

# 压气机静子双圆弧倒置串列叶栅 流动性能的试验研究

南京航空学院 庄表南

## 摘 要

本文对三种不同弦长比和弯度比的压气机静子双圆弧倒置串列叶栅, 改变其轴向距离和周向偏距等参数, 组合成21种不同几何参数的串列叶栅。在 $Ma_1 = 0.3$ 左右,  $Re = 2.7 \times 10^5$ 下进行了吹风试验, 得出其主要流动性能, 如气流转角 $\Delta\beta$ 和气流流动损失系数 $\omega$ 随气流攻角 $i$ 的变化关系; 并找出其在最佳状态下主要几何参数的工作范围。

## 一、前 言

压气机串列叶栅在航空发动机上的应用愈来愈被人们所重视, 因为串列叶栅与单排叶栅相比具有突出的优点, 即串列叶栅能完成的气流转角大, 而流动损失小。串列叶栅一般有两种形式: 一种是正置串列叶栅, 即通常所称的串列叶栅; [1,2]另一种是倒置串列叶栅 (见图2), 其缝隙流道由前叶片的低压面和后叶片的高压面组成。气流在缝隙流道中加速, 使前叶片的低压面扩压梯度减小, 附面层减薄。因此, 前叶片允许有较高的负荷, 而对后叶片高压面上的附面层能起到吹除作用, 附面层减薄或推迟分离, 减小损失。串列叶栅的前叶片对后叶片可起导流作用。在非设计工况下, 可以说只有前排处于不利条件, 而后排叶片仍可在较为有利的条件下工作。因此, 将它用于高增压比离心式压气机的导风轮中, 以及用于离心式压气机的扩压器上, 其性能有明显的提高 [3]。

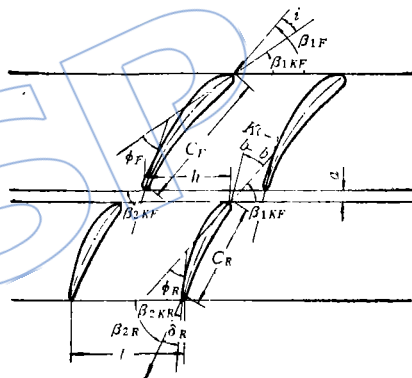


图1 倒置串列叶栅示意图

串列叶栅的前叶片对后叶片可起导流作用。在非设计工况下, 可以说只有前排处于不利条件, 而后排叶片仍可在较为有利的条件下工作。因此, 将它用于高增压比离心式压气机的导风轮中, 以及用于离心式压气机的扩压器上, 其性能有明显的提高 [3]。

## 二、试验设备及试验件

试验设备是我院平面叶栅风洞。试验件是参考Turmo II c、J69、和J85串列叶片某截面叶型的几何进、出口角、弦长、弯度、稠度等参数, 用单个和串列的叶轮机机械平面双圆弧叶型坐标的计算机程序进行设计。制造了三套按三种不同弦长比和弯度比设计的串列叶栅, 其中每套叶栅又按不同的相对轴距离、相对周向偏距、叶片安装角等排列成几种组合, 共有21种不同几何参数的倒置串列叶栅组合。为了便于分析比较, 规定倒置串列叶栅试验件的编号如下: (1) 参考Turmo II c设计的双圆弧倒置串列叶栅为341型, 其中7种组合, 编号分别

为; 3411~3417。(2) 参考J69设计的双圆弧倒置串列叶栅为342型, 其中7种组合, 编号分别为: 3421~3427。(3) 参考J85设计的双圆弧倒置串列叶栅为343型, 其中7种组合, 编号分别为: 3431~3437。

测试系统包括总、静压和气流方向的测量, 以及壁面附面层的吸除装置。这些测试都由微机控制, 自动进行采集和处理数据。直至获得满意的结果打印出来为止<sup>[1]</sup>。

### 三、试验结果和讨论

1. 341型倒置串列叶栅 试验结果见图2和图3。其主要性能参数见表1。

由图可以看出, 当攻角相同时, 3412的 $\Delta\beta$ 为最大, 3415的 $\Delta\beta$ 为最小, 两者相差 $3^\circ$ 左右。损失系数 $\bar{\omega}$ 以3415为最小, 约0.044, 若 $\bar{\omega}$ 限为不大于0.08则3412的 $\Delta\beta_{\max}$ 为最大, 达

表1 341型叶栅的主要性能参数 ( $\Delta\beta$ 和 $i$ 限 $\bar{\omega} \leq 0.08$ )

| 编 号  | $\Delta\beta_{\max}$ | $\bar{\omega}_{\min}$ | $i$ 的工作范围                    | $h/t$  | $a/c_F$ |
|------|----------------------|-----------------------|------------------------------|--------|---------|
| 3411 | $56.2^\circ$         | 0.050                 | $-13.2^\circ \sim 0.8^\circ$ | 0.9100 | -0.0198 |
| 3412 | $58.6^\circ$         | 0.045                 | $-13.8^\circ \sim 3^\circ$   | 0.8361 | -0.0228 |
| 3413 | $54.3^\circ$         | 0.059                 | $-11^\circ \sim 1^\circ$     | 0.8428 | 0.0297  |
| 3414 | $53.8^\circ$         | 0.056                 | $-10^\circ \sim 4^\circ$     | 0.8798 | 0.0284  |
| 3415 | $54.6^\circ$         | 0.044                 | $-13^\circ \sim 3^\circ$     | 0.9066 | -0.0148 |
| 3416 | $53.6^\circ$         | 0.054                 | $-13^\circ \sim 4^\circ$     | 0.7555 | -0.0198 |
| 3417 | $55.8^\circ$         | 0.068                 | $-13^\circ \sim 4.6^\circ$   | 0.8764 | 0.0346  |

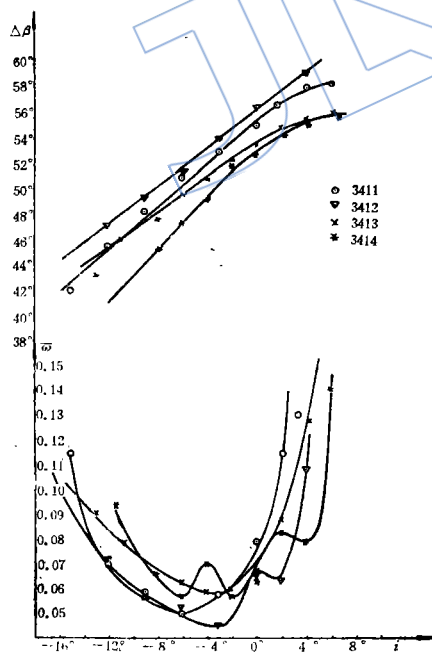


图2 341型倒置串列叶栅正常特性线

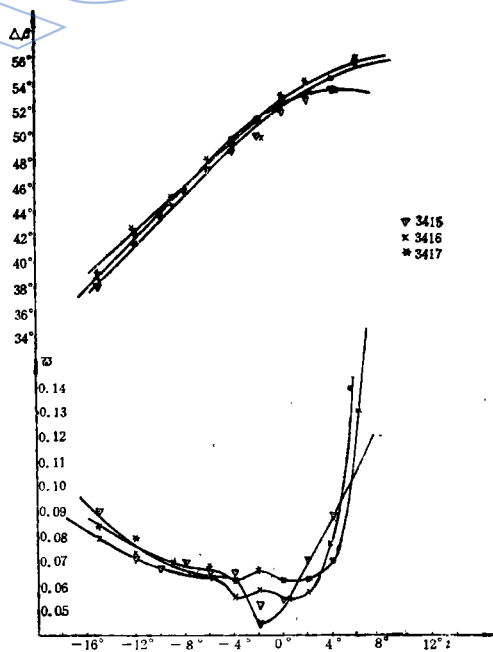


图3 341型倒置串列叶栅正常特性线 (续)

到 $58.6^\circ$ 。工作范围也以3412为最宽,在 $-13.8^\circ \sim 3^\circ$ 之间。同时由参数表中看出3412的 $\bar{\omega}_{\min}$ 为0.045,与最小的 $\bar{\omega}_{\min}$ 非常接近。综合各方面的参数看来,3412号的倒置串列叶栅组合较好。其原因主要是叶栅的相对偏距适中, $h/t=0.8361$ 。轴向距离也较好, $a/c_F=-0.0228$ ,略有一点重叠度,气流在缝隙槽道中作加速流动。这一方面可以减小前叶片低压面的分离,同时又可以吹除后叶片高压面上的分离,改善了气流在前、后叶片上的流动性能,从而减小了损失,增大了气流转角。在图上还可以看到所有叶型负攻角的范围较大。一般来说,在较大的负攻角下工作的叶栅往往是在叶片后部的高压面上产生严重分离,采用了倒置串列叶栅以后,在缝隙槽道中的加速气流,就能够吹除后叶片上的气流分离团,从而使附面层变薄,减小了损失。

## 2. 342型倒置串列叶栅 试验结果见图4、图5。其主要性能参数见表2。

表2 342叶栅的主要性能参数 ( $\Delta\beta_{\max}$ 和 $i_{\text{限}} \leq 0.08$ )

| 编 号  | $\Delta\beta_{\max}$ | $\bar{\omega}_{\min}$ | $i$ 的工作范围                   | $h/t$  | $a/c_F$ |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------|---------|
| 3421 | $43.2^\circ$         | 0.065                 | $-10^\circ \sim 1.4^\circ$  | 0.8328 | 0.0382  |
| 3422 | $49^\circ$           | 0.069                 | $-12.5^\circ \sim -4^\circ$ | 0.9537 | 0.0338  |
| 3423 | $50.6^\circ$         | 0.076                 | $-12^\circ \sim -1.5^\circ$ | 0.9805 | 0.0338  |
| 3424 | $53.8^\circ$         | 0.059                 | $-10^\circ \sim 2^\circ$    | 0.8831 | 0.0501  |
| 3425 | $52^\circ$           | 0.064                 | $-13.2^\circ \sim 2^\circ$  | 0.9402 | 0.0631  |
| 3426 | $52.2^\circ$         | 0.065                 | $-12^\circ \sim -0.5^\circ$ | 0.8395 | -0.0270 |
| 3427 | $51.6^\circ$         | 0.065                 | $-10^\circ \sim -0.5^\circ$ | 0.8999 | -0.0405 |

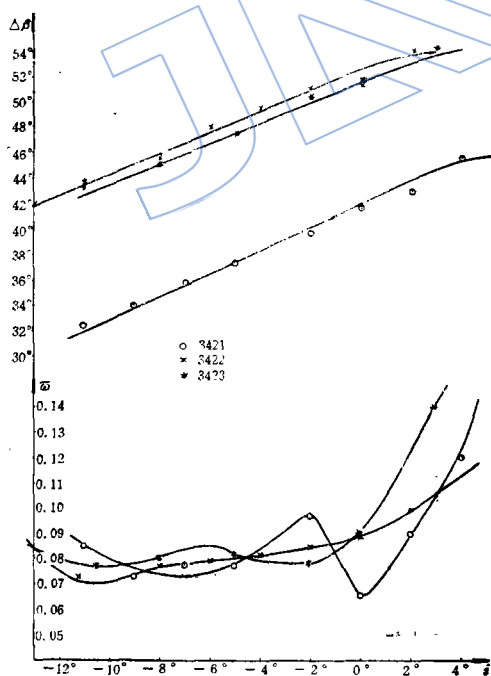


图4 342型倒置串列叶栅正常特性线

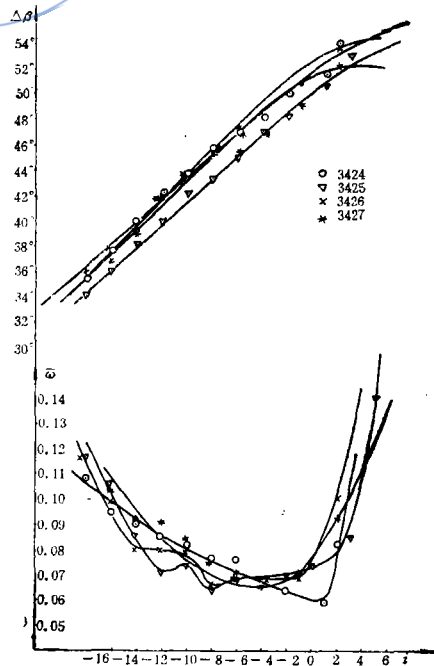


图5 342型倒置串列叶栅正常特性线 (续)

由图可以看出,当攻角相同时,3424的 $\Delta\beta$ 为最大,3421的 $\Delta\beta$ 为最小,两者相差 $10^\circ$ 左右。损失系数 $\bar{\omega}$ 最小为3424,约为0.059。若 $\bar{\omega}$ 限为不大于0.08时,仍以3424的 $\Delta\beta_{\max}$ 为最大, $\Delta\beta_{\max} = 53.8^\circ$ 。3425的*i*工作范围最宽为 $-13.2^\circ \sim 2^\circ$ 。但3424的*i*工作范围在 $-10^\circ \sim 2^\circ$ 也较大。综合看来3424的性能较好。其性能较好的主要原因是 $h/t$ 较大,并与 $a/c_F$ 的配合适中,改善了前后叶片的流动情况。

### 3. 343型倒置串列叶栅 试验结果见图6、图7,其主要性能参数见表3。

由图可知,一般来说,当攻角相同时,3431的 $\Delta\beta$ 为最大,3436的 $\Delta\beta$ 为最小,两者相差大约为 $4^\circ$ 左右。3433的损失系数 $\bar{\omega}$ 最小,约为0.054,而且当 $\bar{\omega} \leq 0.08$ 时的 $\Delta\beta_{\max}$ 也是3433

表3 343型叶栅的主要性能参数 ( $\Delta\beta_{\max}$ 和 $i_{\text{限}} \leq 0.08$ )

| 编 号  | $\Delta\beta_{\max}$ | $\bar{\omega}_{\min}$ | <i>i</i> 的工作范围              | $h/t$ | $a/c_F$ |
|------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------|---------|
| 3431 | $52^\circ$           | 0.073                 | $-6^\circ \sim -1^\circ$    | 0.782 | 0.121   |
| 3432 | $50.2^\circ$         | 0.080                 | $-6^\circ \sim -3^\circ$    | 0.817 | 0.145   |
| 3433 | $52.8^\circ$         | 0.054                 | $-3^\circ \sim -0.5^\circ$  | 0.779 | 0.042   |
| 3434 | $52.2^\circ$         | 0.055                 | $-6^\circ \sim 1^\circ$     | 0.832 | 0.029   |
| 3435 | $52^\circ$           | 0.063                 | $-6^\circ \sim 1^\circ$     | 0.878 | 0.029   |
| 3436 | $49^\circ$           | 0.066                 | $-4.3^\circ \sim 0.3^\circ$ | 0.847 | -0.035  |
| 3437 | $49.8^\circ$         | 0.059                 | $-5^\circ \sim 0.5^\circ$   | 0.786 | -0.032  |

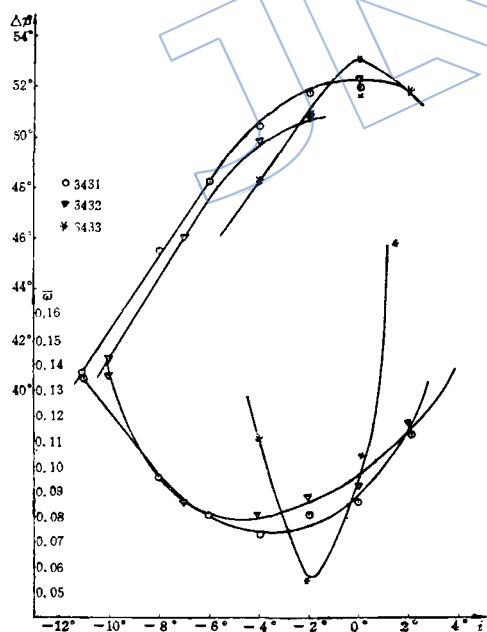


图6 343型倒置串列叶栅正常特性线

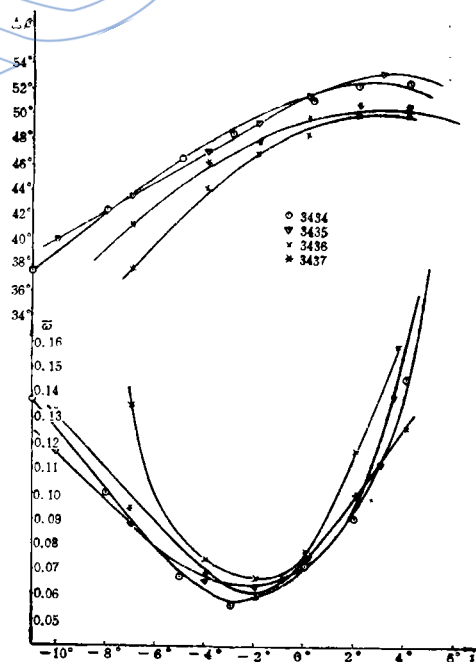


图7 343型倒置串列叶栅正常特性线 (续)

为最大, 约为 $52.8^\circ$ , 但其 $i$ 的工作范围较窄, 在 $-3^\circ \sim -0.5^\circ$ 之间, 然而由图 8 可见, 3434 叶栅的 $\overline{\omega}_{min}$ 亦较低, 为 0.055;  $\Delta\beta_{max}$  也较高, 为 $52.2^\circ$ ; 其 $i$ 的工作范围较宽, 在 $-6^\circ \sim 1^\circ$ 之间。综合看来, 还是 3434 号叶型叶栅的流动性能较好, 即其转角较大, 损失系数较小, 工作范围较宽。这种叶栅性能较好的原因, 也是由于 $h/t$ 和 $a/c_F$ 的配合较适中。

4. 几何参数变化对性能的影响 这里主要讨论周向偏距 $h$  (或相对周向偏距 $h/t$ ) 和轴向距离 $a$  (或相对轴向距离 $a/c_F$ ) 的变化对倒置串列叶栅流动性能的影响。

由 341 型倒置串列叶栅的试验结果看出: 当 $a/c_F$ 约为 $-0.02$ 时, 缝隙槽道有一定的重叠度, 能吹除后叶片上的附面层, 减小气流损失, 增加气流转角, 如 3412 号叶栅就属这种类型。这时的 $(h/t)_{opt}$ 约为 0.83 左右。对 342 型叶栅来说, 当 $a/c_F = 0.05$   $h/t$ 时, 应为 0.88 左右。此时 $\Delta\beta$  和 $\overline{\omega}$ 的性能较好。而对 343 型叶栅来说, 当 $a/c_F = 0.029$ ,  $h/t = 0.83$  左右, 此时 $\Delta\beta$  和 $\overline{\omega}$ 的性能较好。但后两种叶型的总的性能都比 341 型的性能差一些, 其原因之一是后两种叶型的槽道都没有重叠度。

表 4 三种叶栅的综合分析结果

| 叶 型 | $a/c_F$         | $(h/t)_{opt}$ |
|-----|-----------------|---------------|
| 341 | $\approx -0.02$ | 0.83          |
| 342 | $\approx 0.05$  | 0.88          |
| 343 | $\approx 0.029$ | 0.83          |

综合以上分析的结果, 列于表 4。

## 四、结 论

1. 串列叶栅不管是正置还是倒置都具有气流转角大, 损失系数小的特点。如与单排叶栅相比其性能有明显的提高。
2. 倒置串列叶栅在很大的负攻角下工作性能仍然较好。一般 $i$ 可达 $-13^\circ$ 左右。如果设计的叶片经常在宽广的负攻角下工作时, 则采用倒置串列叶栅是有利的。离心增压器的扩压器部分就是采用倒置串列叶栅的特点设计的。
3. 倒置串列叶栅的相对周向偏距应和相对轴向距离密切配合,  $a/c_F = -0.02$ 时,  $h/t = 0.83$ 左右, 这时叶栅性能较好。

## 参 考 文 献

- [1] 庄表南、郭秉衡, “高亚音速压气机静子串列叶栅试验研究”, 航空动力学报, 第 1 卷、第 1 期、1986 年 7 月。
- [2] 庄表南、吴国钊、郭秉衡, “双圆弧串列叶栅流动性能的试验研究”, 航空动力学报, 第 2 卷、第 2 期、1987 年 4 月。
- [3] Klassen, Hugh A., Wood, J.R. and Schumann, L.F., “Experimental Performance of a 13.65-Centimeter-Tip-Diameter Tandem-Bladed Designed for a Pressure Ratio of 6”, NASA TP 1091, 1977.

(责任编辑 冯毓诚)

## APPLICATION OF ANNULAR INSTABILITY MODEL TO FY-20 LIQUID PROPELLANT ROCKET ENGINE

Yuan Weilan

*(Naval Aeronautical Engineering Institute)*

Zhuang Fengchen and Yang Benlian

*(National University of Defense Technology)*

### Abstract

This paper presents computation and analysis of tangential mode of high frequency combustion instability in FY-20 liquid propellant rocket engine by means of the annular instability model. The results show that the tangential mode of high frequency unstable combustion does not occur in the engine, that coincides with the experimental results. Concrete steps and some effective measures for improving the liquid propellant rocket engine which is weak in the tangential mode of high frequency stability are also described in the paper.

## FLOW PERFORMANCE OF REVERSED TANDEM CASCADES WITH DOUBLE-CIRCULAR ARC PROFILE FOR COMPRESSOR STATOR

Zhuang Biaonan

*(Nanjing Aeronautical Institute)*

### Abstract

Blowing experiments have been completed on 21 kinds of reversed tandem cascades with different geometrical parameters. The cascades were designed by the aid of a computer program with reference to the configurations of the tandem cascades of Turmo-IIIc, J69 and J85 compressor stators. The main flow performances were obtained in the form of a group of curves. Three conclusions are drawn as follows. 1. The turning angle of the reversed tandem cascade is larger than that of a single blade cascade, while the pressure loss coefficient is smaller. 2. The reversed cascades still possess a better performance even if the incident angle is about  $-13^\circ$ . Therefore, they can be suitable for application under conditions of minus incident angles. 3. The relative displacement and the relative axial distance of reversed tandem cascades should be matched well.