

为未来做好准备

——威廉·布朗谈 GE 航空集团的技术与产品发展

GE Aviation Ready for the Future

■ 王翔宇 / 中国航发研究院 成磊

GE 航空集团将高可靠性的发动机产品与完善的客户支援结合，在商用航空发动机市场取得了成功。“没人能准确地预测未来，但我们一定要为未来做好准备，而且是目的明确地做好准备”，这是 GE 航空百年来长盛不衰的经营哲学。

回首百年发展历程，GE 航空集团始终将客户价值置于其创新理念的核心地位，以为客户提供更可靠、更高效和更环保的产品为己任，摒弃华而不实的创新，以务实求真的心态，在航空发动机的高新科技及产品的研发、应用领域开创了一个个新纪元。在第二届国际航空发动机论坛召开期间，GE 航空集团市场总经理兼首席市场营销官威廉·布朗 (William H. Brown)，就 GE 航空集团的技术与产品发展接受了本刊的采访。布朗先生于 1980 年加入 GE 航空集团，先后在制造技术研发、质量及采购管理等领域担任领导职务，之后还负责过发动机部件维修项目，以及发动机维修设施和流程改进工作，他自 2000 年起被任命为 GE 航空集团航空产品市场总经理，同时还担任 CFM 国际公司的营销总经理，并代理 GE 航空集团首席市场营销官之职。

问:2019 年是 GE 航空集团成立 100 周年。您认为 GE 航空在过去



GE 航空集团市场总经理兼首席市场营销官
威廉·布朗

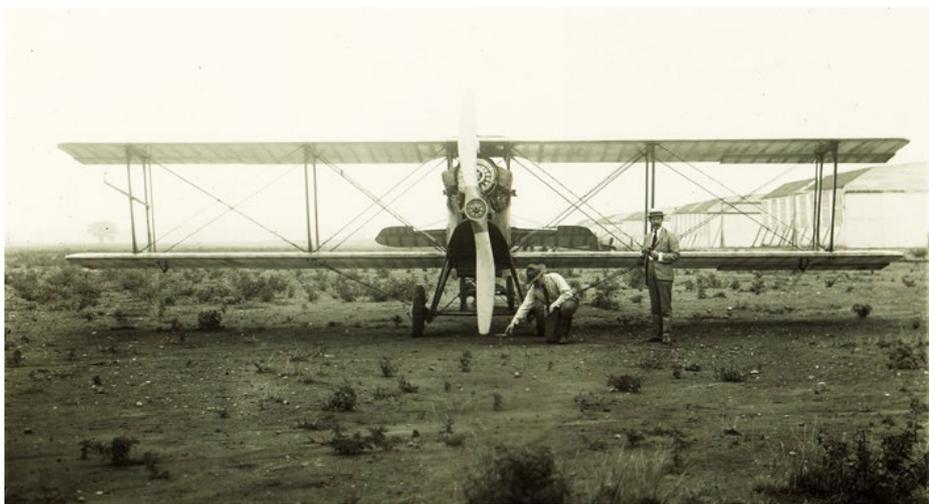
的 100 年里有哪些里程碑事件？

答：2019 年，GE 航空集团迎来了百岁华诞。作为航空界的传奇，GE 航空始终将创新理念铭刻于心，通过一代又一代的新产品和新技术为航空产业注入强劲动力，见证了百年航空的时代演进。1919 年，GE 燃气轮机工程师桑福德·莫斯 (Sanford Moss) 设计制造出首个涡轮增压器，这种离心式压气机能够借助来自发动机的废气进一步压缩空气，在高空产生更高的

空气密度从而极大地提升了活塞式发动机的效率，使得飞机能在 4800m 以上的高度飞行，从此 GE 开始向航空发动机领域进军。在涡轮增压器的基础上，GE 以英国工程师弗兰克·惠特尔发动机为蓝本，于 1942 年成功制造了美国第一台喷气式航空发动机，标志着美国正式进入了喷气飞行时代。

20 世纪 50 年代，GE 航空集团杰出的领导者格哈德·纽曼发明了航空发动机压气机的可调静子叶片 (VSV) 技术，显著提升了发动机的喘振裕度。这一发明在喷气式航空发动机的发展历程中具有重要意义，其成果被业界广泛采用。这一创新推动 GE 成功研发了第一型民用大涵道比涡扇发动机 CF6，后来成为波音 747、波音 767 以及 A300 等飞机的动力。

进入 20 世纪 80 年代，以 F101 军用涡扇发动机的核心机为基础，GE 航空集团与法国斯奈克玛公司平股合资，成立 CFM 国际公司，共同研发 CFM56 系列发动机，这可以称得上是民航史上最成功的一型发动机产品。GE 还研发了第一台无涵道风



莫斯(右)与Le Pere双翼飞机

扇(UDF)发动机并成功完成了地面和飞行试验。也是从那时起,GE开始了对碳纤维复合材料的大力投入与研发,并在以后的GE90、GENx以及LEAP发动机风扇叶片上得到应用。虽然用先进的复合材料替代传统金属并不是一个很新的概念,但航空材料在可靠性和安全性上的标准更为严苛,毕竟它们不像航天材料那样可以在几个循环内便可以完成其“使命”。目前,GE新研发的发动机的冷端部件材料已经从铝、钛合金过渡到碳纤维复合材料,而制造热端部件的传统合金也开始被陶瓷基复合材料所取代。毫不夸张地说,这场从金属合金到“超越金属”(Beyond Metal)的工程材料的变革是20世纪90年代航空史上的里程碑事件。

2000年以后,GE研发了第三代双环预混旋流(TAPS)燃烧室,与传统燃烧系统相比,它能使空气和燃油在燃烧前充分混合,以实现贫油燃烧及更低的排放——氮氧化物(NO_x)的排放量下降了75%以上,显然这项技术不仅仅意味着燃油消耗

的降低,也是实现更加清洁环保的航空旅行的重要一步。

近日,GE为波音777X研发的GE9X发动机在地面测试中推力达到598kN,创造了一项新的吉尼斯世界纪录——成为当今世界上推力最大的商用喷气发动机,这是GE当之无愧的荣耀。

在过去的100年里,无论是在发动机架构(包括风扇直接驱动、间接驱动以及开式转子和混合电推

进),或是在先进的气动设计(越来越高的涵道比、总压比以及效率),还是在材料工程上(开创性地采用碳纤维复合材料与陶瓷基复合材料),可以说,GE在航空发动机领域的这些探索实践完美地见证了人类航空事业的成长与进步。

问: GE航空集团研制生产了目前全球最畅销的窄体机发动机,以及最大推力的民用涡扇发动机。更有数据显示,未来10年GE/CFM国际公司在民用航空动力市场将占据67%的市场份额。在您看来,GE是通过掌握哪些关键技术使产品具有如此强大的市场竞争力?

答:我非常喜欢这个问题。在我看来,GE在市场上赢得更多客户选择的根本原因是将高可靠性的发动机产品与完善的客户支援服务真正地结合在了一起。刚才,我介绍了GE在引领航空产业技术发展上的突出表现,但站在客户的角度,那些颠覆性新技术所带来的性能提升却未必是他们最想要的。以CFM56发动机为例,与竞争

- ◎ 美国首台喷气发动机
- ◎ 美国首台涡轮发动机
- ◎ Ma2的喷气发动机
- ◎ 首台高涵道比涡扇发动机
- ◎ 首个复合材料风扇叶片投入商业运营
- ◎ GE9X 发动机推力创吉尼斯世界纪录
- ◎ 陶瓷基复合材料在商用发动机中得到应用
- ◎ 增材制造发动机零部件首度获得FAA批准
- ◎ 受控无人机飞行管理系统
- ◎ IMW级发电机验证机

GE航空的技术创新

产品相比，其耗油率并不是最低的，但这并不妨碍CFM56成为民航史上最受欢迎的一型动力产品——发动机的性能表现固然重要，但这需要通过卓越的耐久性和可靠性来保证。

这里我想重点谈一下我们的产品和客户支援。一种技术即使再新再好，一旦在使用中出了问题却无法解决，那么在客户眼中这种所谓的“好技术”也只是徒有虚名；另一种技术虽然看起来并不那么“炫酷”，但却有足够的认知和手段去处理在使用中遇到的问题，那便是客户眼中真正的“好技术”。一定要让客户对自己的产品有信心，“想客户之所想，急客户之所急”一直是GE孜孜以求的经营之道，全球最好的航空发动机支援服务网络体系成为了GE航空的产品深受市场青睐的核心因素之一。在客户支援优先的理念下，一旦交付的产品出现了问题，GE的服务代表要做的第一件事就是协调工程师尽快解决故障，让发动机尽快恢复使用，而不是先去界定这是谁的责任。

问：LEAP和GE9X是GE航空投放市场的最新窄体机/宽体机动力产品，您认为二者的“技术标签”是什么？继普惠公司的PW1000G系列发动机之后，罗罗公司最新研发的超扇发动机也采用了大功率减速齿轮箱。那么GE航空对齿轮传动技术的发展与应用持何种观点？

答：在我看来，可以用4个词来概括LEAP和GE9X的技术特点，即简单、可靠、耐用和直接驱动，而直接驱动也是这两型发动机能够实现简单、可靠、耐用的一个重要因素。当然，这些特点并不是以牺牲发动机性能

为代价来实现的，GE的发动机产品通过简单、可靠和耐用真正成为了市场的主导。

关于发动机的架构问题，我们认为在飞机方案确定之前先确定发动机的架构并不是一种正确的做法。设计发动机是为了主动地适应飞机的需求，而不是让飞机被动地去接受发动机。在明确飞机需求与应用环境之前，发动机制造商不应该盲目地确定产品架构，一型可以适应飞机的发动机才可能是好的发动机。

齿轮传动并不是一个新鲜的概念，而要说到省油，开式转子至少还能再继续降低20%以上的燃油消耗。早在20世纪80年代，GE就研发并试飞了相关发动机，然而遗憾的是并没有哪家飞机制造商能够接受这型超前的发动机产品，这对GE来说也是一个教训。我想表达的是，GE从来没有把未来的发展锁定在某一项技术、某一种架构上，也不会用激进的研发理念去强推某型动力产品。无论是齿

轮传动、开式转子还是混合电推进技术，GE在每一个潜在的领域都进行了充分的准备，至于最终到底是什么则一定要等到飞机的需求确定后再下结论，要让飞机能够很顺利地接受我们的发动机。

问：CF34在2018年的范堡罗航展上取得了200余台的订单，也是国产ARJ21飞机的唯一动力装置。自问世以来，CF34系列发动机不断发展，历久弥新。GE是如何看待未来支线航空运输市场的发展的？在CF34之后有无新产品研发的计划？

答：CF34系列发动机之所以长期受到支线航空市场的欢迎，主要有两方面的因素：一是飞机的燃油消耗主要集中在巡航阶段，飞行距离相对较短的支线航空运输显然是对燃油消耗并不敏感的一个细分市场，这也意味着航空公司在使用CF34时不会有过多的燃油成本的顾虑；二是支线航空频繁的起降潜伏着较



CF34-10A 发动机

大的安全风险，发动机的可靠性成为航空公司关注的核心焦点，而像CF34这样久经考验的发动机产品的优势是不言而喻的。

新成立的航空公司大多是从支线航空起步的，待安全记录达到一定水平后再申请运营更大的飞机、更远的航线。美国是这样，中国也是如此。而对一个运营经验十分匮乏的新进入者而言，成熟稳定的飞机和发动机才是最好上手的、风险也是最低的。

问：波音公司737MAX停飞事件对全球航空产业造成很大冲击，而作为其唯一动力装置的LEAP发动机，相关市场的发展是否也会连带地受到影响？

答：我们目前仍在根据合同向波音公司交付LEAP发动机，波音公司也没有停止737MAX的生产，只是生产速度比先前有所降低。作为长期合作伙伴，GE对未来波音737MAX复

飞并重新获得市场的认可充满信心。事实上，此次停飞事件后，业界正在建立一套新的、比之前严苛得多的适航审定标准，而波音737MAX很有可能会是第一个经历新适航标准严格考核的飞行器，到时候也可称得上是全球最安全放心的飞行器。波音737MAX迟早会再交付运营的，这只是一个时间问题。

问：GE9X已于今年上半年进行了飞行测试。相比GE90，GE9X在技术上主要有哪些突破，能为波音777X飞机带来哪些提升？

答：可以说GE9X的技术亮点体现在高效的空气动力设计、先进材料和数字化3个方面，当然前面的两点是我反复提及的。首先，GE9X的总压比和核心机压比分别为60：1和27：1，而GE90对应的数字只有40：1和19：1，增幅达到了50%，这是一个巨大的气动效率的提升；其次，除了碳纤维复合材料风扇叶

片和风扇机匣，GE9X还采用了陶瓷基复合材料的涡轮盘、罩环、燃烧室和出口导向器，在质量减轻了三分之一的同时，大大减少了对冷却的需求并使强度提升了1倍。

对于GE9X的数字化来说，GE在制造每一台发动机时都会记录其海量的数字信息，这些信息就像指纹或者“遗传基因”（DNA）一样，可以用来对发动机进行数字识别。一旦有发动机在使用中出现了问题，可以锁定所有具备类似识别特征的发动机并进行未雨绸缪的防范处理。这比像过去那样一台一台地监控发动机的状况要高效、彻底得多。

问：从公开的渠道看，GE在对波音公司的新中型飞机（NMA）和中俄合作CRJ929双通道远程宽体客机的动力方案竞标中表现非常活跃。GE航空是如何看待这两款新飞机的市场前景的？如果最终的结果是“一机双发”，GE航空能否接受？

答：首先，对这两款新飞机而言，GE航空只可能接受“一机一发”的方案。为新飞机研制新型发动机需要很大的投入，考虑到这二者有限的市场空间，“一机双发”下的商业回报是无法令人满意的。这是业界的一个共识。事实上，即使站在飞机制造商的角度，我个人也不认为发动机双选会带来更多的好处。

发动机制造商是否能为一款飞机提供动力，是一个很复杂的商业性问题。在做决定之前，先要弄清楚投入会有多大？收益又会有多少？当然，最终的答案很大程度上取决于对飞机未来市场前景的判断。

问：以数字化和电气化为特征的航



LEAP 发动机



GE9X发动机

空产业第三时代即将到来，目前限制电动飞行发展的技术瓶颈主要有哪些？GE为应对未来电动飞行趋势进行了哪些准备？

答：全球航空产业朝着电气化方向发展的趋势已经开始形成了，当然距离全电动或者混合电推进飞行器正式进入商用航空市场还有较长的路要走，目前的挑战是多方面的。

我们可以把高密度发电机、逆变器和电动机放在一起讨论。燃气涡轮产生的电能经过逆变器转变为直流电后驱动电动机工作，这一过程看起来似乎并不复杂，不过据估算，商用飞行所需要的功率至少在25MW以上，按照现在的技术水平，这些电力装置会很大很重，如果不能实现小型化、轻量化，显然是不能在飞机上使用的。从爱迪生时代算起，GE开展电力业务已经超过100年，我们在高功率密度电力系统的研发上积累了极为丰富的经验。从发电、供电、交直流转换到高效电机，很多先进的电力技术会被用

到未来的电动飞机，我相信航空业务与电力业务的强强结合将是我们电动飞行市场制胜的关键，这也是其他传统的发动机制造商所不具备的天然优势。

电池的能量密度是另一项重大的挑战。目前常见的电池的能量密度可能只是航空煤油的1%~2%，而且电池放电也不会像燃油消耗那样使得飞机的质量逐渐减少，电动飞行也许短期内可以在城市空中交通（UAM）这样的通用航空领域得到应用，但如果是承载100~200名旅客，在10000m的高空飞行超过4800km的距离，凭借目前的电池技术是无法存储足够的能量的，而采用混合电推进是比全电动更为切实可行的思路。

燃料燃烧产生电能从而驱动电动机，混合动力推进系统中能量转化引起的效率损失其实更大，虽然看似多此一举，但它在气动效率上的提升却是传统发动机无法比拟的。为了改善气动效率，风扇直径被设计得越来

越大，同时也增加了额外的质量和阻力。采用混合电推进系统，可以用分布在机翼前缘的一组电机和涵道风扇取代两个大涵道比涡扇发动机，它们质量更轻且阻力更小，更便于实现飞机和发动机的全面集成。目前GE旗下有11个机构正在开展混合电推进系统研发，位于俄亥俄州的代顿实验室正在测试2MW航空电力装置，在不远的将来，市场上会出现GE的混合电推进飞行器产品。

问：航空动力技术的进步为航空器的发展提供新的机遇。GE对未来整个航空产业发展有何展望？未来的发展重点有哪些？

答：第一，无论是直接驱动，间接驱动，还是开式转子，GE将对各种不同的发动机架构进行广泛深入的研究和技术储备。第二，先进空气动力和新材料的发展路径是较为清晰的、不会受到发动机架构的影响，GE将会继续保持在高效气动设计与先进航空材料方面的投入。第三，持续发力混合电推进技术，重点探索新一代高密度发电机、逆变器、电动机和电池技术。

我特别想强调的是，任何人都没有准确预测未来航空市场需求的能力，怀着侥幸心理去寻找捷径、寄希望于某一种假设，是肯定不能取得长久的成功的。我们应该事先考虑到方方面面的情况，任何人都无法准确地预测未来，但我们一定要为未来做好准备，而且是目标明确地做好准备，这是GE航空百年来长盛不衰的经营哲学。

航空动力

（王翔宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）