（ICAO）第四十一届大会审议并通过了全球航空长期理想目标（LTAG），各国政府和航空业界正在齐心协力向2050年实现净零排放这一共同目标进发。2023年6月，IATA发布了一系列路线图，围绕提高飞行能效、使用替代燃料和碳捕获碳清除等三大行动着眼点，首次全面详细评估了航空业可持续发展所需的关键举措和时间节点，涉及飞机和发动机技术、能源基础设施建设、运营管理、供资融资和产业政策等方方面面。IATA在路线图中呼吁政府机构、装备制造、能源供应商、航空公司、机场以及金融服务商等所有利益相关方采取行动，提供必要的工具、政策和适宜的产品，确保航空业的这场根本性变革取得成功。

飞机和发动机技术

航空业的绝大部分排放来自燃料燃烧，飞行能效的提升能直接降低燃料供应链中的能源消耗。从历史的发展来看，新一代飞机和发动机的应用往往可减少20%的能源消耗，尽管航空市场还处于向737MAX、A320neo，以及LEAP、PW1000G这



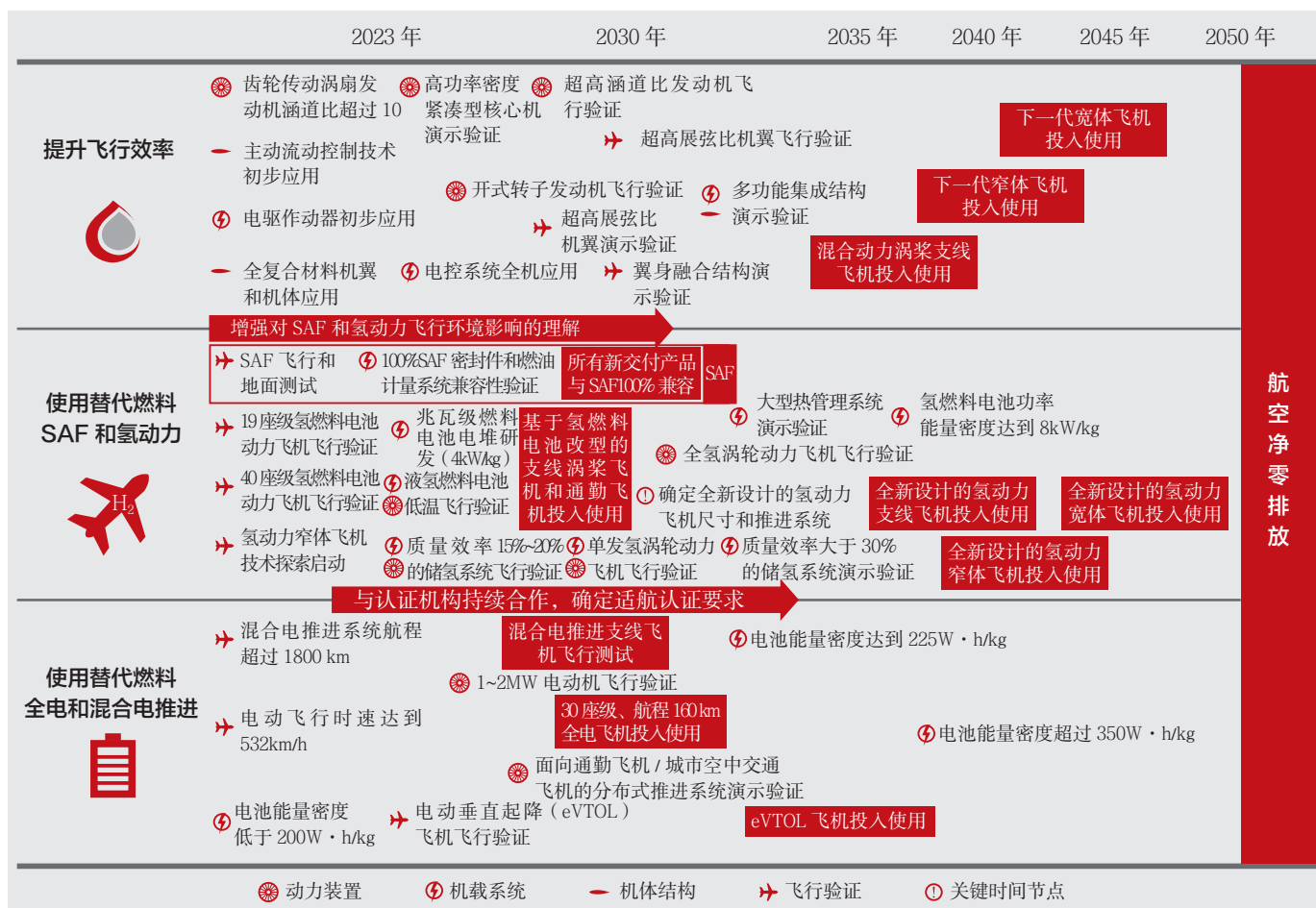
三大行动着眼点和五大关键举措的对应关系

些当前最先进的产品过渡的阶段，但未来随着更高效的发动机、更轻质的材料，以及更小阻力的机体空气动力学结构的研发，下一代飞机和发动机还有15%~20%的效率提升空间，到2050年可减少1.25亿~1.4亿t碳排放、将航空飞行活动中的能源需求降低7%~10%，并能够支持100%可持续航空燃料（SAF）。而再下一代产品的发展则转向电推进或氢动力飞机，预计在2030年前氢燃料可用于中短程飞行，电推进航班会在通勤航线出现，到2050年电池技术会成熟到足以为支线飞行提供动力，氢动力飞行则会扩大到干线航班，可进一步减少0.35亿~1.25亿t碳排放，最终的数值取决于其进入市场的速度，可以飞多远以

及可以搭载多少旅客。

提升飞行效率

通过技术革新提升飞机和发动机效率是长期以来航空业孜孜以求的方向。未来燃气涡轮发动机的涵道比将从如今的10左右提高到12以上、核心机压比从如今的40提高到50~60，动力系统的推进效率和热效率得以进一步优化，并有望通过开式转子与齿轮传动的结合实现架构革命性创新；主动流动控制技术有助于延迟边界层转捩、降低飞行摩擦阻力，更长更薄的折叠式跨声速桁架支撑机翼（TTBW）则在保持机场兼容性的同时大大降低诱导阻力，同时轻质复合材料和增材制造能够加速机体集成化、多功能结构的发展应用；升级机载系统，通过



航空净零排放

飞机和发动机技术发展路线图

缩小作动器尺寸并持续用更简单的电气系统替代液压系统也是加速多电飞行、减轻质量的重要途径。

开发更高效的动力系统、机体外形和结构以及机载系统，与飞行中到底采用哪种燃料无关，然而随着时间的推移，常规飞机和发动机技术升级的难度越来越大、成本越来越高，特别是各个系统之间的耦合性设计矛盾、各项指标提升不可兼得的问题逐渐显现。例如，超高涵道比发动机产生额外阻力和质量可能会在一定程度上抵消效率收益；超大展弦比机翼需要更大推力的发动机来达到相同的起飞、爬升和巡航性能；超长后掠翼使得机体重心

后移，对起落架设置和地面稳定性提出了新的要求。在这种情况下，将航空市场需求增长曲线和航空碳排放曲线完全解耦的唯一方法就是从根本上改变二氧化碳的来源，即常规航空燃料，实现飞行效率提升与替代燃料应用的有机结合。

应用替代燃料

替代常规航空燃料主要有SAF、电能和氢能三大选项。目前，几乎所有可用的SAF都是石蜡基的，由于缺乏常规航空燃料中的芳香烃组分，在一定程度上展现出了不同的特性，导致其还不能单独应用于飞行活动：一是发动机燃油管线、阀门和油箱上的现有腈类密封件依赖

燃料中的芳香烃物质来保持可用性；二是当前燃油计量系统适用的流体密度、电导率和比能范围与石蜡基SAF不完全匹配。这些技术挑战显然已经来不及等到下一代飞机和发动机问世再解决，2030年所有的产品都将与石蜡基SAF100%兼容。而与常规航空燃料具有完全相同组分和性质的全配方SAF的研发也十分急迫，相关标准有望在2024年出台，那些在役的飞机和发动机产品将无需再为配适SAF进行改动。

考虑到SAF仍属于碳氢燃料范畴、无法真正实现航空脱碳发展，其供应能力也受生物质原料产能的制约，长远来看电能和氢能这样的

零碳能源方案更具应用价值。基于现有产品改型，氢动力飞行大概率在2030年前出现在支线以及更小级别的市场，这将是加速氢动力技术成熟迈出的关键一步，使2035年后氢动力在窄体市场的应用成为可能。而当前航空电推进系统的功率量级为500kW，为了支持更远的飞行距离和更大的有效载荷，除了高密度电池和兆瓦级超高效电动机及配电装置以外，和燃气涡轮发动机组成的混合电推进系统将是后续的研发重点。虽然到2040年氢动力和电推进对全球航空碳排放的影响还十分有限，但这一切努力都是2060

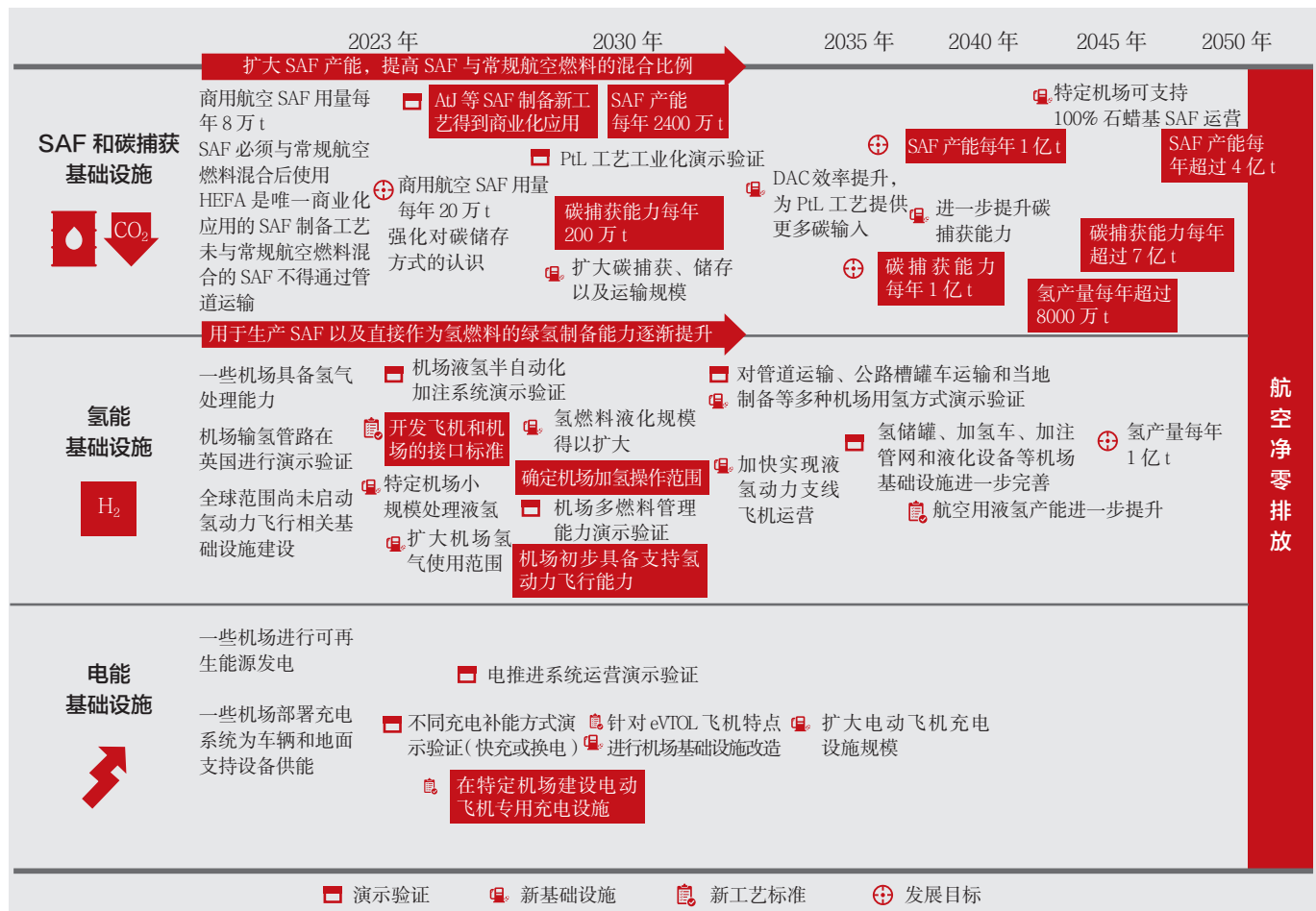
年后从净零排放到完全零排放过渡的必要准备。

能源基础设施建设

如今SAF已经能够完全嵌入到机场运营体系，但仍需要新的基础设施来收集原材料，运输到专业化工厂并依据不同的制备方法进行生产。到2030年，全球SAF的需求量可能会达到2400万吨，其中的绝大部分将来自加氢酯和脂肪酸(HEFA)工艺。随着更多新兴工艺的成熟，城市固体废物、农林残留物等更广泛的原料来源将大大缓解HEFA工艺中油脂类物质的供应压力。较为理想的

情况下，到2050年全球SAF制备工厂将超过7000家，SAF有望替代80%~90%的常规航空燃料，为满足如此巨大的需求，约40%的SAF是通过电转液(PtL)工艺合成的，即通过空气碳捕获技术(DAC)以获取制备SAF的碳原料。即使不考虑利用各种碳清除手段去除大气中残留的航空排放，仅通过PtL工艺获取SAF就能产生每年5亿t的碳输入，相应地扩大碳捕获能力势在必行。

无论是HEFA工艺还是PtL工艺，氢几乎是所有制备SAF工艺必需的中间物，2050年左右其市场需求量将达到1亿t，几乎与现在全球的氢能产



能源基础设施发展路线图

量相当。考虑到目前可再生能源电解水制氢的比例还不到1%，重构绿色氢能制备产业、提升绿色氢能生产规模对于航空净零排放发展是绝对必要的。除了用来制备SAF外，2050年用于氢动力飞行的燃料需求可能在400万~1400万t，这也将催生全新的航空氢动力产业配套需求。在储运方面，机场接收和分配氢燃料的策略因情而异，一些会通过管道输送氢气然后在现场液化和储存，还有一些会借助公路槽罐车运输，随着运量的上升再向管道输送过渡。在加注方面，之前由单一主干路和多个支路构成的加注管网需要改建以满足液氢流动的压力差，同时终端的加氢效率应与常规航空燃料持平，并实现对作业的安全流程与区域的标准化认证。

预计到2050年电动飞行的最大航程和有效载荷仍将较为有限，不过从兆瓦级电推进系统的发展来看，无论是针对快速充电还是电池交换模式，想要运营一个全电动支线机队至少需要30~50MW电力的支持，有必要启动专门的机场充电设备建设和电力扩容改造，充电装置位置应进行优化以减少电缆布置长度和

电能传递损失，高能量密度电池则对机场的消防设备和相关人员技能提出新的要求，当然这些工作在一定程度上可借鉴前期电动汽车行业的经验与成果。进一步来看，如果将电能需求从单纯的电动飞行扩大到整个替代燃料的制备和应用，2050年航空业用电量将达到10000TW·h，占全球电力产能的20%，相当于2021年全球发电量的一半。航空业绿色转型伴随的基础设施建设规模可见一斑，只有在政策和投资到位的情况下才有可能实现。

运营管理

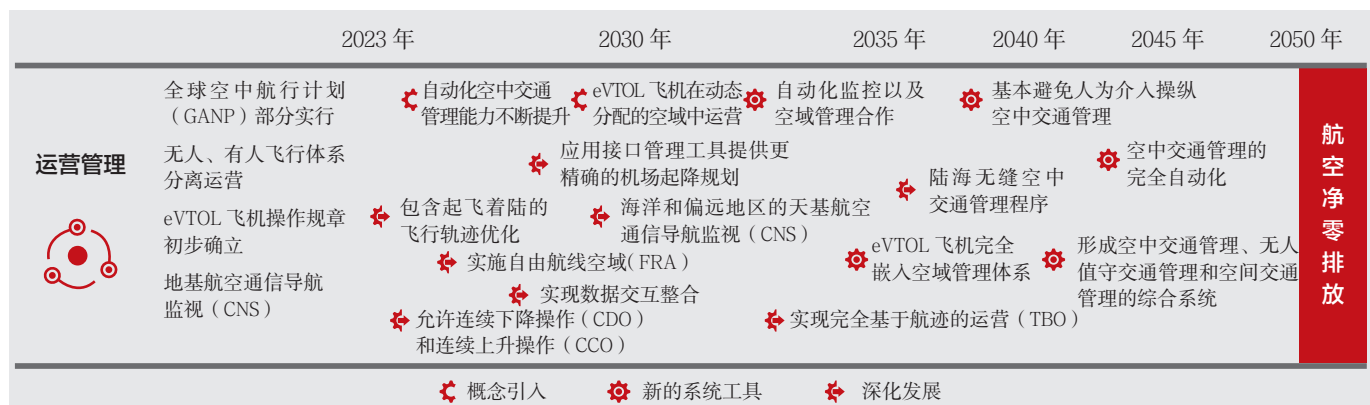
机队规模的扩张使得天空成为一种越来越稀缺的资源，改进现有飞机和发动机的运行方式为提高能效、减少排放创造了新的机会。在政府机构、航空公司、机场和空中导航服务商（ANSP）的通力协作下，自动化、大数据管理和各种新技术融合将是提升空中交通管理水平的关键。通过整合不同国家不同区域的碎片化空域，借助飞机和塔台之间的实时精准数据链通信工具，允许飞机在不同阶段选择最佳飞行剖面、优化飞行轨迹，不再受预先定义的

航线网络约束，并逐渐引导航空运营商之间的信息自由流动，基于人工智能减少人为经验因素干预，增强运营过程的自主决策能力。

可以说“完美飞行”的实现，既是一个与导航、通信和监测有关的技术问题，也涉及多方的组织合作，形成通用的行为边界、监管框架和标准规范。如果到2050年航空运营效率能提升3%，那么对应的碳减排量将达到5000万t。与飞机和发动机技术以及能源基础设施的长周期、高成本、性能或产量跨代跃升相比，跨境空域开放和统一通信标准这些改善市场运营的手段可以在现有的设备、技术和流程上立即独立部署，从而以一种更加循序渐进的方式加强全球航空运营的可兼容性和互操作性，并在2045年左右以高水平的无人自主化为标志，达到未来空中交通管理系统的最终形态。

供资融资

预计到2050年航空业绿色转型所需资金为5.3万亿美元，相当于从2023年开始每年需要1786亿美元的经费支持。虽然看起来似乎高得令人望而却步，但这必须结合行业的



运营管理发展路线图

规模和价值综合考虑。根据波音公司发布的2022年商用航空市场展望(CMO)，未来20年新交付产品市场价值将超过7.2万亿美元，2019年在役机队的80%届时将会被替换。事实上仅在过去10年，航空业在飞机和发动机技术研发上的投资就达到了1万亿美元，而如果跨行业比较的话，2030年前全球每年用于石油与天然气的勘探与开发的资金为5700亿美元，是航空业净零排放花费的3倍以上。因此，航空业可持续发展的投资需求固然巨大但并不过分，进一步应根据投资机会的成熟程度，在不同的阶段形成有针对性的投融资机制。

目前，与航空业净零排放发展相关的绝大部分技术都处在研发的初期，各方面的潜在风险是最高的，所有投入的资金都有损失的可能。这需要政府机构给予特别财政支持和项目引导以确保市场参与者有意愿参与，美国的持续降低能耗、排放和噪声(CLEEN)计划和欧盟的清洁航空(Clean Aviation)计划就是很好的例子。同时，政府机构还应以信用增级、优惠贷款、贷款担保和税收抵免等方式增加市场参与者的融资机会、降低资金获取成本。一旦技术成熟到足以展示有形的商业前景，政府机构的干预将逐渐弱化，市场选择与竞争机制开始形成，股权交易和债券发行将成为主要的融资方式。预计大多数私有资本可能会在2035—2050年进入绿色航空市场，并占据航空业绿色转型投资需求的三分之二。

产业政策

航空业无法依靠自身的力量实现脱

碳发展，能否在2050年前实现净零排放目标很大程度上取决于顶层政策设计与执行情况。只有遵循“促进和保护”的原则和营造公平竞争环境的理念，建立一个可预测的政策框架，涵盖绿色解决方案的各个方面，确保绿色发展带来的现实收益，所有行业参与者才能够坚定地投入人力、物力和财力，尽可能快地将革命性的碳减排技术推向市场。2023—2030年将是产业政策布局的关键时期，届时许多新技术将逐步成熟，许多新燃料将开始认证，许多新市场将初见端倪，相应的目标制定得越清晰，涉及的利益相关者越多，监测监管越密切越有力，跨区域协调越顺畅，那么绿色转型的结果就会越成功。

具体来看，在扫除制度障碍方面，在确保安全性的前提下努力缩短氢动力和电推进系统以及替代燃料的审批认证周期(目前的适航程序需要近10年的时间才能完成)，同时实现技术标准和可持续性标准的统一；在加速研发方面，启动一系列专项计划对氢动力、电推进、SAF和碳清除碳捕获技术及其基础设施解决方案进行大力支持；在组织合作方面，形成全球一致的可持续准则和法律环境，防止多个法规重叠管理、简化处理相同或关联事项的流程，避免不同政策体系之间的套利行为和扭曲竞争，提升资本配置效率；在去市场风险方面，为航空业提供完善的融资路径与运营保障，降低机会成本、提升投资回报，培育绿色航空产业自我循环能力；在激励引导方面，给予那些积极投身航空可持续转型的参与者更多政策倾斜，明确技术研发、产品使用和

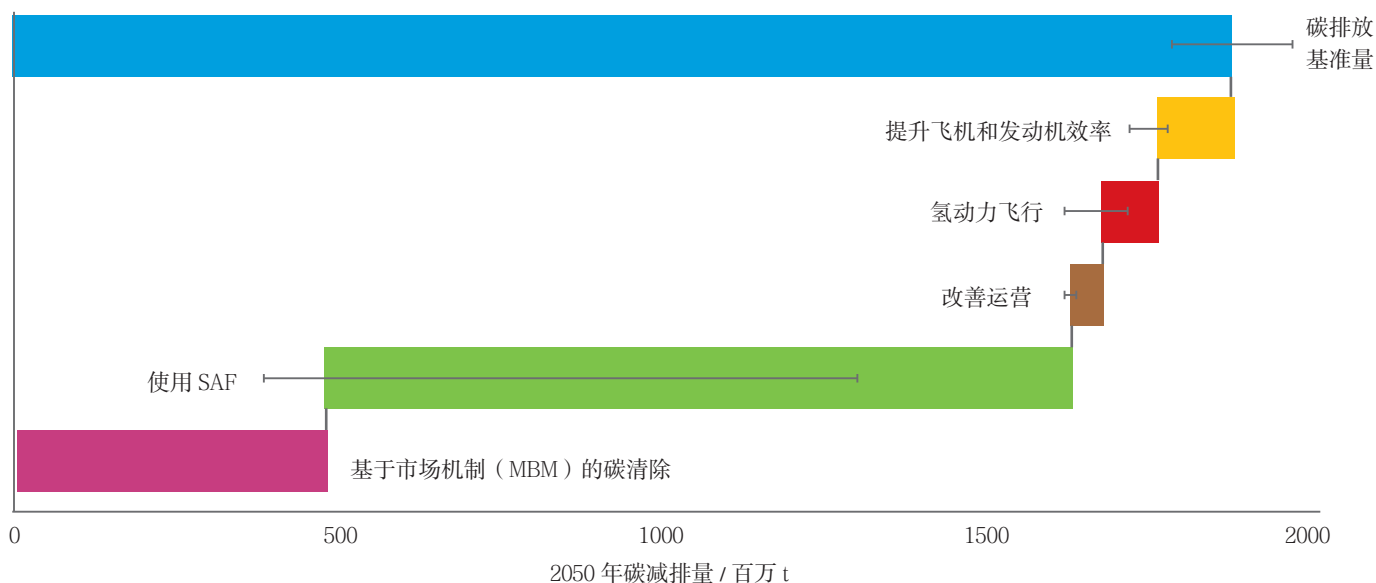
运营升级附带的资金补贴，并确保航空业在绿色电力、绿色氢能和生物原料需求方面与其他行业公平竞争。

路线图评述

在路线图提到的五大关键举措中，技术、基础设施和运营主要瞄向了“需要什么来实现净零排放”的问题，金融和政策则是前三者能够真正发挥作用的依托与保障。根据对模拟场景的定量评估，提升飞行效率、使用氢动力、改善运营效率、使用SAF以及碳捕获碳清除将是降低碳排放量的贡献主体，其中SAF有望产生62%的减排收益，是当前航空绿色转型方案的核心。换言之，如果由于激励措施不到位或生产工艺无法突破导致SAF普及情况低于预期，那么留下的减排份额空白(从62%下降到18%)将很难被填补。当然，即便SAF完全替代了常规航空燃料，对应的减排份额最多只能到78%，残余的碳排放主要依赖碳交易市场机制下的各种碳清除手段解决。随着常规飞机和发动机技术进步以及优化运行带来的能效提升逐渐逼近极限，氢动力飞行正处于快速发展阶段，并展现出了比电动飞行更大的市场应用前景，但在2050年前仍难以接过SAF的“大旗”，成为航空可持续发展的中坚力量。

除了未来航空净零排放发展策略的相关论述外，路线图还有以下几方面的观点值得特别关注。

第一，对所有可能促进航空业绿色转型的技术方向进行广泛布局。航空业净零排放之路存在多种多样的可能，即便是被寄予厚望的SAF，其市场应用最好情况与最差情况对



路线图中各种举措对应的碳减排贡献（黑色实线为不同场景下的浮动区间）

应的减排效果足足相差了4倍。过分专注于短期减排收益会带来很大的技术锁定风险，押注个别技术路径将阻碍竞争并限制其他长效解决方案的发展，某种程度上甚至可以说2050年前航空业可持续发展最大的挑战与任何具体的解决方案无关，而是与实现的速度相关。这意味着路线图有一定的倾向性但不会拘泥于唯一的技术形式，并根据各种技术实际的成熟进程进行灵活的资源调配。

第二，作为为航空业绿色转型保驾护航的“一体两翼”，资金和政策应予以特别的重视。一方面，航空业可持续发展的启动成本和技术风险很高，商业模式尚未经过验证，需要通过外部的资金和政策支持，降低初始阶段的各种不确定性、强化减排带来的经济性效益，逐步带动私有资本进场，加快建立能够平稳运行的市场能力。另一方面，资金和政策手段相辅相成、互为补充，如果没有政策力推，航空市场参与

者吃不到“定心丸”，不论国有还是私有各类投资都不可能落地，而如果没有资金注入，政策中描述的再宏伟的蓝图也只是在说空话，引导和激励效果也会大打折扣。

第三，以全产业链的视角推动各项关键举措融通发展。以SAF的推广应用为例，既需要完成与飞机和发动机兼容性测试验证，又需要不断开发新的制备工艺，实现对更多种类生物质原材料的利用。类似的氢动力飞行则除了产品研发以外，还涉及绿色氢能的制备、液化并运输到机场，机场液氢加注设施建设等配套的方方面面。未来航空净零排放发展不是单纯的技术问题，而是一个全局性的产业问题，既要引入新模式、新产品，又要改进旧模式、旧产品，无论是技术、基础设施还是运营，每一项举措发挥效能都离不开其他举措的协作配合，从而将产业链上游能源商、中游制造商、下游运营商更加密切地联系在一起。

结束语

2023年10月，工信部等四部门联合印发《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》，提出要坚持多技术路线并举，积极探索绿色航空新领域、新赛道，明确了未来不同时期我国绿色航空各个细分市场的发展路径，统筹推进绿色航空制造业创新体系、产业体系、示范应用体系和服务保障体系建设。这对于我国航空业实现碳达峰、碳中和目标具有重要的指引意义，应将《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》和《“十四五”民航绿色发展专项规划》有机结合，强化绿色航空核心技术攻关，推动制造运营一体化产业链建设，构建协同创新应用机制，进一步细化支持政策和配套措施、加大金融扶持力度，打造绿色航空发展新动能，加快培育绿色航空发展新业态。

航空动力

（王翔宇，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）