

基于 RELAP5 程序的直管式 直流蒸汽发生器敏感性分析

刘新凯¹, 刘建阁², 彭敏俊²

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 直流蒸汽发生器内二回路侧的工质水经历了复杂的相变过程, 流型转变和传热情况比自然循环式蒸汽发生器要复杂。本文以 B&W 公司的 19 管直管式直流蒸汽发生器实验装置为研究对象, 采用最佳估算程序 RELAP5/MOD3.4 对其进行建模分析, 研究了节点划分个数、计算时间步长、不同算法和分析方法对计算结果的影响, 研究了系统程序 RELAP5 在分析存在有剧烈相变问题时需注意的不确定性因素。结果表明: 应适当增加控制体的划分个数、降低计算时间步长; 注意两相流模型的选择使用; 注意两种算法的使用场合; 同时应选择多通道的分析方法。

关键词: 直流蒸汽发生器; RELAP5/MOD3.4 程序; 相变

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)09-1088-09

Sensitivity Analysis of Once-Through Steam Generator Based on RELAP5 Code

LIU Xin-kai¹, LIU Jian-ge², PENG Min-jun²

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The water of the once-through steam generator secondary side goes through complicated phase change processes, and the flow types and heat transfer cases are much more complex than that of the natural circulation steam generator used in pressurized water reactor. The straight pipe type once-through steam generator experiment equipment of B&W Company was studied in the paper. The best estimated code RELAP5/MOD3.4 was chosen, and the influences of the node number, calculation time step, arithmetic, and the analysis method were studied in detail. The uncertainty factors that should be careful attention during the research on the great phase change were described. The results show that the number of the control volume increases; the calculation time step decreases; the two-phase model is adopt properly based on problem type; the using condition of the different arithmetics is ascertain; the multi-channel analysis method is selected accordingly.

Key words: once-through steam generator; RELAP5/MOD3.4 code; phase change

在直流蒸汽发生器内,二回路侧的工质水经历了较大的相变过程,因此传热情况比自然循环蒸汽发生器要复杂,传热工况包括:单相水对流、欠热沸腾、饱和沸腾、强制对流蒸发、缺液区和过热蒸汽 6 种工况,各种工况下的工质与壁面的传热机制相差很大。

对此,文献[1]采用了可移动边界的处理办法,将两个控制体之间的界面定在两种换热工况的交界面上,相交界面作为变量,与一、二次侧流体的热力学参数一起进行差分,同一个控制体内传热机制相同,其分析结果表明:在相同的精度要求下,控制体的数目可大幅减少,计算快速。文献[2]采用集总参数法,将二回路侧传热区分为 3 个:欠热区、蒸发区和沸腾区,分别采用不同的换热关系式进行计算。本文采用最佳估算程序 RELAP5 程序,结合 B&W 公司 19 管直管式直流蒸汽发生器实验装置,研究有效换热区节点划分个数、计算时间步长、不同算法和流道划分方法对计算结果的影响,研究系统程序 RELAP5 在分析存在有剧烈相变问题时需注意的不确定性因素,旨为系统建模提供有价值的方法指导。

1 计算模型简介

目前,公认比较完善的计算模型是两流体模型^[3],该模型对汽、液两相分别建立质量、动量和能量守恒方程(6 个场方程),同时考虑汽、液两相之间的质量、动量和能量交换(3 个界面方程:相界面质量传递方程、相界面动量传递方程和相界面能量传递方程),反映各种物理现象之间的内在机理,原则上这种数学模型可描述两相流各种复杂的工况,难点在于场方程数目多,还要补充大量结构关系式,求解困难且计算变量非常庞大,且在对相交界面(相与壁面、相与相之间)的摩擦压降模型多是建立在工程判断和启发式的观点基础上的,而不是直接采用数学推导方法得到精确的模型,尽管在工程应用上已很完善且满足分析要求,但其中的某些关系式(如传热、流动等)因带有工程经验特点,从而使得这种完善的数学物理模型计算精度因此而受到一定程度的不确定性影响。

本文所用 RELAP5/MOD3.4 程序采用一维、瞬态、两流体模型^[4-5],其流场方程由气液两相质量、动量和能量 6 方程组成,气相中可包含不凝结气体成份,采用添加横向流动“接管”的方法来近似模拟三维流动。每个单元控制体均采用了两相处理方法,采用流型处理气液两相的分布以及交界面处两相的相互作用程度,相与壁面的接触面积决定了流体与壁面之间的能量交换、壁面摩擦等,其中传热关系式涵盖单相水、欠热沸腾、饱和沸腾、强制对流蒸发、缺液区和过热蒸汽 6 种工况,可对存在较大相变的流动工况进行计算分析。

2 计算结果与分析

2.1 节点个数影响

B&W 公司的直管式直流蒸汽发生器实验装置横截面如图 1 所示^[6],其管长为 15.90 m,传热管采用三角形排列,外径 15.87 mm,内径 13.94 mm,栅距 22.20 mm,实验装置六角形边长为 57.70 mm,管材为因科镍,一回路线侧的水从管内由上向下流动,二次侧的水从管外由下向上流动。实验工况边界条件如下。一次侧:入口温度 604.85 K,流量 11.77 kg/s,压力 15.30 MPa;二回路侧:给水温度 524.85 K,流量 1.18 kg/s,压力 7.40 MPa。

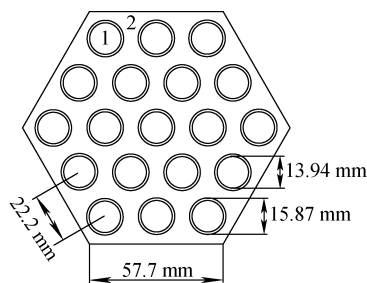


图 1 直流蒸汽发生器横截面示意图

Fig. 1 Cross section of once-through steam generator

采用平均通道处理方法,将一、二回路分别看作是 2 个独立的平均通道,2 个平均通道之间的热量传递通过热构件来模拟,同时需限定当量直径,计算的一回路侧的流通面积和当量直径分别为 $0.002\ 899\ \text{m}^2$ 、 $0.013\ 94\ \text{m}$,二回路侧的

流通面积和当量直径分别为 0.004 892 m²、0.015 13 m,管内侧总传热面积为 13.23 m²,管外侧总传热面积为 15.06 m²。计算节点划分如图 2 所示。其中 TDV 表示时间相关控制体,提供初始压力和温度边界,TDJ 表示时间相关接管,提供初始的流量,SV 表示单一控制体,代表程序计算进出口流体状态,SJ 表示单一接管,P 表示管型部件,A 表示环形部件,B 表示分支,HS 表示传热部件,下同,根据传热原理,属于流体加热流体型传热类型。

计算中选用自适应计算步长选项,最小时间步长为 1.0×10⁻⁸ s,最大时间步长为 1.0×10⁻³ s,选用半隐式求解算法,采用非平衡态、水位跟踪、垂直分层以及沿流动方向上的壁面摩擦模型,有效传热区节点(或称关键传热区的水力几何控制体)个数 *N* 为:5、10、20、30、40、50。计算中首先选择进行稳态计算,待计算结束后,将稳定后的节点热力状态参数重新输进程序输入卡,然后分别进行稳态计算和 5 000 s 的瞬态计算,同时比较两者之间的偏差(压力、温度和流量),当相对偏差小于 0.1%时,认为各节点的热力参数达到稳定。提取 5 000 s 后瞬态计算值,然后再与实验结果比较(表 1,图3~6)。

从表和图可看出,一回路侧单相流体温度相对偏差较小,最大偏差来源于存在相变的二回路侧流体温度,且随 *N* 的增加,计算值与实验值的偏差呈减小的趋势。表明:当算法和模型选定后,*N* 越多,控制体划分得越小,计算结果相对越精确;但控制体划分得越细,为满足数值收敛性,所需的计算时间步长就

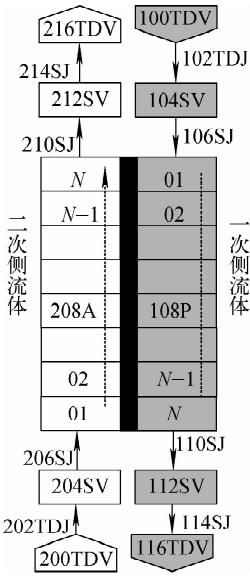


图 2 平均通道计算节点示意图
Fig. 2 Calculation node with average channel

会变得越小,计算所需消耗的时间就会越长。因此,需综合考虑,在满足工程分析和偏差可接受的范围内,选择合适的节点划分数目。此外,从流体温度分布图与实验值相比可看出,RELAP5 程序计算出的一回路侧流体温度略偏高,计算出的二回路侧流体温度略偏低,当流道几何尺寸、当量直径及传热面积确定后,需选择合适的计算节点数,确保计算结果的误差在可接受的范围内。图中饱和沸腾区空泡份额表现出低谷,是由于流型过渡,选用不同的经验关系式计算的空泡份额不同造成的,且在流型过渡区对空泡份额的计算结果未采用线性平滑处理引起的。

表 1 不同节点计算结果比较
Table 1 Results comparison with different node numbers

<i>N</i>	<i>p</i> _{1,in} / MPa	<i>T</i> _{1,in} / K	<i>m</i> _{1,in} / (kg·s ⁻¹)	<i>p</i> _{1,out} / MPa	<i>T</i> _{1,out} / K	<i>T</i> _{1,out} 相对 偏差/%	<i>p</i> _{2,in} / MPa	<i>T</i> _{2,in} / K	<i>m</i> _{2,in} / (kg·s ⁻¹)	<i>p</i> _{2,out} / MPa	<i>T</i> _{2,out} / K	<i>T</i> _{2,out} 相对 偏差/%
实验值	15.300	604.85	11.77		574.45		7.400	524.85	1.18		596.35	
5	15.301	604.86	11.77	15.235	576.38	0.34	7.399	524.85	1.18	7.36	576.35	-3.35
10	15.301	604.86	11.77	15.235	575.62	0.20	7.403	524.85	1.18	7.36	586.17	-1.71
20	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	0.14	7.405	524.85	1.18	7.36	590.54	-0.97
30	15.301	604.86	11.77	15.235	575.16	0.12	7.406	524.85	1.18	7.36	592.24	-0.69
40	15.301	604.86	11.77	15.235	575.11	0.11	7.406	524.85	1.18	7.36	593.05	-0.55
50	15.302	604.86	11.77	15.235	575.01	0.10	7.403	524.85	1.18	7.36	594.13	-0.37

注:*p* 为压力;*T* 为温度;*m* 为流量;1 代表一次侧;2 代表二次侧;in 表示进口;out 表示出口,下同

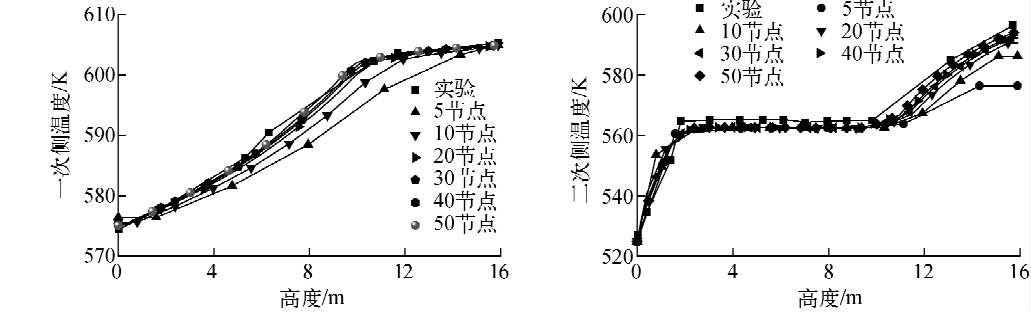


图 3 流体温度与实验值比较
Fig. 3 Comparison of fluid temperatures and experiment results

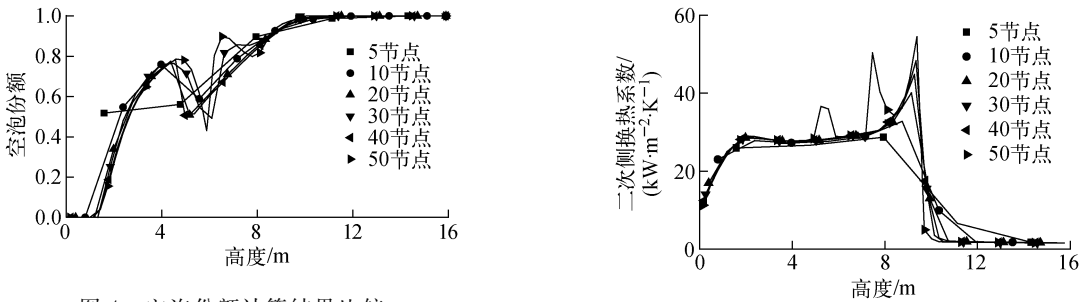


图 4 空泡份额计算结果比较
Fig. 4 Void fraction comparison

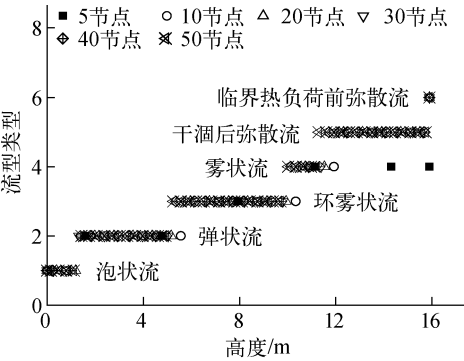


图 5 流型比较
Fig. 5 Flow type comparison

2.2 时间步长的影响

结合上述分析的结果,有效传热区选取 20 个计算节点,对不同时间步长下的计算结果进行分析,计算中选用不同的定步长计算,半隐式求解算法,采用非平衡态、水位跟踪、垂直分层及沿流动方向上的壁面摩擦模型。最小时间步长为 1.0×10^{-8} s,最大时间步长分别取步长 1 (0.002 5 s)、步长 2(0.001 s)、步长 3(0.000 1 s),计算中最大和最小计算时间均保持各自情形不变,计算一回路侧热力参数列于表2,图7、8示

表 2 不同计算步长结果比较
Table 2 Results comparison with different time steps

步长	$p_{1,in}/$ MPa	$T_{1,in}/$ K	$m_{1,in}/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	$p_{1,out}/$ MPa	$T_{1,out}/$ K	$p_{2,in}/$ MPa	$T_{2,in}/$ K	$m_{2,in}/$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	$p_{2,out}/$ MPa	$T_{2,out}/$ K
实验值	15.300	604.85	11.77		574.45	7.400	524.85	1.18		596.35
自适应步长	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	7.405	524.85	1.18	7.360	590.54
1	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	7.405	524.85	1.18	7.360	590.52
2	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	7.405	524.85	1.18	7.360	590.47
3	15.301	604.86	11.77	15.235	575.16	7.405	524.85	1.18	7.360	592.24

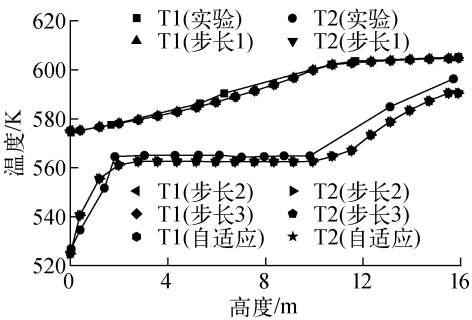


图 7 不同计算步长下流体温度与实验值比较
Fig. 7 Comparison of fluid temperatures and experiment results using different time steps

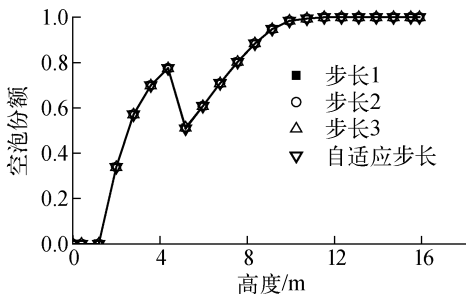


图 8 不同计算步长下空泡份额比较
Fig. 8 Void fraction comparison using different time steps

出了沿着轴向温度和空泡份额分布。为便于比较,图表中还给出了 20 个节点自适应步长计算结果。从中可发现,在算法和模型确定,时间步长(要小于单元控制体的长度与单元控制体内最高流速的比值)满足收敛性条件下,不同步长的计算结果与实验值的偏差基本一致,自适应步长与定步长计算结果基本相同,所不同的是时间步长越小,计算耗时相对越长。说明,在确保收敛和调用相同模型时,应尽可能选择较大的时间步长或自适应计算步长,以节省运算时间,提高计算效率。

2.3 算法影响

RELAP5 程序可选择性调用两种算法:近隐式算法(nearly-implicit)和半隐式算法(semi-implicit)。当需考虑相对快速的瞬变现象,如大破口事故(LOCA),且材料的 Courant 限制不会引起造成病态问题时,一般会选择半隐式数值方法,与显式迎风(explicit-upwind)方法类似,这种数值方法中,数值扩散随控制体尺寸的减小而减小,随 Courant 数的增大而减小;当需考虑伴随有准稳态条件的长期瞬态或需背离 Courant 限制条件时,推荐采用近隐式算法,与隐式迎风(implicit-upwind)方法类似,对于近隐式算法,数值的扩散随控制体尺寸的减小而减小,随 Courant 数的增大而增大。数值扩散表达式为:

$$D_{\text{explicit-upwind}} = \left(1 - \frac{w\Delta t}{\Delta x}\right) \frac{w\Delta x}{2} \tag{1}$$

$$D_{\text{implicit-upwind}} = \left(1 + \frac{w\Delta t}{\Delta x}\right) \frac{w\Delta x}{2} \tag{2}$$

$$\text{Courant 数} = w\Delta t/\Delta x \tag{3}$$

其中: D 为数值扩散系数, m^2/s ; w 为流速, m/s ; Δt 为时间步长, s ; Δx 为沿流动方向单元控制体的长度或控制体尺寸, m 。

这里仍选用 20 个计算节点,初始条件与前面相同,采用半隐式和近隐式计算的结果列于表 3。可见两者差别不大,流体温度和二回路侧的空泡份额计算结果也几乎一致。

为比较瞬态过程中两种算法的特点,在二次侧引入流量扰动,时间序列列于表 4。由于一回路侧的入口温度和流量保持不变,二回路侧入口流量的瞬时扰动会引起受热区流量、出口流量及出口温度等参数的变化,扰动带来的瞬时影响示于图 9~11。

从图可看出,当扰动产生后,由于流动传热存在滞后效应,二回路侧中间位置和出口的质

表 3 两种算法结果比较

Table 3 Results comparison using different arithmetics

方法	$p_{1,\text{in}}/$ MPa	$T_{1,\text{in}}/$ K	$m_{1,\text{in}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p_{1,\text{out}}/$ MPa	$T_{1,\text{out}}/$ K	$p_{2,\text{in}}/$ MPa	$T_{2,\text{in}}/$ K	$m_{2,\text{in}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p_{2,\text{out}}/$ MPa	$T_{2,\text{out}}/$ K
实验值	15.300	604.85	11.77		574.45	7.400	524.85	1.18		596.35
半隐式算法	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	7.405	524.85	1.18	7.360	590.52
近隐式算法	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	7.405	524.85	1.18	7.360	590.59

表 4 扰动时间表
Table 4 Disturbance time sequence

时间/s	二次侧流量/(kg·s ⁻¹)
0.0~1 000.0	1.18
1 000.0~1 000.5	1.18~0.8
1 000.5~1 500.0	0.8
1 500.0~1 500.5	0.8~1.18
1 500.5~2 000.0	1.18

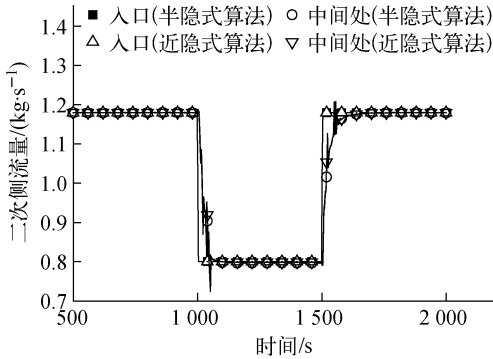


图 9 两种算法下实验段中间位置流量比较
Fig. 9 Mass flow comparison at middle by two algorithms

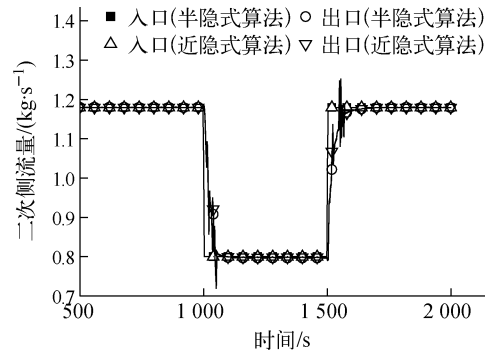


图 10 两种算法下实验段出口位置流量比较
Fig. 10 Mass flow comparison at outlet by two algorithms

量流量总是滞后于扰动达到预定的稳定值,然而在达到稳定值的过程中,流量的波动特性存在差异,波动的峰值也各不相同,在这个短暂的瞬态变化过程中,采用近隐式算法得出的流量波动较大,峰值较高;扰动对温度的影响也具有相类似的滞后特点,且两种算法得出的出口温度值存在一定的偏差,这个偏差(0.07℃)基本

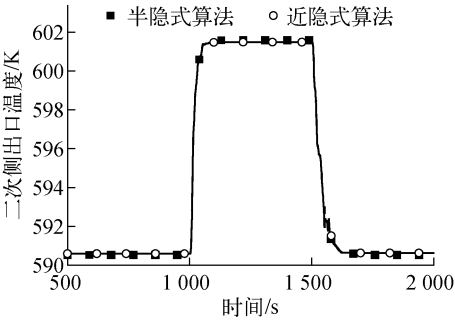


图 11 两种算法下实验段出口温度比较
Fig. 11 Temperature comparison at outlet by two algorithms

可忽略不计,同样近隐式算法温度存在着波动特性,主要是流量引起的。从总体来看,两种算法均较好地模拟出了瞬态过程的流动传热滞后特性。

2.4 多通道分析方法

以上采用平均单通道分析方法,实际上,二次侧由于管束定位格架的影响可能会存在潜在的流体受热不均匀,这种不均匀性会引起管束之间流体的横向流动。为考虑二回路侧流体间的横向影响,采用多通道分析方法。根据图 12、13 所示的多通道划分示意图,将其划分为 3 个通道,每个通道单元控制体的横向间采用特殊的横向多接管连接(RELAP5/MOD3.3 以后版本为模拟横向交叉流动而添加的特殊模型),表示横向可能存在着质量和动量交换。采用这种准三维模拟方法计算的各通道几何参数列于表 5。

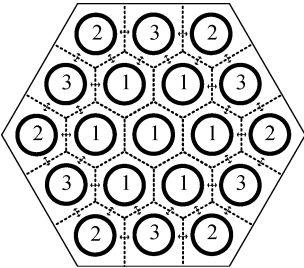


图 12 多通道划分示意图
Fig. 12 Diagram of multichannel method

根据这种方法,结合上述分析结果,有效传热热区选取 20 个计算节点,计算中选用自适应步长计算,半隐式求解算法,采用非平衡态、水位

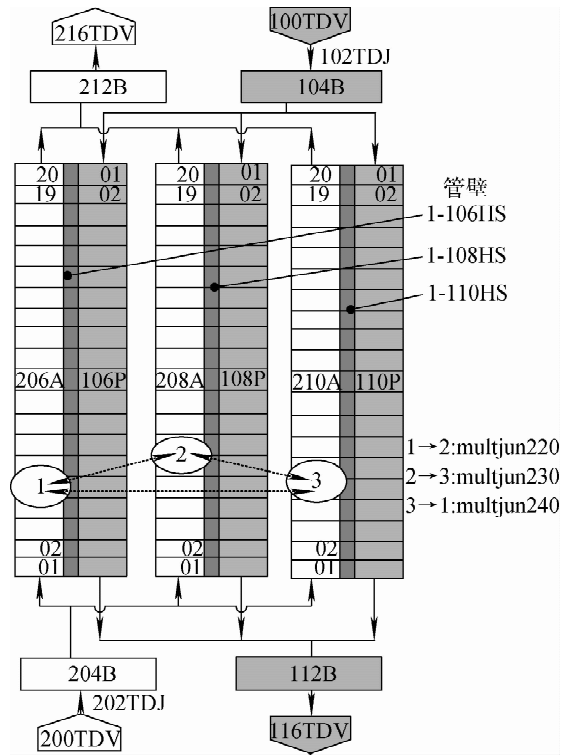


图 13 多通道计算节点示意图

Fig. 13 Calculation node of multichannel method

跟踪、垂直分层及沿流动方向上的壁面摩擦模型。最小时间步长为 1.0×10^{-8} s, 计算的各子通道相关的参数列于表 6, 为便于比较, 表中还列出了进、出口有关参数的计算结果和采用 20 个节点、自适应步长的计算结果。表 7 列出了横向流动情况, 很明显采用平均单通道模型是不能反映相邻通道间横向影响的。图 14、15 示出了沿着轴向温度和空泡份额分布, 为便于比较, 表中还给出了 20 个节点自适应步长计算结果。

比较可发现, 采用平均通道和多通道分析方法得到的出口计算结果, 两者之间偏差很小(压强最大偏差为 3.2 kPa, 温度最大偏差为 0.2 ℃), 然而多通道分析方法可得到不同当量几何条件下温度、压力、空泡等参数具体分布情况, 能考虑到通道之间的相互作用影响, 而平均通道只能得到所有通道内相关参数的近似平均特性分布情况, 因此相比之下, 采用多通道分析方法更为接近实际状况。

表 5 各通道几何参数

Table 5 Geometric parameters of each channel

通道	管数目	水力当量直径/mm		流通面积/m ²		管内侧 总换热面积/m ²
		一次侧	二次侧	一次侧	二次侧	
1	7	13.94	18.37	0.001 068	0.001 603	0.004 887
2	6	13.94	12.97	0.000 916	0.001 661	0.004 178
3	6	13.94	15.07	0.000 916	0.001 629	0.004 178

表 6 多通道分析方法计算结果

Table 6 Results of multichannel method

项目	$p_{1,in}/$ MPa	$T_{1,in}/$ K	$m_{1,in}/$ (kg · s ⁻¹)	$p_{1,out}/$ MPa	$T_{1,out}/$ K	$p_{2,in}/$ MPa	$T_{2,in}/$ K	$m_{2,in}/$ (kg · s ⁻¹)	$p_{2,out}/$ MPa	$T_{2,out}/$ K
通道 1	15.288	604.63	4.34	15.226	575.17	7.399	541.36	0.40	7.360	591.23
通道 2	15.288	604.73	3.71	15.226	575.4	7.399	540.18	0.39	7.360	589.82
通道 3	15.288	604.64	3.72	15.226	575.31	7.399	540.05	0.39	7.360	589.16
通道进出口	15.301	604.87	11.77	15.235	575.29	7.402	524.85	1.18	7.360	590.73
自适应步长	15.301	604.86	11.77	15.235	575.28	7.405	524.85	1.18	7.360	590.54
实验值	15.300	604.85	11.77		574.45	7.400	524.85	1.18		596.35

表 7 横向流动情况
Table 7 Cross flow results

控制体			控制体			控制体		
流量/ (kg·s ⁻¹)		来向	去向	流量/ (kg·s ⁻¹)		来向	去向	流量/ (kg·s ⁻¹)
来向	去向			来向	去向			
206-01	208-01	—0.028 0	206-01	210-01	—0.008 1	210-01	206-01	0.008 1
206-02	208-02	0.014 4	206-02	210-02	0.002 1	210-02	206-02	—0.002 1
206-03	208-03	—0.006 9	206-03	210-03	0.010 8	210-03	206-03	—0.010 8
206-04	208-04	—0.007 9	206-04	210-04	—0.013 0	210-04	206-04	0.013 0
206-05	208-05	0.004 8	206-05	210-05	0.029 7	210-05	206-05	—0.029 7
206-06	208-06	0.062 8	206-06	210-06	—0.036 2	210-06	206-06	0.036 2
206-07	208-07	—0.059 0	206-07	210-07	0.015 8	210-07	206-07	—0.015 8
206-08	208-08	—0.031 6	206-08	210-08	0.015 2	210-08	206-08	—0.015 2
206-09	208-09	0.011 5	206-09	210-09	—0.013 9	210-09	206-09	0.013 9
206-10	208-10	0.003 9	206-10	210-10	—0.004 2	210-10	206-10	0.004 2
206-11	208-11	0.013 6	206-11	210-11	0.006 9	210-11	206-11	—0.006 9
206-12	208-12	—0.010 5	206-12	210-12	—0.011 1	210-12	206-12	0.011 1
206-13	208-13	0.040 0	206-13	210-13	0.020 5	210-13	206-13	—0.020 5
206-14	208-14	—0.069 2	206-14	210-14	—0.026 8	210-14	206-14	0.026 8
206-15	208-15	0.100 1	206-15	210-15	0.107 5	210-15	206-15	0.047 8
206-16	208-16	—0.173 8	206-16	210-16	—0.054 9	210-16	206-16	0.021 5
206-17	208-17	0.261 5	206-17	210-17	0.052 0	210-17	206-17	—0.052 0
206-18	208-18	—0.388 1	206-18	210-18	—0.067 9	210-18	206-18	0.067 9
206-19	208-19	0.592 0	206-19	210-19	0.084 1	210-19	206-19	—0.084 1
206-20	208-20	—1.031 9	206-20	210-20	—0.062 6	210-20	206-20	0.062 6

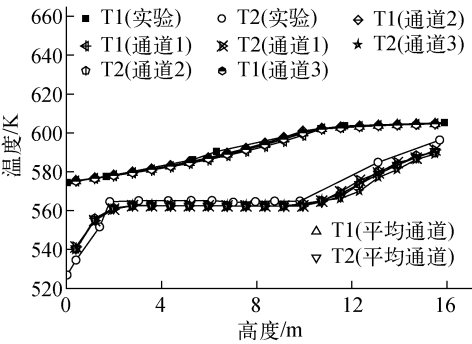


图 14 各子通道温度分布示意图
Fig. 14 Temperature distribution of each sub-channel

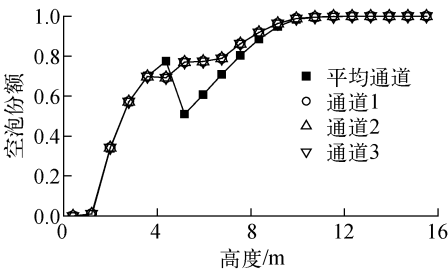


图 15 各通道空泡份额分布示意图
Fig. 15 Void fraction distribution of each channel

3 小结

采用最佳估算程序 RELAP5/MOD3.4 程

序对 B&W 公司 19 管直列管式直流蒸汽发生器实验装置的敏感性计算分析表明：

1) 当流道几何尺寸、当量直径及传热面积确定后,需结合实验条件对有效传热区计算节点的个数进行敏感性分析,选择合适的计算节

点数目,确保计算结果的偏差在可接受的范围内;

2) 当算法和模型确定,在确保满足收敛性的条件下,自适应步长与定步长计算结果基本相同,所不同的是时间步长越小,计算耗时相对越长,说明在确保收敛和调用相同模型时,应尽可能选择较大的时间步长或自适应计算步长,以节省运算时间,提高计算效率;

3) 在模拟直流蒸汽发生器计算时,半隐式算法和近隐式算法计算结果存在偏差,但偏差可接受,两者均较好地模拟了流动传热滞后效应;

4) 采用平均单通道分析结果与采用多通道分析方法进出口计算结果基本一致,但相比之下,多通道分析方法较为准确地反映了不同通道之间的相互作用程度。

进一步研究需结合实验,将三维流场分析工具 ANSYS-CFD 与系统分析工具 RELAP5 联合进行分析,以相互比较来详细研究直流蒸汽发生器内复杂的流动特征,以便掌握直流蒸汽发生器在各种工况下系统及局部的详细运行特性和规律,用于指导设计和实际运行。

参考文献:

- [1] 解衡,张金玲,贾斗南,等. 直管式直流蒸汽发生器的热工水力特性分析与计算[J]. 核科学与工程,1997,17(2):97-102.
XIE Heng, ZHANG Jinling, JIA Dounan, et al. Thermal hydraulic predictions of once-through steam generator[J]. Chinese Journal of Nuclear

Science and Engineering, 1997, 17(2): 97-102 (in Chinese).

- [2] 张伟,边信黔,夏国清. 套管式直流蒸汽发生器静态和动态特性的仿真研究[J]. 中国机电工程学报,2007,27(5):76-80.
ZHANG Wei, BIAN Xinqian, XIA Guoqing. Simulation research of static and dynamic characteristic of once-through steam generator in concentric annulus tube [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 76-80(in Chinese).
- [3] CHEXAL B, HOROWITZ J, McCARTHY G, et al. Two-phase pressure drop technology for design and analysis[M]. Palo Alto, CA: EPRI Distribution Center, 1999: 1-8.
- [4] INEL RELAP5 Team. RELAP5/MOD3. 3 code manual, Volume I: Code structure, system models, and solution methods[M]. USA: Information Systems Laboratories, 2001.
- [5] 刘建阁,彭敏俊,张志俭,等. 套管式直流蒸汽发生器稳态特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009,30(7):757-762.
LIU Jiange, PENG Minjun, ZHANG Zhijian, et al. Analysis of steady-state characteristics of casing once-through steam generator[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(7): 757-762(in Chinese).
- [6] HASSAN Y A. Thermal hydraulic predictions of a 19-tube once-through steam generator testing using TRAC-PF1 [C] // The Winter Annual Meeting of the ASME. New York: [s. n.], 1985.