

船用核动力二回路热力系统动态仿真

张杨伟, 蔡琦, 蔡章生

(海军工程大学 核能科学与工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 基于船用核动力装置运行安全分析, 建立了二回路系统两相流通用仿真软件模型, 实现了人工干预条件下复杂两相流流体网络系统的动态特性实时仿真, 拓展了目前核动力装置通用安全分析程序的研究范围。以二回路快速降负荷为例, 对仿真模型的性能进行了验证。结果表明: 该软件模型能准确反映船用二回路系统的动态特性, 可用于事故处置规程和控制系统功能的验证。该模型也可用于核电站饱和蒸汽系统仿真软件的开发。

关键词: 船用核动力; 饱和蒸汽; 仿真模型; 运行安全分析

中图分类号: TK262

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0176-06

Simulation on Secondary Loop of Marine Nuclear Power

ZHANG Yang-wei, CAI Qi, CAI Zhang-sheng

(Department of Nuclear Energy Science and Engineering,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on operational safety analysis of marine nuclear power, a general two-phase flow simulation model for nuclear secondary loop system was established, which can fit the needs of real-time dynamic simulation of complex two-phase fluid networks under manual intervention conditions, and expand the reach field of current general safety analysis program of nuclear power plant. As an example, the capability of the simulation model was validated by taking simulation of rapidly power reducing condition of secondary loop. The results indicate that the model reflects the dynamic characteristics of secondary loop system of marine nuclear power properly, and can be used to validate the accident treatment regulation and function of control system. The model can also fit the needs of developing saturated steam system simulation software of nuclear power station.

Key words: marine nuclear power; saturated steam; simulation model; operational safety analysis

核电厂二回路热力系统与反应堆一回路系统具有很大的耦合性, 在分析系统运行安全性

时须考虑二回路系统动态过程对反应堆的影响。因此, 在现有基础上开发配套的二回路热

力系统动态仿真软件成为一项重要的工作。尤其对船用核动力装置而言,受船体空间布置的局限及海洋机动条件下负荷剧烈变化的影响,核动力系统的安全与二回路热力系统运行状态的关系更为密切。以往相关文献^[1-3]主要针对常规火电站蒸汽系统和压水堆电站二回路及核汽轮机的仿真研究,受对象和模型的限制,这些研究在处理船用核动力二回路热力系统两相流动问题和快速变负荷问题时存在一定的局限。本文针对运行安全分析的需要,研究船用核动力二回路热力系统的动态仿真。

1 仿真对象分析

受海洋条件和船舶机动状态的影响,船用核动力二回路系统在设备布置、运行管理等方面有其区别于常规电站蒸汽动力装置和核电站二回路系统。在对其进行仿真建模时,需解决以下问题。

1) 系统的复杂性。船用二回路系统由蒸汽系统、凝给水系统、乏汽系统、疏水系统、滑油系统等几十个承担不同功能又相互关联的分系统组成,这就需建立多压力节点、多流线的计算模型,且各系统间不同的接口形式在仿真过程中必然需建立不同类型、复杂的接口边界。在建模过程中,还必须进行复杂系统的简化,在保证计算精度的基础上减小计算量,提高软件运行的可信度和可靠性。

2) 设备的多样性。船用二回路系统包括各种类型的汽轮机、换热器、汽水分离器、汽动泵、电动泵、截止阀、安全阀、止回阀、管道等设备部件,不同的设备需分别建立不同的数学模型;在仿真计算过程中还须使用控制程序实现部分设备启动、运行、停止等不同运行状态间的转换。

3) 主汽轮机运行工况快速变化带来的复杂的热工水力过程响应。与常规电站汽轮机系统或核电站二回路系统不同,船用二回路系统常处于快速的负荷变化状态,即具有高度的机动性要求。这种机动性要求对仿真软件的计算能力和模型的精度提出了更高的要求。

4) 汽液两相流动模型。随工况的快速变化和能量的转换,饱和蒸汽的热力性质也将发生剧烈变化,汽水两相间的交替过程更为复杂。因此,必须选用高效的两相流动模型,且能够处

理高速蒸汽流动中可能出现的临界流问题。

5) 仿真软件的实时性和可交互性。与传统安全分析软件不同,运行安全分析仿真软件必须具备实时甚至超实时的运算能力,且在运行过程中根据需要随时实现人工干预。

6) 高效准确的数值算法。多压力节点流体网络问题的计算过程必然生成大型的压力矩阵,且该矩阵的维数随节点划分数量的增加而增大。应用高效的数值算法求解压力矩阵能够保证计算分析所要求的精度和运算过程的实时性。

上述问题既包含了核电厂二回路系统和船用核动力二回路系统仿真研究的共性特点,又反映了船用核动力二回路系统仿真的特殊性,本文仿真模型针对上述问题建立。

图1所示为本文仿真对象的流程示意图。为保持仿真对象的完整性,对该流程相关的辅蒸汽系统及辅凝水系统也进行了建模,图中仅给出了接口边界。

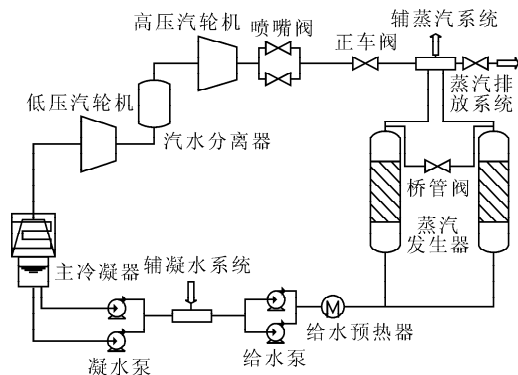


图1 二回路仿真示意图

Fig. 1 Scheme of secondary loop simulation

2 仿真模型及软件实现

2.1 基本守恒方程

将系统的管路、设备根据功能及连接关系分割成若干仿真控制体,各控制体间通过流线连接。对每个控制体分别建立不可凝气体质量方程,汽、液质量方程,汽、液动量方程,汽、液能量方程。

1) 质量守恒方程

长度为 z ,截面积为 A 的封闭管道控制体流体连续方程为:

$$A \frac{\partial(\rho\phi)_n}{\partial t} + \frac{\partial F_n}{\partial z} = \sum \frac{\partial F_{bn}}{\partial z} + \frac{\partial \Gamma_n}{\partial z} \quad (1)$$

式中: α 为流体成分份额; ρ 为流体密度; z 为流向坐标; F_{bn} 为边界流量; Γ_n 表示由于控制体内流体成分(如液相和汽相的交替)改变引起的流量。

2) 能量守恒方程

$$A \frac{\partial(\alpha \rho h)_f}{\partial t} = - \frac{\partial(hF)_f}{\partial z} + A(\Gamma h_{\text{sat}} + \dot{Q} - W)_f + \sum \delta h_s F_{\text{bn}} \quad (2)$$

式中: Γh_{sat} 为流体发生相变时产生的能量; \dot{Q} 为控制体与外界的热量交换; W 为驱动外部机械(汽轮机等)做功时消耗的能量; $\sum \delta h_s F_{\text{bn}}$ 表示控制体有边界时流体能量的交换。

3) 动量守恒方程

控制体动量平衡受力示于图2。

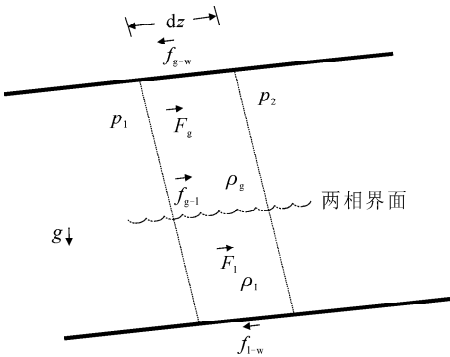


图2 动量平衡示意图

Fig. 2 Scheme of momentum balance

动量守恒方程为:

$$\frac{dF_f}{dt} = - \frac{\alpha_f A}{K_u} \left(\frac{dp}{dz} + f_{f-w} + f_{f-f} + K_u \rho_f g - \delta p_{\text{pump}} \right) + \sum \delta F_{\text{bn}} v_s \quad (3)$$

其中: K_u 为单位制转换因子; f_{f-w} 为流体与壁面的摩擦系数; f_{f-f} 为流体间的摩擦系数; δp_{pump} 表示流道上有泵等动力构件时对流体的作用; $\sum \delta F_{\text{bn}} v_s$ 表示控制体有边界时与边界流体质量交换产生的作用。

在处理汽液两相问题时,为简化并保证计算过程的稳定性,假定汽液两相具有相同相速度而不考虑汽液两相间的滑移效应,实践表明,这种假设能够满足动态仿真分析的精度要求。

2.2 汽液两相界面的传热

假设汽液两相交界面内的工质对两相的热

流密度没有影响,即 $\dot{Q}_I = \dot{Q}_{II} = \dot{Q}_{Ig}$, \dot{Q}_I 为界面传热率; \dot{Q}_{II} 为液相向界面的传热率; \dot{Q}_{Ig} 为汽相向界面的传热率。由此可得界面传热率:

$$\dot{Q}_I = \frac{A_1 h_{lg} \frac{k_l}{X_0}}{\frac{k_l}{X_0} + h_{lg}} (T_1 - T_g) \quad (4)$$

式中: h_{lg} 为汽相和界面的传热系数; k_l/X_0 为液相和界面的传热系数;计算中,假设传热界面的厚度 X_0 为恒定。

受汽液两相的体积及流体流速的影响,准确计算相间换热面积 A_1 很难。本文运用大型热工水力分析程序 RETACT 中的方法进行估算:

$$A_1 = \frac{K [\alpha_g (1.0 - \alpha_g)]^2 V}{Rd'} \quad (5)$$

其中: $K=3.0$ 为面积常数; V 为流体体积;分散相的粒度 Rd' 则由下式计算:

$$Rd = \frac{0.5 We_{\text{crit}} \sigma}{\rho_l v_{\text{avg}}^2} \quad (6)$$

$$Rd' = \max(0.0015, \min(Rd, \frac{1}{2} D_n)) \quad (7)$$

其中: $We_{\text{crit}}=5$ 为临界韦伯数; σ 为液相表面张力; v_{avg} 为流体平均流速。

2.3 两相传热系数模型

两相传热系数与密度、速度、导热率等物性参数有关,并由控制体的物理状态(压力、焓)决定。考虑两相传热的复杂性,在计算流体壁面传热系数时,根据流体状态将传热过程沿流道分区,根据运算精确度与实时性的要求分别对不同的传热区域进行计算。

单相汽(液)强迫对流传热系数的计算选用 Dittus-Boelter 公式,泡核沸腾传热系数的计算选用 Chen 公式^[4],膜态沸腾传热系数的计算选用 Bailey 公式,冷凝传热系数采用 Boyko-Kruzhilin 公式^[5],同时,考虑流体的自然对流换热。

2.4 临界流模型

在蒸汽管路的某些节流区或高压管路发生破口事故时,可能出现临界流动现象。本文在计算临界流动过程时,根据流体质量含汽率将临界流动模型分为欠热喷放区、两相混合喷放区、过渡喷放区和单相汽体喷放区,每区使用不同公式计算临界流量。

2.5 设备模型

根据设计和工作原理,对系统中的各种设

备分别建立计算模型,包括汽轮机功率模型^[6]、换热器换热模型、离心式凝水泵模型、汽轮给水泵模型、止回阀模型、截止阀模型、射汽抽气器模型、汽水分离器模型等。其中,部分泵、阀可根据目前仿真分析程序中通用的模型进行计算,而一些特殊设备如射汽抽气器,则根据其原理及工作特性单独建立计算模型。

2.6 物性方程

流体的物性参数如压力、温度、密度是反映热工流体网络运行状态的重要参数,也是进行质量、能量和动量传递的基本参数。物性方程的建立基于基本守恒方程。

气液混合管道流体的压力主要受气相成分压力的影响,可认为气相压力即为管道流体压力。气体混合物的压力由不同成分各种气体的分压力决定,总压力等于各分压力之和。

在热不平衡状态下,管道中混物流体气相的温度和液相的温度可以不同,所以,在计算流体温度时,对气相和液相分别建立计算模型。其中气相温度根据不可凝气体和水蒸气的不同特性分别建模。

根据液相温度对应的焓在饱和参数表中求得可饱和和液相密度,通过液相可压缩度的修正求得液相压力;气相密度通过平均气体常数 $R_{avg}(T)$ 求得。

2.7 数值解法

根据已求得的参数通过插值法在水或蒸汽参数表中计算水和蒸汽的热力学参数。如计算沸腾流动饱和物性参数时,认为汽液两相的饱

和焓、饱和温度是流体总压力 p_i 的函数,则根据 p_i 在饱和水和饱和蒸汽参数表中插值得上述物性参数。

求解矩阵方程时,不可凝气体、蒸汽的质量守恒方程,混合物体积流量计算的数值解法为显式有限差分法,液相的质量守恒方程的求解采用隐式差分法,能量守恒方程的求解采用半隐式差分法。

2.8 软件结构及计算流程

软件采用 Fortran77 语言编程。为减小压力矩阵求解各节点压力的计算量,将二回路根据功能分成主蒸汽系统、辅蒸汽系统、主凝水系统、辅凝水系统、给水系统等子系统,各子系统编写对应的子程序。子程序间通过边界接口程序和存储数据库传递计算信息,并由共同的主控调度程序统一分配计算序列。子程序中包含实现不同计算功能的程序模块,这些模块划分为子系统热力性质专用计算模块和供各子程序调用的通用设备计算模块。图 3 示出软件的结构组成示意图,图 4 为子程序的计算流程简图。

2.9 人机交互

为实现软件运行过程中设备的启停、主机转速控制、故障和事故插入、主要过程参数显示等功能,使用 C++ Builder 语言开发了人机交互界面,并通过 VC++ 语言编写的通讯模块实现界面与计算程序间的数据交换。通过交互界面,可方便、实时地实现各种运行工况下的人工干预。

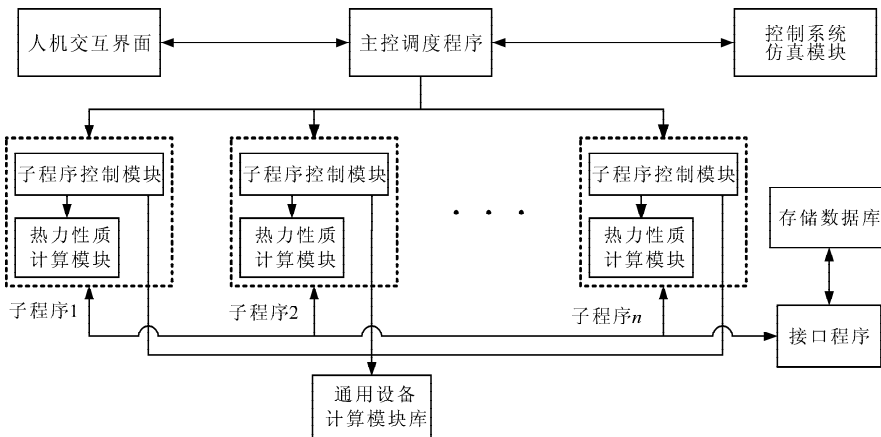


图 3 软件结构

Fig. 3 Software structure

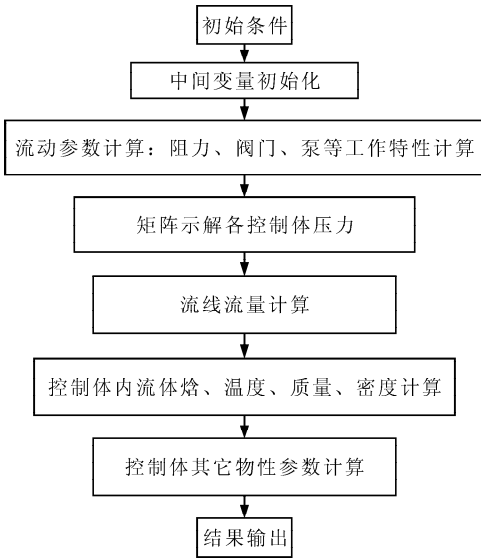


图4 子程序计算流程

Fig. 4 Computation flow chart of subroutine

3 算例分析

快速变负荷是船用二回路系统具有代表性的典型运行工况,变负荷过程中系统运行参数变化剧烈,相关控制系统连续响应动作,对仿真软件的计算能力提出了很高的要求。本文模拟

了主汽轮机功率减小 85% 的系统响应。

系统初始状态为 100% 额定功率运行,仿真过程中,相关调节系统投入自动运行状态,满功率运行 10 s 后开始关小进汽阀开度,并于 17 s 减小至设定小开度。主要仿真结果示于图 5。

由图 5a 可看出:由于汽轮机进汽流量减小,新蒸汽压力迅速上升,达到蒸汽安全定值时排放,压力继续上升至最高值后,因反应堆功率下降,压力缓慢下降,并最终保持在某一比满功率压力较高的值。左右环路蒸汽压力在变功率过程中变化趋势基本一致。

由图 5b 可看出:蒸汽流量持续下降并最终达到低功率水平下对应的低流量值;给水流量最初受蒸汽压力上升引起的汽轮给水泵转速的上升而增大,随后下降至低流量值,并受给水调节系统自动控制。

由图 5c 可看出:主机功率随蒸汽流量的减小迅速降低至低功率值。

由图 5d 可看出:冷凝器压力受排入冷凝器蒸汽量的影响较大。压力的改变引起饱和温度的改变,从而引起冷凝器内部压力的波动。平衡后保持在低真空值。

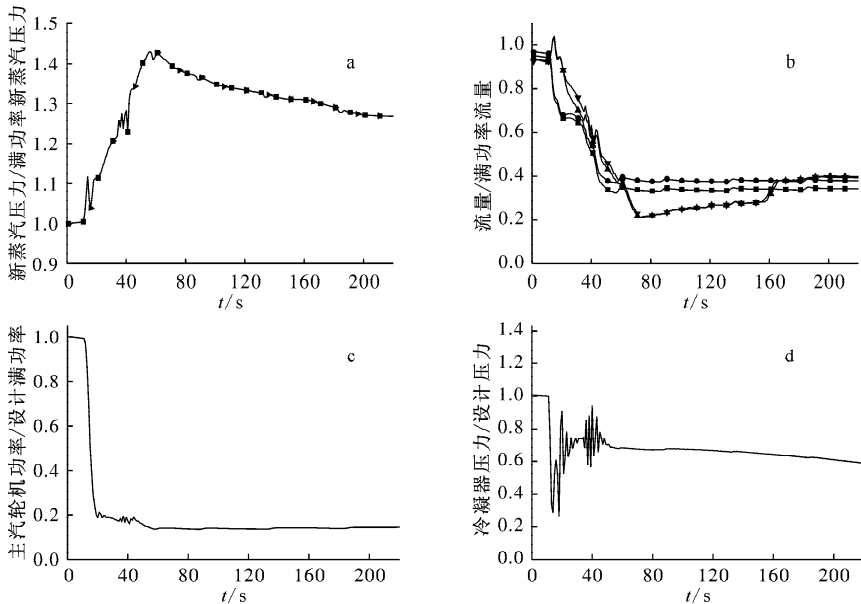


图5 新蒸汽压力(a)、蒸汽流量及给水流量(b)、主汽轮机功率(c)和冷凝器压力(d)的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of pressure of fresh steam (a), flow of steam and feedwater (b), power of main steam turbine (c) and pressure of condenser (d)

a: ■——左环路; ▶——右环路

b: ■——左环路蒸汽流量; ●——右环路蒸汽流量; ▲——左环路给水流量; ▼——右环路给水流量

以上结果较好地反映了实际快速降负荷过程。

利用本文软件对其它正常及异常工况的运行特性进行了模拟分析,结果与实际装置运行过程相符。限于篇幅,本文不作详细阐述。

4 结论

建立适用于船用二回路系统特点的实时动态仿真软件模型是进行运行安全仿真研究的前提之一,也是本文的主要内容。针对船用二回路系统的特点,本文对其动态过程进行了仿真研究,建立了动态仿真模型,开发了仿真分析软件。该软件满足核动力二回路系统两相流动、临界流动等复杂现象的仿真分析需求,并实现了人工干预和控制系统调节作用下系统的复杂响应,是对船用核动力系统运行安全分析软件的一个重要补充,目前已成功应用于两型船用核动力仿真模拟器及安全分析机二回路系统的开发上,取得了很好的效果。本文建立的仿真模型是面向核饱和和蒸汽热力系统的一种通用模型,其应用范围可扩展到核电站蒸汽热力系统运行仿真分析软件的开发上。

参考文献:

[1] 刘笑驰,蔡瑞忠,吕崇德. 大型蒸汽管网的在线仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 397-399.
LIU Xiaochi, CAI Ruizhong, LU Chongde. Simulation investigation of large-scale steam heating network[J]. Journal of System Simulation,

2002, 14(3): 397-399(in Chinese).

- [2] 于明义,黄善衡,翁史烈. 核蒸汽轮机系统数模混合实时仿真[J]. 热能动力工程, 1997, 12(6): 434-437.
YU Mingyi, HUANG Shanheng, WENG Shilie. The hybrid real time simulation of a nuclear steam turbine system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1997, 12(6): 434-437(in Chinese).
- [3] 李运泽,严俊杰,林万超,等. 压水堆核电机组二回路的线性单元分析法[J]. 热能动力工程, 2000, 15(5): 544-547.
LI Yunze, YAN Junjie, LIN Wanchao, et al. A linear element method for analyzing the secondary circuit of a pressurized water reactor nuclear power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2000, 15(5): 544-547(in Chinese).
- [4] CHEN J C. A correlation for boiling heat transfer to saturated liquid in convective flow [J]. I&EC Process Design and Development, 1966, 5: 322-329.
- [5] BOYKE L D, KRUSHILIN G N. Heat transfer and hydraulic resistance during condensation of steam in a horizontal tube and in a bundle of tubes[J]. Inst of Heat Mass Transfer, 1967, 10: 361-373.
- [6] 张杨伟,蔡琦,于雷. 船用核汽轮机装置仿真研究[J]. 汽轮机技术, 2006, 48(1): 40-43.
ZHANG Yangwei, CAI Qi, YU Lei. Study of marine nuclear steam turbine plant simulation [J]. Turbine Technology, 2006, 48(1): 40-43 (in Chinese).