

# 零压力梯度平板边界层转捩的数值模拟

董 平, 黄洪雁, 冯国泰

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 对平板边界层转捩试验 T3A 和 T3B 进行了数值模拟, 计算值与实验值吻合的较好。通过对零压力梯度的平板转捩现象的研究得出以下的结论: 转捩流动的复杂性对流动边界层的影响不容忽视; M-L 转捩模型能比较准确地预测转捩的发生和发展过程, 在高速流场下使用全湍流模型来模拟转捩流动的误差较小。

**关 键 词:** 平板边界层转捩; 转捩模型; 零压力梯度; 数值模拟

中图分类号: O242 文献标识码: A

## 引 言

转捩现象是一个具有强烈的非定常、非线性、对干扰极其敏感的三维过程。在叶轮机械中, 转捩通常产生较大的分离而直接影响叶片的气动性能和传热特性, 目前通过求解雷诺平均的  $N-S$  方程 (RANS) 预测流场难以令人满意的原因之一就是没有一个通用的湍流模型可以对边界层中转捩、分离等复杂现象进行准确的预估和模拟。在工程应用上模拟转捩流动大都依赖于由实验总结出的经验准则, 国外研究者提出了一些转捩模型, 比较著名的有 Abu-Ghannam & Shaw (AGS) 模型、Steelant & Dick 模型、Suzen & Huang (S-H) 模型等<sup>[1-3]</sup>; 国内一些学者也进行了相关的研究, 如顾金生、郭玉波等人<sup>[4-5]</sup>, 这些模型大都还有一些不足。Menter & Langty (M-L) 的转捩模型对前人提出模型的很多不足作了较大的改进<sup>[6]</sup>, 通用性和准确性都得到很大的提高<sup>[7]</sup>。

Coupland 所作的平板边界层转捩 T3 系列实验通常被作为验证 CFD 程序对转捩预测能力的经典算例<sup>[8]</sup>, 本文的主要工作对其中零压力梯度的实验 T3A、T3B 进行数值模拟, 一方面是对 M-L 转捩模型对转捩的预测能力进行校核, 另一方面是通过计算结果对转捩现象流动特点进行细致研究。

## 1 数值方法和模拟工况

在较早的转捩模型中, 如 AGS 模型, 转捩起始点雷诺数通常根据经验关系式由进口的湍流强度或者附面层动量厚度雷诺数等得出, 但是实际情况下流场中局部参数是各不相同的, 仅凭宏观变量并不能准确地描述整个流场的流动情况; 另外, 如果边界层内网格点数比较稀疏, 在积分过程中容易引起较大的误差, 并且由于其只适用于结构化网格而影响了在非结构化网格和并行计算中的应用, 通用性较弱。M-L 转捩模型对上述相应的缺点做出了修改<sup>[9]</sup>, 增强了准确性和通用性, 一方面修改了由 S-H 模型发展而来的间歇系数输运方程, 采用涡量雷诺数代替动量厚度雷诺数作为转捩起始点雷诺数, 因为涡量雷诺数只与局部变量有关, 所以就把转捩的特性与局部变量相关联; 另一方面考虑到系统的流动输运特性, 引入转捩起始动量厚度雷诺数输运方程, 把转捩起始动量厚度雷诺数看作是一个输运变量; 同时对于转捩起始动量厚度雷诺数的取值, 通过考虑局部湍流强度和压力梯度等参数。M-L 转捩模型结合 AGS 转捩模型和 S-H 模型的优缺点提出了一个新经验关系式, M-L 转捩模型的详细推导参见文献<sup>[6]</sup>。

T3A、T3B 的实验情况和实验条件如图 1 和表 1 所示。由表 1 可见, 实验的进口湍流强度与实际涡轮工作条件相似: 3%~6%。本文选用商业程序 CFX 作为求解器, 湍流模型选取如表 2 所示, 差分格式均为二阶迎风格式。根据文献<sup>[8]</sup>, T3 系列实验可以看作二维流动, 但由于 CFX 对于二维计算的局限性, 只能使用三维网格近似模拟二维网格, 高度方向、流动方向和展向网格点数为  $140 \times 600 \times 4$ , 合计 33.6 万。为准确预测转捩过程和捕捉边界层内速

收稿日期: 2006-11-20; 修订日期: 2007-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50476028 50576017)

作者简介: 董平 (1974-) 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 哈尔滨工业大学博士研究生

度分布, 对流向(转捩发生区域)和壁面附近网格都进行加密, 距壁面第一个网格点  $y^+ < 1$ , 并保证边界层内(假设边界层厚度  $\leq 25$  mm)存在 30 个网格点。

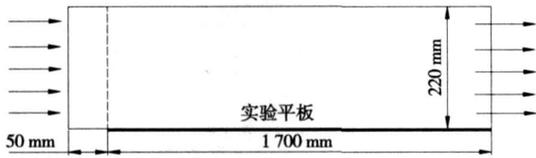


图 1 平板转捩实验示意图

表 1 实验的进口条件

	进口速度/ $m \cdot s^{-1}$	湍流强度/%	粘性比
T3A	5.4	3.0	13
T3B	9.4	6.0	100

表 2 选用的湍流模型

层流模型		✓
$k-\epsilon$	标准格式	✓
高雷诺数湍流模型	重整化群格式(RNG)	✓
$k-\omega$	标准格式	✓
低雷诺数湍流模型	剪切应力	原型
	输运格式	
	M-L 一方程模型	✓
	(SST) 转捩	
	模型	二方程模型
		✓

## 2 平板转捩的数值模拟结果与分析

在以下图例中,  $Re$  代表预测的转捩起始动量厚度雷诺数; 图 2 是壁面阻力摩擦系数分布图, 定义是:  $C_f = \tau / 0.5 \rho U_{ref}^2$ ,  $\tau$  是流向方向上的壁面切应力, 通常认为摩擦系数最小处为转捩起始点, 最大之处为转捩终点。图 3 是沿流向不同位置速度剖面轮廓线和边界层厚度分布, 选用 M-L 二方程模型计算结果速度剖面与实验值速度剖面进行对比, 取当地流速为  $99\% U_{mid}$  时的高度为边界层厚度,  $U_{mid}$  为中径处势流速度。图 4 是边界层形状参数分布, 形状参数(Shape Factor)的定义是:  $H = \delta^*/\delta$ ,  $\delta^*$  为边界层位移厚度,  $\delta$  为边界层动量损失厚度, 形状参数是衡量边界层流动状态的参数, 一般情况下认为层流状态的形状参数应该大于 2。在湍流边界层内由于流速分布更趋均匀化而边界层位移厚度  $\delta^*$  减小, 由于阻力的增加而边界层动量损失厚度  $\delta$  增加, 形状参数下降到 1.5 以下, 如果发生转捩, 形状参数必然有一个从高向低的跳跃过程。图 5 和图 6 分别为

T3A、T3B 采用不同湍流模型计算的流场粘性比分布云图, 为了对比方便, 在图中加入了相应的边界层厚度沿流向分布曲线, 粘性比是湍流粘度与分子粘性比值, 粘性比越大越趋向湍流, 越小则越趋向层流。

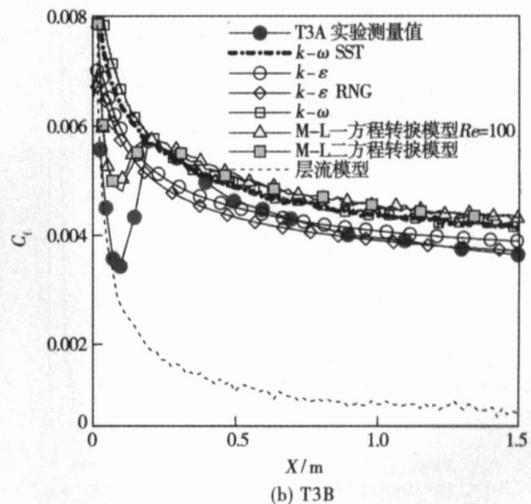
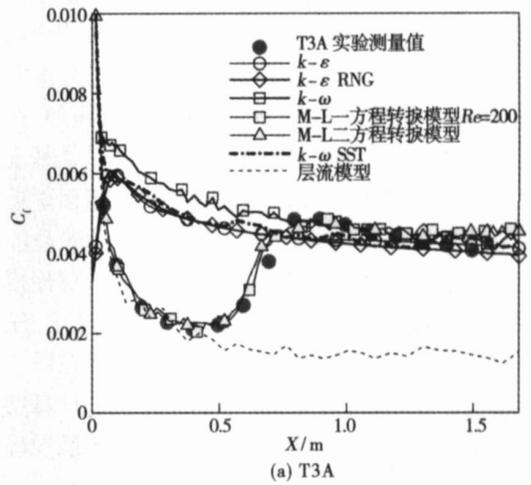
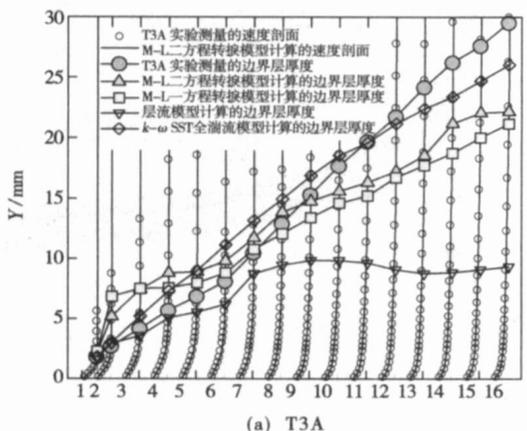


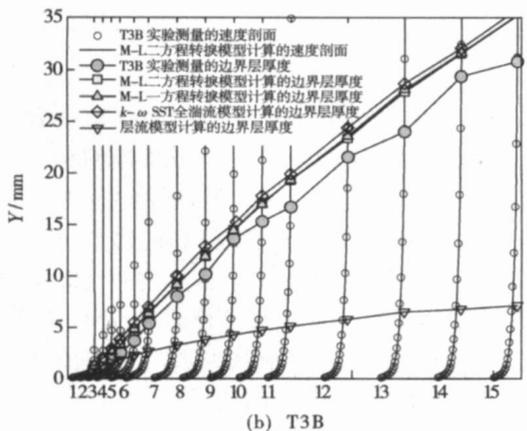
图 2 壁面阻力摩擦系数分布沿流向分布

从图 2 中各湍流模型计算的壁面摩擦系数与实验值比较可以看出, 应用 M-L 一方程模型和二方程模型都能比较准确地捕捉到转捩的始终位置和发展过程; 在图 4 中使用 M-L 模型计算的边界层形状参数与实验值吻合较好, 而使用  $k-\omega$  模型(标准格式和 SST 格式)和  $k-\epsilon$  模型(标准格式和 RNG 格式)所计算的摩擦系数和边界层形状参数与实验值相差都较大, 不能准确区分层流向湍流的转捩过程, 这主要是因为当使用  $k-\epsilon$  模型和  $k-\omega$  模型时, 它们所描述附面层内流动实际上都是湍流边界层流动特性。  $k-\epsilon$  模型在计算时对附面层内部的流动不求解, 必须使用壁面函数, 壁面函数是根据无压力梯度下平面湍

流边界层的特性推导出来的经验公式, 相应第一个网格节点 ( $y^+ > 11.06$ ) 处于附面层中湍流对数层 (log-law region) 和粘性底层 (viscous sub-layer) 之间的混合层中 (buffer layer), 并不能准确地描述粘性底层中壁面处的流动情况。由图 4 可见, 使用  $k-\epsilon$  模型计算的边界层形状参数均小于 1.3, 理论上应属于全湍流状态, 但与平板实验转换后湍流状态仍还有很大误差; 而  $k-\omega$  模型虽然属于低雷诺数湍流模型, 在计算过程中对附面层内部流动直接求解, 但它是基于全湍流的假设, 另外由于在附面层粘性底层壁面附近采用阻尼耗散 (damping function), 壁面附近的湍动能也被人为减小, 使得低雷诺数湍流模型不能准确地模拟转捩流动, 而且也不能准确描述自由流湍流速度、压力梯度和马赫数等因素对壁面附近的影响。在图 2 和图 4 中可以看到, 使用  $k-\omega$  全湍流模型的计算结果与平板实验转换后湍流状态吻合较好, 但不能准确分辨转捩前的层流状态。



$X=45, 95, 195, 295, 395, 495, 595, 695, 795, 895, 995, 1095, 1195, 1295, 1395, 1495$  mm



$X=25, 45, 70, 95, 145, 195, 295, 395, 495, 595, 695, 895, 1095, 1295, 1495$  mm

图 3 流向位置速度分布轮廓线和边界层厚度

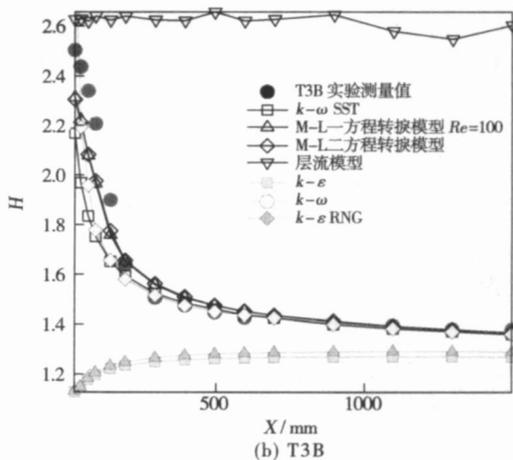
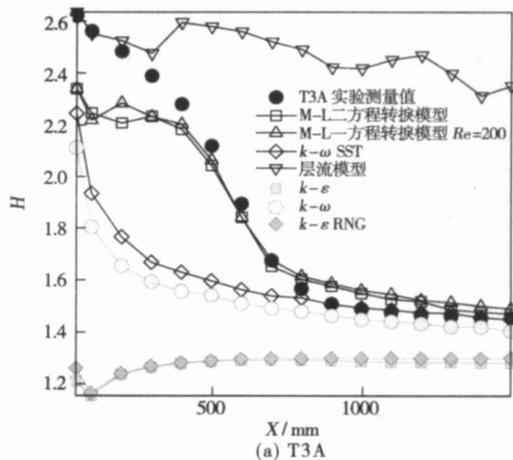


图 4 边界层形状参数分布

对于图 2(a) 中较低湍流度 (3%) 的 T3A, 使用转捩模型计算的壁面阻力摩擦系数与实验值符合得较好; 而对于图 2(b) 中较高湍流度 (6%) 的 T3B, 计算结果显示转捩位置与实验值基本符合, 但在转捩起始点附近的壁面阻力摩擦系数与实验值有所差别; 与之相对在图 3 中各剖面边界层厚度分布计算值和实验值并不是完全符合, 而且图 3(b) 中 T3B 边界层厚度分布计算值和实验值的误差要小于图 3(a) 中的 T3A, 上述现象主要是因为 T3A 和 T3B 之间在边界层中流动状态有很大的不同。较高的湍流度能够增强扰动的传播, 促进转捩的提早发生, 反之则推迟转捩的发生。由于 T3B 的进口湍流度较高, 自由流几乎是经过平板的前缘就发生了转捩, 由图 2(b) 可以计算出 T3B 的转捩长度约为 0.15 m, 只占平板长度的 9%, 转捩发生以后湍流流动区域约占去 90% 平板长度, 图 4(b) 中形状参数也显示 T3B 平板大部分区域的流动状态为湍流流动; T3A 的进口湍流度较小, 转捩在平板的中部才开始发生, 由图 2(a) 可

以计算出 T3A 的转捩长度大约为 0.4 m, 层流流动区、转捩区域和湍流流动区分别占平板长度的比例为 29%、24%和 57%; 另外, 在图 4 中显示 T3A 和 T3B 转捩起始点附近区域边界层形状参数与实验值尚有一定的差别, 与之对应, 使用单一流动状态(湍流或层流)模型计算的边界层形状参数与实验值的吻合度在相应的特殊区域是非常高的。综合上面的现象, 一方面说明虽然 M-L 模型计算结果比较成功地描述了从层流向湍流的复杂转捩流动过程, 但是由于模型本身的不完善性原因, 使得数值模拟的转捩起始点前后区域的流动是一种介于层流和湍流中间的一种流动状态, 从而影响到转捩起始点前后区域边界层剖面速度值与实验值相比有一定的误差, 导致边界层厚度在转捩发生前后也与实验值有较大的区别; 另一方面是由于如前所述 M-L 转捩模型是采用传统方式——通过判断转捩起始动量厚度雷诺数来切换求解层流和湍流状态, 而在目前数值模拟中全湍流模型相对转捩模型更加成熟, 对单一流动状态(湍流或层流)的数值模拟能力, 无论是

准确性还是通用性, 都要远强于对转捩这种复杂流动的模拟。由图 5 和图 6 中 T3A、T3B 实验各湍流模型计算的粘性比分布可以看出使用  $k-\epsilon$  模型、 $k-\omega$  模型与 M-L 转捩模型的区别: 对于 T3A 说, 转捩过程明显, 层流区和湍流区对整个近壁面流场影响都很大, 由图 5(a)可以看到, 对于低湍流度的 T3A 采用转捩模型的计算值显示在转捩前为层流状态, 并在边界层中起主导作用, 但经过转捩以后, 层流边界层迅速减薄转变为湍流的粘性底层, 流动状态也变成完全湍流, 而基于全湍流假设模型计算结果基本不能体现转捩前后流动状态的变化, 在图 5(b)和图 5(c)中全湍流计算值显示流动中除了粘性底层根本没有层流状态的存在; 而 T3B 的近壁面流动则更接近于单一的全湍流状态, 所以当求解 T3B 流场时使用转捩模型的效果和使用全湍流模型的效果类似, 通过图 6(a)转捩状态和图 6(c)全湍流状态对比, 可以发现他们在中下游的流动状态几乎相同, 而图 6(b)中使用高雷诺数  $k-\epsilon$  模型计算的近壁面流场误差还是较大。

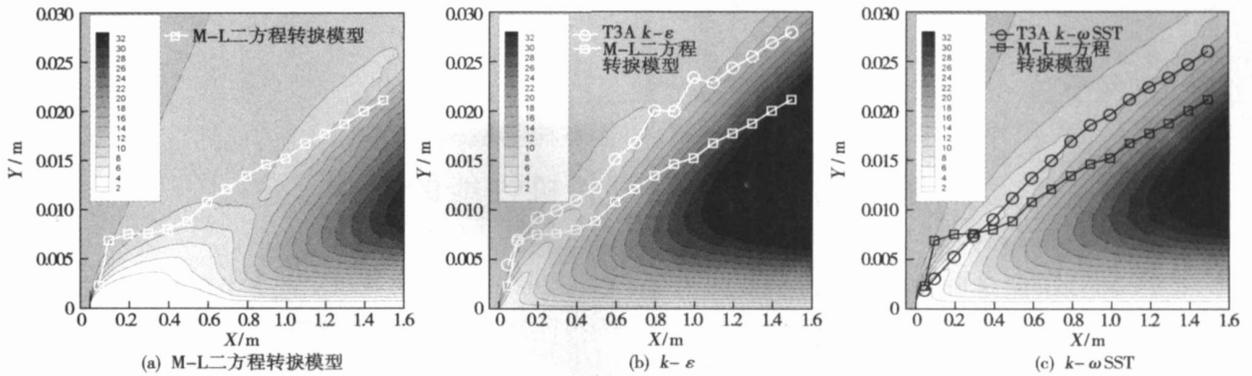


图 5 T3A 各湍流模型计算的粘性比分布对比

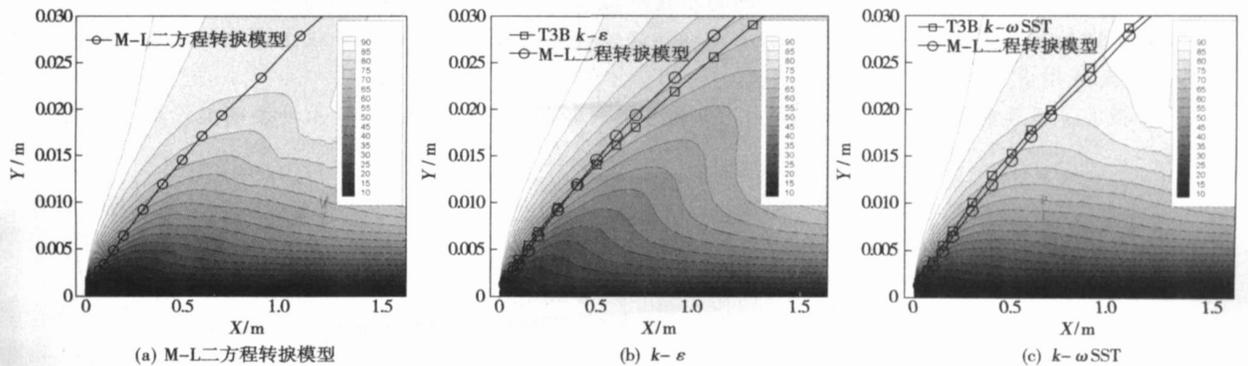


图 6 T3B 各湍流模型计算的粘性比分布对比

### 3 结 论

通过对零压力梯度的平板边界层转捩实验 T3A 和 T3B 进行数值模拟, 分析对比计算结果得出以下的结论:

(1) 使用 M-L 一方程模型和二方程模型都能比较准确地预测零压力梯度下转捩的发生和发展过程; 使用  $k-\omega$  模型(标准格式和 SST 格式)和  $k-\epsilon$  模型(标准格式和 RNG 格式)的计算结果都不能准确预测转捩过程, 对于近壁面流场的计算误差也很大。

(2) M-L 模型本身尚存在不完善性, 使得数值计算在转捩起始点前后区域的流动与实验值相比有一定的误差, 计算得到的各剖面边界层厚度与实验值也存在一定误差, 有待改进。

参考文献:

[1] ABU GHANNAM B J, SHAW R. Natural transition of boundary layers-

the effects of turbulence pressure gradient, and flow history[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1980, 22(5): 213-228.

[2] STEELANT J, DICK E. Modeling of laminar-turbulent transitional for high freestream turbulence[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123, 22-30.

[3] SUZEN, Y B, XIONG G, HUANG P G. Predictions of transitional flows in low-pressure turbines using an intermittency transport equation[R]. AIAA Paper 2000-2654, 2000.

[4] 顾金生. 不依赖于经验系数的湍流模型初探[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.

[5] 郭玉波. 叶轮机内粘性流场的转捩流动数值模拟方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.

[6] MENTER F R, LANGTRY R B, LIKKI S R, et al. A Correlation-based transition using local variables part I-model formulation[R]. ASME Paper 2004-GT-53452, 2004.

[7] LANGTRY R B, MENTER F R, LIKKI S R, et al. A Correlation-based transition using local variables part II-test cases and industrial application[R]. ASME Paper 2004-GT-53454, 2004.

[8] <http://cfd.me.umist.ac.uk/ercoftac/classif.html>.

(编辑 伟)

理论研究

## 喷水对多转子燃气轮机性能的影响

据《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2006 年 1 月号报道了用于计算具有喷水的多转子燃气轮机性能的方法。该方法已用于可得到其压气机几何和干性能详细数据的一台三转子工业燃气轮机, 并假设阻塞的喷嘴流量来模拟每个涡轮。

基于这一方法计算的初步结果表明, 具有与单轴燃气轮机估算类似的趋势, 即通过喷水, 空气质量流量和压比均增加, 并且前几级压气机移向阻塞和后几级压气机倾向失速。尤其是低压压气机在严重的非设计条件下运行, 导致气动力性能恶化, 蒸发冷却的功效降低。但是, 中压和高压轴的转速较它们的设计值增加, 从而减轻了增加质量流量不利的气动力影响。调整涡轮喉部面积和变几何导叶状态也可以减轻非设计的困难, 并且这无疑指出了今后研究的一个领域。

尽管损害了压气机的气动力性能, 估算的三转子燃气轮机总的性能表明, 输出功率明显增加以及热效率略有增加。

(吉桂明 供稿)

水煤浆锅炉的发展及现状 = **Development and Status Quo of Coal-water-mixture (CWM)-fired Boilers** [刊, 汉] / LI Yi, YANG Gong-xun, GAO Song (College of Electromechanical and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 583 ~ 585

The concept of coal-water-mixture (CWM)-fired boilers and the features that set them apart from other boilers are briefly described along with a detailed account of the evolution and status quo of CWM-fired boilers both at home and abroad, i. e. the evolutionary process of various oil and coal-fired boilers being converted to burn CWM. The authors have noted the problems existing in the retrofitted CWM-fired boilers and the emergence of special purpose ones. The main technologies used in such boilers are depicted in detail with an analysis of their new technologies and related existing problems. Finally, the future development of CWM-fired boilers was forecasted and the authors conclude that the boilers in question will play a positive role in promoting energy-savings and environment protection. **Key words:** boiler, development, status quo, coal-water-mixture

零压力梯度平板边界层转捩的数值模拟 = **A Numerical Simulation of the Boundary Layer Transition on a Plate with Zero Pressure Gradient** [刊, 汉] / DONG Ping, HUANG Hong-yan, FENG Guo-tai (College of Energy Sciences and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 586 ~ 590

A numerical simulation of the boundary layer transition tests T3A and T3B on a plate was performed and the calculated values were in relatively good agreement with the test ones. Through a study of the phenomenon of boundary layer transition on a plate at zero pressure gradient, the authors have concluded that the influence of the complexity of the transition flows on the boundary layer of a flow field should not be neglected. The M-L transition model can somewhat accurately predict the generation and development process of the transition. At a high turbulence, the use of a total turbulence model to simulate a transition flow will result in a relatively small error. **Key words:** boundary layer transition on a plate, transition model, zero pressure gradient, numerical simulation

影响系数法平衡中的病态方程研究 = **A Study of Ill-conditioned Equations Involved in a Dynamic Balancing Process When Influence Coefficient Method is Used** [刊, 汉] / WANG Xiu-feng, NIU Zhen (National Key Laboratory on Machine Building Systematic Engineering, Diagnosis and Control Theory Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 591 ~ 595

Dynamic balancing technology provides the most important means for the elimination of unbalance faults of rotors while influence coefficient method (ICM) represents a major approach in dynamic balancing techniques. However, in practical operations the balancing efficiency may be lowered due to the influence of ill-conditioned equations. To cope with the problem of possible emergence of ill-conditioned equations, a single-span rotor model was established and by using rotor vibration mode theory the mechanism governing the appearance in the ICM of ill-conditioned equations analyzed. On this basis, an experimental study was conducted. The research results show that the ICM can be used for the dynamic balancing of flexible rotors. However, the rotors may be influenced by the ill-conditioned equations at a special rotating speed and a special counterweight plane while the selection of a rational balancing speed and balanced counterweight plane constitutes a main measure for avoiding the ill-conditioned equations. **Key words:** influence coefficient method, dynamic balancing, ill-conditioned equation

LDV 实验测量气冷环形涡轮叶栅内部流场 = **Experimental Measurement of the Flow Field in an Air-cooled Annular Turbine Cascade by Using LDV (laser-Doppler velocimetry)** [刊, 汉] / YUAN Feng, WU Ya-dong, ZHU Xiao-cheng, et al (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 596 ~ 600

An experimental measurement was performed of the three-dimensional average speed in the flow field of an air-cooled an-