

航空净零排放发展路径比较

Comparasion Between Aviation Net Zero Transition Pathways

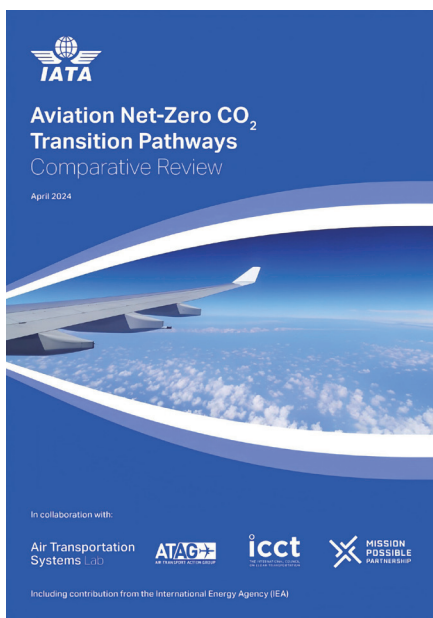
■ 王翔宇 刘英杰 / 中国航空发动机研究院

国际航空运输协会（IATA）通过对多个不同的航空净零排放发展路径进行比较分析，充分展示了多种减排举措组合应用对于航空业绿色转型的重要意义，进一步明确了未来航空业去碳化发展的重点工作方向，有助于推动航空业采取积极行动顺应时代发展趋势，加速航空净零排放愿景的实现。

到2050年实现二氧化碳（CO₂）净零排放是未来航空运输业发展面临的重大挑战之一。为达成这一目标需要采取一系列举措，可能涉及飞机/发动机技术突破、绿色能源保障、运营管理能力提升和面向市场的产业政策支持等多方面。考虑到航空业绿色转型过程的高投入和长期性、技术进步的不确定性，以及地区发展的不平衡性，这些举措在具体的应用实践中必然存在不同的理解、方式和侧重，并不会对应某种单一的普适的发展路径。2024年4月，IATA在相关报告中首次全面回顾了14个有代表性的绿色航空发展路线图，对其中给出的航空净零排放发展途径进行了比较，帮助航空市场参与者更好地了解各个举措的碳减排潜力，以便有针对性地开展工作。

研究对象选择

近年来，航空业围绕净零排放发展所需的方法工具已基本形成共识，但不同组织和机构对于其中的“排列组合”问题，即这些方法工具如何搭配运用、能达成何种效果仍存在一定程度的争议，相应地提出了各自的发展路径。IATA将出现这种



IATA 航空净零排放发展途径比较

情况的原因归纳为3点。一是对未来市场环境存在差异化的假设，不同的经济发展态势、航空运输需求、燃料价格变化以及地缘政治发展判断会对航空业走向的预测产生根本性影响；二是提出净零排放路径的出发点和适用范围不同，有的倾向于航空业内外部的去碳联动，此时碳捕获、碳清除的重要性就会被放大，而有的则更侧重于通过挖掘航空业自身的潜力去降低排放；三是采用了不同的模型架构对市场需求

开展评估，既有自上而下预先确定市场增速、再引入各种减排举措对其修正，也有自下而上直接将减排举措作为额外的自变量对航空需求增长进行建模。

显然如果不对上述差异进行系统分析，航空市场参与者很难掌握各种净零排放路径的特征及其对应的关键行动项。鉴于此，IATA在航空净零排放发展路径的比较研究中重点讨论了其适用对象范围、模型架构、关键假设以及不同举措对应的碳减排贡献，所选取的14个有较大影响力的发展路径除了来自国际组织和政府机构发布的绿色航空战略以外，还包括高水平学术刊物上的研究成果。需要说明的是，为了体现对未来发展预估的严谨性和全面性，很多绿色航空战略往往进行了多场景假设（一般每一个场景都会对应一个不同的发展路径），有的会给出倾向性意见，即指出最有可能出现的场景并展开进一步讨论，也有的只是把这些可能的场景都展示出来由读者自行甄别。

发展路径比较 研究范围

绿色航空战略的研究对象一般

IATA选择的14个航空净零排放发展路径

序号	绿色航空战略	发展路径	发布者	发布时间
1	航空净零排放路线图		IATA	2023年
2	2050年净零排放路线图		国际能源署 (IEA)	2023年
3	全球航空长期理想目标 (LTAG)	场景2: 温和增长	国际民航组织 (ICAO)	2022年
4		场景3: 激进发展		
5	视野2050: 使航空业与《巴黎协定》保持一致		国际清洁交通委员会 (ICCT)	2022年
6	让净零排放成为可能: 1.5°C温升目标下的航空业发展策略	审慎发展场景	使命可行伙伴关系 (MPP)	2022年
7		可再生电力快速发展场景		2022年
8	气候净零影响下的成本与排放方式分析	场景1: 生物燃料+电转液 (PtL) 燃料	《自然气候变化》期刊 (环境科学类顶级刊物)	2022年
9		场景2: 生物燃料+氢燃料		2022年
10	航路点2050	场景1: 推动技术和运营管理提升	航空运输行动小组 (ATAG)	2021年
11		场景2: 积极的替代燃料部署		2021年
12		场景3: 激进的技术能力提升		2021年
13	目标2050: 欧洲航空净零排放发展路线		荷兰航空航天中心 (NLR)、荷兰SEO经济研究所	2021年
14	航空气候行动计划		美国联邦航空局 (FAA)	2021年

是制定航空净零排放路径的最基本出发点, 为使研究更加完备, 可增加对货运市场的讨论, 像MPP发布的路线图甚至囊括了军事应用在内的几乎全部空中活动。在IATA选择的14个发展路径中, 有5个在碳排放之外考虑了非碳影响、有6个考虑了从燃料生产到燃烧反应的全生命周期碳排放, 这确实进一步提升了研究的深度和广度, 但目前对其进行定量评估仍存在较大技术困难。

此外, 还有8个路线图对基于市场机制 (MBM) 的碳清除进行了探讨。作为行业外的普适性去碳活动, 碳捕获/储存 (CCS) 和直接空气捕获 (DAC) 技术的推广应用很可能将是实现航空净零排放愿景的“最后一块拼图”, 这一点在欧盟排放交易计划 (ETS) 和ICAO国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA) 等政策的加持下会更加明显。即使碳清除技术不被算作独立的减排工具, 它也可提供碳源并在基于PtL工艺的可持续航空燃料 (SAF) 的制备中发挥关键作用, 相关论述在几乎所有

不会因存在多个场景假设而发生变化。国际组织的研究对象往往覆盖全球市场, 政府机构则更多面向区域或本国环境开展研究。客运市场

不同发展路径的研究对象比较

序号	路径名称	覆盖区域	航空活动	排放对象	是否为全生命周期	是否考虑碳清除
1	IATA 航空净零排放路线图	全球	客运	仅CO ₂	否	是
2	2050年净零排放路线图	全球	客运	仅CO ₂	否	是
3	LTAG 场景2	国际航班	客运/货运、公务机	仅CO ₂	否	否
4	LTAG 场景3					
5	视野2050	全球	客运/货运	仅CO ₂	是	否
6	MPP 审慎场景	全球	客运/货运、通用航空、政府和军事应用	CO ₂ 和非CO ₂	是	是
7	MPP 激进场景					
8	《自然气候变化》场景1	全球	客运/货运	CO ₂ 和非CO ₂	是	否
9	《自然气候变化》场景2					
10	航路点场景1	全球	客运	仅CO ₂	否	是
11	航路点场景2					
12	航路点场景3					
13	目标2050	欧洲	客运	仅CO ₂	否	是
14	航空气候行动计划	美国	客运/货运、通用航空	CO ₂ 和非CO ₂	是	否

路线图中都有所提及。

模型构架

市场需求是航空业绿色发展的最大牵引，其增长情况直接决定了2050年前应减少的碳排放量，是确定预测模型架构的关键。因此，长期以来航空业往往将需求作为模型的输入自变量，此时排放量与市场需求同比例增长，以到2050年仍旧完全采用常规航空燃料时的排放量为基准，通过应用各种工具从这一基准上梯次削减排放直到净零为止。IATA选择的14个发展路径中有10个都采用了这种自上而下的模型架构，可操作性强，易于对各种减排工具的效果进行直观比较。相比之下还有少量发展路径是基于自下而上的思路建模，市场增长率不再是预先确定的值而是在各种减排工具下的输出量，如实施ETS等经济刺

激政策或大范围使用SAF都会导致运营成本上升从而抑制需求的增长。此时发展路径可根据各种环境因素来直接调整对市场的发展预期，碳排放量随着绿色转型对需求的影响以及各种减排工具的不断作用而动态变化。

自下而上的模型架构能够更加真实地反映市场实时态势，但需要引入更多的定量假设，累积的误差在很大程度上抵消了其真实性和完备性优势，相关研究还需进一步完善。目前除了《自然气候变化》上的学术研究论文外，只有IEA在净零排放路线图中采用了这种建模方法，IATA航空净零排放路线图则是部分采用（关闭了对应成本变化的需求响应机制），而严格自下而上建模的结果就是IEA关于旅客周转量（RPK）增速的预测结果是所

有国际组织中最低的，这也是现实中航空业绿色转型所必然承受的代价。特别值得一提的是，现阶段几乎所有的自下而上建模都是借鉴伦敦大学学院（UCL）的基于计量经济学的开源航空集成模型（AIM）进行的，而相似的模型在不同假设（需求增速只是其中的一方面）下产生的结果差异会很大，这既是未来航空市场发展不确定性的体现，也反映出统筹考量多场景、多方案的必要性。

关键假设

除了航空运输需求以外，常规减排技术手段的运用与新能源航空的发展是建立模型时另外两个关键变量，会对2050年的碳排放评估结果产生直接影响。前者主要包括制造商层面的改进飞机/发动机设计和制造技术（即提升技术效率），以及运营商层面的优化空中交通管理（即提升运营效率），后者则与电推进、氢动力和SAF的应用息息相关。考虑到下一代飞机/发动机仍处于研发的初期、常规技术的发展已逼近天花板，且后疫情时代全球经济增长的放缓使得机队更换率普遍较低，绝大部分发展路径都将2050年前常规减排手段对应的年化效率提升设置在1.5%以下（其中技术效率平均每年提高1%左右），显著低于2009—2019年全球航空业2%左右的历史发展水平。

由于SAF可直接用于现役机队、无需对飞机/发动机和机场基础设施进行重大改动，这种又快又省的方案被认为能够产生最大的全生命周期碳减排收益。所有的发展路径都假设到2030年SAF在航空燃料中的份额至少为6%，到2050年SAF将占

不同发展路径的模型构架比较

序号	路径名称	需求建模方法	需求度量	年化增速 (2019—2050年)	2030年需求/万亿	2050年需求/万亿
1	IATA航空净零排放路线图	自下而上	RPK	2.9%	12.71	21.55
2	2050年净零排放路线图	自下而上	RPK	2.1%	10.97	16.55
3	LTAG场景2	自上而下	RPK	3.8% (2018—2050年)	8.10	13.12
4	LTAG场景3					
5	视野2050	自上而下	RPK	2.7%	11.73	19.96
6	MPP审慎场景	自上而下	RPK	2.5%	10.64	19.22
7	MPP激进场景					
8	《自然气候变化》场景1	自下而上	RPK	3.4%	13.10	24.24
9	《自然气候变化》场景2			3.3%		23.26
10	航路点场景1	自上而下	RPK	3.1%	12.39	22.35
11	航路点场景2					
12	航路点场景3					
13	目标2050	自上而下	登机人数	2.0% (2018—2050年)	9亿	14亿
14	航空气候行动计划	自上而下	RPK	3.3%	2.11	2.90

不同发展路径的关键假设比较

序号	路径名称	技术效率年化提升	运营效率年化提升	2030年SAF市场份额	2050年SAF市场份额	2050年电推进/氢动力市场份额
1	IATA航空净零排放路线图	2019—2050年：1.1%	2019—2050年：0.2%	6%	90%	5%
2	2050年净零排放路线图	2019—2050年：2.0%		11%	70%	11%
3	LTAG场景2	2018—2050年：0.9%	2018—2050年：0.3%	13%	72%	—
4	LTAG场景3	2018—2050年：0.2%	2018—2050年：0.4%	21%	98%	2%
5	视野2050	2019—034年：1.1% 2035—2050年：2.2%	2019—2050年：0.6%	15%	79%	21%
6	MPP审慎场景	2019—2030年：1.5%	2030—2050年：2.0%	13%	86%	15%
7	MPP激进场景	2019—2030年：1.5%	2030—2050年：2.0%	15%	66%	34%
8	《自然气候变化》场景1	—	—	10%	100%	—
9	《自然气候变化》场景2			10%	47%	53%
10	航路点场景1	2019—2050年：1.1%	2019—2050年：0.2%	—	90%	—
11	航路点场景2	2019—2050年：1.1%	2019—2050年：0.1%	—	90%	—
12	航路点场景3	2019—2050年：1.1%	2019—2050年：0.1%	—	90%	10%
13	目标2050	2018—2050年：1.2%	2018—2050年：0.3%	6%	66%	21%
14	航空气候行动计划	2019—2030年：1.1%	2019—2030年：0.4%	10%	88%	—

据航空能源总需求的65% ~ 100%，其在全球航空能源中的渗透速度既取决于原料供应和生产成本，也与电推进和氢动力的发展进程密切相关。14个发展路径中有5个认为电推进和氢动力无法在2050年前航空业绿色转型过程中发挥重大作用、未对其进行显式定量评估，另外9个给出的2050年电推进和氢动力的市场份额均值为20%左右，不过不同发展路径之间的偏差很大。如在《自然气候变化》设想的强力发展氢动力的场景中甚至达到了53%，而ICAO的LTAG场景3在应用新能源方面虽然较场景2更加激进，但也只有2%。

减排贡献

各个发展路径对于常规的飞机/发动机效率提升所产生的减排预期较为稳定，在航空业碳减排量“大盘子”中的占比约为20%。注意到美

国航空气候行动计划中偏高的结论（29%）是由于技术效率提升，包括了现有成长期机型不断替换老旧产品（如未来用最新的A320neo替换所有的A320机型），而ICAO在LTAG场景2中则将这种以新换旧设定为原本就会出现基准情形，因此给出了偏低的减排占比结论（7%）。提升运营效率产生的碳减排收益占比通常低于10%，ICCT在其发展路径中假设到2050年航空运输的运载率达到90%以推动运营效率实现0.6%的年化增长，相应地使得其最终碳减排份额突破了15%。

大多数发展路径都假设到2050年前SAF在航空燃料中具有主导地位，因此自然而然其贡献了最高的减排份额，为24% ~ 70%不等，平均值为53%。基于PtL工艺制备的SAF消除了生物质原料的可用性限制，相比生物燃料可能会在航空

业绿色转型过程中发挥更大作用。ICAO在LTAG的场景2中假设PtL技术部署较慢，生物燃料之外高达28%的市场空缺将依赖低碳化石燃料（LCAF）填补，但对应的碳减排贡献只有2%。电推进和氢动力在10个发展路径中处于次要地位，需要建立导向极为鲜明的假设以提升其市场份额才能进一步展现减排作用。欧洲目标2050发展路线主要关注区域内部市场、航班飞行距离一般小于2000km，在一定程度上避免了氢动力大型化应用的技术难题，成为了重视氢动力发展的代表性方案。

关注常规减排技术手段的运用与新能源航空发展的同时，碳清除以及由于绿色转型所导致的航空市场需求下降同样被纳入碳减排实施效果的定量评估中。在考虑碳清除活动影响的发展路径中，IATA的净零排放路线图认为其对应的减排份

额达到20%，而其他的都在10%以下。ICAO给出的2个发展路径中分别有32%和13%的碳剩余，这可能需要在CORSIA框架下引入外部力量实现中和，即购买其他行业减排项目产生的碳信用额来抵消任何超过2019年的排放量。航空需求下降对应碳减排贡献通常低于10%，其中最大的可能性在于SAF过高的成本使得航空旅行票价上涨，而IEA的2050年净零排放路线图甚至将需求管理的作用放大到了20%。

分析与思考

整体来看，IATA关于航空净零排放发展路径的比较既是对绿色航空发展战略研究方法论的归纳总结，又是对不同发展路线之间关键异同的集中展示。对于前者而言，面向客运需求、飞行过程中的CO₂排放是绿色航空转型关注的最基本内容，更系统、更丰富的研究工作还应考虑到其他细分市场以及全生命周期CO₂和非CO₂排放影响等内容，并评估跨行业碳清除活动的可行性；自下而上的模型架构在理论完备性上展现出一定的优势，近些年开始在一些具有较大影响力的发展路线图中得到应用，是未来绿色航空市场建模的重点发展方向；飞机/发动机技术效率提升、机队运营管理效率提升，以及电推进、氢动力和SAF的应用情况是实现净零排放的关键举措和模型应用的前置输入，不同的假设会对最终的发展路径选择产生决定影响。对于后者而言，特定减排举措的重要程度显然有所差别，航空去碳化发展也不应由某一类市场参与者或业务域独自承担，多种举措的组合应用将是航空业绿色转

型的根本原则，具体来看主要包括以下几方面。

第一，所有的发展路径均认为SAF将是2050年前最重要的碳减排手段，但具体的减排贡献存在较大波动，这也表明SAF在政府支持、投资水平、生产成本、利润潜力和原材料供给等方面还存在较大不确定性。

第二，各个发展路径针对技术效率和运营效率的提升所发挥的碳减排作用具有较为一致的观点，二者的减排份额约为2:1，在航空业净零排放发展中合计可贡献30%左右的减排量。

第三，不同的发展路径对于电推进和氢动力的发展持有很大争议，关于其大规模市场应用的时间表仍莫衷一是。这与是否采取强有力的支持政策，以及可再生能源价格能否迅速下降、电气化技术能否取得跨越式进步密切相关。

第四，大部分发展路径都倾向于航空业需要利用行业外碳清除的帮助从而彻底解决2050年的残余排放问题，同时捕获的CO₂也将是释放PtL工艺产能、推动SAF应用的关键，航空业应高度重视碳清除相关技术的发展。

此外，针对IATA的净零排放发展路径比较工作还有3点需要说明。一是IATA并没有说明为什么选择了这14个发展路径进行比较，如英国政府于2022年发布的航空零排放战略（Jet Zero）中涉及的多个场景并未被纳入分析，即使是IATA自身的航空净零排放路线图事实上也包括10个场景假设，但最终选择的是默认的场景2，至于原因尚不清楚。二是IATA回避了不同发展路径影响力

权重的问题，显然有的发展路径为行业内外部所熟知，有的更倾向于学术层面的探讨，有的更是代表了政府层面的倾向性指导意见，在同一个维度对其进行比较的合理性似乎有待商榷。三是很多绿色航空战略设想了多个发展场景，但为了体现场景之间的差异性往往将情形假设极端化，某种减排手段效果过于突出，押宝式的绿色转型也与当前航空业多措并举、稳健发展的态势相违背，从IATA的对比研究结果来看，这些研究场景实际能带来的参考价值可能较为有限。

结束语

过去的几年，各个国际组织、研究机构和政府部门提出了多种净零排放发展路径，这固然体现了对航空业绿色转型的决心、思考与布局，但五花八门的分析结论也容易让航空市场参与者感到无所适从。通过对这些侧重点各异的发展路径进行比较，可以发现很多趋势性的判断已经逐渐收敛，而那些基于不同假设所产生的路径分歧，短时间内也难以形成理论上的统一，只有在航空业净零排放的实践过程中才能得以验证并迭代完善。从某种意义上来说，在现阶段认知下关于绿色航空战略与路径的研究已经足够充分，当务之急是各方如何尽快将共识转化成行动，用发展路径去指引相关工作的开展、在工作开展中不断总结经验修正路径，朝着2050年实现航空净零排放愿景不断迈进。 **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）