

# 改变游戏规则的技术创新

A Game-Changer Technology Innovation

## —— 普惠 PurePower™ PW1000G 型发动机

普惠发动机公司 于树宏 冀鹏 刘巨祥



于树宏

普惠发动机中国公司业务开发销售总经理。1982年获南开大学英语系学士学位。1993年获美国费城拉塞尔大学工商管理硕士学位。1996年加入普惠公司,历任客户培训经理、发动机大修销售经理、业务开发经理。

世界主要航空发动机制造商都在积极探索如何提升发动机的性能。普惠航空发动机公司的成功答案是:“PurePower™ PW1000G”——“洁静动力™ PW1000G型发动机”。

尽管飞机仍然繁忙地穿梭在空中,但是整个航空业却因飙升的油价而陷入亏损的泥沼,为了实现盈亏平衡,世界主要的航空公司不得不削减运力,有的多达20%。

新飞机的开发,特别是新材料的应用,使飞机的性能得到大幅度的提高,从而使其使用成本下降20%~30%。但这其中一多半是来自发动机性能提高的贡献。

世界主要航空发动机制造商都在积极探索如何提升发动机的性能。普惠航空发动机公司的成功答案是:“PurePower™ PW1000G”——“洁静动力™ PW1000G型发动机”(即

齿轮传动涡扇发动机,G代表了齿轮传动涡扇发动机)。

今年7月14日普惠发动机公司在范堡罗航展上宣布:具有技术突破的齿轮传动涡扇发动机,在完成了相当于40000次地面测试后,又成功地在普惠公司的波音747飞行车台上完成了空中测试。该发动机被正式命名为普惠“PurePower™ PW1000G”——“洁静动力™ PW1000G型发动机”。

同时,庞巴迪公司也正式宣布启动了100~149座级的C系列C110和C130型飞机研发和生产计划,当天还与汉莎航空公司共同对

外宣布双方签署了60架C系列飞机购买意向书。庞巴迪公司认为这种改变游戏规则C系列飞机将减少二氧化碳排放20%，飞行时的噪声水平只有当今同类飞机的20%，为航空公司运营现金成本带来15%的优势。而这些引人注目的性能提升，主要是来自作为C系列飞机唯一动力的普惠“洁静动力™ PW1000G型发动机”（原称GTF发动机）的贡献。根据庞巴迪公司C系列飞机的要求，该发动机将可提供93.5kN~102.4kN推力。

这两种型号的飞机都计划在2013年交付使用。

2007年7月，三菱重工宣布启动70座~90座级的三菱支线飞机，同时宣布选择普惠GTF发动机作为唯一动力装置。三菱飞机公司要求发动机的推力应为66.8kN~75.7kN。这一决策被评为2007年世界航空业十大事件之一。

对于目前大型发动机装机数量已达16000台、与其他两家发动机制造商三分天下的普惠发动机公司来说，为什么要投入巨资开发这种新型发动机呢？这种发动机又是如何开发出来的？其技术优势和安全可靠性和如何呢？

### 洁静环保的“绿色”发动机是普惠的设计目标

随着航空技术的进步，当今的航空发动机的安全可靠性能使机长终生都不会遇到一次因发动机故障而引发的失事事故。但是，航空公司高管们的日子却越来越不好过。随着油价的飙升，航油成本已由原来占经营成本的20%~25%左右，攀升到目前的45%，并且正在飙向50%。

面对着这样的困境，飞机制造商采取的主要对策是：尽可能多地采用新技术，减轻飞机重量。为此，在新型飞机上大量采用复合材料来替代铝合金等金属材料。其次是采

用电传操纵，减少液压装置。比如90年代中期设计的波音777飞机，其发电总量为270kW；而目前开发的波音787飞机，其发电总量高达1350kW，是前者的5倍！

其次，随着人们对环境的关注，若按国际民航组织减噪第四阶段要求以及世界航空环境保护委员会第六次会议决议对减少氮氧化物的要求，都对未来的航空产品提出了新的更高的标准。这些标准仅仅依靠飞机的改进是无法达到的。开发更清洁、安静、更绿色环保的航空发动机，是世界航空业对发动机制造商提出的历史性挑战。

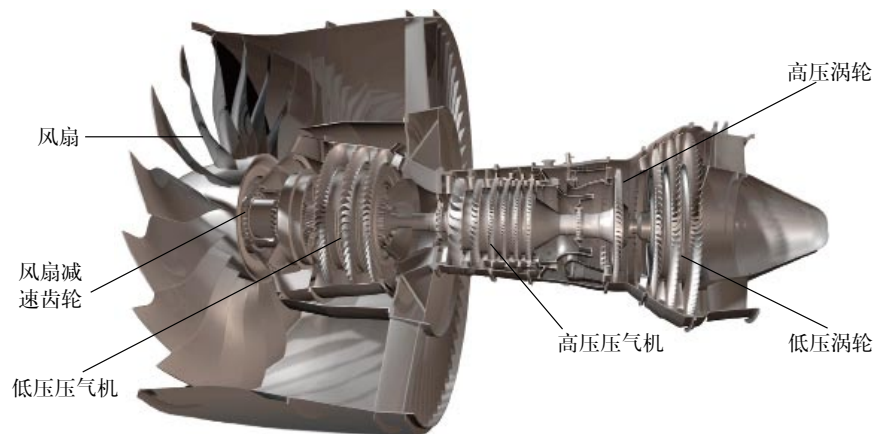
普惠发动机公司一直以生产用于双通道飞机的、推力在178kN以

上。面对54000多台发动机的大市场，普惠公司不惜投入巨资开发下一代发动机的行动，也就不足为奇了！

### 选择齿轮减速技术是实现技术突破的关键

普惠公司开发下一代发动机，历经了近20年的历程。其间对3500个不同方案和组合进行了深入系统的论证和评估，最终才确定并实现了这一最佳方案。

传统的涡扇发动机其动力的80%来自风扇。一般讲，风扇越大，涵道比越高，发动机动力和效率越好。因此追求高涵道比一直是发动机厂家不懈努力的目标。但是，传统涡扇发动机的风扇由于采用低压涡



PW1000G的结构示意图

上级别的大型发动机闻名于世。自70年代推出JT8D以后，30多年来，普惠公司还没有单独为150座级民用飞机开发过推力在66.8kN~133.5kN之间的中小型发动机。根据波音公司今年7月公布的预测分析，在未来20年世界新飞机市场中，新飞机需求量多达29400架。而150座级单通道飞机的需求量高达19160架，占整个新机市场的65%。普惠发动机公司预测从2013年到2032年20年间，全球下一代单通道飞机总需求也将高达19000架，下一代公务喷气机需求将达到8000架。两项相加，就是54000台发动机的市

场。面对54000多台发动机的大市场，普惠公司不惜投入巨资开发下一代发动机的行动，也就不足为奇了！

轮和低压压气机同轴连接的方式，也就是发动机所拥有的高压转子与低压转子运用两轴两速运转。这迫使风扇和低压涡轮均无法在其各自的最佳工作转速下运转，从而使其效率大大降低。从理论上说，低压涡轮和压气机转速越高，效率也会越高，而风扇则像螺旋桨一样，转速越低，效率越高，噪声也越小。风扇尺寸的增大又要求其转速降低以减小叶尖的线速度，从而减小阻力，提高效率，降低噪声，这样就产生了相互匹配上的矛盾。此外，在涡轮转速较低的情况下，更大尺寸的风扇，就要求低压压气机和低压涡轮有更多的级数，以提

供足够的动力来驱动风扇,这却增加了发动机的重量,反而使其效率降低,这也就是传统的涡扇发动机的设计只能在风扇和低压涡轮间选择折中转速的原因。这种折中的结果是风扇和低压单元都不能实现效率优化。因此,传统的同推力级别的涡扇发动机涵道比达到5:1时就无法突破这些局限了。

普惠公司在风扇后巧妙地使用了星型齿轮减速设计和技术,使发动



机各转子效率得到极大的优化。简单地说,就是普惠公司在原有双轴双转速发动机基础上,通过在风扇与低压涡轮连接轴间增加一个减速齿轮系统,从而消除了它们在传统涡扇发动机上的相互限制,真正意义上实现了风扇转子与低压转子的分离,满足它们各自在其最佳转速工作的目标,从而使其效率最大化。这一设计用一个减速齿轮系统创造出双轴三转速的涡扇发动机。普惠开发的“洁静动力™ PW1000G”型发动机风扇转速比传统涡扇发动机风扇转速降低了30%,提高了风扇转子的效

率,而低压涡轮和低压压气机转速比原来提高了2.8倍,提高了低压压气机和低压涡轮的效率,这一设计使发动机的涵道比达到空前的10~12:1,是当前A320飞机和波音737飞机所使用的动力的两倍。由于这一转速已非常接近传统的高压转子转速,从而减小了高/低压压气级间的压力梯度,增加了压气机的稳定性和防喘性能,从而进一步提高了发动机的可靠性。

若给发动机增加上一个齿轮箱,是否会增加发动机重量?其实不会,因为低压涡轮和低压压气机转速的提高带来了效率的提高,使低压压气机和低压涡轮在同等推力下其级数各由原来的4~5级减少到了3级,低压转子的部件数也有很大幅度的减少。同等推力的传统发动机,低压压气机和低压涡轮共有3500个叶片,而GTF发动机低压级只有2000个叶片,其中低压涡轮部分减少了900个叶片,低压压气机部分减少了600个叶片,这使得发动机的重量不仅没增加,反而减轻了10%。另一个随之而来的好处是,由于部件的减少,也使得发动机维修成本降低了40%。

齿轮减速系统对齿轮装置的技术要求极高,它的可靠性如何保证呢?众所周知,普惠公司由生产大型航空发动机的美国普惠公司和生产涡轮螺旋桨发动机以及小型涡扇发动机的加拿大普惠公司组成。而加拿大普惠生产的用于塞斯那“大篷车”、比奇1900、运12等小型螺旋桨飞机的PT6型发动机;用于ATR72、冲-8、新舟60等支线涡桨飞机的PW100系列发动机以及用于同属于美国联合技术公司的西科斯基公司直升机使用的发动机,都装有减速齿轮装置。这些发动机的总飞行使用时间已高达3.4亿多小时,减速齿轮装置一直没有出现任何设计、技术、工程方面的问题。它们一起为普惠公司的齿轮驱动涡扇发动机奠

定了坚实的基础,也积累了完整、安全可靠的技术。普惠公司还向用户郑重承诺,齿轮装置的设计可以满足发动机两个大修循环间隔的使用要求,即齿轮装置不影响发动机大修间隔。这是因为齿轮装置的设计完全没有寿命时限,也不需要特殊维护。对于用户来说,齿轮减速装置几乎是“隐身的”,完全可以认为减速齿轮系统就是风扇和低压级轴的一部分,因为在日常使用中它不用任何额外的维护,完全和目前产品的维护是一样的。

齿轮减速系统的工作原理如下:齿轮减速系统有一个由低压涡轮驱动的中心齿轮(太阳齿轮)作为动力输入,五个固定的星形齿轮均匀围绕在太阳轮周边。这五个星形齿轮被一个齿环环绕着,并驱动齿环转动。这个齿环直接带动1.90m~2.03m直径的风扇,从而产生巨大的推力。普惠公司不断深入研究,现在使用的齿轮减速系统已经是第7代的产品,而且普惠公司一直以技术创新闻名,可以相信,今后普惠公司必将继续研发出新一代更完美的减速齿轮系统。

还有人提出普惠为什么不开发无涵道开放式转子发动机——即桨扇外置式发动机呢?熟悉航空发展史的人都知道,这是因为开放式转子发动机面临着巨大的技术挑战和风险。例如开放式转子发动机带来的噪声问题;为防止桨叶失效后出现非包容性损伤,而对飞机结构进行加强带来的飞机增重问题;由于桨扇外置带来的空气动力性能下降,导致的燃油消耗增加的问题;以及外露的高速运转的巨大的转子对旅客造成的负面心理影响,等等问题,普惠公司早在十几年前,就发现了这些问题,在与航空公司和FAA共同讨论后,普惠公司另辟蹊径,采取了齿轮驱动风扇的方案,从而催生了“洁静动力™ PW1000G”型发动机。

普惠公司是一个非常注重技术

创新的公司,她在不断创新中又储备了大量新技术。为了能推出真正优秀的成熟产品,在产品研发过程中普惠始终秉持使用成熟完备技术的理念。普惠公司有一整套严格的技术开发程度完备的管理系统,早在1987年普惠公司就开始了这项为期20年的技术开发。从无涵道开放式转子验证机,到90年代开始加装齿轮减速系统的ADP验证机,一直到当前成功开发的齿轮驱动风扇发动机,真可谓20年铸一剑。其间,普惠公司还专门为此项研发设立了15个试验台架,对各项关键技术进行了大量试验和测试。



PW1000G风扇减速系统的齿轮

### 集多项新技术之大成, 造就真正环保发动机

普惠公司在“洁静动力™ PW1000G型发动机”上采用了多项创新技术,这包括全新的高速低压涡轮和压气机,即通过提高低压压气机的转速,提高级间增压比,减少了压气机的级数,缩短了压气机的长度,降低了压气机的重量和维修成本。

高效的高压压气机设计,采用新型的整体式叶盘设计,减轻了重量,提高了高压压气机的防喘裕度,三维叶片构型提高了高压压气机的工作效率。

涡轮采用大升力叶片设计以及中间涡轮框架结构,加上叶尖吹气密封结构,使得高压涡轮系统性能提高,重量减轻,降低了直接的维修航

材费用。低压涡轮系统也采用大升力叶片,减少低压涡轮级数,改进封严措施,从而使低压涡轮重量减轻,性能提高。

先进的消音板设计和轻型的结构材料使得GOODRICH公司为GTF发动机设计的短舱系统近乎完美。

正是这些先进技术的使用,才创造出这种环保、低油耗、高效、低维修成本的新一代发动机。这种新一代的发动机与当今常用的发动机相比,油耗降低12%以上,使造成雾霾气候的氮氧化合物的排放减少50%。噪声比世界民航组织规定的第四阶段的要求还低20dB。

噪声的显著降低意味着装有PW1000G发动机的飞机在临近居民区的机场进行起降时,将不用担心时间上的限制,也不会因为夜间航班的运行而影响周围居民生活。因此,航空公司在运行上会有更大的灵活度。另外,航空公司可以采用更直接的航线结构,不用考虑为规避噪声敏感地区而采用绕远的航线;因为没有了噪声问题,就可以直接使用最近的跑道进行起飞。这一切的改变,都是因为噪声的降低而带来的便捷。这些便捷又意味着航空公司将有更大的运行灵活度和更经济的机场使用费用。而最为重要的是,这将为航空公司节省大量的不必要的燃油消耗。我们曾经做过测试,由于缩短了起飞跑道的距离,航空公司每分钟将节省0.4%的燃油;由于不用绕飞以规避降噪航线,将减少飞机滞空时间,而在同等级别的飞机中,每减少一分钟的飞行,就意味着节省了1.2%的燃油消耗。

在环保方面,普惠公司“洁静动力™ PW1000G型发动机”采用最

新的TALON X燃烧室技术,即富油—淬熄—贫油装置,将燃烧控制在一定范围,然后快速降温,极大地减少了氮氧化合物的排放,并减轻重量,提高耐久性。采用该技术使得氮氧化物排放比当前同等推力级别的传统发动机降低了50%,比世界民航组织会议提出的减排要求还低50%~55%。这种齿轮减速发动机的二氧化碳的排放也大大降低,根据计算,装有齿轮减速装置发动机的飞机,每年每架飞机可以减少3000t的二氧化碳排放——这就相当于我们种植了70万棵树木的效果。这样的减排效果令人瞠目。

### 收放自如的设计, 灵活多变的产品组合

在“洁静动力™ PW1000G”的设计上,普惠首次采用了等比例缩放理念,衍生出不同推力的产品,来满足市场不同的需求。具体来说,就是采用完全相同或相似的结构形式和构型,用等比例缩放的方法衍生出外形尺寸不同,推力各异的发动机来满足市场的不同需要。这一理念的引入将大大缩短产品开发的周期,提高灵活应对市场需求的能力。

### 与世界级厂家合作, 生产世界级发动机

尤其值得提出的是普惠公司与几大世界级航空生产企业组成合作伙伴,共同开发这项创新的普惠公司“洁静动力™ PW1000G型发动机”,其中包括MTU、AVIO、VOLVO、HAMILTON SUNDSTRAND,以及GOODRICH等世界知名公司。世界一流公司的集体合作,保证了世界水准的创新型发动机的成功开发。

这种创新的普惠“洁静动力™ PW1000G型发动机”必将给世界航空业界带来全新的发展机遇,普惠将为世界航空的大发展,继续开发出更新、效率更高的发动机。(责编 侧卫)