

两类常用篦齿密封和临界特性的分析与比较*

西北工业大学 吴丁毅**

【摘要】 对于根据大量实验数据提出的计算两类篦齿流量系数的经验公式相对于理论公式所做的各种修正进行了讨论。对它们的密封特性作了深入的分析 and 比较,指出了各自的特点和适用条件。探讨了篦齿的临界特性,提出了新的能够准确计算两类篦齿临界压比的经验公式。

主题词: 密封 流量系数 泄漏

分类号: TK473.813

1 引言

目前用于计算篦齿泄漏量的经验公式比较粗糙,考虑的影响因素较少,降低了空气系统流动参数计算的准确性。笔者对直通式和台阶式这两类篦齿的封严性能进行了大量的实验研究^[1,2],对实验数据进行整理拟合提出了计算各类篦齿流量系数的经验公式。在此基础上对计算公式的修改进行了讨论,对篦齿的封严特性做了深入的分析 and 比较,探讨了篦齿的临界特性,提出了计算两类篦齿临界压比的经验公式。这些分析、讨论和计算公式有助于工程人员在空气系统的设计和校核计算中合理地选择篦齿的类型,准确地计算流动参数,正确地分析系统的流动特性。

2 篦齿结构

对两类共4种篦齿测量了其泄漏量随各种流动和结构参数的变化情况。它们分别是直通式直齿(代号ZZ)和直通式斜齿(ZX)以及台阶式直齿(TZ)和台阶式斜齿(TX)。参见图1。详细尺寸和实验结果见文献^[1,2]。

根据对篦齿封严机理的研究^[3,4],篦齿是靠缝隙的节流和齿腔中的涡流来消耗气流的动能,增加阻力,达到减少泄漏的目的。即影响封严性能的几何参数是齿尖厚度 t 与间隙 c 的“厚隙比” t/c ,齿高 H 与齿距 B 的“高距比” H/B 。根据流场分析研究,随着 H/B 不断减小,齿腔中的涡流耗散效应逐步增加。但由于重量和结构的限制,实际的发动机上不允许 H/B 过

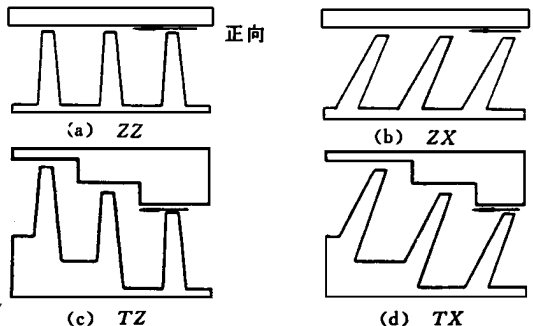


图1 篦齿结构示意图

小,一般为 1 左右。实验中仅改变了 t/c , 而 H/B 取目前机种常用的尺度为 0.86。

3 密封特性讨论

目前在计算篦齿泄漏量时主要采用两个参数,即泄漏系数 φ 和流量系数 α

$$\varphi = m^{\circ} \sqrt{T_i^{\circ} / (P_i^{\circ} A)} \quad , \quad \alpha = m^{\circ} \sqrt{R T_i^{\circ} / (P_i^{\circ} A)} \quad (1)$$

其中 m° 是流过篦齿缝隙面积 A 的质量流量, T_i° 和 P_i° 是篦齿进口气体的总温和总压。显然两者仅差一个气体常数 R 的平方根。为了便于后面进行分析,本文采用流量系数进行讨论。

长期以来我国的航空发动机界一直采用斯多达拉^[4]公式计算篦齿的泄漏量。

$$\alpha = k \{ [1 - (P_0^{\circ} / P_i^{\circ})^2] / N \}^{0.5} \quad (2)$$

其中 P_0° 是篦齿出口的气流总压, N 为齿数, k 为齿型修正系数。根据文献[5]直通式直齿、斜齿和台阶斜齿的 k 分别为 1.27, 1.15, 0.85。公式(2)是在绝热流动的假设下,把篦齿内部流动做为一系列类似于喷管的过程,推导得到的理论公式。原始公式仅考虑了压比和齿数的影响。为了适应工程计算的要求,实用公式增加了齿型修正系数。该公式用于计算航空发动机空气系统中篦齿的泄漏量时最大的缺点在于它是针对低压气流推导的。

马丁^[4]公式是适用于计算高压气流通过篦齿的泄漏量的理论公式。

$$\alpha = k \{ [1 - (P_0^{\circ} / P_i^{\circ})^2] / [N - \ln(P_0^{\circ} / P_i^{\circ})] \}^{0.5} \quad (3)$$

它同公式(2)一样把除压比和齿数以外的影响因素都归结为一个齿型修正系数。笔者认为齿型的差异不仅仅是直通齿与台阶齿,直齿与斜齿的区别,还应包括影响密封性能的重要的无因次结构参数 t/c 和 H/B 。这么多因素,特别是一些变化的因素,是不可能用一个确定的常数全面准确地加以考虑的。在马丁原始公式的基础上,利用所做的大量实验数据进行修正,提出了计算直通式和台阶式篦齿流量系数的经验公式。其中 H/B 的适用范围是 0.8 至 1.2。

直通式篦齿

$$\alpha = k(t/c)^{-0.1} [1 - a(N - 1)/N]^{0.5} \{ [1 - (P_0^{\circ} / P_i^{\circ})^2] / [N - \ln(P_0^{\circ} / P_i^{\circ})] \}^{0.5} \quad (4)$$

直齿: $k = 0.898$, $a = 0.33$, $N \leq 9$

斜齿: $k = 0.661$, $a = 0.70$, $N \leq 7$

台阶式篦齿

$$\alpha = k(t/c)^{0.2} [1 - a(N - 1)/N]^{0.2} \{ [1 - (P_0^{\circ} / P_i^{\circ})^2] / [N - \ln(P_0^{\circ} / P_i^{\circ})] \}^{0.75} \quad (5)$$

直齿: $k = 0.966$, $a = 0.70$, $N \leq 5$

斜齿: $k = 0.780$, $a = 0.88$, $N \leq 5$

对照公式(3) — (5)可以看出新的计算公式比马丁公式在几个方面进行了改进。

首先是从压比因子 $[1 - (P_0^{\circ} / P_i^{\circ})^2] / [N - \ln(P_0^{\circ} / P_i^{\circ})]$ 的指数上根本区别了直通式与台阶式两类篦齿的差异。增加了反映无因次间隙变化影响的重要因子厚隙比 t/c , 强化了齿数的影响,增加了齿数因子 $[1 - a(N - 1)/N]$ 。齿型系数仅表示同类篦齿中直齿与斜齿的差别。由于公式(4)和(5)是在理论的基础上利用大量实验数据充分考虑多种因素修正得到的,因此计算结果与实验数据在不同的齿型和几何参数下均符合良好。参见图 2。

斯多达拉公式(2)的计算结果不仅误差大,而且变化趋势也不完全正确。马丁公式(3)的计算结果变化趋势基本上是正确的,但由于它只有一个综合修正常数 k ,无法全面考虑各种几何参数的影响,造成计算结果在许多情况下误差较大。

从公式(4)和(5)可以看出直通式篦齿与台阶式篦齿的密封性能有许多相似之处,但也有

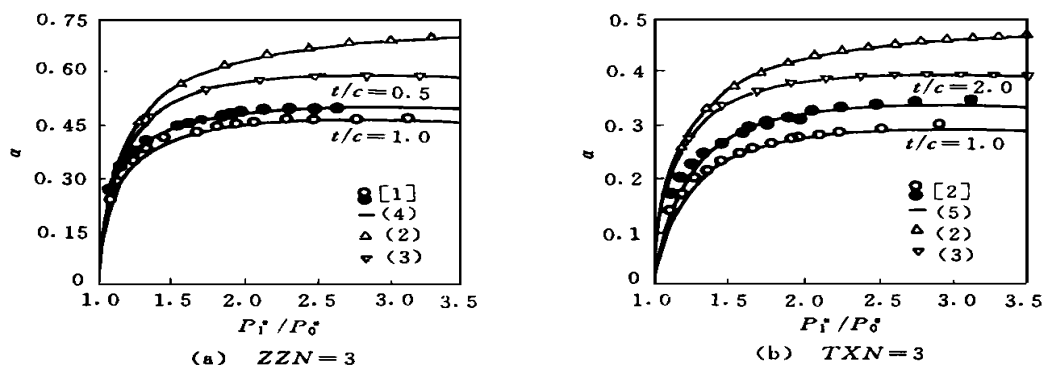


图 2 计算结果与实验数据对比

不少差别。

特别需要指出,两类篦齿的 α 受 t/c 变化影响的规律完全相反。当 t/c 减小即间隙 c 增大时,直通齿的 α 增大而台阶齿的 α 减小。这是由于 c 增大时,对于直通齿不仅是泄漏面积 A 增大了,而且内部流动情况发生了变化,有更多的气体直接冲向下一个节流口,卷入齿间涡流的气流变少了,气流损失减少,因此泄漏量增加很快。对于台阶齿只要间隙变化不超过台阶高度,其内部流动变化不大,大部分气体经过齿尖节流后都要进入齿腔中的旋涡,然后才流向下一个节流口,气流损失变化不大,主要由于流通面积增大造成的泄漏量增加相对较慢。这说明台阶齿的密封性能对于间隙的变化不敏感,它是台阶齿的一个重要的优秀特征。

从上述公式分析和讨论说明台阶式篦齿在单位齿密封能力、间隙敏感性和流向特性等方面都优于直通式篦齿。但并不能因此就在选择密封结构时全部采用台阶齿。因为台阶齿存在结构复杂、径向尺寸大和单位齿重量大等缺点。所以应该根据实际的条件和需要来选择篦齿结构。例如在小轴径、轴向尺度宽裕,气流方向确定的条件下,完全可以采用较多齿数的直通式斜齿取得与台阶齿同样良好的封严效果。

4 临界特性讨论

篦齿的临界特性是在空气系统设计计算和流动状态分析时都十分关心的一个性质。以往计算临界压比和临界流量都是利用斯多达拉公式(2),假定气流在最后一个齿达到理想喷嘴的临界状态,从而推导计算临界参数的理论公式^[5]

$$P_i^*/P_{cr}^* = 1.89 \sqrt{1 + (N - 1)\Gamma} \quad (\Gamma = 0.685) \quad , \quad \alpha_{cr} = \Gamma / \sqrt{1 + (N - 1)\Gamma^2} \quad (6)$$

但是用公式(6)计算的临界值不仅与实验结果不符,而且与理论公式(2)和(3)计算的流量系数曲线显示的临界点也有较大差异。参见图3。

由于公式(6)是在理想流动的假设条件得到的,其计算的每级齿产生的压力损失比实际的损失小,所以造成了理论计算临界压比小于实际测量结果。而且临界流量的计算公式没有考虑篦齿几何尺寸的差异,使得计算误差很大。

本文根据实验结果整理得到了计算临界压比的经验公式。

直通式篦齿

$$P_i^*/P_{cr}^* = 1.89 \sqrt{1 + 0.81(N - 1) - 0.023(N - 1)^2} \quad (7)$$

台阶式篦齿

$$P_i^*/P_{cr}^* = 1.89 \sqrt{1 + 0.91(N - 1) - 0.053(N - 1)^2} \quad (8)$$

在选定了篦齿类别和齿数以后就可以用公式(7)或(8)计算出它的临界压比。当工作压比超过临界值以后需将该值代入公式(4)或(5)计算出相应的临界流量。由于公式(4)和(5)详细考虑了篦齿的类别、齿型和厚隙比等参数的影响,因此能够准确地计算出篦齿的临界流量系数。参见图4。

由于公式(4)和(5)是用实验数据拟合的,其只能保证在临界点以前计算的流量系数是正确的。超过临界压比以

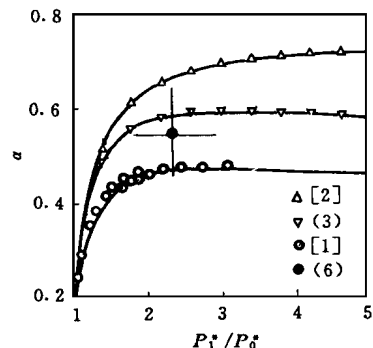


图3 用公式(6)计算临界点造成的误差

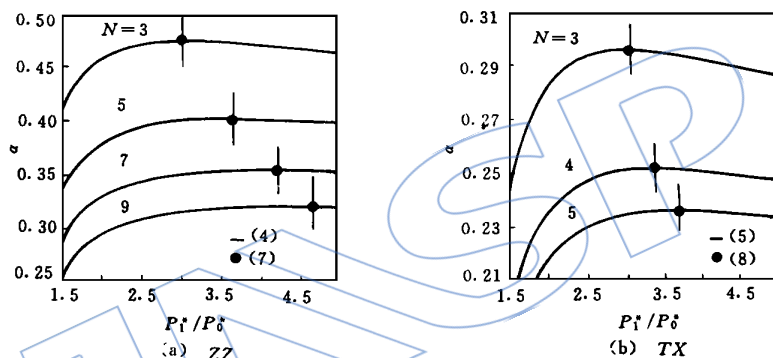


图4 直通齿与台阶齿的临界特性

后,从图4可以看出流量系数反而下降了,这是曲线拟合形成的走势,并不表示真实的流量变化规律。不过由于在实际应用中,当压比超过临界点以后就采用临界流量系数了,因此不会造成实用结果的误差。

参 考 文 献

- 1 吴丁毅 直通式篦齿密封特性的实验研究 推进技术, 1997, 18(3)
- 2 吴丁毅 台阶式篦齿密封特性的实验研究 流体机械, 1995, 23(11)
- 3 吴丁毅 直通式篦齿内部流场显示研究 流体机械, 1997, 25(2)
- 4 塔鲁达纳夫斯基 非接触密封 北京: 机械工业出版社, 1986
- 5 顾永泉 流体动密封 北京: 石油大学出版社, 1990

(责任编辑 魏星禄)

green ent

Key Words Noise propellers Fuselages Effect Noise measurements

COMPARISON BETWEEN TWO KINDS OF CONVENTIONAL LABYRINTH

Wu Dingyi

(7th Dept Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT Straight- through and stepped labyrinths are often used in aircraft engine. According to large amounts of experimental data, the empirical formulas of mass flow factor for these two kinds of labyrinth have been provided which are superior to their theoretical formulas due to various corrections. The seal characteristics of the two kinds of labyrinth were compared and analyzed in detail so that their features and reasonable conditions of their application were found out. Finally, the new empirical formulas for calculating their critical pressure ratio were derived too.

Key Words Sealing Flow coefficients Leakage

MULTISECTION LINERS FOR NOISE REDUCTION OF COUNTER- ROTATING FAN

Shi Wei

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 210016)

ABSTRACT It has been found that multisection liners not only attenuate the sound waves in ducts, but also to suppress sound wave through the wave reflection at impedance discontinuities. As a consequence, the maximum noise reduction in a duct of given length can be realized by designing each section liner and different combination. In the present investigation, different combinations of multisection liners have been designed to suppress the discrete noises generated by a counter- rotating fan. The experimental results testified that, the noise was reduced by 9 dB in far field under the condition of 60 cm liner length.

Key Words Fans Perforated plate sound absorption Noise reduction

DIGITAL SIMULATION ON TOOTH CUTTING AND MESHING OF SPIRAL BEVEL GEARS

Wang Sanmin and Ji Minggang

(Mechanical Dept Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The conventional methods for determining the tooth geometry and tooth contact of spiral bevel gears are based on differential geometries of rigid body movement, and consequently make description of tooth surface and analysis of tooth contact behavior very complicated. In this paper, the authors work out a digital simulation method for tooth cutting and meshing of spiral bevel gears. A numerical model of tooth surfaces is set up by digital simulation of tooth cutting. The analysis of tooth contact behavior is completed with the numerical model of tooth surfaces. Solution of the meshing equation $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$ in conventional methods is replaced by minimizing the normal distance between points on the tooth