

台阶式篦齿封严特性的数值模拟

缪文静¹, 王锁芳²

(1. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042;
2. 南京航空航天大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210016)

[摘要] 在深入分析了国内外有关封严篦齿研究成果的基础之上, 为了弥补在台阶式篦齿方面数值模拟工作的不足, 基于数值模拟的方法, 采用 FLENT 软件中标准 $k-\varepsilon$ 模型和 QUICK 格式算法研究了台阶式篦齿泄漏系数随前后压比, 齿腔形状、齿数、密封间隙、齿倾斜度、流向改变而变化的规律, 并与之和实验结果及直通式篦齿性质做了比较, 证实了数值模拟方法的准确性, 并找出了影响台阶式篦齿泄漏系数的主要因素, 结论可作为台阶式篦齿正确选型的参考, 有助于提高篦齿封严效果。

[关键词] 台阶式篦齿, 泄漏系数, 封严, 数值模拟

[中图分类号] V231.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)02-0072-05

Numerical Study on Sealing Characteristics of Stepped Labyrinth

MIAO Wenjing¹, WANG Suofang²

(1. School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the profound analysis on sealing labyrinth, in order to make up the shortage of numerical study on sealing labyrinth, the method of numerical simulation is used to study effect of pressure ratio, labyrinth shape, labyrinth tooth number, sealing clearance, flow direction on leakage rates of stepped labyrinth, by adopting the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and QUICK schemes, and compared with results of experiments and numerical simulation of straight-through labyrinth. The veracity of numerical simulation is approved, and main factors are also found out of influencing leakage rates of stepped labyrinth. The conclusion can be referenced for type selection of stepped labyrinth and will improve sealing of labyrinth.

Key words: stepped labyrinth, leakage rates, seal, numerical simulation

0 引言

在高速旋转的涡轮机械中, 为了减少气体不必要的泄漏, 保持各个腔室里的工作压力, 通常需要采用篦齿装置来进行非接触密封。轴向篦齿封严的类型有很多, 常用的有直通式、台阶式、错齿式、刷式等几种。关于直通式篦齿的实验和数值模拟工作, 已有前人研究并得出了结论, 发现它主要存在单位齿密封能力差、泄漏量随间隙变化敏感等一系列问题。所以在目前高压高转速的涡轮机械中, 一般都采用台阶式篦齿。

关于台阶式篦齿的实验, 前人也做了一定的工作^[1,2]。但由于实验条件有限, 只能对一定数量不同齿数、间隙、倾斜度的篦齿进行研究, 所得的工况点少, 所以结论难免粗糙。

本文是基于现代数值模拟流场软件技术, 采用 fluent 商用计算软件, simple 算法, QUICK 模式对台阶式篦齿内部流场进行了模拟。在和实验结果进行比对, 证实了模拟的可行性和精确性后, 模拟了各种不同齿形、齿高、间隙、台阶高、台阶位置以及倾斜度等的台阶式篦齿, 并在每一种齿形模拟时都分析不同前后压比的影响, 得出了篦齿泄漏量和这些参数变化之间的联系, 从而在详尽的资料中基本摸索到了台阶式篦齿内部流场分布情况和最佳篦齿形状。

收稿日期: 2005-11-10.

作者简介: 缪文静(1977-), 女, 助教, 主要从事传热传质方面的教学与研究. E-mail: miaoer519@sina.com

通讯联系人: 王锁芳(1965-), 副教授, 主要从事传热传质方面的教学与研究. E-mail: suofangwang@163.net

1 数值模拟结果及分析

1.1 网格及算法的选取

由于台阶式篦齿结构的不对称和复杂性,若采用结构型网格,网格倾斜度太大,计算结果误差较大.在和实验结果^[1,3]对比之后,采用了计算结果和实验结果较为贴近的非结构网格,并根据 Wittig 文献^[4]研究结果选择 $K-\varepsilon$ 湍流模型、QUICK 模式和 Simple 算法对篦齿内流场进行了模拟.边界条件为压力进口和出口值给定,温度恒定为 300 K,壁面设为绝热,采用近壁面加强处理模式.其中网格较为精细,网格数为 30 000—100 000 之间.图 1、图 2 为单个齿腔内网格图,由于网格太密不便于显示,故已将网格数下降为原有 1/40.

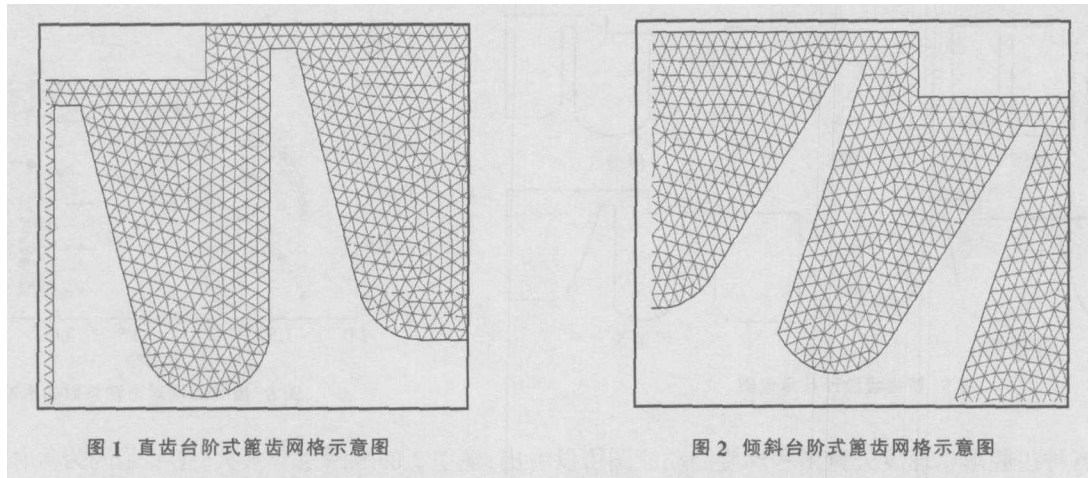
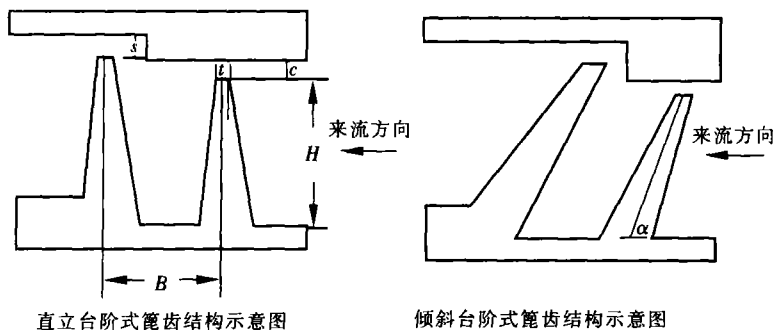


图 1 直齿台阶式篦齿网格示意图

图 2 倾斜台阶式篦齿网格示意图

1.2 部分数值模拟结果与实验结果的比较

西北工业大学吴丁毅^[1]等对台阶式篦齿密封特性进行了实验研究,在不同的厚隙比、压比、倾斜度下得出了台阶式篦齿不同的泄漏系数.在数值模拟之初,本文采用 fluent 商用软件,非结构型网格,对实验篦齿几何形状(如图 3 所示)进行了数值模拟,并将结果和实验结果做了比较(如图 4 所示),发现除了高压比情况下误差较大之外,其余工况两者误差均不超过 5%,说明数值模拟结果具有相当的可靠性.



直立台阶式篦齿结构示意图

倾斜台阶式篦齿结构示意图

s.台阶高度;c.齿间间隙;H.齿高;B.齿间间隙;t.齿顶厚度; α .齿倾斜角度

图 3 篦齿结构示意图

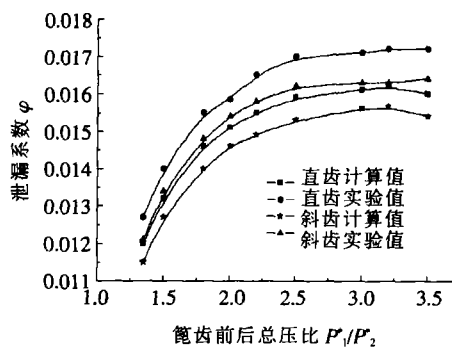


图 4 计算数值和实验值比较

泄漏系数 φ 的定义为实际流量和定熵条件下理论流量之比^[5-7]:

$$\varphi = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} = \frac{\dot{m} \sqrt{T_1^*}}{P_1^* A} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{P_0 A}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{2K}{R(K-1)} \left[\left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]} \quad (2)$$

式中, $A = C\pi D$ (D 是篦齿环的直径), 由于台阶高度 s 比 D 小很多, 故认为在各齿处面积没有变化, D 为各齿处直径的平均值; T_1^* 为来流总温; P_1^* 为来流总压; π 为前后压比.

由于在和实验对比过程中已经分别对不同压比下的斜齿和直齿篦齿情况做了模拟, 所以图 2 的结果

不仅表明数值模拟结果是真实可靠的,而且从图中可以看出,泄漏系数 φ 随压比 p_1^*/p_2^* 变化的规律,当压比 p_1^*/p_2^* 在1~2.5区间变化时,随着压比的增加, φ 增加很快,曲线比较陡直.而当压比 p_1^*/p_2^* 超过2.5之后, φ 随压比的变化越来越缓慢,并在压比超过3后 φ 的值逐渐趋向定值,曲线形状几乎是一条水平线.

1.3 齿腔形状对泄漏系数的影响

在数值模拟中,可以不受实验元件限制任意选用设计齿腔形状.本文共对5种齿腔形状的篦齿分别在压比 p_1^*/p_2^* 为1.347~3.5及定高定厚隙比定齿间距情况下的泄漏系数进行了比较,如图5、图6所示.发现由于形状适合涡旋发展,模型5单倾角齿底为圆弧形状的篦齿泄漏系数最小,故将之设定为最佳齿形,以后计算中都采用这种齿形进行计算.

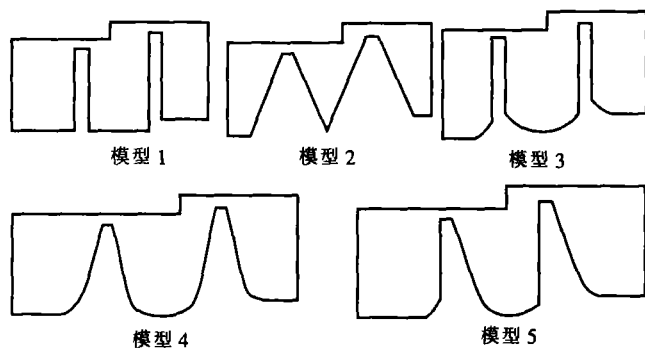


图5 篦齿齿腔形状示意图

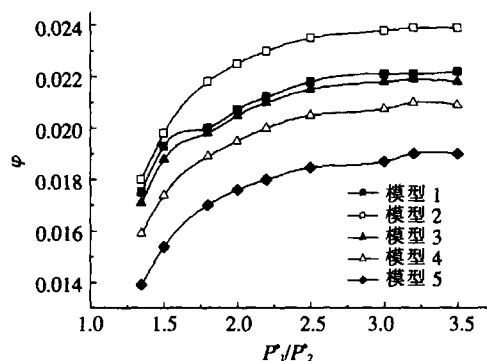


图6 齿腔形状对泄漏系数的影响

从各种齿腔形状速度矢量图和涡旋端动能图可以看出,模型2的泄漏系数最大,主要是因为气体在尖角处形成了尖角滞止区,不利于涡旋发展.而在模型1中,在矩形角处形成了小涡旋,涡旋数目比模型4和模型5多了一个,但由于模型5中大涡旋的端流动能大于其它模型,有利于能量耗散,故综合封严效果最佳.

1.4 篦齿腔中流场分布

速度矢量图如图7所示,可以明显看出气体在齿腔内的流动情况.

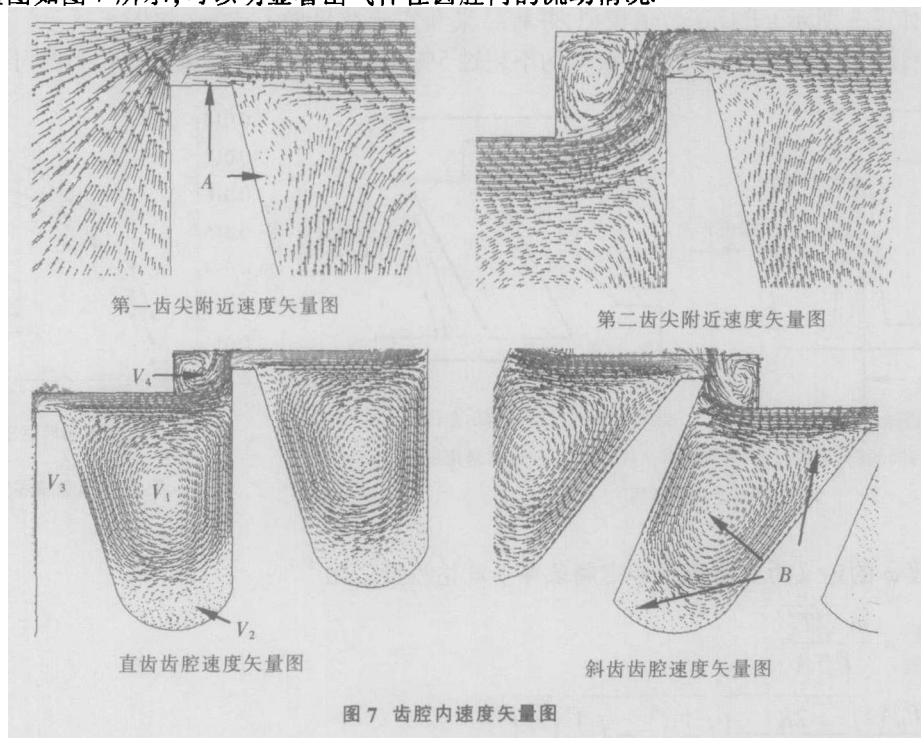


图7 齿腔内速度矢量图

从图7可知,上游来流在经过第一个齿尖时剧烈收缩加速进入篦齿,随后出现明显的扩压流动,导致在第一齿尖表面和齿尖背部出现了气流分离,如图中A处所示.在随后的齿尖处,由于台阶的存在,气流并没有直接冲入下一个齿隙,而是形成了一个涡旋,造成了能量的耗散,这正是台阶式篦齿密封性能比直通式优越的原因所在.

此外,另一部分气流与齿间腔室的流体产生质量交换,并在此形成一组漩涡,其包括中心的一个大漩涡 V_1 ,底部的两个角涡 V_2 ,上游篦齿尾缘分离后形成的小涡 V_3 。从第二齿流出冲向第三齿的流动情况与此相似,在第二、三齿端面未发现气流分离。

而在倾斜式齿腔中,则在齿腔上下依次排列着数个大小不一的涡旋(如图7中B处所示),由于涡旋数量增加,尺度均匀,从而加大了流体间摩擦,此外由于倾角的存在,也使射流于涡旋间的质量流量增加,所有这些致使倾斜式篦齿的密封性能明显优于直齿式。

1.5 齿数及倾斜度对泄漏系数的影响

图8是 $t/c = 1.14$ 时不定长情况下直齿式篦齿在不同齿数下泄漏系数 φ 随压比变化的情况。

可以很明显看出,随着齿数的增加泄漏系数 φ 在减小,尤其在齿数较少的情况下这种减少最为明显,这是由于篦齿多次节流的关系。但也可以看出,随着齿数的增加,特别是齿数达到5以后,增加齿数对改善封严的效果就减弱了,而且在不定长情况下,台阶式篦齿齿数的增加除了会增大轴向尺寸外,而且由于台阶数的增多,也会增加径向尺寸。所以若想在5齿基础之上再改善封印效果,则最好采用更先进的刷式或蜂窝式封严。

图9是 $t/c = 1.14$ 时3齿和5齿篦齿倾斜度对泄漏系数的影响的曲线变化示意图。

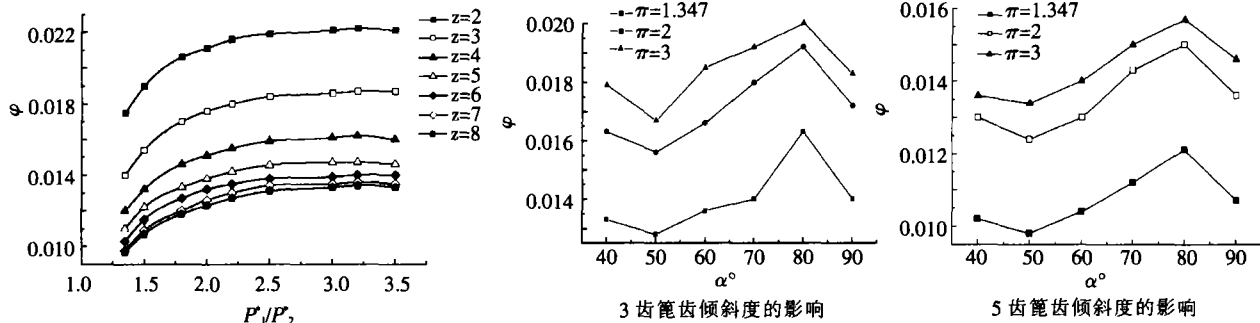


图8 齿数对泄漏系数的影响

图9 篦齿倾斜度的影响

从图9可知,不论是3齿还是5齿,随着倾斜度的减小(90° 为直立)一开始泄漏量增大,但从 70° 开始,泄漏量随角度减小而减少,这是由于斜齿的齿间形状造成了更多更合理的涡旋分布而引起更大能量损耗以及倾斜引起的射流加大了质量交换的缘故。但从 50° 开始,若倾斜角度进一步减小,则泄漏量不降反增,这是由于此时倾斜度过小造成了齿腔过于狭窄,开始不利于涡旋的产生和发展。所以斜齿虽然可以减小泄漏系数,但并非倾斜度越小越好。图9大致给出了台阶式篦齿的一个最佳倾斜度,为 50° 角左右。

此外,5齿篦齿泄漏量随倾斜度变化的曲线明显比3齿平缓,也即5齿篦齿泄漏量受倾斜度的影响要比3齿少的多。这是因为随着齿数增多,齿顶节流在整个作用中比例逐渐增大而齿间涡流作用逐渐减少的关系。

1.6 齿间隙 t/c 及流向的影响

图10分别是直通式篦齿^[3,7]和台阶式篦齿泄漏量随齿间隙变化的关系。在计算中,取齿尖厚 $t = 0.4 \text{ mm}$ 为定值,通过改变齿间隙 c 的数值来改变齿隙比。

从图上可以看出,不论是直通式还是台阶式篦齿,随着齿间隙 c 增大,泄漏系数 φ 都会增大。而且在齿数较多的情况下,篦齿间隙对泄漏系数的影响比齿数较少的要大。当较大间隙时,封严齿数对泄漏系数的影响比小间隙的要小。这是由于间隙较大的时候,封严篦齿形成动能载越效应比较明显,因此靠增加齿数来增强封严的效果不明显。

比较两图也会发现,台阶式篦齿泄漏系数 φ 所受齿间隙影响要比直通式小得多,这也是台阶式篦齿的优点之一。

图11是5齿倾斜和直齿式台阶篦齿正反流向时的泄漏系数。由图可知,不论是直齿还是斜齿,当气流反向流过篦齿时,泄漏系数 φ 变化都不大,最多变化3%~4%左右,说明台阶式篦齿对气流的流向并不敏感。这是由于篦齿有一个台阶式结构,不论气流从哪个方向来,总是先碰到壁面,随之卷入齿间涡流的缘故。这也是台阶式篦齿优于直通式的一个方面。

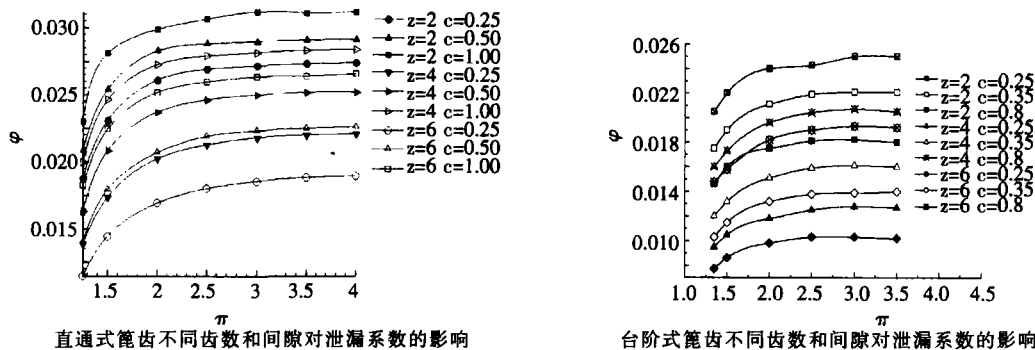


图10 不同齿数齿间间隙对泄漏系数的影响

2 结论

(1) CFD 算法模拟台阶式篦齿腔内流场的结果是真实可信的。

(2) 台阶式篦齿采用单倾角圆弧下壁面的齿腔形状有利于封严。

(3) 随着篦齿前后压力增加, 泄漏系数一开始增加较快, 后来逐步趋向一个稳定值。在齿数小于5时, 用增加齿数的方法来减少泄漏系数的是有效的。

(4) 倾斜篦齿的封严效果比直立篦齿要好, 最佳倾角在 50° 左右。

(5) 台阶式篦齿泄漏系数受密封间隙的影响比直通式要小得多。

(6) 流向改变对台阶式篦齿密封性能影响不大。

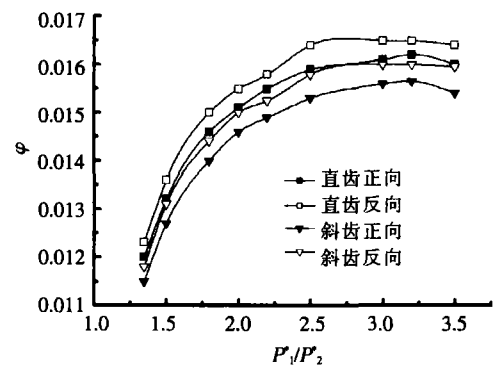


图11 流向对泄漏系数的影响

[参考文献] (References)

- [1] 吴丁毅. 台阶式篦齿密封特性的实验研究[J]. 流体机械, 1995, 11(11): 7-10.
WU Dingyi. Experiential research of sealing characteristics of stepped labyrinth[J]. Fluent Machinery, 1995, 11(11): 7-10. (in Chinese)
- [2] SCHRAMM V, WILLENBORG K, KIM S, et al. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124: 140-146.
- [3] 王锁芳, 吕海峰. 转静态封严篦齿流场的数值分析和封严特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 444-449.
WANG Suofang, LÜ Haifeng. Numerical analysis of flow and experiemental instigatim of labyrith sealing characteristics at rotational and static states[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 444-449. (in Chinese)
- [4] WITTIG S L K. Scaling effects on leakage losses in labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105: 305-309.
- [5] YUCELI U, KAZAKIA J Y. Analytical prediction techniques for axisymmetric flow in gas labyrinth seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123: 255-257.
- [6] RHODE D L. CFD Analysis to Improve performance of labyrinth seals[J]. NREC News: Summer, 1999, 13(1): 3-4.
- [7] 杨军, 曾军, 康勇. 直通型篦齿流场计算[J]. 燃气轮机试验与研究, 2002, 15(4): 13-16.
YANG Jun, ZENG Jun, KANG Yong. Calculation of the straight labyrinth seal[J]. Experiential Reasearch of Gas Turbines, 2002, 15(4): 13-16. (in Chinese)
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
TAO Wenquan. Numencal Heat Tranfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese)

[责任编辑:刘健]