

大涵道比涡扇发动机风扇叶片的变迁

Changes of Fan Blades of High-Bypass-Ratio Turbofans

■ 陈光

从1970年先后投入使用的JT9D与TF39发动机，到2020年将要投入使用的GE9X，大涵道比涡扇发动机的发展正好经历了50年。这50年中，大涵道比涡扇发动机的变化令人眼花缭乱，其中，风扇叶片是变化最大的构件之一。

第一款大涵道比涡扇发动机风扇叶片的诞生

TF39发动机是世界上第一型大涵道比涡扇发动机，也是唯一一型将增压级装在风扇前的发动机。TF39是在J79发动机的基础上衍生发展而来，将去掉第一级压气机的J79作为核心机，在前端装上一级风扇，风扇前再装一级增压级（被称为 $1\frac{1}{2}$ 级风扇，如图1所示），由6级低压涡轮驱动。

分流环将外涵气流与内涵气流分开，其尖部距风扇叶片叶根较近，说明由风扇叶片流出的空气大部分流入外涵道，仅少量的空气进入核心机，由此产生高达8的涵道比，这不仅在当时（20世纪六七十年代）是最高的，而且在其后20多年一直保持着最高的纪录，直至1995年才被GE90发动机（涵道比为9）超过。

其他大涵道比涡扇发动机的增压级均装在风扇叶片之后，将风扇后流入核心机的部分空气进一步增压，而在TF39中，经过前置增压级增压后的空气仅一部分流入核心机，另一部分则流入外涵道。另外，不同于其他大涵道比涡扇发动机的风扇前均无进口导向叶片，TF39发动

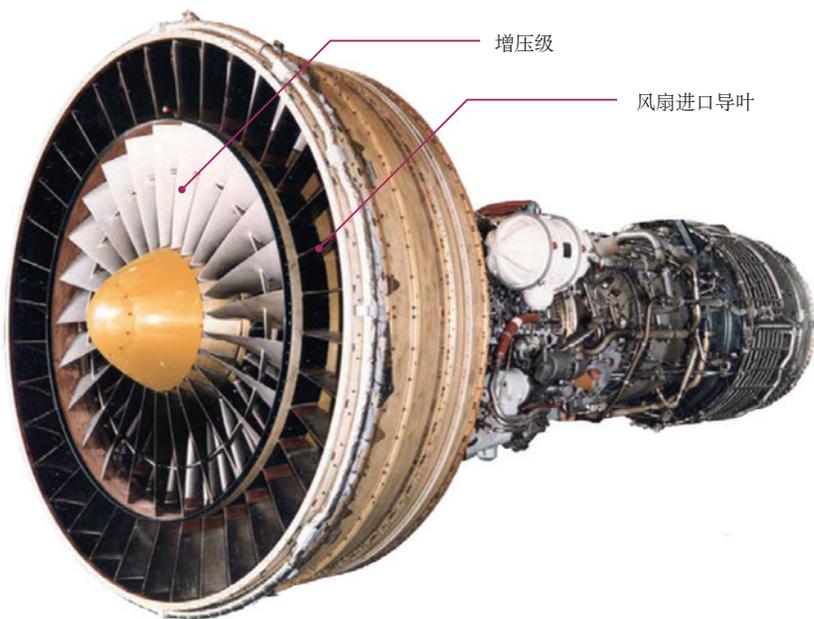


图1 TF39发动机

机由于风扇前有增压级及包容气流通道的罩环，罩环通过36个叶片与风扇机匣相连，这36个叶片成为风扇外部的进口导向叶片。

早期采取的防振与防撞措施

风扇叶片薄而长，又处于发动机进口处，在设计中需解决两大问题：一是叶片振动问题；二是抗外物，特别是飞鸟撞击的问题。为此，在

大涵道比涡扇发动机发展初期，基本上是通过在叶身距叶尖三分之一附近处增加一个凸肩（个别的有两个凸肩），或者增加叶冠来解决的。

带凸肩的风扇叶片

最初投入使用的JT9D发动机风扇叶片采用了展弦比为4.6的窄弦设计，叶身上有两个凸肩，如图2所示。后续的JT9D-7R4将展弦比减小为3.8后，叶身上只做一个较大的凸



图2 带双凸肩的风扇叶片

肩，其他发动机也均只带一个凸肩。

在带一个凸肩的风扇叶片中，两侧的凸肩端面分别与相邻叶片的凸肩端面相抵，形成整环，如图3所示。这样，叶片由无凸肩的一端夹持变为两端夹持，增加了刚性，提高了自振频率；另一方面，一旦叶

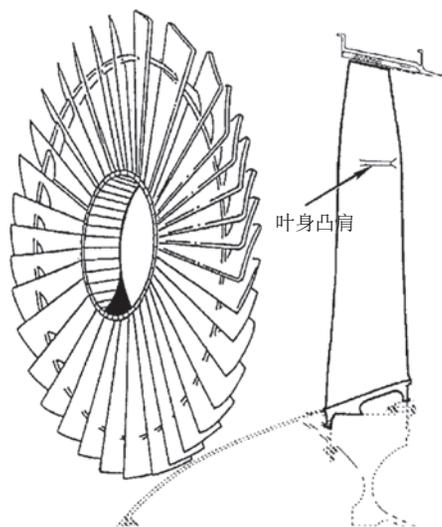


图3 风扇叶片带中间凸肩的风扇部件

片振动起来，相邻的凸肩端面之间相互干摩擦，吸收振动能量，达到减振的目的。由于凸肩端面在工作中会与相邻叶片凸肩相互高速摩擦，为此，须在凸肩端面上喷涂耐磨涂层。风扇叶片带凸肩形成整环后，也增加了抗外物特别是飞鸟撞击的能力。

然而，风扇叶片采用叶身凸肩也会带来一些问题：首先，带凸肩后，叶片加工变得困难得多；其次，凸肩不仅增加了叶片质量，使叶根处承受的应力增加很多，而且在凸肩与叶身交接处，凸肩对叶身还产生一个附加的弯矩，使该处应力状况变得复杂；更重要的是，凸肩对风扇的性能影响较大——气流流过凸肩时会在其后产生紊流区，不仅缩小了有效的气流通道面积，而且使压力损失加大，如图4所示，这不仅会使风扇效率降低，直接使发动机耗油率上升，还会使风扇的喘振裕度变小。因此，自从带凸肩的长风扇叶片出现后，设计人员就开始尝试采取措施来取消凸肩，但由于困难很大，直到20世纪80年代初期，小展弦比叶片的出现才使得各种努力初见成效。

带叶冠的风扇叶片

叶冠是涡轮工作叶片常用的设

计，但在F101与CFM56-2发动机的风扇叶片上也得到了采用，并且它们的叶冠上还有两道封严篦齿。采用带冠的风扇叶片，不仅可以解决叶片的振动问题，而且可以减少叶尖间隙处的漏气损失，提高风扇效率。但是，叶冠不仅增加了榫根处的载荷，而且在叶冠与叶尖交界处还存在较大的弯曲应力。为此，采用带冠叶片时，须加大叶栅稠度，以增加叶片数、缩小叶冠周向尺寸、降低叶冠质量。例如，CFM56-3（风扇叶片不带冠）的风扇叶片数为36片，而CFM56-2的风扇叶片却多达46片。带冠的风扇叶片不被采用的主要原因不仅在于前述的叶片强度问题，还在于抗外物打击的能力不如采用中间减振凸肩的好，因此风扇叶片带冠的设计没有得到推广。

当前采取的减轻质量的措施

如果将风扇叶片由大展弦比改成小展弦比，叶片就变得又宽又厚，振动与外物撞击的问题当然就会迎刃而解。但是，又宽又厚的叶片会大幅增加质量，这对叶片榫根与轮盘的强度提出更高要求。在大涵道比涡扇发动机发展的前10~20年中，罗罗公司花费了14年时间率先解决了降低宽弦风扇叶片质量的问题，

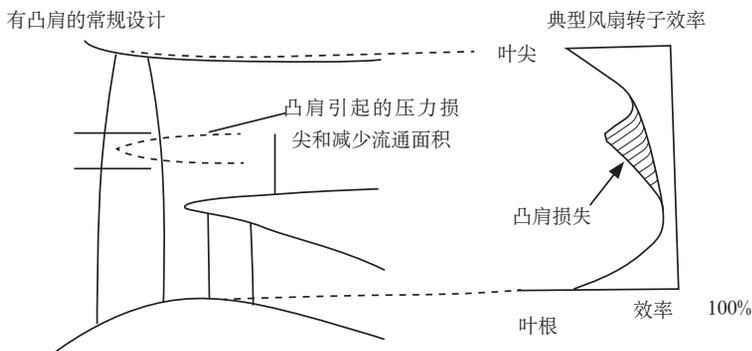


图4 风扇叶片带凸肩后使风扇效率下降

而普惠公司与GE公司直至1995年才将没有风扇凸肩的发动机投入使用，花费了近25年时间。

带蜂窝的夹层结构宽弦风扇叶片

20世纪80年代初期，罗罗公司发展了一种带蜂窝的夹层结构宽弦风扇叶片，如图5所示。这种叶片由两片经过化学铣削成型的钛合金面板，夹上由钛合金制成的蜂窝芯板，在高温炉中经过扩散连接处理将三者连接成一体，然后在模中扭转成最终型面。这种风扇叶片既具有较好的抗振和抗外物打击的能力，质量又轻。该叶片首先用于RB211-535E4发动机，该发动机于1984年10月装在波音757飞机上投入使用。随后，V2500等发动机的风扇叶片也采用了这种设计。

RB211-535E4发动机采用的宽弦风扇叶片，由于取消了凸肩，风扇性能有明显的改善，在巡航条件下，风扇转子的绝热效率提高了2%~4%，风扇轮毂处的效率提高了2%~4%，喘振裕度也得到改善。由于风扇效率的提高，发动机耗油率可降低4%以上。

用于波音777的三型发动机风扇叶片

1990年年初，波音公司提出

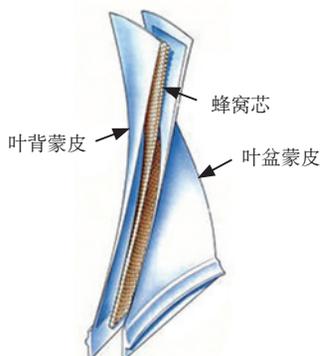


图5 带蜂窝芯的夹层结构宽弦风扇叶片

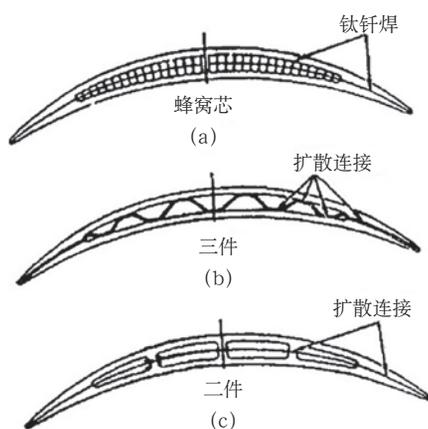


图6 三种钛合金空心风扇叶片剖面图

在5年内研制一款新型双发、双道通、能执飞任何航线的波音777大型客机。三大发动机公司均为波音777提供了发动机，即普惠公司的PW4084、GE公司的GE90与罗罗公司的遛达800。这三型发动机最大特点之一是均采用了宽弦风扇叶片。为了减轻风扇叶片质量，三家公司采取了不同的措施。

如图6(a)所示，罗罗公司在RB211-535E4风扇叶片的基础上发展了该公司的第二代空心宽弦风扇叶片，其叶型剖面如图6(b)所示。这种被称为扩散连接/超塑性成形(DB/SPF)的叶片的外形仍然由钛合金的两个面板组成，但两个面板间夹的不是蜂窝芯板，而是由薄片形成的桁架与面板连接组成了一种质量轻且承力特性好的结构。这种叶片由于中间薄板参与受力，因此，面板可以做得更薄，其质量比带蜂窝芯的叶片轻1/3。

普惠公司的风扇叶片是采用钛合金做成空心的结构。该型叶片先在两面板的内侧铣出一些纵向槽，再用扩散连接法将面板连接起来，形成空穴，如图6(c)所示。这种叶片与罗罗公司的叶片相比，显然结构要简单得多，但质量也最大。

GE公司的GE90发动机的风扇直径是当时最大的，达到3.142m，叶片高达1.22m，叶尖处的弦长0.53m，榫头宽0.305m。这种大型叶片如果采用钛合金材料，即使做成空心结构，其质量也将很大，榫头处的强度也难解决，于是GE公司决定用复合材料来做叶片。

用于波音777的三种发动机风扇叶片，采用了不同减轻叶片质量的措施。从结果上看，罗罗公司的DB/SPF叶片最轻，复合材料的叶片次之，普惠公司的叶片最重，见表1。

复合材料风扇叶片

早在20世纪60年代末，罗罗公司在研制RB211-22B时，风扇叶片就采用了复合材料，它具有质量轻、抗振性能好的特点，但最终却没能通过抗鸟击的试验，不得不在后期改用钛合金来做风扇叶片。因此，当GE公司宣布GE90的风扇叶片将采用复合材料制作时，很多人持怀疑态度。GE公司之所以坚持发展复合材料的风扇叶片，是因为其已对复合材料在风扇叶片上的应用做了多年的研究，而且在20世纪80年代研制的无涵道风扇发动机(UDF)GE36的风扇叶片就已采用了复合材

表1 三种型号发动机风扇叶片参数比较

发动机型号	GE90	PW4084	遛达800
单位叶高的质量/(kg/m)	11.91	19.17	10.77

料。GE公司为GE90风扇叶片开发了该公司的第一代复合材料，并在随后的20多年时间里发展了四代：第二代用于GE90-115B，第三代用于GENx，第四代用于GE9X。目前，罗罗公司准备在遛达XWB以后的发动机中，改用复合材料风扇叶片。这些事实说明，复合材料用于制作风扇叶片已是大势所趋。

用复合材料做成的风扇叶片具有以下特点：质量轻、成本低、抗振性能特别是抗颤振性能好，具有优异的损伤容限能力。一般钛合金叶片如果在根部出现裂纹，裂纹将很快扩展，影响叶片的正常工作。但复合材料叶片即使出现大的缺口，也不会扩展。复合材料叶片受到外物撞击时在弹性变形下，能将撞击能量吸收并在叶身上重新分布，使它仍然具有较强的抗外物打伤能力。

但复合材料存在着被认为有碍其发展的腐蚀问题。对此，GE公司采取多种措施来提高复合材料叶片抗腐蚀的性能，并取得了较好的结果。例如在叶片上涂聚氨酯防腐涂层，以及采用较小的叶尖切线速度等。

在设计GE90时，对复合材料做

成的风扇叶片虽然采用了防鸟撞的措施，但是为了确保在大鸟撞击下也能正常工作，风扇设计成小的叶尖切线速度（371m/s），相应的压比也小。据分析，外物打在叶片上的撞击能量与叶尖切线速度的二次方成正比。在投鸟取证的试验中，风扇叶片承受了3.6 kg大鸟撞击的考验。

GE9X的风扇叶片采用了GE公司的第四代碳纤维复合材料。该复合材料采用了刚性更高的碳纤维与新的环氧树脂，为了增大叶片的强度，叶片前缘包覆的钛合金薄片改为合金钢的薄片，因此叶片可以做比GE90、GENx叶片更薄；由于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（如图7所示）、叶片数更少（16片，GE90为22片，GENx为18片），这也使GE9X成为所有大涵道比涡扇发动机中风扇叶片最少的发动机。由于风扇叶片数少，叶身较薄，加上采用了最新的气动设计，使空气在风扇中流通能力加大，在同样的风扇叶尖直径下，发动机推力可增大；气动性能好，提高了风扇效率；由于风扇叶片采用了第四代复合材料制作，

提高了叶片强度，使风扇叶尖可采用比GE90高的切线速度，不仅提高了风扇效率，而且提高了低压涡轮转速，使低压涡轮效率增大。较薄的复合材料风叶片质量较轻，可减轻支承风扇转子的结构质量，可减少发动机总质量。因此，有人用“薄、尖、弯”三个字形容GE9X风扇叶片的特点。

LEAP发动机的风扇叶片是用三维编织树脂模传递成形(3D WRTM)的方法制作的，它的碳纤维不是简单层叠在一起，而是采用三维技术编织形成网状结构，使其更加坚固，随后注入树脂并在高压容器内固化。这种叶片不仅质量轻、耐久性好，抗外物打伤能力强、抗振动性能好，而且能完成复杂的型面。

叶型设计的演变

大涵道比涡扇发动机风扇叶片高度大，叶尖处半径比叶根处半径大很多，使两处的切线速度相差较大，叶尖处气流相对速度大于声速，而叶根处则远低于声速。为此，风扇叶片叶尖处需按超声速设计，叶根处则按亚声速设计，属于跨声速叶片。



图7 GE9X的复合材料风扇叶片



图8 GE90-115B风扇叶片

早期的大涵道比涡扇发动机风扇叶片叶型均用二维气动方法设计，叶片形状简单。到世纪之交，设计人员已开始使用第一、第二、第三代三维气动方法设计，且叶片做成前、后掠形。例如，GE90在改型为GE90-115B时，风扇叶片就用三维气动计算方法设计成S形后掠叶型，如图8所示，以减少超声速气流流入叶片时压力的损失，提高效率。

空客A380用的遛达900发动机的风扇叶片，做成像弯刀似的带前掠和后掠，如图9所示。这种带掠形风扇叶片效率高、噪声低且抗外物击伤能力较强。罗罗公司的最新发动机遛达XWB的风扇叶片基本与遛达900的相近，如图10所示。

风扇叶片与盘连接的演变

大涵道比涡扇发动机风扇叶片与轮盘的连接，除早期个别发动机采用枞树形榫根（RB211-22B发动机）与销钉榫根（CF34-3发动机）外，均采用轴向燕尾形榫根。

在轴向燕尾形榫根中，榫根上端面必须将叶根型面包容住，由于叶根型面是呈弧形的，要能将叶根型面全部包住，则榫根上端面的平行四边形就会过大，这样，在轮盘

装的叶片数会受到限制。如果保持叶片数不变，则只能选择将轮缘外径加大。为了克服这个问题，罗罗公司在RB211-535E4等发动机上采用了圆弧形燕尾榫根，即榫根的上端面的外形基本做成与叶根型面的外形一致的圆弧形，相应地轮盘上的燕尾形榫槽也做成圆弧形，如图11所示。采用这种榫头可以减小轮盘轮缘直径，风扇的轮毂比可取得较大，在相同的空气流量下，风扇直径可以稍小些。但是，轮盘的榫槽不能用拉刀拉出来，只能用铣床将它铣出来，增加了加工的困难与工作量。CFM国际公司在CFM56系列发动机中的最后型号CFM56-7中，风扇叶片也采用了圆弧形燕尾榫根。

大涵道比涡扇发动机的风扇叶

片一般级压比为1.5 ~ 1.7，气流在工作叶片中压缩较大，因而叶根的底座处均做成大斜度的气流通道。早期在叶片的底部做一个沿气流通道相符合的底座（或称平台），底座之下通过中间段（或称中间根或延长根）与榫根相连，如图12所示。叶片带底座后对叶片的加工带来不便，特别是对宽弦叶片更是如此。为此，有的发动机叶片先做成不带底座的叶片，然后在两叶片间装上叶间平台以形成气流通道，中间平台即叶片间垫块的两侧面需做成与叶片叶身型面相符合的型面。

结束语

自大涵道比涡扇发动机诞生以来，风扇叶片的构造、材料和叶型等经历了50年的变迁，每次演变无不为了风扇乃至整个发动机带来显著的收益，这其中的每一步都凝结着设计者的智慧和不懈努力。尽管目前风扇叶片的增压比和效率等已发展到空前的高度，但其发展的脚步并未停歇，在新的设计手段及新材料的护航下，风扇叶片无疑会在未来更加臻于完美。

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）



图11 圆弧形榫根

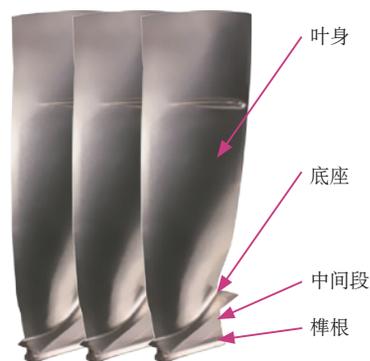


图12 带底座的风扇叶片

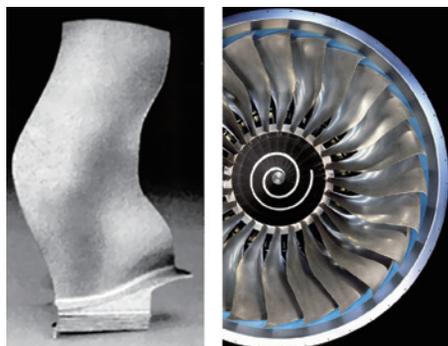


图9 遛达900的风扇叶片



图10 遛达XWB的风扇叶片