

蒸汽轮机末级静叶沟槽除湿方法的数值模拟

徐 亮, 颜培刚, 黄洪雁, 韩万金

(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:在某蒸汽轮机末级静叶叶栅压力面中后部表面上设置了“后仰”的除湿沟槽, 通过全三维两相流动数值模拟, 探讨了该除湿沟槽的除湿机理。数值计算结果表明, 设计的除湿沟槽能在槽道内建立起沿叶高方向的负压力梯度, 正是因这种压力分布使槽道内的流体具有向上运动的能力, 这样便于沟槽内的液体水向叶片顶部端壁汇聚, 进而排流出叶栅流道。计算结果还表明, 该除湿沟槽对蒸汽流道的流动参数(压力和干度等)分布几乎没有形成影响。

关 键 词: 除湿沟槽; 静叶片; 湿蒸气; 两相流动

中图分类号: TM623.94 文献标识码: A

引 言

在汽轮机叶栅流道内, 水的形态主要有: 一次水滴、二次水滴、液膜和水流。自发凝结形成的初始水滴是极小的水分子簇(一次水滴), 作为凝结核在以后的膨胀过程中不断吸附水分子, 水滴也不断长大。对于一次水滴, 由于直径小, 其汽流跟随性较好。一次水滴在汽流通道内流动时, 有部分水滴接触到静叶、动叶或汽缸壁的壁面而附着在其上形成水膜。静叶片表面的水膜在汽流的带动下低速流向出汽边, 在出汽边, 水膜被壁面附近的低速汽流撕裂成尺寸较大的水滴, 再被流道内高速汽流碎裂成二次水滴^[1~2]。因此, 控制叶片表面、端壁壁面的水膜流动, 如果可能的话将叶栅流道壁面的液膜导出叶栅流道, 对减少二次水滴的形成量, 提高汽流流动效率和机组运行的安全性具有十分重要的意义。

国内外相关专家都在积极开展汽轮机中除湿方法的研究, 俄罗斯勃良斯克运输机械制造学院 P. M. Блоник 对通过导叶空腔将水膜抽吸出流动区域的方法进行了研究, 其结果表明: 内弧表面距出汽边不远处开设缝隙会有较好的效果^[3]。哈尔滨汽轮机厂对核电汽轮机静叶的各种除湿沟槽的形状及结构

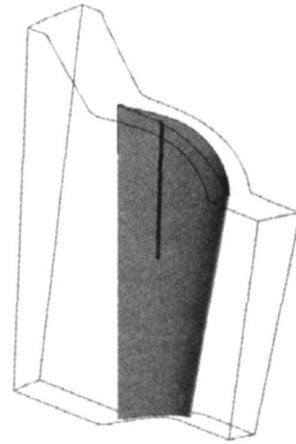


图 1 具有除湿沟槽的叶栅

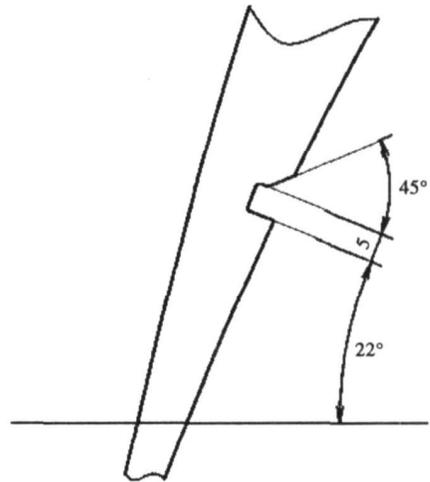


图 2 去湿沟槽结构放大图(mm)

进行了比较详细的试验研究, 指出平缓的带过渡圆角的进口边可以提高去水效率, 在满足强度和刚度的情况下, 除湿沟槽宽度应在 3.3~5.5 mm 范围之

内^[4]。国内俞茂铮教授在 20 世纪 80 年代就开始对湿蒸气汽轮机的除湿进行研究,取得不少成果^[5]。另外王新军等人对静叶的抽吸缝做过比较深入的研究^[6]。本文对某蒸汽轮机的末级,在静叶内弧中后部设计“后仰”除湿沟槽,如图 1 和图 2 所示,研究其对蒸汽流场的影响及除湿机理。

1 计算方法及网格

对具有除湿沟槽的叶型和不带沟槽的原型用 CFX 软件进行了全三维汽液两相流体定常模拟计算。采用参数为:静叶片数 54 个,进口总压 31.171 kPa,总温 343.45 K,进口气流角 90°,静叶进口时湿蒸气的干度为 0.93;出口背压 17.200 kPa。数值计算方程采用欧拉均相流体方程,湍流模型采用标准的 $\kappa-\epsilon$ 模型加壁面函数方法。采用的工质为水蒸气,用 Vukalovich Virial 模型对过热蒸汽进行插值计算,状态方程采用如下经验式:

$$p = \rho RT (B_1 + B_2 \rho + B_3 \rho^2 + B_4 \rho^3) \quad (1)$$

式(1)适用范围为:压力 1 ~ 10 000 kPa,温度 273.15 ~ 1 000 K。

在平衡相变化的计算过程中,采用了均质两相混合模型,气相质量比例按下式计算:

$$x = \frac{h - h_{sat,l}(p)}{h_{sat,v} - h_{sat,l}(p)} \quad (2)$$

式中: h —静焓; $h_{sat,v}$ 、 $h_{sat,l}$ —气相和液相的饱和焓,为压力的函数。因此,当 $x < 0$ 时,混合物为 100% 液体;当 $x > 1$ 时,混合物为 100% 过热蒸汽;当 $0 < x < 1$ 时,混合物为湿蒸气,其属性参数 ϕ :

$$\phi_{mix}(p) = (1-x)\phi_{sat,l}(p) + x\phi_{sat,v}(p) \quad (3)$$

均匀介质动量控制方程:

模型假定: $U_\alpha = U$, $1 \leq \alpha \leq N_p$, 因此动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \mu((\nabla U) + (\nabla U)^T) = S_M - \nabla p \quad (4)$$

式中: $\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha$, $\mu = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \mu_\alpha$

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = S_{MS_\alpha} + \sum_{\beta=1}^N \Gamma_{\alpha\beta} \quad (5)$$

式中: S_{MS_α} —质量源相。

体积守恒方程:

$$\sum_{\alpha=1}^N r_\alpha = 1 \quad (6)$$

压力约束方程:

需要求解的方程数目为 $5N_p$ 个,未知变量为 $U_\alpha, V_\alpha, W_\alpha, r_\alpha, P_\alpha$ 。上述已知方程总数为 $4N_p + 1$ 个,还需要 $N_p - 1$ 个方程来封闭方程组,可以通过对所有相介质赋予同样的压力值,即给定压力约束:

$$p_\alpha = p, \alpha = 1, N_p \quad (7)$$

计算时的网格流道进出口采用 H 型网格,叶片周围区域为 O 型网格,其网格点数为 47 万,图 3 ~ 图 5 给出了具有除湿沟槽的叶栅流道网格及除湿沟槽的局部网格细节。

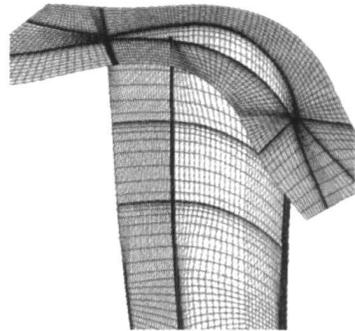


图 3 顶部附近的网格结构

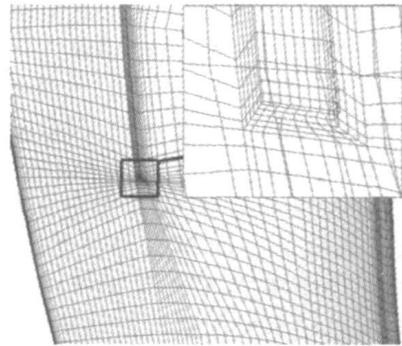


图 4 除湿沟槽附近的网格结构

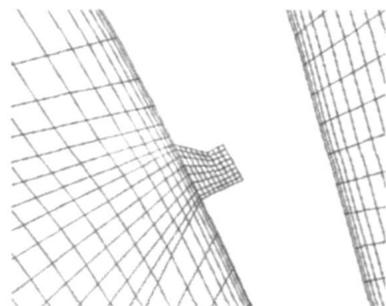


图 5 除湿沟槽内网格分布

2 计算结果及分析

采用的某蒸汽轮机末级原型实际运行时的流量为 347.68 t/h, 即单个静叶叶栅流道的流量为 1.788 5 kg/s, 数值收敛(速度与压力残差都在 $1e-6$ 以下, 其残差曲线呈小波动的水平直线)结果时原型和带除湿沟槽的单个静叶叶栅流道的流量分别为 1.791 79 kg/s 和 1.784 2 kg/s, 与实际流量相差分别为 1.84% 和 2.4%, 可见相差很小, 说明此数值计算结果是可靠的。

2.1 叶栅流道流场结果分析

图 6 给出了 10%、50% 和 90% 叶高位置压力沿叶型的分布, 其中: 横坐标为相对轴向弦长, 纵坐标为以前缘处最高压力作为参考压力的无量纲压力。从压力分布特点可以看出(在 50% 叶高处), 气流流过叶栅流道, 总的来说, 压力降低, 速度增加, 叶型型线具有明显的后加载特征。在压力面和吸力面, 由于气流所绕流壁面曲率的不同, 流动出现明显差异。在吸力侧, 叶栅固体壁面曲率较大, 气流在接触叶栅前缘后迅速加速, 压力降低得比较快, 在吸力侧出口稍后的位置压力达到最低, 速度最高。

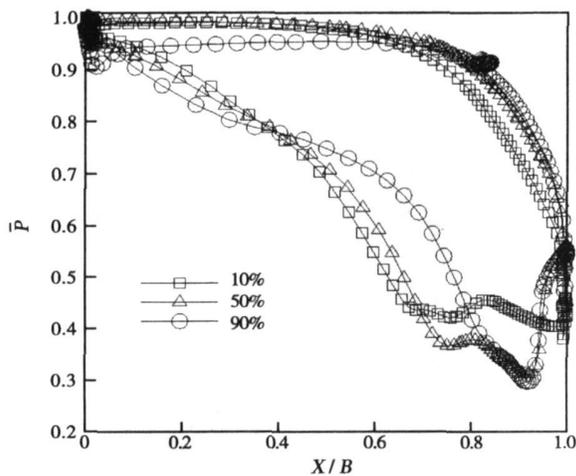


图 6 静叶压力沿叶型的分布

从图 7 和图 8 看出叶栅流道压力最低的位置基本上也是蒸汽湿度最大的位置, 这一位置气体的干度较低。在 90% 这一叶高处, 叶栅载荷略微前移, 叶栅中后部的相对载荷与中部相比较而言有所降低。但是 S1 流面上的压力及湿度的分布特点与 50% 叶高很类似, 除湿沟槽的出现对流道内压力及

干度的分布没有形成明显的影响, 如图 9 和图 10 所示。

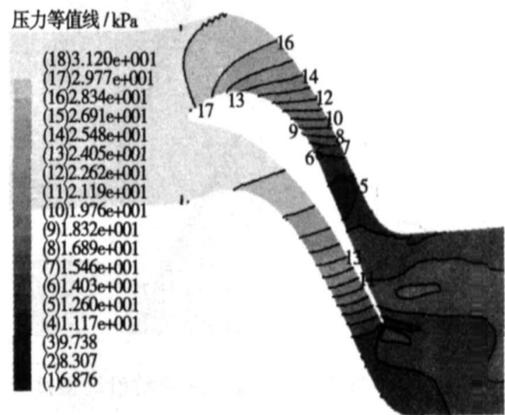


图 7 50% 叶高静压分布

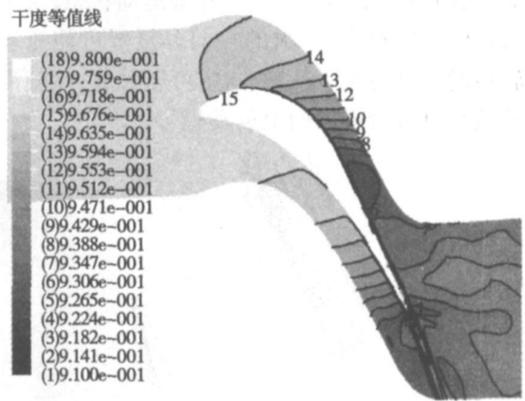


图 8 50% 叶高干度分布

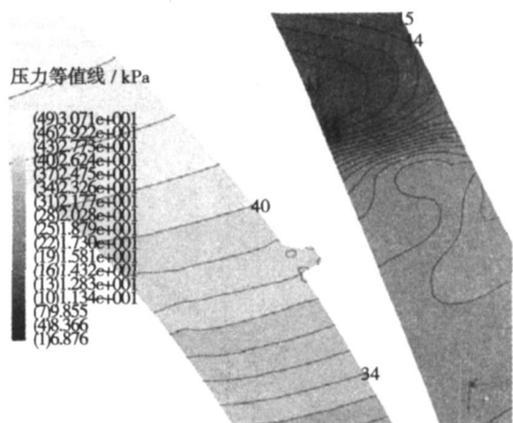


图 9 90% 叶高拟 S1 流面除湿沟槽附近压力分布

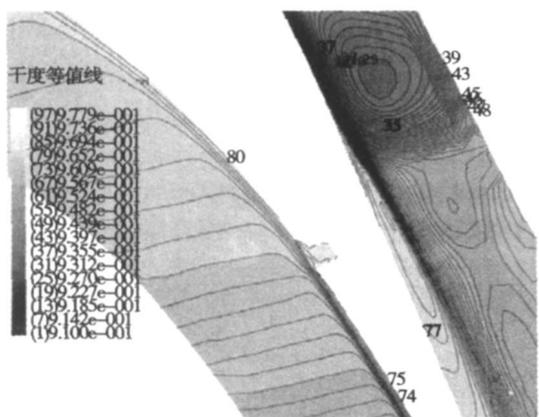


图 10 90%叶高拟 S1 流面除湿沟槽附近湿度分布

2.2 除湿沟槽内的流场结果分析

图 11 给出了除湿沟槽内及其附近区域速度矢量分布。在外部汽流的带动下，除湿沟槽内的流动在 S1 流面内的投影矢量呈现螺旋运动状态，由于壁面附近的速度较小，不大的径向分量即可使流动呈现较强的三维特性。从图(c)中可以看出，除湿沟槽内的流动具有较强的向上运动趋势。

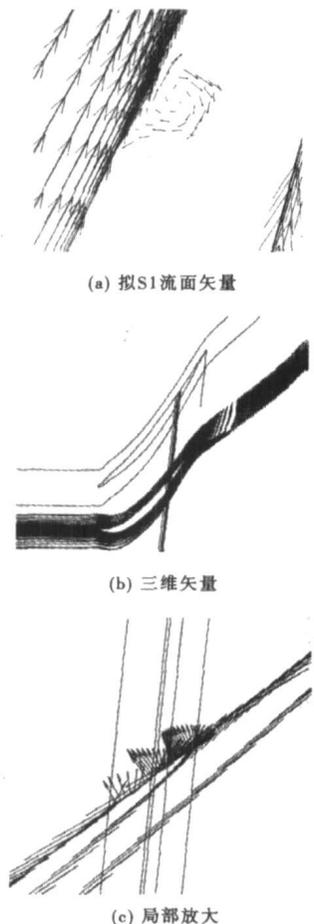


图 11 除湿沟槽内及其附近区域速度矢量分布

开设除湿沟槽道时，除湿沟槽道径向母线的选取几乎平行于叶栅的叶型母线。本算例中静叶叶栅采用尾缘积叠方式，因而叶片表面的沟槽具有后仰的特点。从图 12 中可以看出，沟槽的径向母线几乎与压力等值线平行，不过还是沿叶高方向以很小斜角穿过了压力等值线。沟槽内及其附近的压力等值线分布，从沟槽右侧的压力等值线分布可以推断出在沟槽内沿叶高出现了负的压力梯度，如图中斜向上的线条 A 所示。这一负的压力梯度是除湿沟槽内液体出现指向上部流动的主要驱动力。

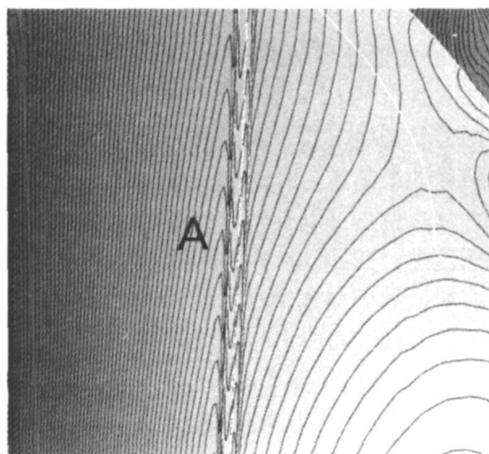


图 12 壁面及槽道内压力等值线分布

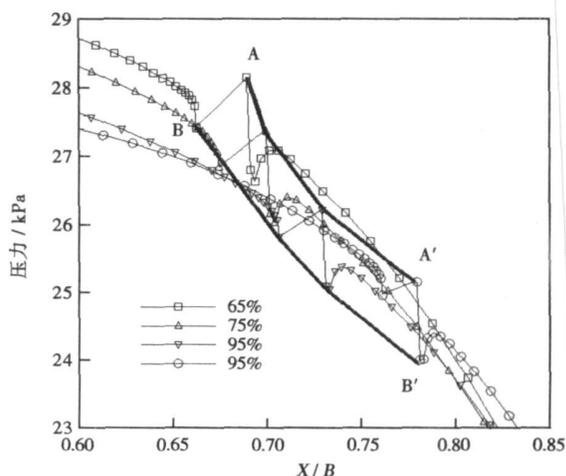


图 13 除湿沟槽附近壁面上的压力分布

图 13 给出了除湿沟槽附近壁面上的压力分布。AA'和 BB'连线分别表示不同叶高除湿沟槽道底部两个顶点上的压力值，由此可以看出，随着高度的增加，除湿沟槽道内的压力是逐渐降低的，进一步证明

了图 12 得到除湿沟槽道内沿叶高出现了负的压力梯度这一结论。从图 13 中还可以看出, 如果除湿沟槽道的后仰趋势进一步增强, 则这一负压力梯度的绝对值将有增加趋势。

显然, 除湿沟槽道内建立起来的沿叶高方向负的压力梯度, 是上部除湿沟槽设计的关键, 它的存在使槽道内的流体具有向上运动的能力。这一压力梯度的建立, 可以有很多种方法来实现: 利用不同叶高下流体膨胀先后不一致自然形成的径向梯度; 在除湿沟槽顶部设置低压条件; 采用“后仰”的除湿沟槽道等。考虑到液滴撞击到压力面上形成水膜, 压力面的后部是水滴收集得比较多的区域, 除湿沟槽应该开设在后部区域, 兼顾到利用不同叶高下流体膨胀先后不一致自然形成的径向梯度, 而压力面上汽体压力的降低又发生在中后部, 因此除湿沟槽中部开设位置的选取设置在压力面上压力发生迅速降低的位置或稍后的位置都可以, 其它径向位置在考虑到需要多大的槽道径向负压力梯度后, 参考压力沿叶型的分布选择即可。

3 结 论

(1) 宽度设计为 5 mm 的沟槽, 能有效地阻断压力面上的水膜向出汽边运动, 这样沟槽前叶片表面上的液体水几乎全部流入沟槽。通过计算, 此结构的开设对叶栅流道内的汽动参数(静压力和干度等)分布影响甚微。

(2) 采用结构合理的“后仰”除湿沟槽, 能在槽道内建立起沿叶高方向的负压力梯度, 它使槽道内的流体具有向上运动的能力, 便于沟槽内的液体水向叶顶汇集, 进而排流出叶栅流道。如果计算时在除湿沟槽顶部端壁处给定抽吸出口边界条件, 那么利用除湿沟槽对湿度区域的抽吸, 再加上槽道内指向叶顶方向的负压力梯度对沟槽内流体的驱动, 在这两方面的共同作用下, 会模拟出更好的向上除湿效果。

(3) 为了收集更多的水量, 并兼顾到静叶叶栅流道内湿蒸气流动的特点, 除湿沟槽的合理位置应选择压力面的中后部。

参考文献:

- [1] MOORE M J, SIEVERDING C H. Aerothermodynamics of low pressure steam turbines and Condensers[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1987.
- [2] MOORE M J, SIEVERDING C H. Two-phase steam flow in turbines and separators[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- [3] 刘建成, 林志鸿, 闻雪友, 等. 汽轮机内部除湿技术的发展[J]. 热能动力工程, 2005, 20(1): 1-5.
- [4] 王洪鹏, 韩丽丽, 何成君. 核电汽轮机静叶除湿沟槽结构研究[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(5): 361-363.
- [5] 俞茂铮, 黄 跃. 汽轮机末级隔板中的水分沉积规律及除湿方法[J]. 汽轮机技术, 1988, 5(10): 44-50.
- [6] 王新军, 高铁瑜, 徐廷相. 汽轮机空心静叶去湿缝隙结构的研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(1): 14-17.

(编辑 伟)

理论研究

级间喷水对燃气轮机影响的数值模拟

《ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power》2008 年 1 月号报道了意大利博洛尼亚市 DIEM 大学的学者使用自己以 FORTRAN 90 语言编写的计算代码, 通过气动热力学的模拟研究了级间喷水对 GE 7EA 型燃气轮机性能的影响。

计算程序考虑了喷入的水在压气机内蒸发, 包括水滴动态特性的影响, 这些考虑是必要的, 以便充分估计湿压缩对燃气轮机性能的影响。

通过计算在有入口蒸发成雾、过度喷射成雾和级间喷水情况下逐级的压气机性能和整个燃气轮机的性能, 证明了这个计算代码的可靠性。

提供的结果表明, 喷水的位置将影响压气机级负荷的重新分布。

对观察到的各种性能参数变化的趋势作了解释。

(吉桂明 供稿)

我国煤燃烧研究发展现状与趋势= **Status Quo of the Study on the Development of Coal Combustion in China and its Development Trend**[刊, 汉] / SUI Jian-cai, DU Yun-gui (College of Resources and Environment, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044), LIU Yi (China Power Investment Corporation Yuanda Environment Protection Engineering Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 400060), XU Ming-hou (National Key Laboratory on Coal Combustion, HuaZhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 111 ~ 116

First, the authors have made an in-depth analysis of the status quo of the study on coal combustion both at home and abroad and its development trend. It is noted that the two major problems, namely, a low efficiency and heavy pollution during coal combustion, are the key factors limiting the sustainable economic and social development of China with the near-term research direction and main tasks of China in this field being pinpointed. Moreover, the authors also hold that to actively conduct a wide spectrum of research covering a variety of topics is of the utmost strategic significance for China. They include: the development of clean combustion of coal, environment-friendly multiple cogeneration-based resource utilization, coal combustion near-zero emission technology, the generation, migration and control of pollutants during energy source utilization, the efficient and clean utilization of new and low-grade energy sources, as well as research concerning monitoring, diagnosis and control of thermal-energy transformation systems, etc. **Key words:** coal combustion, pollution, development trend

蒸汽轮机末级静叶沟槽除湿方法的数值模拟= **A Numerical Simulation of the Moisture-removal Method for the Last-stage Stationary-blade Groove of Steam Turbines**[刊, 汉] / XU Liang, YAN Pei-gang, HUANG Hong-yan, et al (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 117 ~ 121

With “rear-upward” moisture-removal grooves being provided on the middle-rear portion of stationary-blade cascade-pressure surfaces in the last stage of a steam turbine and through a full three-dimensional numerical simulation of two-phase flows, explored and investigated was the moisture-removal mechanism of the grooves in question. The numerical calculation results show that the moisture-removal grooves thus designed can create a negative pressure gradient inside the grooves along the blade height. It is precisely such a pressure distribution that enables the liquid in the grooves to secure an ability to move upward and facilitate an accumulation of the liquid water at the end wall of the blades, thereby discharging it from the cascade flow passages. The calculation results also show that the moisture-removal grooves exercise almost no influence on the distribution of aerodynamic parameters (pressure and dryness, etc.) along the steam flow passages. **Key words:** moisture-removal groove, stationary blade, wet steam, two-phase flow

基于支持向量回归的大容量机组主蒸汽流量建模= **A Modeling of the Main Steam Flow Rate of a High-power Steam Turbine Based on a Support Vector Regression**[刊, 汉] / ZHOU Jian-xin, WANG Lei, WU Hai-ji, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 122 ~ 126

A theory for the calculation of the main steam flow rate of a high power steam turbine unit was analyzed, and the disadvantage of routine calculation models based on the pressure after the regulating stage, pinpointed. On this basis, introduced were a vector-supported regression calculation model and its parameter selection. The model in question was used for a modeling calculation of the main steam flow rate of a 300 MW steam turbine unit, and simultaneously put in contrast with