

压气机叶栅的 空气动力学

〔苏〕 Ю.М.特雷申科 著

450.1

机械工业出版社

本书介绍了采用不同类型叶片绕流控制方法的压气机叶栅空气动力学的最新研究结果,详细阐述了一些特殊类型叶栅的特性。这些叶栅分别由双列叶型、带有紊流器的叶型,以及对边界层吹气和抽吸的叶型组成。本书是压气机叶栅空气动力学方面的理论和实用价值兼有的难得参考书。读者可以在如何扩大压气机稳定工况范围方面,得到有益的启发和帮助。

本书适用于压气机设计和研究的工程技术人员、教学科研工作者、研究生和高年级大学生。

АЭРОДИНАМИКА КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТОК

Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО

Издательство «Машиностроение» 1979г.

* * *

压气机叶栅的空气动力学

〔苏〕Ю. М. 特雷申科 著

徐家驹 译

王植强 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $4\frac{5}{8}$ · 字数 100 千字

1984年1月北京第一版·1984年1月北京第一次印刷

印数 0,001—3,300 · 定价 0.61 元

*

统一书号: 15033 · 5311

译者的话

Ю.М.特雷申科所著的《压气机叶栅空气动力学》一书，专门论述采用不同绕流控制方法的各种叶栅的流动特点及其性能。

从事于轴流压气机和离心压气机设计和研究的所有科技工作者，几乎都会遇到如何扩大压气机稳定工况范围的问题。随着压气机单级负荷愈来愈高，这一问题变得更加突出，人们对它的关注也愈来愈强烈。本书正是针对这一问题，清晰地归纳了作者本人及其他作者的最新研究成果，详细阐明了对压气机叶栅（由双列叶型、带有紊流器的叶型、对边界层吹气和抽吸的叶型组成）进行绕流控制的原理和试验研究结果。此外，本书还概略讨论了如何利用平面直叶栅的试验数据，来设计、计算实际上具有圆锥形流面的高压比轴流压气机的问题。关于这一问题的论述，篇幅不多，但对于设计人员来说，无疑是十分有用的。

译者曾有机会参与扩大高压比离心压气机稳定工况范围的试验研究工作，在我们所研究的方法当中，其中有绕流控制方法。试验结果表明，在高压比的离心压气机叶片扩压器中，采用绕流控制方法扩大压气机稳定工况范围是行之有效的。可惜我们未能及时地从理论上系统地把试验结果整理出来，而只是停留在感性认识上。在译者阅读了本书以后，深受启发和教益，欣然把它译出来，供从事于压气机设计研究的工程技术人员、教学科研工作者、研究生和高年级大学生

IV

参考。

本书译稿承蒙王植强同志校阅，提出了一些宝贵的意见，谨此致谢。

限于译者水平，译文中难免有许多谬误和不妥之处，望读者不吝指教。

徐家驹

1982年4月

序 言

本书论述压气机叶栅的空气动力学。三十多年来,随着燃气涡轮发动机的发展,压气机参数的变化比其它任何部件的参数变化更为显著。例如在早期,燃气涡轮发动机涡轮进口的燃气温度 T_3^* 仅为 $1000\sim 1100\text{ K}$, 增压比 π_3^* 仅为 $5\sim 7$ (效率等于 $0.78\sim 0.82$ 时), 而现代的燃气涡轮发动机, 温度 T_3^* 高达 $1590\sim 1647\text{ K}$, 增压比 π_3^* 已达 $23\sim 27$ (效率等于 $0.82\sim 0.85$ 时)。

压气机参数的变化这样明显, 与其说是由于级数有所增多, 倒不如说是由于加大了级的空气动力负荷, 改善了通流部分(叶片排)内部的空气动力学性能。人们详细地探讨了各种各样的可能性, 设法借用超音速级和造型复杂的叶片排, 以提高压气机的空气动力负荷。此外, 改变航空燃气涡轮发动机工作过程的参数, 以及不断提高飞行器动力装置的经济性要求, 这些发展趋势, 也使我们有可能去合理地分析那些目前尚未认真研究过的若干方法, 以求改善轴流压气机叶片排的性能。采用这些方法, 原则上既可提高压气机级的空气动力负荷, 又可降低压气机内的损失。

本书所述及的压气机叶栅空气动力学研究结果, 与叶片绕流的各种控制方法有关。由于以前从未论述过这一问题, 因此, 书中系统地介绍了有关的文献资料, 并用插图详细说明了改善压气机叶栅空气动力特性的各种途径。

广泛了解本专业人员的研究成果, 有助于用新的观点着手解决改善压气机内部的空气动力性能的一系列任务。既然本书包含有压气机叶栅空气动力学研究的最新成果, 因此, 对于航空学院和工科大学的学生们来说无疑也是有裨益的。

目 录

译者的话

序言

第一章 压气机叶栅的参数和特性	1
一、压气机叶栅的基本参数	1
二、亚音速压气机叶栅的特性	10
三、马赫数 M 和雷诺数 Re 对压气机叶栅特性的影响以及 叶栅的滞后现象	20
四、叶片排空气动力计算的基本任务	34
五、斜向绕流压气机叶栅的空气动力特性	43
第二章 环量控制压气机叶栅的空气动力学	50
一、叶片机部件的绕流控制及其一般原理	50
二、主动绕流控制的压气机叶栅	56
三、采用主动绕流控制叶片的压气机叶栅的 空气动力特性	65
四、关于采用绕流控制叶片的压气机叶栅的 空气动力负荷	81
五、采用被动绕流控制叶片的压气机叶栅的 空气动力特性	90
第三章 压气机叶栅空气动力性能的改善对 压气机特性的影响	107
一、研究方法	107
二、带有双列叶片扩压器的离心压气机的特性	115
三、在叶片扩压器中带有紊流器的离心压气机的特性	119
四、通过向叶片边界层吹气来主动控制叶片扩压器 绕流的离心压气机的特性	124
五、从叶面上抽吸边界层来主动控制叶片扩压器绕流的 离心压气机的特性	130
附录	138
附表 I 试验用的扩压叶栅的主要参数	138
附表 II 试验用的单列收敛叶栅的主要参数	138
附表 III 试验用的双列扩压叶栅的主要参数	139
参考文献	141

第一章 压气机叶栅的参数和特性

一、压气机叶栅的基本参数

叶片机空气动力（气体动力）计算的基本任务是，合理地选取压气机叶栅的最佳参数，以满足对压气机提出的有效性和经济性（压头和效率）的要求。进行压气机气动计算的大多数方法，都可归结为确定不同计算半径上各基元级的气体流动状态。轴流压气机叶片排中叶片几何参数的沿径变化（叶片造型），必须与计算时采用的压缩功分布规律相适应。可以把轴流压气机中广泛应用的沿叶高等环量、等反动度以及按别的造型规律计算的级，看成是由一些基元叶片排（基元级）所组成。这些基元叶片排的高度是那么小，以至于可以忽略流动参数的沿径变化。根据轴流压气机级在计算工况下的气流径向平衡条件，可以推算出径向高度为无限小的各基元叶片排的作功量，该量与相邻基元叶片排的作功量无关。

在以柱面或锥面近似表达轴流压气机的流面之后，就可以象分析平面流动一样去分析基元级内的流动。为此，首先将基元级展开成平面，然后再分析研究这种在几何参数上与原始基元叶片排等价的平面叶栅。虽然作这样的处理明显地带有条件性，但在压气机的空气动力计算中，却广泛应用平面叶栅的特性，因为经过适当修正之后，它可以模拟轴流压气机通流部分的流动过程。研究压气机平面叶栅，不仅使叶片排的计算有了充分的依据，而且还可以用来改进压气机性能。在叙述压气机叶栅和改进其性能方面的问题之前，先来

确定一下以后分析中经常要用到的若干定义。首先应该指出，每一种叶型叶栅的特点照例都是用几何参数表示的。图 1 表示出压气机叶栅的简图及其主要的几何参数。凡是压气机叶栅，都由空气动力叶型组成。所有叶型前缘的连线，称为叶栅额线，与叶栅额线垂直的直线，称为叶栅轴线。相邻叶型对应点（一般指前缘或后缘）之间的距离（沿额线），用栅距 t 表示。

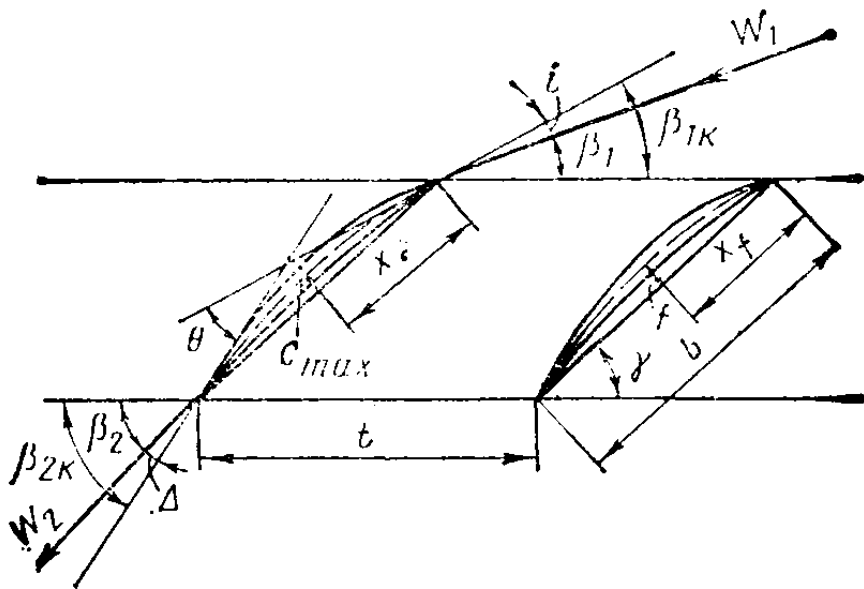


图 1 亚音速压气机叶栅示意图

构成叶栅的每一个叶型，都有一条以一定角度弯曲的中线。中线与叶型轮廓线的两个交点的连线，称为叶弦 b 。叶弦与栅距之比，称为叶栅稠度 b/t 。叶栅稠度是对轴流压气机级作空气动力计算时所求出的一个基本参数。

下面列出几个表征叶型在叶栅中所处位置的基本结构角：

γ —— 叶型在叶栅中的安装角（叶弦与叶栅额线之间的夹角）；

β_{1x} ——叶栅进口的结构角(前缘处中线的切线与叶栅额线之间的夹角);

β_{2x} ——叶栅出口的结构角(后缘处中线的切线和叶栅额线的平行线之间的夹角);

$\bar{a}_r = a_r/t$ ——叶栅《喉部》的相对尺寸(宽度), 这里, a_r 为叶栅的《喉部》尺寸(在相邻叶型之间槽道最小内切圆的直径)。

图 1 表示了构成压气机叶栅的叶型主要几何参数。在叶片绕流为亚音速的级中, 通常采用机翼翼型作为原始叶型, 这种翼型的中线按圆弧(或按双圆弧)或按抛物线规律弯曲。翼型内切圆圆心的连线就是该翼型的中线。翼型的外凸部位称作叶背, 翼型的内凹部位称作叶盆。

除中线弯角 θ (在中线与翼型轮廓线交点上所作的中线切线之间的夹角) 以外, 还用最大厚度 c_{max} 、翼型中线的最大弯度 f_{max} 、中线最大弯度点离叶片前缘的距离 x_f 以及翼型最大厚度截面离叶片前缘的距离 x_c 表示翼型形状的特征。在空气动力计算中, 常采用下列相对值: $\bar{c} = c_{max}/b$ ——翼型最大相对厚度; $\bar{x}_c = x_c/b$ ——翼型最大厚度点离前缘的相对距离; $\bar{x}_f = x_f/b$ ——翼型中线最大弯度点离前缘的相对距离。

除了这些表示叶栅和叶型(叶栅由叶型构成)特征的参数外, 每种叶栅还取决于跟叶栅进口处的速度大小相适应的叶型种类。根据叶栅前相对速度的大小, 可以采用分别由亚音速、跨音速和超音速叶型构成的亚音速、跨音速和超音速叶栅。

因为只要叶栅开始与气流相互作用, 就会依运动学原理对气流产生影响, 所以很自然地要提到一些绕叶栅流动的流

体运动参数，其中有： β_1 ——叶栅进口气流角； β_2 ——叶栅出口气流角； $i = \beta_{1x} - \beta_1$ ——气流冲角（速度矢量 $\vec{W}_1$ 与叶片前缘点中线切线之间的夹角）； $\Delta = \beta_{2x} - \beta_2$ ——气流落后角（叶栅出口速度矢量 $\vec{W}_2$ 与叶片后缘点 $\ominus$ 中线切线之间的夹角）。

由于气流同叶栅相互作用，引起了作用在叶片上的空气动力。有关气流和叶型叶栅的相互作用问题，H.E.儒可夫斯基、C.A.恰普雷金、B.C.斯捷切金、Л.Г.洛强斯基、A.豪威尔等许多作者都作过研究。他们在气流参数和气流绕过叶栅型面时产生的空气动力之间，建立起了若干基本关系式（文献 24、33 和 41）。下面分析研究轴流压气机基元级（压气机平面叶栅）参数、气流参数和绕叶片流动时引起的空气动力这三者之间的相互关系。用两个分量表达作用在叶片上的总空气动力 P ：沿着几何平均速度 W_m 垂直方向上的升力 P_y ，以及垂直于升力方向的阻力 P_x （图 2）。对于具有单位叶高的压气机基元叶栅而言，可以写出：

$$P_y = c_y \rho_m \frac{W_m^2}{2} b$$

$$P_x = c_x \rho_m \frac{W_m^2}{2} b$$

式中 c_y ——叶栅中叶型的升力系数；

c_x ——叶栅中叶型的阻力系数。

考虑到关系式 $W_m = W_{m0} / \sin \beta_m$ （按图 2 所示的速度三角形），可得到作用在叶栅叶型上的升力表达式为：

$$P_y = c_y b \rho_m \frac{W_{m0}^2}{2 \sin^2 \beta_m} \quad (1-1)$$

⊖ 原文为前缘点，有误——译注。

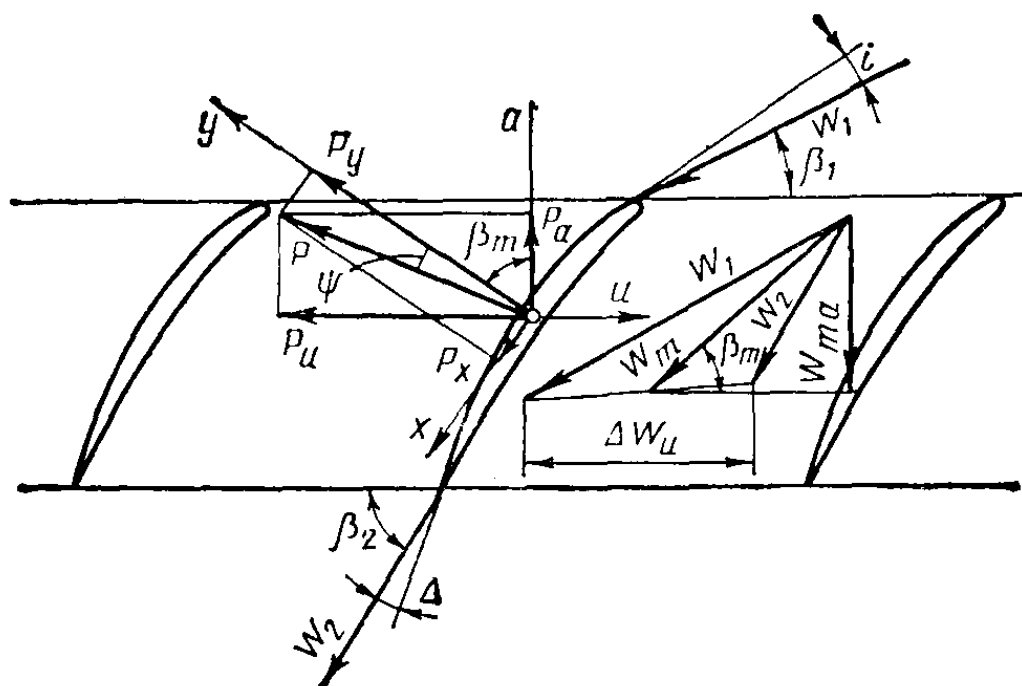


图2 作用在叶栅型面上的空气动力

依照欧拉动量方程，作用在基元叶栅叶片上的轴向力和周向力（ P_a 和 P_u ）即为总空气动力的分力，并可以用如下关系式确定：

$$\begin{aligned} P_a &= -\rho_m t W_{mu} \Delta W_u \\ P_u &= \rho_m t W_{ma} \Delta W_u \end{aligned} \quad (1-2)$$

若以 ψ 表示总空气动力 P 与升力 P_y 之间的夹角，就可以导出如下形式的 P_y 表达式：

$$P_y = P \sin \psi = \frac{P_u}{\sin(\beta_m + \psi)} \cos \psi \quad (1-3)$$

若把 P_u 的表达式 (1-2) 代入式 (1-3)，并使得出的表达式与 P_y 的表达式 (1-1) 相等，则可以写出如下形式的叶栅叶型升力系数计算式：

$$c_y = \frac{t}{b} \frac{2 \sin \beta_m}{\sin(\beta_m + \psi)} \frac{\Delta W_u}{c_{ma}} \cos \psi \quad (1-4)$$

对压气机叶栅而言，角度 ψ 可以按下式计算：

$$\psi = \arctg \frac{P_x}{P_y} = \arctg \frac{c_x}{c_y} = \arctg \mu = \arctg \frac{1}{k}$$

式中 $k = c_y/c_x = 1/\mu$ ——叶栅中叶型的升阻比。

根据低速平面叶栅吹风的试验结果，可以得出如图 3 所示的关系曲线 $\mu = f(b/t, \beta_m)$ 。这种曲线可以用来估价叶栅计算参数对其效率的影响（文献 42）。

叶栅叶型升力系数的计算公式形式很多，采用什么样的公式，视计算时的原始数据而定。例如在文献

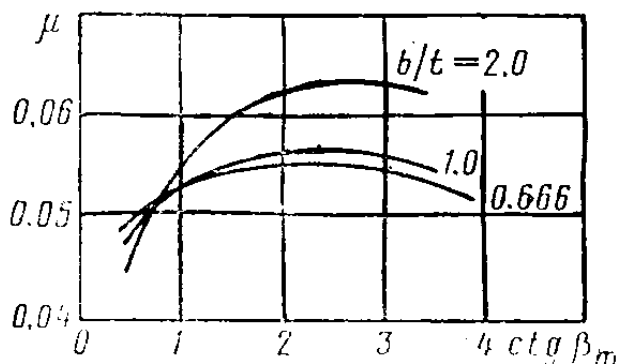


图 3 叶型阻升比与压气机
叶栅基本参数的关系曲线

41 中，叶型升力系数 c_y 的表达式中含有叶栅稠度，即

$$c_y = 1.125 \left(\frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} \right)^2 \left[\frac{6 \left(\frac{t}{b} \right) - 1}{5 \frac{t}{b}} \right] \quad (1-5)$$

在许多文献中，采用如下形式的升力系数计算公式：

$$c_y = 2 \left(\frac{t}{b} \right) (\operatorname{ctg} \beta_1 - \operatorname{ctg} \beta_2) \sin \beta_m \quad (1-6)$$

式 (1-4)、(1-5) 和 (1-6) 的计算结果与试验研究结果的对比表明，它们之间的一致性在多数情况下是非常满意的。

可以用下列几种参数评定压气机叶栅内的损失大小：总压损失系数 ξ ；叶栅中叶型的阻力系数 c_x ；叶栅的总压恢复系数 σ 和别的一些参数。总压损失系数 ξ 即为单位摩擦功 L_f 与气体单位质量的动能之比，后者按叶栅内的平均流速

计算, 即为 $W_m^2/2$, 因而得

$$\xi = \frac{L_r}{W_m^2/2} \quad (1-7)$$

因为当叶栅进口处的流速很低时, 摩擦功 L_r 可以按总压损失确定, 即

$$L_r = \frac{p_1^* - p_2^*}{\rho_1}$$

式中 ρ_1 ——叶栅前的气体密度;

p_1^* ——按栅距平均的叶栅前总压;

p_2^* ——按栅距平均的叶栅后总压,

这样, 损失系数 ξ 可写成:

$$\xi = \frac{p_1^* - p_2^*}{\rho_1 W_m^2/2} \quad (1-8)$$

利用这些参数, 通常可以在叶片排的整个实际工作范围内, 估算出压气机叶栅的总压损失。

在叶栅叶型的升阻比达到最大值时, 可以按如下表达式估算损失系数:

$$\xi = \frac{0.065 + 2(\Delta\beta/100)^2}{100\sqrt{\sin\beta_1}} \left(\frac{b}{t} \right) \quad (1-9)$$

叶栅中叶型的阻力系数 c_x 反映了损失的大小, 可以简单地把 c_x 分成三项:

$$c_x = c_{x_n} + c_{x_k} + c_{x_r}$$

式中 $c_{x_n} = (0.022 - 0.006 t / b)$ ——亚音速压气机叶栅名义工况下的损失系数;

$c_{x_k} = 0.018 t / h$ ——考虑限定通道高度的壁面边界层内摩擦损

失的端损失系数;

$c_{x_r} = 0.018 c_{y_t}^2$ ——二次流损失系数, 这一系数考虑到了由于实际气流具有粘性而引起的径向潜流、端部涡流和其它因素 (c_{y_t} ——叶栅中叶型的理论升力系数, 见图4)。

可以写出系数 c_{x_r} 的其它一些表达式, 而且这些表达式都考虑到了叶片槽道端面上边界层形成的特点, 例如(见文献24):

$$c_{x_r} = 0.29 c_{y_t} \frac{\delta_r}{h}$$

式中 δ_r —— 限定叶片高度的端面上附着边界层的厚度;
 h —— 叶高。

采用这样的关系式, 固然可以得出更精确的计算结果, 但要另外研究叶片槽道附着边界层内的流动参数, 以便提供计算用的一些数据。

把叶栅特性的研究数据综合起来, 可以得出一些计算叶型损失系数的半经验公式。从损失系数大小可以看出叶栅叶型的气动力完善程度。例如, 在叶型安装角为 $45^\circ < \gamma < 100^\circ$ 的情况下, 当相对厚度为 $0.05 < \bar{c} < 0.1$ 的叶型组成的叶栅绕流为无分离时, 可以用下式计算叶型的最

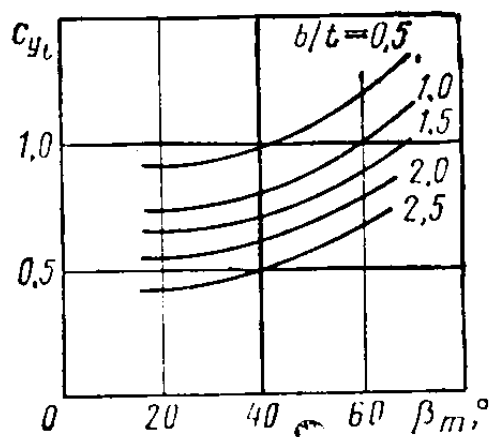


图4 叶栅中叶型的理论升力系数与稠度和角度 β_m 的关系曲线

小阻力系数:

$$c_{x_{\min}} = 0.012 + 0.042\bar{f} + 0.0023b/t$$

式中 $\bar{f} = f/b$ ——翼型中线的相对弯度。

在文献 52 中, 还给出了另外一些关系式, 也可以用来估算叶栅的叶型阻力, 例如

$$c_{x_n} = \left(\frac{t}{b}\right) \left(\frac{p_1^* - p_2^*}{\frac{1}{2}\rho W_1^2}\right) \left(\frac{\cos^3 \beta_m}{\cos^2 \beta_1}\right)$$

根据以上引用的关系式, 不难证明系数 c_{x_n} 和 ξ 之间的关系, 可以用下式表示:

$$c_{x_n} = \xi \frac{t}{b} \frac{\sin^3 \beta_m}{\sin^2 \beta_1}$$

若将所有的参数都代入系数 ξ 的表达式中, 则可求得叶栅名义工况下的总压损失系数的计算公式 (文献 24):

$$\xi = \left(0.022\frac{b}{t} + 0.018\frac{b}{h} + 0.29c_y \frac{\delta_r}{h} \frac{b}{t} - 0.006\right) \frac{\sin^2 \beta_1}{\sin^3 \beta_m}$$

总压恢复系数是叶栅前、后总压之比, 即

$$\sigma = p_2^*/p_1^*$$

系数 σ 和 ξ 之间的关系可以用下式确定:

$$\sigma = 1 - \xi \frac{k}{2} M_{w_1}^2 \frac{1}{\epsilon}$$

式中 k ——绝热指数。

$$\xi = \frac{\Delta p^*}{\frac{1}{2}\rho W_1^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{w_1}^2\right)^{\frac{k}{k-1}}}$$

对于叶栅进口的气流为低亚音速的情况，可以忽略可压缩性的影响 ($\sigma \approx \text{常数}$)，此时， σ 表达式简化为：

$$\sigma \approx 1 - \xi \frac{k}{2} M_{w_1}^2$$

叶栅的工作指标与绕流状态的典型关系曲线示于图 5 和图 6。在计算中应用哪一种曲线，决定于进行研究的条件和目的。上面分析过的这些关系式，把叶栅几何特性、气流运动状态和叶栅基本参数彼此联系了起来，因而是对压气机叶栅进行空气动力计算的基本方程式。

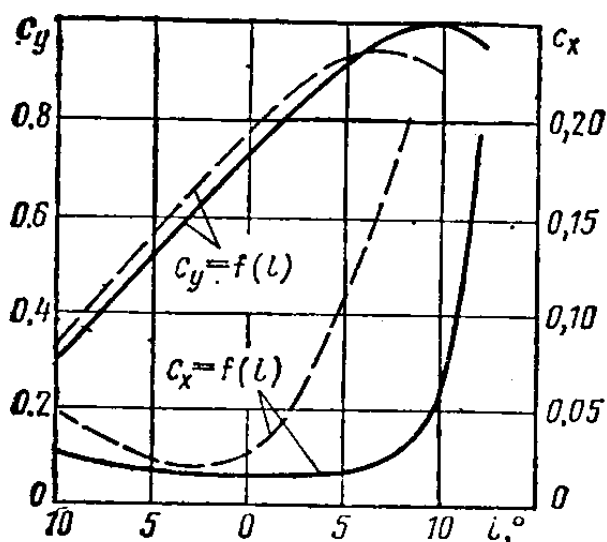


图 5 压气机叶栅空气动力系数 c_y 和 c_x 的关系曲线 ($b/t = 1.33$, $\theta = 25^\circ$, $\bar{c} = 0.1$, $\beta_{2x} = 60^\circ$)
—— $M_1 = 0.3$ --- $M_1 = 0.7$

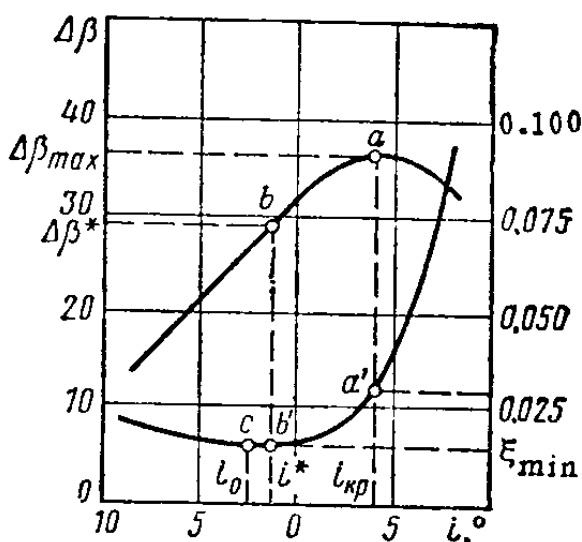


图 6 扩压叶栅总压损失系数和气流折转角与冲角的典型关系曲线

二、亚音速压气机叶栅的特性

压气机叶栅的特性，是指叶栅主要工作指标（系数 c_y 和 c_x 或者气流折转角 $\Delta\beta$ 和总压损失系数 ξ ），在一定的 M 、 Re 、 b/t 、 θ 、 γ 等数值下对冲角的依赖关系。图 5 和图 6 表示了典型亚音速压气机叶栅的空气动力特性。这种特性

可以按理论计算或用试验方法获得。压气机叶栅特性的理论计算法，用于设计固定式压气机。这种方法是在 H. E. 儒可夫斯基、C. A. 恰普雷金、Л. И. 谢多夫等许多作者所做工作的基础上建立起来的。在航空发动机制造业中，优先采用按试验方法得到的压气机叶栅特性。对叶栅特性进行试验研究时，要测定叶栅进、出口气流的运动参数 (β_1 、 β_2 ， i ， Δ) 和热力参数——气流的静压、总压以及总温 (p_1 ， p_1^* ， T_1^* ， p_2 ， p_2^* ， T_2^*)。由于叶栅前、后的气流参数在所研究的截面上具有一定的不均匀性，因此要在几个点上进行测量，随后取平均值。在文献 15、3、19 和 44 中，都描述过用来确定压气机叶栅空气动力特性的试验装置及其研究方法。本书有关章节将讨论压气机叶栅试验研究的某些特点，但由于在空气动力学的这一范畴内已有很多的著作，因此有关试验技术和试验方法问题不再详细介绍。

对压气机叶栅空气动力特性（见图 6）的分析研究，有可能确切地区别叶栅的各种特征工况，这一点对于分析叶片机性能和经济性来说，具有特别重要的意义。

压气机叶栅最大工况的特点是，叶片绕流开始发生严重的分离以及气流折转角达到最大值 $\Delta\beta_{\max}$ （图 6 中点 a 和 a' ）。叶栅最大工况与临界冲角相对应。

叶栅名义工况的特点是，气流折转角达到名义值 $\Delta\beta^*$ ，气流最大折转角与名义折转角的关系为 $\Delta\beta^* = 0.8\Delta\beta_{\max}$ 。叶栅名义工况与名义冲角 i^* 相对应。气流名义折转角比最大折转角低 20% 的必要性在于：可以使叶栅计算工况具有一定的气流分离裕度。A. P. 豪威尔（见文献 45）综合分析了大量试验研究数据后发现：气流名义折转角 $\Delta\beta^*$ ，大体上可以按叶栅稠度 (b/t) 和出口气流角 (β_2) 确定。亚音速压气