

第三章 压气机的工作原理与特性

第三讲 压气机特性

3.3 多级压气机非设计工作状态分析

3.3.1 多级压气机中级的工作特点

在压气机的工作中，通常只是在设计状态下能够做到各单级工作状态的匹配。这就要求在设计压气机时，设计状态下的速度 c_d 和 u 要选择得使每一个级都在最佳工作状态下工作，使之具有高的效率，并且使其具有足够的稳定工作范围。因此，多级压气机流道面积也就依此而确定，与设计状态的各级压比（或密度比）相适应。

在非设计状态下，压气机的压比会发生变化，而对于按设计点确定的几何通道面积来说，二者就会出现不匹配，导致各单级的气流速度、冲角、加给气流的功和效率等发生变化，引起压气机各单级工作状态的变化。

在多级压气机中，各级共同工作的条件是具有相同的空气流量和转速。对于 i 和 $i+1$ 两个邻近的级，其共同工作的条件可写成下列形式

$$\rho_i c_{iu} A_i = \rho_{i+1} c_{(i+1)u} A_{i+1}$$

$$u_i D_{(i+1)m} = u_{i+1} D_{im}$$

将上两式相除后，可得

$$\frac{c_{(i+1)u}}{c_{iu}} = \text{const} \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \quad (3-34)$$

显然，对于其他任意级都可写出类似的关系式。现对第一级和最后一级（Z）应用该关系式，并假设第一级进口的轴向速度等于压气机的进口速度，则有

$$\frac{c_{2u}}{c_{2a}} = \text{const} \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3-35)$$

近似认为 $\pi_c \approx \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^n$ ，其中， n 为多变过程指数，代入上式，得

$$\frac{c_{2u}}{c_{2a}} = \text{const} / \pi_c^{\frac{1}{n}} \quad (3-36)$$

上述这些式子表明，压气机中（或是一组级中）增压比的任何改变，都不可避免地伴有后面级和第一级（或前面级）流量系数比的变

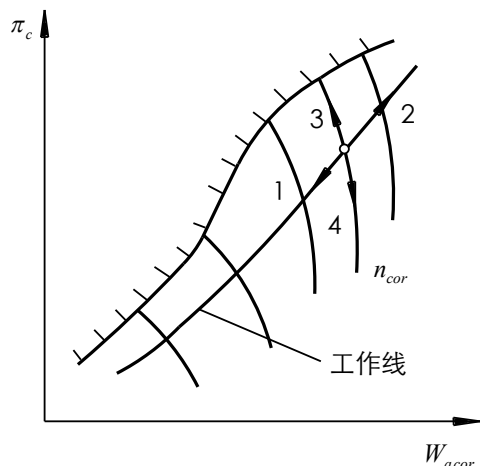


图 3-44 压气机非设计状态的四种工作情形

化。如果在 $\pi_c = \pi_{cl}$ 时，所有的级都在最佳状态下工作，然而，当 π_c 有了任何变化时都会导致某些级的工作偏离最佳状态，引起一些级在流量系数数值上的不匹配，其中最为严重的是相互离得最远的第一级与最后一级之间的不匹配。从式 (3-36) 中还可看出，当 $\pi_c < \pi_{cl}$ 时， $\bar{c}_{2a} > \bar{c}_{2a}$ ，即越往后流量系数越大。而当 $\pi_c > \pi_{cl}$ 时，则 $\bar{c}_{2a} < \bar{c}_{2a}$ ，说明越往后面，级进口流量系数越小。总的来说，在非设计状态下各级流量系数的变化情况是不相同的。

结合将在第七章飞机推进系统各部件匹配工作中进行的讨论，一般地，可把装在发动机上的压气机非设计工作状态归纳为四种典型情形，如图 3-44 所示，它们是：沿工作线换算转速小于（或大于）设计换算转速（1，2）、沿着等换算转速线增压比大于（或小于）设计增压比（3，4）。其中的工作线可有多种形式，但最有意义的就是发动机转子的共同工作线（将在第七章中详细介绍共同工作线的确定）。

(1) 换算转速小于设计换算转速

由换算转速的定义 $n_{cor} = n \sqrt{\frac{288}{T_2^*}}$ 可知，换算转速的减小可由压气机的物理转速 n 减小

或进口总温 T_2^* 增大而引起，而引起 T_2^* 增大的原因又可能是由于大气温度、飞行高度、飞行速度三个方面的变化而导致的。但由于换算转速是相似参数，在通用特性图上（发动机共同工作线一定时）代表了压气机工作点的变化，表示了一系列不同工作条件下的相似工作状态。因此，分析压气机的工作特点时，可以充分利用相似的概念。下面以大气温度升高为例来进行讨论。

当大气温度升高时， T_2^* 增大，使 n_{cor} 减小，由图 3-44 可以看出，压气机工作点沿着共同工作线向下移动， π_c 和 W_{acor} （或 $q(\lambda_2)$ ）都减小。 $q(\lambda_2)$ （或 W_{acor} ）减小使得压气机进口的轴向速度减小，即 c_{2a} 减小，而此时转速不变，所以 \bar{c}_{2a} 减小。由式 (3-36) 可知，在多级压气机中，由于 π_c 减小而小于 π_{cl} 时，则压气机后面级的流量系数 \bar{c}_{2a} 和进口流量系数 \bar{c}_{2a} 的比值大于设计状态的比值，即前面级的 \bar{c}_a 减小，而后面级的 \bar{c}_a 增大，综合这两个方面的因素，各级流量系数的变化呈现如图 3-45 的变化趋势，图中表示的是高设计增压比压气机的各级流量系数的变化情形。

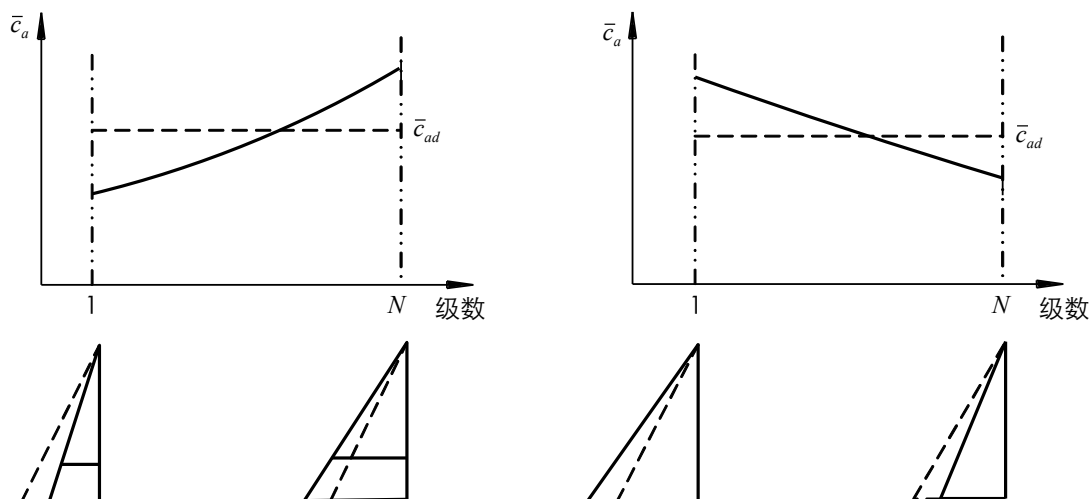


图 3-45 $n_{cor} < n_{cord}$ 时的压气机工作情形(轴向进气) 图 3-46 $n_{cor} > n_{cord}$ 时的压气机工作情形(轴向进气)

由状态相似的概念，由于物理转速减小或飞行 M 数增大或飞行高度降低都会使 n_{cor} 小于 n_{cord} 时，各级 \bar{c}_a 的变化情况均如图 3-45 所示。

根据各级进口流量系数的变化情形，就可得出其各级进口速度三角形的变化情况，如图 3-45 所示（设为轴向进气，图中虚线表示设计状态，实线表示 n_{cor} 减小的情况）。可见，如果假设在设计状态下各级的气流冲角为零，则当 $n_{cor} < n_{cord}$ 时，前面几级变为正冲角，后面几级变为负冲角，具体正冲角的级数多还是负冲角的级数多，由设计增压比的大小而定。

(2) 换算转速大于设计换算转速

因为压气机的设计转速一般情况下都是最大转速，所以在压气机实际工作中由于物理转速增大而使 $n_{cor} > n_{cord}$ 的情况不多，所以换算转速增大主要是因为 T_2^* 减小所致。

显然，这种情况下各级流量系数和进口速度三角形的变化情形与上面的分析方法相同，但结论相反，其结果如图 3-46 所示。

(3) 沿等换算转速线，空气流量减小

在这种情况下，压气机的进口温度 T_2^* 和物理转速都不变，空气流量减小（即 c_{2a} 减小），将使得第一级的进口流量系数减小而小于 \bar{c}_{ad} 。由图 3-44 可知，随着工作点沿等换算转速线上移时，压气机增压比是增大的，因而由式 (3-36) 可知，这会使后面各级的流量系数进一步地逐级减小，其变化情况如图 3-47 所示。可见，各级气流都为正冲角，且越往后正冲角越大。

(4) 沿等换算转速线，空气流量增大

这种非设计工作状态与 (3) 相反，各级流量系数的变化如图 3-48 所示。可见，各级气流均为负冲角，且逐级加剧。

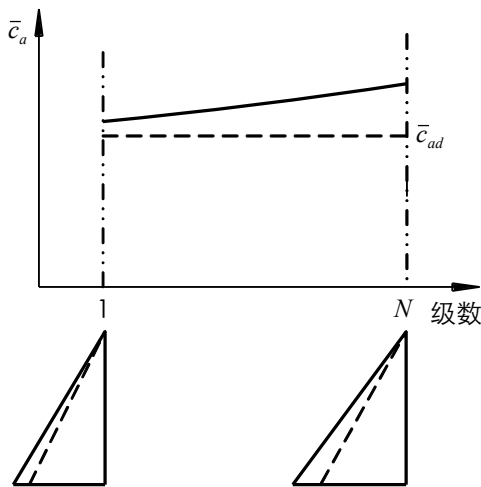
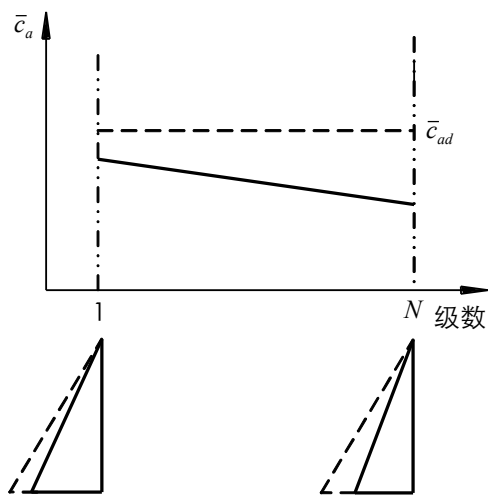


图 3-47 空气流量减小时的压气机工作情形(轴向进气) 图 3-48 空气流量增大时的压气机工作情形(轴向进气)

3.3.2 装在发动机上的多级压气机功的变化特点

由前面的分析可知，在非设计状态下多级压气机各级流动状态的变化各不相同，因而也必然会引起各级压气机对气流作功量的变化不相同，从而使整台压气机的功发生变化。而分析讨论压气机功在非设计状态下的变化，又可为今后将要讨论的发动机匹配工作及发动机工作过程参数变化规律等奠定重要的基础。

参见图 3-44，对于工作点沿等换算转速线变化时的压气机功的变化规律，在压气机流量特性的分析中已经进行了讨论，即流量减小（工作点上移）时压气机的功是增大的，反之则减小。这里不再赘述。下面来详细讨论当换算转速发生变化时，多级压气机功的变化情形，这也正是今后研究压气机功随发动机工作条件变化而感兴趣的情形。

3.3.2.1 换算转速小于设计换算转速

为了正确分析压气机功的变化，首先必须要明确的是，多级压气机功是由各级的功相加而得到的，而对于各级功的变化，可以利用式 (3-14)，即 $l_{c,st} = u \cdot \Delta w_u$ ，结合各级的流动状态变化来进行分析。因为要涉及 u 的变化，所以对 $n_{cor} < n_{cor d}$ 的情形就要分成下列两种典型情况来加以分析。

(1) 压气机的物理转速不变， T_2^* 增大。在这种情况下，由于压气机转速不变，所以 u 不变，各级压气机功的变化由 Δw_u 来决定。由图 3-45 可以看出，换算转速减小时，多级压气机中是前面级 \bar{c}_a 减小，气流冲角增大，后面级 \bar{c}_a 增大，冲角减小，它们对 Δw_u 影响结果示意地表示在图 3-49 中，可知前面级 Δw_u 增大，而后面级 Δw_u 减小，从而使前面级的功增大，后面级的功减小。那么，整台压气机的功将如何变化呢？显然，问题的答案要根据级功增大和减少的数量来确定，而级功增大和减少的数量又与 \bar{c}_a 的变化幅度相关。由式 (3-36) 可知，各级 \bar{c}_a 相对于第一级的变化幅度由增压比变化的程度来决定。对于相同的换算转速变化，若增压比减小量大，则 \bar{c}_a 增大的级数就多，增大的幅度也大，所以整个压气机功是减小的；若增压比减小的量小，则整台压气机的功就增大。若增压比的减小程度适中，则压气机的功就基本上保持不变。这样，我们就可以在压气机的特性图上以压气机功不变的工作点为界，划分出当 n_{cor} 减小时压气机功增大和减小的区域，如图 3-50 所示。在等压气机功线的左上方区域（Ⅰ）即是压气机功增大的区域，而右下方（Ⅱ）则是压气机功减小的区域。事实上，在后面的发动机匹配工作分析中可知，装机压气机工作点的走向取决于发动机各部件的共同工作，受到诸多因素的影响，要视具体情况而定。

(2) T_2^* 不变，压气机物理转速减小。在这种情况下，换算转速变化时，各级 \bar{c}_a 、冲角和 Δw_u 的变化规律与（1）相同。但是，因为压气机物理转速 n 减小，使各级的 u 减小，并在压气机功的变化中起主要影响作用（ $l_{c,st} = u \cdot \Delta w_u$ ），因此压气机各级的功均减小，从

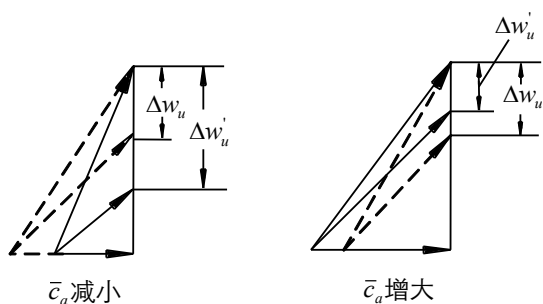


图 3-49 \bar{c}_a 变化对 Δw_u 的影响 (以轴向进气为例)

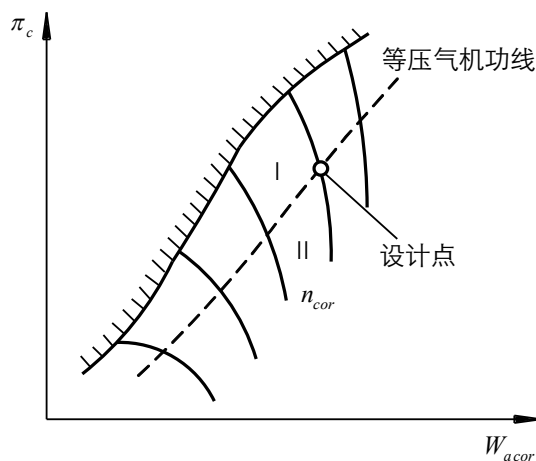


图 3-50 压气机功的变化情况

而使整台压气机的功减小。但应当注意的是，虽然各级的功都减小，但由于前后级的 Δw_u 变化不一样，所以前后级的功减小的幅度并不相同，而是前面级的功减小量小，后面级的功减小量大。

3.3.2.2 换算转速大于设计换算转速

因为压气机的物理转速 n 不可能大于设计转速，换算转速大于设计换算转速是由 T_2^* 减小而引起的，因此只考虑 T_2^* 减小的情形。与换算转速小于设计换算转速时的情形相反，当增压比的增加量大时，整台压气机功是增大的；而当增压比的增加量小时，则整台压气机功是减小的。压气机功的变化范围也如图 3-50 所示。