

齿位置对压气机级间封严影响的数值研究

孔晓治, 刘高文, 陈 凯

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 通过对压气机级间封严不同篦齿位置时的流场和温度场进行数值模拟, 获得其泄漏特性、旋流特性和风阻温升特性. 研究单齿、双齿和三齿的相对位置对级间篦齿封严的流量系数、出口旋转比和风阻温升的影响. 结果表明: 单齿情况下, 单齿在下游时的流量系数最小, 出口旋转比和风阻温升最大. 双齿情况下, 上游和下游各一齿时的流量系数最小. 三齿情况下, 上、下游和中间各一齿时流量系数最小. 出口旋转比和风阻温升都随流量系数的减小而增大.

关 键 词: 级间封严; 篦齿; 流量系数; 旋转比; 风阻温升

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical study on the influences of tooth position in a compressor stator well sealing

KONG Xiao-zhi, LIU Gao-wen, CHEN Kai

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Numerical simulations of the flow and temperature fields of a labyrinth were carried out at different tooth positions in a compressor stator well. The sealing characteristics, swirl characteristics and windage heating characteristics of a labyrinth seal with different tooth positions were studied. Influences of relative different positions of single, double and triple teeth on the discharge coefficient, outlet swirl ratio and windage heating were studied. The results show that the discharge coefficient is minimum, outlet swirl ratio and windage heating are maximum when the single tooth is placed at downstream position. Under the double teeth condition, when one is at upstream position and the other at downstream position, the discharge coefficient is minimum. Under the triple teeth condition, when upstream, downstream and middle positions are separately provided with a tooth, the discharge coefficient is minimum. With the decrease of discharge coefficient, the outlet swirl ratio and windage temperature increase.

Key words: stator well sealing; labyrinth; discharge coefficient; swirl ratio; windage heating

在航空发动机中, 转动件和静止件之间不可避免地会留有间隙, 气体泄漏必然发生. 然而随着航空发动机循环参数及性能的提高, 封严技术已成为影响航空发动机性能的主要因素之一^[1-2]. Sturgess 表示, 航空发动机性能的提升一半将由

封严技术决定^[3]. 美国路易斯研究中心(Lewis Research Center)的 Steinetz 等^[4]研究认为, 对于商用飞机, 先进的密封技术可以减少航空发动机 3%~5% 的直接操作费用; 可以降低 10% 的燃油消耗量. 篦齿封严是各种旋转机械上普遍使用的

收稿日期: 2014-04-29

作者简介: 孔晓治(1989—), 男, 河北沧州人, 博士生, 研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动传热.

E-mail: kongxiaozhi_lx@163.com

封严方式,它是利用篦齿尖与封严环面之间的间隙节流和齿腔中涡流来增加通道的流阻,达到减少泄漏的目的^[5].在航空发动机中主要用于压气机和涡轮级间封严、叶尖和内流空气系统、涡轮轮缘封严以及主轴承腔滑油封严系统中的油气隔离等^[6-8].

为了达到更好的封严效果,必须知道篦齿封严的流动特性.国内外学者通过理论分析、数值计算、实验研究对篦齿封严的封严机理和影响因素都做了大量的工作. Martin, Egli, Kearton 等人最早对篦齿封严进行了理论推导和实验研究,并且从气动热力学机理上对篦齿封严做了阐述,提出了泄漏特性的表达和计算方法^[9-10]. Gamal、黄晓光等^[11-12]实验研究了齿型、齿宽等对篦齿封严的影响.王鹏飞等^[13-15]研究了压比和旋转对篦齿封严的影响.大量研究表明气动参数、转速、封严间隙、篦齿几何参数对其密封性能都有重大影响^[16].

在航空发动机压气机中随着主流通道压力的升高,为了防止气流通过转子与静子间隙泄漏,必须有级间封严.在压气机级间封严篦齿段进出口分别有一个转-静旋转盘腔,这是其与常规篦齿封严明显的不同之处.级间泄漏的这股气流除了会引起主流流量减少、压气机压缩功损失外,在转子的作用下还会产生风阻温升,影响叶根温度、强度和变形.图 1^[1]为某压气机级间封严结构图.

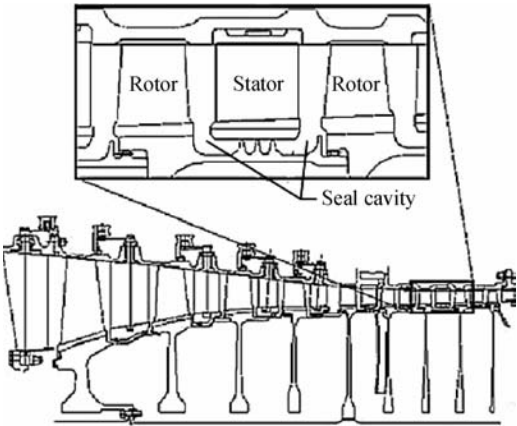


图 1 压气机级间篦齿封严结构

Fig. 1 Structure of labyrinth seal in a compressor stator well

压气机级间篦齿封严中如果齿尖与静子根部间隙过大,则会降低封严效果;如果间隙过小,转子的转动又会使齿尖与静子根部产生刚蹭.另外,很多新型封严结构在应用上都会有一定的局限性,比如台阶齿要求径向有一定的空间;斜齿的加

工比较困难等.怎样在较大的间隙下减少气体泄漏,是级间封严的研究重点和难点.本文将研究篦齿轴向位置对压气机级间封严特性的影响.

1 计算模型与计算方法

1.1 计算模型

针对某航空发动机的压气机级间封严结构,对其中一级进行二维轴对称旋流模型的模拟,计算模型如图 2 所示.

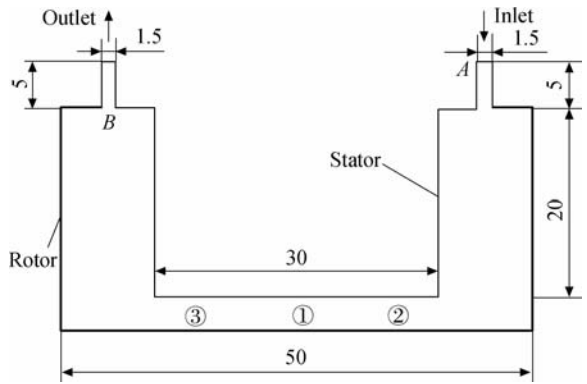


图 2 压气机级间篦齿封严计算模型(单位:mm)

Fig. 2 Computation model of labyrinth seal in a compressor stator well (unit:mm)

图 2 中细实线表示静子,粗实线表示转子,转子半径为旋转中心到齿顶的距离, $R=250\text{ mm}$. 右侧为气流进口,左端为气流出口.数据统计截面如图中 A,B 所示,其中 A 为进口截面,B 为出口截面.本文通过截面数据统计,计算出了流量系数、出口旋转比、风阻温升.图 2 中位置①在中央,位置②和位置③各距两端 5 mm.齿数和齿位置情况介绍如下.

单齿:在位置①,定义为情况 1,记为 $N=1-1$;在位置②,定义为情况 2,记为 $N=1-2$;在位置③,定义为情况 3,记为 $N=1-3$.

双齿:两齿都在位置①,定义为情况 1,记为 $N=2-1$;一齿在位置②,一齿在位置③,定义为情况 2,记为 $N=2-2$.

三齿:位置①,②,③各一齿,定义为情况 1,记为 $N=3-1$;位置②一齿,位置③两齿,定义为情况 2,记为 $N=3-2$;位置②两齿,位置③一齿,定义为情况 3,记为 $N=3-3$;位置①三齿,定义为情况 4,记为 $N=3-4$.

齿尺寸如图 3 所示.其中,齿顶间隙 $c=0.5\text{ mm}$,齿顶厚度 $t=0.3\text{ mm}$,齿高 $H=3.2\text{ mm}$,前后倾角 α 和 θ 都为 10° .当双齿或者三齿在同一

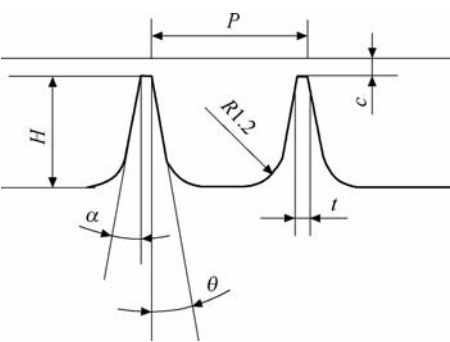


图 3 篦齿参数定义(单位:mm)
Fig. 3 Parameters definition for the labyrinth
(unit:mm)

置时,齿间距 $P=4.5\text{ mm}$. 当单个齿位于位置②或③时,分别为齿中心距两端 5 mm .

将计算域划分为多个子区域,采用 Gambit 软件分块划分网格. 如图 4 所示,篦齿附近采用非结构化三角形网格,齿尖等速度梯度变化较大的地方进行网格加密并保证疏密网格过渡均匀,其他区域采用结构化四边形网格. 转子和静子壁面都划分边界层网格,边界层共 10 层,保证壁面 Y^+ 在 1 的量级. 为了消除网格数目对于计算结果的影响,对于 3 个齿都在位置①的情况进行不同网格数目的划分,分别为 10 万、13 万、17 万左右. 流量系数在相同工况下的偏差在 0.5% 以内,可以忽略网格数目对于计算结果的影响.

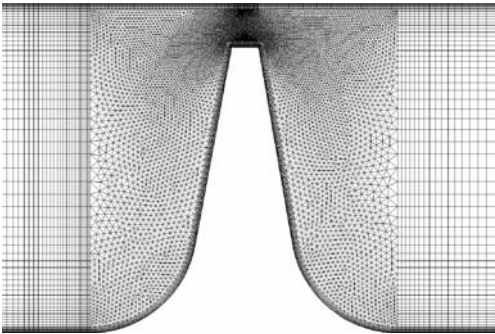


图 4 齿附近网格划分
Fig. 4 Mesh generation for the teeth

1.2 计算方法和边界条件

利用 Fluent 6.3 软件进行求解,物理方程选择二维稳态轴对称旋流模型,方程求解采用分离隐式求解器和 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法,离散格式为 2 阶迎风格式.

湍流模型根据 1.3 节的验证,realizable $k-\epsilon$ 模型误差小、收敛性好、振荡小,所以计算中都采

用此模型,并且考虑黏性耗散热的影响,近壁采用增强壁面处理方法. 流体为理想气体,黏性随温度变化的计算采用 Sutherland 公式.

进口为压力进口,沿径向无旋转进气,给定进口总压和总温 300 K;出口条件为压力出口,给定出口静压为 0.12 MPa;进出口压比范围为 1.05~1.30,进口总压根据压比和出口压力计算得到. 篦齿壁面采用转动壁面,转速给定 8000 r/min,上壁面为静止壁面,整个计算域壁面都绝热.

1.3 计算方法验证

由于压气机级间篦齿封严模型的实验结果尚未得到,为保证计算的可靠性和准确性,暂选用文献[10]的篦齿实验模型进行数值模拟和计算方法验证. 计算中湍流模型分别尝试了标准 $k-\omega$ 模型、RNG(renormalization-group) $k-\omega$ 模型、realizable $k-\omega$ 模型和 SST(shear-stress transport) $k-\omega$ 模型,其他计算方法与上文相同. 其中 realizable $k-\omega$ 湍流模型的数值结果误差较小,流量系数 C_d 计算结果与实验数据的对比如表 1 所示.

表 1 流量系数的计算结果和实验结果的对比

Table 1 Comparison of discharge coefficient between experiment and numerical results

p_0^*/Pa	p_1/Pa	C_d		偏差/%
		计算值	实验值 ^[10]	
500 000	312 500	0.6539	0.6279	4.15
450 000	281 250	0.6487	0.6240	3.96
400 000	250 000	0.6413	0.6204	3.37
350 000	218 750	0.6312	0.6177	2.19

表 1 中 p_0^* 为进口总压, p_1 为出口静压. 由表中可以看出,流量系数的偏差都在 5% 以内,而且在壁面转动时 realizable $k-\omega$ 湍流模型的收敛性较好,振荡较小. 本文在计算过程中湍流模型选择为 realizable $k-\omega$ 模型.

2 参数定义与分析

级间篦齿封严进出口压比 π 为进口总压与出口静压之比(进口取质量平均的总压,出口取质量平均的静压),定义为^[17]

$$\pi = \frac{p_0^*}{p_1}$$

(1)

压比的高低决定了气流的流动马赫数,而马赫数的大小反映了气流的可压缩性,对气体流动损失的影响很大.

在级间篦齿封严结构中利用流量系数来反映泄漏特性,可在一定程度上反映封严篦齿的流动损失大小,定义为^[17]

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ideal}} \tag{2}$$

理想质量流量定义为

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{p_0^* A_1}{\sqrt{T_0^* R}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_0^*} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_0^*} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \tag{3}$$

式中 $\dot{m}$ 为实际质量流量, $\dot{m}_{ideal}$ 为理想质量流量, T_0^* 为进口总温, R 和 κ 分别为气体常数和等熵指数, A_1 为篦齿齿顶的最小流通面积:

$$A_1 = 2\pi \times r_t \times c \tag{4}$$

式中 r_t 为齿顶处的转子半径.

采用旋转比表示级间封严的旋流特性,定义为^[17]:

$$\beta = \frac{V_\varphi}{V} = \frac{V_\varphi}{\omega r} \tag{5}$$

式中 V_φ 为气流的周向速度; V 为转子的旋转线速度; ω 为旋转角速度; r 为旋转半径. 出口旋转比由图 2 中 B 截面的面积平均得出.

采用风阻温升表示级间封严的温升特性,定义为出口总温 T_1^* 和进口总温 T_0^* 之差^[17].

$$\Delta T = T_1^* - T_0^* \tag{6}$$

风阻温升主要来自于转子对气流的做功,即风阻加热.

3 齿位置不同时的典型流场特征

在级间封严中,齿位置的不同会影响到其流动特性,从而产生不同的流动损失. 转子转动会引起级间中流动结构发生变化,特别是进出口盘腔内的旋流作用会对级间封严流动特性产生重大影响. 为此选择不同齿位置时级间封严通道内的流线、速度和旋转比分布来分析齿位置不同对级间封严的影响. 另外,为了清楚分析齿位置的影响,本节算例都为单齿情况.

3.1 不加转速、齿位置不同时流动特性

为了更加直观深入研究齿位置对级间封严的影响,首先研究不加转速($n=0\text{ r/min}$)、单齿位置不同时的流动特性. 压比 $\pi=1.10$, 不加转速, $N=1-1$ (单齿在位置①)、 $N=1-2$ (单齿在位置②)、 $N=1-3$ (单齿在位置③)3 种情况时级间封严通道内的速度云图如图 5 所示.

图 5 中位置 I, II 为出口盘腔(左腔)拐弯前

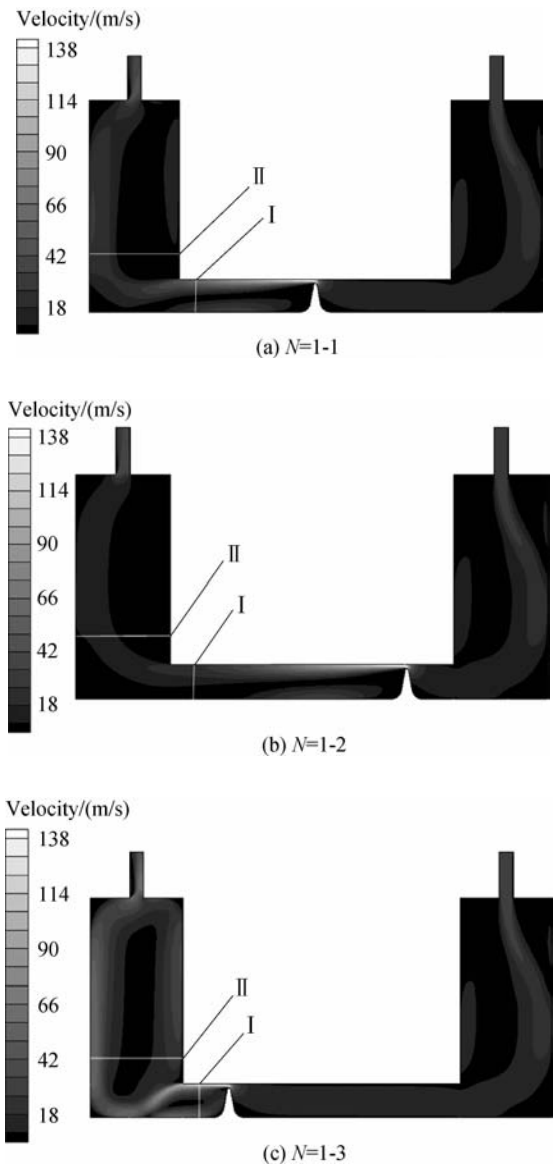


图 5 压气机级间单齿位置不同时速度云图
($\pi=1.10, n=0\text{ r/min}$)

Fig. 5 Velocity contour of single tooth in different positions in a compressor stator well
($\pi=1.10, n=0\text{ r/min}$)

后的两个截面.从图中可以看出,气流经过齿的节流后在齿间隙处有一个速度较高的流动轨迹.当单齿越靠下游时,即 $N=1-3$ 时,经过齿节流后的高速气流贴近上壁面,在出口盘腔入口拐弯处尚未充分掺混,因此高速气流拐弯引起的压力损失大.经统计, $N=1-1, 1-2, 1-3$ 三种情况时截面 I, II 的总压差对比如表 2.

3.2 加转速、齿位置不同时流动特性

压比 $\pi=1.10$, 转速 $n=8000\text{ r/min}$ 时, $N=1-2, 1-3$ 两种情况时级间封严通道内的径向与轴向和速度云图如图 6 所示.

表 2 3 种情况时截面 I, II 的总压损失

Table 2 Total pressure loss between I section and II section of case N=1-1, case N=1-2, case N=1-3

位置 N	截面 I 总压/Pa	截面 II 总压/Pa	总压损失/Pa
1-1	121 402. 07	121 055. 96	346. 11
1-2	121 135. 88	120 985. 11	150. 77
1-3	124 247. 14	121 671. 79	2 575. 35

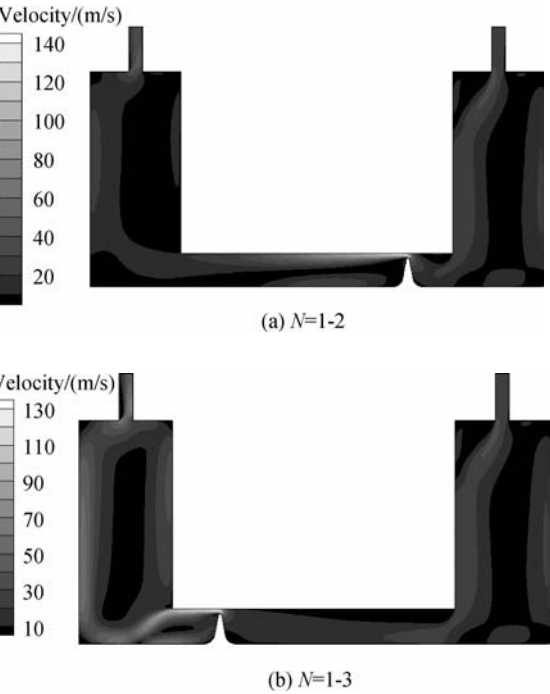


图 6 压气机级间单齿位置不同时速度云图
($\pi=1.10, n=8000\text{ r/min}$)

Fig. 6 Velocity contour of single tooth in different potions in a compressor stator well
($\pi=1.10, n=8000\text{ r/min}$)

从图 6 中可以看出,在加转速的情况下,单齿越靠下游时,经过齿节流后贴近上壁面的高速气流同样在出口盘腔入口拐弯处尚未充分掺混.因此,齿位置不同引起的出口盘腔入口拐弯处压力损失大小不同是影响级间封严流动特性的重要因素.

压比 $\pi=1.10$, 转速 $n=8000\text{ r/min}$ 时, $N=1-2, 1-3$ 两种情况时,级间封严通道内的流线分布如图 7 所示.

图 7 中篦齿段进出口分别为两个转-静旋转盘腔,在转-静旋转盘腔中会出现大的涡流区^[18].气流通过齿节流后,在贴近齿的下游会产生一个涡,齿的位置越靠下游时,这个涡的强度越大.进

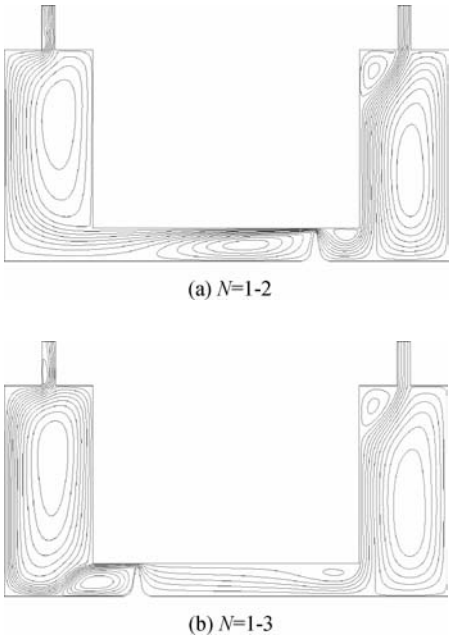


图 7 压气机级间单齿位置不同时流线图
($\pi=1.10, n=8000\text{ r/min}$)

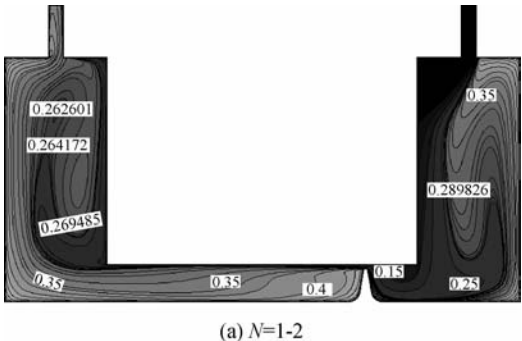
Fig. 7 Streamline of single tooth in different potions in a compressor stator well
($\pi=1.10, n=8000\text{ r/min}$)

口旋转盘腔中由于逆时针涡的存在使气流大部分偏向静子侧流入,出口旋转盘腔中气流大部分被卷吸到转子盘面流出.齿的位置越靠下游时,出口旋转盘腔中被卷吸到转子侧的气流越多.

3.3 加转速、齿位置不同时旋流特性

由于转子转动,篦齿段及进出口盘腔气流的旋流特性是级间封严的重要特征.压比 $\pi=1.10$, 转速 $n=8000\text{ r/min}$, $N=1-2, 1-3$ 两种情况时级间,封严通道内的的旋转比等值线如图 8 所示.

由图 8 可知气流通过篦齿时,转子对气流做功较大,旋转比增加明显.齿的位置越靠下游时,篦齿上游的气流旋转比越大.可以看出 $N=1-3$ 情况时篦齿上游气流的旋转比明显大于 $N=1-2$ 情况时.旋流作用的增强会使轴向的损失增大,减小泄漏.



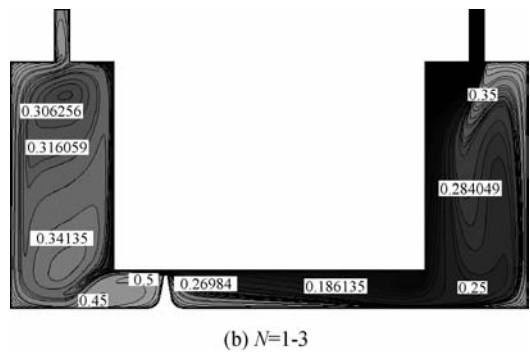


图 8 压气机级间单齿位置不同时旋转比等值线图
($\pi=1.10, n=8000\text{ r/min}$)

Fig. 8 Isolines of swirl ratio of single tooth in different positions in a compressor stator well
($\pi=1.10, n=8000\text{ r/min}$)

由以上分析可知,对于级间封严,当齿越靠下游时,出口盘腔入口拐弯处的压力损失较大,篦齿上游气流旋转比较大,阻碍气体流出,减小泄漏.因此齿位置对级间封严泄漏特性的影响是两者的综合效果.

4 齿位置对篦齿流动特性的影响

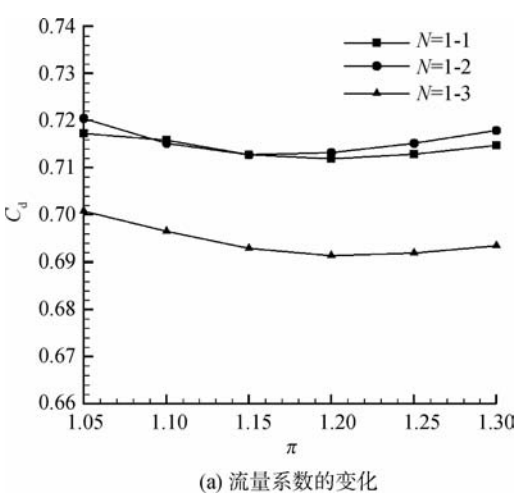
4.1 单齿位置不同时的影响

图 9 是在转速 $n=8000\text{ r/min}$,单齿位置不同时流量系数 C_d 、出口旋转比 β_{out} 、风阻温升 ΔT 随压比变化的曲线图.其中单齿相对位置包括 $N=1-1, 1-2, 1-3$ 三种情况.

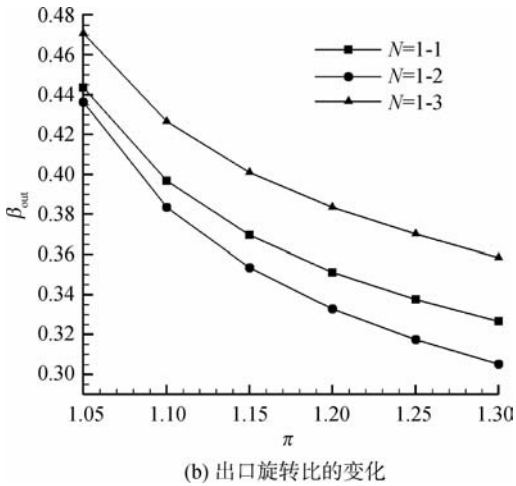
图 9(a)表示单齿位置不同时流量系数 C_d 随压比的变化规律.由图可知,单齿在 3 个位置时,流量系数随压比的变化都在 1.5% 以内.同压比下,当单齿为 $N=1-3$ 情况时流量系数最小;单齿为 $N=1-1$ 情况时流量系数略小于单齿为 $N=1-2$ 时.单齿越靠下游出口盘腔进口处的拐弯损失较大,篦齿上游气流旋流较强,使得流量系数较小.

图 9(b)为单齿相对位置不同时出口旋转比随压比的变化曲线.出口旋转比都随压比的增大而减小,这是由于压比增大,通过级间封严的流量增大,气体旋流减小.相同压比下,单齿为 $N=1-3$ 情况时出口旋转比最大,单齿为 $N=1-2$ 情况时出口旋转比最小.齿的位置越靠下游时,泄漏气体的流量较小,经过齿位置之前的气流旋转比较大,使得经过齿的作用后,气流旋转增大明显.

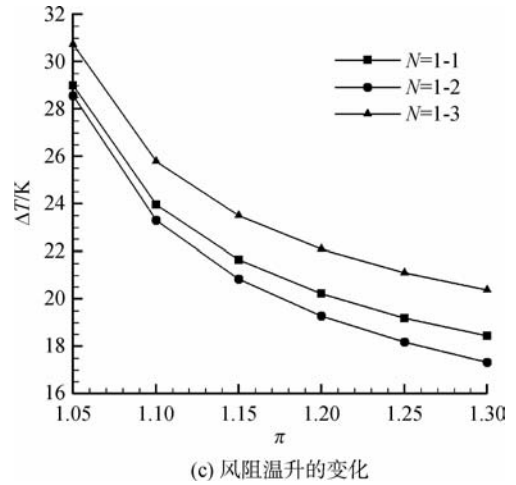
图 9(c)为单齿相对位置不同时风阻温升随压比的变化曲线.风阻温升都随压比增大而减小.单齿为 $N=1-3$ 情况时风阻温升最大,单齿为 $N=1-2$ 时风阻温升最小.压比越大,不同齿位置之间



(a) 流量系数的变化



(b) 出口旋转比的变化



(c) 风阻温升的变化

图 9 单齿位置不同对压气机级间封严的影响
Fig. 9 Influences of single tooth in different positions in a compressor stator well

风阻温升差别越大.

4.2 双齿位置不同时的影响

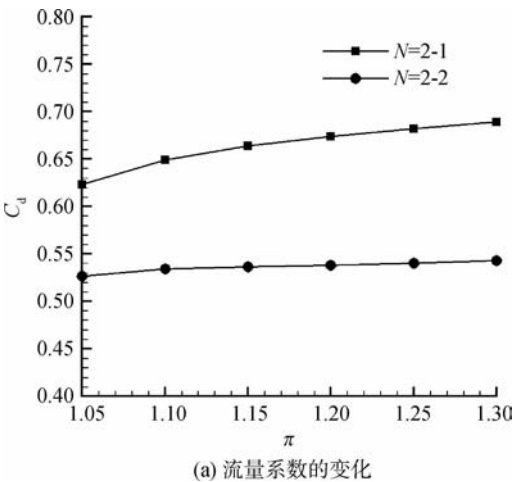
图 10 是在转速 $n=8000\text{ r/min}$,双齿位置不同时流量系数、出口旋转比、风阻温升随压比变化

的曲线图. 其中双齿相对位置包括 $N=2-1, 2-2$ 两种情况.

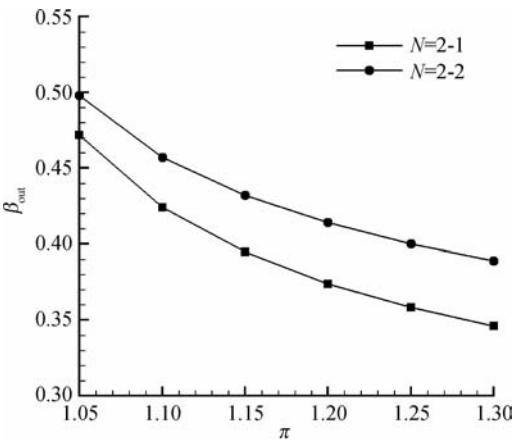
图 10(a)表示双齿相对位置不同时流量系数随压比的变化规律. 双齿为 $N=2-1$ 情况时,随压比的增大流量系数增大;双齿为 $N=2-2$ 情况时,随压比的增大流量系数增大很小,增大幅度在 3%以内. 另外,相同压比下,双齿为 $N=2-2$ 情况时的流量系数小于双齿为 $N=2-1$ 时. 这是由于 $N=2-2$ 情况时左端出口盘腔进口处的拐弯损失较大,篦齿通道气流旋流较强,泄漏较小.

从图 10(b)中可以看出,随着压比的增大,两种情况时出口旋转比都减小. 相同压比下,双齿为 $N=2-2$ 情况时的出口旋转比大于双齿为 $N=2-1$ 时. $N=2-2$ 情况时有一齿在左端,通过这个齿前的气流旋转比较大,使得经过齿的作用后,气流旋转比较大.

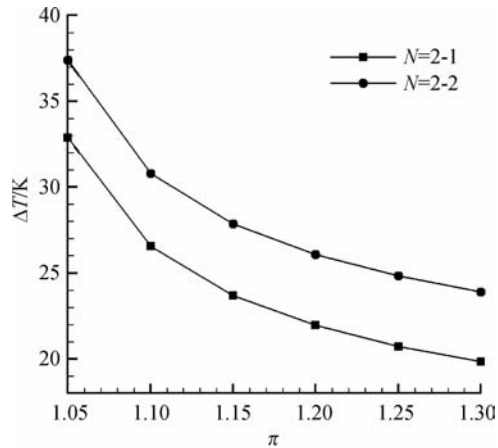
由图 10(c)可知,随着压比的增大,两种情况时风阻温升都减小. 相同压比时,双齿为 $N=2-2$ 情况时的风阻温升大于双齿为 $N=2-1$ 时,最大相差 4.5 K 左右.



(a) 流量系数的变化



(b) 出口旋转比的变化



(c) 风阻温升的变化

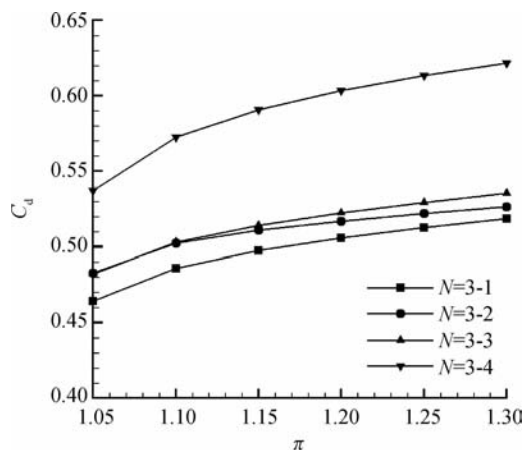
图 10 双齿位置不同对压气机级间封严的影响
Fig. 10 Influences of double teeth in different potions in a compressor stator well

4.3 三齿位置不同时的影响

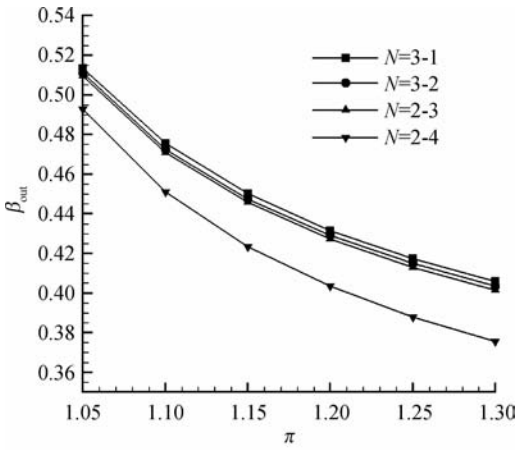
图 11 是在转速 $n=8000\text{ r/min}$, 三齿位置不同时流量系数、出口旋转比、风阻温升随压比变化的曲线图. 其中三齿相对位置包括 $N=3-1, 3-2, 3-3, 3-4$ 四种情况.

从图 11(a)中看出,随着压比的增大,4 种情况的流量系数都增大. 相同压比时,三齿为 $N=3-1$ 情况时,流量系数最小;三齿为 $N=3-4$ 情况时流量系数最大;三齿为 $N=3-3$ 情况时的流量系数略大于三齿为 $N=3-2$ 时. 这是由于 $N=3-1$ 情况时左端出口盘腔进口处的拐弯损失较大,篦齿通道气流旋流较强,泄漏较小.

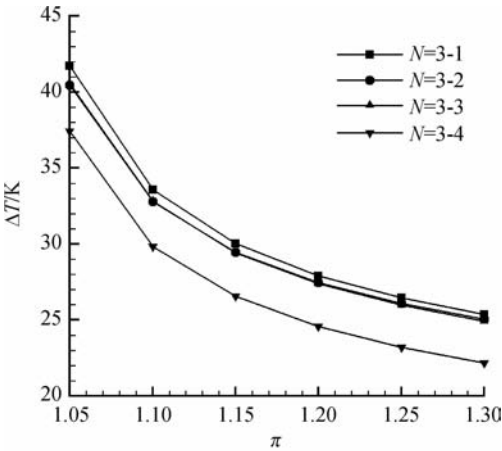
由图 11(b)可知,随着压比的增大,4 种情况的出口旋转比都减小. 相同压比时,三齿为 $N=3-1$ 情况时,出口旋转比最大;三齿为 $N=3-4$ 情况时,出口旋转比最小;三齿为 $N=3-2$ 和三齿为 $N=3-3$ 情况时的出口旋转比基本相同. $N=3-1$



(a) 流量系数的变化



(b) 出口旋转比的变化



(c) 风阻温升的变化

图 11 三齿位置不同对压气机级间封严的影响
Fig. 11 Influences of triple teeth in different potions in a compressor stator well

情况时有一齿在左端,通过这个齿前的气流旋转比较大,使得经过齿的作用后,气流的旋转比较大。

由图 11(c)可知,随着压比的增大,4 种情况的风阻温升都减小。相同压比时,三齿为 $N=3-1$ 情况时风阻温升最大;三齿为 $N=3-4$ 情况时的风阻温升最小;三齿为 $N=3-2$ 和三齿为 $N=3-3$ 情况时的风阻温升基本相同。 $N=3-1$ 情况与 $N=3-4$ 情况时的风阻温升最大可相差 4.3 K 左右。

5 结 论

本文通过对压气机级间篦齿封严中单齿、双齿、三齿相对位置进行数值模拟和分析,得出如下结论:

1) 齿位置不同会影响级间封严中气流拐弯的流动损失大小、旋流强度,从而影响级间封严的泄漏特性、旋流特性和温升特性。

2) 单齿情况下,单齿在下游时的流量系数最

小,出口旋转比和风阻温升最大。

3) 双齿情况下,上游和下游各一齿时的流量系数最小,出口旋转比和风阻温升最大。

4) 三齿情况下,上游、下游和中间各一齿时流量系数最小,出口旋转比和风阻温升最大。

参考文献:

[1] 纪国剑. 航空发动机典型篦齿封严泄漏特性的数值和实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
JI Guojian. Numerical and experimental investigation of sealing characteristics on typical labyrinth seals in aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008. (in Chinese)

[2] Soemarwoto B I,Kok J C,de Cock K M J. Performance evaluation of gas turbine labyrinth seals using computational fluid dynamics[R]. ASME Paper 07-GT-27905,2007.

[3] Sturgess G J. Application of CFD to gas turbine engine secondary flow system; the labyrinth seal[R]. AIAA 88-3203,1988.

[4] Steinetz B M, Hendricks R C. Advanced seal technology role in meeting next generation turbine engine goals[R]. NASA/TM-98-206961,1998.

[5] David C J,Paul C I,John R T. Abradable stator gas turbine labyrinth seals;Part 2 numerical modeling of differing seal geometries and the construction of a second generation design tool[R]. AIAA-2002-3937,2002.

[6] 李志刚,李军,丰镇平. 蜂窝密封流动特性的数值研究和泄漏量计算公式的构造[J]. 机械工程学报,2011,47(2): 142-148.
LI Zhigang,LI Jun,FENG Zhenping. Numerical investigation on discharge behavior and predication formula establishment of leakage flow rate of honeycomb seal[J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(2):142-148. (in Chinese)

[7] Chougule H H, Ramerth D. Numerical investigation of worn labyrinth seals[R]. ASME Paper 06-GT-90690,2006.

[8] 张霞,张效伟,朱惠人,等. 直通型篦齿封严特性的试验[J]. 航空动力学报,2010,25(8):1753-1757.
ZHANG Xia,ZHANG Xiaowei,ZHU Hui ren, et al. Experimental investigation on seal characteristics of straight-through labyrinth[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(8):1753-1757. (in Chinese)

[9] 杨军. 直通型封严篦齿流动特性的试验研究及数值计算[D]. 成都:电子科技大学,2009.
YANG Jun. Experimental investigation and numerical study of straight-through labyrinth characteristic of flow [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2009. (in Chinese)

[10] Willenborg K, Kim S, Wittig S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[R]. ASME Paper 01-GT-0123, 2001.

[11] Gamal A M, Vance J M. Labyrinth seal leakage tests: tooth profile, tooth thickness, and eccentricity effects[R]. ASME Paper 07-GT-27223, 2007.

[12] 黄晓光, 吴丁毅, 王泳泓, 等. 航空发动机中直通式篦齿密封腔内流动和换热的实验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2):159-162.
HUANG Xiaoguang, WU Dingyi, WANG Yonghong, et al. Experimental investigation of flow and heat transfer in straight labyrinth seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2):159-162. (in Chinese)

[13] 王鹏飞, 刘玉芳, 郭文, 等. 高转速对直通型篦齿封严特性影响的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(2): 45-48.
WANG Pengfei, LIU Yufang, GUO Wen, et al. Influence of high rotational speeds on the labyrinth sealing characteristics[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(2):45-48. (in Chinese)

[14] Denecke J, Dullenkopf K, Wittig S. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals[R]. ASME Paper 05-GT-68677, 2005.

[15] 王鹏飞, 郭文, 张靖周. 旋转封严篦齿风阻温升的试验研究与数值分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6):1402-1408.
WANG Pengfei, GUO Wen, ZHANG Jingzhou. Experiment investigation and numerical analysis of windage heating in rotating labyrinth seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6):1402-1408. (in Chinese)

[16] Braun E, Dullenkopf K, Bauer H J. Optimization of labyrinth seal performance combining experimental, numerical and data mining methods[R]. ASME Paper 12-GT-68077, 2012.

[17] 夏全忠. 直通型封严篦齿瞬稳态特性研究[D]. 西安:西北工业大学, 2012.
XIA Quanzhong. Investigations transient-static properties of straight-through labyrinth seal[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)

[18] Childs P R N. Rotating flow[M]. Burlington, US: Butterworth-Heinemann, 2011.

(编辑:陈 越)