

# 凝汽器水侧流动的三维数值模拟

蒋建飞<sup>1</sup>, 黄树红<sup>2</sup>, 王 坤<sup>2</sup>, 高 伟<sup>2</sup>

(1. 平顶山工学院 建筑环境与热能工程系, 河南 平顶山 467044; 2 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 建立了某一凝汽器实际管束的流动计算模型, 运用计算流体力学的方法, 对该凝汽器水侧流场进行了三维数值模拟。采用分区对称计算方法, 大大降低网格数量, 从而详细预测了凝汽器水侧进出口水室以及其连接管和冷却水管束内的流动特性。计算结果可以清楚地表明: 该凝汽器进口水室存在大量漩涡, 使流动阻力增加, 流动恶化; 水室速度分布不均匀, 进口水室管板中心区域流体流速较高而边缘区域较低, 结构上存在一定问题; 而出口水室的结构较为合理。这与采用多孔介质模型模拟的结论一致, 进一步验证了采用多孔介质模型对凝汽器进行计算是正确可行的。计算结果同时表明, 冷却水管束内流量和流速的分布是不均匀的, 位于中心位置的冷却水管流量较大, 而周边区域较小, 最大流量差别可达到 38%, 且相邻管路的流量减小幅度与冷却水管布置有关。冷却水管内冷却水流量和流速的差异将会影响换热器的换热性能。计算结果可为分析研究管排流动不均而引起的换热效率问题提供条件, 也可为凝汽器设计和结构优化提供依据。

**关 键 词:** 凝汽器; 水侧; 流动特性; 数值模拟

中图分类号: TK264.1 文献标识码: A

## 引 言

凝汽器是一种管壳式换热器。详细了解换热器内部流场有助于设计开发可靠和高效率的设备。长期以来, 人们比较多地注重对汽侧(壳侧)的研究, 分析工质流动特性, 以提高换热器的效率和进行高效换热器的设计。而对于水侧(管侧)而言, 其进口管箱内的流场关系到管束的速度分布, 出口管箱内的流场影响到出口管道中的速度场, 故水侧流体流动特性也对换热效率有重要影响。研究凝汽器水侧流动, 对其效率和运行安全性有很现实的意义。

凝汽器进口水室的结构形状, 对水侧的流动特性和冷却水管内的流量分配的影响至关重要。水室应该具有良好的流动特性, 尽可能减少冷却水流压力损失, 减少涡流现象, 到达管板表面的冷却水流量尽量均匀。不同结构水室的流动特性, 过去是无法通过理论计算得知的, 通常通过水室模型试验得出

定量的近似结论<sup>[1]</sup>。文献[1]介绍了 600 MW 汽轮机的单流程凝汽器流动特性试验, 主要比较圆弧形水室和斜板形水室的流动特性。水室模型按照 1:5 缩小比例设计, 两块管板之间夹入不同目数和层数的铜丝网, 用于模拟冷却水流过不同长度冷却水管的摩擦阻力。

实验方法具有直观、真实、可靠的特点, 但也存在着很大的不足和弊端, 如实验耗资大, 周期长, 而且不能够预测凝汽器管侧详细的流动特性, 只是给出整体的压降等。随着计算机技术的提高以及计算流体力学和数值传热学的蓬勃发展, 数值模拟方法已成为研究凝汽器管侧流动的一种重要手段。

对于凝汽器水侧的数值模拟, 很少见到相关文献。凝汽器水侧流道中存在成千上万根冷却水管, 如果对管排进行精确建模, 将导致计算网格数量巨大, 往往超出一台计算机的计算能力。文献[2]中采用多孔介质模型, 较好地模拟了凝汽器水侧的流动特性。但是由于多孔介质模型忽略了流动区域的具体几何结构, 与凝汽器水室中的实际流动有一些差别。另外, 采用多孔介质模型将流体在众多冷却水管中的流动简化为在多孔介质中的流动, 无法精确得到不同位置的冷却水管束进口速度分布和流量分布。

本文采用三维数值计算方法, 精确建立某船用凝汽器实际管排模型, 模拟其水侧的流动特性。重点研究了进出口水室流体的流动, 得出其速度压力分布和冷却水管束内的速度分布和流量分布情况, 为进一步优化凝汽器设计提供参考。

## 1 数值计算模型

### 1.1 模拟对象

模拟对象为船用动力装置中的单流程凝汽器。进出口水室呈半球形结构, 几何模型如图 1 所示。管板上冷却水管路采用对称布置, 在垂直截面上管束没有布置到边缘, 在水平截面上管束一直布置到边缘, 如图 2 所示。

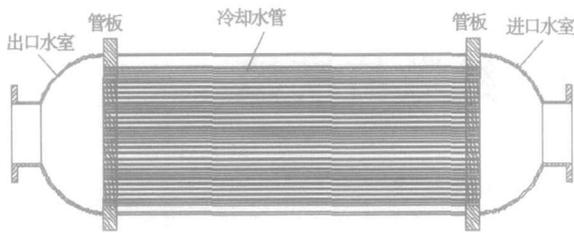


图 1 凝汽器结构示意图

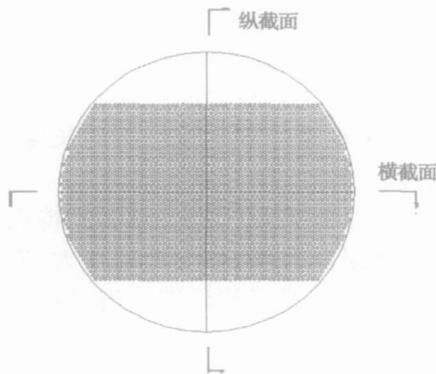


图 2 管板上冷却水管路布置图

### 1.2 计算区域

图 1 所示的凝汽器中存在几千根冷却水管, 其管径与长度相比非常小, 而 CFD 计算网格数量取决于模型的最小结构尺度。因此, 很难对凝汽器进行精确管排网格建模。即使考虑对称结构, 取 1/4 区域进行模拟, 网格数量仍无法控制在目前的计算能力范围内, 因此提出了分区计算的思路。

由于冷却水管路相对较长, 管内的流动经过一定的距离后达到充分发展。计算研究表明<sup>[3]</sup>, 对于该凝汽器的冷却水管, 在深入管内达到管径的 40 倍长度处, 流动达到充分发展。因此, 可将整个凝汽器分为 3 个部分: 进口区域, 包括进口水室及 40 倍管径的冷却水管束长度; 出口区域, 包括 40 倍管径长度的冷却水管束和出口水室及其接管; 中间区域, 包括冷却水管束的中间部分, 认为其流动已经达到充分发展, 其流动特性与进口区域冷却水管末端相同。

由此, 实际的数值模拟要计算进口区域和出口区域。另外, 如图 2 所示, 冷却水管束为对称布置, 取 1/4 区域进行计算即可。为模拟实际凝汽器循环冷却水进出边界条件, 将凝汽器计算模型进出口接管分别延长 2 倍管径和 5 倍管径长度, 并保证流动完全扩展。其几何模型与网格方案如图 3 和图 4 所示, 图中前后接管未全部显示。

格, 水室及前后接管用四面体网格。对水室与冷却水管路的接口过渡部位进行网格局部加密。进口区域网格数量为 230 万, 出口区域 233 万。

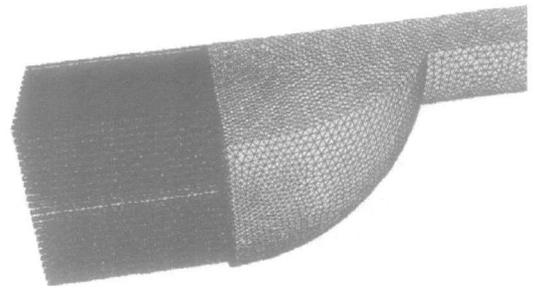


图 3 进口区域计算网格方案

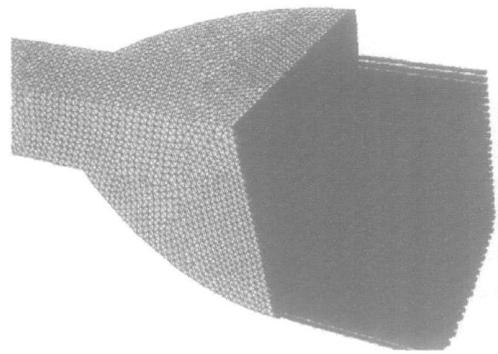


图 4 出口区域计算网格方案

### 1.3 边界条件

进口区域计算模型的边界条件取速度进口条件和压力出口条件。

将进口区域计算结果中, 冷却水管束离末端 50 mm 处截面的速度分布, 作为出口区域计算模型的进口边界条件, 出口边界条件为压力出口条件。

凝汽器的横向、纵向对称面定义为完全对称边界。

计算中选取标准  $k-\epsilon$  两方程湍流模型, 计算方法采用 Segregate 分离式方法, 湍流动能、湍流耗散项、动量方程的对流项都采用二阶迎风格式离散; 用 Simple 算法求解压力和速度的耦合关系; 壁面采用无滑移边界条件, 标准壁面函数。

## 2 计算结果和分析

### 2.1 进口区域

当凝汽器入口流速边界条件为 2 m/s 时, 从计算所得的速度分布云图(如图 5 和图 6 所示)可以看出(右侧为进口), 当流体由凝汽器进水管口进入进口水室时, 过流断面突然扩大, 由于流体有惯性, 不

能依照管道的形状突然扩展到整个截面上, 而是有一个渐扩的过程, 从而在进口水室的边壁处产生大量漩涡, 形成低压的漩涡区。

管板壁上布置了数量众多的冷却水管作为流道。流体直接冲刷到管板中心部分, 部分流体进入中间冷却水管内, 另一部分流体被管板壁面阻挡, 流体的动能转化为压力能形成高压区, 流体向周围的低压区扩散。在管板与凝汽器壳体连接的边缘区域, 没有流体直接冲刷。对于水平截面, 由于管束一直布置到边缘, 中心区域流体向周围低压区域持续扩散, 从而压缩水室的涡流, 使得涡流尺度减小, 如图 5 所示。对于垂直截面, 由于管束没有一直布置到边缘, 流体扩散受到阻滞, 涡流尺度较大, 如图 6 所示。

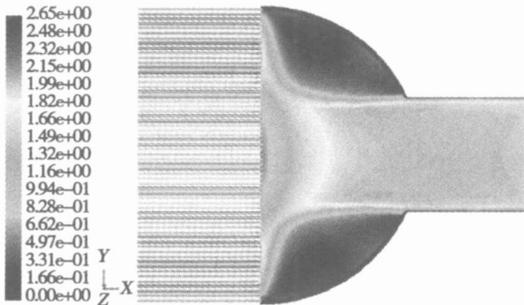


图 5 进口水室水平截面速度分布

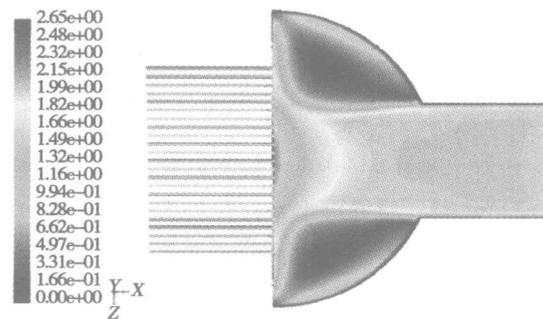


图 6 进口水室垂直截面速度分布

图 7 为冷却水管束中的流量分布, 横坐标为该管口距离水室管板中心的垂直距离。由图可见, 越靠近管板中心区域的冷却水管, 其流量越大, 中心区域为  $0.29 \text{ kg/s}$ 。随着位置偏离中心, 管内流量下降。对于横向截面, 边缘区域流量降为  $0.21 \text{ kg/s}$ 。对于纵向截面, 管内流量沿直径方向速度下降较快, 其边缘位置的冷却水进口截面流量也为  $0.21 \text{ kg/s}$ 。管内流量差别最大达到  $38\%$ 。

区域, 速度较大, 边缘区域速度较小。

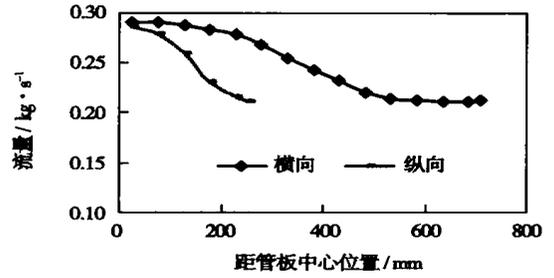


图 7 不同位置冷却水管流量分布

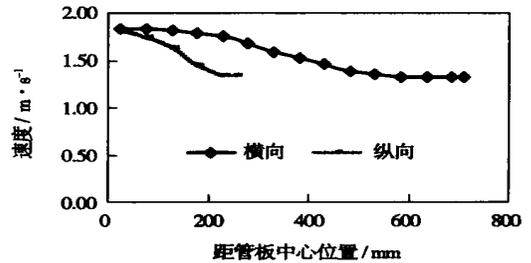


图 8 不同位置冷却水管速度分布

由此可见, 冷却水管内流量不仅与其位置有关, 而且与管路的布置方式有关, 并且相邻管路间的流量的变化幅度与该方向上管路布置数量有关。

计算表明, 该凝汽器进口水室存在大量漩涡, 冷却水管束入口的速度分布和流量分布存在较大的不均匀, 这样使得边缘区域的冷却水管路内冷却水流量较小, 影响凝汽器整体的换热效率。同时, 由于中心区域管口的速度较高且有横向流动存在, 使得中心区域的冷却水管口长时间受到高速流体的冲刷, 对管口的密封性不利, 对于胀管连接的凝汽器, 极易影响设备的运行安全。

显然, 如果在结构设计中进行优化, 并加装导流装置分散高速流体, 使得进入各冷却水管的流量分布和速度分布尽可能均匀, 有利于提高整个凝汽器的换热效率。

## 2.2 出口区域

当冷却水管路内的流体汇流到凝汽器出口水室时, 通流面积瞬间扩大, 流体流速降低, 流体向周围扩展, 且不同位置的管路出口流动状态相似。整个布置了冷却水管路的水平截面, 流动都较为均匀, 如图 9 所示。而垂直截面只在中心区域布置了冷却水管路, 因此在出口水室边缘区域有较为明显的涡流存在, 如图 10 所示。

图 8 为冷却水管束中的流动速度分布。在中间

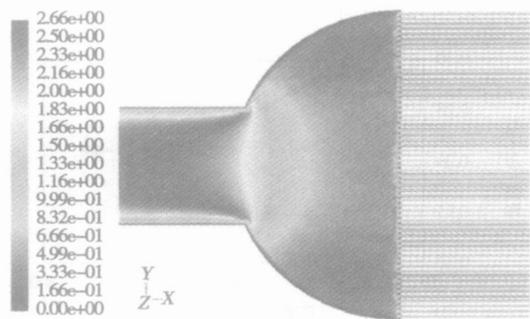


图 9 出口水室水平截面速度分布

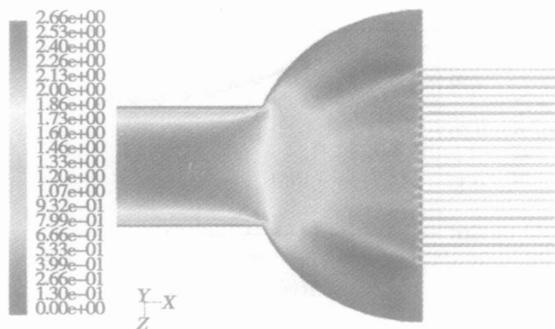


图 10 出口水室垂直截面速度分布

由于从出口水室到出口接管为光滑圆弧形, 因此由水室过渡到接管流动阻力较小, 在出口管端未发生大的流动分离。总体看, 该凝汽器出口水室的结构较为合理。

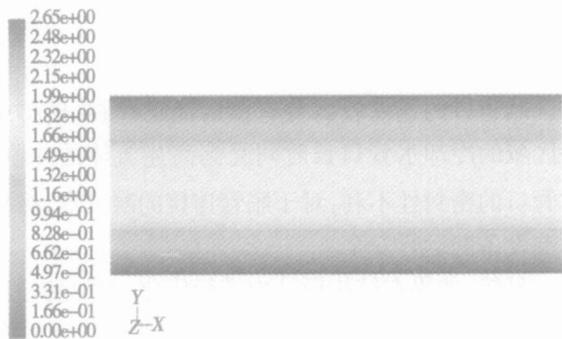


图 11 冷却管出口前 50 mm 处截面速度分布

图 11 为图 3 所示部分某一冷却水管距离出口 50 mm 处的一段管道内速度分布图。由图可见, 速度分布沿管程均匀, 说明在管路出口前流动已经达到充分发展状态。因此, 选取 40 倍管径长度的冷却水管路作为计算区域是合理的。

### 2.3 与文献[2]计算结果的比较

文献[2]曾采用多孔介质模型对冷却水管路进

行计算, 其截面的速度分布如图 12 所示。对两种计算方法进行比较可见, 采用多孔介质模型得到的速度分布与本文水平截面计算结果很相似(参见图 5 和图 9), 说明采用多孔介质模型计算凝汽器水侧流动特性, 特别是进口水室的流动特性是可行的。

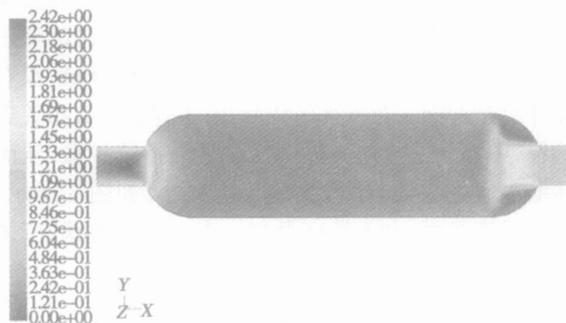


图 12 采用多孔介质模型计算凝汽器对称截面速度分布云图

## 3 结 论

(1)建立了凝汽器实际管束的流动计算模型, 并进行三维数值模拟, 采用分区对称计算方法, 大大降低网格数量, 从而详细预测凝汽器水侧进出口水室以及其连接管和冷却水管束内的流动特性。

(2)计算结果表明, 对于所研究的船用凝汽器, 冷却水管束内流量和流速的分布是不均匀的, 位于中心位置的冷却水管流量较大, 而周边区域较小, 最大流量差别可达到 38%, 且相邻管路的流量减小幅度与冷却水管布置有关。可见, 需要重视凝汽器水侧流动对工作性能的影响, 优化结构。

(3)该凝汽器进口水室存在较大的漩涡, 水室速度分布不均匀, 进入各冷却水管内的流量有较大差异, 结构上存在一定问题; 出口水室的结构较为合理。这与采用多孔介质模型模拟的结论一致, 进一步验证了采用多孔介质模型对凝汽器进行计算是正确可行的。

(4)本文的模拟对象为船用的小型凝汽器, 计算方法可直接推广到大型凝汽器, 为直接模拟和优化结构提供了参考。

### 参考文献:

- [ 1 ] 张卓澄. 大型电站凝汽器[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [ 2 ] 蒋建飞, 黄树红, 王 坤, 等. 凝汽器水侧的三维数值模拟[ J ]. 动力工程, 2006(2): 249-252.
- [ 3 ] 蒋建飞. 自流冷却系统内流场及其部件三维数值模拟[ D ]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

(编辑 何静芳)

基于双流体模型的湿蒸气凝结流动三维数值模拟 = A Three-dimensional Numerical Simulation of Wet Steam Condensation Flows Based on a Dual Fluid Model [刊, 汉] / WU Xiao-ming, LI Liang, LI Guo-jun, et al (College of Energy Source and Power Engineering under Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 367 ~ 370

A dual fluid model for wet-steam condensation flows was established with due consideration of such effects as inter-phase speed slip, coupling and diffusion of turbulent flows in wet-steam steam-liquid two-phase flows. In the light of the turbulent characteristics of flows in steam turbine cascades, derived and established was the SST  $k-\omega-k_p$  turbulent flow model of wet steam two-phase flow by consulting the conveyance equation theory of particle turbulent energy and on the basis of the turbulent flow model involving two equations SST  $k-\omega$ , which have a relatively good numerical simulation accuracy in single-phase turbulent flow calculations. In the above model, introduced were several quasi-fluid conceptions, such as liquid-phase viscosity, heat conductivity and diffusion coefficient etc. On this basis, a three-dimensional numerical simulation was conducted of a wet steam flow of spontaneous condensation existing in a rectilinear cascade. It can be shown that compared with a central section, a large quantity of condensation nuclei first emerged from steam flows in the vicinity of the end walls and regained their balance state relatively early. There exists a certain difference among the mach numbers at the outlet of the steam-liquid two-phase flow cascade along the blade height due to the existence of a structure of vortex system. The model established by the authors can enhance the three-dimensional numerical simulation accuracy of wet steam condensation flows and better reveal the interphase function of condensation flows in a cascade. **Key words:** turbine cascade, wet steam, condensation flow, dual fluid model, two-phase turbulent flow model, numerical simulation

凝汽器水侧流动的三维数值模拟 = A Three-dimensional Numerical Simulation of Water Flows at the Water Side of a Condenser [刊, 汉] / JIANG Jian-fei (Architectural and Thermal Energy Engineering Department of Pingdingshan Institute of Technology, Pingdingshan, China, Post Code: 467044), HUANG Shu-hong, WANG Kun, et al (College of Energy Source and Power Engineering under the Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 371 ~ 374

A model for the calculation of flows in tube bundles of a condenser has been established and by employing a CFD (computational fluid dynamics) method, a three-dimensional numerical simulation conducted of the flow field at the water side of the condenser. By using a sub-regional symmetric calculation method, the number of mesh can be greatly reduced, making it possible to conduct a detailed prediction of the flow characteristics in the inlet and outlet water chambers and their connecting pipes at the condenser water side as well as in the cooling water tube bundles. The calculation results clearly indicate that there exist numerous vortexes in the inlet and outlet water chambers of the condenser, resulting in an increase of flow resistance and a deterioration of the flow conditions. The velocity distribution inside the water chambers is not uniform. As a result, the flow velocity in the tubesheet central area of the inlet water chamber is relatively high and that in the marginal area is relatively low, indicating the presence of a certain structural problem. The structure of the outlet water chamber, however, is relatively rational. This fully corresponds with the conclusion of the simulation conducted by using a porous medium model, giving further proof that it is correct and feasible to use the porous-medium model to calculate the condenser. The calculation results show simultaneously that the distribution of flow rates and velocity in the cooling water tube bundles is not uniform, i. e. the cooling water tubes in the central area have a relatively big flow rate while those in the peripheral area a relatively small flow rate. The biggest difference in flow rates can amount to 38%. The margin of decrease in the flow rate of neighboring tubes has something to do with the layout of the cooling water tubes. The difference in cooling water flow rate and velocity in the cooling water tubes will influence the heat exchange performance of a heat exchanger. The calculation results can provide a foundation for the analysis of heat exchange efficiency problems caused by a non-uniform flow in tube banks and also a basis for the design and structural optimization of condensers. **Key words:** marine condenser, water side, flow characteristics, numerical simulation

竖直通道内相邻气泡对上升的直接数值模拟 = A Direct Numerical Simulation of Neighboring Air-bubble Rising Process in a Vertical Channel [刊, 汉] / LI Yan-peng, ZHANG Qian-long (College of Environmental Science and Engineering under Chang'an University, Xi'an, China, Post Code: 710064), BAI Bo-feng (National Key Laboratory on Multi-phase Flow, Power Engineering Department of the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 375 ~ 379