

# 基于牛顿迭代法的舰船冷凝器动态仿真模型研究

代守宝, 陈光, 王雨晴, 高万博

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江哈尔滨 150078)

**摘要:** 针对舰船冷凝器设备的结构和运行特点, 根据流体流动守恒方程、道尔顿气体分压定律和牛顿迭代法理论, 利用 Fortran 语言编程, 建立多相介质冷凝器热工水力动态仿真模型。基于秦山一期 300 MW 机组冷凝器额定工况运行参数对开发的模型进行验证。研究表明: 所设计的模型可反映冷凝器内部各主要参数随时间的变化规律、真实的流动和换热过程; 主要参数相对误差在 10% 以内, 可满足系统实时仿真需求; 冷凝器在稳态工况、变负荷过程、故障工况下的仿真分析, 可获得其不同工况下的动态响应。

**关键词:** 舰船冷凝器; 动态仿真模型; 牛顿迭代法理论

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.06.003

[引用本文格式] 代守宝, 陈光, 王雨晴, 等. 基于牛顿迭代法的舰船冷凝器动态仿真模型研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(6): 19-25. DAI Shou-bao, CHEN Guang, WANG Yu-qing, et al. Research on dynamic simulation model of marine condenser based on Newton iteration method [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 19-25.

## Research on Dynamic Simulation Model of Marine Condenser based on Newton Iteration Method

DAI Shou-bao, CHEN Guang, WANG Yu-qing, GAO Wan-bo

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** Aiming at the equipment structure and operation characteristics of marine condenser, in accordance with the hydrodynamic conservation equation, Dalton's law of partial pressure and the theory of Newton iterative method, multiphase medium condenser thermal hydraulic dynamic simulation model was set up by use of Fortran programming. The model was verified based on the rated operating parameters of the 300 MW unit condenser of Qinshan phase I. The research results show that the model can reflect the variation rule of each main internal parameter with the time, as well as the real flow and heat transfer process; the relative error of the main parameters is less than 10%, which can meet the real-time simulation requirement of the system. The dynamic response of the condenser under different operating conditions can be obtained by the simulation analysis of the condenser under steady-state operating condition, variable load process and fault operating condition.

**Key words:** condenser of the marine, dynamic simulation model, the theory of Newton iterative method

### 符号说明

$t$ —时间, s;

$x$ —蒸汽干度;

$R$ —冷凝器内空气所占的质量份额;

$R_a$ —空气的气体常数, 461.5 J/(kg·K);

$M_s$ —蒸汽存量, kg;

$M_a$ —冷凝器中空气存量, kg;

$M_{cw}$ —冷却水管存水量, kg;

$V$ —冷凝器内汽水空间体积, m<sup>3</sup>;

$D_w$ —冷却水流量, kg/s;

$C_w$ —冷却水比热容, kJ/(kg·K);

$\delta$ —转速不等率;

$\sum F_s$  — 进出冷凝器中的蒸汽质量变化量, kg/s;

$\sum F_a$  — 进出冷凝器的空气质量变化量, kg/s;

$F_{st}$  — 汽轮机排汽量, kg/s;

$F_{ost}$  — 其他进汽量, kg/s;

$F_f$  — 疏水蒸发量, kg/s;

$F_v$  — 热井水动态蒸发量, kg/s;

$F_{as}$  — 疏水凝结量, kg/s;

$F_c$  — 蒸汽主凝结量, kg/s;

$F_{da}$  — 冷凝器散热量, kg/s;

$F_{ss}$  — 抽真空设备抽出的蒸汽量, kg/s;

$F_{kq1}$  — 进入的空气量, kg/s;

$F_{kq2}$  — 轴封漏入的空气量, kg/s;

$F_{kq3}$  — 故障时漏入的空气量, kg/s;

$F_{a0}$  — 抽气器抽出的汽水混合流量, kg/s;

$F_d$  — 热井补水量, kg/s;

$F_l$  — 冷却管泄漏量, kg/s;

$F_v$  — 热井水面动态蒸发量, kg/s;

$F_{wo}$  — 冷凝器出水量, kg/s。

$H_{st}$  — 汽轮机排汽焓, kJ/kg;

$H_{ost}$  — 其他进汽焓, kJ/kg;

$H_c$  — 冷凝器的饱和汽焓, kJ/kg。

$H_{cw}$  — 冷凝器下饱和水焓, kJ/kg;

$H_l$  — 冷却水焓, kJ/kg;

$h_g$  — 饱和蒸汽比焓, kJ/kg;

$v_l$  — 饱和水比容,  $m^3/kg$ ;

$v_g$  — 饱和蒸汽比容,  $m^3/kg$ ;

$p_c$  — 冷凝器压力, MPa;

$p_s$  — 冷凝器蒸汽分压, MPa;

$p_a$  — 冷凝器空气分压, MPa。

## 引 言

舰船压水堆核动力装置由反应堆、一回路、二回路系统和推进系统 4 部分组成, 具有系统组成复杂、子系统及设备间耦合关联性强、动态响应收敛限制因素多等特点, 研究分析难度大, 设计流程复杂, 舰船动力系统的数字化仿真设计技术被广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

主汽轮机组是核动力装置二回路系统的重要组成部分, 其主要功能是将反应堆及一回路系统产生并传递过来的热量, 以尽可能高的效率转化为输出功。主汽轮机组动态过程对整个二回路系统的运行特性有重要的影响, 尤其对于有限的空间布置和频繁变负荷的船用核动力装置而言, 系统的安全与主汽轮机组动态运行特性存在更为密切的联系。冷凝器作为二回路系统唯一的通海冷源, 接收并冷却二回路系统疏水排汽和维持机组在真空环境下运行。

机组频繁变负荷, 冷凝器的循环冷却水流量和温度随机组工况和浅深不同不断变化, 直接导致冷凝器的运行真空度的变化, 而冷凝器壳侧真空是设备运行的关键指标, 直接影响汽轮机组的正常运行。

目前, 冷凝器实时动态仿真模型主要为简化的理想气体物理模型。理想气体是一种假想没有粘性的气体, 其分子是一些有弹性的、不具体积的质点, 分子间没有相互作用力, 对此简化的物理模型, 不但可定性地分析气体某些热力现象, 而且可定量地导出状态参数间存在的简单函数关系, 因此通常利用理想气体状态方程求解冷凝器内壳侧蒸汽压力。但冷凝器壳侧蒸汽处于饱和状态, 饱和蒸汽的比体积较气体小得多, 分子间的内聚力随距离减小急剧增大, 实际分子运动规律极其复杂。因此, 冷凝器壳侧蒸汽不能看作理想气体进行压力求解<sup>[5]</sup>。

另一种冷凝器仿真模型的技术方案是基于非均匀和非平衡态的瞬态、两相流体模型, 分别建立冷凝器壳侧蒸汽区气相和液相的质量、动量和能量 6 个守恒方程, 并整场求解压力等变量。该模型可将冷凝器壳侧蒸汽区分为多压力节点, 较真实地反映设备内部实际的物理过程, 仿真计算结果精度较高, 但求解过程较复杂, 无法满足实时性的要求, 一般不用做冷凝器实时动态仿真模型的开发。

本文针对舰船冷凝器设备的结构和运行特点, 根据流体流动守恒方程、道尔顿气体分压定律和牛顿迭代法理论, 建立多相介质冷凝器热工水力实时动态仿真模型, 对冷凝器稳态工况、变负荷过程、故障工况进行仿真分析, 获得其不同工况下实时、高精度的动态响应, 为舰船动力系统与主要设备协同仿真技术研究提供技术支撑。

## 1 模型建立

### 1.1 研究对象

舰船冷凝器系统多为单流程、表面式管壳换热器。汽轮机排汽或其他系统排汽, 进入冷凝器的壳侧管束区, 被管束内冷却水冷凝下来。工质的比容急剧缩小, 形成真空。凝结下来的冷凝水经热井除氧后由凝水系统排出, 如图 1 所示。冷凝器中的换热过程为<sup>[6-10]</sup>:

(1) 冷却管外表面上的蒸汽凝结放热; (2) 金

属壁面及内外表面上污垢的导热;(3)管内冷却水的对流传热。

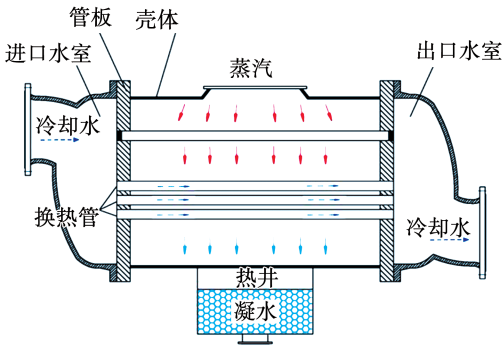


图 1 冷凝器功能原理图

Fig.1 Schematic diagram of condenser

### 1.2 模型假设

建立舰船冷凝器的数学模型时,为了微分方程的计算简便且确保数学模型的精确性,主要作如下简化假设<sup>[11]</sup>:(1)冷凝器内热负荷分布均匀;(2)由于管壁较薄,可近似地用稳态导热来描述其热量传导;(3)管内冷却水流速均匀,水流处于紊流状态;(4)壳体散热忽略不计;(5)不考虑冷却水管内外管壁温度的差异。

### 1.3 数学模型

冷凝器数学仿真模型分为壳侧与管侧:(1)壳侧分为凝结区和热井区两部分;(2)管侧分为设备通海部件及其内部的循环冷却水。

#### 1.3.1 冷凝器壳侧

针对冷凝器内流动介质的不同物性,其壳侧分为 3 个部分:蒸汽、空气和热井凝结水<sup>[12-15]</sup>。

冷凝器内蒸汽质量守恒方程为:

$$\frac{dM_s}{dt} = \sum F_s \quad (1)$$

$$\sum F_s = F_{st} + F_{ost} + F_f + F_v -$$

$$(F_{as} + F_c + F_{da} + F_{ss})$$

冷凝器内空气质量守恒方程为:

$$\frac{dM_a}{dt} = \sum F_a \quad (2)$$

式中:

$$\sum F_a = F_{kq1} + F_{kq2} + F_{kq3} - F_{a0}R$$

假设冷凝器内蒸汽速度不变,则冷凝器内部蒸汽的平均焓值  $H_s$  :

$$\frac{dM_s H_s}{dt} = F_{st} H_{st} + F_{ost} H_{ost} + (F_f - F_c) H_c -$$

$$(F_{as} + F_{da} + F_s) H_s \quad (3)$$

由壳侧空间的平均比焓  $H_s$  和平均比容  $V_s$  求解箱体的压力  $p_s$ 。

平均比焓和平均比容的计算式为:

$$H_s = (1 - x) h_1 + x h_g \quad (4)$$

$$V_s = (1 - x) v_1 + x v_g \quad (5)$$

将式(4)、(5)联立,消去  $x$  得到(6)式,满足该式的压力,便是冷凝器壳侧压力的解。

$$A(p) + B(p) V_s = H_s \quad (6)$$

式中:

$$A(p) = \frac{(v_g h_1 - v_1 h_g)}{v_{lg}}$$

$$B(p) = \frac{h_{lg}}{v_{lg}}$$

利用“牛顿迭代法”求解式(6),设式(6)为函数  $f(x)$ ,牛顿迭代法理论使用函数  $f(x)$  的泰勒级数的前面几项来寻找方程  $f(x) = 0$  的根。牛顿迭代法是求方程根的重要方法之一,其最大的优点是在方程  $f(x) = 0$  的单根附近具有平方收敛,求解过程如图 2 所示。

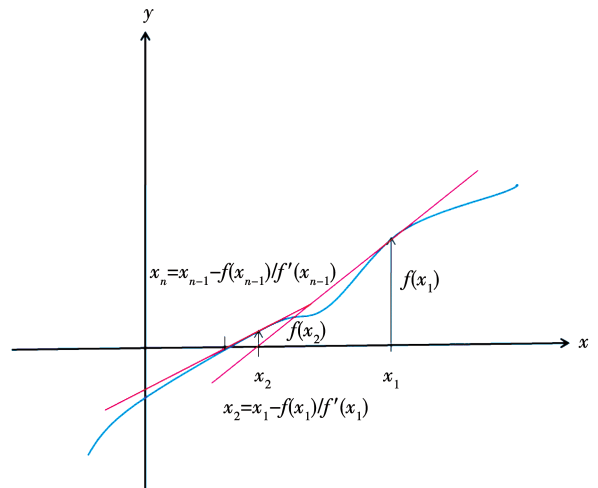


图 2 “牛顿迭代法”示意图

Fig.2 Schematic diagram of Newton iteration method

用牛顿迭代法解非线性方程,是把非线性方程线性化的一种近似方法,方便计算。牛顿法的本质是“以直代曲”,先猜测一个值  $x_1$ ,其近似方程的根为  $c$ ,用过  $(x_1, f(x_1))$  点的切线  $y = f(x_1) + f'(x_1)(x - x_1)$  近似代替曲线  $f(x)$ ,再用切线方程  $y = f(x_1)$

$+f(x_1)(x-x_1)=0$  的根  $x=x_2=x_1-f(x_1)/f'(x_1)$  近似代替曲线方程的根  $c$ , 得到  $f(x)=0$  的第 2 个近似值, 依次类推可得到迭代公式  $x_n=x_{n-1}-f(x_{n-1})/f'(x_{n-1})$ , 最后得到方程近似解  $p_s$ , 调用饱和水蒸气表求得压力  $p_s$  下的饱和蒸汽参数  $t_s, h_g, h_f, v_g$  和  $v_f$ 。

冷凝器内空气分压  $p_a$  和冷凝器内绝对压力  $p_c$ 。

冷凝器中的空气可以视为理想气体, 根据道尔顿气体分压定律理想气体的状态方程经简化可得:

$$\frac{dp_a}{d\tau}V = R_a \frac{dM_a}{d\tau}(t_a + 273) \quad (7)$$

冷凝器内绝对压力为:

$$p_c = p_s + p_a \quad (8)$$

根据进出冷凝器内的疏水和凝水流量, 建立热井凝水的质量平衡方程:

$$\frac{dM_h}{dt} = \sum F_h \quad (9)$$

其中:

$$\sum F_h = F_c + F_d + F_{as} + F_{da} + F_l - F_v - F_{wo}$$

确定热井水焓  $H_h$  和水温  $t_h$

$$\frac{dM_h H_h}{dt} = (F_d + F_c + F_{as} + F_{da})H_{cw} +$$

$$F_l H_l - F_v H_c - F_{wo} H_h - Q_{lo} - Q_{cw} \quad (10)$$

根据热井水焓调用水蒸汽表查得热井水温  $t_h$ 。

### 1.3.2 冷凝器管侧

冷凝器换热过程主要包括: 蒸汽凝结放热、冷却水管导热和冷却水对流吸热:

蒸汽凝结放热

$$Q = K\Delta t_m A_u \quad (11)$$

冷却水出口温度  $t_2$  :

$$M_{cw} c_w \frac{d\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)}{dt} = Q_c - D_w c_w (t_2 - t_1) \quad (12)$$

## 2 模型编译和验证

### 2.1 模型编译

利用模型编译程序对冷凝器进行仿真计算, 程序的计算流程如图 3 所示。

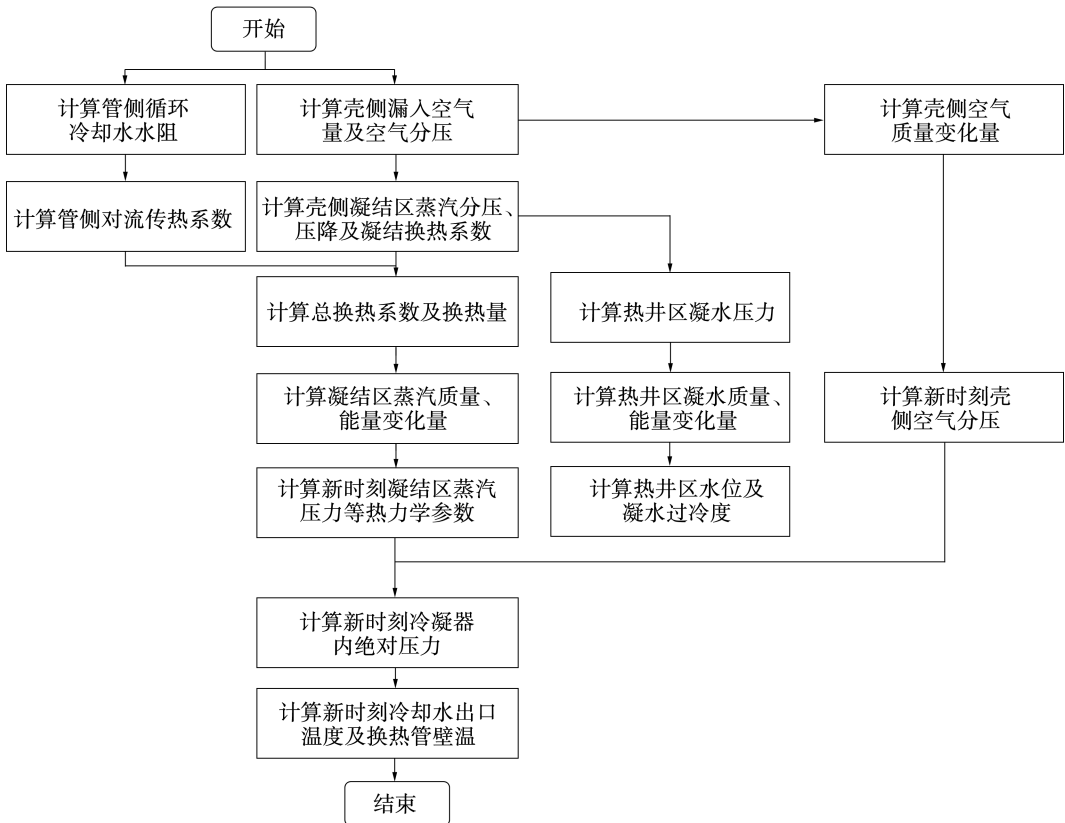


图 3 冷凝器模型计算流程

Fig.3 Flow chart of condenser model calculation

### 2.2 模型验证

冷凝器真空压力是主汽轮机组正常运行的主要指标。以秦山一期 300 MW 核电机组冷凝器为仿真验证对象,利用仿真计算结果对其变工况计算结果进行验证。同时利用开发的仿真模型进行不同运行工况、冷却水进口温度以及循环冷却水流量动态特性验证。仿真对象冷却管的数量及规格为 17 128 根  $\Phi 25 \times 0.7$  和 200 根  $\Phi 25 \times 1.0$ 。冷凝器额定工况参数如表 1 所示。

表 1 冷凝器主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of condenser

参数	数值
喉部压力/kPa	5
进汽量/ $t \cdot h^{-1}$	551.41
冷却水流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	31 270
冷却倍率	58
冷却管内平均流速/ $m \cdot s^{-1}$	2.3
冷却水进口设计温度/ $^{\circ}C$	18
冷却水温升/ $^{\circ}C$	9.51
冷却面积/ $m^2$	14 086

图 4 为主汽轮机排气由 100% 降到 65% 工况,开发模型与仿真机的压力计算结果对比曲线。随着负荷的降低,冷凝器内的压力不断下降,最大相对偏差为 4.76%。

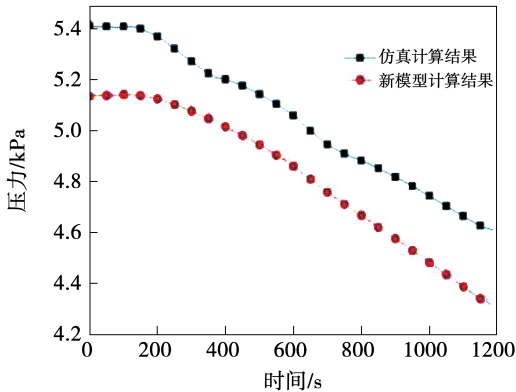


图 4 冷凝器压力对比曲线

Fig. 4 Pressure contrast curves of condenser

图 5 为冷凝器的冷却水流量和入口温度恒定,不同负荷工况下的冷凝器压力计算结果。冷凝器在额定工况下变负荷计算表明蒸汽负荷越小,冷凝器真空压力越低。通常冷凝器压力是冷凝器壳侧蒸汽

凝结温度对应的饱和压力,而蒸汽的凝结温度与冷却水的入口温度、冷却水的温升以及传热端差有关,在一定的冷却水流量和冷却水进口温度条件下,蒸汽负荷的降低会使冷却水的温升和传热端差减小,进而使蒸汽的凝结温度及冷凝器压力下降。

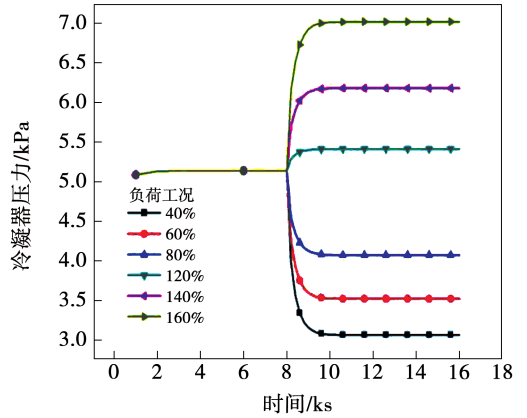


图 5 各负荷工况下的冷凝器压力

Fig. 5 Pressure of condenser under different load conditions

图 6 和图 7 为蒸汽负荷和冷却管壁清洁系数均为设计值时冷凝器压力与冷却水流量、冷却水进水温度的关系曲线。由图 6 可知,冷却水进水温度保持不变,冷却水流量减少,冷凝器内压力有较大幅度的升高,冷却水进水温度越高,影响越大。因此,冷却水流量是冷凝器压力高低的一个重要影响因素,夏季高温期尤为突出。要保证冷凝器在真空下运行,就要保证有足够的循环冷却水量。因此,在实际运行中,应根据水泵性能、冷却水进水温度和供水方式等方面来确定合适的冷却水流量。

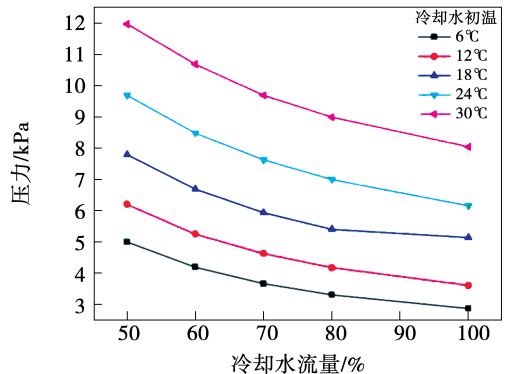


图 6 不同冷却水流量下的冷凝器压力

Fig. 6 Pressure of condenser in different flow of cooling water

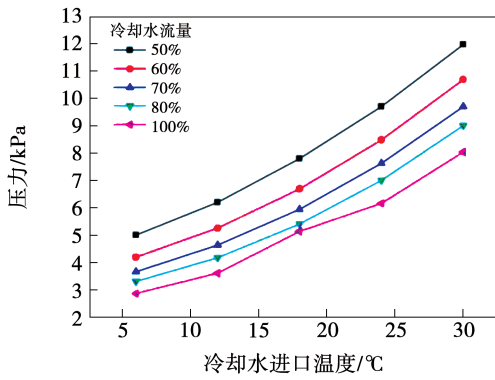


图 7 不同冷却水初温下的冷凝器压力  
Fig. 7 Pressure of condenser at different initial temperatures of cooling water

冷却水进水温度通过影响冷却水温升和端差进而影响冷凝器真空。由图 7 可知,在一定的冷却水流量条件下,随着冷却水进水温度的升高,冷凝器压力也相应的升高,在循环冷却水流量不足的情况下,其影响更大。对于采用直流供水方式的电厂,在冷却水进水温度的调节上比较困难,但夏季高温期要关注冷却水初温对冷凝器压力的影响。

### 3 冷凝器模型动态特性分析

图 8 ~ 图 11 为故障工况下冷凝器压力变化曲线。图 8 和图 9 分别为抽汽器故障工况和真空阀破坏故障工况下的冷凝器内压力变化曲线。两种工况下冷凝器内的空气质量含量均增多,导致冷凝器压力上升。

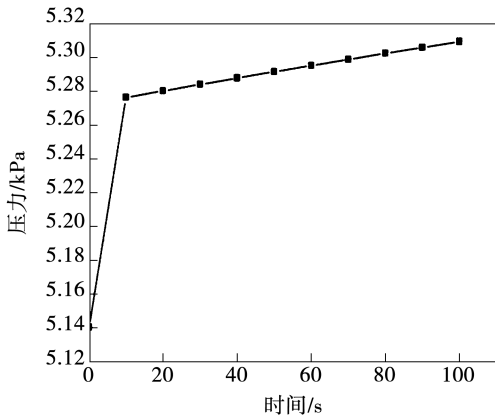


图 8 抽汽器故障下的冷凝器压力  
Fig. 8 Pressure of condenser under the failure condition of extraction facility

图 10 为冷凝器的冷却水管破裂事故工况下冷凝器压力的变化曲线。冷却水管破裂后冷却水很快进入冷却水的汽空间,使得冷凝器汽空间减小,压力

升高。图 11 为循环冷却水减少故障下的冷凝器压力曲线。导致循环冷却水减少的原因很多,如循环水泵故障,循环冷却水管堵塞等。冷却水减少将会导致冷凝器内蒸汽不能被完全冷却,使得冷凝器内压力升高。

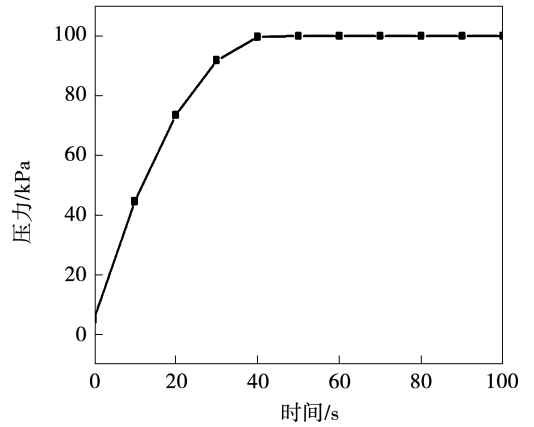


图 9 真空阀破坏故障下的冷凝器压力  
Fig. 9 Pressure of condenser under the failure condition of vacuum valve break

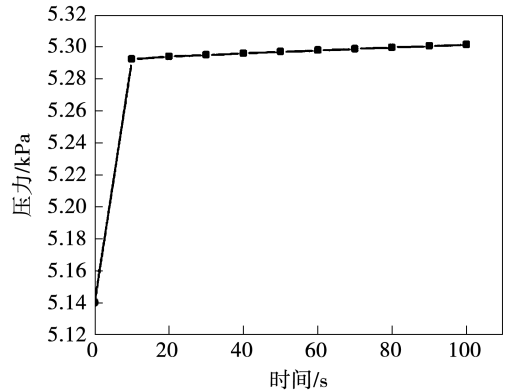


图 10 冷却水管泄漏故障下的冷凝器压力  
Fig. 10 Pressure of condenser under the failure condition of cooling pipe leakage

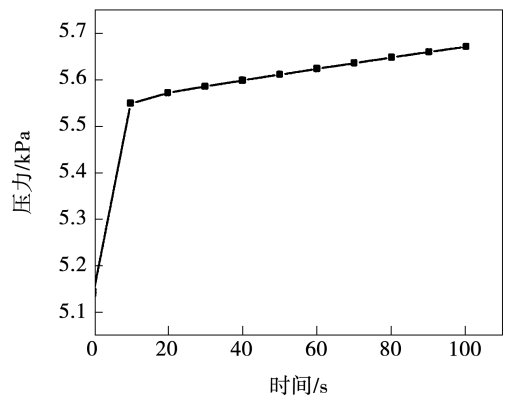


图 11 循环冷却水减少故障下的冷凝器压力  
Fig. 11 Pressure of condenser under the failure condition of circulating cooling water reduction

## 4 结 论

以秦山一期 300 MW 核电厂的冷凝器为对象,对冷凝器稳态工况、变负荷过程、故障工况进行仿真分析,验证了模型的精度和动态特性的合理性,结论如下:

(1) 模型主要参数计算结果相对误差在 10% 以内,可满足系统实时仿真的需求;

(2) 不同工况负荷、冷却水流量和冷却水初温条件下,冷凝器壳侧真空压力计算结果与实际运行状态保持一致;

(3) 抽汽器故障、真空阀破坏故障、冷却水管破裂事故及循环冷却水减少 4 个故障工况下,冷凝器壳侧真空压力也随之升高,模型可为机组故障诊断和运行维护提供仿真实论基础。

## 参考文献:

[1] 孙中宁. 核动力设备[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004.  
SUN Zhong-ning. Nuclear power plant[M]. Harbin: Harbin Engineering University Publishing House, 2004

[2] 陈君尧. 国外潜艇核动力装置的由来和展望[J]. 核动力工程, 1993, 14(3): 263 - 268.  
CHEN Jun-yao. The origin and prospect of submarine nuclear power plant in foreign countries[J]. Nuclear Power Engineering, 1993, 14(3): 263 - 268.

[3] 夏银山,陶春波. 国外潜艇反应堆发展技术分析[J]. 现代舰船, 1995(1): 53 - 57.  
XIA Yin-shan, TAO Chun-bo. Technical analysis of submarine reactor development in foreign countries[J]. Modern Ship, 1995(1): 53 - 57.

[4] 张大发,毛景荣. 船用核反应堆运行与管理[M]. 北京:原子能出版社,1997.  
ZHANG Da-fa, MAO Jing-rong. Operation and management of marine nuclear reactor[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997.

[5] 沈维道,蒋智敏. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.  
SHEN Wei-dao, JIANG Zhi-min. Engineering thermodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.

[6] HU Hong-gang, ZHANG Chao. A modified  $k - \varepsilon$  turbulence model for the simulation of two-phase flow and heat transfer in condensers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(9): 1641 - 1648.

[7] SAID M A. The influence of condenser cooling seawater fouling on the thermal performance of a nuclear power plant [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 76: 421 - 430.

[8] SAMI I. The influence of condenser cooling seawater temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 80: 371 - 378.

[9] MICHAEL E W. Economic impact of condenser fouling in existing thermoelectric power plants [J]. Energy, 2012, 44(1): 429 - 437.

[10] ANOZIE A N, ODEJOBI O J. The search for optimum condenser cooling water flow rate in a thermal power plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(17 - 18): 4083 - 4090.

[11] 杨 康. 船用冷凝器仿真建模与真空度控制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2018.  
YANG Kang. Research on simulation modeling and vacuum control method of marine condenser [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[12] 丁 燕, 顾 昌, 方 琼, 等. 300 MW 机组冷凝器动态数学模型的建立与仿真[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(5): 327 - 329.  
DING Yan, GU Chang, FANG Qiong et al. Establishment and simulation of dynamic mathematical model for condenser of 300 MW unit [J]. Steam Turbine Technology, 2004, 46(5): 327 - 329.

[13] 李 勇, 张卫会, 张欣刚, 等. 300 MW 核电汽轮机冷凝器动态过程的数值分析[J]. 核动力工程, 2002, 36(4): 50 - 53.  
LI Yong, ZHANG Wei-hui, ZHANG Xin-gang, et al. Numerical analysis of condenser dynamic process of 300 MW nuclear power turbine [J]. Nuclear Power Engineering, 2002, 36(4): 50 - 53.

[14] 崔 凝. 大型电站冷凝器动态数学模型的研究与应用[D]. 北京:华北电力大学, 2001.  
CUI Ning. Research and application of dynamic mathematical model for condenser of large power station [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.

[15] 倪 何, 程 刚, 孙丰瑞, 等. 某型舰用冷凝器动态数学模型的建立和应用[J]. 计算机仿真, 2007, 24(7): 337 - 341.  
NI He, CHENG Gang, SUN Feng-rui, et al. Establishment and application of dynamic mathematical model for a type of marine condenser [J]. Computer Simulation, 2007, 24(7): 337 - 341.

(姜雪梅 编辑)