

双圆弧单排叶栅和串列叶栅 流动性能的试验研究

南京航空学院 庄表南 郭秉衡

摘 要

本文对按照“单个的和串列的叶轮机平面双圆弧叶型坐标的计算机程序”设计出的单排叶栅和串列叶栅,在 $Ma_1=0.3$; $Re=2\times 10^5$ 下,进行了吹风试验获得叶栅的正常特性线;即气流转角 $\Delta\beta$ 和叶型损失系数 $\bar{\omega}$ 随气流攻角 α 的变化关系。从而可以清楚地看出在设计压气机叶型叶栅时采用串列叶栅具有转角大损失小的优点。

一、引 言

串列叶栅就其本质来说就是控制气流在叶背、叶盆上的附面层的形成和发展。把气流本来在一个叶片上所要完成的转角,分布在二个叶片上完成。这时每个叶片上的附面层减薄而不易分离,故损失较小。而且如前、后排叶片相对位置排列得恰当,前叶片流出的气流对后叶片上的附面层能起到吹除的作用,使后排叶片的附面层更薄,损失更小。实践证明,用串列叶栅设计的叶型可以获得高负荷,而产生的损失较小^[1~4],所以串列叶栅在航空发动机中已被采用。目前串列叶栅大多数用在航空发动机轴流压气机的末级静子,如透默Ⅲ、J85、威派尔522、J69等;也有用作末级风扇静子,如JT-15D、JT-8D、阿杜尔、CF6-6等。

我院曾对透默Ⅲ串列叶栅进行了吹风试验,得到了可喜的成果。为了获得更多的串列叶栅试验数据,本文在同样条件下对双圆弧串列叶栅和单排叶栅进行了吹风试验,比较了二者性能。得出采用串列叶栅具有转角大,损失小等显著的优点。

二、试验设备及试验件

试验设备 本试验在叶栅风洞上进行的。其气源低速时用鼓风机吹风,叶栅进口 $Ma_1=0.3$ 左右。高亚音速时用地面涡轮连续式气源设备, $Ma_1=0.8$ 左右。风洞本体部分有进气管道,经阀门、扩压管进入稳定箱使气流均匀稳定,再经收敛段及喷口使气流加速进入试验叶栅。风洞试验段面积为 $300\text{mm}\times 100\text{mm}$ 。设计成这样大的面积是为了保证试验件片具有一定的高度及一定的叶片数目,从而可防止四周附面层的影响,保证在叶栅中间部分测量气流参数的准确性,并在试验段二侧有附面层吸除装置,保证气流的二元性。

试验件 本试验件模拟透默Ⅲ轴流压气机末级静子叶片的主要气动参数和叶型叶栅参数,按双圆弧叶型坐标计算机程序设计,即在进气角、总弯度、总弦长、稠度与透默Ⅲ末级静子第Ⅱ截面基本一致的条件下,按双圆弧叶型设计单排叶栅和双排叶栅,并严格按设计图纸要求加工而成。(图1、表1~3)

表1 双圆弧单排和串列叶栅的主要几何参数

类 型	总弦长 (mm)	总弯度 (°)	总稠度	几何进口角 (β_{1s})
单 排	66.47	63	2.232	36
串 列	66.47	63	2.232	36

表2 串列叶栅前、后排叶栅的主要参数

叶 栅	弦 长 (mm)	弯 度 (°)	栅 距 (mm)	安装角 (°)
前	40.47	20.57	29.8	55.3
后	27.7	23.29	29.8	70.2

表3 串列叶栅的前后叶片关系

间距 a	偏距 b	重叠度 L
2.64mm	25.31mm	-0.48mm

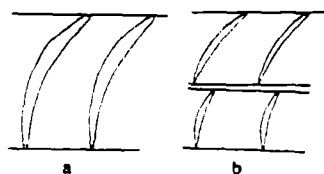


图1 双圆弧单排叶栅 (a) 和串列叶栅 (b) 示意图

三、试验方法和参数测量

试验方法 本试验的内容是测定双圆弧压气机单排和串列叶栅的正常特性线。所谓正常特性线就是指在一定的来流 Ma 数下, 气流转角 $\Delta\beta$ 和总压损失系数 $\bar{\omega}$ 随进口攻角 i 的变化关系。因而必须不同的攻角下, 测量与 $\Delta\beta$ 和 $\bar{\omega}$ 有关的参数。

试验叶栅不管是单排的还是双排的, 都是有10个叶片组成, 各叶片的按装角应保持一致, 经检查后, 把它放在叶栅风洞试验段中, 转动试验件把它调到要做试验的气流攻角 i 之下, 并检查所有测试仪器后, 接着开动鼓风机, 调节控制阀, 保持栅前进口马赫数 $ma_1 = 0.3$ 。当气流稳定后, 即可在中间叶片进行一个或二个栅距参数的测量。

参数测量 栅前气流参数可以认为是均匀的, 气流方向也是平直的。所以只需测一个点或几个点取其平均值, 而不需要沿栅距逐点进行测量。

栅后参数的测量是本试验的关键, 我们是用三向位移机构自动测量。众所周知, 气流通过叶栅时的损失集中反映在尾迹区, 而尾迹区内总压分布变化很大。因此, 为了获得栅后总压, 必须测量沿整个栅距的总压分布, 然后按质量平均法取其平均值。同样尾迹内的气流方向变化也很大。为了求得栅后气流角度的质量平均值, 也必须测出 β_2 沿栅距的变化。

测量精度 进、出口总压 p_1^* 、 p_2^* 的精度为 $\pm 4.9Pa$; 进、出口静压 p_1 、 p_2 的精度为 $\pm 4.9Pa$; 进、出口气流方向 β_1 、 β_2 的精度为 $< \pm 0.5^\circ$ 。

测试数据的整理: 总压损失系数 $\bar{\omega} = (p_1^* - p_2^*) / (p_1^* - p_1)$; 静压扩压系数 $\psi = (p_2 - p_1) / (p_1^* - p_1)$; 气流转角 $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$; 气流攻角 $i = \beta_{1s} - \beta_1$ 。

测试范围 进口马赫数 $Ma_1 = 0.3$, $Re = 2 \times 10^5$; 气流攻角 $i = -6.5^\circ \sim +3.5^\circ$ 。

测试仪器 总压和静压的测量用总静压探针, 配有SYD-1张丝压力传感器, XJ-100巡回检测仪和LS-5型数字记录器, 为了保证测试数据的可靠性, 同时采用U形管水银柱和水柱测压计。气流方向用方向探针并配有张丝压力传感器测量。

控制操纵系统 测试装置由 Z-80 单板机控制三向位移机构进行快速测量。工作时探针自动跟踪气流，当方向对准后，自动采集数据并打印出结果。

四、试验结果及其分析

将试验研究所得的结果，绘制成 $\Delta\beta \sim i$ ， $\bar{\omega} \sim i$ 的变化曲线，即可得到双圆弧单列叶栅和双圆弧串列叶栅正常特性线。为了便于比较，将双圆弧单列叶栅和串列叶栅的正常特性线画在一起，见图 2。另外还可以画出 $\psi \sim i$ 的变化曲线，见图 3； $\bar{\omega} \sim \Delta\beta$ 的变化曲线，见图 4。从这些试验所得的曲线中可以看出以下几点：

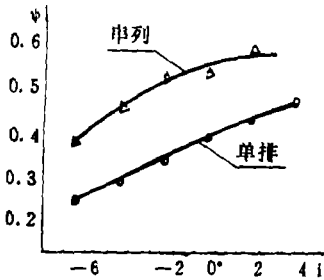


图3 单排和串列叶栅 $\psi \sim i$ 的变化曲线的比较

1. 不管是单排叶栅还是串列叶栅气流转角 $\Delta\beta$ 随气流攻角 i 的变化几乎成线性关系；而损失系数 $\bar{\omega}$ 随气流攻角 i 的变化较为复杂。一般来说在某一攻角 i 下，其损失系数最小，称之为最佳气流攻角。大于或小于这个最佳气流攻角，损失系数都有所增加（见图 2）。但最佳气流攻角的数值对单排叶栅和串列叶栅来讲是不相同的。本试验中单排叶栅的最佳攻角为 -3° 左右而串列叶栅的最佳攻角为 1° 左右。从这里可以初步看出串列叶栅的优点之一是最佳气流攻角较大。这意味着气流在叶栅中加功量较大时损失仍然是最小的。

2. 在同样的条件下（即单排叶栅的弦长、弯度、稠度和串列叶栅的总弦长、总弯度、总稠度完全一样），串列叶栅比单排叶栅具有无可比拟的优点。即在同样的攻角 i 下，串列叶栅的转角 $\Delta\beta$ 比单排叶栅的转角约大 $2 \sim 5^\circ$ 。如 $i = 1^\circ$ 时，串列叶栅的转角 $\Delta\beta$ （简称为 $\Delta\beta_{串}$ ）为 55.4° 而单排叶栅的转角（简称为 $\Delta\beta_{单}$ ）为 49.6° ；同时串列叶栅的损失系数 $\bar{\omega}_{串}$ 比单排叶栅的损失系数 $\bar{\omega}_{单}$ 要小得多。如 $i = 1^\circ$ 时， $\bar{\omega}_{串} = 0.04$ 而 $\bar{\omega}_{单} = 0.076$ （见图 2）。

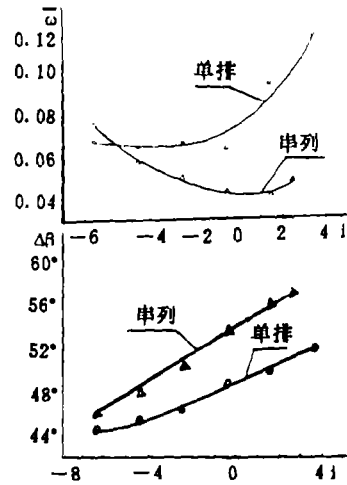


图2 单排和串列叶栅正常特性线的比较

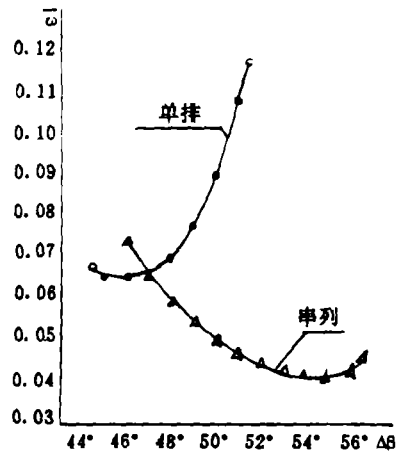


图4 单排和串列叶栅 $\bar{\omega} \sim \Delta\beta$ 的变化曲线的比较

3. 如果从 $\psi \sim i$ 图 (见图3) 来看在同样的条件下, 串列叶栅的静压扩压系数 ψ_{st} 也比单列叶栅的静压扩压系数 ψ_{sh} 为大。如 $i=1^\circ$ 时, $\psi_{st}=0.55$ 而 $\psi_{sh}=0.39$ 。这意味着在同样的有关主要几何参数和进口气流参数下, 串列叶栅的扩压性能好。

4. 根据单排和串列叶栅的正常特性线作出 $\bar{\omega} \sim \Delta\beta$ 的变化曲线 (见图4)。由图可以看出, 转角较大时, 串列叶栅的损失系数较小, 而单排叶栅的损失系数较大。这说明串列叶栅能够在较大的加功量下 (即 $\Delta\beta$ 较大), 由于控制了附面层的增长和发展使损失系数仍然保持在最小的范围内。例如 $\Delta\beta=55^\circ$ 时, $\bar{\omega}_{st}$ 约为 0.04 左右, 而此时 $\bar{\omega}_{sh}$ 就非常大, 估算约为 0.2 以上。这是因为气流流经单排叶栅时早就出现分离了, 损失突然增加。单排叶栅只有在 $\Delta\beta$ 转角较小时, 如 $\Delta\beta=46^\circ$ 时, 损失较小, $\bar{\omega}=0.063$ 。但还是比最小的 $\bar{\omega}_{st}$ 仍大一些。由此可见, 串列叶栅是在大的转角下工作特别有利。

本文着重对双圆弧单排叶栅和串列叶栅进行了对比性试验研究。通过试验得出 $Ma=0.3$; $Re=2 \times 10^5$ 下的单排叶栅和串列叶栅正常特性线, 即 $\Delta\beta \sim i$ 的变化关系曲线。同时得出 $\psi \sim i$ 的关系曲线和 $\bar{\omega} \sim \Delta\beta$ 的关系曲线。从这些试验获得的曲线中可以明显地看出串列叶栅有效地控制了叶型表面附面层的增长和发展, 所以它与单列叶栅相比具有无可比拟的优点。即串列叶栅工作范围 (指低损失系数时的工作范围) 宽广, 气流转角大, 损失小。故它实为提高压气机级负荷, 扩大压气机喘振裕度的一种行之有效的办法, 值得推广。

参 考 文 献

- [1] Bertner, James L. and Nosek, Stouley M., "Summary of Tests on Two Highly-Loaded Turbine Blade Concepts in Three-Dimensional Cascade Sector", Paper 69-WA/GT-5 ASME, Nov. 1969.
- [2] Raily, J. W., and EL-Sarha, M. E., "An Investigation of the Flow Through Tandem Cascades", Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 180, Pt. 3J. 1965-1966.
- [3] Linnemann, H., "Tandem Grid in a Single Stage Blower Rep. RSIC-276", Redstone Sci. Information Center, Army Missile Command, Sept. 1964. (Available from DDC AD-606782).
- [4] Lueders, H. G. and Roelke, R. J., "Some Experimental Results of Two Concepts Designed to Increase Turbine Blade Loading", Paper 69-WA/GT-1. ASME, Nov. 1969.

(责任编辑 冯毓诚)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON CHARACTERISTICS OF SINGLE AND TANDEM BLADE CASCADES WITH DOUBLE—CIRCULAR ARC PROFILE

Zhuang Biaonan and Guo Bingheng

(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT A single cascade and a tandem cascade with double-circular arc profile have been designed and investigated, which have same total cord, total camber, constructional inlet and exit angles, and solidity as the reference tandem compressor stator blade of Turmo III c gas turbine engine. The inlet Mach number is 0.3. The characteristics of both single and tandem cascades, such as the dependence of turning angle $\Delta\beta$ and coefficient of total pressure loss $\bar{\omega}$ on incidence angle α have been obtained. The experimental data are compared and analyzed. The tandem cascade features large fluid turning angle and small loss coefficient. For incidence angle from -6.5° to $+3.5^\circ$, $\Delta\beta$ of the tandem cascade is larger than $\Delta\beta$ of the single cascade $2-5^\circ$, and $\bar{\omega}$ the tandem cascade is smaller than $\bar{\omega}$ of the single cascade. For example, when $\alpha=1^\circ$, for the tandem cascade $\Delta\beta=55.4^\circ$, $\bar{\omega}=0.04$, for the single cascade $\Delta\beta=49.6^\circ$, $\bar{\omega}=0.076$.

STUDY ON NONLINEAR DUFFING CHARACTERISTICS OF FLEXIBLE ROTOR WITH SFDB

Meng Guang and Xue Zhongqing

(*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT It is demonstrated theoretically and numerically that the flexible rotor-centralized squeeze film damper bearings (SFDB) system with multiple degrees of freedom has the nonlinear characteristics similar to those of the Duffing equation of one degree of freedom. The bone curve and amplitude limit curve of the amplitude-frequency response curve of the system are derived. The relations among the above three curves and their effects on bistable response are analyzed. It is found that the number of the intersection points of the bone curve with the amplitude limit curve determines the nonlinear forms of the system responses, and the amplitude limit curve is tangential to the amplitude-frequency response curve at the intersection point. Thus it is revealed how the Duffing and bifurcation nonlinear responses are formed. It is also proved that the squeeze film force will not change the rigid critical speed of the original system, but make the amplitude-frequency response curve deflect. This deflection always has the characteristics of hard spring, that is, the amplitude-frequency response curve will deflect in the direction of larger rotating speed. When this deflection reaches a certain degree, the bistable response occurs and it may appear in the both sides of the undamped rigid critical speed of the system.