

AC-600 应急余热排出系统建模与动态仿真

秋穗正 周涛 郭玉君 张金玲 苏光辉

(西安交通大学, 710049)

陈炳德 肖泽军

(中国核动力研究设计院, 成都, 610041)

摘要 通过建立合理完善的 AC600 应急余热排出系统的数学模型, 研制了用于该系统热工水力瞬态特性分析的动态仿真程序 MISAP。并应用 MISAP 对全厂断电事故时在不同工况下自动投入应急余热排出系统后的瞬态热工水力特性进行了计算和分析, 计算结果和定性的理论分析相符合。

关键词 AC600 堆芯余热 自然循环 数学模型 动态仿真

1 前言

在 AC-600 的概念设计中, 蒸汽发生器二次侧采用非能动的堆芯应急余热排出系统, 可大大提高系统运行的可靠性。当发生全厂断电等事故工况时, 非能动堆芯余热排出系统会自动投入, 把反应堆剩余衰变热带出, 确保反应堆系统的安全。

运用计算机对 AC-600 应急余热排出系统的各种热工水力特性进行动态仿真, 可为该系统的结构和控制参数的设计提供至关重要的理论依据, 同时也不失为一种非常经济和可行的手段。

本文通过建立合理完善的 AC-600 应急余热排出系统的数学模型, 研制了用于该系统热工水力瞬态特性分析的动态仿真程序 MISAP, 并对全厂断电事故工况下自动投入应急余热排出系统后的瞬态热工水力特性进行了计算和分析。

2 应急余热排出系统

应急余热排出系统 (ERHRS) (图 1) 由一台蒸

汽发生器、一台应急给水箱、一台应急冷却器以及相应的管道、阀门和控制仪表组成了一条独立的应急余热排出系统。当反应堆失去正常的冷却手段时, 该系统替代正常的二回路系统排出堆芯余热, 使一回路冷却剂温度、压力和二次侧压力维持在允许限值内

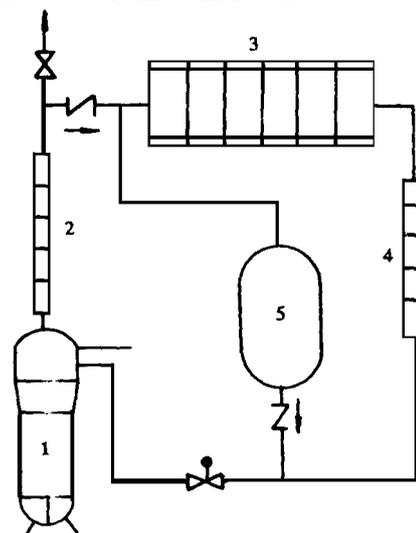


图 1 AC-600 应急余热排出系统控制体划分图
1—蒸汽发生器; 2—上升段; 3—空气冷却器;
4—下降段; 5—应急给水箱

1998年6月9日收到初稿, 1998年9月7日收到修改稿。

当全厂断电、主蒸汽管道断裂或丧失主冷却剂时,蒸汽发生器二次侧压力、水位下降,应急给水箱隔离阀打开,为蒸汽发生器提供补水水源,将蒸汽发生器的二次侧水位维持在一定水平上。蒸汽发生器的二次侧冷却剂吸收反应堆主冷却剂的热量而变成蒸汽,上升至应急空气冷却器。蒸汽在此冷凝成水,同时将热量传给大气环境,冷却水靠重力返回流至蒸汽发生器,从而建立起自然循环,将堆芯余热连续不断地排往环境。

3 应急余热排出系统数学模型

3.1 数学模型子模型块和控制体划分

应急余热排出系统的数学模型由蒸汽发生器、上升段、应急空气冷却器、下降段、应急给水箱、管道、腔室、阀门等子模型的数学模型组成。系统各子模型控制体的划分如图1(蒸汽发生器模块的划分见文献[1])所示。各子模型的控制体划分均可变动。

3.2 数学模型的基本假设与条件

系统内的工质流动作一维处理;忽略所有管壁的轴向热传导;系统内压力与空间无关;系统内的上升段和下降段考虑绝热、定功率散热和自然对流散热3种情况;空气冷却器可以有不同角度的倾斜,可分为光管和翅片管两种;管外空气换热可分为自然对流和强迫对流两种形式。

3.3 各控制体的基本数学方程

下面分别介绍应急余热排出系统各控制体的基本质量、动量和能量守恒方程:

对于蒸汽发生器一次侧的流体通道、给水下降通道、二次侧流体过冷段通道等控制体以及该系统中的空气冷却器、上升段、下降段中过冷液体的热工水力学方程采用单相流体平衡方程,则其质量、动量、能量守恒方程如下:

$$\frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} = -A \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{W^2}{A} \right] - gA - u_{md}l \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial h}{\partial z} W = \frac{qU}{A} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3)$$

对于蒸汽发生器的二次侧沸腾段控制体及该系统的上升段、下降段和空气冷却器中的两相流动混合物,则其质量、能量和动量(采用漂移流模型)守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_g + (1 - \rho) \rho_f \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_g V_g + (1 - \rho) \rho_f V_f \right] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_g h_g + (1 - \rho) \rho_f h_f \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho_g V_g h_g + (1 - \rho) \rho_f V_f h_f \right] = \frac{qU}{A} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{W^2}{A} \right] = -A \frac{\partial P}{\partial z} - u_{md}l - gA - \frac{\partial}{\partial z} P_{BG}A \quad (6)$$

P_{BG} 为漂移流模型计算的压降。

蒸汽发生器U型传热管及空气冷却器管壁壁温方程:

$$MC \frac{\partial T}{\partial t} = q_p A_p - q_s A_s \quad (7)$$

蒸汽发生器给水室水位方程:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{W_{fw} + W_{afw} - \lambda_{RR} W_s}{A_{dc} \cdot dc} - \frac{L}{dc} \left[\frac{\partial_{dc} dP}{\partial P dt} + \frac{\partial_{dc} dh_{dc}}{\partial h_{dc} dt} \right] \quad (8)$$

蒸汽发生器给水室焓方程:

$$\frac{\partial h_{dc}}{\partial t} = \frac{[(1 - \lambda_{RR}) W_s h_f + W_{fw} h_{fw} + W_{afw} h_{afw} - W_s h_{dc}]}{dc \cdot A_{dc} \cdot L} - \frac{(W_{fw} + W_{afw} - \lambda_{RR} W_s) h_{dc}}{dc \cdot A_{dc} \cdot L} \quad (9)$$

系统压力方程由方程(5)求取。

系统内两相流体空泡份额方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\frac{q}{A} + \frac{\partial P}{\partial t} + h \frac{\partial f}{\partial t} - \frac{W_s}{h} \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f h_f)}{\rho_g h_g - \rho_f h_f - h_{gf}} - \frac{\left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g h_g - \rho_f h_f) - h \frac{\partial \rho_{gf}}{\partial t} \right]}{\rho_g h_g - \rho_f h_f - h_{gf}} \quad (10)$$

式中,

$$h = (1 - \lambda) V_f h_f + \lambda V_g h_g$$

$$g^f = f - g$$

系统的自然循环流量和蒸汽发生器二次侧自然循环流量方程:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -A \frac{\partial P}{\partial t} - v_m d l - g A - \frac{\partial}{\partial z} P_{BG} A$$

$$- \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{W^2}{A} \right] \quad (11)$$

腔室方程:

对于腔室, 主要考虑延迟方程:

$$W \frac{dh}{dt} = W(h_{in} - h_{out}) \quad (12)$$

3.4 热工水力学公式的选取

考虑到 AC-600 应急余热排出系统的自然循环特性, 选取了一套流体分别在强迫循环大流量和自然循环小流量工况下, 包括单相水、过冷沸腾、饱和沸腾、过渡沸腾、稳定膜态沸腾、单相汽状态下不同的传热系数和各种阻力系数计算公式, 特别是对于低 Re 数流体的传热系数、阻力系数公式进行了合理修正。具体计算公式见文献[2]。

4 模型的数学处理及程序编制

4.1 数值求解方法

从上节中可以看出, 应急余热排出系统的每一数学方程, 都是一个关于时间和空间的耦合微分方程组的初值问题。实现其求解, 必须对数学模型作空间离散、时间连续的处理。这样, 在每一个控制体内, 可认为参数只是时间的函数而与空间无关。

系统数学模型各未知变量的系数差别很大, 这就形成了数学上所谓的病态方程组。本文选用容易变阶变步长的 Gear 方法求解。Gear 方法采用向后差分法, 能够应用高阶和高稳定的格式, 计算速度快, 稳定性好。

4.2 程序编制

在应急余热排出系统数学模型的基础上, 研制了该系统的动态仿真 MISAP 计算程序, 该程序由主程序和 57 个子程序组成, 求解 79 个微分方程组所构成的刚性常微分方程组的初值

问题。该程序采用模块化结构, 易于移植和修改完善, 适用于微机。

5 模型计算与讨论

5.1 计算参数的选取

由于 AC-600 正处于概念设计阶段, 缺乏相应完整的配套参数, 在参阅秦山核电厂蒸汽发生器^[3]和 AC-600 的有关参数^[4, 5]的情况下对本文所建立的数学模型进行了分析计算。

5.2 应急余热排出系统数学模型的计算分析

蒸汽发生器数学模型的验证见文献[1]。

笔者应用 MISAP 程序对 AC-600 应急余热排出系统在全厂断电事故的不同工况下的瞬态特性进行了分析计算。

反应堆系统正常稳定运行 50 秒后全厂断电, 反应堆自动紧急停堆, 主循环泵惰转, 堆芯衰变热与其额定热功率的比值以图 2 所示的曲线急剧衰减。(160 秒后, 其衰变热为其额定热功率的 5%), 蒸汽发生器失去主冷却剂, 水位下降。当其水位下降至某一警戒水位时, 应急余热排出系统自动投入。在系统自动投入前, 系统自然循环流量为零, 上升段充满蒸汽, 下降段为一定过冷度的水。图 2~图 8 表示了三种不同的运行工况: 工况 1 表示主蒸汽管阀门同时卡死; 工况 2 表示主蒸汽流量同时下降 50%; 工况 3 表示主蒸汽流量保持不变。

反应堆停堆后, 其压力主要取决于一次侧

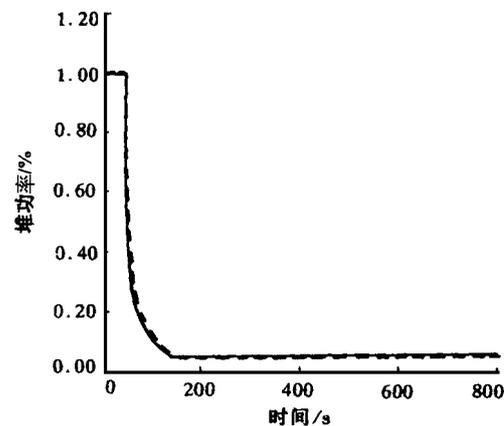


图 2 堆芯衰变热与堆芯额定功率比值因子变化曲线

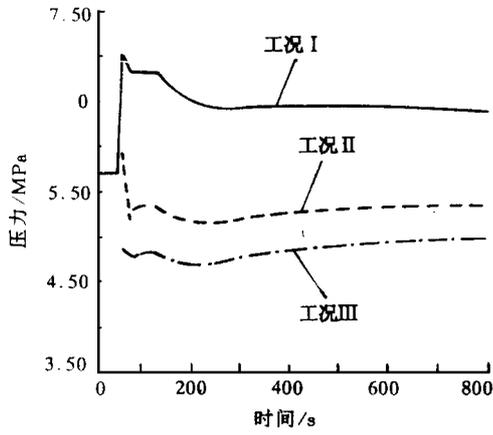


图3 应急余热排出系统压力变化曲线

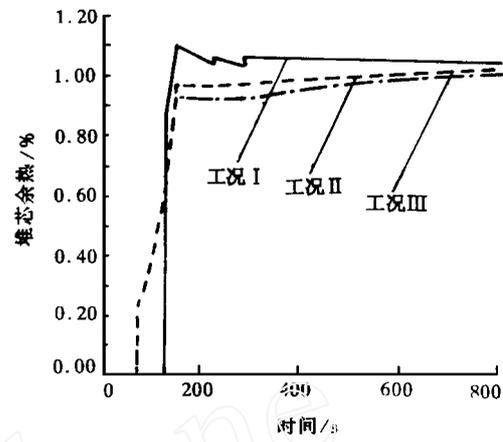


图6 应急余热排出系统导出热量与堆芯余热的比值曲线

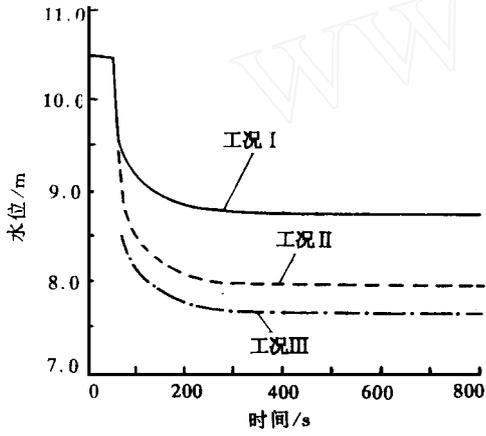


图4 蒸汽发生器水位变化曲线

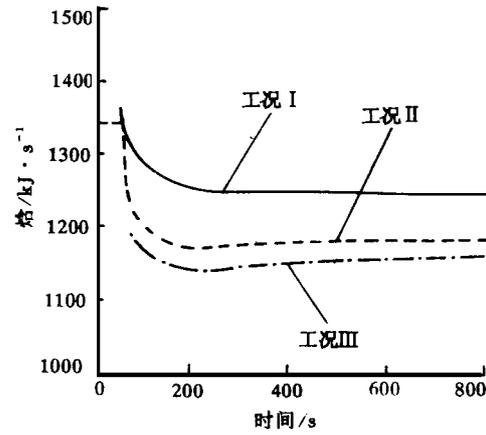


图7 蒸汽发生器一次侧流体焓变化曲线

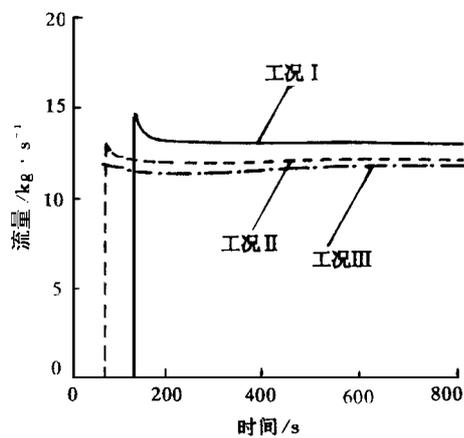


图5 应急余热排出系统自然循环流量变化曲线

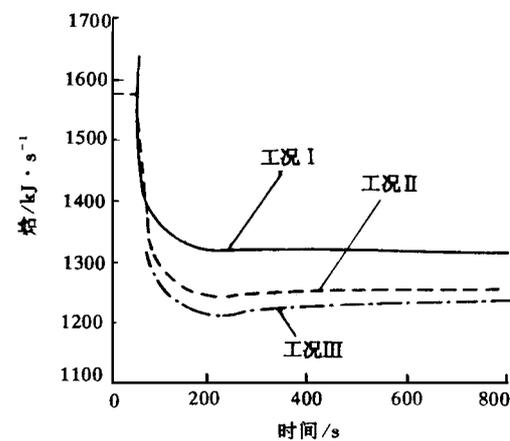


图8 蒸汽发生器二次侧流体焓变化曲线

所传递的热量和主蒸汽所带走的热量。由于堆芯衰变热急剧下降，故工况 I，工况 II 压力下

降，而工况 III 压力上升是因为主蒸汽阀卡死(图3)。对于这三种工况，由于失去主冷却剂，其

水位都下降(图4), 工况 下降最小(压力上升, 安全阀打开, 安全阀蒸汽流量较主蒸汽流量小), 工况 次之(主蒸汽流量减小50%), 工况 的水位下降最多(主蒸汽流量不变)。三种工况的水位下降趋势不同, 故应急余热排出系统自动投入的时间也不同(图5, 图6, 工况 , 工况 水位同时达到警戒水位, 故几乎同时投入)。堆芯功率急剧下降导致蒸汽发生器一、二次侧焓下降(图7, 图8)。当蒸汽发生器所带出热量变化不大时, 压力决定了二次侧饱和温度, 进而决定了一、二次侧传热温差, 故使得蒸汽发生器一、二次侧焓值变化趋势不同(图7, 图8)。由于系统自动投入前, 上升段充满饱和蒸汽, 下降段充满一定过冷度的水, 该系统自动投入时, 两边密度差很大, 系统自然循环流量急速增加(图5), 随热量的排出, 自然循环流量逐渐稳定。压力升高, 上升段、空气冷凝器和下降段内质量含汽率下降, 故系统内的传热系数增大(水的换热系数比蒸汽大), 排出热量增加(图6), 进而相应的自然循环压头增大, 自然循环流量增大(图5), 图6则表明, 当应急余热排出系统稳定运行时, 可以安全导出堆芯5%额定衰变热功率。

6 结 论

(1) 通过建立合理完善的 AC-600 应急余热排出系统数学模型, 运用计算机对其进行动态仿真, 不失为一种经济可行的方法, 可为该系统的设计提供有益的帮助。

(2) 应用 MISAP 程序, 对全厂断电事故工况下, 自动投入应急余热排出系统后的瞬态热工水力特性进行了计算分析, 计算结果和定性的理论分析相符, 即与各种参数的定性分析变化

趋势相符合。

本文的数学模型及程序已经得到中国核动力研究设计院热工水力研究室的实验验证, 这里不再赘述, 作者将另文介绍。

符号表

A: 面积, m^2	V: 速度, m/s
U: 长度, m	h: 焓, kJ/kg
C: 热容, $kJ/kg \cdot K$	W: 流量, kg/s
u: 湿周, m	L: 水位, m
g: 重力加速度, m/s^2	x: 含汽率
ρ : 密度, kg/m^3	M: 质量, kg
q: 热流密度, kw/m^2	c: 空泡份额
τ_w : 壁面剪切力, kPa	P: 压力, kPa
T: 温度, K	

下标

afw: 辅助给水	fw: 给水
out: 出口	RIR: U型管顶部
dc: 下降段	g: 饱和蒸汽
P: 一次侧	S: 二次侧
f: 饱和液体	in: 入口
m: 摩擦	U: 湿周

参 考 文 献

- 1 秋穗正, 郭玉君, 张金玲等. 蒸汽发生器瞬态特性分析数学模型. 西安交通大学学报, 1995, 29(5): 112~117.
- 2 郭玉君. 核动力系统热工水力分析程序研制与应用. 西安交通大学博士论文, 1994.
- 3 刘家钰. 秦山核电厂 30 万千瓦蒸汽发生器设计. 核科学与工程, 1990, 10(增刊).
- 4 张森如, 谭祚, 章宗耀等. AC-600 非能动安全特性分析. 核动力工程, 1989, 10(5): 24~29.
- 5 柏平, 谭祚. AC-600 非能动安全系统设计. 核动力工程, 1989, 10(5): 19~23.

Modeling and Dynamic Simulation for Emergency Residual Heat Removal System of AC-600

Qiu Suizhen Zhou Tao Guo Yujun Zhang Jinling Su Guanghui

(Xi'an Jiaotong University)

Chen Bingde Xiao Zejun

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041)

Abstract A reasonable and perfect mathematical model for Emergency Residual Heat Removal System (ERHRS) of AC-600 is constructed in the paper, and a dynamic simulation program MISAP is developed for analyzing the transient thermohydraulic characteristics of this system. Calculations with MISAP and analyses are carried out for transient thermohydraulic characteristics after automatic operation of ERHRS under several different conditions when Loss of offside power accident happened, the calculated results coincide with those of theoretical analyses.

Key word AC-600 Core residual heat Natural recirculation Mathematical model Dynamic simulation

[作者简介]

秋穗正, 男, 1965 年生, 副教授。1996 年西安交通大学反应堆专业博士学位, 现从事反应堆工程研究工作。

周涛, 男, 1965 年生, 副教授。1987 年毕业于西安交通大学核反应堆工程专业, 现为西安交通大学核能系在职博士生。

郭玉君, 男, 1963 年生, 副教授。1994 年毕业于西安交通大学反应堆工程专业, 现从事反应堆工程研究工作。

更正

由于我们工作中的疏忽, 本刊 1998 年第 6 期出现了不该发生的错误, 特更正如下:

1. P563 倒数第 7 行的“决断”应为“诊断”
2. P564 的公式(1)应为

$$y = \begin{cases} \exp - \left[\frac{(t/T_{1/2}) - C_n}{C_n} \right] & (t/T_{1/2} > C_n) \\ 1.0 & (t/T_{1/2} < C_n) \end{cases}$$

3. P565 第 17 行“HI 5 种分类法”的顺序应为: 技能 - CP₂; 规则 - CP₂; 规则 - CP₁; 规则 - CP₃; 知识 - CP₃。

4. P566 倒数第 3 行“反应时间分布方差由大到小”应为“反应时间分布方差由小到大”。

5. P566 倒数第 6 行“方差按照 CP₁、CP₂、CP₃ 的顺序增大”应为“方差按照 CP₂、CP₁、CP₃ 的顺序加大”。

在此, 向作者和读者表示歉意。

《核动力工程》编辑部