

PT6发动机的发展之路

The Development Road of PT6

■ 王士奇/中国航发研究院 刘子娟/中国航发动研所

从1963年取得美国和加拿大的民用适航证，到2019年为PC-12 NGX飞机提供动力，作为普惠加拿大公司完全自主设计的第一型燃气涡轮发动机，PT6系列已经面世56年了，可谓是通用航空动力领域的“常青树”，通过对PT6的研究，可为我国通用航空发动机的发展提供借鉴。

PT6发动机研制历程

1958年12月，普惠加拿大公司开始了373kW（500hp）级燃气涡轮发动机的研制。公司做出这一决定主要基于以下几个原因：一是通用航空市场尤其是小型双发运输机对此级别的动力装置有较大的需求，同时还存在军用的可能性；二是普惠加拿大公司的投资预算有限，研发一型通用航空发动机的花费可能较小；三是当时还很少有发动机公司重视这一潜在但尚未被开发的市场；四是潜在用户比奇飞机公司对这个级别的涡桨发动机有明确的需求。

但直到1963年春，尽管在发动机研制上已花费了数百万美元，普惠加拿大公司仍未获得一份PT6发动机的正式订单。这期间，普惠加拿大公司尝试进入美国的军用直升机市场，参与竞标了美国陆军的轻型侦察直升机项目，以及美国海军的突击支援直升机项目，但都以失败而告终。此时，普惠加拿大公司意识到尽管自己是美国公司控股的企业，但作为加拿大的制造商，进入美国军方市场是非常困难的。所以，普惠加拿大公司不得不把精力集中到其他市场上。PT6项目的最初目标，民用固定翼飞机动力市场，



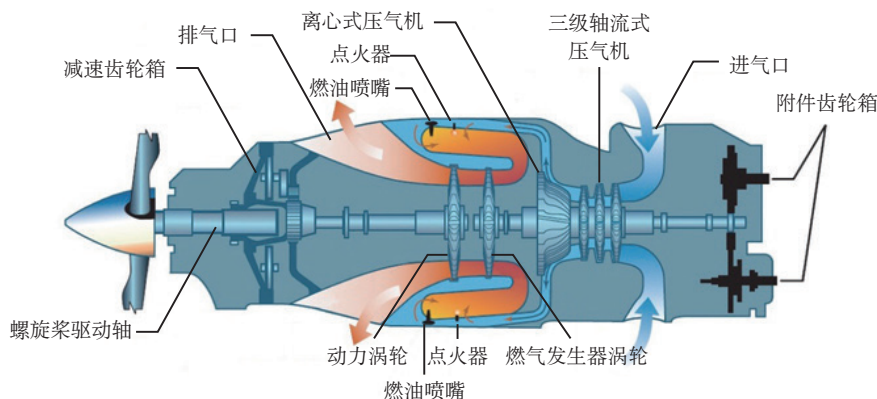
装备PT6 E系列发动机的PC-12 NGX飞机

仍然很有潜力，普惠加拿大公司决定把主要精力放在这个市场上。

终于，普惠加拿大公司的PT6发动机在与莱康明公司的T53涡桨发动机、透博梅卡公司的巴斯坦和阿斯塔祖涡桨发动机、大陆公司的217型发动机的竞争中胜出。1963年7月14日，比奇飞机公司正式宣布研制“空中国王”90型公务机，将以两台功率为410kW（550hp）的PT6A-6型发动机为动力，该飞机于1964年1月24日首飞。普惠加拿大公司获得了16台PT6A-6发动机的订单，这是公司历史上的首个燃气

涡轮发动机订单。随着“空中国王”在世界公务机市场上的畅销，普惠加拿大公司的PT6也获得了源源不断的订单，比奇飞机公司成为普惠加拿大公司最大的客户。

当时市场上活塞式发动机种类较多，尽管涡轮发动机的初始采购成本较高，但其长期使用成本则较活塞式发动机更低。例如，PT6的功率质量比较活塞式发动机高，使得飞机在有效载荷、总质量和飞行速度方面都会受益，飞机的载重能力的提高就将发动机初期的采购成本以及较高的燃油消耗量抵消掉了。



PT6A发动机的内部结构示意图

普惠加拿大公司对此进行研究的结果是，以涡轮发动机为动力的飞机能在更高的升限以更快的巡航速度飞行，其运营成本最终与活塞式发动机相近；另外，随着飞机对快速、低噪声、高可靠性的要求越来越高，普惠加拿大公司预测燃气涡轮发动机在高端公务机动力市场会逐渐取代活塞式发动机的地位。事实证明，普惠加拿大公司的预测十分正确。

1965年，当时的美国民用航空委员会取消了小型支线客机运营的政策限制，使得支线客机在20世纪60年代迎来了快速发展的机遇。对普惠加拿大公司而言，这是拓展PT6发动机市场的一个难得的历史机遇，普惠加拿大公司趁此机会迅速占领了小型支线客机市场。到20世纪60

年代末，PT6A发动机已经成为了支线客机和公务机涡桨发动机中的佼佼者。在PT6A涡桨发动机成功的基础上，普惠加拿大公司又针对直升机市场相继研发了PT6T双体并联涡轴发动机、PT6B/C单体涡轴发动机，并获得了巨大成功。

PT6A涡桨发动机在支线客机和公务机市场上的巨大成功，一举将普惠加拿大公司从活塞式发动机的许可生产转变为燃气涡轮发动机的自行研发、生产和销售。其型号发展的宝贵经验，以及产品成功带来的巨大利润也让普惠加拿大公司能够迅速对其产品进行持续的改进，并针对不同的市场开发全新的产品。可以毫不夸张地说，没有PT6A发动机的成功，就没有今天的普惠加拿大公司。

PT6发动机设计特点

普惠加拿大公司经过市场研究确定研制PT6发动机之后，首先要面对的问题就是确定发动机的结构布局。在确定设计标准和原则时，PT6目标定位在低成本和低风险上。为此，公司决定选择相对保守的气动设计和机械设计，以弥补部件试验设备

的不足带来的不便。此外，从用户角度考虑，设计人员将可靠性、耗油率、维修性、质量、成本等作为重点考虑因素。为达到这些目标，几个重要的问题摆在了面前——发动机是采用自由涡轮式结构，还是固定轴式结构？是采用同心轴结构，还是对置轴结构？是采用组合压气机，还是双级离心式压气机？

自由涡轮式与固定轴式

自由涡轮式和固定轴式（即单轴结构）这两种结构各有利弊。固定轴式结构的优点在于部件数量少，研制成本低，对油门杆操纵的响应速度快，便于飞行员在紧急状态下进行控制。但固定轴式结构的主要缺点是压气机、涡轮和传动轴的载荷都取决于同一转速条件，限制了发动机控制的灵活性和输出功率的提高。

自由涡轮结构的优势在于燃气发生器可相对动力涡轮段独立工作，因此可在输出轴转速低的条件下输出非常高的功率，反之亦然；无须离合器，便于直升机动力的起动和加速；如果是涡桨型动力，则自由涡轮结构的优点是发动机功率转速范围宽，有助于在地面和飞行中降低螺旋桨噪声，并且涡轮结构输出转速的灵活性可使发动机适合匹配多种已有的螺旋桨设计，无须专门为发动机进行价格昂贵的螺旋桨定制设计。由于当时普惠加拿大公司尚未完全明确市场需求，故要考虑涡桨、涡轴两种型号的共同特点，而自由式涡轮发动机结构在涡轴和涡桨型发动机上都特别适用。此外，自由涡轮式结构所需要的起动功率较低，利于低温条件下的操作。自由涡轮结构最大的缺点则是比固定轴结构的初始研制成本要高。



PT6T双体并联式涡轴发动机

除了比较两种结构的优缺点之外，潜在客户比奇飞机公司对自由涡轮结构的偏向，也是普惠加拿大公司最终选择该结构的一大原因。比奇飞机公司认为，当发动机在高转速下出现故障时，因为固定轴结构发动机的所有内部部件都连在一根轴上，风车状态时螺旋桨会给发动机带来很大的扭矩，使得飞机一侧的气动阻力过大而造成尾部结构失效。而同样的故障对于自由涡轮结构发动机而言，因为只有少数发动机内部部件连在螺旋桨轴上，螺旋桨带来的扭矩小，飞行员试图顺桨时产生的气动阻力也相对较小，不易引起结构失效。基于以上的考量，普惠加拿大公司最终决定采用自由涡轮式设计结构。

对置轴与同心轴

在确定了自由涡轮结构之后，就面临着是选择同心轴设计还是对置轴设计的问题。在同心轴发动机设计中，一根长的动力涡轮轴穿过压气机至发动机前端，通过减速齿轮箱带动螺旋桨。这种发动机设计便于空气流直接进入进气道且直接从发动机后部排出，将压力和性能损失减至最小。该设计方式的难点在于如何避免轴振动，以及如何解决高转速、细长且要穿过燃气发生器的轴的支承问题。

而对置轴设计将燃气发生器轴置于发动机后端，并将动力涡轮轴置于发动机前端与之相对应。这种结构在机械结构上实现起来要相对简单，但必须采用逆向的空气流动形式，即进气道在发动机后端而不是前端，空气流经压气机、燃烧室和涡轮，从发动机前端排出。对置轴式发动机设计的优点是：压气机

噪声较低、进气道可用滤网保护以减少外物损伤、易于进行维修检查和部件更换等。缺点是使发动机机体和质量增大，不够紧凑。

最终，普惠加拿大公司的设计团队一致认为同心轴设计对于自己的设计水平和经验而言风险太大，最终决定采用对置轴设计。多年之后，已经积累了丰富的设计经验，面向对体积和质量都非常敏感的直升机发动机市场，普惠加拿大公司设计的同样为447kW（600hp）级别的PW200系列涡轴发动机就采用了同心轴设计。

组合压气机与双级离心式压气机

在该功率范围的涡桨/涡轴发动机要实现所需的压比和流量，既可以采用轴流+离心组合式压气机，也可以采取双级离心式压气机。一般来讲，采用3级轴流式+1级离心式（3A+1C）的组合压气机的发动机的径向尺寸更小，轴向尺寸更长，属“瘦长”型布局；而采用双级离心式压气机的发动机的径向尺寸大、轴向尺寸更为紧凑，属“矮胖”型布局。对于同等压比的压气机来说，组合压气机的效率比双级离心式压气机

的效率更高。但是，3A+1C组合压气机的喘振裕度比离心压气机的小，需要可调导叶机构+放气装置一起完成防喘控制，结构上更为复杂，零件数更多，导致可靠性较低。相比之下，双级离心式压气机本身零件少，且喘振裕度大，不需要防喘放气装置或者仅设置放气装置即可满足防喘要求；同时离心叶片较厚，抗外物损伤能力能强，可靠性更高。

PT6发动机采用组合压气机布局的原因主要是普惠加拿大公司当时有限的技术储备，从其母公司得到的技术援助也主要是轴流式压气机技术，并且当时的双级离心式压气机技术并不成熟，因此采用了效率更高、结构更为复杂、技术更为保守的组合压气机布局。

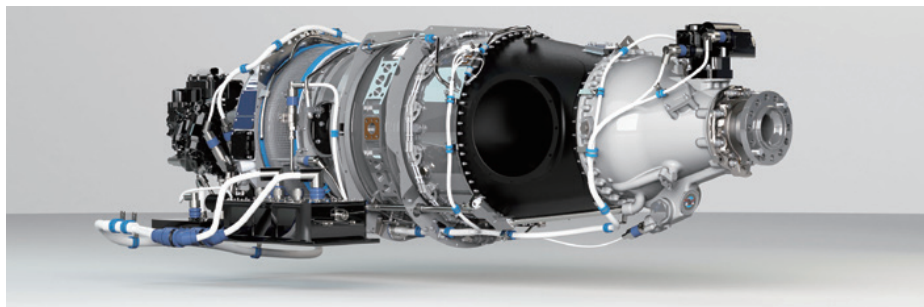
PT6发动机的型号发展

PT6发动机目前主要包含PT6A系列涡桨发动机和PT6B、PT6C、PT6T系列涡轴发动机，以及最新的PT6E系列涡桨发动机（参数详见表1），另外还包括了一些工业及船用动力等非航空产品。

PT6A系列涡桨发动机的输出功率

表1 几款典型的PT6系列发动机基本参数

	PT6A-67A	PT6E-67XP	PT6T-9	PT6B-37A	PT6C-67E
发动机类型	涡桨	涡桨	涡轴	涡轴	涡轴
取证时间	2004年10月	2019年10月	2015年10月	1999年12月	2012年12月
干质量/kg	251.2	270.3	346.1	184.8	216.8
长/mm	1888.5	1870.9	1672.7	1502	1500
宽/mm	466.1（直径）	481.8（直径）	1138.4	483	570（直径）
高/mm			905.5	904	
起飞功率/kW	895	895	1383	684	969
输出轴转速/ (r/min)	1700	1700	6798	4505	—



PT6E 发动机

覆盖广泛，从373 ~ 1417kW（500 ~ 1900hp），主要用于单发和双发的固定翼飞机，适用于公务出行、航空运动、航空货运等各种应用场景。PT6A发动机共发展了70多个型别，用于180多个国家、7100多家用户的120多种中小型军民用固定翼飞机上，累计飞行超过4亿小时，是PT6发动机中最成功的产品系列。

PT6B系列为746kW（1000hp）级别的涡轴发动机，共有6个型别，累计飞行时间超过170万小时。而PT6C系列的输出功率覆盖了1193 ~ 1491kW（1600 ~ 2000hp），主要用于中型直升机和倾转旋翼机。PT6C是首先采用双通道全权限数字式电子控制（FADEC）系统的PT6发动机，提高了燃油效率，减轻了飞行员的工作负担。

PT6T为普惠加拿大公司独创的双体并联式涡轴发动机，最初的PT6T-3型采用两台PT6A-34涡桨发动机的本体部分并联，将两台发动机的输出轴同时传入同一个齿轮箱内，再统一减速后输出功率。这对齿轮箱和控制系统提出了很高的要求，既要齿轮质量轻且坚固，又要承受较大载荷。同时，发动机本体和齿轮箱要使用相互独立的滑油系统，以免发生故障时相互影响。PT6T双体并联式发动机的输出功

率为1350 ~ 1500kW，目前已经生产了7250多台，累计飞行时间将近4400万小时。

在PT6A的基础上，PT6E涡桨发动机在全球通用航空领域首次引入双通道一体化电子螺旋桨与发动机控制系统，数字化程度和智能化程度大幅提高，大大简化了发动机和螺旋桨控制系统的操作，降低了飞机的驾驶难度，提高了飞行的安全性。这款数字化连接的发动机通过监控超过100个参数来支持对发动机、系统运行进行预测性分析并提供主动维护计划，这使得其大修间隔时间提高了43%，达到了5000h。同时，PT6E发动机采用了最新一代的单晶涡轮叶片，优化了涡轮冷却系统，输出功率（相比PT6A-67P）提高了10%，达到895kW（1200hp），使得飞机能够获得更高的爬升率和飞行速度。

PT6系列发动机的成功之道

到目前为止，PT6系列发动机已经累计交付超过51000台，累计飞行时间总计超过4.5亿小时，配装超过140型飞机，用户数量超过8000家，生产周期已接近60年，并且丝毫不见颓势。根据其发动机产量、配装飞机数量及生产期，PT6堪称世界上最成功的小型燃气涡轮航空发动机。

PT6发动机成功的因素是多方面的。

第一，也是最重要的一点，世界航空工业从第二次世界大战后期开始了动力燃气涡轮化的大潮，这个浪潮逐渐从军用动力扩展到民用动力，并在20世纪60年代渗透到了支线航空市场。并且在同一时期，支线航空市场的政府管制放松，支线航空工业得到了迅猛发展，扩大了PT6发动机的市场需求。

第二是其母公司普惠公司在技术上的支持和把关，以及信用上的背书。普惠加拿大公司在设计PT6发动机的前后，都与普惠公司进行了大量技术上的沟通和交流，并从中受益良多。普惠公司在航空发动机界的名声和地位也为推广PT6发动机加分不少。

第三在于功率选择上的正确决策，使得PT6发动机在当时没有同功率级别的竞争对手。1958年，135kW（250hp）左右的市场已经被艾利逊公司的250型发动机牢牢占据，莱康明公司也早已公布了具有641kW（860hp）并有具有提升空间的T53发动机的设计细节，而373kW（500hp）级别的市场还处于空白状态。

第四在于普惠加拿大公司与自由市场上的飞机公司建立了良好的沟通、合作关系。普惠加拿大公司不是设立在美国的公司，因此很难进入美国的军用发动机市场，在意识到这个问题之后，普惠加拿大公司便把重点放在了民用航空市场上，深耕支线客机、公务机以及民用直升机市场，避免了冷战结束后军用发动机市场剧烈萎缩造成的严重后果。

航空动力

（王士奇，中国航发研究院，工程师，从事航空发动机总体性能研究）