

涡轮风扇发动机 工作原理与性能讲义

(初稿)



中国人民解放军空军司令部军训部

一九七六年八月

V23.5.13

V235-13
1002

说 明

积。

为适应部队、院校航空理论教育的需要，现将《涡轮风扇发动机
工作原理与性能讲义》(初稿)印发试用。望在试用中及时提出意见，
以便充实修改。

空军司令部军训部

一九七六年八月



30231465



tio

1

ard Ai

Drific

317976

9-

目 录

第一章 涡扇发动机的一般介绍和特点	(1)
第二章 涡扇发动机压缩机与涡轮的共同工作	(11)
第一节 压缩机工作原理.....	(11)
第二节 涡轮工作原理.....	(26)
第三节 涡扇发动机的压缩机与涡轮的共同工作.....	(30)
第三章 涡扇发动机的特性	(40)
第一节 影响涡扇发动机推力和燃料消耗率的因素.....	(40)
第二节 转速特性.....	(43)
第三节 高度特性.....	(47)
第四节 速度特性.....	(50)
第五节 涡扇发动机的调节.....	(54)
第四章 斯贝 512-5W 发动机的性能	(57)
第一节 斯贝 512-5W 发动机的一般介绍.....	(57)
第二节 斯贝 512-5W 发动机的调节规律.....	(65)
第三节 斯贝 512-5W 发动机推力的调定.....	(69)
第四节 斯贝 512-5W 发动机的特性.....	(80)
第五节 斯贝 512-5W 发动机的反推力装置.....	(87)
第五章 JT3D-7 发动机的性能	(91)
第一节 JT3D-7 发动机的一般介绍.....	(91)
第二节 JT3D-7 发动机的调节规律.....	(93)
第三节 JT3D-7 发动机推力的调定.....	(94)
第四节 JT3D-7 发动机的特性.....	(98)
附 录	
第一章附录.....	(105)
第二章附录.....	(106)
第三章附录.....	(107)
第四章附录.....	(108)
几个主要公制单位与英制单位的换算.....	(114)
技术符号代号表.....	(119)

第一章 涡轮风扇发动机的一般介绍和特点

涡轮风扇发动机（以下简称涡扇发动机）自六十年代初问世以来，由于在使用中具有独特的优越性，到现在已有较大发展，并有继续发展的趋势。不带加力装置的涡扇发动机目前被广泛地用作 M 数为 $0.8 \sim 0.9$ 左右的高亚音速轰炸机和运输机的动力，带加力装置的涡扇发动机则适于作为 M 数为 2 以上的超音速歼击机、轰炸机和运输机的动力。

一、涡扇发动机的组成和工作特点

涡扇发动机是由涡轮喷气发动机（以后简称涡喷发动机）加上一个风扇和外壳而构成的。它的组成部分包括进气道、风扇、压缩器、燃烧室、涡轮和喷管，如图 1-1 所示（该图是斯贝 512-5W 涡扇发动机的示意图，图中还标明了该发动机各特征截面的站号，除第五章外，本书各种参数的注脚均以此站号为准）。

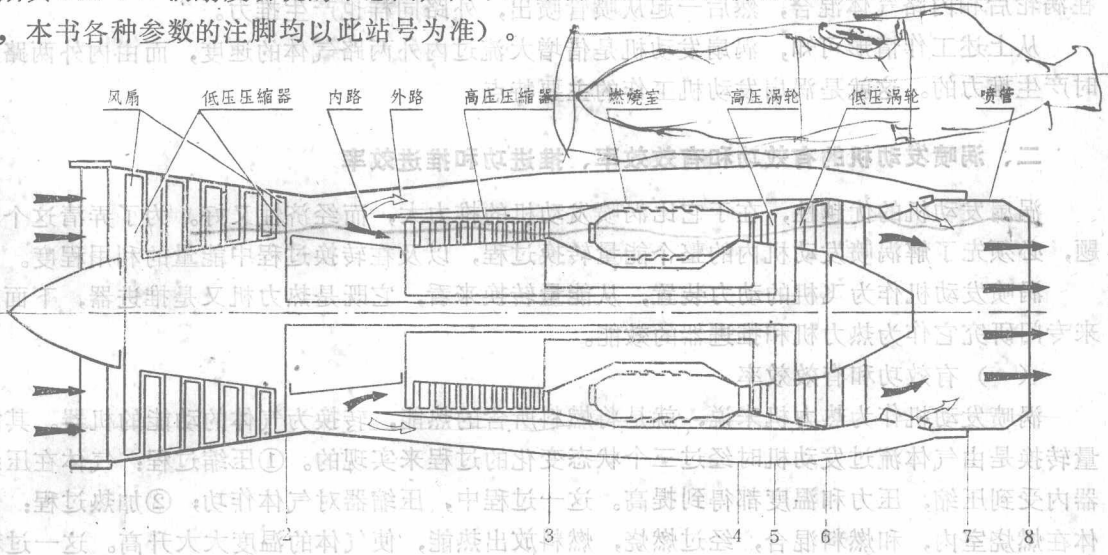


图 1-1 斯贝 512-5W 涡扇发动机示意图

这种发动机具有两个函道（或叫气流通道），内函道相当于一般的涡喷发动机，外函道则为设置有风扇的环形气流通道的。这两个函道简称为内函和外函，或内路和外路。因此，这种发动机又叫做内外函涡轮喷气发动机，或双路式涡轮喷气发动机。

为了分析问题方便，通常把风扇分成两个部分，即外函部分和内函部分。风扇的外函部分用来压缩流进外函道的空气，称它为外函风扇（简称风扇）；风扇的内函部分用来压缩流进内函道的空气，称它为低压压缩器。在低压压缩器后面的压缩器，叫做高压压缩器。涡轮也分为两部分：带动低压压缩器和风扇的涡轮叫做低压涡轮，带动高压压缩器的涡轮叫做高

压涡轮。

涡扇发动机既然是从涡喷发动机的基础上发展起来的，它的工作与涡喷发动机相比必然有着一定的共同点，同时也还有它一定的特殊点。毛主席教导我们：“对于物质的每一种运动形式，必须注意它和其他各种运动形式的共同点。但是，尤其重要的，成为我们认识事物的基础的东西，则是必须注意它的特殊点”。因此，我们在研究涡扇发动机的工作时，既要注意它与涡喷发动机的共同点，更要注意它的特殊点。

涡扇发动机工作时，空气从内外两路流过发动机。

内路的工作情形与涡喷发动机的相同。流入内路的空气先后经低压压缩器和高压压缩器，两次提高压力。在燃烧室内和燃料混合，进行燃烧，成为高温燃气。具有一定压力的高温燃气进入涡轮后，在涡轮内膨胀，推动高压涡轮和低压涡轮旋转。燃气流出涡轮后进入喷管，继续膨胀，流速增大。最后从喷口以较大的速度向后喷出，产生推力。不过，涡扇发动机内路的喷气速度比涡喷发动机的要低些。因为，燃气在涡扇发动机的高、低压涡轮内膨胀程度较大，在喷管内燃气的膨胀程度则随之减小。故内路的喷气速度比涡喷发动机的要低些。

在内路产生推力的同时，流入外路的空气，经风扇加压，压力和温度得到提高，在通道内膨胀加速，向后喷出，也产生推力。图 1-1 所示的斯贝 512-5W 涡扇发动机，其外路空气在涡轮后和内路气体混合，然后一起从喷管喷出，外路同样也产生推力。

从上述工作情形可知，涡扇发动机是借增大流过内外两路气体的速度，而由内外两路同时产生推力的。这就是涡扇发动机工作的主要特点。

二、涡喷发动机的有效功和有效效率、推进功和推进效率

涡扇发动机的优越性，在于它比涡喷发动机的推力大，而经济性又好。为了弄清这个问题，必须先了解涡喷发动机内的整个能量转换过程，以及在转换过程中能量的利用程度。

涡喷发动机作为飞机的动力装置，从能量转换来看，它既是热力机又是推进器，下面就专门研究它作为热力机和推进器的效能。

（一）有效功和有效效率

涡喷发动机作为热力机来说，就是将燃料所含的热能，转换为气体的动能的机器。其能量转换是由气体流过发动机时经过三个状态变化的过程来实现的。①压缩过程：气体在压缩机内受到压缩，压力和温度都得到提高。这一过程中，压缩机对气体做功；②加热过程：气体在燃烧室内，和燃料混合，经过燃烧，燃料放出热能，使气体的温度大大升高。这一过程中，气体得到了大量的热能；③膨胀过程：气体流过涡轮和喷管时进行膨胀，压力和温度不断下降，直至喷口处气体的压力等于外界大气压力，其温度则大大低于燃烧室出口处的温度。这一过程中气体膨胀做功，一部分热能用来转动涡轮做功，另一部分热能在喷管内用来增大气体的速度，即转换为气体的动能，还有一部分热能随气体排出发动机。

压缩机是由涡轮带动的，可以认为气体对涡轮所作的功等于压缩机对气体所作的功，它们互相抵消。因此，研究发动机内部能量的转换时，只需考虑燃烧室内加入气体的热能和喷管内转换成动能的这部分能量以及随气体排出发动机的热能。空内能用来增大每 1 公斤气体动能的这部分能量，叫做有效功，用 W 有效表示。当发动机随着飞机以速度 V 向前运动时，相对于空气来看，可以认为发动机是不动的，

而空气以相对速度 V 流入发动机，并以相对速度 C_8 流出发动机。这样，流入发动机时，每公斤气体所具有的动能为 $\frac{V^2}{2g}$ ；流出发动机时，每公斤气体的动能为 $\frac{C_8^2}{2g}$ 。因此，每公斤气体流出发动机时所增加的动能为：

$$\frac{C_8^2}{2g} - \frac{V^2}{2g} = \frac{C_8^2 - V^2}{2g}$$

这部分动能称为每公斤气体的动能增量。由定义可知，它在数值上恰好等于有效功，即：

$$l_{\text{有效}} = \frac{C_8^2 - V^2}{2g}$$

有效功既然是由加入的热量转换而来的，显然，它的大小是和加入热量的多少以及热量的利用程度有关。对每公斤气体加入的热量越多，有效功就越大；热量的利用程度越高，有效功也越大。

为了表明发动机内热量的利用程度，引入有效效率 ($\eta_{\text{有效}}$) 的概念。有效效率等于转换为有效功的热量与加入每公斤气体中燃料所含热量的比值，即：

$$\eta_{\text{有效}} = \frac{\text{转换为有效功的热量}}{\text{加入每公斤气体中燃料所含的热量}}$$

有效效率的数值，表明加入每公斤气体的燃料所含热量中，有多大的百分数转换成为有效功。它是说明涡喷发动机作为热力机的经济性的指标。有效效率越高，发动机工作起来就越经济。现代的涡喷发动机，有效效率约为 0.24~0.30。

有效效率的高低主要和压缩器对气体压缩程度的大小，即增压比的大小有关。增压比越大，加热后气体膨胀的程度也越大，所加的热量转换成有效功的部分就越多，随气体排出发动机的热量就越小，有效效率就越高；反之，增压比越小，加热后气体膨胀的程度越小，有效功也越小，随气体排出的热量就越多，有效效率就越低。

(二) 推进功和推进效率

飞机上安装发动机的目的在于得到推力，使飞机前进。涡喷发动机推力的大小按下式计算：

$$R = \frac{G_{\text{空}}}{g} (C_8 - V)$$

式中 R ——推力，单位为公斤；

$G_{\text{空}}$ ——每秒钟流过发动机的空气量，单位为公斤/秒。

推力在推动飞机前进时所做的功，叫做推进功。每秒钟所作推进功的计算式为：

$$R \cdot V = \frac{G_{\text{空}}}{g} (C_8 - V) \cdot V$$

推进功是由发动机的有效功转换而来的，这正与活塞式飞机的螺旋桨拉飞机前进所作的功是由活塞式发动机的有效功转换而来的相似。螺旋桨不可能将发动机全部有效功都转换为拉飞机前进的功，喷气式发动机也不可能将全部有效功（它等于气体的动能增量）都转换为推进功。这是由于气体离开发动机时，一部分有效功被气体以动能的形式带走了。前面把发动机仅仅作为热力机来研究时，是认为发动机不动，而空气以相对速度 V 向发动机流来的。

可是作为推进器来研究时，就必须考虑发动机的前进速度了。当发动机随飞机以速度 V 向前运动，前面的空气实际是不动的。这样，在发动机进口处气体的绝对速度为零，它的动能也为零。流出发动机时，气体的绝对速度为 $C_8 - V$ ，因此气体流出发动机每秒钟所带走的动能为 $\frac{G_{空}}{2g} (C_8 - V)^2$ ，这部分能量就是有效功在转换为推进功的过程中所损失的能量，通常把它叫做离速损失。因为，发动机在产生推力的时候，喷气速度 (C_8) 必然大于飞行速度 (V)，所以动能的损失是不可避免的。根据能量转换和守恒定律可知：推进功等于气体的有效功与离速损失的差值^①。为了从数量上表明气体的有效功转换为推进功的程度，我们引入推进效率 ($\eta_{推}$) 的概念，推进效率等于推进功与气流的动能增量之比值，即：

$$\eta_{推} = \frac{\frac{G_{空}}{g} (C_8 - V)V}{\frac{G_{空}}{2g} (C_8^2 - V^2)}$$

化简得：

$$\eta_{推} = \frac{2}{1 + \frac{C_8}{V}}$$

推进效率的大小说明气体的有效功中有多大的百分数转换为发动机的推进功。它是说明喷气发动机作为推进器的经济性的指标。现代涡喷发动机的推进效率，约为 $0.50 \sim 0.65$ 。

从上式看出，推进效率的大小和喷气速度与飞行速度之比值 (C_8/V) 有关。比值越小，则喷气速度与飞行速度的差值也越小，相对于飞行速度来讲，气体喷出发动机时的绝对速度也越小，因此离速损失越小，转换为推进功的能量就越多。

(三) 总效率

喷气式发动机作为飞机的动力装置，它的经济性的好坏，应该看其将燃料所含的热量中有多少转换成推进功。转换为推进功的热量与单位时间内加入发动机的燃料所含热量之比，叫做发动机的总效率 ($\eta_{总}$)，即：

$$\eta_{总} = \frac{\text{转换为推进功的热量}}{\text{单位时间内加入发动机的燃料所含的热量}}$$

所以，总效率的高低，才是衡量涡喷发动机作为飞机动力装置的经济性的标准。现代涡喷发动机的总效率约为 $0.17 \sim 0.19$ 。

由总效率、有效效率和推进效率的定义可知，它们三者之间的关系为：

$$\eta_{总} = \eta_{有效} \cdot \eta_{推}$$

在涡喷发动机原理中已经讲过，燃料消耗率是衡量发动机经济性的标准，而这里又用总效率来衡量发动机的经济性，这是因为二者有着它们的一致性，它们的关系可用下式^②表明：

$$\eta_{总} = \frac{3600A}{H_{热} \cdot C}$$

①关系式见本章附录。

②公式推导见本章附录。

式中 A ——功热当量 $\left(\frac{1}{427} \frac{\text{大卡}}{\text{公斤一米}}\right)$;

$H_{\text{热}}$ ——1 公斤燃料所含的热量;

C ——燃料消耗率。

上式说明，在一定的飞行速度下，总效率和燃料消耗率成反比，燃料消耗率越小，总效率就越高，发动机的经济性就越好。所以用燃料消耗率或总效率都可以说明发动机经济性的好坏。可是当飞行速度发生变化时，就只有总效率才是衡量发动机经济性好坏的唯一标准。今后在分析问题或实用中，从方便出发，有时选用总效率，而有时则用燃料消耗率。

三、涡扇发动机的优越性

前已指出，和涡喷发动机相比较，涡扇发动机的优越性是推力大，而经济性又好。下面我们就来研究这个问题。

“有比较才能鉴别。”现在我们来比较图 1-2 所示的两种发动机：(a) 为涡喷发动机，(b) 为涡扇发动机。并且认为图 (b) 的涡扇发动机是在图 (a) 的涡喷发动机的基础上发展起来

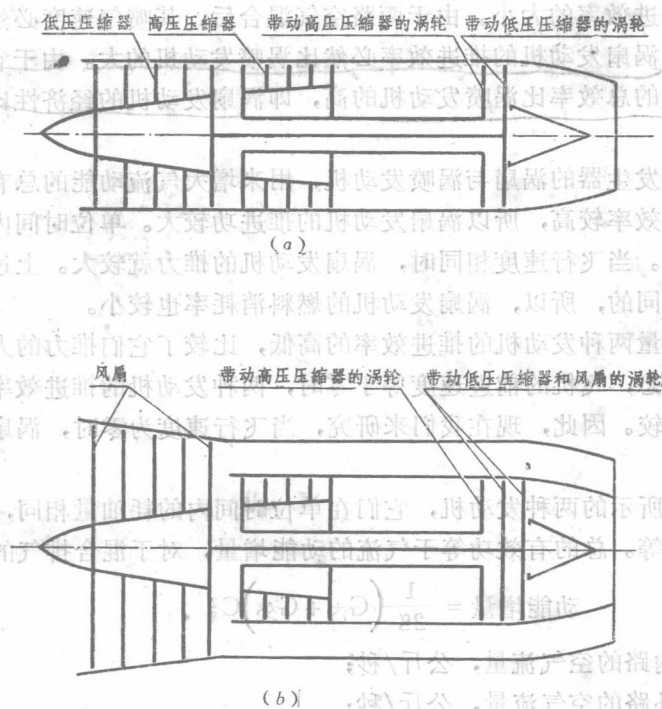


图 1-2 涡扇发动机和涡喷发动机的比较

的。即把涡喷发动机的低压压缩器的叶片加长，使它成为外函风扇；并在带动压缩器的涡轮后面增加一级涡轮，专门用来带动风扇。这样，涡扇发动机从低压压缩机进口到带动低压压缩器的涡轮出口的内函部分，与涡喷发动机的相应部分是完全相同的。通常把这个内函部分，叫做燃气发生器，或叫做核心发动机。

现在我们就来比较这两台带同样燃气发生器的涡扇发动机和涡喷发动机，在相同的飞行条件（飞行速度和高度）和工作状态（增压比和涡轮前燃气温度）下工作，看它们有那些共同点和不同点。

由于同样的燃气发生器在相同的飞行条件和工作状态下工作，所以它们内部的工作情形是完全相同的，即单位时间流过的空气量和加入的燃料量以及转换为有效功的总能量都是相同的，因而它们的有效效率是相同的。

可是，它们的推进效率却不一样。因为涡扇发动机的有效功分配于内外两路（外路的能量是一部分有效功通过涡轮和风扇传来的），就流过内路的空气来说，只有一部分有效功用来增大它的动能，因而内路的喷气速度小于涡喷发动机的喷气速度；就流过外路的空气来说，因为风扇增压比不大，又未加入燃料进行燃烧，喷气速度比内路的还小。如果将内外两路气体在喷出发动机之前进行混合，使它们的喷气速度相等，这样就可直接用前面所得的公式：

$$\eta_{推} = \frac{2}{1 + \frac{C_s}{V}}$$

来说明涡扇发动机推进效率的大小。由于两路空气混合后，其喷气速度必然小于涡喷发动机的喷气速度，因此，涡扇发动机的推进效率必然比涡喷发动机的大。由于它们的有效效率相同，所以涡扇发动机的总效率比涡喷发动机的高，即涡扇发动机的经济性比涡喷发动机的好。

因为带相同燃气发生器的涡扇与涡喷发动机，用来增大气流动能的总有效功是相同的，而涡扇发动机的推进效率较高，所以涡扇发动机的推进功较大。单位时间内的推进功等于推力与飞行速度的乘积。当飞行速度相同时，涡扇发动机的推力就较大。上述两种发动机单位时间内的耗油量是相同的，所以，涡扇发动机的燃料消耗率也较小。

前面我们通过衡量两种发动机的推进效率的高低，比较了它们推力的大小和经济性的好坏。可是，在起飞状态，飞机的前进速度等于零时，两种发动机的推进效率都等于零，用上述方法就无从进行比较。因此，现在我们来研究，当飞行速度为零时，涡扇发动机是否还具有它的优越性。

仍然采用图 1-2 所示的两种发动机，它们在单位时间内的耗油量相同，由热能转换为总的有效功的能量也相等。总的有效功等于气流的动能增量，对于混合排气的涡扇发动机，

$$\text{动能增量} = \frac{1}{2g} (G_{内} + G_{外}) C_s^2$$

式中 $G_{内}$ ——流过内路的空气流量，公斤/秒；

$G_{外}$ ——流过外路的空气流量，公斤/秒；

C_s ——内路和外路的空气混合后的喷气速度。

发动机的推力为：

$$R = \frac{1}{g} (G_{内} + G_{外}) C_s$$

从能量公式中可以看出，动能增量的大小与空气流量 $(G_{内} + G_{外})$ 和喷气速度平方 (C_s^2) 的乘积成正比；从推力公式中又可看出，推力的大小是与空气流量 $(G_{内} + G_{外})$ 和喷气速度

(C_8) 的乘积成正比的。当燃气发生器转换为总的有效功的能量一定时, 即

$$\frac{1}{2g} (G_{内} + G_{外}) C_8^2 = \text{常数}$$

时, 如果把空气流量增大到四倍, 则喷气速度只降低到原来的一半 (即 $\frac{1}{2}$)。从推力公式可知, 这时的推力却要增大到原来的两倍 (因 $4 \times \frac{1}{2} = 2$)。

因此, 可以得出这样的结论: 把一定量的有效功用来加速气流以产生反作用推力时, 被加速的空气流量越大, 虽然喷气速度相应要减小一些, 但反作用推力却要增大一些。这个原理叫做质量附加原理。

很显然, 在地面工作时, 涡扇发动机的燃料消耗率也比涡喷发动机的小, 这是由于两种发动机单位时间内的耗油量相同, 而涡扇发动机推力大的缘故。

涡扇发动机除了具有上述主要优点以外, 气体流出发动机时所产生的噪音也比较小。因为噪音的强度随着喷气速度的增加而剧烈增大, 涡扇发动机因其内外两路的喷气速度都比较小, 所以噪音强度比涡喷发动机的要小得多。

但是, “同世界上一切事物无不具有两重性 (即对立统一规律) 一样”, 涡扇发动机也有两重性。涡扇发动机的缺点是, 结构比较复杂, 重量较重, 迎风面积较大。如果把涡扇与涡喷发动机的迎风面积做成相等, 使它们的空气流量一样, 那么在同样增压比和涡轮前燃气温度的情况下, 涡扇发动机的推力就会比涡喷发动机的小些。

还应指出, 涡扇发动机只有在一定的飞行速度范围内, 才能显示出推力大和经济性好的优越性, 超过这一速度范围, 它的性能变得反而不如涡喷发动机, 这个问题将在第三章中予以分析。

四、涡扇发动机的类型

涡扇发动机的基本工作原理已如上述, 而从构造上来看, 涡扇发动机却有各种不同的型式。下面就从不同的角度来介绍涡扇发动机的类型。

(一) 从风扇安装的位置来区分

根据风扇安装位置的不同, 可分为前风扇式和后风扇式两大类。图 1-1 所示的即为前风扇式涡扇发动机, 图 1-3 所示的即为后风扇式涡扇发动机。如将现有的涡喷发动机改为涡扇

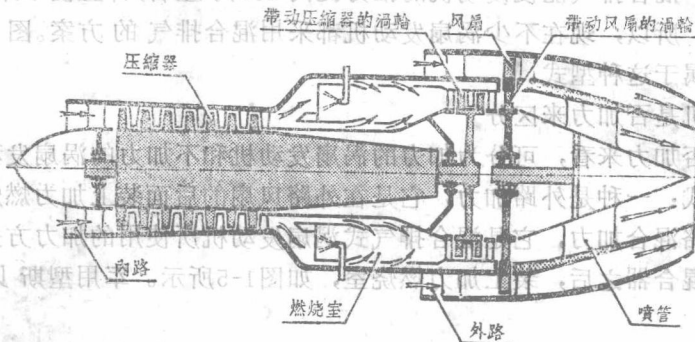


图 1-3 后风扇式涡扇发动机

发动机，采用后风扇式方案，则仅在涡喷发动机的后面加一级涡轮和风扇，对前面的燃气发生器不致发生影响，因而其改型工作就比较简单。但由于后风扇的方案有严重的缺点：第一、直径太大，因为要在直径大的涡轮外面再加上风扇，其直径必然比前风扇式的大得多；第二、涡轮叶片容易损坏，因为高温涡轮叶片的外面，再加一风扇叶片，其内部应力必然很大，且叶片容易振动，严重地影响它的寿命和使用的安全。实践证明，前风扇式比后风扇式优越得多，所以目前发展以及大量使用的，基本上都属于前风扇式涡扇发动机。

(二) 从流量比的高低来区分

外函空气流量与内函空气流量之比，叫做流量比，也叫函道比，用 y 表示。

当内函空气流量一定时，如果流量比越大，则外函的空气流量也越大。

假若从燃气发生器传给外函空气的能量一定时，流量比越大，则外函空气的排气速度越低，损失的动能就越小，推进效率就越高。因此流量比越大的涡扇发动机，推力也越大，经济性则越好。

然而，“事物都是一分为二的”，随着流量比的增大，发动机的迎风面积也增大，这样就会增加飞机的阻力和发动机的重量。此外，流量比大的发动机，随着飞行速度的增大，推力下降的速度也较快，这个问题将在第三章进一步说明。

通常将流量比为4~8的发动机，叫做高流量比涡扇发动机，它的燃料消耗率约为0.32~0.34公斤燃料/公斤推力-小时；流量比为1~3的，叫做中流量比涡扇发动机，它的燃料消耗率约为0.45~0.65公斤燃料/公斤推力-小时，例如JT3D-7即为中流量比的涡扇发动机，其流量比为1.43，燃料消耗率为0.525公斤燃料/公斤推力-小时；流量比在1以下的，叫做低流量比涡扇发动机，它的燃料消耗率约为0.6~0.8公斤燃料/公斤推力-小时，例如斯贝512—5W即为低流量比的涡扇发动机，其流量比为0.7，燃料消耗率为0.60公斤燃料/公斤推力-小时。虽然低流量比涡扇发动机，燃料消耗率较高，但比涡喷发动机的仍然要低得多。

应该指出，上述发动机的流量比数据，是指发动机的设计状态而言的，当飞行条件或发动机的工作状态变化时，发动机的流量比也会随之而变化，这个问题将在本书第三章予以阐明。

(三) 从内外路空气在排出发动机之前是否混合来区分

根据内外路空气在排出发动机之前是否进行混合，可分为混合排气式涡扇发动机与分别排气式涡扇发动机。混合排气能使发动机的推力提高1.5%左右，并且便于采用反推力装置，还有利于降低噪音。所以，现在不少涡扇发动机都采用混合排气的方案。图1-1所示的斯贝512—5W发动机即属于这种型式。

(四) 从发动机是否加力来区分

根据发动机是否加力来看，可分为加力的涡扇发动机和不加力的涡扇发动机。加力的发动机有两种加力方式：一种是外路加力，它是在外路风扇的后面装上加力燃烧室，如图1-4所示；一种是内外路混合加力，它是混合排气式涡扇发动机所使用的加力方式，在内外路空气进行混合的排气混合器之后，装上加力燃烧室，如图1-5所示。军用型斯贝MK-202就是采用混合加力的。

在加力燃烧室内，由于加入了燃料，进行燃烧，气体的温度可提高到2000°K以上，因而喷气速度提高很多，发动机的推力也增大很多。但由于加力燃烧室内，气体的压力不高，

所加的热量，利用程度就不高，燃料消耗率则显著增大。由... 增加... 燃料消耗率... 显著增大... 利用程度... 不高... 热量... 所加...

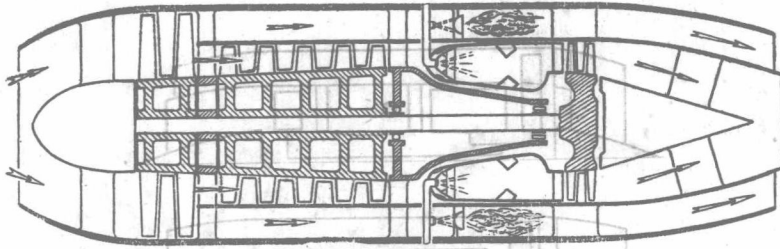


图 1-4 外路加力的涡扇发动机

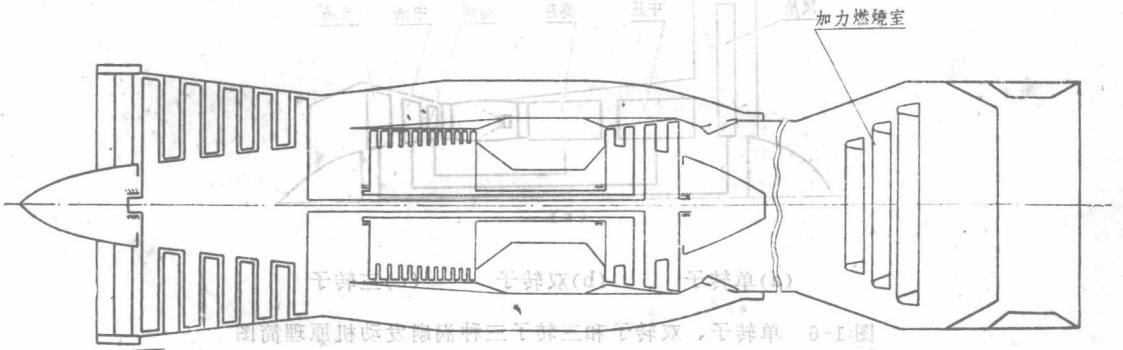


图 1-5 内外路混合加力的涡扇发动机

带加力燃烧室的涡扇发动机在使用加力时有较大的推力，可使飞机有较好的高速性能；而在不使用加力时，燃料消耗率较小，可使飞机有较好的巡航性能。因此，这种发动机适用于飞行M数在2以上的歼击机、轰炸机和运输机上。

(五) 从外函道的长短来区分

根据发动机外函道的长短不同，可分为长外函涡扇发动机与短外函涡扇发动机两种。图1-1所示为长外函涡扇发动机；本书第五章中的图5-1所示为短外函涡扇发动机。

长外函适用于混合排气的涡扇发动机和带加力的涡扇发动机。而短外函则适用于高流量比的涡扇发动机。因高流量比的发动机，其外函道的壳体直径较大，缩短其长度，就可以减小其重量和外部空气阻力。

(六) 从发动机转子的数目来区分

根据发动机内压缩器（包括风扇）和涡轮所组成的转子的数目不同，可分为单转子、双转子和三转子三种类型的涡扇发动机，其原理简图如图1-6中(a)、(b)、(c)所示。

增加转子数目的目的，在于防止高增压比的轴向式压缩器发生喘振。然而，增加转子的数目，又会使发动机的结构复杂、重量增大。

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

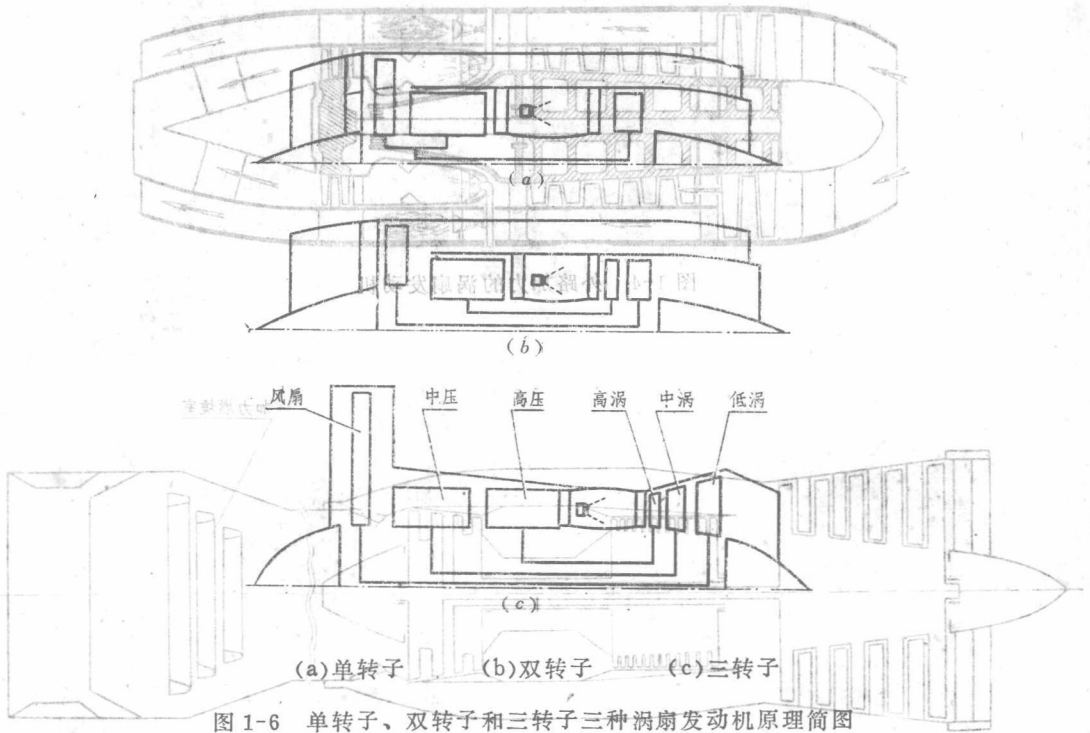


图 1-6 单转子、双转子和三转子三种涡扇发动机原理简图

图 1-6 单转子、双转子和三转子三种涡扇发动机原理简图

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

图 1-6 单转子、双转子和三转子三种涡扇发动机原理简图

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

图 1-6 单转子、双转子和三转子三种涡扇发动机原理简图

图 1-6 单转子、双转子和三转子三种涡扇发动机原理简图

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

由于涡扇发动机都用较高的增压比，所以，现在大多数都采用双转子。而有些增压比很高的发动机，如RB-211，其增压比达到26，则采用三个转子。

图 1-6 单转子、双转子和三转子三种涡扇发动机原理简图

45 45 15:50

同时长燃时取别者工本其理... 点来其其然周... 出排器能进发向能然于其单已

第二章 涡扇发动机压缩器与

涡轮的共同工作

为了了解涡扇发动机的性能参数(推力和燃料消耗率等)随发动机工作状态及飞行条件的变化规律,就必须首先弄清发动机的一些主要工作过程参数(如涡轮前燃气温度、压缩器增压比、涡轮落压比等)随发动机工作状态及飞行条件的变化关系。而这种变化关系只能从发动机内部各部件的工作规律及各部件间的相互联系、相互影响(即共同工作)中去找。发动机内各部件间的联系、影响是错综复杂的。毛主席教导我们:“研究任何过程,如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话,就要用全力找出它的主要矛盾。捉住了这个主要矛盾,一切问题就迎刃而解了。”

涡扇发动机内,风扇和低压压缩器通常用一根轴与低压涡轮相连接;高压压缩器与高压涡轮用一根轴连接。它们是发动机内的没有机械联系的两个转动部分。当发动机的某一部件工作状态发生变化时,往往通过压缩器与涡轮的共同工作来影响全局,使整个发动机的工作状况发生相应的变化。因此,在研究发动机内各部件的共同工作时,应该着重研究压缩器与涡轮的共同工作。

“只有从矛盾的各个方面着手研究,才有可能了解其总体。”所以,本章先分别介绍压缩器与涡轮的基本工作原理,然后,在此基础上进一步研究涡扇发动机压缩器与涡轮的共同工作。

第一节 压缩器工作原理

涡扇发动机的压缩器一般由多级轴向式的低压压缩器(包括风扇的内路部分)和高压压缩器组成,如图 2-1 所示。低、高压压缩器都由固定部分(静子)和转动部分(转子)组成。由于涡扇发动机的压缩器有两个无机械联系的转子,所以称为双转子压缩器。双转子压缩器

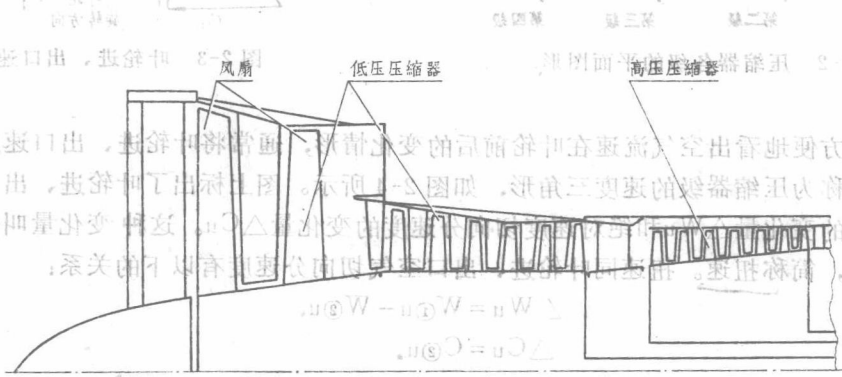


图 2-1 涡扇发动机压缩器原理简图

与单转子多级轴向式压缩机相比，固然有其特殊点，但其基本工作原理仍然是相同的。

一、增压原理

(一) 空气在压缩机内的流动情形

压缩器的静子和转子都由好几排叶片组成。转子叶片叫做工作叶片；静子叶片叫做整流叶片。一排工作叶片（通称工作叶轮）和一排整流叶片（通称整流环）组成压缩机的一级，如图 2-2 所示（图中只画出了四级）。

从进气道流来的空气，依次流经各级的工作叶轮和整流环。各级内空气的流动情形基本相同。空气以绝对速度 C_1 流向叶轮（为了分析问题方便，假设 C_1 是轴向流向叶轮的），由于叶轮是转动的，其转动的圆周速度以 u 表示。所以，相对于叶轮来说，空气是以相对速度 W_1 进入叶轮的，如图 2-3 所示。由绝对速度 C_1 、相对速度 W_1 和圆周速度 u 三个速度向量所组成的三角形叫做叶轮进口速度三角形。在工作叶轮叶片间的弯曲扩散通道中，相对速度的大小和方向都发生了变化，最后以相对速度 W_2 自叶轮流出来（见图 2-3）。由于在叶轮出口处，气流仍具有圆周速度 u ，因而气流是以绝对速度 C_2 流出叶轮的。在叶轮出口处，由气流的绝对速度 C_2 、相对速度 W_2 和圆周速度 u 三个速度向量所组成的三角形叫做叶轮出口速度三角形。

叶轮 整流环

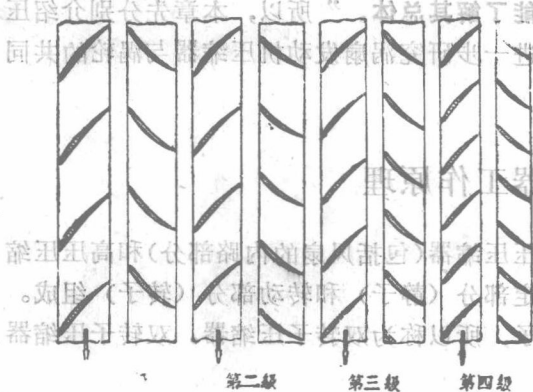


图 2-2 压缩机各级的平面图形

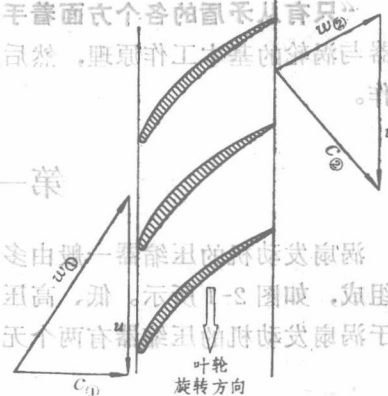


图 2-3 叶轮进、出口速度三角形

为了方便地看出空气流速在叶轮前后的变化情形，通常将叶轮进、出口速度三角形组合在一起，称为压缩机级的速度三角形，如图 2-4 所示。图上标出了叶轮进、出口相对速度切向分速度的变化量 ΔW_u 和绝对速度切向分速度的变化量 ΔC_u 。这种变化量叫做空气在叶轮中的扭速，简称扭速。扭速同叶轮进、出口空气切向分速度有以下的关系：

$$\begin{aligned} \Delta W_u &= W_{1u} - W_{2u}, \\ \Delta C_u &= C_{2u}. \end{aligned}$$

式中 W_{1u} 、 W_{2u} ——叶轮进、出口相对速度的切向分速度；
 C_{2u} ——叶轮出口绝对速度的切向分速度。

因为叶轮进口与出口的圆周速度相等，所以相对速度的切向变化量和绝对速度的切向变化量相等（参看图 2-4），即：

$$\Delta W_u = \Delta C_u$$

扭速是一个很重要的物理量，它与压缩器作功和增压的程度密切相关。

空气在整流环内的流动情形比较简单。因为整流环固定不动，所以，空气是以流出叶轮时的绝对速度 $C_{②}$ 流入整流环的。在整流环叶片间弯曲、扩散通道中，绝对速度的大小和方向都发生了变化，最后以速度 $C_{③}$ 流出整流环（见图 2-5）。

（二）空气流过压缩器时，压力是怎样增大的

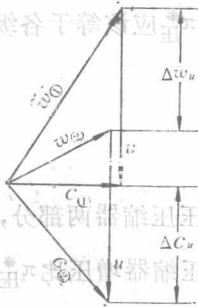


图 2-4 压缩器级的速度三角形

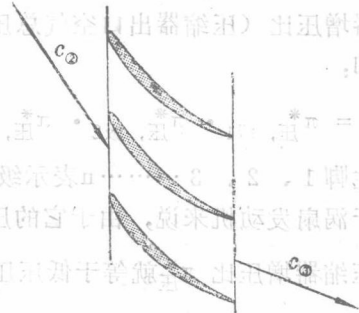


图 2-5 整流环进、出口速度的变化

空气流过叶轮时，由于叶轮叶片间通道沿空气流动方向是扩散的，所以相对速度由 $W_{①}$ 减小到 $W_{②}$ ，因而压力由 $P_{①}$ 提高到 $P_{②}$ ，温度也由 $T_{①}$ 上升到 $T_{②}$ 。在叶轮内，空气的绝对速度由 $C_{①}$ 增大到 $C_{②}$ （见图 2-3）。

空气流过整流环时，由于整流环叶片间通道沿空气流动方向也是扩散的，所以绝对速度由 $C_{②}$ 降低到 $C_{③}$ ，因而压力由 $P_{②}$ 进一步提高到 $P_{③}$ ，温度也由 $T_{②}$ 进一步上升到 $T_{③}$ 。

上述变化的产生，显然是叶轮旋转对空气做功的结果。即叶轮通过叶片对空气的作用力将涡轮传过来的功加给空气，使空气获得了能量，表现出来的就是：在叶轮中空气压力提高和绝对动能增大；在整流环中，气体的速度下降，绝对动能减小，压力再次提高。

上述单级压缩器内空气压力、温度和速度的变化情形如图 2-6 所示。

单级压缩器的增压能力可用级增压比

（ $\pi_{\text{压, 级}}$ ）来表示：

$$\pi_{\text{压, 级}} = \frac{P_{③}}{P_{①}}$$

或者用总参数①表示的级增压比（ $\pi_{\text{压, 级}}^*$ ）

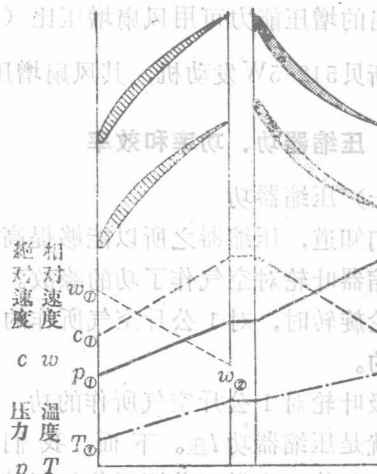


图 2-6 单级压缩器内气流参数的变化

① 关于总参数的含意，详见本章附录。

来表示:

$$\pi_{\text{压, 级}}^* = \frac{P_{\text{③}}^*}{P_{\text{①}}^*}$$

式中 $P_{\text{③}}^*$ 、 $P_{\text{①}}^*$ ——级出口、进口空气静压;

$P_{\text{③}}^*$ 、 $P_{\text{①}}^*$ ——级出口、进口空气总压。

空气流经多级压缩器时压力的提高,显然是各单级压力提高逐级积累的结果。因此,多级压缩器增压比(压缩器出口空气总压与进口空气总压的比值) $\pi_{\text{压}}^*$ 应该等于各级增压比的乘积。即:

$$\pi_{\text{压}}^* = \pi_{\text{压, 级1}}^* \cdot \pi_{\text{压, 级2}}^* \cdot \pi_{\text{压, 级3}}^* \cdots \cdots \pi_{\text{压, 级n}}^*$$

式中,注脚 1、2、3……n表示级次。

对于涡扇发动机来说,由于它的压缩器包括低压压缩器 and 高压压缩器两部分,所以涡扇发动机压缩器增压比 $\pi_{\text{压}}^*$ 就等于低压压缩器增压比 $\pi_{\text{压, 低}}^*$ 与高压压缩器增压比 $\pi_{\text{压, 高}}^*$ 的乘积,即:

$$\pi_{\text{压}}^* = \pi_{\text{压, 低}}^* \cdot \pi_{\text{压, 高}}^*$$

例如,斯贝512-5W发动机的低压压缩器增压比为2.6,高压压缩器增压比为7.98,则发动机的压缩器增压比

$$\pi_{\text{压}}^* = \pi_{\text{压, 低}}^* \cdot \pi_{\text{压, 高}}^* = 2.6 \times 7.98 = 20.7$$

顺便说明一下,涡扇发动机的风扇就其组成与工作原理来说,与轴向式压缩器完全一样。风扇的增压能力可用风扇增压比(风扇出口空气总压与进口空气总压之比值) $\pi_{\text{扇}}^*$ 来表示。如斯贝512-5W发动机,其风扇增压比为2.6,与低压压缩器增压比相等。

二、压缩器功、功率和效率

(一) 压缩器功

我们知道,压缩器之所以能够提高空气的压力,除气流通道是扩散的这个条件之外,主要是压缩器叶轮对空气作了功的缘故。

叶轮旋转时,对1公斤空气所作的功叫做压缩器功。用符号 $l_{\text{压}}$ 表示。压缩器功是由涡轮提供的。

单级叶轮对1公斤空气所作的功,称为级压缩器功,用符号 $l_{\text{压, 级}}$ 表示。各级压缩器功之和就是压缩器功 $l_{\text{压}}$ 。下面,我们从分析级压缩器功入手,然后分析压缩器功随外界条件的变化规律,为学习共同工作打好基础。

从物理学中知道,力对物体所作的功等于力和物体沿力的方向移动距离的乘积。级压缩器功的大小也可以按上述功的计算方法来推求。设工作叶轮叶片沿切线方向加给空气的力为