

# Passport发动机的设计特点及关键技术

## Design Feature & Key Technology of GE Passport Engine

■ 温杰

GE公司利用eCore验证机的预研成果，借鉴大型涡扇发动机的研制经验和关键技术，针对支线和公务机市场推出了全新设计的Passport发动机。该发动机预计今年将随庞巴迪公司的“环球”7000公务机投入商业运营，而“环球”7000的市场竞争力，在很大程度上需要仰仗Passport的表现。

### 研发背景

GE公司于2008年7月12日宣布启动高效核心机（eCore）验证机计划。从市场竞争角度来看，eCore验证机的推出主要是为应对普惠公司提出的PurePower通用核心机计划所带来的挑战。

eCore的目标是在LEAP56计划的基础上，利用GE90和GENx发动机的先进技术，研制出一种通用构型的发动机，可适用于不同的飞行平台。eCore验证机后来成为LEAP发动机和Passport发动机的研制基础。

与eCore验证机相比，LEAP发动机的核心机尺寸有所扩大，而Passport发动机的核心机尺寸略有减小。LEAP发动机作为CFM56的后继型号，成为波音737 MAX、空客A320neo和中国商飞C919单通道喷气客机的动力装置。

Passport发动机的问世则是受公务机市场需求的驱动。在竞争激烈的超远程公务机市场，庞巴迪公司当时酝酿发展一款新机型与对手抗衡。庞巴迪新型公务机的飞行距离拟达到12960 ~ 14810km，要求发动机有良好的经济性和推力水平。



“环球”7000原型机正在进行飞行试验

GE公司为此提出要研制一种推力为62 ~ 89kN的发动机。

新型涡扇发动机的初步设计工作于2009年正式启动，在工程研制阶段被称作TechX。2010年10月19日，庞巴迪公司在美国公务机航空协会年会暨公务机展（NBAA）上宣布，选择GE公司作为最新启动的“环球”7000/8000超远程公务机的发动机供应商。2011年5月16日，GE公司在欧洲公务机展（EBACE）上宣布，TechX被正式命名为Passport发动机。同时，GE公司希望Passport发

展成为一个全新的涡扇发动机系列，推力为45.4 ~ 90.8kN。其中，配装“环球”7000公务机的Passport 20的推力为73.4kN，耗油率至少比目前使用的同级别涡扇发动机低8%。

### 设计特点

作为新一代高涵道比涡扇发动机，Passport发动机的增压部分采用了1级整体叶盘风扇、3级低压压气机和10级高压压气机，涵道比为5.6，总增压比为45；在燃烧部分采用了贫油低排放环形燃烧室，具有燃烧效

率高、污染物排放少的特点；在膨胀做功部分采用了2级高压涡轮和4级低压涡轮；在排气部分采用了混合器和中心锥体，可以有效混合气流，减少压力损失。

Passport的核心机充分利用了eCore验证机的成果。它的10级高压压气机叶片采用了三维气动设计，增压比达到23，同时不会发生失速喘振，甚至没有油门杆限制。在结构上，高压压气机的前5级采用钛合金加工而成的叶盘结构，而后5级采用了传统的压气机盘与镍基合金铸造叶片，以适应更高的压缩空气温度。从制造工艺来看，前5级整体叶盘的叶片和后5级压气机盘上的叶片都经过超级抛光，具有更高的光洁度，以提升气流增压过程的效率。

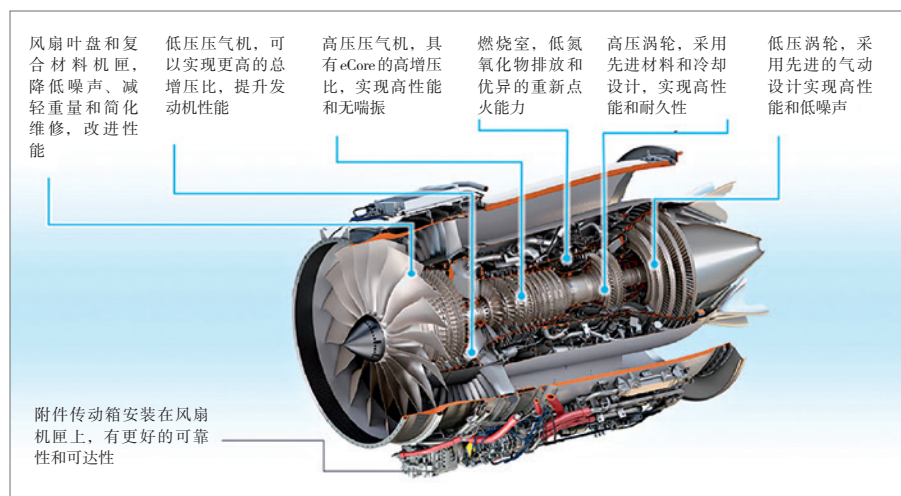
Passport的第二代双环预混旋流燃烧室（TAPS II）充分利用了GE90等大型涡扇发动机不断优化的低排放技术，使燃油在燃烧室内得到充分雾化和混合，实现全工作状态下的贫油燃烧，显著降低了污染排放。经过验证，Passport发动机的氮

氧化物、烟尘、碳氢化合物和二氧化碳等排放物指标达到国际民航组织（ICAO）的航空环境保护委员会（CAEP）制定的CAEP/8排放标准，比CAEP/6排放标准低50%。

高压涡轮的叶片采用了三维气动设计，具有高载荷性能。低压涡轮采用了第三代三维气动设计、先进的冷却技术和主动间隙控制技术，以减轻重量，提高耐久性。

低压涡轮部分采用了主动间隙

控制技术，可以根据发动机的不同工作状态，调整涡轮叶片叶尖与涡轮机匣之间的间隙。叶尖间隙越小，涡轮叶片的工作效率就越高。具体方法是，Passport发动机在涡轮机匣上布置有冷却管路，通过全权限数字式电子控制（FADEC）系统调节冷却空气压力，经过毛细气孔注入冷却空气，控制涡轮机匣的扩张和收缩。就巡航状态而言，发动机需要较小的叶尖间隙，但是在起飞和



Passport发动机的剖视图

## Passport 发动机研制大事记

2008年7月15日

GE公司在范堡罗航展上宣布启动eCore计划，为发展新一代涡扇发动机验证核心技术。

2010年第一季度

第一台eCore验证机按计划开始第二阶段全面测试，同时充分利用商业和军事应用领域的多项先进技术开始研制TechX发动机。10月19日，TechX发动机被选为“环球”7000/8000超远程公务机的动力装置。

2012年2月

Passport发动机通过了设计评估，同时GE公司制造出风筒叶盘。4月27日，GE公司冻结了Passport发动机的设计，开始了详细设计阶段。

2009年10月

GE公司考虑研制CF34发动机的后继机，开始初步设计工作，希望在2015年后推出新型涡扇发动机。

2011年5月16日

TechX发动机正式更名为Passport发动机。5月24日，第二台eCore验证机在试车台上开始接受测试，验证了Passport发动机核心机的性能。

2013年3月

GE公司开始装配第一台Passport发动机。2013年6月24日，首台Passport发动机在俄亥俄州皮布尔斯工厂开始整机台架试车，运转时间超过3h，推力达到80kN。按照计划，将有8台Passport发动机和2台核心机用于发动机认证。10月，第二台Passport发动机在地面试车中达到了最大推力85.4kN。

降落过程中则需要较大的间隙，避免叶尖和机匣之间发生摩擦。主动间隙控制技术在大型涡扇发动机上较为常见，但在公务机发动机上属首次应用。

在排气部分，Passport发动机采用了可变面积风扇外涵喷管。通过调节发动机外涵道的面积，控制外涵道的气流速度，在不同飞行状态下都可使发动机始终处于最佳工作状态，同时还可以有效降低噪声和振动。



Passport发动机在地面试车台上接受测试

## 先进技术

### 风扇整体叶盘

针对新一代公务机的舒适性要求，Passport发动机在设计上的一个主要特点是采用了较大的单级风扇叶盘，可以显著降低发动机的振动和噪声。

从制造技术来看，整体叶盘虽然已经应用于军用和民用涡扇发动机，但Passport发动机的单级风扇叶盘的直径达到132cm，是迄今制造的最大的风扇叶盘之一。风扇叶盘由于减少了零件数量，在重量上减

轻了三分之一，同时降低了振动和减少了磨损，相应地减少了维修工作量。根据热力学循环的优化结果，风扇设计有18个宽弦叶片。这些叶片由钛合金锻造而成，通过线性摩擦焊接到叶盘上，最大限度地减少了叶片脱落的可能性。GE公司称，参照Passport发动机的尺寸估算，全金属风扇的重量仍然比使用复合材料制造的风扇部件轻，并且还可以保持金属叶片的空气动力学效率。

风扇叶盘由于减少气流泄漏和采用了更小的轮盘，明显增加了空气流量，有效改善了燃油效率。对于传统的压气机盘和叶片结构而言，风扇叶片的榫头与轮盘上的榫槽吻合，但会存在一个缝隙，在工作过程中将引起空气泄漏，从而导致性能损失。GE公司通过去除燕尾型榫头结构以及与轮毂相关的尺寸和重量，减小了轮盘的直径，从而可以利用增加的环状区域获得更多的气流。

2013年9月9日

GE公司、日本的IHI公司和比利时的Techspace Aero公司（隶属于赛峰集团）达成协议，成为Passport发动机的合资伙伴。

2015年9月

GE公司完成Passport发动机与IPS发动机短舱的集成工作，并在11月将IPS安装到第一架“环球”7000试验机（FTV1）上。

2017年8月

“环球”7000试验机（FTV2）在飞行试验中出现一台Passport发动机空中停车。调查发现，这是由于动力装置上出现了一个孤立的装配错误，对研制和试飞工作未造成影响。

2014年12月30日

Passport发动机开始在波音747-100飞行试验台上进行飞行测试。

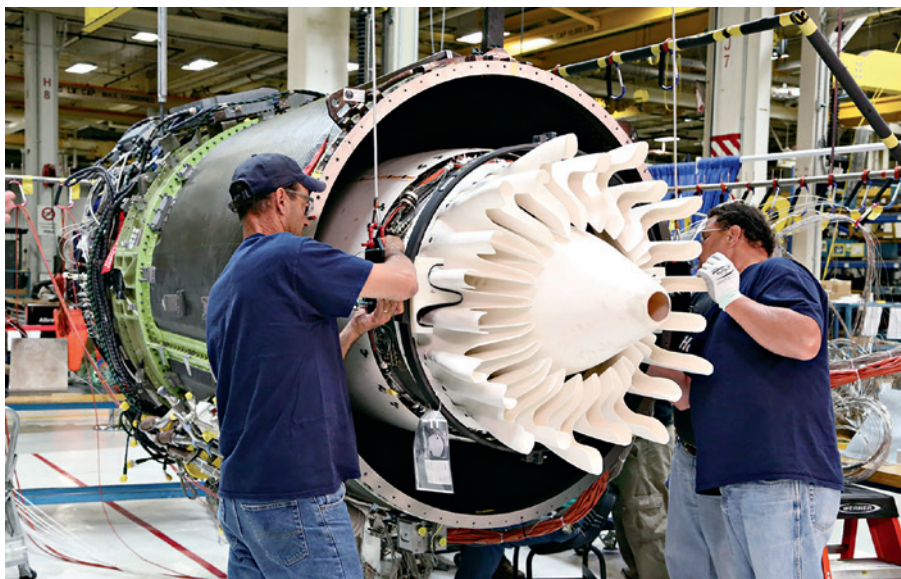
2016年4月

Passport发动机在完成了3380h和3385循环的研制和取证测试后，获颁FAA型号合格证。

2017年10月

截至2017年10月，Passport发动机累计运转时间超过3300 h，3385循环。预计，在投入使用前，这两个数字将分别达到4000h和8000循环，相当于“环球”7000公务机运营10年的等效时间。





排气混合装置采用了CMC材料制造

从生产工艺来看，风扇叶盘无须单独的叶片，不仅消除了以往在安装叶片与轮毂时所需的润滑工艺，同时也不再需要校准式平衡。

从安装位置来看，Passport发动机安装在“环球”7000的机身尾部，远离地面，可以借助机翼的防护作用，减少外物损伤（FOD）。

从设计角度来看，风扇叶片的叶型具有非常高的效率，远远超过了同级别发动机，因此可以在设计时采用加厚的风扇叶片前缘，具有更强的抗损伤性。

从维修角度来看，风扇叶盘设计成为易于拆卸和装配的结构。GE公司已经研制出了可以原位更换风扇叶盘的工具，将其变成一个外场可更换部件（LRU），根据需要可以直接更换整个叶盘，然后将其送到车间，视损伤情况进行修理。在Passport发动机测试过程中，GE公司从未拆下风扇进行过修理。

### 陶瓷基复合材料

为了进一步减轻发动机的重量，

GE公司在Passport发动机的风扇机匣和整流叶片等部件上采用了复合材料。值得一提的是，Passport发动机是首型在排气混合器、排气中心体等15个零部件中使用了陶瓷基复合材料（CMC）的公务机发动机。

CMC材料能够承受高达982℃的温度，而Passport发动机上的最高温度为677℃，留有充足的裕度。以中心锥体为例，这是一种发动机后部突出的锥体，结构非常轻巧，大约长76.2cm，前端直径超过50.8cm，重量大约只有4kg。它的周围是CMC材料制造的混合器，一种非常复杂的褶皱式结构，需要3天时间才能铺设成形。

### 一体化推进系统

Passport安装在发动机短舱内，与先进的进气道、消声部件和反推力装置组成一体化推进系统（IPS），这也是在公务机发动机上的首次应用。发动机短舱采用了细长形的低阻构型，在风扇机匣等大型部件上广泛使用了复合材料，可以充分发

挥其气动性能和声学方面的优势，有效降低阻力和减轻重量。

短舱内部设计了一个单件扩展复合材料内筒，结合了先进的声学防护，可降低发动机噪声水平。IPS的防冰系统采用了定向流气动喷嘴技术，可以更有效地利用引自发动机的空气，以减少引气量。IPS在反推力装置上采用了移动式“弹力密封片”，以减少飞机在飞行过程中引起的空气泄漏和湍流。

### 创新工艺

作为一种新型发动机，Passport发动机采用了多种新型工艺和技术。其中，高压压气机的叶片和叶盘采用了超光滑抛光工艺。通常，正常的叶片可能有20μm的粗糙度，用肉眼观察十分光滑，而Passport发动机的叶片会被放入介质中，并以特定频率振动后，达到4~5μm范围内的表面粗糙度，使表面存在极其微小的凸起，甚至低于叶片表面的正常层流边界层。除了改善空气流动外，使用更光滑的部件可以避免积垢，有助于保持压气机的效率。

### 数字孪生

Passport发动机在完成组装和测试之后都会有一个数字孪生体对应其发动机实体。数字孪生体将按照相同工作条件进行数字化“运转”，同步完成每项任务。这样，GE公司可以掌握每台发动机每天的工作情况，如飞行过程的天气、降低额定值的原因、是否吸入过火山灰、是否在中东遭遇沙尘暴，并将监测重点放在基于运行条件的可能出现的问题上。运控中心的工作人员分别监控每台发动机，并开展日常维护。因此，这将彻底改变公务机发动机的使用和维修方式。

航空动力