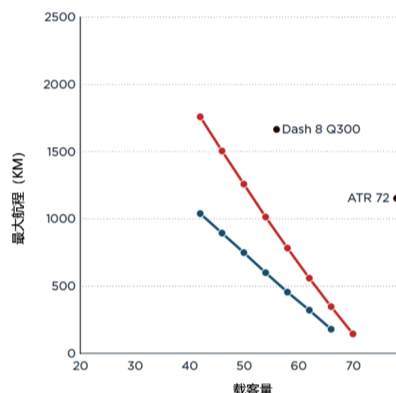


ATR-72改装氢动力分析报告

用氢燃料电池为飞机提供动力是一种潜在的航空零排放解决方案。虽然燃料电池还不能产生足够的动力来驱动窄体干线飞机，但它们已经可以为支线涡桨飞机提供足够的动力。2023年8月2日，国际清洁交通理事会（ICCT）发布了一篇氢能航空分析报告，该报告模拟了一架改进型的ATR-72涡桨支线飞机，采用氢燃料电池动力系统，并考虑了液氢和压缩气氢两种燃料存储方案。报告使用了400千米和700千米的飞行（大约是从纽约到华盛顿特区的距离）来模拟ATR-72的任务。在此类航线上，一架燃料电池飞机的能源和碳排放强度较低，燃料成本稍高，并且每年可减少2500吨温室气体排放。

介绍

储氢罐的尺寸要求其必须可安置在机身内部（减少载客量）。每一排拆掉的座位都被替换成两个垂直叠放的圆柱形储氢罐。携带更多的氢燃料可以增加飞机的最大航程，但会减少飞机的载客量。该研究模拟了42座到70座的不同改装方案，下图展示了载客量、最大航程和能量强度之间的平衡关系，比较了ATR-72和Dash-8 Q300两个飞机平台。虽然燃料电池改装飞机的有效载荷和航程无法与化石燃料飞机相比，但它们更加节能，单位乘客千米所需的能量更少（能量强度，MJ/ASK）。另外，使用液氢代替压缩气氢可以增加飞机的航程，但会降低能量强度。



燃料电池改装飞机的最大航程(左)和能量强度(右)。

将飞机的有效载荷与航程和2019年正在运营的涡桨支线飞机航线进行比较，可以看出50座的压缩气氢飞机和58座的液氢飞机分别可以覆盖14%和16%的涡桨支线飞机运力（乘客千米，ASK），约占商用航空全球总运力的0.1%。虽然它们不能搭载ATR-72所能搭载的全部78名乘客，但这两种氢动力飞机的航程已经超过了2019年ATR-72执飞航线的90%。该研究使用400千米和700千米的飞行来模拟ATR-72的真实使用情况，这分别是纽约到华盛顿和柏林到布鲁塞尔的距离。这两条航线分别代表了ATR-72所有航线的中位数距离和包括90%航班的距离。

假设一架ATR-72每年300天每天运行4次400千米的航班，并使用燃料电池推进和绿色氢燃料，每年可减少2500吨温室气体排放，其中包括了制造燃料电池的碳排放。

该研究量化了使用气氢和液氢的ATR-72的碳排放和成本，以及使用航空煤油（JET-A）和合成燃料的ATR-72的碳排放和成本。该研究还包括了生产燃料电池和储氢装置的全生命周期排放和成本。使用绿色液氢的燃料电池飞机与常规燃料飞机相比碳排放降低了88%，与合成燃料相比碳排放降低35%。

虽然在大多数情况下，绿氢可能比航空煤油更昂贵，但燃料电池推进系统效率的提高将使2030年美国使用氢燃料的溢价降29%~40%，并使2050年美国绿氢燃料的使用成本比化石燃料更低。欧洲的氢燃料生产成本将更高，2030年使用绿氢的溢价将在100%左右，到2050年将降至50%。在所有情况下，绿氢都比合成燃料便宜。

综上所述，采用储氢罐和燃料电池推进的涡桨支线飞机更节能，碳排放更少，但燃料成本更高，有效载荷和航程更低。

飞机平台

ATR-72是该研究的参考飞机。ATR-72承担了39%的涡桨飞机运力，虽然这架飞机可以搭载78名乘客飞行1370千米，但2019年最常见的乘客容量是70人，90%的航线都在700千米以下。

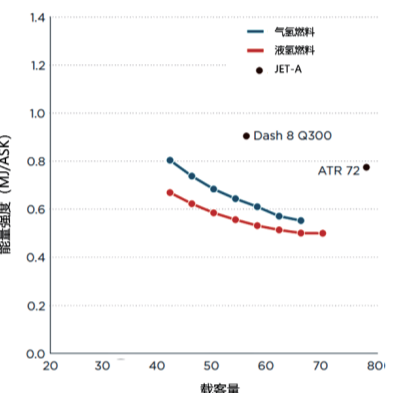
燃料电池的改装必然会降低飞机的载客量，因为氢必须储存在机身中。该研究同时包括了Dash-8 Q300的性能，根据该研究的建模，Dash-8 Q300可以搭载56名乘客飞行1650千米。由于欧盟航空安全局(EASA)正在考虑修改相关规定，该研究中液氢燃料飞机的性能数据与之前的分析不同，储备要求更小（仅有5分钟的闲置时间，而不是之前分析中的45分钟闲置时间）。

任务仿真

飞机气动分析和任务仿真将使用SUAVE进行，这是一个用于概念机设计和优化的开源仿真软件。SUAVE可以模拟氢燃料电池飞机。在各种任务中，将燃料电池改进型飞机的性能与原来的飞机进行比较。然后将这些飞机在400千米和700千米航程的任务中进行比较，这些任务代表了现实世界的大多数使用情况。2019年，ATR-72在全球航班的中位数距离为364千米，90%的飞行距离都小于700千米。

燃料分析

该研究比较了在燃料电池飞机上使用绿色液氢和气氢燃料的成本和碳



燃料电池改装飞机的最大航程(左)和能量强度(右)。

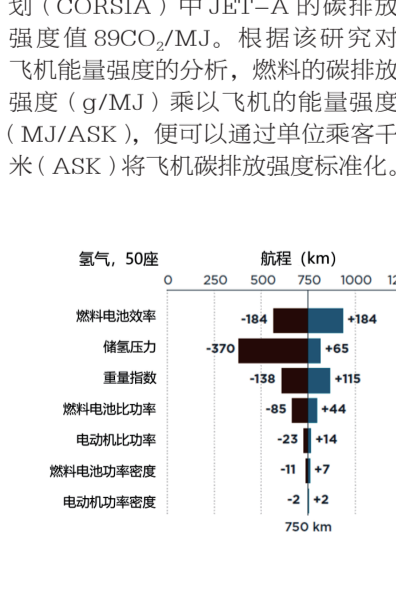
排放，与航空煤油和合成燃料作了对比。JET-A是主流的商用航空煤油，合成燃料是一种航空煤油的替代品。一般来说，合成燃料在全生命周期内的碳排放量比JET-A低。绿氢是指使用100%的可再生能源进行电解水生产的氢燃料。合成燃料和绿氢都需要使用额外的可再生能源生产，以尽量减少其碳排放。可再生能源发电过程不排放碳（例如当太阳能或风能发电）。

碳排放强度

碳排放强度计算使用甲烷和一氧化二氮在过去100年的全球变暖影响值将其转换为二氧化碳单位。该研究没有估计NOx、黑碳、水蒸气或尾迹/卷云等短期气候污染物对气候变暖的影响。但考虑了燃料的全生命周期影响，包括基础设施建设、储能或燃料电池装置生产相关的碳排放。

该研究使用了联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的风能和太阳能发电碳排放数据作为可再生能源的碳排放依据，碳排放强度为29g CO₂/kWh，该值包括与能源生产设施（即风力涡轮机和光伏电站）的建设和安装相关的排放。可再生能源的碳排放强度，以及生产每种燃料的能量转换效率，可用于计算液氢、气氢和合成燃料的碳排放强度。生产气氢的效率为70%，将气氢压缩到700 Bar所需的能量为6kWh/kg，则气氢的能量转换效率为62%。液化需要12kWh/kg，则液氢的能量转换效率为56%。气氢也是合成燃料生产的一种原料，或者使用碳捕捉、费托合成等其他工艺。合成燃料生产的整体能源效率从46%到51%不等，该研究使用51%作为能源效率。可再生能源的碳强度除以各种燃料的能量转换效率来计算每种燃料的碳强度。该研究采用国际航空碳抵消和减排计划(CORSIA)中JET-A的碳排放强度值89CO₂/MJ。根据该研究对飞机能量强度的分析，燃料的碳排放强度(g/MJ)乘以飞机的能量强度(MJ/ASK)，便可以通过单位乘客千米(ASK)将飞机碳排放强度标准化。

该研究使用了联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的风能和太阳能发电碳排放数据作为可再生能源的碳排放依据，碳排放强度为29g CO₂/kWh，该值包括与能源生产设施（即风力涡轮机和光伏电站）的建设和安装相关的排放。可再生能源的碳排放强度，以及生产每种燃料的能量转换效率，可用于计算液氢、气氢和合成燃料的碳排放强度。生产气氢的效率为70%，将气氢压缩到700 Bar所需的能量为6kWh/kg，则气氢的能量转换效率为62%。液化需要12kWh/kg，则液氢的能量转换效率为56%。气氢也是合成燃料生产的一种原料，或者使用碳捕捉、费托合成等其他工艺。合成燃料生产的整体能源效率从46%到51%不等，该研究使用51%作为能源效率。可再生能源的碳强度除以各种燃料的能量转换效率来计算每种燃料的碳强度。该研究采用国际航空碳抵消和减排计划(CORSIA)中JET-A的碳排放强度值89CO₂/MJ。根据该研究对飞机能量强度的分析，燃料的碳排放强度(g/MJ)乘以飞机的能量强度(MJ/ASK)，便可以通过单位乘客千米(ASK)将飞机碳排放强度标准化。



燃料成本

对于燃料价格分析，该研究分析了美国和欧盟(EU)在2030年和2050年的预期成本，这两个地区可能是氢燃料电池飞机的早期市场。到2030年，燃料电池飞机可能会投入商业使用。

绿氢的使用成本分为三个部分：1. 制氢成本；2. 液化或压缩氢气成本；3. 加氢站成本。该研究将氢燃料的成本与JET-A航空煤油和合成燃料的成本进行了对比。由于市场波动很难预测航空煤油的未来价格，根据国际航空运输协会IATA 2023年航空燃料价格监测，JET-A在2022年12月的价格高于美国能源情报署在2030年和2050年的预测价格。该研究使用IATA 2022年12月的价格。合成燃料的成本取自之前的ICCT研究报告。由于JET-A和合成燃料具有不同于气氢的比能量和能量密度，因此成本必须通过能量而不是质量或体积进行归一化。

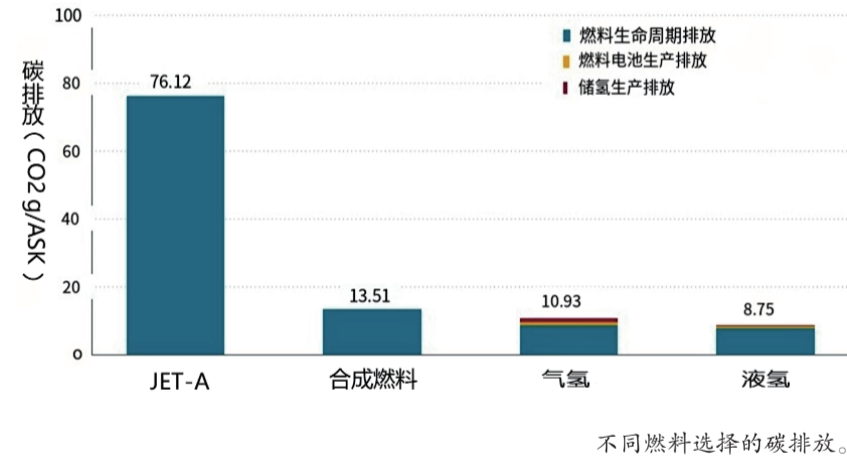
在所有情况下，JET-A是最便宜的，其次是绿色气氢和绿色液氢，合成燃料一般是最昂贵的选择。预计在2030-2050年期间，所有非化石燃料的价格都将下降。一旦飞机性能被量化，燃料价格(\$/MJ)乘以飞机的能量强度(MJ/ASK)，便可以通过单位乘客千米(ASK)将燃料成本标准化。

分析结果

本节介绍该研究的主要结果。除敏感性分析外，所有结果都是使用前面介绍的参数的中间值生成的。首先，该研究确定了搭载不同数量氢燃料和乘客飞机的最大航程和运输效率，将有效载荷和航程分析结果与2019年的涡桨支线飞机航班进行比较，以确定碳排放最小的氢燃料—乘客配置。然后，将使用气氢和液氢为燃料电池飞机提供动力的碳排放强度和成本与使用JET-A航空煤油和合成燃料的原始ATR-72飞机进行了比较。最后，该研究评估了燃料电池改装飞机对各种参数的敏感性。

航程与载荷分析
增加燃料电池飞机的座位容量会降低最大航程，同时降低飞机的能量强度，收益也会递减。

燃料电池飞机的能耗会更低，因



不同燃料选择的碳排放。

为与电动机配对的燃料电池可以比涡轮螺旋桨发动机更有效地转换能量。涡轮螺旋桨发动机的热力学效率通常在25%~35%之间，而燃料电池飞机可以实现44%的能量转换效率。对于基本相同的有效载荷，燃料电池飞机预计会比化石燃料飞机更有效率，但航程会少一些。下表给出了每种情景下以及使用两种氢燃料时，燃料电池飞机可以覆盖的现有涡桨支线飞机航线份额，包括运力和航线航程。

性能分析
在确定了燃料电池飞机的载荷—储氢配置后，改装后飞机的性能可以直接与原始ATR-72进行比较。该研究使用了气氢和液氢燃料飞机的最佳配置（分别为50座型和58座型），同时包括了在以前的研究中建模的液氢涡轮螺旋桨飞机的性能比较。下表给出了不同飞机的最大航程模拟结果。如前所述，燃料电池改装飞机的有效载荷和航程更低，但也更加节能。

燃料分析
ATR-72在每年300天内每天执行4次400千米飞行（两次往返），航班满载78名乘客，相当于每年3740万ASK的运力。在碳排



放强度为76.1g CO₂/ASK的情况下，ATR-72在一年运行中将排放2850吨二氧化碳。而同样运量下的氢燃料电池飞机将只排放325-362吨的二氧化碳，碳排放减少了88%。

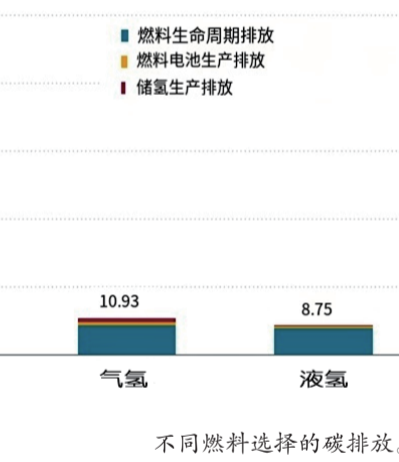
不同飞机的碳排放强度为了比较燃料成本，该研究考虑了美国和欧洲两个地区，以及2030年和2050年这个节点。由于燃料电池和储氢装置在飞机的使用寿命内必须多次更换，因此将燃料电池和储氢装置的成本纳入成本分析。氢燃料电池飞机的更高运输效率缩小了与JET-A航空煤油的价格差距，使氢燃料可以在2050年成为美国的更便宜选择。在单位乘客千米(ASK)的基础上，液氢将比气氢燃料更便宜，因为液氢飞机的高效率将补偿生产液氢的高成本。合成燃料将是最昂贵的选择，根据年份和地区的不同，比氢燃料贵30%~50%。

敏感性分析
对氢燃料电池飞机的模型进行敏感性分析可以深入了解各项参数对飞机性能的影响程度。使用气氢燃料搭载50名乘客和使用液氢燃料搭载58名乘客的这两种飞机来说，燃料电池效率对飞机性能的影响最大，效率变化18%，航程变化近25%。对于气氢燃料飞机，考虑到可携带的氢气量的变化，存储压力将显著影响航程。氢气储存在300Bar(30Mpa)，将比700Bar的航程减少近一半。由于研究的GI值较低，燃料储存系统的重量指数在氢气情况下比液氢情况下具有更大的影响。燃料电池比功率会适度影响两架飞机的性能，电动机参数和燃料电池功率密度对两架飞机的航程影响较小。

除了表明哪些参数可以更好地预测飞行性能外，这种敏感性分析还可以作为优先改进哪些参数的参考。燃料电池效率的提高将对飞机航程产生巨大的影响，相比之下，提高燃料电池或电动机的功率密度对航程几乎没有影响。

结论

该报告分析了改装一架装有氢燃料电池推进系统的ATR-72飞机的性能，并与原始飞机性能进行了比较。量化了JET-A航空煤油、合成燃料、气氢燃料和液氢燃料为飞机加油的碳排放强度和成本。最后，对建模参数



不同燃料选择的碳排放。

进行了敏感性分析。这一分析得出了6个关键结论如下：

- 使用氢燃料电池改造ATR-72等涡桨支线飞机可以更加节能；
 - 使用绿氢为氢燃料电池飞机提供动力将减少90%的温室气体排放量；
 - 氢燃料电池推进系统效率的不断将提高将持续降低绿氢燃料的使用成本
 - 使用液氢作为燃料将增加氢燃料电池飞机的有效载荷和航程；
 - 氢燃料电池飞机可满足15%到20%的涡桨支线飞机市场需求；
 - 提高氢燃料电池效率是提高飞机性能的最有效方法；
- 作为市场先行者，燃料电池改装飞机可以帮助机场发展氢能基础设施，提供一个初步的试验台，为发展更大、更清洁的氢能飞机做准备，从而使航空产业实现进一步的脱碳。但由于燃料电池技术的现状和绿氢的高价格阻碍了它们的大规模应用，因此需要更大的政策支持力度。

(纪宇哈)



我国eVTOL市场离商业化运营还有多远？

丨丁一璠

3月5日，李强总理作政府工作报告时提到，今年将加快发展新质生产力，“积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”。这也是国务院政府工作报告中首次写入“低空经济”。而eVTOL所飞行的低空区域，被视为一个新的万亿规模量级跃变的产业空间。

近年来，eVTOL一直被资本圈、政府关注和熟悉。eVTOL的概念是什么？据公开资料显示，eVTOL是指能够垂直起降的电动航空器，它结合了直升机的垂直起降能力和固定翼飞机的长距离飞行效率，被视为解决城市交通拥堵的一项创新技术。eVTOL最显著的优点包括低噪音、零排放、高效率 and 灵活性。这些特性使得eVTOL特别适合用于城市和城市际之间的快速交通，能够在有限的空间内进行起降，极大地提高了城市交通的便捷性和可达性。

据悉，目前国内已有多家不同背景的厂商进入eVTOL行业。2023年以来，据数据显示，一级市场共有8家eVTOL企业获融资，其中，沃兰特航空、零重力飞行工业在上半年内获得两轮融资。

2月27日，全球首条跨海跨城际eVTOL航线的公开首次演示飞行，由峰飞航空科技自主研发的5座eVTOL载人航空器盛世龙，从深圳蛇口邮轮母港起飞，跨越珠江入海海湾，飞往珠海九洲港码头，将单程2.5到3小时的地面车程缩短至20分钟。本次试飞为融合空域管理的鲜活案例，也是中国民航业在电动航空领域有望领先世界的重要一步。

适航认证被认为是eVTOL商业化的前提。据了解，目前国内市场中亿航智能自主研发的EH216-S无人驾驶载人航空器系统，于2023年10月获得中国民用航空局正式颁发型号合格证，被视为行业的重要事件。预计这款无人驾驶载人航空器系统将在2024年旅游观光场景开启商业运营，而沃飞长空2023年12月取得G1，沃兰特、时的科技也有望在2024Q1通过G1阶段。

但是国内eVTOL行业仍处于发展初期，头部产品处于市场测试及适航取证阶段，目前拿的是型号合格证，后续还有两个证要拿，包括PC和AC。PC代表监管机构认可飞机制造商的质量和管理体系，可以将航空器投入批量生产。AC代表适航当局对每架飞机制造符合性的批准，该证是在飞机生产完成后，正式交付给客户之前，由客户申请的一种适航证件。

按照技术路线划分，eVTOL主要分为多旋翼型、复合翼和矢量推进型（倾转旋翼、倾转机翼）等。其在飞行速度、载荷和技术实现上都存在差异。其中，亿航智能、小鹏汇天等企业以多旋翼技术为主，沃兰特主攻复合翼技术，而时的科技、沃飞长空则是倾转翼的代表企业。此外，零重力飞行工业三代技术路线都有涉及。目前海外优质的eVTOL企业包括Joby、Archer、Vertical Aerospace、Wisk、Bell都是倾转旋翼构型。

甬兴证券研报显示，eVTOL开发需要结合空气动力学、飞行力学、结构力学、仿生学、材料学、计算机、控制理论等多门学科知识。从技术角度来看，多旋翼的巡航速度大概在70-120千米/时，相对飞行时间也比较短，一般航时不超过30分钟，航程不超过50千米，由于设计局限，多旋翼型续航短、飞行速度慢仍是痛点。而复合翼型具备更大的航程和较高的时速，可以达到150-200千米/时，相对适合中长途运输。但由于垂直升降系统和巡航系统分开，会产生重量冗余和额外阻力。倾转翼相比前两种机型而言，在行程和性能上面都有很大的提升，速度大概是前者几倍水平。倾转旋翼构型路线能够实现航程、载荷和速度的最优化。如国内

零重力公司相关负责人介绍，作为国内唯一突破全倾转和变总距控制技术的机型，旗下的产品ZG-T6倾转旋翼eVTOL具有长航程、高航速等优势，航程为300千米，航时为90分钟，为城市、城际等中长途交通提供智慧出行解决方案。另外在价格对比方面，市面上多旋翼机型现在价格基本上都是200万元左右，倾转翼机型的价格可能会达到800万元左右。

有业内人士认为，目前国内行业市场生存环境方面，各家做的产品技术各具特色，现在主要就是PK看哪家能够在未来先飞起来、先取证、先商业化运营。

不过业内公认进入商业应用阶段还需要攻克很多难题，比如：产品实际运行的安全性，可靠性；运行空域的申请，包括起降场所等；以及eVTOL最适配的应用场景等。

在政府政策层面，低空经济、商业航天等被列为若干战略性新兴产业。据公开资料显示，2023年以来，累计有十余个省份将“低空经济”“eVTOL”等相关内容写入了政府工作报告。2023年，广东、安徽、江西、海南等地先后举办了低空经济相关的飞行论坛、研讨会等。其中，深圳市于2023年首次将“低空经济”概念写入政府工作报告，并制定全国首部低空经济产业发展法规，打造全国首张1.4GHz低空经济通信专网。2023年12月26日，深圳宝安启用全国首个无人驾驶载人航空器城市空中交通运营中心，该中心将与亿航智能、鹏城之翼合作开通全国首条eVTOL短途观光航线。2023年12月28日，深圳市7部门联合印发《深圳市支持低空经济高质量发展的若干措施》。其中提到，加快推动载人eVTOL等低空航空器产业化。对获得中国民航局颁发的eVTOL航空器和无人驾驶航空器型号合格证和生产许可证并在本市经营的低空经济企业给予奖励，其中eVTOL航空器1500万元，大型无人驾驶航空器500万元，中型无人驾驶航空器300万元。每个企业每年资助不超过3000万元，同一型号仅奖励一次。2023年12月28日，合肥市政府发布《合肥市低空经济发展行动计划（2023-2025）》。其提出，计划在2024年基本建成骆岗低空融合飞行试验片区，2025年基本建成具有国际影响力的“低空之城”。

据合肥市人民政府官方发布，目前合肥低空经济已集聚企业60余家。2023年以来，其已亿航智能、时的科技、零重力飞行工业等eVTOL公司达成多项合作。此外，广州开发区、黄埔区也相继为低空经济产业制定了“低空十条”专项扶持政策。

在政策推动下，去年亿航智能在合肥市设立华东区域总部，推动无人驾驶航空器在华东地区的生产、销售、运营，加速城市空中交通的落地。同时合肥市政府计划为亿航智能提供总价值为1亿美元的各项支持，包括协调或促进不少于100架EH216系列无人驾驶航空器的采购订单，以及资金支持。

中信证券研报认为，低空经济发展进入战略机遇期，eVTOL飞行器作为低空经济重要载体之一，是全新增量市场，预计2024年开启示范导入期，未来有望重塑城市和社会效率。

北京商务航空协会副秘书长诸葛溱认为，低空在国内泛指1000米以下空域范围，早在2019年国家及军委就下发过有关低空开放试点工作的文件，之后又有全国三个低空试点区域的工作安排。时至今日，低空开放变成了低空经济，可见其已经由试点逐步变成了推广，而且写入了今年两会的政府工作报告。相信在十四五期间，低空经济将是各地的一个热门话题和工作。例如，很多地方看好热门中的热门eVTOL产品，大搞试点，个人认为此类产品离真正商业化还有一定距离，可以先以载货为先行，将安全性，费效比适当，再试用于城市间的接驳，更加符合经济和市场规律发展。