

# 未来航空可持续发展之路

## The Road to Sustainable Aviation Development in the Future

■ 廖忠权 / 中国航发研究院

航空业的可持续发展已成为全球关注的重要议题，其核心和关键就是节省能源、减少温室气体排放，而碳中和与净零排放是航空可持续发展的路标和抓手。

**据** 预测，全球航空运输将保持平均每15年翻一番的增长态势。如果不采取减排措施，预计到2050年航空运输碳排放将占全球温室气体排放量的10%，成为气候变暖的重要推手。世界各国、国际组织、研究机构和企业等纷纷提出了针对碳中和、净零排放的可持续航空发展解决方案。

### 碳中和与净零排放

1992年，联合国大会通过了《联合国气候变化框架公约》，提出全面控制二氧化碳等温室气体排放。1997年，伦敦未来森林公司提出一项商业策划，其中提到了碳中和（carbon neutral），之后美国和欧洲将碳中和做了进一步的解释：对那些在所有减少或避免排放的努力都穷尽之后仍然存在的排放额进行碳补偿，即指企业、团体或个人测算其在一定时间内的温室气体排放总量，再通过植树造林、节能减排等形式抵消这些排放量，以保证净碳排放量接近于零。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的定义，碳中和是指当一个组织在1年内的二氧化碳排放通过二氧化碳去除技术应用达到平衡，净零排放是指当一个组织



在1年内所有的温室气体（以二氧化碳当量衡量）排放量与温室气体清除量达到平衡。碳中和目标只与二氧化碳有关，而净零排放目标包括所有温室气体。如果一个组织或行业主要释放二氧化碳，碳中和与净零排放几乎没有区别。

碳中和现已成为国际社会的环境管理工具，其实现途径分为碳排放和碳吸收两大类。在排放端，降低二氧化碳等温室气体的排放量，例如，提高工业、电力的能源效率、开发利用可再生能源，减少对传统化石燃料的依赖；在吸收端，针对受经济、技术等因素限制而难以完

全避免的部分碳排放，通过植树造林等方式，增强地球环境碳吸收能力。

2010年5月，英国标准协会（BSI）正式发布了全球第一份碳中和国际标准——PAS 2060，对温室气体排放的量化、还原和补偿做出了具体规定。

### 政策与协议

#### 2030年可持续发展议程

2015年9月，联合国大会第70届会议上，193个会员国通过了《2030年可持续发展议程》，提出了包括“采取紧急行动应对气候变化

及其影响”在内的17项可持续发展目标。《2030年可持续发展议程》于2016年1月1日正式启动，明确将环境作为可持续发展目标之一，这事实上成为了之后各个国家和地区组织制定可持续航空发展政策和措施的纲领性指导文件。

### 巴黎协定

2015年12月12日，近200个国家在巴黎气候变化大会上通过了《巴黎协定》，于2016年11月4日正式生效。该协定为2020年后全球应对气候变化行动做出了安排。《巴黎协定》的长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2℃以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5℃以内。全球将尽快实现温室气体排放达到峰值，21世纪下半叶实现温室气体净零排放。

### 欧洲绿色协议

2019年12月11日，欧盟委员会在布鲁塞尔公布了应对气候变化的纲领性文件《欧洲绿色协议》，提出到2050年欧洲在全球范围内率先实现碳中和，即二氧化碳净排放量降为零。中期目标是到2030年，温室气体排放量与1995年相比将降低55%。2020年3月，欧盟委会公布了《欧洲气候法》草案，这是欧洲历史上第一部旨在应对气候变化、实现温室气体零排放的法律。欧盟委员会主席冯·德莱恩表示，这个草案是本届欧盟委员会欧洲绿色协议各项政策的核心，展现了欧盟在应对气候变化上的决心。

### 中国发布碳中和目标

2007年，中国超越美国，成为世界第一大碳排放国。截至2015年，中国人均碳排放量是世界平均水平的1.1倍。早在2007年，中国就发

布了《中国应对气候变化国家方案》，此后又多次提出降低碳排放目标。2009年，中国提出到2020年，单位国内生产总值（GDP）的二氧化碳排放量比2005年下降40%~45%，2019年11月，生态环境部宣布中国2020“减碳”目标提前1年完成。2015年，中国提出2030“减碳”目标，即单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降60%~65%，二氧化碳排放量将在2030年左右达到峰值并争取尽早达到。2020年9月22日举行的第75届联合国大会一般性辩论上，习近平主席提出：中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

## 发动机制造商可持续航空发展举措

### GE 航空集团

GE航空集团将在2030年前实现设施及运营碳中和的目标。

GE航空集团董事长兼首席执行官拉里·卡尔普表示，为实现2030碳中和目标，GE航空集团将通过包括经营性投资、消除能源浪费以及智能供电等在内的手段直接降低碳排放和能源消耗，涉及工业制造、风

力发电、燃气轮机、航空以及核能等众多领域。

而在航空领域，在现有各型发动机的基础上，GE航空集团认为其已获得美国联邦航空局（FAA）认证的GE9X涡扇发动机，集成了GE航空集团在过去10年中开发的先进技术，将有助于全球的脱碳目标。GE航空集团还在与赛峰集团合作研究开式转子发动机，竞标欧洲“清洁航空”（clean aviation）的研究项目，以促进全球可持续航空的发展。此外，GE航空集团基于其强大的技术基础也在开展电推进系统和其他新概念发动机的研究。

### 普惠公司

根据普惠公司工程高级副总裁吉奥夫·亨特的公开发言显示，对于未来航空可持续发展，普惠公司聚焦三大关键领域：持续提高燃气轮机的效率以降低燃油消耗与碳排放；探索诸如混合电推进以及氢燃料系统等全新技术；更广泛地推动可持续航空燃料（SAF）的应用。吉奥夫·亨特认为：燃气涡轮发动机、直升机发动机和固定翼飞机发动机还远未达到其研发潜力的极限。喷气发动机的热效率自其问世以来已提升了400%，但



GE航空集团降低碳排放的三大途径



这可能仅实现了其理论极限的一半。通过采用全新的架构与更先进的材料，燃气涡轮发动机的效率还会进一步提升。

电推进技术可帮助减少排放。全电推进系统因受制于沉重的电池组，将最有可能应用于如城市空中交通等低载荷与短航程的平台之上。混合电推进概念则能够用于增强并优化燃气涡轮发动机的性能，可应用于中程甚至远程商用飞机之上。氢能推进技术不论是作为无碳燃料供燃气涡轮发动机使用、亦或是作为驱动电动机的燃料电池的组成部分都同样具有潜力。但这些技术都需要时间来发展成熟。

可持续航空燃料在实现减排目标时可发挥核心作用，是实现减排目标的一个“拿来即用”的动力解决方案。虽然可持续航空燃料的供应受到限制并且成本高昂是其被广泛采用的障碍，但目前来自政府与航空业的利益相关方正在大举投资

加大供应。因此，可持续航空燃料应成为一个更具竞争力的解决方案，不仅供给大型商用飞机使用，还应供给较小的支线飞机、公务机与直升机使用。

### 霍尼韦尔公司

对于提高航空业的可持续性，霍尼韦尔董事长兼首席执行官（CEO）杜瑞哲于2020年表示，“公司现有的技术可以达到即使航空飞行增加到2019年的4倍，温室气体排放也只有2019年的一半”。其重点关注的可持续航空相关技术包括发展电推进、优化飞机运营和开发替代燃料等方面。

发展电推进和混合电推进系统，减少燃油消耗和温室气体排放，特别是在飞机起飞、着陆和滑行期间，所有这些阶段通常都发生在人口稠密的城市地区。霍尼韦尔公司还开发了一种混合动力任务分析工具，可以帮助设计者评估涡轮电力系统。2019年霍尼韦尔公司在实验室里将

一种汽车电动机和逆变器与飞行控制器进行集成，旨在为电动飞机制造更轻更省油的涡轮和具有更好功重比的发电机。

霍尼韦尔福吉（Honeywell Forge）公司的云软件分析可以优化飞机的运营和航线，目前每次飞行可节省5%的燃料。此外，霍尼韦尔公司于2020年9月成立了无人机系统（UAS）和城市空中交通（UAM）实验室，以提升市场软硬件技术方面的能力。该实验室类似于概念型城市空中交通飞行器驾驶舱，配备真实硬件，是全球同类实验室中首个可演示真实电传飞控和飞行器航电设备的实验室，用于开发、测试和演示UAS、UAM的领先技术，旨在简化未来飞行器的操作。

开发替代燃料，利用地沟油、藻类和麻疯树等植物性原料（它们与食物资源没有竞争关系）制造绿色燃料。例如，霍尼韦尔公司的技术使炼油厂能够生产绿色航空燃料，可使温室气体排放量减少60% ~ 85%；霍尼韦尔公司还利用再生油生产绿色柴油，从而使公路、铁路和海运的温室气体排放量减少85%。2020年10月，霍尼韦尔公司又收购了燃料电池制造商巴拉德公司的无人系统关键知识产权、库存和设备，包括该公司设计和生产的可为无人机系统供电的储氢质子交换膜燃料电池系统，并聘用了燃料电池专家团队，正式涉足燃料电池开发业务。

### 罗罗公司

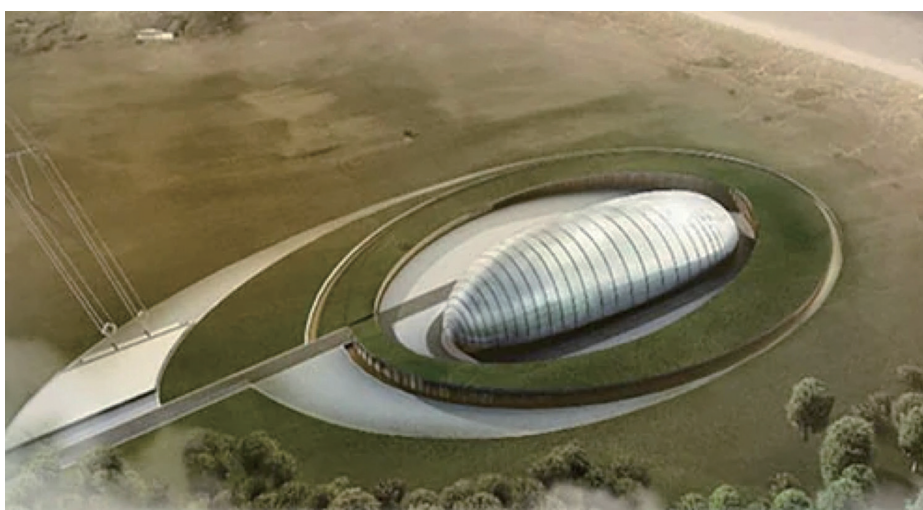
罗罗公司在2020年6月宣布加入联合国零排放行动，公司承诺将在2030年实现自身的净零排放，并做到以下几点：发展业务与《巴黎协定》目标保持一致，将全球温度



霍尼韦尔UAM飞行器驾驶舱（来源：霍尼韦尔公司）



罗罗将与泰克南公司合作开发全电动11座通勤飞机P-Volt（来源：罗罗公司）



罗罗公司构想的小型模块化核反应堆（SMR）

上升限制在1.5℃以下；利用其技术能力在航空、船舶、铁路和发电等领域在2050年实现净零排放方面发挥领导作用；继续并设法加快实现既定的碳减排目标的进度；继续保持在研发上的投资，以寻求更高效的产品和应对气候变化挑战的创新解决方案；发布明确的路线图，为2050年实现零净排放（包括中期里程碑）提供技术途径。

为了协助整个行业在2050年实现净零排放，罗罗公司将重点发展的关键技术包括：提高发动机效率，与燃料行业一起大幅提高低碳替代燃料的利用率；建造小型模块化核电站，可大规模提供清洁的低碳电

力；加速开发具有颠覆性的新技术和能力以开发未来的低排放产品，



赛峰集团开式转子发动机于2017年在法国伊斯特尔进行地面测试（来源：赛峰集团）

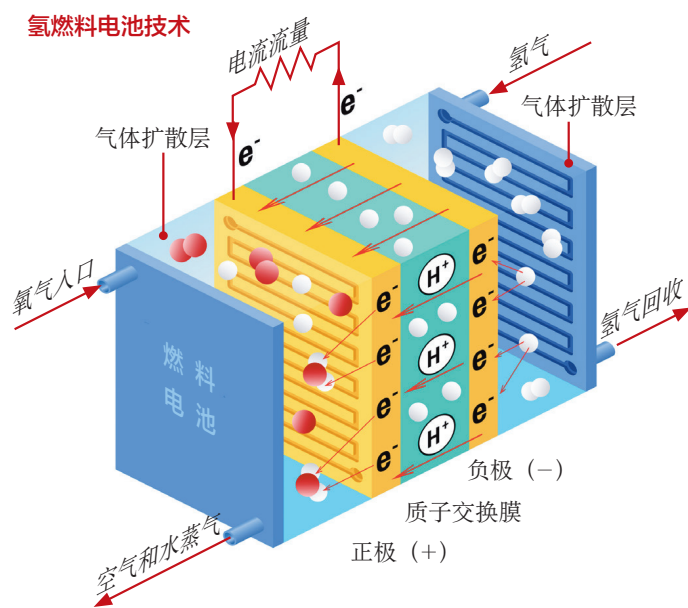
包括开拓飞行电气化领域；继续在铁路和海运市场中部署混合动力系统，并将这些功能转换为航空技术；利用微电网解决方案，提供高稳定性和备用电源；计划到2030年，通过使用100%可再生能源，在高价值金属上率先采用闭环制造技术，并部署先进的微电网，实现运营和设施的温室气体净零排放。

### 赛峰集团

为研发探索面向未来的新一代推进解决方案，赛峰集团正在研究超高涵道比发动机（UHBR），该发动机属于传统涡扇发动机构型，但涵道比更高，达到或超过15：1。风扇模块的主要部件使用更轻、更坚固的复合材料。在此种类型的构型中，低压涡轮通过使用先进的3D航空设计和陶瓷基复合材料进行了优化。UHBR可将油耗降低5%~10%，并且可以轻松集成到目前的飞机上，这是赛峰集团面向2025年的动力解决方案。

赛峰集团正在研究开式转子发动机，即桨扇发动机，这是赛峰集团研究和技术的战略重心，也





MTU公司关注氢燃料电池技术（来源：MTU公司）

是赛峰集团面向2030年的动力解决方案。赛峰集团坚持认为，开式转子发动机是“迄今已知的唯一一种具有两位数的燃油减少潜力，同时仍能满足未来社区噪声标准的发动机构型。”赛峰集团还在研究面向2040—2050年的未来航空动力概念，如分布式推进、混合动力推进和边界层吸入。和罗罗公司一样，赛峰集团也致力于研发可持续替代燃料，以及发动机与替代燃料的兼容。

除了在动力系统开展各种探索研究，在非动力系统领域，赛峰集团也在拓展近几十年已经开始的工作，用更紧凑、可靠和灵活的电动装置取代传统的液压和气动系统，既是顺应航空电气化的发展潮流，也是公司可持续航空发展的战略布局。

### MTU公司

MTU公司对自己的定位是着眼于确保在未来天空中取得进一步进展的所有可能性。公司对航空未来可持续发展的战略措施主要包括以下几个方面：继续发展燃气涡轮发动机；研

发下一代发动机的创新技术、2050年及以后的革命性技术；关注可持续航空燃料，特别是氢燃料。

MTU公司坚持认为，作为一个概念，燃气涡轮发动机将继续在较长时期内占据主导地位。未来燃气涡轮发动机在飞机上主要有两种可能应用：一种是作为效率提升的、更绿色环保的主发动机；另一种是作为低排放混合电推进系统的源动机。只要它们的引入被证明是有益的，MTU公司将继续发展燃气涡轮发动机。

针对下一代发动机的技术创新，MTU公司正在研究替代传统燃气涡轮发动机的概念，从混合电推进系统到燃料电池都加以关注并尝试。MTU公司已经参与了普惠公司齿轮传动涡扇（GTF）发动机的开发，并认为第二代GTF发动机仍具有很大的发展潜力。如果进一步优化，它将进一步减少排放，并将于21世纪30年代中期投入运营。

对2050年及以后的革命性技

术，MTU公司在尝试对比不同的发动机方案：第一种是将传统燃气涡轮发动机的核心机用活塞发动机代替，构成复合循环发动机，这将显著提高发动机效率；第二种是水增强涡扇发动机（water-enhanced turbofan），这种涡扇发动机是要将水蒸气注入燃烧室，基本原理是将水在发动机的热交换器中蒸发成水蒸气，而热交换器的热量来自发动机余热，这种发动机也可以显著提高发动机效率。2020年10月，MTU公司又特别提及“正在专注发展水增强涡扇发动机，此概念可以降低15%的燃油消耗，并大大降低污染物，特别是NO<sub>x</sub>的排放。”

对可持续航空燃料，MTU公司特别青睐氢燃料。MTU公司首席运营官拉尔斯·瓦格纳表示：“氢对我们来说是一个极具吸引力的未来选择，它应该马上被用作燃料”。氢燃料有3种可能的用途：一是将氢转化为可持续航空燃料；二是将氢气作为燃料直接燃烧，当然发动机需要进行适应性

设计，特别是燃烧室；三是氢燃料电池。针对这3种途径，MTU公司表示“从长远来看，MTU公司应选用第三种使用氢的方法”。

## 可持续航空的解决途径和未来挑战

实现净零排放需要提高燃料效率和减少碳排放。从上述一些企业针对净零排放采取的解决措施可以看到，为了实现《巴黎协定》约定的减排目标，世界航空业正在努力追求航空技术大幅突破，甚至颠覆性突破。虽然所采取的路径千差万别，但就技术途径而言，最终都可以归结为提高燃料效率和减少碳排放两大途径。

航空运输行动小组（ATAG）于2020年9月发布了全球航空业应对气候变化的《2050路线图》（The Waypoint 2050），分析了全球航空业应对气候挑战可能采取的技术创新，主要包括飞机和推进系统两大方面，针对提高燃料效率和减少排放这两大途径，提出了5种未来技术方案，这也是目前主要研究机构和企业正在研究的技术方案：现役或即将服役飞机使用传统燃料或可持续航空燃料；进化技术（2035年前下一代飞机最有前景的技术），沿用传统的飞机结构，只在一些技术点上进行改进，例如，GTF发动机、高增压比发动机、超高涵道比发动机、使用轻质复合材料、主动减载、结构健康监测、机载燃料电池和先进电传飞控系统，使用传统燃料或可持续航空燃料；机体革命，飞行构型配置的革命，包括翼身融合、桁架支撑机翼、盒式机翼等，使用传统燃料或可持续航空燃料；推进系

统革命，如电推进、混合电推进、氢能、开式转子发动机等，预计2035—2040年可用于100座以下使用电池系统的飞机和使用混合动力系统的大型飞机；激进技术，实现100~200座的窄体飞机的零排放，存在巨大挑战，包括认证测试困难、航空公司态度谨慎、更高的基础设施要求、成本以及公众信任等。此外，需重点关注电动飞机和氢能飞机的前景。

实现净零排放不仅仅是技术问题，更是政府管理和全球协作问题。各国政府应在做出减排承诺的同时加大对绿色航空、清洁能源等相关领域技术发展的投资力度，制定更加广泛的节能减排政策和措施，将重点从减少碳排放扩大到减少气候变化影响。各国的航空研究机构应促进交流与合作，并在开发各种创新技术概念时，充分考虑航空公司和乘客的现实需求，将创新技术建立在能以较低成本满足需求的基础上。此外，航空公司、维修服务商、航空旅客也需根据各国实际情况全方位践行低碳、零碳理念。

特别值得一提的是，即便全球航空业如此不遗余力地追求实现净零排放目标，也未必一定能实现。根据ATAG的判断，至少在2060年之前，如果不主要依靠碳中和措施，全球航空工业的净零排放几乎是不可能实现的。ATAG发布的《2050路线图》中的净零排放目标是：到2050年全球航空业二氧化碳排放量比2005年减少一半，在此基础上，2060年左右达到全球净零排放。

ATAG执行董事迈克尔·吉尔表示：“世界上一些地区有可能更快地实现这一目标”，但就整个航空业而

言，2060年是一个“务实、现实的愿景”，全球航空业的净零排放可以在2060年或此后不久实现。要实现全球航空业2050年减排目标，就需要从石化燃料完全转型；到2050年，航空运输业将需要获得5亿t的可持续航空燃料，才能实现这一目标，而目前的产量还不到100万t，为此需要获得政府支持。

## 结束语

航空业必须可持续发展已是全球共识。为了确保全球航空业的持久健康发展，已经并且还将持续发布一系列诸如《巴黎协定》的节能减排政策和措施，欧洲甚至已经发布了《欧洲气候法》草案，以确保协调平衡各国、各行业的发展步伐，中国也明确发布了碳中和目标，承担起节能减排的责任。航空业是节能减排的关键领域，而航空业的节能减排目标需要各国的通力合作方能达成，特别是航空制造相关企业。目前，世界领先的航空发动机制造商在贯彻可持续航空发展理念时采取的各种应对策略和措施，可谓百花齐放、各显神通，但都结合了自身的特点和技术背景，而不是简单地跟风追随，这同时也是一条重要启示。此外，对于可持续航空发展众望所归的可持续航空燃料，未来将是航空业面临的关键挑战之一，并已经引起各国政府的关注。例如，2020年法国宣布计划到2025年用可持续航空燃料取代2%的石化燃料，到2030年提高到5%，到2050年提高到50%。

**航空动力**

（廖忠权，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机前沿技术探索和产业发展研究）