

蒸汽发生器二次侧流场三维数值模拟

蒋兴, 张明, 谢永诚, 姚伟达

(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

摘要: 基于 FLUENT 软件程序, 采用多孔介质模型, 在蒸汽发生器二次侧流场为单相流动的条件下, 建立了蒸汽发生器二次侧流场的三维流动计算模型。计算核电厂稳态运行过程中蒸汽发生器二次侧的三维流场, 得到整个流场的压力和速度分布。最后对数值模拟的流场进行了分析, 得到比较满意的结果。

关键词: 核电厂; 蒸汽发生器; 数值模拟

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S1-0438-06

Three-Dimensional Numerical Simulation of Secondary Side Flow Field in Steam Generator

JIANG Xing, ZHANG Ming, XIE Yong-cheng, YAO Wei-da

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on FLUENT program, and adopting the method of porous media, the calculation method of three-dimensional flowing was built in the condition of single-phase flowing in steam generator. By calculating three-dimensional flow field in steam generator in the process of nuclear plant steady running, the distributions of pressure and velocity were got. Finally, the flow field of numerical simulation was analyzed, and the result is satisfied.

Key words: nuclear power plant; steam generator; numerical simulation

蒸汽发生器是压水堆核电厂一回路和二回路进行换热的关键设备, 其中的传热管既是蒸汽发生器热交换的关键部件, 又是一回路压力边界中薄弱的部分。计算蒸汽发生器二次侧的三维流场、了解其压力分布和速度分布, 对提高蒸汽发生器的热效率和对蒸汽发生器中的传热管进行流致振动分析有现实意义。目前, 对蒸汽发生器二次侧的热工水力计算, 采用试验关联式进行一维分析是最常用的方法, 计算出蒸

汽发生器二次侧平均的压力、流速及换热系数等参数, 再手算完成。由于蒸汽发生器结构十分复杂, 二次侧不同位置的热工水力参数值也各异, 此方法不能描述蒸汽发生器局部的热工水力参数值。另外, 对蒸汽发生器中的传热管进行流致振动分析时最关心的是二次侧流体冲刷传热管的横向速度, 而通常的热工水力分析方法得到的是一维的平均流体速度, 不能提供流体的横向速度。随着计算机及 CFD 技术的

发展,使得采用更完善的方法计算三维流场成为可能。本工作基于通用大型计算流体动力学(CFD)软件 FLUENT,通过物理模型和一些物理条件的简化,采用 FLUENT 软件中的多孔介质模型计算分析蒸汽发生器二次侧流场。

1 计算模型及网格划分

图 1 为蒸汽发生器结构,其二次侧流体区域示于图 2。其上部 U 型管弯曲部分多孔介质参数(惯性阻尼系数和粘性阻尼系数)的确定十分困难,因此,计算中略去了这部分流动区域,简化了计算模型,其计算区域为:蒸汽发生器下降管套筒内,高度从管板到第 6 块支撑板之间(图 1 中 B 到 A)的圆筒区域(图 3)。管束套筒直径 2.840 m,下降管套筒直径 2.940 m,圆筒高度 6.949 m。整个流体区域的网格全部采用六面体单元,共计 438 765 个节点,418 852 个单元,计算模型及网格划分示于图 4^[1]。

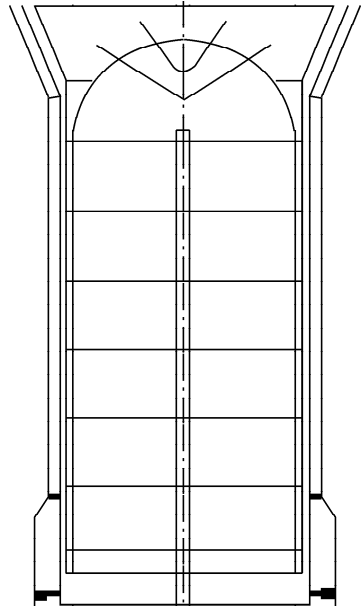


图 2 蒸汽发生器二次侧流体区域
Fig. 2 Steam generator secondary fluid region

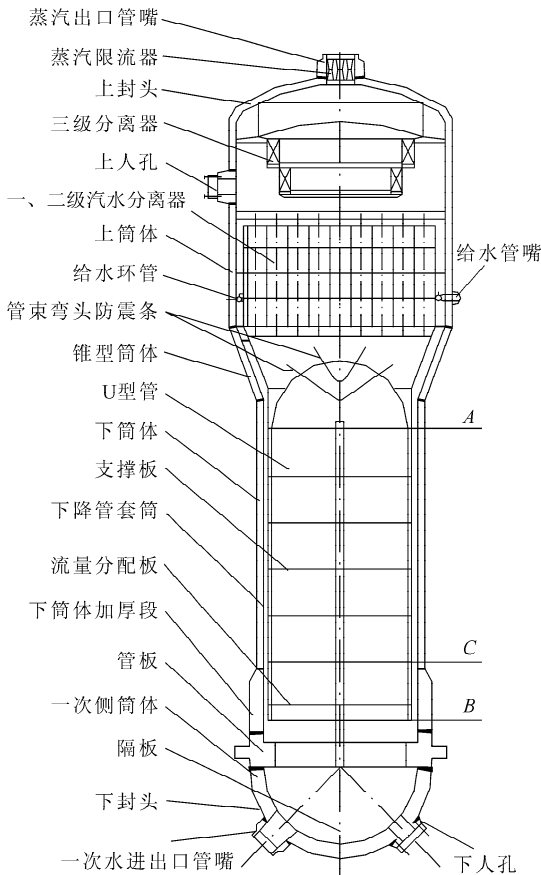


图 1 蒸汽发生器结构简图
Fig. 1 Steam generator structural pattern

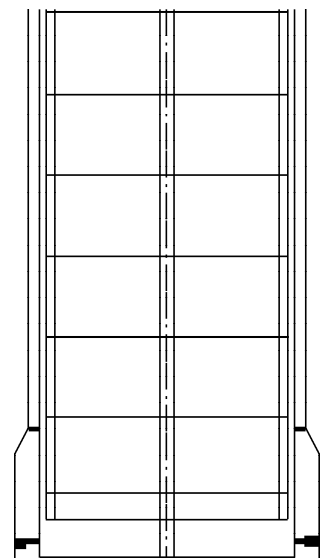


图 3 蒸汽发生器二次侧流体计算区域
Fig. 3 Steam generator secondary fluid calculation region

2 数学模型

在蒸汽发生器二次侧流场的计算中,设流体为粘性不可压缩的湍流,计算采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模式。在此湍流模式中,连续性方程和动量方程^[2]分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

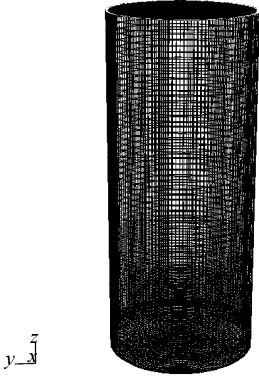


图4 多孔介质模型中蒸汽发生器
计算流体区域网格划分

Fig. 4 Steam generator fluid calculation
region grid in porous zone model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (2)$$

式中： t 为时间项； ρ 为流体密度； u_i 和 u_j （ i 和 j 取值均为1、2、3）分别为流体在空间3个垂直方向上的速度； u_i' 和 u_j' 分别为流体在空间3个垂直方向上的脉动速度； x_i 和 x_j 分别为流体在空间的3个方向； p 为压力； S_i 为广义源项。

在多孔介质模型中，有：

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho u_{\text{mag}} u_j \right) \quad (3)$$

式中： μ 为流体的动力粘度； D_{ij} 为流体在空间3个垂直方向上的粘性阻尼系数； C_{ij} 为流体在空间3个垂直方向上的惯性阻尼系数； $\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu u_j$ 为粘性损失项； $\sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho u_{\text{mag}} u_j$ 为惯性损失项。

这里，源项 S_i 反映了在多孔单元中的压力梯度。

与 k 和 ϵ 相对应的运输方程张量表达式^[2]为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

式中： μ_t 为湍动粘度； G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项； G_b 为由于浮力引起的湍动能 k 的产生项； Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献； $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数； σ_k 和 σ_ϵ 分别为与湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数； S_k 和 S_ϵ 为定义的源项。

3 输入参数^[3]

3.1 计算输入

计算区域流体设为不可压缩湍流，采用 $k-\epsilon$ 湍流模式。U型管分段示意图示于图5。

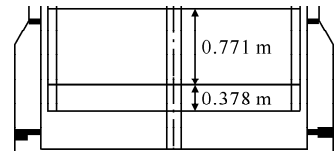


图5 U型管分段示意图

Fig. 5 U shape tube segmentation
diagrammatic sketch

计算流体区域的主要参数如下。

流体参数：流体温度 t ，270℃；流体密度 ρ_f ，840 kg/m³；流体压力 p ，5.4 MPa；动力粘度 μ ，0.000 11 N·s/m²。

计算模型的主要几何尺寸：下降管套筒直径 D_d ，2.940 m；管束套筒直径 D_p ，2.840 m；计算区域高度 L ，6.894 m。

1.149 m U型管：横向粘性阻尼系数，7 087 273 m⁻²；横向惯性阻尼系数，33.2 m⁻¹；纵向粘性阻尼系数，2 838 454 m⁻²；纵向惯性阻尼系数，-0.009 4 m⁻¹。

0.378 m U型管：横向粘性阻尼系数，7 087 273 m⁻²；横向惯性阻尼系数，33.2 m⁻¹；纵向粘性阻尼系数，936 690 m⁻²；纵向惯性阻尼系数，-0.003 1 m⁻¹。

0.771 m U型管：横向粘性阻尼系数，7 087 273 m⁻²；横向惯性阻尼系数，33.2 m⁻¹；纵向粘性阻尼系数，1 901 764 m⁻²；纵向惯性阻尼系数，-0.006 3 m⁻¹。

3.2 边界条件

蒸汽发生器下降管实际流量为1 299.3 kg/s，根据蒸汽发生器二次侧给水分配环的设计，给水按4：1的比例分配到管束的热端和冷端，将

流体入口定为速度边界条件,将下降管实际流量除以面积得到进口的速度值,其中,热端进口 $v_1=5.83 \text{ m/s}$,冷端进口 $v_2=1.46 \text{ m/s}$ 。根据蒸汽发生器二次侧流体实际的压力值,出口定为压力边界条件, $p=5.4 \text{ MPa}$ (图 6)。

4 计算结果

图 6 中坐标系的规定如下: y 为沿横向的进口方向; z 为沿计算区域的轴向; x 与 y, z 轴垂直。坐标原点位置定在计算圆筒区域下底面的圆心位置。图 7~11 分别示出了 $x=0 \text{ m}$ 、 $y=0 \text{ m}$ 、 $z=0.1 \text{ m}$ 、 $z=0.368 \text{ m}$ 和 $z=6 \text{ m}$ 截面压力、速度和速度矢量的分布。

5 结果分析

1) 通过图 7 中的压力云图可看到,在 $x=0 \text{ m}$ 截面,压力最大值出现在蒸汽发生器热

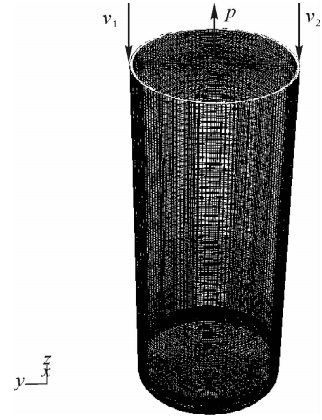


图 6 进口速度、出口压力边界设置示意图

Fig. 6 Inlet velocity, outlet pressure boundary setting

端的下降通道底部。不可压缩流体的伯努利方程为:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gy = c_1(\psi) \quad (6)$$

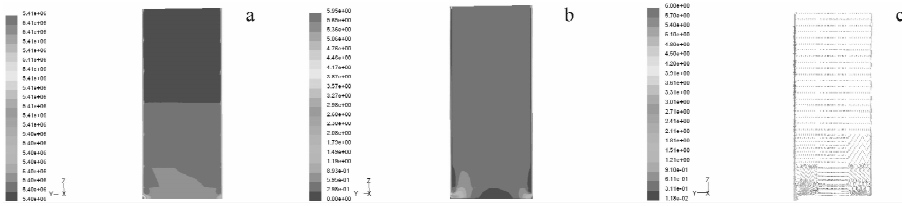


图 7 $x=0 \text{ m}$ 截面压力云图(a)、速度云图(b)和速度矢量图(c)

Fig. 7 Pressure contours (a), velocity contours (b) and velocity vector (c) on section $x=0 \text{ m}$

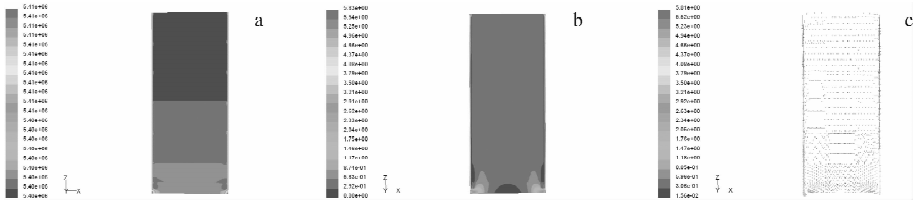


图 8 $y=0 \text{ m}$ 截面压力云图(a)、速度云图(b)和速度矢量图(c)

Fig. 8 Pressure contours (a), velocity contours (b) and velocity vector (c) on section $y=0 \text{ m}$

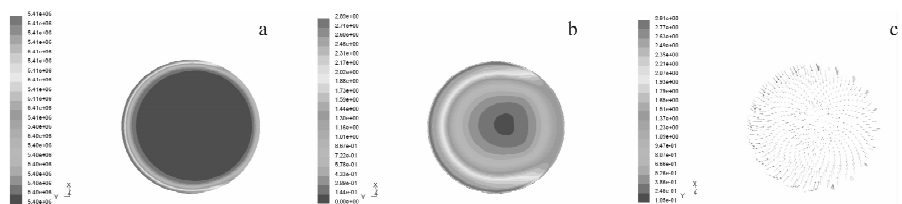


图 9 $z=0.1 \text{ m}$ 截面压力云图(a)、速度云图(b)和速度矢量图(c)

Fig. 9 Pressure contours (a), velocity contours (b) and velocity vector (c) on section $z=0.1 \text{ m}$

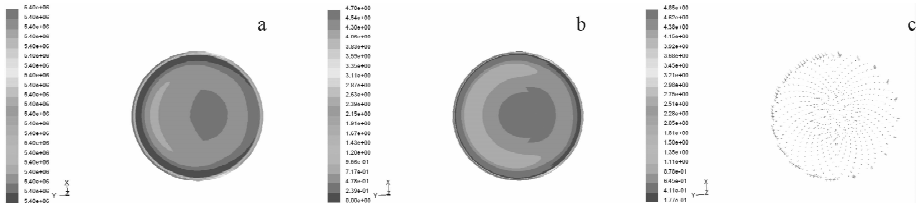


图 10 $z=0.368$ m 截面压力云图(a)、速度云图(b)和速度矢量图(c)

Fig. 10 Pressure contours (a), velocity contours (b) and velocity vector (c) on section $z=0.368$ m

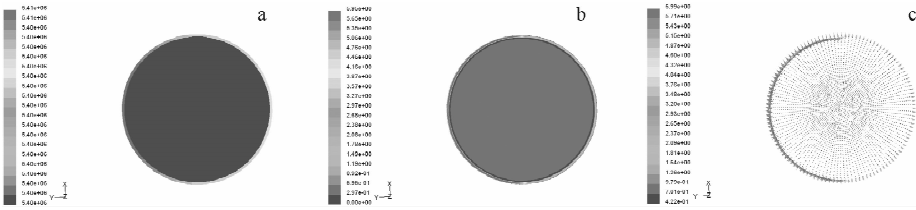


图 11 $z=6$ m 截面压力云图(a)、速度云图(b)和速度矢量图(c)

Fig. 11 Pressure contours (a), velocity contours (b) and velocity vector (c) on section $z=6$ m

下降通道内同一条流线, $c_1(\psi)$ 为常数, v 为速度, p 为压强, ρ 为密度, g 为重力加速度, y 为高度。根据式(6), 在下降通道底部, z 向速度 v 最小, 并且高度 y 值最小, 因此, 压强 p 达到最大值。在流体进入管束套筒内后向 z 轴的正方向流动, 由于压力损失, 沿流动方向的压强逐渐变小。图 7 中的速度云图和速度矢量图反映了蒸汽发生器二次侧的速度分布。由图 7 可看出, 轴向(z 向)最大速度出现在蒸汽发生器热端的下降通道内, 横向(y 向)最大速度出现在流体由下降通道进入到管束套筒的区域。

2) 图 8 中的压力云图、速度云图及速度矢量图分别反映了 $y=0$ m 截面的压力和速度分布情况。对于 $y=0$ m 截面, 下降通道的压力、速度为对称分布。

3) 由图 9~11 的压力云图可看出, 蒸汽发生器二次侧流体沿流动的 z 轴方向压力逐渐变小, 且热端明显比冷端的压力值大, 这主要是由于流速的不同而造成的。由图 9~11 的速度云图及速度矢量图看到, 热端速度明显比冷端大, 是由热、冷端流量的不同而造成的。

4) 图 12~15 反映了典型断面上速度沿坐标轴的变化。

流场计算区域速度场的主要结果为: 下降套筒和管板间通道(热端与冷端交界处) x 方向最大速度为 $2.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 下降套筒和管板间的通

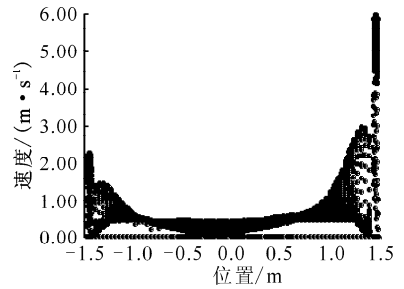


图 12 $x=0$ m 截面速度沿 y 方向的变化
Fig. 12 Velocity on section $x=0$ m change with y coordinate

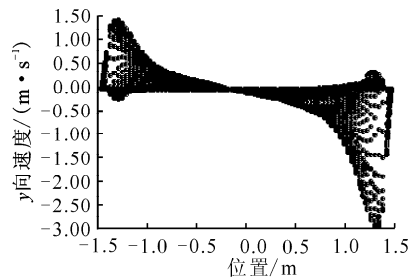


图 13 $x=0$ m 截面的 y 向速度沿 y 方向的变化
Fig. 13 Velocity of y direction on section $x=0$ m change with y coordinate

道(热端处) y 方向最大速度为 $2.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 下降通道内 z 方向最大速度为 $5.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 下降通道内最大速度为 $5.95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

5) 蒸汽发生器二次侧的流动状况十分复

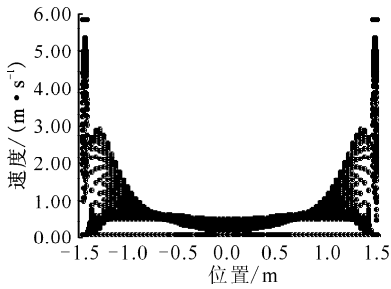


图 14 $y=0$ m 截面速度沿 x 方向的变化

Fig. 14 Velocity on section $y=0$ m change with x coordinate

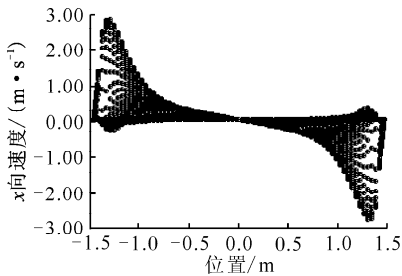


图 15 $y=0$ m 截面的 x 向速度沿 x 方向的变化

Fig. 15 Velocity of x direction on section $y=0$ m change with x coordinate

杂,二次侧水被加热后,沿 U 型管自下而上的流型有单相液体、泡状流、团状流、环状流、有夹

带的环状流、滴状流和单相蒸汽。本工作在简化蒸汽发生器二次侧流动为单相流的情况下,计算模拟了蒸汽发生器二次侧流场。

6 结论

蒸汽发生器是核电厂一回路系统中的重要设备,本工作模拟了其二次侧的三维流场,并对它进行了分析,通过本文的计算和分析得到以下结论:

- 1) 获得了蒸汽发生器内的流速三维分布、方向和大小,为流致振动提供数据输入;
- 2) 获得了蒸汽发生器内二次侧的阻力分布,为详细的三维热工水力分析提供基础;
- 3) 将多孔介质模型成功应用在蒸汽发生器三维流场计算模型中,为以后蒸汽发生器的三维传热分析提供依据。

参考文献:

- [1] 桂晨. 蒸汽发生器[R]. 上海:上海核工程研究设计院,2004.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [3] FLUENT公司. FLUENT 用户手册[M]. [出版地不详]:[出版者不详], 2005.