

# 航空叶片机原理

吴国钊等编

南京航空航天大学

V235.1 / 1042



2008047692

V235.1  
1042-1

# 前 言

本书系航空发动机原理教材中关于叶片机原理的部分，内容包括航空发动机的两大部件——压气机和涡轮的基本理论。本书是航空发动机专业本科学生必修的专业课教材。学习本书所需的专业基础知识有：流体力学，工程热力学，空气动力学和传热学。

本书是在总结历届教学实践经验的基础上编写的。我们认为，压气机和涡轮内气体流动的规律虽然有许多是类似的，可以同时讲，对比着讲，但是为了使初学的学生在理解时不易混淆，却采取分别叙述的方法，在前面讲压气机的时候不提及涡轮，在后面讲涡轮的时候，与压气机作对比。

本书注意到在教学大纲的范围内力求多反映现代叶片机发展中的一些新技术新成就，并指出尚待研究的一些重要问题。使读者对叶片机技术发展的目前水平有所了解。每章中还推荐一些参考文献，使读者便于进一步深入自学。有\*号的小节，课内不讲，供进一步自学用。



本书力求对基本原理的阐述做到由浅入深，深入透彻，并且还编有复习题，思考题和习题，使读者牢固掌握基本知识。

全书共分三章，第一章绪言，由吴国翎编写，第二章压气机，其中§2-1节到§2-5节轴流式压气机部分由吴国翎编写，§2-6节离心式压气机部分由庄表南编写，§2-7节压气机特性和调节部分由张惠民编写，第三章轴流式涡轮由郭秉衡编写，全书最后由吴国翎统一汇编。

由于水平有限，错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八六年二月

本书经过近几年采用之后，由吴国翎、胡骏和周正贵作了适当的修改，再次付印。

编 者

一九九三年九月

2008047692

# 目 录

## 第一篇 叶片机

### 第一章 绪 言 ..... 1

### 第二章 压气机 ..... 6

#### § 2-1 轴流式压气机的工作原理 ..... 6

#### § 2-2 压缩过程的基本方程和热力学图解 ..... 6

##### 一、压气机中气体流动过程所遵循的能量方程和动量矩方程 ..... 6

##### 二、热力学图示 ..... 11

##### 思考题和习题 ..... 13

#### § 2-3 轴流式压气机的基元级 ..... 13

##### 一、级是多级压气机的基本单元 ..... 13

##### 二、基元级 ..... 14

##### 三、基元级的加功扩压过程 ..... 15

##### 四、基元级的速度三角形 ..... 18

##### 五、反力度 ..... 22

##### 六、基元级内流动过程在焓熵图上的表示 ..... 24

##### 七、超音速基元级的增压原理及其特点 ..... 25

##### 八、叶型和叶栅的主要参数 ..... 40

##### 九、亚音平面叶栅的实验研究 ..... 51

##### 十、超音平面叶栅的实验研究 ..... 54

##### \* 十一、压气机叶片叶型 ..... 65

##### 思考题和习题 ..... 73

#### § 2-4 轴流式压气机级 ..... 74

##### 一、压气机中的三元流计算概述 ..... 75

##### 二、完全径向平衡方程 ..... 77

##### 三、简化径向平衡方程 ..... 79

##### 四、等环量分布规律 ..... 82

##### 五、等反力度分布规律 ..... 86

##### 六、通用规律 ..... 89

##### 七、级的流动损失 ..... 91

八、级的增压比和效率	95
* 九、风扇级	97
思考题和习题	103
§ 2-5 多级轴流式压气机	103
一、多级轴流式压气机气动设计的目的与要求	103
二、多级轴流式压气机的工作原理和设计中的—些问题	103
三、多轴轴流式压气机气动计算参数的选择	109
思考题和习题	114
§ 2-6 离心式压气机	115
一、离心式压气机的主要部件及其功用	115
二、气体在离心式压气机中的流动特点	116
三、离心式压气机的流动损失和效率	123
四、超音离心式压气机简介	124
思考题和习题	127
§ 2-7 压气机特性和调节	128
一、压气机的工作范围	128
二、压气机的流量特性及其绘制	128
三、流量特性线的变化特点	133
四、压气机进口总压和总温对流量特性线的影响	135
五、相似理论在叶轮机中之应用	136
六、压气机的通用特性线	140
七、压气机中的不稳定流态	142
* 八、叶轮机械中的气动——弹性不稳定现象——颤振	147
九、进口流场不均匀(流场畸变)对压气机性能的影响	149
十、在非设计工况下多级轴流式压气机中各级的工作特点	152
十一、涡轮燃气发动机上压气机发生喘振的条件和 扩大稳定区的方法	156
* 十二、提高轴流式压气机失速裕度的可能途径	161
思考题	166
参考文献	167
第三章 轴流式涡轮	170
§ 3-1 涡轮的工作原理	170

89	一、涡轮的工作原理	170
7e	二、涡轮中气体流动过程所遵循的能量方程和动量矩方程	171
801	三、涡轮中气体膨胀过程的热力学图解	174
801	四、叶轮机械中气体流动基本方程的统一形式	175
801	§ 3-2 涡轮的基元级	177
801	一、决定基元级速度三角形的主要参数	177
801	二、反力度	178
811	三、涡轮叶栅中的流动	180
811	四、叶型损失及其工程估算	183
811	§ 3-3 涡轮级	188
811	一、级空间的气流组织	189
821	二、级的流动损失	193
821	三、涡轮效率和涡轮功率	193
821	四、单级涡轮气动设计简介	194
821	§ 3-4 多级涡轮	199
821	一、采用多级的原则	199
821	二、主要参数在各级中的分配	200
821	三、多级涡轮的绝热效率比单级的高	201
821	§ 3-5 涡轮特性	203
821	一、涡轮的非设计工作状态	203
821	二、涡轮的相似工作条件	204
821	三、单级涡轮的特性	205
821	四、多级涡轮的特性	207
821	五、涡轮特性线的其他形式	210
821	六、用转动喷嘴环的方法调节涡轮	213
821	§ 3-6 涡轮冷却	214
821	复习思考题	217
821	习 题	218
821	参考文献	219

# 第一篇 叶片机

## 第一章 绪言

航空燃气轮机是将燃料能量转变为转轴功或飞机推进功的发动机。其原理和工作方式很早以前就建立了，但是只是在耐高温材料和具有高效率的部件能够制造出来之后，它才成为有用的动力装置。

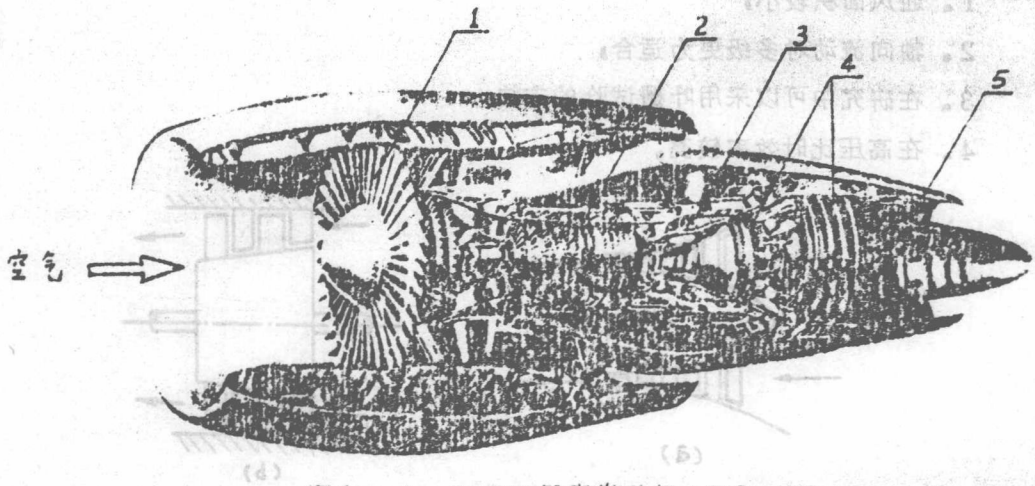


图 1-1 双涵道风扇发动机 CF6-50

图 1-1 是一台双涵道风扇航空燃气轮机<sup>[1]</sup>。空气从左方进入发动机，经过风扇 1 被压缩，其压力升高，而后分为两路，靠近轴的一路的空气，经过压气机 2 被进一步压缩，其压力进一步升高，进入燃烧室 3，与喷嘴喷入的燃料混合，燃烧，变成高温燃气，而后进入涡轮 4 中，膨胀作功，最后在尾喷管 5 中膨胀加速，高速排入大气。涡轮 4 用以驱动风扇 1 和压气机 2。尾喷管 5 排出燃气。燃气作用于发动机以反作用力，推动发动机前进。风扇后离轴较远的一路空气，流经环形通道最后也排入大气，产生附加推力。

风扇、压气机、燃烧室和涡轮组成一个部份，涡轮发出的功正好供给风扇和压气机消耗，独自成立一个能量平衡系统。对于发动机来说，只起了发生高温和一定压力的燃气的作用，称为燃气发生器。对燃气发生器加上不同的进气管道和尾喷管就得到不同形式

的航空燃气轮机。

由图 1-1 可以看出, 风扇, 压气机和涡轮有一个共同的特点, 就是在转动轴或转动轮上装有许多叶片, 能量的转换是通过叶片和工质的相互作用实现的, 因此, 统称为叶片机。

叶片机按其工质流动的方向分为轴流式、径流式、斜流式和混合式四种。

轴流式叶片机的工质大体上是在圆柱形回转面上沿轴线方向流动的, 如图 1-2 所示。英国早期的压气机设计采用轴流式。德国在 Junker 004 机和第二次世界大战中的其他燃气轮机中采用轴流式压气机。现代大、中功率的航空燃气轮机几乎全部都采用轴流式压气机。航空燃气轮机中的涡轮在整个发展历史过程中, 也几乎全部都做成轴流式。

轴流式叶片机具有以下优点:

1. 迎风面积较小;
2. 轴向流动对多级更为适合;
3. 在研究中可以采用叶栅试验的方法;
4. 在高压比时效率较高。

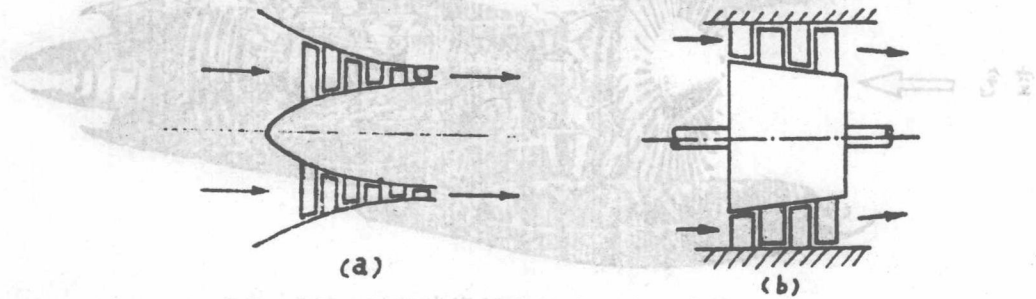


图 1-2 轴流式叶片机示意图

(a) 压气机 (b) 涡轮

径流式叶片机的工质大体上是在垂直于旋转轴的平面内作径向流动, 如图 1-3 所示。航空燃气轮机中的径流式压气机一般称为离心式压气机。四十年代和五十年代初的航空燃气轮机中大都采用离心式压气机。小型航空燃气轮机中离心式压气机用得很多。离心式压气机的优点有:

1. 单级增压比较高;
2. 构造简单;
3. 叶片沾污时, 性能下降较少;



图 1-3 离心式压气机示意图

#### 4. 长度较小

#### 5. 稳定工作范围大。

斜流式叶片的工质大致上是在与旋转轴成一倾斜角的回转曲面内流动，如图1-4所示。

混合式叶片机是指不同型式的级组成的叶片机。例如有的现代小型航空燃气轮机中压气机是由轴流式和离心式组成的，一般前面一级或两级为轴流式，后面是一级离心式，如图1-5所示。这类压气机兼有轴流式和离心式的优点。混合式发动机为了要提供轴流级和离心级的最佳匹配，有时需要有某种形式的变几何措施：

##### (1) 变角度静叶片

##### (2) 级间放气口

包括了变几何的机构，也就增加了复杂性和造价，降低了可靠性。航空发动机中至今还没有见过混合式的涡轮。

叶片机的发展是和航空燃气轮机的发展紧密联系在一起。叶片机在科学技术水平不高的条件下是不可能顺利发展的，十九世纪前半期，生产力发展不足和小规模分散的生产关系无法使回转式发动机得到发展。只有在叶片运动速度很高气体温度很高的条件下叶片机才能有效地工作。因此，只有在热力学、空气动力学、材料力学、冶金学各方面的有关重要问题解决之后，叶片机才得到迅速的发展而成为有用的动力装置的。

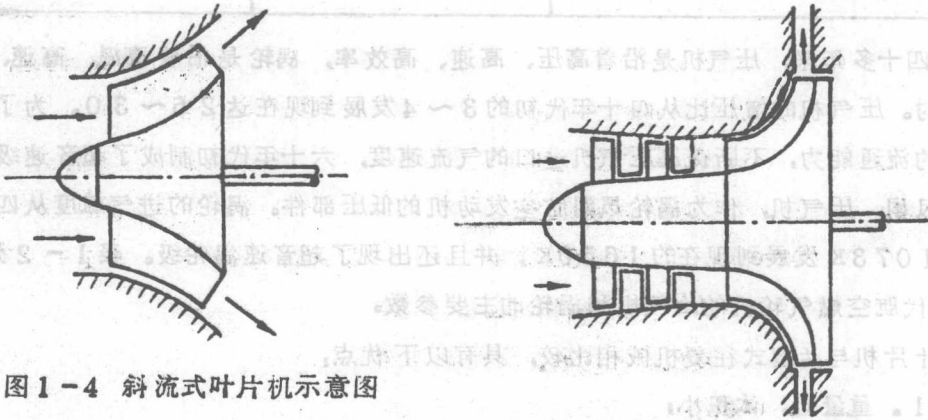


图 1-4 斜流式叶片机示意图

第二次世界大战结束之前，世界上生产的仅有两种航空发动机<sup>[1]</sup>，一种是英国生产的W型航空燃气轮机，压气机是单级双侧进气离心式的，一种是德国生产的Jumo (004)航空燃气轮机，压气机是轴流式的。两种发动机的性能比较见表1-1。



表 1 - 1

	Junkers 004B (Jumo 004)	Welland
压气机		
型式	轴流式	离心式
增压比	3.1	4
级数	8	1
效率	0.80	0.75
涡轮		
进气温度 (k)	1073	
级数	1	1
效率	0.80	0.87
重量推力比	0.83	0.53
单位推力迎风面积 (米 <sup>2</sup> / 牛顿)	0.000067	0.00014
燃料消耗率 (千克 / 小时千克)	1.40 ~ 1.48	1.12
可靠性	低	高
寿命 (小时)	25 ~ 35	100

四十多年来，压气机是沿着高压、高速、高效率，涡轮是沿着高温、高速、高效率发展的。压气机的增压比从四十年代的 3 ~ 4 发展到现在达 25 ~ 30。为了提高压气机的流通能力，不断提高压气机进口的气流速度，六十年代初制成了超音速级。还出现了风扇，压气机，作为涡轮风扇航空发动机的低压部件。涡轮的进气温度从四十年代的 1073K 发展到现在的 1650K，并且还出现了超音速涡轮级。表 1 - 2 列出了一些现代航空燃气轮机的压气机和涡轮的主要参数。

叶片机与活塞式往复机械相比较，具有以下优点：

1. 重量轻，体积小；
2. 功率大；
3. 因为是回转式机械，所以工作平稳，振动小。



## 第二章 压气机

### § 2-1 轴流式压气机的工作原理

压气机是航空燃气轮机中的一个重要组成部件，它的功用是提高空气的总压（或滞止压力）。

从图 1-1 可以看出，压气机主要由两部分组成：一为旋转的部份称为“转子”，一为不动的部分称为“静子”。转子是由沿轮缘安装了许多叶片的好多轮盘组合而成的。每个轮盘以及其上的叶片称为“工作轮”，而工作轮上的叶片称为“工作叶片”。静子是由好多圈固定在机匣上的叶片组成。每一圈叶片称为整流器，这些叶片称为整流叶片。工作轮和整流器是顺序交错排列的，每一个工作轮及其后面的一个整流器叫做压气机的一个“级”。只有一个级的压气机称为单级压气机，由两个或两个以上的级组成的压气机称为多级压气机。空气在工作轮中通过其工作叶片的相互作用而获得自外界输入的机械功而能量增加，增加的能量包括两部分：一部分是动能；另一部分表现为压力增加。在整流器中空气沿着整流叶片之间的通道，逐渐改变其流动方向，同时逐渐减速，进一步把动能转变为压力提高，由此达到增压的目的。在多级压气机中，空气流过一个级又一个级，空气压力被一步一步地提高。

在轴流式压气机中，空气流过一个级，压力升高是很有限的，增压比（级后压力与级前压力之比，详见后面讨论）只有 1.15~1.35，而航空燃气轮机中，空气的最高压力与大气压力之比要高得多。因此，这种用途的轴流式压气机都做成多级的。

在航空燃气轮机中，压气机所消耗的功由涡轮提供，其效量大约为整台燃气轮机发出的净功的 2~3 倍。因此，压气机性能的好坏对整台发动机起举足轻重的作用。压气机对空气的压缩过程究竟遵循什么规律？能量转换关系如何？所需的压缩功如何计算？这些问题在下一节中讨论。

### § 2-2 压缩过程的基本方程和热力学图解

#### 一、压气机中气体流动过程所遵循的能量方程和动量矩方程

##### 1. 热焓方程式〔2〕

能量方程是对某一流体微团根据能量不灭定律得出的能量平衡关系式。气体在燃气

轮机中既要流过静止的部件，又要流过转动的部件。因此，我们往往需要利用定坐标和动坐标系统来观察气流的运动。

### (1) 定坐标系统

设外界对流过压气机的每公斤空气加入的热量为 $q$ 、机械功为 $L_u$ ，则热焓形式的能量方程式可表示为：

$$q + L_u = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_2^* - h_1^* \quad (2-1)$$

式中， $c$ ——空气的速度；

$h$ ——每公斤空气的焓。

在压气机中，机械功的输入是通过装在轮缘上的叶片来完成的，习惯上称它为“轮缘功”，以 $L_u$ 表示。

在压气机中，由于空气速度大，空气与外界交换的热量很少，而流过的空气流量又相当大，平均分摊到每公斤空气上的热量交换更是微不足道。因此，可以认为 $q = 0$ ，能量方程可写成：

$$L_u = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_2^* - h_1^* \quad (2-2)$$

上式表明，压气机通过旋转的叶片加给每公斤空气的轮缘功等于空气在压气机出口处的总能量与压气机进口处的总能量之差。

### (2) 动坐标系统

当空气流过压气机工作轮的时候，我们往往设想把坐标系与工作轮连在一起，在动坐标系统中去观察空气的运动。这时在与动坐标连在一起的观察者看来，叶片仍然是静止的， $L_u = 0$ ，但这时离心惯性力所作的功却不为零，而是等于 $(u_2^2 - u_1^2) / 2$ 。

因而这时的能量方程式成为

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \quad (2-3)$$

这里应该注意，在动坐标系统中，速度项为相对速度 $w$ 而不是绝对速度 $c$ 。

若圆周速度 $u_2$ 和 $u_1$ 相等，则离心惯性力做功为零，于是有：

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2}$$

或者  $h_{1w}^* = h_{2w}^* \quad (2-4)$

式中 $h_{w}^*$ 空气在相对运动中的总焓。

上式说明，当 $u_2 = u_1$ 时，空气在相对运动中的总焓维持不变。

## 2. 机械能形式的能量方程式 (伯努利方程式)

### (1) 定坐标系

设  $L_f$  为每公斤空气的流动损失, 则机械能形式的能量方程为,

$$L_u = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + L_f \quad (2-5)$$

应该指出, 机械能形式的能量方程式表述了空气运动时机械能之间的平衡关系, 既适于等熵过程, 也适于有热量交换的情况。加热与否, 不影响该方程式的形式。但由于加热以后, 影响了空气热力变化过程, 因此会影响方程式中各项的具体数值。

在空气状态按多变过程变化的情况下, 方程 (2-5) 中的积分为,

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{n}{n-1} R (T_2 - T_1)$$

对于在压气机中的压缩过程来说, 我们用  $L_{nk}$  来表示这个积分, 并称为压气机的多变压缩功, 它又可写为,

$$\begin{aligned} L_{nk} &= \frac{n}{n-1} R T_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \\ &= \frac{n}{n-1} R T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中  $p_2/p_1$  — 空气在压气机中的增压比。

假如压缩过程是在没有摩擦和热交换的情况下进行的 (即等熵过程), 那么多变指数  $n$  即等于等熵指数  $k$ , 这时积分

$$\begin{aligned} \int_1^2 (dp/\rho) &\text{ 就变成等熵压缩功 } L_{ad,k} \\ L_{ad,k} &= \frac{k}{k-1} R T_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2-7)$$

等熵压缩功是把空气从  $p_1$  压缩到  $p_2$  时所需要的最小的功, 因为它对应于没有流动损失的情况。

对于压气机中的流动过程, 有,

$$L_u = L_{nk} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + L_f \quad (2-8)$$

此式说明, 压气机加给空气的轮缘功用来完成多变压缩, 增加空气的功能以及克服全部流动损失。

### (2) 动坐标系

在动坐标系中，离心惯性力做功为  $(u_2^2 - u_1^2) / 2$ 。由于叶轮在动坐标系中相对静止，因此  $L_m = 0$ 。这时机械能形式的能量方程为：

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = \int_1^2 \frac{2}{\rho} dp + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + L_f \quad (2-9)$$

当  $u_2 = u_1$  时，离心惯性力做功为零，此时，

$$\int_1^2 \frac{2}{\rho} dp + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + L_f = 0 \quad (2-10)$$

此式表明，空气压力的变化与相对速度的变化是密切相关的。相对速度提高，则压力下降；相对速度降低，则压力提高。

### 3. 动量矩方程和轮缘功 [2]

#### (1) 动量矩方程

我们在理论力学中已经知道，质点系对于某一固定点（或轴）的动量矩对于时间的导数等于作用于质点系所有外力对同一点（或轴）之矩的矢量和。或者说，作用在物体上的外力矩的总和，等于动量矩对时间的变化率。

$$\sum \vec{r} \times \vec{F} = \frac{d}{dt} (\sum \vec{r} \times m \vec{c})$$

式中  $\vec{F}$ —作用在物体上的外力；

$\vec{r}$ —转轴到力的作用点的矢径；

$m$ —物体的质量；

$\vec{c}$ —物体的速度。

这个表达式虽然对空气来说，也是成立的，但是在气流中，由于不容易从连续流动的空气中区分某一个特定的空气块，因而上述动量矩方程式在使用时很不方便。同时，在气体力学的计算中，已知的常常是进出口的气体状态参数，因此就必须把动量矩方程变成适合于气流参数计算的形式。

现在来考虑空气流过工作轮的情况。图 2-1 (a) 为空气流过叶片的剖面图，图 (b) 为正视图，图 (c) 为流管的放大图。假设在瞬间  $t$ ，气流的位置在截面 1-1 和 2-2 之间，经过  $dt$  时刻之后，这股气流移到了 1'-1' 和 2'-2' 之间。因为是定常流动，即气流的参数是不随时间而变化的，因此位于截面 1'-1' 和 2-2 之间的气流参数并没有改变，也就是说，位于截面 1'-1' 和 2-2 之间气流的动量矩在瞬间  $t$  和  $t + dt$  都是一样的。所以，在  $dt$  时间内原在 1-1 和 2-2 截面之间的气流动量矩变化，就等于截面 2-2 和 2'-2' 之间的气流动量矩与截面 1-1 和 1'-1' 之间那部分气流的动量矩之差。

截面 2-2 和 2'-2' 之间气流的动量矩为  $\Delta m_2 c_{2u} r_2$ ；截面 1-1 和 1'-1' 之间气流的动量矩为  $\Delta m_1 c_{1u} r_1$ ；其中  $\Delta m_2$  为 2-2 和 2'-2' 之间气流的质量； $\Delta m_1$  为 1-1 和 1'-1' 之间气流的质量。

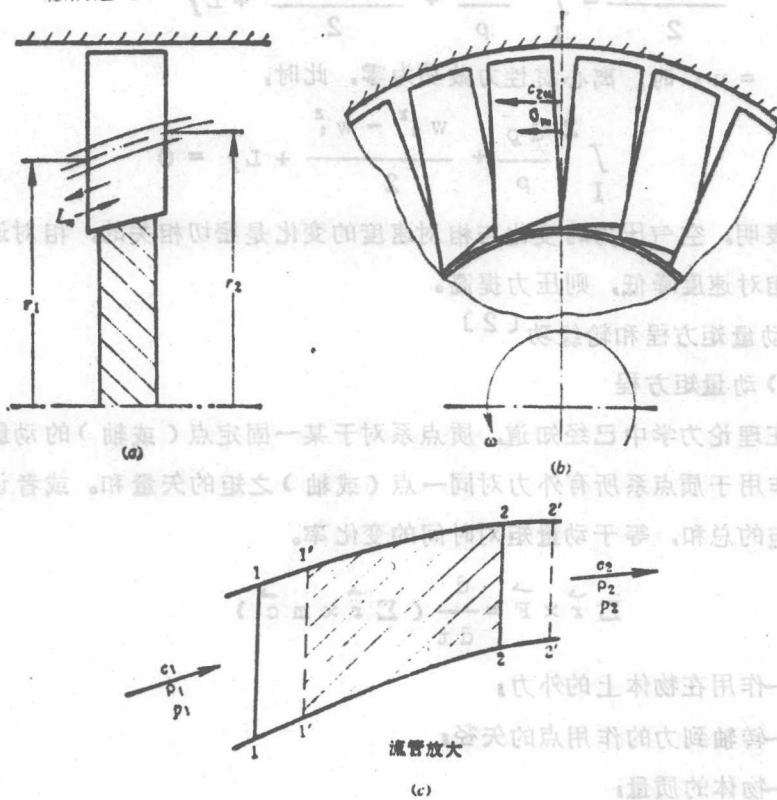


图 2-1 推导动量矩方程用图

因为气流是连续的，所以  $\Delta m_1 = \Delta m_2 = m dt$ ，其中  $m$  为流管气流的质量流量，单位为公斤/秒。于是在  $dt$  时间内这股空气的动量矩变化为：

$$\Delta m_2 c_{2u} r_2 - \Delta m_1 c_{1u} r_1 = m c_{2u} r_2 dt - m c_{1u} r_1 dt$$

在  $dt$  时间内，这股气流对转轴的动量矩变化率为：

$$\frac{m c_{2u} r_2 dt - m c_{1u} r_1 dt}{dt} = m (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1)$$

由动量矩定律可知，作用于截面 1-1 和 2-2 之间这股气流上外力矩的总和（以  $M$  表示之）应等于这股气流的动量矩对时间的变化率，即

$$M = m (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1) \quad (2-11)$$

这就是适合于叶片机计算的动量矩方程式。该方程告诉我们，只要知道了工作轮进出口的切向速度，就可以求出作用在气流上的外力矩。

(2) 轮缘功

设工作轮的转动角速度为 $\omega$  (若工作轮的转速为每分钟 $n$ 转, 则 $\omega = 2\pi n/60$ ), 经过 $dt$ 时间后的角位移为 $\theta$ , 则根据理论力学的知识, 可得流量为 $m$ 时的轮缘功 $L_u$ 为,

$$\begin{aligned} L_u &= M \theta \\ &= M \omega dt \\ &= m (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1) \omega dt \\ &= \Delta m (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1) \omega \end{aligned}$$

对流过压气机的每公斤空气而言, 则轮缘功为,

$$L_u = \frac{u}{\Delta m} = \omega (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1) = c_{2u} u_2 - c_{1u} u_1 \quad (2-12)$$

当进出口半径相同时, 亦即 $r_1 = r_2$ 时, 得

$$L_u = u (c_{2u} - c_{1u}) = u \Delta c_u \quad (2-13)$$

二. 热力学图示

热力学焓熵图可以清晰地表示出压缩过程中起始点和终止点的状态参数, 用线段表示能量, 帮助我们对压缩过程有一个简明正确的了解。

当把空气从静压 $p_1$ 压缩到静压 $p_2$ 时, 如果是理想情况, 则在焓熵图(图2-2)中过程由垂直线 $1-2_{ad}$ 表示; 实际过程有摩擦损失, 有熵增, 因此由斜线 $1-2$ 表示。

过程起点的滞止状态以 $1^*$ 表示,  $1-1^*$

表示起点的动能  $\frac{c_1^2}{2}$ 。

过程终点的滞止状态以 $2^*$ 表示,  $2-2^*$ 表示终点的动能  $\frac{c_2^2}{2}$ 。

$1-2_{ad}$ 表示等熵压缩过程的焓增,  $h_{2ad} - h_1$ , 此时也即表示等熵压缩功 $L_{ad}$ 。因为在理想情况下

$$L_u = \int_1^2 \frac{2}{\rho} dp + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

$$L_u = h_{2ad} - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

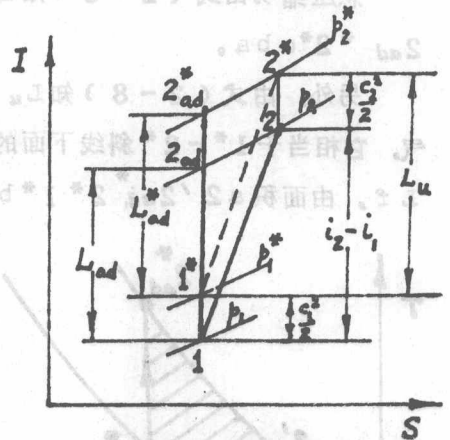


图2-2 压缩过程的焓熵图



所以

$$h_{2ad} - h_1 = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = L_{ad}$$

实际过程中焓增  $h_2 - h_1 > h_{2ad} - h_1$

理想过程中滞止等熵功  $L_{ad}^*$  由  $1^* - 2_{ad}^*$  表示，而实际过程中需加入轮缘功  $L_u$ ，并且  $L_u > L_{ad}^*$

用温熵图表示压缩过程可以由图形面积表示压缩功，等熵压缩过程由图 2-3 (a) 中的垂线  $1^* - 2_{ad}^*$  表示，压缩功由式 (2-7) 知，

$$\begin{aligned} L_{ad,k}^* &= C_p (T_{2ad}^* - T_1^*) \\ &= C_p (T_{2ad}^* - T_1^*) \end{aligned}$$

因此等熵压缩功由图 2-3 (a) 中阴影面积  $a 2' 2_{ad}^* 1^* b a$  表示。

多变压缩过程由图 2-3 (b) 中  $1^* - 2^*$  表示。

总压缩功由式 (2-3) 知  $L_u = h_2^* - h_1^* = C_p (T_2^* - T_1^*)$  等于面积  $a 2' 2_{ad}^* 2^* c b a$ 。

另外，由式 (2-8) 知  $L_u = L_{uk} + L_f$ 。流动损失功  $L_f$  以热量形式给予空气，它相当于  $1^* - 2^*$  斜线下面的面积  $b 1^* 2^* c b$ 。因此，多变压缩功  $L_{uk} = L_u - L_f$ ，由面积  $a 2' 2_{ad}^* 2^* 1^* b a$  表示。

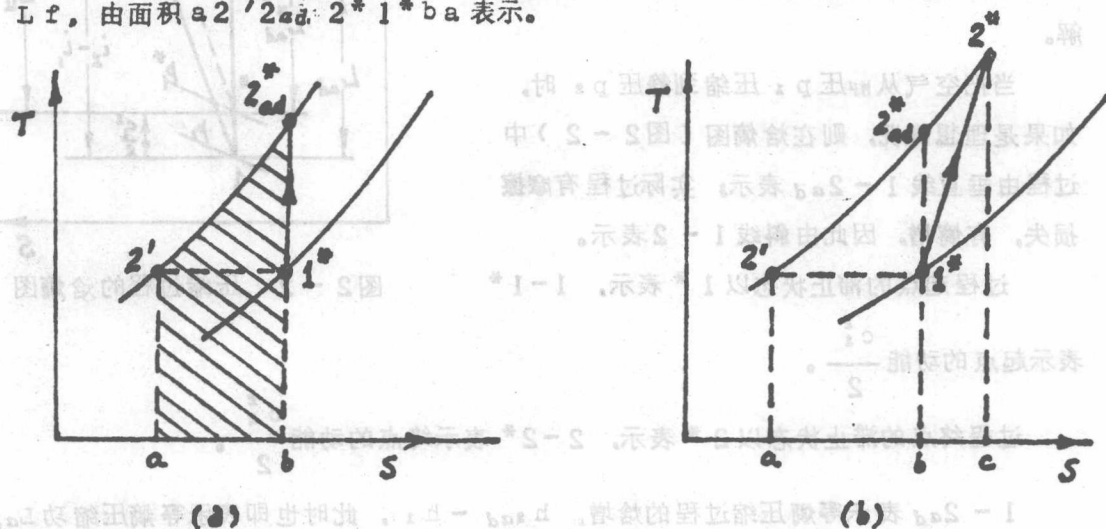


图 2-3 压缩过程的温熵图

有损失情况下的多变压缩功  $L_{uk}$  比等熵压缩功  $L_{ad,k}$  大，由图 2-3 知，大一块面积  $1^* 2_{ad}^* 2^*$  表示的功，即  $L_{uk} = L_{ad,k} + \Delta L_f$ 。多付出的这部份功  $\Delta L_f$  称做热阻功。因为在实际压缩过程中要克服流动损失而消耗一部份机械功  $L_f$ 。这部分功使气流的温度升高，气流温度升高后，不易被压缩，所以多变压缩功要比等熵压缩功多