

齿间凸起对直通篦齿封严特性影响的数值研究^{*}

童 飞¹, 张 丽¹, 华锐睿¹, 陆海鹰², 梁义强²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072; 2. 中航工业沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要: 为提升篦齿的密封性能, 对在齿间光滑衬套上增加矩形凸起的直通篦齿的流动特性进行了数值研究, 分析了压比、凸起的尺寸和轴向位置对篦齿泄漏特性的影响。和光滑齿相比, 凸起破坏了壁面射流附面层的连续性, 改变了流体在齿腔中的流动方向, 有效地提高了通道的密封性能, 降低了通道的泄漏量。结果表明, 当压比为2时, 含有凸起结构的篦齿的泄漏系数较光滑齿降低了13%, 当压比增加到4时, 泄漏系数更是降低了18%; 凸起的高度越大宽度越小, 凸起对篦齿密封性能的提高就越明显; 凸起和下级齿之间的轴向距离越短, 凸起对流入下级齿的气体流动方向改变就越大, 密封性能也就越好。

关键词: 直通篦齿; 密封; 衬套; 凸起; 泄漏系数; 数值研究

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2015) 01-0119-05

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.01.017

Numerical Investigation of Protrusions on Leakage of Straight-Through Labyrinth Seal

TONG Fei¹, ZHANG Li¹, HUA Rui-rui¹, LU Hai-ying², LIANG Yi-qiang²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Engine Design Institute, Shenyang 110000, China)

Abstract: To improve the performance of labyrinth seal, a straight-through labyrinth seal with protrusions on the smooth bush has been numerically investigated. The effects of pressure ratio, protrusions size and the space between teeth and protrusions are studied. Compared with smooth bush straight-through labyrinth seal, protrusions destroy the wall jet boundary layer continuity and change the direction of the jet flow, which improve the seal performance and decrease the mass flow effectively. The study reveals that when the pressure ratio is 2, the leakage coefficient of labyrinth seal with protrusions can decrease by 13% in comparison with smooth bush labyrinth seal, and when the pressure ratio is 4, the leakage coefficient is reduced by 18%. The narrower width and the higher height the protrusions can have, the better seal performance the labyrinth seal can get. Additionally, with a decrease of the axial distance between protrusion and the next tooth, the protrusion can greatly change the direction of the jet which flows into the next tooth, and thus improve the seal performance evidently.

Key words: Straight-through labyrinth seal; Seal; Bush; Protrusion; Leakage coefficient; Numerical investigation

1 引 言

篦齿密封作为航空发动机上使用最为广泛的非接触式封严结构^[1], 主要应用于压气机和涡轮级间、

冷却流路系统等, 具有结构简单, 寿命长等优点。篦齿主要是依靠气体流过齿尖间隙的节流过程和齿腔中膨胀过程所造成的能量耗散以达到密封的目的^[2]。密封技术的改善对未来航空发动机性能的提

^{*} 收稿日期: 2013-12-08; 修订日期: 2014-02-20。

作者简介: 童 飞 (1990—), 男, 硕士, 研究领域为航空发动机封严技术。E-mail: tf900620@163.com

升将起到很大的作用,Sturgess^[3]甚至提出未来航空发动机性能一半的提高将来源于封严技术的改善。由于直通篦齿的直通效应,透气性较高,国内外开始研究刷式封严和指式封严等新型封严技术^[4],但是考虑到篦齿封严的经济性和稳定性,为此合理的改变篦齿结构,优化篦齿设计以降低直通型篦齿的通透性是件很有必要的事情。

发动机在工作的过程中,由于篦齿盘和衬套的膨胀率不同,在旋转的过程中,篦齿盘会由于离心力和风阻温升等因素的影响与衬套发生刮蹭,衬套会因为摩擦作用产生一道道的磨损槽。Steward等^[5]首先利用X光可视化技术在衬套的内表面发现由于磨损作用而形成的凹槽结构。研究发现,含有磨损槽结构的篦齿较光滑齿的泄漏特性发生了明显的变化。Stocker^[6]和Denecke等^[7]在不同的齿间隙下研究了不同深度的磨损槽对通道泄漏系数的影响。Nayak等^[8]研究了磨损后的不同齿形和齿在磨损槽中的轴向位置对通道泄漏特性的影响。Rhode等^[9,10]通过实验的方法对不可压流体在含有磨损槽结构的台阶齿和直通齿模型的流动特性进行了研究。随后,Rhode等^[11]又利用数值模拟的方法对可压流在含有磨损槽的直通齿的内的流动情况进行研究,发现当槽很窄很深的时候,磨损槽对泄漏系数基本无影响,对于其他的情况,通道的泄漏量增加。纪国剑等^[12,13]对含有磨损槽结构的直通齿进行了数值研究,并设想在与齿腔正对的衬套上刻上环形凹槽以提高通道的密封性能,同时利用数值模拟和实验的方法对此进行研究,发现增加凹槽可以较大地提高通道的密封性能。刘高文等^[14]在纪国剑等^[13,15]的研究基础上对在机匣上开设矩形凹槽的直通齿结构的流动和封严特性进行了更为深入的数值研究,发现当宽深比大于5时,含有磨损槽结构的篦齿相对于光滑齿的封严效率可大幅提升到15%左右。

在此,基于对节流后形成的壁面附面层射流破坏的目的,提出了一种与增加凹槽相反的设想,即在齿腔顶部增加矩形凸起。利用数值模拟的方法研究在篦齿齿间的衬套上增加矩形凸起对齿腔内部流场和通道节流效果的影响,研究了压比、凸起尺寸和轴向位置等因素对直通篦齿的密封特性的影响。

2 物理模型和计算方法

2.1 物理模型

图1为含有齿间凸起的篦齿通道示意图。篦齿盘由5个相同的斜齿组成,篦齿齿尖宽度 t 为

0.3mm,齿高 h 为5mm,篦齿盘半径 r 为267mm,齿尖间隙 c 为0.3mm,齿间距 s 为6mm,篦齿前倾角为 15° ,篦齿后倾角为 30° ,如图2所示。本文从两个方面研究了齿间凸起对直通齿的泄漏系数的影响:一方面研究了凸起的几何尺寸对篦齿封严的影响,将凸起固定在齿腔的中心位置,保证 $l=0$,通过改变凸起的高度 a 和宽度 b 研究凸起尺寸对密封的影响;另一方面通过固定凸起的尺寸,即 a 和 b 的大小,调节凸起中心和齿腔中心的距离 l 来研究凸起在齿腔中的相对位置对篦齿密封性能的影响,为此这里共建立了三组计算模型。光滑衬套的篦齿结构是参照实验室实验件的真实尺寸。凸起的具体尺寸和轴向位置见表1。

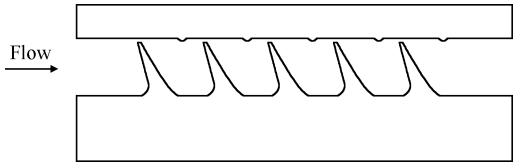


Fig. 1 Sketch map of labyrinth seal

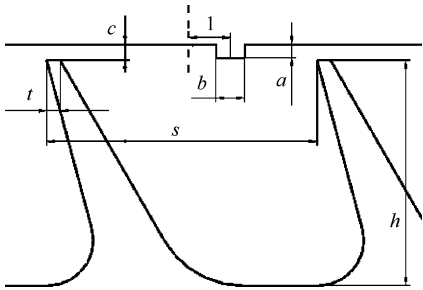


Fig. 2 Tooth parameters

Table1 Structure parameters and axis location of the protrusions

Case	a/t	b/t	l/t
1	0.17/0.33/0.5/0.67/0.83	1	0
2	0.67	0.67/1/1.67/2/3	0
3	0.67	1	-3/-2/0/2/3

2.2 网格的划分

采用非结构化的四边形网格对计算模型进行网格化分,网格示意图如图3所示。篦齿的上下壁面均设置了边面层网格,同时对齿尖和凸起处边界层以

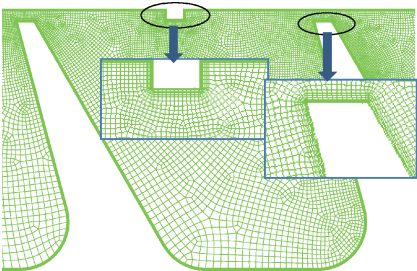


Fig. 3 Sketch map of computational grid

外的网格进行了局部加密。这里对计算网格的无关性进行了验证,最终把通道网格数确定在48000~52000。

2.3 边界条件和湍流模型

计算模型为二维轴对称模型,模型的进口截面设置为压力进口,出口边界条件为压力出口,壁面设置为绝热壁温,气体入口温度设定为300K。由于航空发动机压气机级间增压比和涡轮级间落压比一般都小于4,这里给定出口压力为0.1MPa,通过调节不同的进口压力以获得不同的压比,最终将计算压比设定在1.1~4,流体选择为理想空气。

用不同的湍流模型对光滑齿进行数值模拟,将计算结果和实验结果进行对比,如图4所示,发现RNG $k-\varepsilon$ 模型计算得到的结果和实验结果最为相近,这可能是因为RNG $k-\varepsilon$ 模型考虑了湍流漩涡,对涉及快速应变,中等涡等复杂剪切流动情况的模拟结果较好,所以这里选RNG $k-\varepsilon$ 模型作为计算模型。

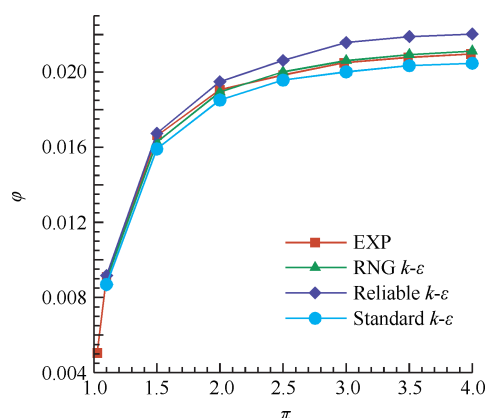


Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results

3 结果和分析

3.1 评价参数

选用泄漏系数 φ 作为评价篦齿封严效果的标准,定义式为

$$\varphi = \dot{m} \sqrt{T_0} / (p_0 A) \quad (1)$$

式中 $\dot{m}$ 为流过篦齿的质量流量, T_0 为进口的总温, p_0 为篦齿缝隙进口总压, A 为篦齿流通面积, $A = 2\pi rc$, r 为篦齿盘半径, c 为篦齿齿尖间隙。

同时为了比较含有凸起的篦齿较光滑衬套的篦齿密封性能的改善,这里引入相对封严效率^[15]

$$\eta_\varphi = (\varphi_s - \varphi_p) / \varphi_s \quad (2)$$

式中 φ_s 表示光滑齿的泄漏系数, φ_p 表示含有凸

起篦齿的泄漏系数。

3.2 结果和分析

3.2.1 凸起高度的影响

如表1的第一组所示,这里研究了凸起的高度对直通篦齿密封性能的影响。图5给出了在固定凸起的宽度 ($b/t=1$) 和轴向位置 ($l/t=0$) 的条件下,含有不同高度 ($a/t=0, 0.17, 0.33, 0.5, 0.67, 0.83$) 凸起的篦齿泄漏系数随压比的变化关系。

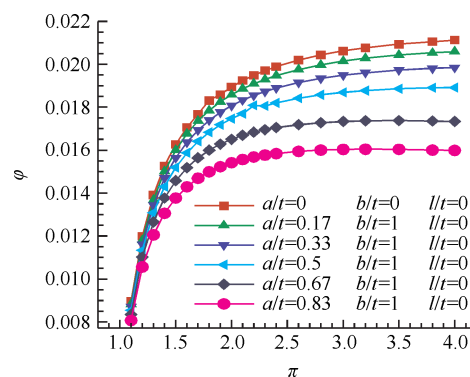


Fig. 5 Effects of protrusions height on leakage coefficient

从图5可以看出,在压比较低的时候,通道的泄漏系数随着压比的增加迅速增大,随后泄漏系数的增速逐渐变缓,最后泄漏系数大小趋于稳定;增加凸起可以有效地提高篦齿通道的密封性能,且随着凸起高度的增加,通道的密封性能相对光滑衬套的篦齿提高得越明显。当 $\pi=2$ 时,衬套上含有高度为0.1mm凸起的篦齿封严效率为4.6%,衬套上含有高度为0.2mm凸起的篦齿封严效率为13%;随着压比的增加,当压比为4时,含有高度为0.2mm凸起的篦齿封严效率从压比为2时的13%提高到18%。从中可以看出,凸起可以有效的提高通道的密封性能,且随着压比的增加,含有凸起的篦齿较光滑齿的封严性能提升的越明显。

对比图6和图7可以看出,在增加凸起之后,齿尖节流后形成的壁面附面层射流不再是直接垂直射入下个齿腔,而是冲击在衬套的凸起上,气流方向随即发生偏转,在凸起的迎风面处形成一个的逆时针的涡,然后气流贴着凸起流动,在背风面也形成了一

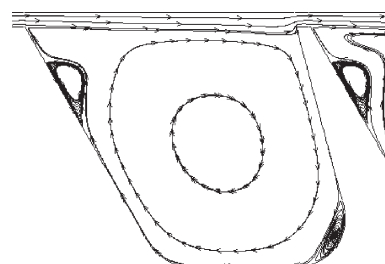


Fig. 6 Streamlines of cavity with smooth bush

个逆时针的涡。涡的形成和变化增加了气体在齿腔中的能量耗散,增强了通道的密封性能。

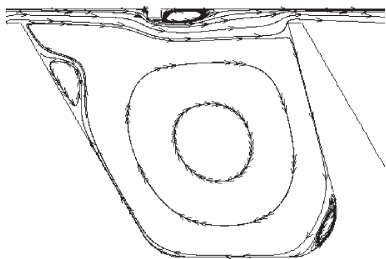


Fig. 7 Streamline of cavity with protrusions

图8给出了图7在齿腔位置处的局部流线放大图。对比图8(a)和图8(b)可以发现增加凸起的高度,凸起处流体流动方向变化明显,凸起两侧涡的大小增加,凸起对节流后的附面层射流的方向改变增强,这就增强通道内气流的能量耗散,降低了通道的通透性,达到减小泄漏系数的目的。对比图8(b)和图8(c)可以发现随着压比增大,凸起背风面形成的涡明显增大,气流方向改变增大,气体在齿腔中的能量耗散也迅速增大。

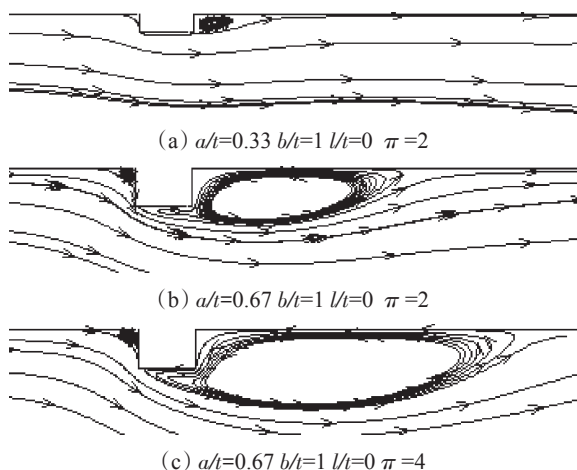


Fig. 8 Streamlines of local section of protrusions

3.2.2 凸起宽度的影响

如表1的第二组所示,这里研究了凸起宽度对篦齿密封性能的影响。在固定凸起高度($a/t=0.67$),同时保持凸起位于空腔正中位置的条件($l/t=0$),通过改变凸起的宽度($b/t=0, 0.67, 1, 1.67, 2, 3$),计算凸起宽度对通道密封性能的影响,具体结果如图9所示。

如图9所示,在凸起高度相同的条件下,凸起的宽度越大,篦齿的密封性能就越差。当压比 $\pi=2$ 时,宽度为0.6mm的篦齿泄漏系数较凸起宽度为0.3mm的泄漏系数增加了6.64%;凸起宽度为0.9mm的泄漏系数较凸起宽为0.3mm的泄漏系数增加10.62%。

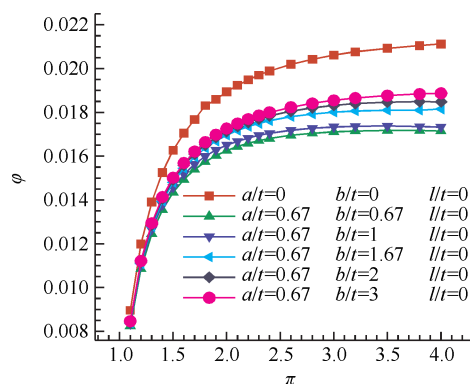


Fig. 9 Effects of protrusions width on leakage coefficient

对比图10(a)和10(c)的篦齿齿腔流线可以发现,宽度增加后,在凸起背风面形成的涡明显减小,被扰乱的气流沿着凸起流动,气流在凸起背风面慢慢贴着衬套流动,这样造成的能量耗散也就减弱了,密封性能就相对较低。

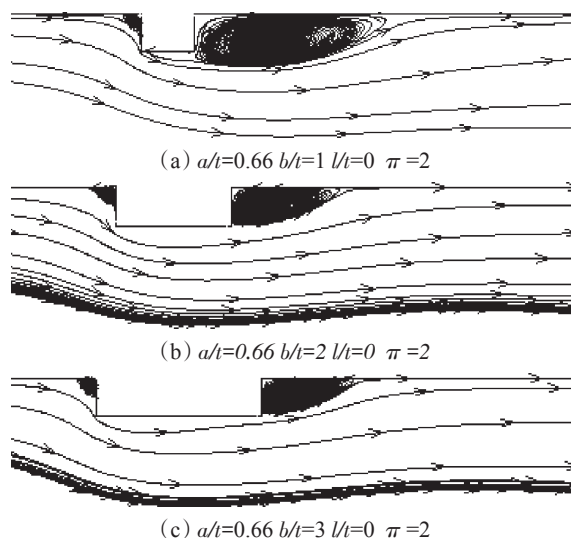


Fig. 10 Streamlines of local section of protrusions

3.2.3 凸起轴向位置的影响

如表1第三组的计算安排,图11给出了在固定凸起高度和宽度的条件下,凸起和齿尖的轴向距离对篦齿密封性能的影响。

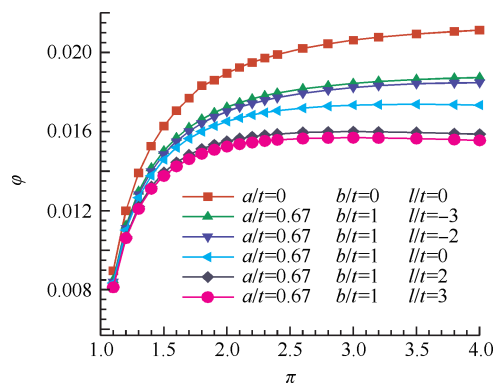


Fig. 11 Effects of axial location of protrusions on leakage coefficient

从图 11 上可以得到凸起在齿腔后部的密封性能优于凸起位于正中的位置,凸起前置的密封效果最差。当压比 $\pi=2$ 时,凸起前移 0.9mm 较凸起居中的情况的泄漏系数增加了 8.1%,凸起后移 0.9mm 的较凸起居中的泄漏系数降低了 10%。

轴向位置对篦齿泄漏系数的影响主要在于控制流入下一个齿腔时流体的速度方向。从图 12 可以看出,图(a)的节流后的流体在冲击到凸起后气流方向发生改变,但是由于凸起距离下一个齿的距离较长,在齿腔压力的作用下,气流慢慢开始贴附壁面,然后沿着壁面垂直射入下一个齿腔,而图(c)的气流在方向还没有恢复的情况下就进入了下个齿腔,这样造成的能量损失就越大,所以凸起前移的情况的密封效果相对于其他两种情况就最差。

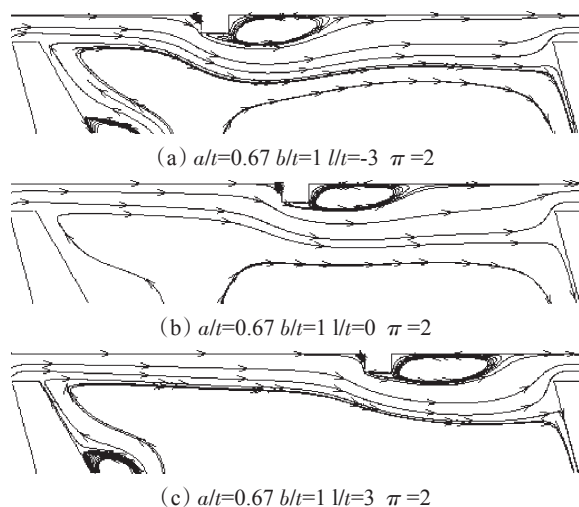


Fig. 12 Streamlines of local section of protrusions

4 结 论

(1)在光滑的衬套上增加凸起,可显著降低通道的泄漏系数,提高通道的密封性能。含有凸起结构的篦齿,在压比为 2 时,通道的泄漏系数较光滑齿降低了 13%;在压比为 4 的时候,泄漏系数更是降低了 18%。

(2)凸起的高度对通道的泄漏系数有着很大的影响,随着凸起高度的增加,泄漏系数明显降低。

(3)凸起宽度在本文计算范围内的增加对篦齿泄漏系数的减小是不利的,因此在满足加工的前提下,应尽量将凸起的宽度设计的最小。

(4)凸起后移的情况较居中的情况泄漏系数降低了 10%,前移的情况泄漏系数相对居中情况增加了 8%。因此凸起越靠近齿腔下游的位置对通道的密封性能提升的越有利。但是在设计凸起的时候,也一定要注意篦齿盘对衬套的磨损作用。应在保证

不发生磨损的情况下,尽量将凸起放在齿腔后部。

参考文献:

- [1] 塔鲁达纳夫斯基. 非接触密封[M]. 李均卿, 刁元康, 译. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [2] 刘卫华, 林 丽, 朱高涛. 迷宫密封机理的研究现状及其展望[J]. 流体机械, 2007, 35(2):35-39.
- [3] Stargess G J. Application of CFD to Gas Turbine Secondary Flow System[R]. AIAA-SS-3203, 1988.
- [4] 2002 NASA Seal/Secondary Air System Workshop[R]. NASA/CP-2003-212458.
- [5] Steward P A, Brasnett K A. The Contribution of Dynamic X-Ray to Gas Turbine Air Sealing Technology[R]. AGARD-CP-237, 1978.
- [6] Stocker H L, Cox D M, Holle G F. Aerodynamic Performance of Conventional and Advanced Design Labyrinth Seals with Solid-Smooth, Abradable and Honeycomb Lands[R]. NAS-3-20056, 1977.
- [7] Denecke J, Scharm V, Kim S, et al. Influence of Rub-Grooves on Labyrinth Seal Leakage[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125: 387-393.
- [8] Nayak K L, Musthafa T, Ansari A. The Effects of Tooth Tip Wear and Its Axial Displacement in Rub-Grooves on Leakage and Windage Heating of Labyrinth Seals with Honeycomb Lands[R]. AIAA 2007-5736.
- [9] Rhode D L, Allen B F. Visualization and Measurements of Rub-Groove Leakage Effects on Straight-Through Labyrinth Seals[R]. ASME 98-GT-506.
- [10] Rhode D L, Allen B F. Measurement and Visualization of Leakage Effects of Rounded Teeth Tips and Rub-Grooves on Stepped Labyrinths[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 604-611.
- [11] Rhode D L, Adams R G. Rub-Groove Width and Depth Effects on Flow Predictions for Straight-Through Labyrinth Seals[J]. Journal of Tribology, 2004, 26(1): 781-787.
- [12] 纪国剑, 吉洪湖. 直通篦齿静止衬套上磨损槽对泄漏特性影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(8): 1403-1408.
- [13] 纪国剑, 吉洪湖, 白花蕾. 齿间环形凹槽结构对直通篦齿封严特性影响的数值研究[J]. 流体机械, 2007, 35(12): 21-24.
- [14] 刘高文, 蒋兆午, 务卫涛, 等. 基于数值模拟的矩形凹槽对直通型篦齿封严特性影响研究[J]. 推进技术, 2013, 34(2): 181-186. (LIU Gao-wen, JIANG Zhao-wu, WU Wei-tao, et al. Investigation on Effects of Rectangular Groove on Leakage of Straight-Trough Labyrinth Seal Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(2): 181-186.)
- [15] 纪国剑, 吉洪湖, 王政伟. 齿间浅槽结构对直通篦齿封严特性影响的实验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 558-562.

(编辑: 朱立影)