

涡轮静叶栅二次流的数值模拟

李 军, 苏 明

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 采用 CFD 软件 Fluent 数值求解了大转折角涡轮静叶栅三维流动, 分析了叶栅沿流向各截面二次流及叶栅的气动特性, 并研究了叶高以及入口攻角变化对叶栅二次流的影响。计算发现, 由叶栅压力面向吸力面运动的二次流强度沿流向逐渐增大, 引起吸力面附近端壁附面层不断壮大且在后部卷起, 并导致沿叶高总压损失系数和沿叶高出口气流角的剧烈变化。通过不同叶栅工况的比较, 发现叶高的减小以及攻角的增大会极大提高叶栅的二次流损失, 其本质原因都是叶栅通道内二次流所占区域的扩大所致。

关 键 词: 二次流; 涡轮; 静叶栅; 数值模拟

中图分类号: TK402 文献标识码: A

引 言

随着现代叶轮机械设计不断高级负荷和热效率的发展趋势, 叶栅中二次流损失在叶栅总损失中所占的比例越来越大, 掌握二次流的成因、涡系结构的演变及损失的组成和发展, 对降低动叶栅损失和改善叶栅气动性能具有重要作用。涡轮静叶栅中主要的流动损失由叶型损失、二次流损失组成。低展弦比静叶栅的二次流损失可占叶栅通流总损失的 30% 以上。端壁区域的流动状况、流道内的压力梯度的不同以及叶型的几何选择都将在很大程度上影响到流道内二次流的生成和发展, 进而影响叶栅流道内的总损失。

采用广泛使用的 CFD 软件 Fluent 对叶栅进行三维数值分析, 运用控制容积积分法及压力修正算法, 结合 SST $k-\omega$ 湍流模型, 求解三维非稳态雷诺平均 N-S 方程, 获取了叶栅速度场、压力场、二次流和流道总压损失的变化情况。随后分析了叶栅二次流的成因、气流角及总压损失沿叶高的分布规律, 以及在不同攻角下的二次流动能损失的变化情况。

1 计算方法

1.1 湍流模型

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值模拟。 $k-\omega$ 紊流模型是基于紊流动能输运 k 和大尺度的紊流频率 ω 的二方程半经验模型。其 k 方程与 $k-\epsilon$ 模型 k 方程的形式基本相同, 不同的是采用了紊流频率 ω 取代紊流耗散率 ϵ 。 ω 方程克服了 ϵ 方程的近壁缺陷, 对于预测近壁流动或存有逆压梯度流动的紊流尺度具有较大优势。

1.2 数值计算方法

采用控制容积法离散微分方程, 利用求解压力耦合方程的 Simplec 算法沟通动量和连续方程, 完成连续的迭代运算。其基本思想是对于给定的压力场, 代入各速度分量的代数方程按次序求解完成全域动量方程的一轮计算, 所得速度场若满足连续性方程, 则求解完毕, 否则修改压力场重新计算, 直至收敛。

1.3 边界条件

在叶栅进口给定速度分布、气流角以及湍流动能和湍流长度尺度, 出口给定背压, 壁面采用无滑移条件, 叶栅上下游周向边界上应用周期性边界条件。由于叶栅内部二次流的发展受叶栅进口边界层厚度的影响较大, 按照紊流边界层的 1/7 速度定律给定叶栅入口边界层速度分布。进口湍流参数由经验公式计算得到。

1.4 计算网格

涡轮静叶采用叶型 25NSP, 该叶栅为低展弦比、大折转角、具有上下端壁的直列叶栅。叶栅主要特征参数为: 弦长 99.67 mm, 轴向弦长 61.46 mm, 栅距 34.56 mm, 叶高 120 mm, 几何进口角 0° , 安装角 51.1° , 入口速度 30 m/s, 圆柱移动速度 30 m/s, 每一时间步圆柱列向下移动 1/4 节距。前置移动圆柱列产生的尾迹用于模拟动叶产生的尾迹。计算采用 H 型网格, 沿流向、栅距及叶展方向分别取 350、46、80 个网格, 并在叶栅前后缘, 上下端壁及吸力面和压力面附近进行局部加密以准确模拟近壁流动, 网格

数 130 万。

2 计算结果

2.1 端壁极限流线及测量面总压损失系数

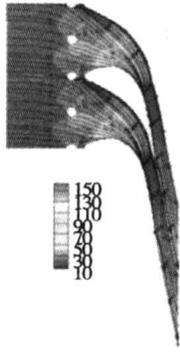


图 1 端壁极限流线

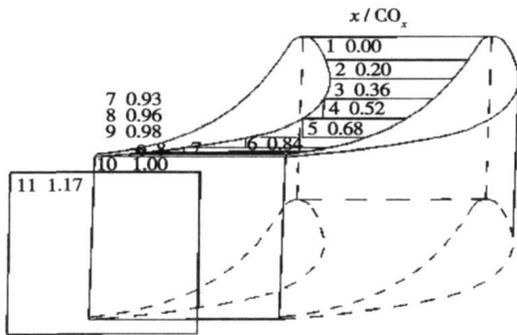


图 2 叶栅型线及测量截面位置

图 1 示出了端壁极限流线, 颜色代表速度值大小。从图中可以看到在端壁附面层内, 由于横向压力梯度的存在, 质点纷纷由叶栅压力面流向吸力面。图 2 示出了叶栅型线及测量截面位置。

图 3 为叶栅的不同横向测量截面总压值的计算结果, 由图可得叶栅流动损失逐步发展的过程, 这是涡(低能流体, 耗能过程)逐渐向后传递、扩张, 二次流活动加剧的结果。在叶栅前缘 1 处, 由于上游流体主要受到上下端壁边界层粘性作用地影响, 此处叶面边界层刚刚开始形成, 所以总压损失主要表现为上游圆柱列的脱落涡损失; 随着流体向后流动, 叶面边界层的粘性作用逐渐加强, 由于壁面附面层和压力面、吸力面之间压差的作用, 由压力面向吸力面运动的二次流逐渐发展涡核继续向远离吸力面和端壁的方向发展强度增加, 如图 3 中截面 5 所示。当低能流体被卷至吸力面时, 上下端壁的低能流体在展向流动并发生相遇、掺混, 使吸力面附面层骤然增厚, 损失急剧增加, 如图 3 中截面 7 所示。当流体流过叶栅喉口向出口运动过程中, 低能流体在吸力面上积聚, 流动中损失最大的流动区域明显的偏向于吸力面一侧, 总压损失大的区域已不再局限于上下端壁附近, 叶片表面附近的损失也在不断增加, 如图 3 出口截面 10 所示。在叶片出口以后截面, 由于压力面与吸力面之间的压差不复存在, 故通道涡趋于耗散, 二次流图上的涡核已不明显, 如图 3 截面 11 所示。综上所述, 近吸力面的总压损失分布清晰地反映了端壁附面层内的低能流体横向流动, 以及在吸力面卷起、堆积等上述流动特征。

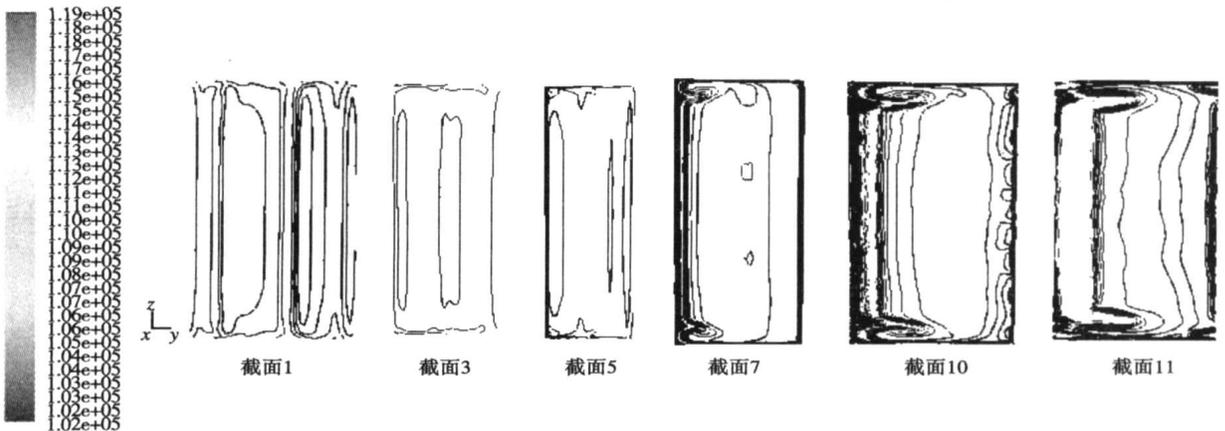


图 3 不同截面的总压等值线分布

为便于揭示端壁二次流对场的影响, 以下采用了总压损失系数 C_{pt} 的定义方式^[1], 即:

$$C_{pt} = (p_0^* - p^*) / \frac{1}{2} \rho_{out} v_{out}^2$$

式中: p_0^* —进口总压; p^* —流场内各点总压; v_{out} 、 ρ_{out} —135%轴向弦长处平均出口气流速度和密度。

图4为沿栅距平均总压损失系数沿流向的分布。由图可以看出,由叶栅进口截面1至截面5,损失均较小。随着二次涡向下游发展过程中的不断壮大,当气流过叶栅喉口后强烈的扩张、损失的剧烈增加,可以看到截面6以后损失的剧烈增加,至叶栅出口截面10上,损失达到最大为0.09。

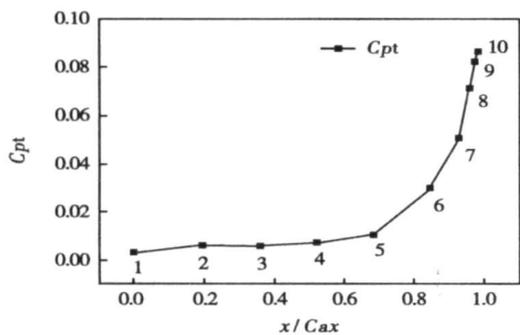


图4 叶栅总压损失沿流向分布

图5为不同横向测量截面平均总压损失系数沿叶高分布的计算结果。总体上沿栅距平均总压损失随流动方向逐渐增大,高损失区首先在近壁区产生,随流动向下游发展。由于在通道内叶高中部大部分区域具有较大的由吸力面向压力面的二次流速度,高损失区沿叶高方向扩大并最终向叶栅中部发展。

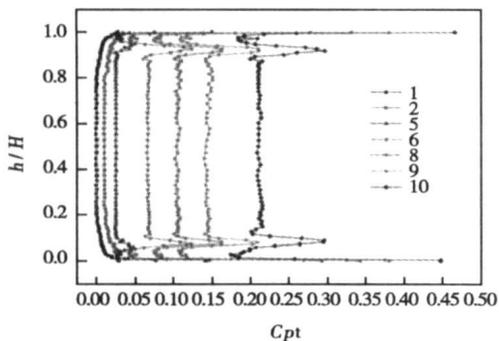


图5 不同测量截面平均总压损失系数沿叶高分布

图6为不同的截面沿栅距平均气流角沿叶高分布的计算结果。这里定义气流角为气流速度与叶栅周向的夹角。结果表明,沿流向气流角逐渐顺着叶

型转折。对于每一个截面,与中部叶高位置的气流角相比较,靠近端壁处气流具有过偏转和欠偏转的分布特点,并逐步向中部叶高发展。过偏转是近壁气流在端壁附近压力面与吸力面之间较大的压差下横向流动的结果,欠偏转是由于一部分主流被通道涡卷吸而产生由吸力面向压力面流动的速度分量,以及吸力面附近积聚的低能流体对主流的排挤所造成的。

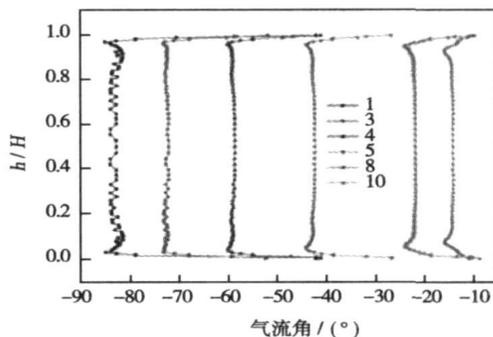


图6 不同测量截面平均气流角沿叶高分布

2.2 叶高对端壁二次流的影响

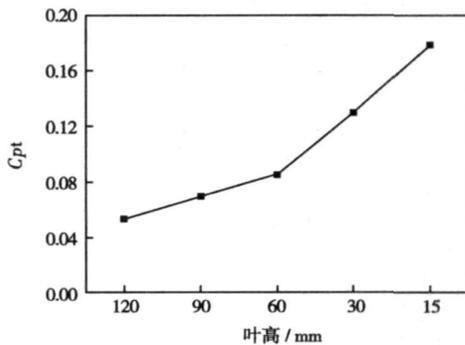


图7 不同叶高的总压损失系数

由文献[2~4]可知,影响端部二次流损失最主要的因素是叶片高度。为了比较,计算采用5种叶高:120、90、60、30和15mm。图7给出了5种叶高的总压损失系数,总体而言,总压损失系数随叶高的减小而增大。但初始叶高减小时(120、90和60mm),总压损失系数增加量与叶高减小量几乎成线性关系,且总压损失系数增加有限($\Delta C_{pt} < 0.03$),这是因为叶高减小所将导致二次涡所占区域成比例地扩大,但相对于整个流道而言二次涡区域仍比较小。随着叶高的进一步减小(60、30和15mm),总压损失系数迅速增大($\Delta C_{pt} > 0.10$),这是因为两端部的二次涡逐步向叶高

中部靠拢, 二次涡区域的扩张速度将超越叶高的减小速度, 导致二次流损失的迅速上升。

由计算可得, 初始叶高减小时 (120、90 和 60 mm) 喉口二次涡区域与端壁流线无显著变化, 限于篇幅, 因此仅绘出 60 mm 的喉口二次涡矢量和流线作为前 3 种叶高的代表。图 8 上半部示出了后 3 种叶高 (60、30 和 15 mm) 的叶栅喉口二次涡速度矢量, 可见在截面端壁靠近吸力面附近出现了明显的二次

流涡核, 且随着叶高的越小, 二次涡所占区域迅速增大。图 8 下半部为叶表极限流线图, 为表示端壁附近质点向叶高中部运动、端壁附面层沿流向逐渐增厚的趋势, 图中颜色标识了二次流矢量在叶高方向的投影; 颜色深浅代表投影矢量的数值大小, 颜色不同 (红、蓝) 代表投影矢量的方向相反。从流线上可以清晰地看出吸力面附近端壁附面层不断壮大, 并在后部卷起的现象。

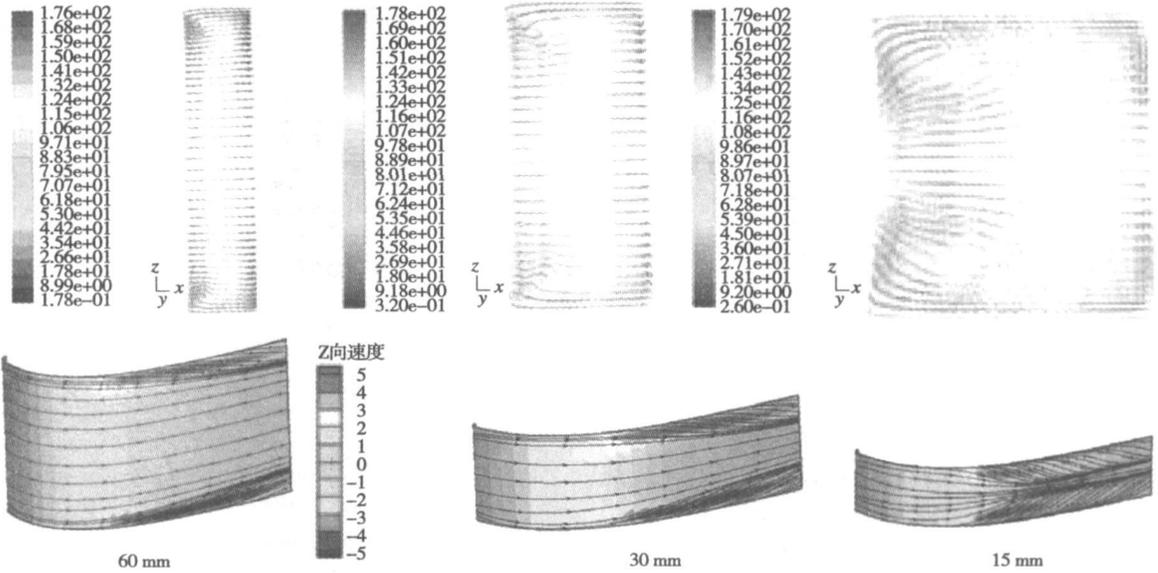


图 8 不同叶高的二次涡矢量及叶表流线图

2.3 攻角对端壁二次流的影响

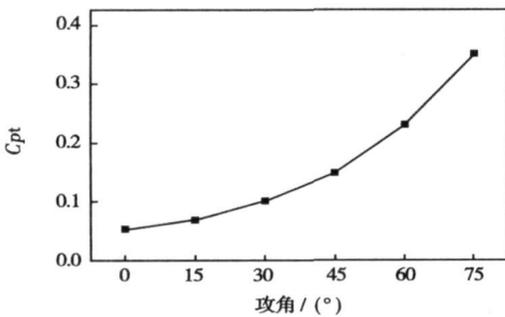


图 9 不同攻角的总压损失系数

由于研究的静叶叶型收缩比较大, 较小的攻角不会对其流动特性产生显著影响, 因此采用 5 种较大的攻角 15、30、45、60 和 75° 进行研究。图 9 示出了不同攻角的总压损失系数。从图中可以看出, 损失随攻角的不断增大而迅速增大。其本质是攻角的

增大会导致进口附面层厚度的急剧增大, 最终反映在叶栅流道中二次涡所占区域的扩大。

图 10 上半部为叶片压力面极限流线计算结果, 下半部为吸力面极限流线计算结果。可见叶片攻角对吸力面影响较大, 引起较大的分离区; 越大的攻角将导致叶栅端壁流线向叶高中部方向偏斜、弯曲的程度越大。

3 结 论

(1) 采用控制容积积分法和 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟存在复杂涡系的叶栅二次流是适用而有效的, 能够较准确地捕捉到叶栅内部的流场细节、二次流涡系的演变以及损失的产生和发展。

(2) 随着流体流动从叶栅前缘处向后发展, 叶面边界层的粘性作用逐渐加强, 由压力面向吸力面运动的二次流逐渐发展涡核继续向远离吸力面和端

壁的方向发展强度增加,使吸力面附面层骤然增厚,损失急剧增加,并引起沿叶高总压损失系数和沿叶高出口气流角的剧烈变化。

(3) 叶高的减小和正攻角的增大都会极大提高叶栅二次流损失,本质上均是二次流所占区域的扩大所引起。

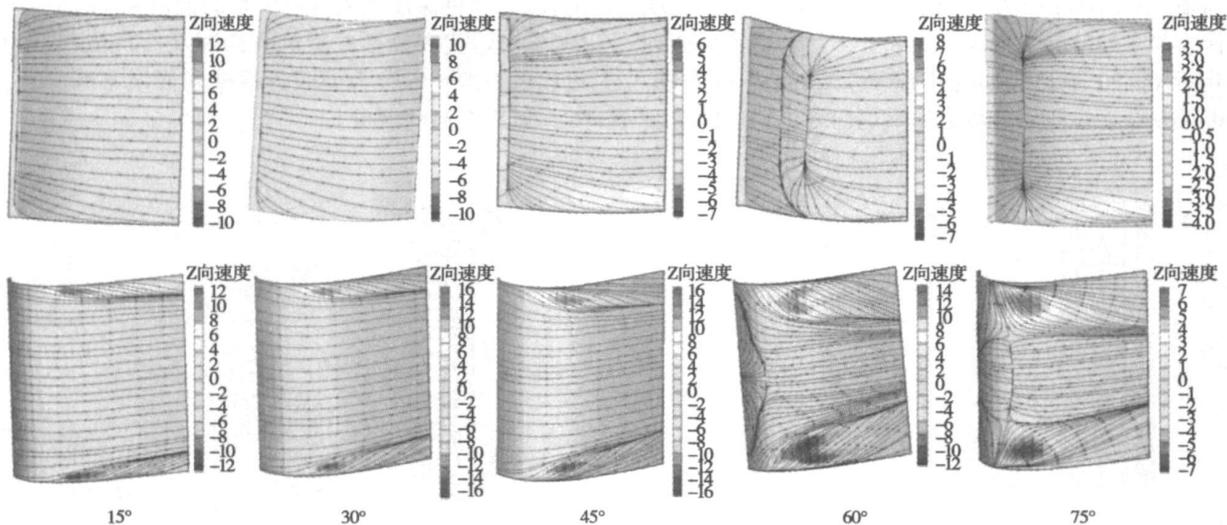


图 10 正攻角对叶表极限流线的影 响

(4) 为了改善低展弦比叶栅设计工况与变工况的气动性能,在设计透平级时应当考虑到二次流引起的出口气流角沿叶高的变化,合理控制二次流的产生和发展,否则会使叶片轮周功及级效率大幅度下降。

参考文献:

[1] YAMAMOTO. Production and development of secondary flows and loss-

es within two types of straight turbine cascade [J] . ASME Journal of Turbomachinery, 1987, 109(4): 194-200.

[2] SCHULTE, HODSON. Unsteady wake induced boundary layer transition in high lift LP turbine[J] . ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120, 28-35.

[3] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A. A new k- eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows model development and validation[J] . Computers Fluids, 1995, 243; 227-238.

[4] 翁史烈. 燃气轮机[M] . 上海: 机械工业出版社, 1989.

新 涂 层

合金元素对叶片保护涂层耐蚀性的影响

据《Теплоэне Р етика》2007 年 2 月 号报道,俄罗斯 ЦКТИ(中央锅炉 涡轮机研究所)研究了 CoNiCrAlY 系合金元素对燃气轮机叶片保护涂层合金耐蚀性的影响。

为了防止燃气轮机叶片的 硫化物和氧化物 腐蚀,广泛应用 CoNiCrAlY 系涂层。与在燃气轮机制造中广泛应用的 CoCrAlY 涂层比较,CoNiCrAlY 涂层具有明显的优点: 更高的热稳定性、热疲劳强度和对底层(镍合金-叶片材料)的粘附力; 更低的塑性过渡温度和低的钴含量。

列出了 CoNiCrAlY 系保护涂层合金模型耐硫化物及氧化物腐蚀试验的结果。确定了在各种温度下 Ni、Cr、Al 和 Y 对这些涂层耐蚀性的影响并得到了用于计算这些涂层铬当量的方程式。

(吉桂明 供稿)

process, Numeca/design 3D software was used. By an optimized joint employment of an artificial neural network and a genetic algorithm, the general performance can be enhanced by way of an increase in localized performance. The flow field thus involved was calculated by seeking a solution for the full three-dimensional viscous flow N-S equation. Moreover, the authors have verified the feasibility of the method under discussion with a three-stage turbine and a four-stage one serving as examples. **Key words:** turbo-machinery, multi-stage turbine, aerodynamic optimization design, quasi three-dimensional design, design flow path, genetic algorithm, artificial neural network

涡轮静叶栅二次流的数值模拟 = A Study of the Numerical Simulation of Secondary Flows in Turbine Stator Cascades [刊, 汉] / LI Jun, SU Ming (Education Ministry Key Laboratory on Turbo-machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 16 ~ 20

By adopting CFD (computational fluid dynamics) Software Fluent a numerical solution for the three-dimensional flows in turbine stator cascades featuring a big turning angle has been achieved. The secondary flows along the flow direction on various sections of the cascade and its aerodynamic characteristics were analyzed along with an investigation of the influence of any change in blade height and inlet incidence on cascade secondary flows. It has been found from the calculation results that the intensity of the secondary flows, which move from the cascade pressure surface to the suction one, increases gradually along the flow direction, giving rise to the continuous consolidation of the boundary layer on endwall near the suction surface and also a curling-up at the rear portion. Moreover, the foregoing also has led to a drastic change of the total pressure loss coefficient and the outlet flow angle along the blade height. A comparison of the various cascade operating conditions shows that a decrease of blade height and an increase of incidence will drastically increase the cascade secondary-flow losses, the intrinsic cause of which invariably lies in the expansion of the area occupied by the secondary flows in the cascade passage. **Key words:** secondary flow, turbine, stator cascade, numerical simulation

转子物性对超临界汽轮机启动热应力的影响 = The Influence of Rotor Physical Property on Thermal Stresses in a Supercritical Steam Turbine during its Startup [刊, 汉] / LIU Yan-feng, HAO Run-tian, GAO Jian-qiang, et al (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 21 ~ 23

In most cases steam turbine rotors are made of 30CrMoV low carbon alloy steel, the physical property parameters of which change significantly with temperature. The model established for calculating rotor thermal stresses has taken into account the influence of the temperature-dependent change of rotor-material physical property. Through a simulation test, analyzed was the variation tendency of rotor thermal stresses in a domestically-made 600 MW supercritical steam turbine under the following four start-up operating conditions, namely, cold-state, warm-state, hot-state and extremely-hot-state. Moreover, the tendency in question was compared with that obtained from a thermal-stress model featuring a rotor of constant physical property. It has been shown that the change of rotor material physical parameters with temperature will significantly influence the magnitude of the start-up thermal stresses. The above finding can provide a helpful reference for enhancing the calculation accuracy of an on-line monitoring model involving turbine-rotor thermal stresses. **Key words:** steam turbine rotor, physical property, thermal stress, model

凝汽器运行状态的物元模型及可拓评价方法 = An Object-element Model for Depicting the Operating States of a Condenser and its Extensible Evaluation Method [刊, 汉] / LU Xu-xiang, LI Lu-ping (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 24 ~ 27

On the basis of establishing indexes for evaluation of the operating states of condensers, presented was an extensible method for the above evaluation in the light of diversity and fuzziness of the evaluation indexes. The proposed method was based on an object-element model and extensible correlation functions. In combination with currently available literature