

大涵道比涡扇发动机的发展

The Development of Civil High-Bypass Turbofans

■ 陈光 / 北京航空航天大学

1970年1月22日，配装JT9D-3A大涵道比涡扇发动机的波音747宽体客机投入使用，翻开了航空发展的新篇章；2020年，随着配装GE9X发动机的波音777X投入使用，又将迎来航空发展的新时代。

从JT9D发动机到GE9X发动机，民用大涵道比发动机经历了半个世纪的发展。期间，大涵道比涡扇发动机的发展有着天翻地覆的变化，不仅研制出的型号多达几十个，而且随着新技术（气动、结构、材料、涂层、工艺）的不断加入，使发动机的性能（推力、耗油率、排放与噪声）、可靠性、维修性及寿命均大幅提高。回顾这50年的发展历程，大致每隔10年可划分为一个阶段，每个阶段都有其特点。

20世纪70年代

20世纪70年代是民用大涵道比涡扇发动机发展初期，代表型号有普惠公司的JT9D（用于波音公司的四发747）、GE公司的CF6-6（用于麦道公司的三发DC-10）、罗罗公司的

RB211-22B（用于洛克希德公司的三发L-1011），这3型发动机分别于1970年、1971年与1972年投入使用。罗罗公司在RB211中采用了独特的三转子结构与复合材料的风扇叶片，虽然研制过程遇到了许多困难，经费超支，加上英镑贬值，不仅是3型发动机中最后投入使用的，而且公司还被迫宣布破产，直至英国政府接管后，才完成了项目研制，但其独特的三转子结构却沿用至今，成为罗罗公司的招牌设计。

这一批大涵道比涡扇发动机的涵道比约为5:1，总压比约为24:1，与当时著名的小涵道比涡扇发动机（如斯贝、JT8D）相比，均有大幅度提高。涵道比的增大使推进效率提高，总压比增大使热效率提高、耗油率下降较多，如表1所示。

这一批的大涵道比涡扇发动机

的结构设计特点：风扇叶片均采用了具有减振与加强抗外物打击能力的叶身凸肩，包容环为带凸环的合金钢制成的环形机匣，压气机叶片采用二维气动方法设计，高压压气机转子中轮盘—鼓环—轮盘间采用短螺栓的连接方式，燃油调节器采用液压机械式等。飞机与发动机的关系是：一型飞机只配一型发动机，一型发动机只用于一型飞机。

20世纪80年代

20世纪80年代是民用大涵道比涡扇发动机的蓬勃发展时期，主要的发动机型号包括：大推力级别有普惠公司的PW4000（见图1）、GE公司的CF6-80C2、罗罗公司的RB211-524D、RB211-524G/H，推力为220~280kN；中等推力级别有普惠公司的PW2000、罗罗公司的RB211-535E4，推力为

表1 20世纪60、70年代几型著名发动机的参数

发动机型号	推力/kN	总压比	涵道比	耗油率/(kg/(N·h))
斯贝	55	18.4 ~ 21 : 1	0.64 ~ 0.71 : 1	0.0816
JT8D	89 ~ 93.4	17.4 ~ 20.1 : 1	1.8 : 1	0.0762
JT9D-3	196.8	21.5 ~ 23.5 : 1	5.2 : 1	0.0661
CF6-6	177 ~ 184	24.3 ~ 24.9 : 1	5.9 : 1	0.0663
RB211-22B	186.8	24.5 : 1	4.8 : 1	0.0668

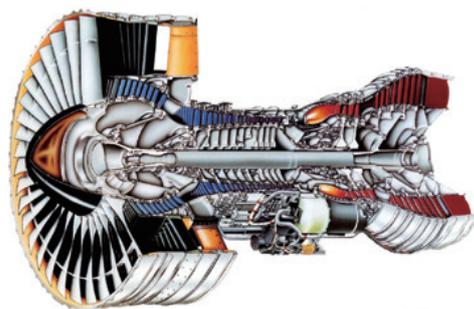


图1 PW4000发动机

表2 20世纪80年代几型著名发动机的参数

发动机型号	推力/kN	总压比	涵道比	耗油率/(kg/(N·h))
PW4000	220 ~ 260	26 ~ 32 : 1	4.8 ~ 5 : 1	0.0587
CF6-80C2	257 ~ 270	27 ~ 32 : 1	5.0 : 1	0.0592
RB211-524G/H	260 ~ 270	33 ~ 34.5 : 1	4.3 : 1	0.0593
PW2000	170 ~ 190	27 ~ 31 : 1	5.3 ~ 6 : 1	0.0593
RB211-535E4	178 ~ 191	26 ~ 28 : 1	4.3 : 1	0.0605
CFM56-3	89 ~ 104	28.8 : 1	5.0 : 1	0.0674
V2500	111	29.4 : 1	5.4 : 1	0.0602

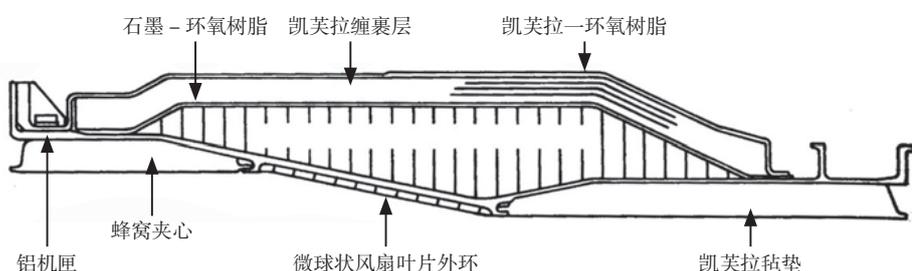


图2 CF6-80C2包容环

170 ~ 190kN；小推力级别有IAE公司的V2500、CFM国际公司的CFM56-3，推力为90 ~ 110kN。

这一批发动机的涵道比基本维持在5 : 1左右，但总压比增加较显著达到28 ~ 32 : 1，因此耗油率有明显降低。表2列出了20世纪80年代的几种代表型号的主要参数。

20世纪80年代中期，民用飞机得到大力发展，世界上两大飞机制造商推出了多种飞机型号，波音公司推出了747-400、757、767与737-300/-400系列，空客公司则推出了A300-600系列与A320系列。飞机与发动机的关系则出现了所谓的“一机多发、一发多机”的关系，即一型客机可选用多型发动机，而一型发动机又可用于多型飞机中。例如，747既可以配装普惠的PW4000，又可以配装GE的CF6-80C2或罗罗的RB211-524。发动机也是如此，PW4000既可用于747-

400，又可用于767或A300-600，CF6-80C2与RB211-524也是既可用于747-400，又可用于767或A300。

这一批发动机，除RB211-535E4外，所有风扇叶片仍带叶身凸肩；在风扇与压气机叶片上，叶型设计已由二维逐渐向准三维、全三

维发展；包容环已由纯钢制外环改为在钛或铝制薄环外缠绕几十层由凯芙拉复合材料制成的条带结构(见图2)；压气机中广泛采用了焊接转子，取代螺栓连接的结构；定向结晶、单晶涡轮叶片以及粉末冶金涡轮盘广泛被采用；全权限数字式电子控制(FADEC)系统取代了传统的燃油调节器；完善的状态监测系统 在发动机中得到广泛应用。

这其中值得一提的是RB211-535E4(见图3)，它是罗罗公司为满足757的需要，在RB211-22B的基础上缩小尺寸研发的，装此发动机的757于1984年10月投入航线运营。在距JT9D投入运营14年后，RB211-535E4的风扇叶片终于做成了取消叶身凸肩的宽弦设计，而普惠公司与GE公司则在其后11年才研发出无凸肩的宽弦风扇叶片。

应该说，RB211-535E4在大涵道比航空发动机发展历程中占据了一定地位，因为它实现了多个世界第一。第一次研发了“三明治”式的夹层风扇叶片的制造技术，使宽弦风扇叶片得以取消凸肩。第一次采用了共享式

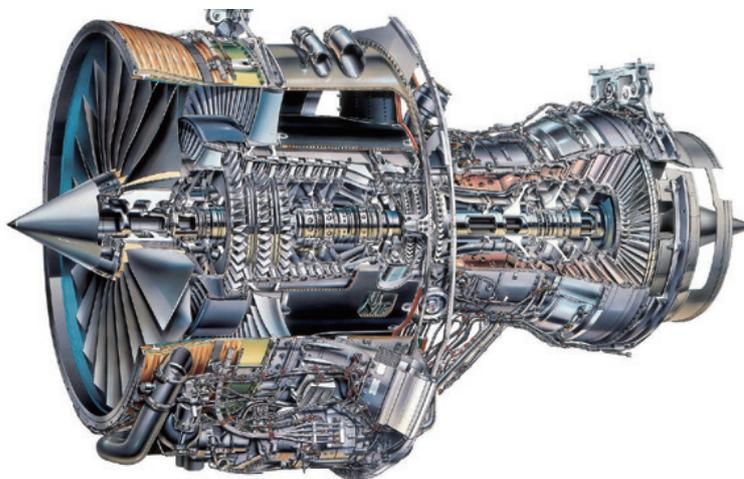


图3 RB211-535E4发动机

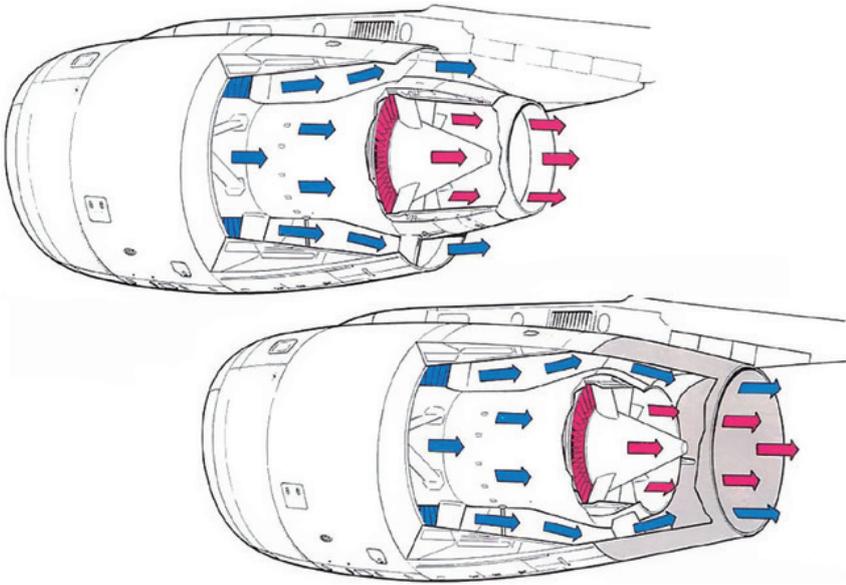


图4 分开式尾喷口(上图)与共享式尾喷口(下图)

喷口,在之前的大涵道比涡扇发动机中,外涵道的冷气流与内涵道的高温气流是分别由各自的喷口流出,而在共享式喷口中,外涵道的冷气流通过掺混器流入内涵道,与内涵道的高温气流掺混后由共享的喷口流出(见图4),可提高推进效率,降低耗油率和噪声,打开反推装置时反推力大等,但这一设计使发动机质量增加,适合远航程的发动机采用。另外,还第一次在压气机叶片中采用端弯处理,以减少端壁边界层影响,从而提高效率与喘振裕度。在涡轮中,采用复合倾斜的涡轮导向叶片,即导向叶片是采用三维设计成复合倾斜式的,即沿轴向、径向均做成曲线状,而不像常规叶片做成直线的,以减少端壁损失等。

20世纪90年代

20世纪90年代,新研发的大型客机有空客的A330/A340与波音的777:A330采用的发动机为PW4168(即风扇直径为2.54m的PW4000)、CF6-80E1与遛达700,推力范围为280~320kN;A340

采用4台CFM56-5C发动机或遛达500发动机,推力范围为140~240kN;777采用的发动机为PW4084(即风扇直径为23.87m的PW4000)、GE90与遛达800,推力范围为331~435kN。

在这一时期,发动机涵道比提高到6~8:1,总压比增加较大达到34~40:1,因此耗油率比上一时期的有明显降低。表3列出了20世纪90年代的几种代表型号的主要参数。

在这一时期,一型发动机只用于一型飞机,而一型飞机能选用三家航空发动机公司的发动机。在这6型发动机中,配装A330的3型发动

机的结构与性能基本与80年代的发动机水平相同,而配装777的发动机则有较大的提高。

777是波音公司于1990年年初提出、计划于1995年年中投入运营的大型双通道、双发宽体客机,号称是第一款无图样设计的飞机,也是一个冒极大技术风险的产品,它在大型客机的发展中登上了一个新的、具有历史意义的台阶。

777的研制目标是要在投入运营之初,就能用双发客机开通过去只能由三发与四发客机飞行的任意航线的的能力(截至20世纪90年代初,还没有任何一种双发客机在使用初期具备这种能力)。它有两个型号:777-200型,航程为7700km,载客量为364座,起飞总质量为233.6t;777-300型,航程为12230km,载客量为298座,起飞总质量为267.6t。

据统计,当时已有的双发客机,发动机总推力与起飞总质量之比为1.4~1.7kN/t,如按最小比值计,两型777客机的发动机至少应分别提供327kN与375kN推力,而在当时已投入使用的发动机中,最大的推力约为270kN。另外,据统计分析,一种客机投入运营后,起飞总质量将不断增加,运营10年后,飞机的起飞总重往往会加大25%左右,届

表3 20世纪90年代主要大涵道比发动机的参数

发动机型号	推力/kN	总压比	涵道比	耗油率/(kg/(N·h))
PW4168	284 ~ 305	32 ~ 35.4 : 1	4.8 ~ 5.2 : 1	0.0581
CF6-80E1	280 ~ 320	32.4 ~ 34.8 : 1	5.3 : 1	0.0578
遛达700	300 ~ 316	33.7 ~ 35.5 : 1	5.0 : 1	0.0573
PW4084	373 ~ 436	34.2 ~ 42.8 : 1	5.5 ~ 6.3 : 1	0.0565
GE90	338 ~ 418	39.3 ~ 45.5 : 1	8.3 ~ 8.6 : 1	0.0538
遛达800	331 ~ 422	34.5 ~ 41.9 : 1	6.2 ~ 5.7 : 1	0.0571

时，飞机所用的发动机推力也应增加20%~30%。由此可见，777需要的是一种推力至少为327kN并可增大到400kN或更大的特大型发动机。因此，研制出推力特大型发动机是777提出的第一个巨大挑战。

777要在投入运营之初就能像三发或四发客机一样具有能开通任意航线的能力，这就要求在飞机投入运营时，就能通过适航当局的180min双发延程飞行(ETOPS)认证，这是对发动机行业提出的另一个极为严苛的要求，因为适航当局从保证飞机飞行安全出发，对此作了许多严格的规定，其中对发动机的规定是：针对120min ETOPS，发动机累计工作时间超过25万小时，空中停车率低于每千小时0.05次；针对180min ETOPS，在获准120min ETOPS后已工作1年，空中停车率低于每千小时0.02次。例如，配装PW4152的A300于1987年6月投入运营，历时4年3个月后，在1991年9月才获得180min ETOPS批准。而777要在投入运营之初获得180min ETOPS批准，这就要求所研制的发动机有极高的可靠性，它的目标难度有多大是可想而知的。

但三大发动机公司迎难而上，为777研制出了3型发动机，即普惠的PW4084、罗罗的遑达800与GE的GE90，前两型是在原有性能较好的发动机基础上，改进衍生发展的。采用衍生发展新发动机虽能减少技术风险，缩短研制周期，但继续增加推力的潜力受到限制，例如用于777的PW4084是在用于A330的PW4164基础上衍生发展的，其初始推力为373.6kN，其最后型号的推力为435.9kN，其推力只增加了16%。

GE90则是采用了全新的设计方法来研制的，既能满足飞机目前所要求的推力，又考虑到今后发展需要加大推力两方面的要求，还不受原有发动机的约束，从循环参数的选择到部件结构设计以及总体结构布局均以满足设计目标而采用的一种较优化的研制途径，但研制中困难较大，周期也稍长。因此，GE90的性能及发展潜力均较好，尺寸也最大，它的风扇叶尖直径为3.124m。

波音公司与三大发动机公司共同努力，经过5年的奋战，777按计划于1995年6月交付航空公司，而且实现了能飞任何航线的能力，这也为在21世纪发展的双发客机树立了榜样，全都努力做到了首飞时即获得180min ETOPS批准。

777的3型发动机采取的新技术，能代表20世纪90年代发动机的水平，它们有以下特点。

第一，风扇叶片采用了不同的方法做成不带凸肩的宽弦风扇叶片，罗罗发展了它的第二代空心叶片，即用超塑性成形/扩散连接(SPF/DB)的方法做成带桁架心的夹层空心叶片；普惠采用在叶盆与叶背中心处开纵槽然后焊成一体制成开纵槽的空心叶片；GE公司采用了复合材料来制作叶片，在叶身的压力面上，涂有聚氨脂防腐涂层，叶背上涂有一般的聚氨酯涂层，并将钛合金薄片粘在叶片前、后缘与叶尖处。此后，新研制的大涵道比风扇发动机的风扇叶片均为宽弦。

第二，高压压气机中，GE90采用了较高的级增压比(1.36:1)；后几级中采用整体外环，以提高效率；静子叶片做成沿径向弯曲不是直线形的，如图5所示，这种称之为

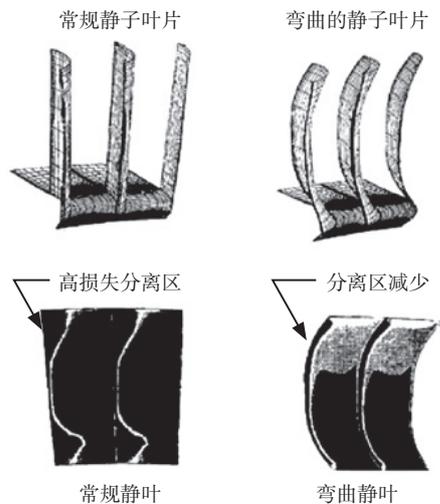


图5 常规与弯曲静叶比较

NSATAR的弯曲设计，能减小上下端壁处的分离区，因而可减小气动损失；静叶不对称安装，以降低振动应力等。

第三，燃烧室中采用浮壁式火焰筒或钻斜孔的铸造火焰筒等。

第四，高压涡轮导向叶片制成复合倾斜式的，低压涡轮工作叶片制成与气流成正交，即叶片不是直的，有的发动机的增压压气机或中压压气机的叶片也做成这种正交叶片。

另外，刷式封严也在发动机中得到应用，不仅用于油封处，也用于气体封严处。

21世纪初

进入21世纪后，绿色航空引起广泛关注，成为航空界在研制新机型与购置新飞机时必须考虑的原则。随着原油价格的不断攀升，全球性气候变暖以及对噪声的控制要求越来越严，新研制的发动机要求耗油率低、排污量少、噪声低、操纵性及维修性好、可靠性高、寿命长等。

在此期间，由于飞机制造公司与发动机公司都忙着围绕绿色航空

的要求，研发新型飞机与发动机，因此，仅有空客公司研发的四发的超大、超远、超豪华的A380客机投入运营。由于在777之后，普惠PW4000发动机已被大型客机弃用，因此在为A380提供发动机时，普惠只好与GE合作，成立发动机联盟公司，研发了GP7200；罗罗为A380推出了遛达900发动机。

另外，GE为满足波音加大航程的777-300ER与777-200LR的需要，在GE90的基础上发展了GE90-115B，它的额定起飞推力为511kN，但在2001年11月的试车中，推力达到了569kN，创造了世界纪录，使GE90-115B成为世界上推力最大的航空发动机，直至今日仍没有被其他发动机超越。

在这一时期，发动机的涵道比与总压比均比20世纪90年代的发动机高，因此耗油率降低较多。表4列出了21世纪初的3种代表机型的主要参数。

在这一批发动机中，GE90-115B是在GE90的基础上发展的，以往衍生发展推力加大的发动机采用的措施是核心机不动，通过加大风扇直径和增加压气机与低压涡轮级数来加大推力，总体结构形式基本不变；但在发展GE90-115B时，不仅核心机中的高压压气机由10级减少成9级、低压涡轮的级数未改变外，风扇转子的支承方式做了大的改动，彻底改变了GE公司采用了近30年的传统结构。

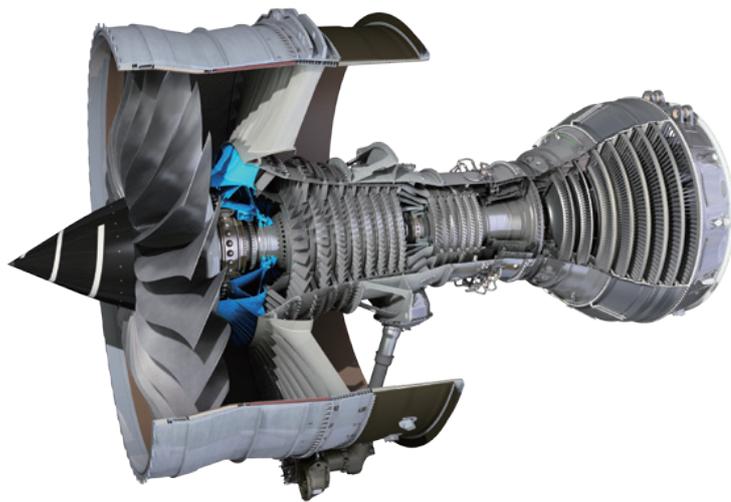


图6 遛达XWB发动机

用于A380的两型发动机的基本结构沿用了20世纪90年代的技术，例如，GP7200的核心部分是将GE90-115B的核心按72%的比例缩小而成，低压部分则沿用了PW4084的设计；在遛达900中，中、高压压气机是由遛达800按90%的比例缩小而成，燃烧室也是遛达800的缩小型，但风扇的直径却由遛达800的2.8m增大到了3m，因此涵道比由6.2 : 1增大到8.5 : 1。

21世纪10年代

在2010—2020年期间，不仅有3款性能更好的飞机先后投入运营，即2011年投入运营的787、2014年投入运营的A350XWB与将于2020投入运营的777X，而且一些老龄飞机也换装了21世纪发展的新动力，提高了客机的经济性、降低了排污及

噪声，这些飞机包括由A320升级为换装新发动机的A320neo、由737NG升级为换装新发动机的737MAX，以及由A330升级为换装新发动机的A330neo，这3款飞机也是在这一个10年中先后投入运营的。这些飞机均为双发的且都在投入航线运营之初得到适航部门180min ETOPS的批准，即具备能执行飞行世界上任何航线的能力。

787可配装GE的GENx发动机与罗罗的遛达1000发动机，A350XWB则仅选用罗罗的遛达XWB发动机（见图6），777X则选用GE9X发动机。在飞机与发动机的关系中，除787外均是“一机对一发，一发对一机”的关系。罗罗还在遛达1000的基础上采用遛达XWB的一些新技术发展了遛达1000 TEN。

虽然有两型发动机可供787选择，但发动机可以互换，这是在其他飞机上未能做到的。飞机客舱增压用的空气一改传统的由高压压气机引气的做法，而是由每台发动机各驱动两台大功率交流发电机为客舱增压系统提供动力，同时还驱动

表4 21世纪初主要大涵道比发动机的参数

发动机型号	推力/kN	总压比	涵道比	耗油率/(kg/(N·h))
GE90-115B	511	42 : 1	9 : 1	0.052
遛达900	310 ~ 340	36.5 ~ 39 : 1	7.7 ~ 8.5 : 1	0.0528
GP7200	311 ~ 340	45.6 : 1	8.7 : 1	0.0528

以前由发动机驱动的液压泵。

在遛达1000中，将由高压转子驱动附件的传统设计，改为由中压转子驱动附件，但在发动机启动时，起动机还是驱动高压转子，因此，在附件传动系统中设置了一套复杂的转换装置。

在换装了新发动机的客机中，A330neo采用了在遛达700的基础上发展的遛达7000发动机，737MAX采用了LEAP-1B发动机，A320neo则有LEAP-1A与PW1100G发动机供用户选择。LEAP发动机是CFM国际公司在CFM56-7B的基础上，引进了许多新发展的技术研制成的系列发动机，我国的C919客机采用了LEAP-1C发动机。

普惠公司则被挤出大型客机动力市场，但其新研制的中等推力齿轮传动涡扇(GTF)发动机(PW1000G系列)，不仅用于A320neo，还用于日本三菱公司的MRJ支线客机、巴航工业的E190E2、空客A220以及俄罗斯的MC-21。

可以看出，21世纪10年代是民用涡扇发动机前所未有、蓬勃发展的新时代，表5列出了21世纪10年代主要发动机的参数。

表5 21世纪10年代主要大涵道比发动机的参数

发动机型号	推力/kN	总压比	涵道比	耗油率/(kg/(N·h))
遛达1000	284 ~ 329	50 : 1	10 ~ 11 : 1	0.0503
GE _{nx}	236 ~ 327	36.1 ~ 44.5 : 1	9.1 ~ 9.6 : 1	0.0500
遛达XWB	330 ~ 430	50 : 1	9.61 : 1	比遛达1000低2.75% 比GE90-115B低10%
GE9X	470	60 : 1	10 : 1	比GE90-115B低10%
LEAP-1A/-1C	106 ~ 156	40 : 1	11 : 1	比CFM56-7低15%
LEAP-1B	100 ~ 120	40 : 1	9 : 1	比CFM56-7低15%
PW1100G	160	50 : 1	12.5 : 1	A320neo的燃料消耗量比A320低16%
遛达1000 TEN	347	50 : 1	>10 : 1	比遛达1000低2% ~ 3%

表6 罗罗公司几代发动机的巡航耗油率

发动机型号	RB211-22B	RB211-524G/H	遛达700	遛达800	遛达500	遛达900	遛达1000	遛达XWB
年代	1972	1989	1995	1996	2002	2007	2011	2014
耗油率/kg/(N·h)	0.0668	0.0593	0.0573	0.0571	0.0550	0.0538	0.0493	0.0479

由表5可以看出，这一时期的发动机的涵道比高达9 ~ 12.5 : 1，总压比高达40 ~ 60 : 1，加上采用了众多新技术，使发动机的耗油率降低较多。以罗罗的发动机为例，遛达XWB比遛达1000低2.75%，而遛达1000与40年前的RB211-22B相比，降低了近25%，表6示出了罗罗公司几型发动机耗油率变化。

GE公司的发动机中，GE_{nx}巡航耗油率比GE90低6.9%，比CF6-80E1低15.4%，而GE9X比GE90低10%。

GE9X是最新的发动机，由于其风扇直径为3.4m，被称为世界上最大的涡扇发动机，但其推力小于GE90-115B；它的发动机风扇叶片采用了第四代碳纤维复合材料，加上采用了先进的三维掠形设计，使风扇叶片后掠更大、叶弦更宽、叶片更薄，叶片数量为16片，成为风扇叶片数最少的涡扇发动机。

结束语

在最新型发动机中，各种性能指标均比20世纪的发动机有较大的提高，但在研制与使用过程中，却发生过多种罕见的故障。例如，遛达900与遛达1000，由于在中压转子中没有采取防止传动轴折断时中压涡轮飞转的安全设计，几乎在同一时间都由于制造过程中的粗制滥造出现了中压涡轮盘非包容的严重故障，遛达900的故障差点造成A380机毁人亡的重大灾难。遛达1000的中压涡轮叶片涂层过早脱落，使叶片腐蚀断裂，造成诸多航空公司大量787停飞。GE_{nx}因为采用了新的拧紧大螺母用的干润滑剂，造成低压涡轮轴在很短的时间内出现3次断裂故障。PW1100G在使用中出现轴承腔漏油、火焰筒通气孔堵塞、停车后转子热弯曲等。遛达1000与PW1100G的故障还造成在一段时间内，配装遛达1000的787与配装PW1100G的A320neo，在总装线上无发动机可装的窘境。在20世纪投入使用的几十型发动机中，却很少出现类似的故障，事实说明在发动机研制中提高发动机性能时，绝对不能忽视发动机的可靠性。我们在研制新发动机时，一定要认真吸取这其中的经验教训。

航空动力

(陈光，北京航空航天大学退休教授，著名航空发动机专家)