

文章编号: 1000-8055(2005)03-0444-06

转静态封严篦齿流场的数值分析和封严特性的试验

王锁芳, 吕海峰

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 采用标准 $k-\epsilon$ 模型及RNG $k-\epsilon$ 模型验证了前人的试验结果, 最大误差分别为2.5%, 15.9%。对4道、7道环型直通式篦齿, 在转静态下采用非结构化网格和SMPL E 算法, 求解了不同转速的速度场和压力场; 并试验研究了不同转速、齿数工况的封严效果, 探讨了篦齿前后压比与泄漏系数的变化关系。表明转速对篦齿封严的影响不明显, 变化幅度在3.6%; 低压比情况下, 随着压比增大, 在相同泰勒数变化范围内, 泄漏系数略有增大。

关键词: 航空、航天推进系统; 旋转; 篦齿; 封严; 湍流

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

Numerical Analysis of Flow and Experimental Investigation of Labyrinth Sealing Characteristics at Rotational and Static States

WANG Suo-fang, LU hai-feng

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The standard $k-\epsilon$ turbulence model and RNG $k-\epsilon$ turbulence model were employed to compute the flow characteristics of the labyrinth sealing in the given reference. Compared to their test data, the maximum errors were 2.5% and 15.9% respectively. The computations of annular straight-through sealing with four-tooth and seven-tooth at rotational and static states were carried out with the non-structure grid and SMPL E method. The sealing effects for different number of tooth and rotational speeds were experimentally investigated. The relations between pressure ratio and leaking coefficient were also explored. The results show that the rotational speed plays a small role on sealing effectiveness, and makes a change of the leaking coefficient within 3.6%. Under low pressure ratio condition, the leaking coefficient goes up a little with the increase of pressure ratio with the same change of Taylor number.

Key words: aerospace propulsion system; rotation; labyrinth; seal; turbulence

篦齿封严的机理好象已经为人们所掌握, 但还有许多流体力学领域的知识需要研究^[1~3], 尤其在篦齿空腔中流场可视化检测等问题和具体结

构的设计等问题。对于旋转状态下封严篦齿特性的研究, 存在一种看法, 即低转速情况下, 转速对封严效果的影响可以忽略。高转速情况下, 由于试

收稿日期: 2004-07-16; 修订日期: 2004-11-08

作者简介: 王锁芳(1963-), 男, 江苏金坛人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 博士, 主要从事发动机流动与传热研究

验条件的限制, 目前文献报道比较少, 还未提出有针对性的论据。各国研究者提出的转速对篦齿封严的影响存在分歧, 有的认为介于 $0 \sim 3\,000\text{ r/min}$ 之间的转速影响比较小^[4], 可以忽略; 有的认为有影响, 但没有定量的给出影响的大小, 部分学者对其影响趋势存在着不同看法^[5~7]。实际上篦齿是旋转系统广泛采用的一种封严方式, 对航空发动机空气系统性能特性影响极大。本文以某型航空发动机典型篦齿的模型, 从低转速到高速进行了数值模拟, 并对低转速 ($0 \sim 3\,500\text{ r/min}$) 工况进行了封严效果的试验研究。

大量的文献报道了关于封严结构内流体流动的研究工作。其中, 文献[1]介绍了篦齿泄漏量随压比变化的实验研究; 文献[2]针对台阶式篦齿的泄漏系数与雷诺数的变化规律进行了实验研究, 美国 NASA 研究中心使用由 NERC 公司开发的二维多重网格生成器, 对实际发动机中的篦齿模型进行了模拟计算, 在以后的篦齿封严设计中进一步加强了数值计算的应用^[3]。然而这些研究工作所采用的模型都进行了部分简化, 造成了研究结果在工程应用中面临的局限性, 忽略了篦齿结构的微小变化对封严效果的重要影响。本文采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 SIMPLE 算法, 对封严篦齿的流动进行了数值模拟, 并选择了一组篦齿模型进行试验, 进一步深入了解转静止状态的封严篦齿的流动机理和封严特性。

封严篦齿的旋转带动了流通气流的旋转, 旋转流体与非旋转流体的动力学差别在于离心力, 泰勒数 ($Ta = w_c(2c/d)^{0.5}/\nu; w_c, c, \nu, d$ 分别是篦齿齿尖线速度、篦齿间隙、气体运动粘度和篦齿环直径), 反映了离心力作用大小。因此对 Ta 的研究会源项:

$$u:S = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left[\eta_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial z}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\eta_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial z}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left[\eta_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial z}\right]$$
$$v:S = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z}\left[\eta_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial r}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\eta_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial r}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left[\eta_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial r}\right] - \frac{2\eta_{\text{eff}}}{r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r}\right] + \frac{\rho w^2}{r}$$
$$w:S = -\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial z}\left[\eta_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial \theta}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\eta_{\text{eff}}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r}\right)\right] - \frac{\rho vw}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left[\eta_{\text{eff}}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{2v}{r}\right)\right] + \frac{\eta_{\text{eff}}}{r}\left[r\frac{\partial(w/r)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial \theta}\right]$$
$$k:S = \rho G_k - \rho \epsilon$$

有助于揭示和理解旋转效应对篦齿封严流动的影响。由于高压比给篦齿内流场带来的较高的流通惯性力(主流), 导致转速对篦齿封严的影响很小。

在封严结构中, 泄漏系数是作为评价密封效果优劣的主要依据。本试验和计算主要研究了篦齿前后的总压比 (P_1^*/P_2^*) 对封严性能的影响, 并整理成泄漏系数随压比的变化规律, φ 的定义为^[11] $\varphi = W \sqrt{T^*}/P_1^*A$ 。其中 W 为篦齿的泄漏量, A 为篦齿漏气面积, T^*, P_1^* 分别为篦齿前总温、总压。

1 计算方法

本文的数值计算是基于斯托克斯假设^[8]来模拟节流元件中的湍流运动, 流体在节流元件中流动时, 假定流动是稳态的, 适用于本文数值模拟的基本控制方程^[9~11]如下:

$$\frac{\partial \rho u \varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho w \varphi) =$$
$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right] +$$
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right] + S$$

广义扩散系数 Γ 见表 1。

表1 变量中的广义扩散系数
Table1 General diffuser coefficients of the parameters

Φ	Γ
u, v, w	$\eta_{\text{eff}} = \eta + \eta$
k	$\eta + (\eta/\sigma_k)$
ϵ	$\eta + (\eta/\sigma_\epsilon)$

$$\epsilon:S=\frac{\epsilon}{k}\left(c_1\rho G_k-c_2\rho\epsilon\right)$$

$$G_k=2\frac{\eta}{\rho}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{r\partial\theta}+\frac{v}{r}\right)^2\right]+$$
$$\frac{\eta}{\rho}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}+\frac{\partial u}{r\partial\theta}\right)^2+\left(\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial\theta}+\frac{\partial w}{\partial r}-\frac{w}{r}\right)^2\right]$$

图 1 为封严篦齿流场计算的网格划分示意图。为了考虑转速对封严篦齿的影响大小,防止数值误差给结果分析带来误导,计算中流量平衡率控制在 0.5%,选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型来模拟这一流动问题,采用 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合,边壁区域采用标准壁面函数。对流项采用一阶迎风格式以便于计算。数值模拟中的具体边界条件设定如下:左边为压力进口,温度 300 K,右边为压力出口,温度为 300 K。计算中设定固体壁面为绝热条件。采用的计算网格为非结构化网格。计算模型尺寸如图 2 所示。

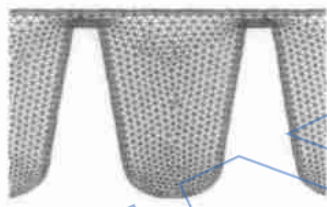


图 1 网格示意图

Fig 1 The part grids of the domain

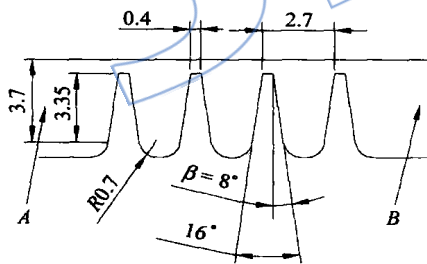
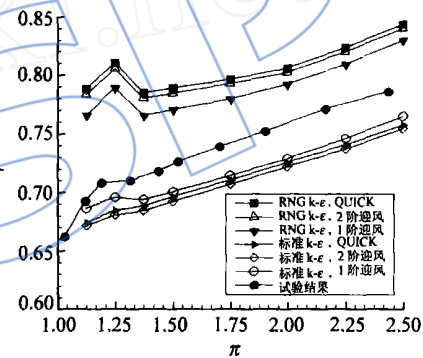


图 2 篦齿结构尺寸

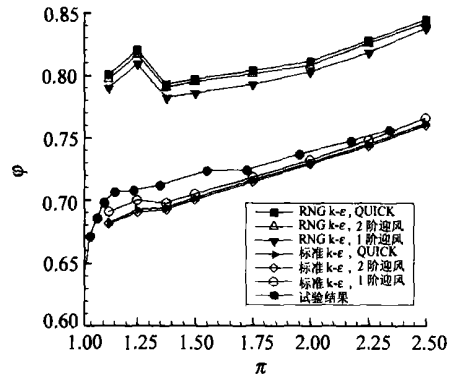
Fig 2 The schematic of the labyrinth

目前没有普遍适用的湍流模型,国内外研究者只有通过湍流模型做定性研究。为考察所选的湍流模型模拟封严篦齿流动的准确性,本文选取 Wittig 等^[12]的试验模型和参数,进行模拟验证。模拟了齿数为 3,篦齿间隙 c 分别为 0.6 mm 和 1.0 mm 的两种模型,采用标准 $k-\epsilon$ 模型一阶迎风、二阶迎风和 QUICK 格式以及 RNG $k-\epsilon$ 模型的一阶迎风、二阶迎风和 QUICK 格式算法。

计算结果与该文献中试验数据的对比如图 3 所示。可以看出标准 $k-\epsilon$ 模型模拟的结果最贴近该文献试验数据。还可看出其低阶格式与高阶格式差别不大,这是由于本计算网格比较精细降低了低阶格式所带来的离散误差,基本保证了解对网格的独立性。以压比 1.25 为例,齿间隙为 0.6 mm 时,标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 模型计算结果与试验结果最大误差分别为 4.0%, 14.3%; 齿间隙为 1.0 mm 时,标准 $k-\epsilon$ 和 RNG $k-\epsilon$ 模型计算结果与试验结果最大误差分别为 2.5%, 15.9%。



(a) $c=0.6\text{ mm}$



(b) $c=1.0\text{ mm}$

图 3 模拟计算与文献试验结果的比较

Fig 3 Comparison of the computation and the test of the literature concerned

为了深入研究转速对篦齿效果的影响,必须降低流通惯性力,采用低压比。对低压比为 1.02 和 1.035,转速为 1 000~14 000 r/min (以 1 000 r/min 为增量)以及转速为 10 r/min 和 100 r/min,共计 32 个工况,数值计算了篦齿封严效果的变

化。

2 结果分析

3.1 流场特性分析

图 4 中(a)~ (e)分别为低压压比(π) 1.035, 不同转速时, 封严篦齿第一道齿腔内的轴向、径向速度矢量图, (f)和(g)分别为切向气流速度矢量图和各腔室的速度矢量分布, (h)和(i)分别为压比 1.5 和 3.5 的各腔室的压力分布图。由图可以

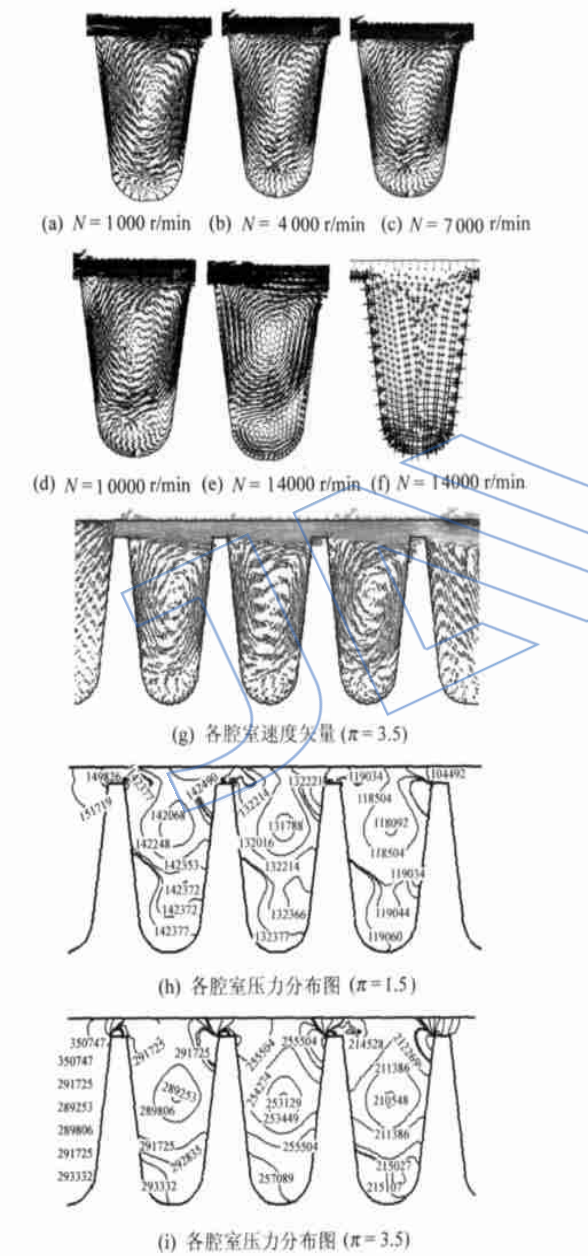


图 4 旋转状态齿腔内速度矢量和压力分布图
Fig 4 Velocity vector and pressure distributions at rotational state

看出, 在1 000 r/m in 时, 腔室右下角, 形成与主旋

涡相反的小旋涡, 当转速逐渐增大, 小旋涡也逐渐增大。即泰勒数较小时, 空腔内出现一个旋涡, 当转速升高, 就会出现两个转向相反的旋涡。由静止状态时第一道齿腔内的速度矢量和湍动能等值线图(图 5)可以看出, 在篦齿腔中, 靠腔室两边速度比较大, 而腔底的速度较小。当封严篦齿旋转时, 迎着气流方向的腔室那一面气流在受到向下游流动的主流驱动力外, 还受到腔面的切向摩擦驱动力, 但这时气流分子受到向下游的驱动力为主, 因此流道呈螺旋型。在腔室下部, 气流也同时受到横向主气流驱动力和壁面摩擦力的作用, 但与腔室上部相比, 其主气流驱动力较弱, 这样在转速较低时, 腔室下部先形成与主旋涡相反的小旋涡, 然后随着转速增大, 小旋涡逐步扩大。

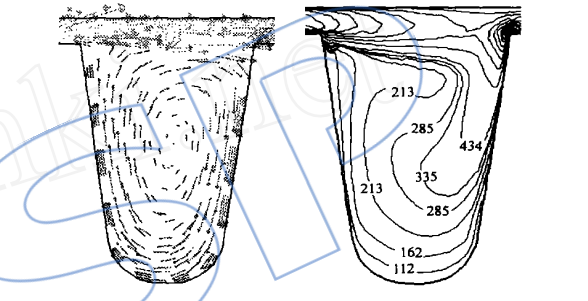


图 5 静止状态齿腔内的速度矢量和湍动能等值线图
Fig 5 Velocity vector and turbulent kinetic energy contour at static state

图 4(f) 表示压比为 1.035, 转速为 14 000 r/m in 时切向气流速度矢量图, 十字箭头大小表示气流切向速度大小。由于在旋转状态下, 气流通过封严篦齿时, 有轴向速度, 径向速度, 切向速度。可以看出, 由于气流粘性摩擦, 腔室内的气流越贴近壁面, 切向气流速度越大, 受壁面的影响越明显, 但在封严齿顶板上可以看出切向气流速度不大。这是由于在齿顶板处间隙小, 气流受到阻塞, 通过间隙有一部分参与腔室的气流旋涡运动, 还有一部分以射流方式直接向下一个节流口冲击, 造成齿顶板处位置的气流速度较高, 受壁面旋转效应影响较低。

观察图 4(g)~ (i) 的各腔室的速度矢量分布和压力分布, 总体来说, 沿着主流运动方向, 封严环半径的大小、转速的不同, 篦齿封严的旋转对齿顶壁面处的边界层气流有影响。于是空气微团不再以最短的路径(呈直线)通过篦齿通道流出, 而是形成螺旋线。螺旋线旋角大小取决于转速大小。

旋转方向上切向力增加了空气摩擦,增大了流阻,导致泄漏量减小,提高了密封效果。

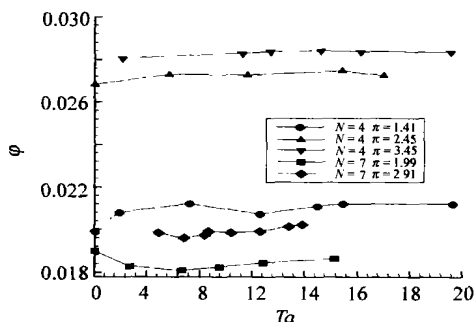


图6 试验中不同齿数和泰勒数对泄漏系数的影响

Fig. 6 Effects of the number of labyrinth restrictions of and Taylor number on the discharge coefficient

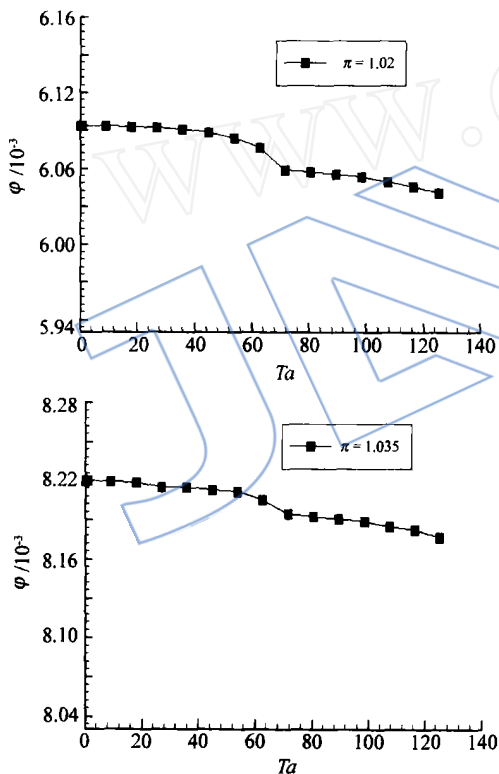


图7 不同压比和泰勒数对泄漏系数的影响

Fig. 7 Effects of pressure ratio and Taylor number on the discharge coefficient

2.2 转速对封严效果影响的试验研究

依据文献[13]介绍的试验装置,对转速为0~3 500 r/min 的工况,进行了篦齿封严的旋转试验研究,其研究结果由图6表示。该图反映了齿数分别为4和7、不同压比、不同转速的试验得到的泄

漏系数与泰勒数之间的关系。可以看出,7道齿的泄漏系数明显比4道齿的要低。这是更多的齿腔节流效果所致。其它压比的工况下,泄漏系数更高,这是由于较高的压比导致较高的气流速度,才引起泄漏量更高。此外在泰勒数变化范围内,4道齿和7道齿的泄漏系数变化不大,有些波动,变化幅度约为3.6%左右,波动有可能是旋转试验中旋转轴偏心引起振动,导致气流压力测量误差较大引起的,但可以看出转速对篦齿封严的影响不明显。

为深入揭示旋转效应对篦齿封严带来的影响,突出反映旋转作用力和通流惯性力的作用,对低压比旋转篦齿进行了数值模拟,结果如图7所示。可以看出随着泰勒数(转速)增加,泄漏系数逐步下降,在0.089(10 r/min)和0.895(100 r/min)之间泄漏量基本不变。泰勒数从8.950(1 000 r/min)增加到125.309(14 000 r/min),下降幅度分别为8‰、5‰。

试验结果表明:随着转速变化,泄漏系数变化幅度不大,约为3.6%。数值模拟结果显示:在压比为1.02、1.035工况下,泰勒数在0~120范围内,泄漏系数逐步下降,变化幅度在10‰内。变化趋势与R hode, Hibbs^[14]一致。可以推断出,随着压比增大,流通惯性力逐渐增强,在相同泰勒数(转速)变化范围内,泄漏系数变化幅度只会处于10‰以内。

3 结 论

通过旋转状态篦齿腔内的流场特性的数值模拟和篦齿封严效果的试验研究,得到如下结论:

(1) 标准 $k-\epsilon$ 和RNG $k-\epsilon$ 模型计算结果与文献试验结果最大误差分别为2.5%, 15.9%,说明本文选取的计算方法是可行的。

(2) 转速对篦齿封严的影响不明显,对4道和7道齿,变化幅度在3.6%。

(3) 由数值模拟与试验结果可知,转速影响的变化规律一致。

(4) 低压比情况下,随着压比增大,流通惯性力逐渐增强,在相同泰勒数变化范围内,泄漏系数略有增大。

参考文献

- [1] 吴丁毅. 直通式篦齿封严特性的实验研究[J]. 推进技术, 1997, 18(3): 79~81.
- Wu Dingyi. An Experimental Investigation on Seal Character of Straight-through Labyrinth [J]. Journal of

- Propulsion Technology*, 1997, 18(3): 78~81.
- [2] Willenborg K. Effects of Reynolds Number and Pressure Ratio on Leakage Loss and Heat Transfer in a Stepped Labyrinth Seal [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001 (123): 815~822.
- [3] CFD Analysis to Improve Performance of Labyrinth Seals [J]. *NREC NEWS*, 1999, 13(1): 3~4.
- [4] 塔鲁达纳夫斯基 K. 非接触密封[M]. 李均卿, 刁元康译. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [5] Rhode D L, Hibbs R I. A New Efficient Model for The Computation of Flow Over Shear Layer-Driven Cavities Part II: A Assessment for Labyrinth Seal Leakage [R]. AIAA - 89- 2807, 1~6.
- [6] 尚显峰. 封严篦齿内流动和换热的实验研究和数据模拟[D]. 西安: 西北工业大学, 1998.
- [7] Morrison G L, Rhode D L. Measured Effect of Step Axial Location on Labyrinth Seal Leakage [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, 18(6): 1129~1130.
- [8] 陈景仁. 湍流模型及有限分析法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- [9] 杨江涛, 曹玉璋. 旋转篦齿封严泄漏与换热的准则研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 8(4): 438~441.
- Yang Huitao, Cao Yuzhang. Analogous Criteria of Leakage Flow and Heat Transfer in Labyrinth Seals [J]. *Journal Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1999, 25 (4): 438~441.
- [10] 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 143~157.
- [11] 陶文铨. 数值传热学(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [12] Wittig S L K. Scaling Effects on Leakage Losses in Labyrinth Seals [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1983, 105: 305~309.
- [13] 吕海峰. 航空发动机空气系统节流元件的特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [14] Rhode D L, Hibbs R I. A New Efficient Model For The Computation of Flow Over Shear Layer-Driven Cavities Part II: A Assessment for Labyrinth Seal Leakage [R]. AIAA - 89- 2807: 1~6.