

涡轮导叶轴向弯曲对其气动性能影响的研究(三维粘流数值分析)

陈乃兴 周 倩 黄伟光

(中国科学院工程热物理研究所)

〔摘要〕 近年来计算流体力学在叶轮机械中得到了应用,在三维计算方法方面有了很大的进。与此同时,从学院式的研究到工业上应用的过渡已经开始。中国科学院工程热物理研究所在最近二十年内致力于发展各种叶轮机械三维流动的计算方法。本文的目的是介绍作者的方法和应用它来研究分析一个典型的大长径比涡轮导向器中气流流动的物理现象。本文给出了一些研究结果和建议。

关键词 三维粘流数值分析 涡轮导叶轴向弯曲 涡轮气动性能

分类号 TK472 TK474.71

1 前言

现代先进的叶轮机械是在很复杂的设计或非设计工况下运行的。为提高其效率,采用了不同的措施,如:层流化叶型、可控涡、叶片扭曲、周向弯曲、轴向弯曲、修改叶尖和叶根的子午面形状等。要得知上述措施对内部流场的影响,最可靠的方法就是进行大量的测试,这就需要投入大量的人力、物力。有时为了得到一个最优组合,需要经过设计—试验—改型设计几个回合,需要的时间很长。国际许多著名的公司、大学和研究机构为发展计算流体力学在发动机中的应用,以应付世界航空市场的迅速变化,投入了大量的人力、物力。工程热物理研究所在近十多年来的研究实践中也深感开发一个全三维粘流计算方法和程序的重要性,在最近几年中也取得了一些成绩⁽¹⁻⁵⁾。

很早以前就有人进行导叶的弯曲对流场影响的研究⁽⁶⁾。最近几年哈工大对这种叶

片做了不少试验和数值分析^(7,8),认为:“弦向倾斜对通道涡和损失的发展起到了与周向倾斜相类似的作用,但是前者比后者减小了叶栅入口段的流向逆压梯度和从锐角侧起的沿叶高的负压梯度,削弱了鞍点分离和通道涡的强度,从而降低了二次旋涡损失。”文献〔7,8〕的试验件是将同一叶片按不同弦向倾角安装而得到的。在通常的叶片设计中,从子午面准三维(S_2 流面)和任意回转面气动设计中,首先得到的是沿不同高度的叶片型线。因此,如果以不同高度的叶片型线为基础,考虑不同程度的前、后弯曲的影响,就能更有助于将前、后弯曲的技术应用到设计中去。

本文的目的就是应用我所开发的有限体积时间推进法详细地分析涡轮导叶前后轴向弯曲对其气动性能的影响。

2 基本思路

图 1 所示是某涡轮末级静叶的子午面形

收稿日期 1995-02-21

状。我们以该叶片为基础，将出气边的叶根和叶尖位置固定，然后将其弯成二次曲线。如果进出气边的曲率半径在叶片的左边，即为前弯，相反即为后弯。前弯叶片在顶部和根部进气边与轴向成锐角，后弯则成钝角。在前后弯曲叶片成型时，同一半径上叶型只是向前或向后平移一段距离，叶片各半径上的形状保持不变。最大轴向平移距离与叶片顶部后缘的叶片高度之比，我们称为相对拱度，即：

$$\bar{h} = \delta x_{\max} / (r_t - r_h)$$

式中 δx_{\max} 表示叶片中径上的最大平移距离，文中对 $\delta x_{\max} = 0.025, 0.05, -0.025, -0.05$ 四种不同拱度的叶片进行了分析，比较了不同程度的前后弯曲对叶栅气动性能的影响。

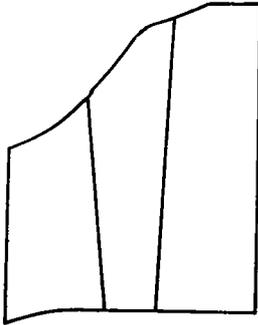


图 1 叶片通道子午面形状

3 数值模拟方法简述

本文应用三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程，有限体积时间推进法，采用 Baldwin-Lomax 混长代数湍流模型。控制方程在笛卡尔坐标系中得到。未知量为密度 ρ ，速度矢量 \vec{V} (或其三个分量 V_x, V_y, V_z)，和内能 e 。其积分表达式为：

$$\int \frac{\partial \rho}{\partial t} dv = \oint \rho (\vec{v} \cdot d\vec{s}) = 0 \tag{2}$$

$$\int \frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} dv + \oint \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot d\vec{s}) + \oint p d\vec{s} = \oint \vec{\tau} d\vec{s} \tag{3}$$

$$\int \frac{\partial (\rho e)}{\partial t} dv + \oint \rho e (\vec{V} \cdot d\vec{s}) + \oint p (\vec{V} \cdot d\vec{s}) = \oint (\vec{\tau} \cdot \vec{V}) d\vec{s} + \oint k \frac{\partial T}{\partial n} ds \tag{4}$$

式中的 s, v 分别为面积和体积；微元面积矢量 $d\vec{s} = (ds_x, ds_y, ds_z)^T$ ； $\vec{\tau}$ 为作用在具有法向单位矢量 \vec{n} 的微元表面上的粘性应力；此外，

$$p = \rho(\kappa - 1) \left(e - \frac{1}{2} V^2 \right) \tag{5}$$

$$k = \frac{\kappa R}{\kappa - 1} \left(\frac{\mu}{Pr_t} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \tag{6}$$

上两式中的 k 为等熵指数； μ, μ_t 分别为分子动力粘性系数和湍流粘性系数； Pr_t, Pr_t 分别为层流和湍流 Prandtl 数。

粘性切应力的表达式为：

$$\vec{\tau} = \mu \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{j=1}^3 n_j G_{ij} \vec{u}_i \right) \tag{7}$$

G 函数为：

$$G_{ij} = \frac{1}{Vol} \sum_{l=1}^6 (V_l \Delta s_j + V_j \Delta s_l) \tag{8}$$

式中， \vec{u}_i 为单位矢量，其分量为 $\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z$ ； Vol 为微元体积。

本文采用的湍流模型为适用于多壁面内流(比如轮毂与叶片所形成的角区)的修正 B-L 模型。为减少近壁面处的节点数采用了壁面函数。

方程(2) - (4) 离散后的代数方程在求解时要对各个面上的通量进行修正，以抑制数值波动和激波附近的振荡与不稳定。在空间方向采用四步 Runge-Kutta 法求解。为加速收敛，本文采用了当地时间步长法、残量平均和多重网格法等技术。

本文采用上述方法对四个不同的前后弯曲叶片进行了计算与分析。

4 结果分析

本文所研究的对象是一具有较大顶部

扩张角的涡轮静叶。其原始叶片是无周向弯曲、无轴向弯曲、叶型径向分布为线性变化的透平导叶。其三个不同径向位置叶型的径向投影见图 2。从该叶片出发,可以把它变成相对拱度为 $-0.025, -0.05, 0.025, 0.05$ 的四种前后弯曲的叶片。图 3 和图 4 分别为后弯为 -0.05 和前弯为 0.05 叶片的三个截面上的计算网格。本文对这四种叶片作了三维粘性流场分析。

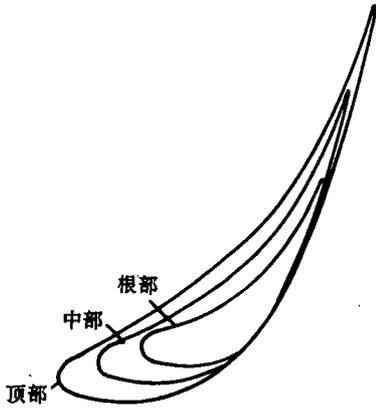


图 2 叶片根部、中部和顶部叶型

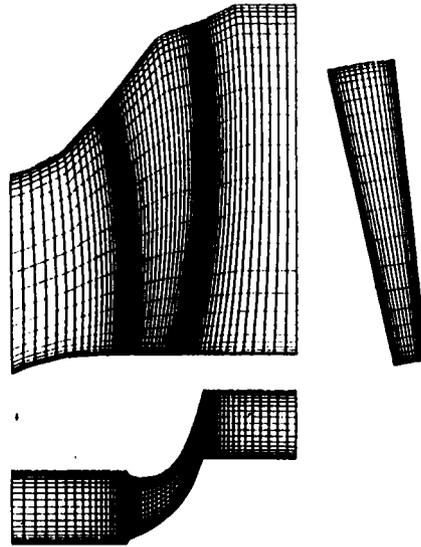


图 4 相对拱度为 0.05 叶片的三维视图

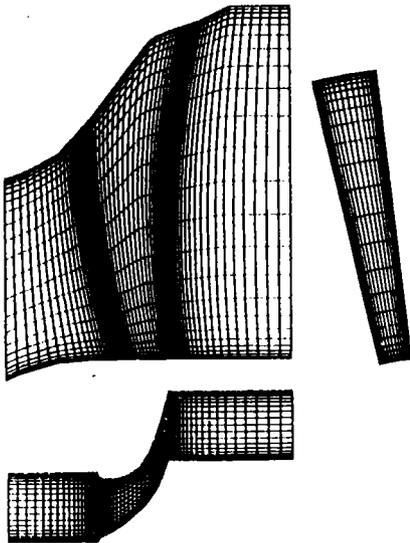


图 3 相对拱度为 -0.05 叶片的三维视图

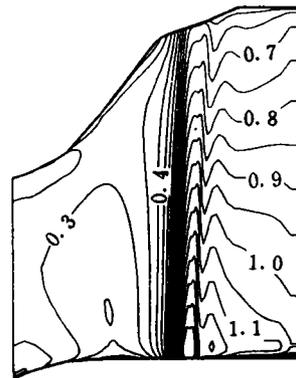


图 5 直叶片中间子午面上的马赫数分布

4.1 三维流场

图5是直叶片的周向坐标中间网格上的马赫数分布图。图上可见在叶片通道内后部的马赫数变化比较剧烈。图6为顶部、中部和根部网格上的压力分布。由上图可以看到,叶片通道内前半部背弧面上的等压线和后半部内弧面上的等压线大致与叶片弯曲的情况相似。由此可见,采取轴向前、后弯的措施可以稍微控制流场内的径向流动,其作用与周向弯曲有些相似,但效果要差一些。

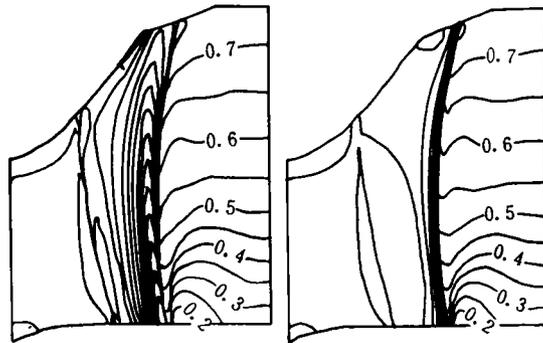


图7 相对拱度为-0.05(后弯)的叶片在背弧和内弧面上的压力分布

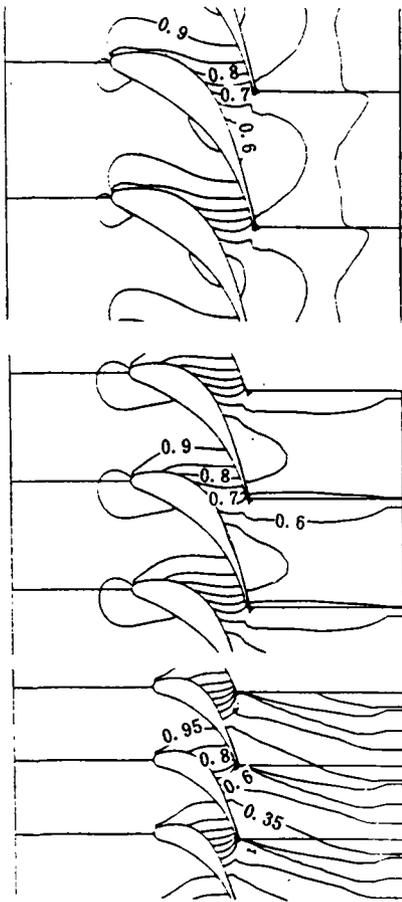


图6 顶部、中部和根部截面上的压力分布

图7和图8分别为两个不同弯度叶片在背弧和内弧上的压力分布。

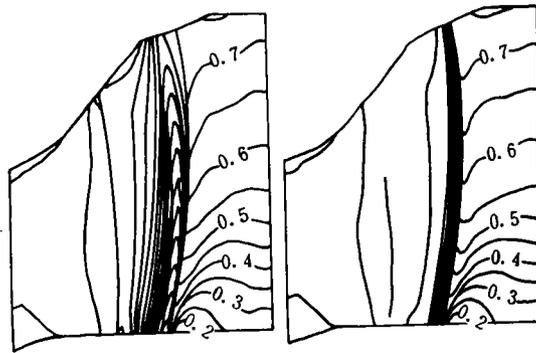


图8 相对拱度为0.05(前弯)的叶片在背弧和内弧面上的压力分布

图9和图10分别为相对拱度为-0.05(后弯)和0.05(前弯)的两组横截面上的压力分布。(a)为计算域进口处;(b)为叶片通道中近前缘处;(c)为叶片通道中间处;(d)为近叶片后缘处;(e)为叶片出口第一个网格点处;(f)则为计算区域出口处的压力分布。从图上可以看出,两种不同叶片通道前部的压力分布有些不同,后部和出口站的压力分布大致相同。

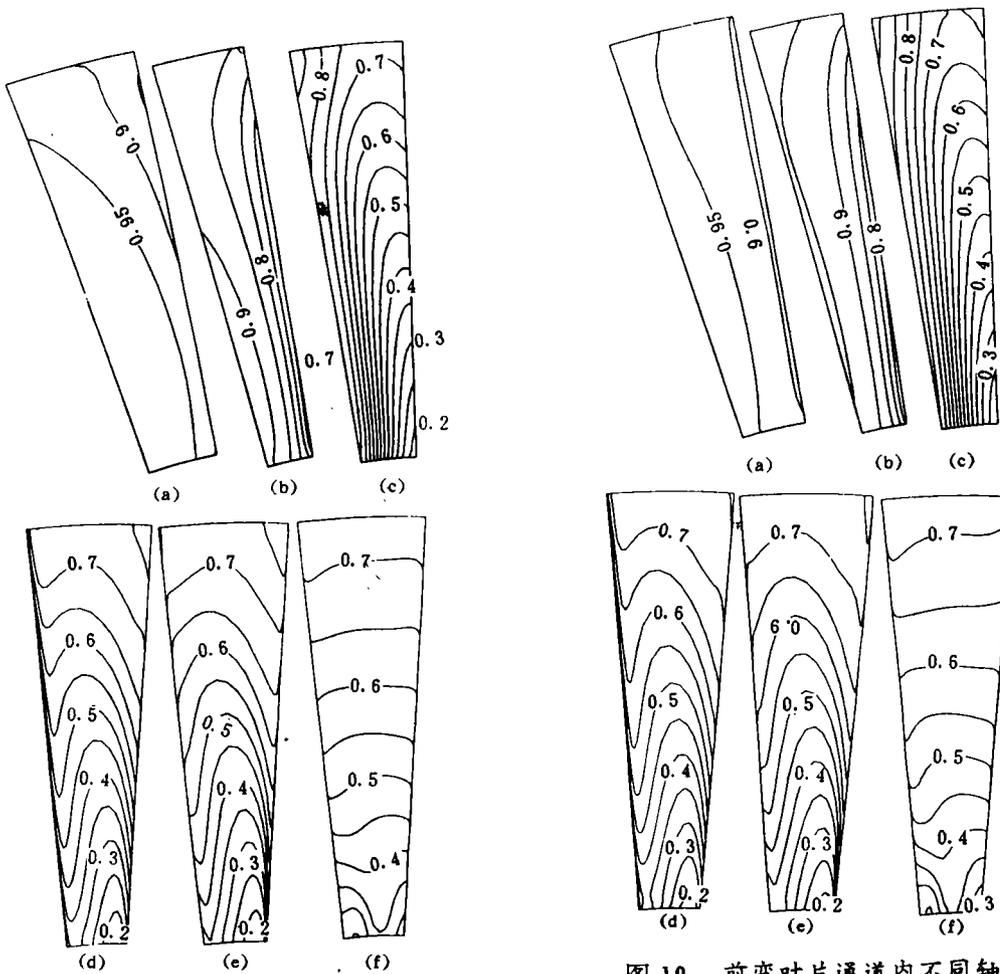


图 9 后弯叶片通道内不同轴向位置的的压力分布

图 10 前弯叶片通道内不同轴向位置的的压力分布

图 11 和图 12 分别为根部和顶部两种不同弯曲叶片(后弯和前弯)的表面压力分布图。我们可以从图 12 上清楚地看到,前弯与后弯的叶片相比,前弯叶片近前缘处的负荷要小些,如果相对拱度再增大些,这个差别将更加明显。根部的负荷减小对叶片的总效率提高有利。这个现象对于顶部来说并不太明显,这是因为这个叶片的顶部有非常大的扩张角,它部分抵消了前弯的作用。

4.2 周向平均参数的比较

为了进行总体和周向平均参数的比较,

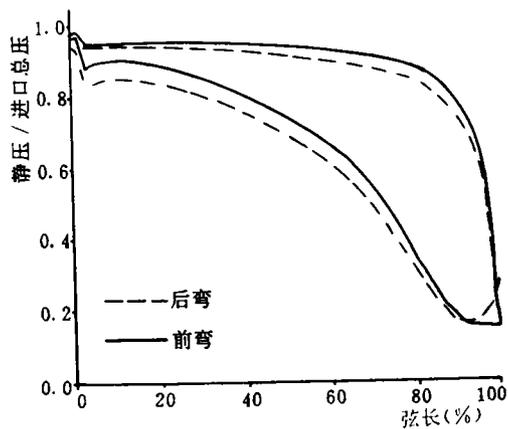


图 11 根部两种不同叶片表面压力分布

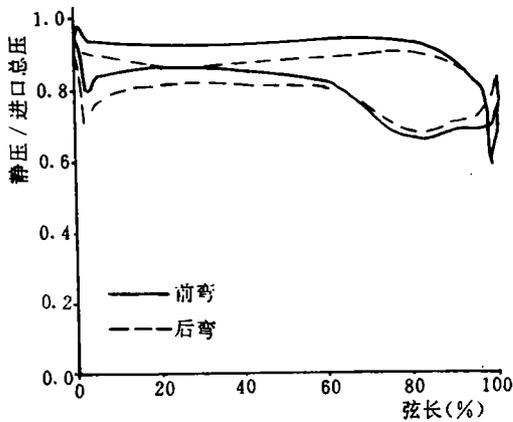


图 12 顶部两种不同叶片表面压力分布

本文采用流量平均的方法。

图 13 为后弯、直、前弯三种叶片通道内周向平均压力分布,这又一次说明了,叶片通道的等压力线分布大致与叶片的弯曲形状相似。因此采用不同的轴向弯曲可以控制叶道

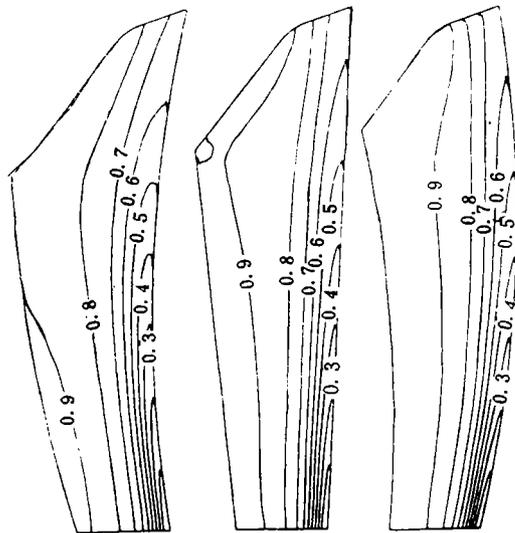


图 13 后弯、不弯和前弯叶片通道内周向平均压力分布

内的流动。图 14 为三种叶片通道内周向平均熵增分布,熵增在叶片通道顶部和根部很大,在中径处很小,因此中部的效率也较大。

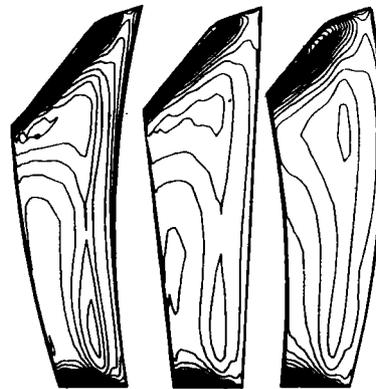


图 14 后弯、不弯和前弯叶片通道内周向平均熵增分布

图 15 所示为不同弯度叶片的等熵效率沿叶片高度的变化。从图中可以看到,轴向前弯叶片在叶片中部的效率要比后弯叶片高,而在顶部(由于顶壁的强烈扩张)则低一些,但从总体来说,前弯叶片的效率要高一些。这也可以从图 16 的顶部总压损失分布图上明显地看出来。

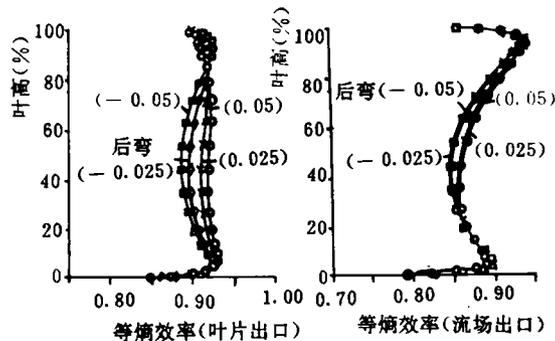


图 15 周向平均等熵效率沿叶高的变化

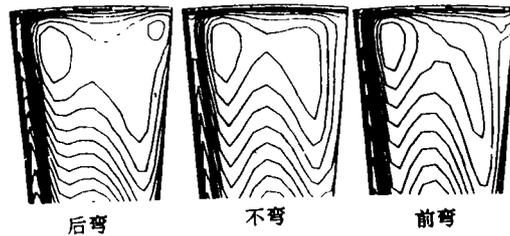


图 16 顶部区域总压损失分布

图 17、18、19 分别为气流角、总压比和总温比沿径向的变化。几种方案气流角的差别较大,近顶壁处最大差别约 5 度,中部的最大差别约 3 度。总温比在中径以下几乎相同,顶部有一些差别,近顶部的最大差别约 2%。总压比的差别也是在近顶部最大,约 5%。由此可见,对于动叶不变的涡轮级,在采用不同轴向弯曲的措施时,必须考虑不同轴向弯曲带来的参数变化对动叶来说能否接受。

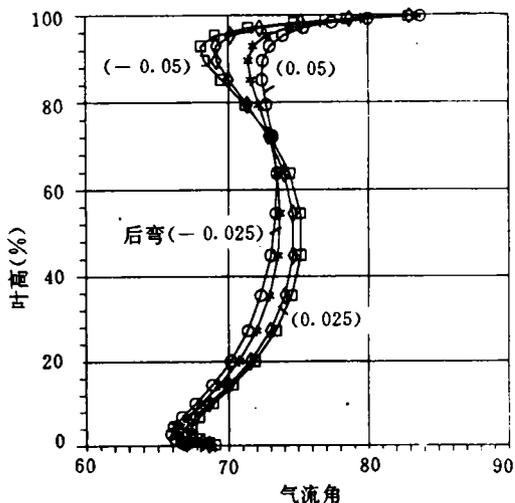


图 17 周向平均气流角沿叶高的变化

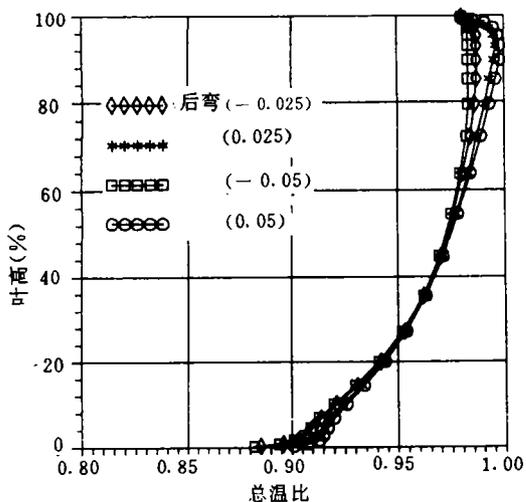


图 18 周向平均总温比沿叶高的变化

图 20 和图 21 分别为这个涡轮静叶中的不同轴向弯度对其平均等熵效率和总流量的影响。从图上可以看出,采用适当的前弯更有利,等熵效率和总流量都有不同程度的提高。

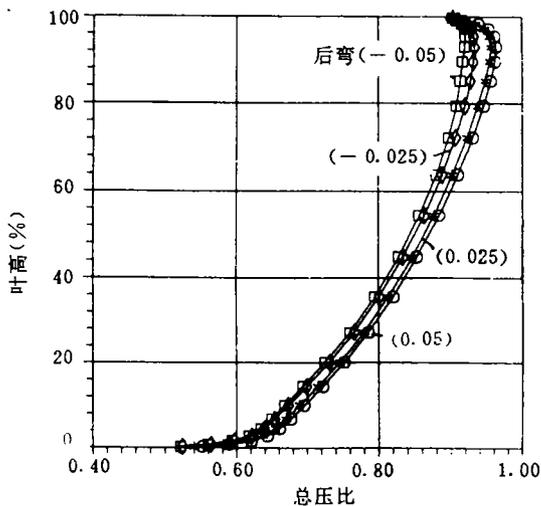


图 19 周向平均总压比沿叶高的变化

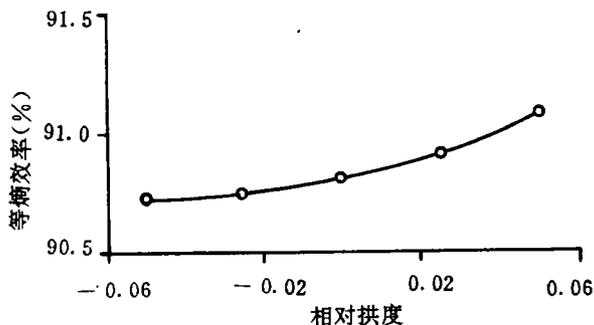


图 20 涡轮静叶不同轴向弯度对等熵效率的影响

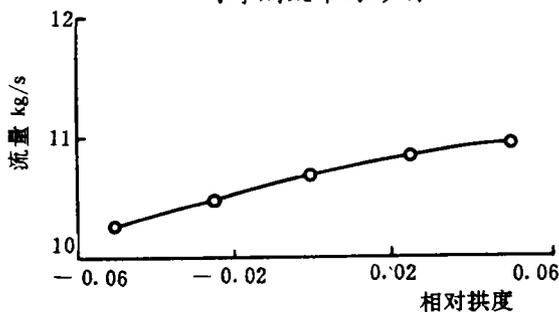


图 21 涡轮静叶不同轴向弯度对总流量的影响

4.3 总性能比较

5 结 论

从上面的结果分析可以得到如下结论:

1) 所发展的数值方法可以用来对所设计的涡轮叶片进行详细的三维分析。这是一个经济和快速的分析手段。这个方法的使用将提高气动设计的水平。

2) 采用轴向弯曲可以增加一个控制二次流的自由度。从流场分析中可以看到,叶片通道内等压线的形状大致与叶片的弯曲形状相似。采用前弯可以减小叶片近前缘处的负荷,同时也可以造成有利的压力梯度,使得在近壁处的低能流体被带走。这有利于叶片效率的提高。

3) 在已有动叶的情况下设计导叶时,选择轴向弯曲量时必须同时考虑它所带来的参数变化,如总温、总压和气流角等,是否会对动叶带来不利影响。

4) 对于所研究的静叶来说,随着弯曲量的增加,其等熵效率和总流量均有所提高。

5) 本文只对组成不同轴向弯度的一种叶片进行了分析,对于其它不同情况的静叶,可以用同一方法进行类似的分析。

作者简介:陈乃兴,男,1933年生。多年从事工程热物理、叶轮机械气动热力学等学科领域的研究。现是国际内流气动热力学会议、国际输运现象国际委员会的国际委员、是中国科学院工程热物理所学术委员会名誉主任、教授、博士生导师。(通讯处:100080 北京海淀区中关村路乙12号)

参 考 文 献

- 1 陈乃兴、郑小清. 跨音速压气机单转子三维流场的数值计算. 高性能推进系统预研文集, 刘大响主编, 1991, PP. 98
- 2 Chen Naixing, Zheng Xiaoqing and Xu Yanji. Numerical computations of turbomachinery cascade turbulent flows with shocks by using multigrid scheme. Paper No. ICAS-92-3. 1. 3, 1992
- 3 Zheng Xiaoqing et. al. Numerical solutions of 3D turbulent flow inside of new concept nozzles. Paper No. ICAS-92-3. 1. 3, 1992
- 4 陈乃兴, 张丰显. 透平级三维湍流流场的数值计算. 1994年中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集, No. 942042. 1992
- 5 陈乃兴, 黄伟光, 周倩. 跨音速单转子压气机三维湍流流场的数值计算. 航空动力学报, 1995, (1)
- 6 Smith L H and Yeh H. Sweep and dihedral effects in axial flow turbomachinery. ASME paper No. 62-WA102, 1962
- 7 韩万今, 黄宗骅, 黄鸿雄, 王仲奇. 大转角叶片弦向倾斜对通道涡和损失发展的影响. 中国工程热物理学会, 气动热力学学术会议论文, No. 942045
- 8 顾发华 等. 叶片的周向弯曲与弦向弯曲及数值分析. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集, 932047

(李乡复 编辑)



高性能的冷凝器管

据“火力原子力发电”1995年3月号报道,日本住友轻金属工业技术研究所成功地研制成一种高度可靠的冷凝器管,它是一种可用来代替海水冷却的冷凝器中铜合金管的一种二重管。

这种二重管是借助于液力扩张法把超薄的钛管包覆在铝黄铜管之内或之外的一种冷凝器管。它表明有理想的耐腐蚀性并比厚度为0.5mm的薄钛管具有更高的传热率。此外,在换管时由于类似的刚性和连接强度,二重管与铜合金管很好的相容,不需要变换原有的冷凝器。

通过对在实际冷凝器中使用的管子的检查,证实了二重管的优良性能。预期,应用二重管可把现有冷凝器改造成高性能和高度可靠的冷凝器。

(学牛 供稿)

涡轮导叶轴向弯曲对其气动性能影响的研究(三维粘流数值分析)=A Study on the Axial Skewing Effect of Turbine Stator Blades on Their Aerodynamic Characteristics(Three-dimensional Viscous Flow Numerical Analysis [刊/中]/Chen Naixing, Zhou Qian, Huang Weiguang(Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(1). -1~8

Recent years have seen the application of computational fluid mechanics to turbomachinery with a significant contribution being rendered to the three-dimensional computation method and the simultaneous initiation of a transition from academic study to industrial use. Over the recent two decades the Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences had been engaged in the development of a variety of three-dimensional flow computational methods for turbomachinery. The present paper presents the method developed by the authors, its application in the study and analysis of the flow phenomena occurring in a typical turbine stator with a high aspect ratio, and the axial skewing effect on its aerodynamic characteristics. Also given are some study results and the authors suggestions. Key words: numerical analysis of three-dimensional viscous flow, axial skewing of turbine stator blades, turbine aerodynamic characteristics

内循环流化床锅炉燃烧机理及有关热工参数的确定=The Combustion Mechanism of an Internal Circulation Fluidized Boiler and the Determination of Related Thermotechnical Parameters[刊/中]/Wang Huaibin, Dong Yong, Quan Wentao(Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(1). -9~14

Proceeding from the combustion mode specific to an internal circulation fluidized bed boiler, the authors analysed the mechanism of fuel particle combustion and presented a method for determining several major thermotechnical parameters in the thermodynamic calculation. Key words: fluidized bed, internal circulation, combustion mechanism, thermodynamic calculation, thermotechnical parameters

PFBC 高温炉渣连续排放与冷却系统的冷态试验研究=Cold-state Experimental Study of a PFBC High-temperature Boiler Slag Continuous Disposal and Cooling System [刊/中]/Rong Degang, Yang Yaping, Wang Shuangqun (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(1). -15~19

This paper briefly describes a cold-state test plant of boiler slag disposal and cooling for a home-made PFBC-CC intermediate test electric power station as well as its working principle and related operation test conditions. The test results have shown that the slag disposal and cooling system based on the use of a pneumatically controlled non-mechanical valve for controlling slag disposal rate and the cooling of slag through a shallow bed fluidized mode is characterized by a good regulation performance under a pressurized environment, low air consumption and adequate adaptability to large granules. Because of the foregoing the said system is expected to find application in an intermediate test plant to realize the continuous disposal and cooling of PFBC high-temperature boiler slag. Key words: pressurized fluidized bed, boiler slag, disposal, cooling system

链条炉排加煤粉复合燃烧技术=A Combustion Technique Featuring the Combination of a Travelling Grate and Pulverized Coal Firing[刊,中]/Yang Mingxin, Wu Shaohua, Sun Shaozeng,