

Simulation of Thermal System of Nuclear Power Plant Based on SimStore

Jiatai Zhao^{1,2}, Jianghua Guo^{1,2}

¹The Key Laboratory of Ministry of Education of Transients in Hydraulic Machinery, Wuhan Hubei

²The Key Laboratory of Hubei Province of Waterjet Theory & New Technology, Wuhan Hubei

Email: Tiger950725@163.com, gjhua@whu.edu.cn

Received: June 25th, 2019; accepted: July 10th, 2019; published: July 17th, 2019

Abstract

Based on the SimStore software package, the conventional island thermal system of the nuclear power plant of Bay Daya in Guangdong Province is taken as the simulation object in this paper. According to the mass conservation and energy conservation under the full load state, the matrix method and constant power output method are used to build a simulation model for typical load steady-state simulation and 70% - 100% load rise simulation. When the simulation system is running stably under 100%, 90% and 70% loads, the accuracy is acceptable; in the load lifting simulation of 70% - 100%, the flow and pressure changes of the main equipment in the system are logical. Reference is provided for the operation, simulation, optimization, the improvement of the efficiency of relevant education and practical training of the conventional island thermal system of nuclear power plant and the development of offshore nuclear power platform.

Keywords

Conventional Island, Thermal System, Simulation, SimStore

基于SimStore的核电站热力系统仿真

赵嘉泰^{1,2}, 郭江华^{1,2}

¹水力机械过渡过程教育部重点实验室, 湖北 武汉

²水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉

Email: Tiger950725@163.com, gjhua@whu.edu.cn

收稿日期: 2019年6月25日; 录用日期: 2019年7月10日; 发布日期: 2019年7月17日

摘要

以广东大亚湾核电站常规岛热力系统为仿真对象, 基于SimStore软件包, 根据满负荷状态下的质量守恒

文章引用: 赵嘉泰, 郭江华. 基于 SimStore 的核电站热力系统仿真[J]. 核科学与技术, 2019, 7(3): 105-113.

DOI: 10.12677/nst.2019.73015

和能量守恒, 运用矩阵法和定功率法, 搭建仿真模型, 进行典型负荷稳态仿真和70%~100%负荷升负荷仿真。仿真系统在100%、90%和70%负荷下稳定运行时, 精度可以接受; 在70%~100%的升负荷仿真中, 主要设备的流量与压力的变化符合逻辑, 为核电站常规岛热力系统模拟运行、仿真与优化, 提高相关教育与实践培训的效率和开发海上核动力平台提供参考。

关键词

常规岛, 热力系统, 仿真, SimStore

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核电由于排放少, 且能量巨大, 是未来清洁能源的主流发展方向之一。然而, 核电站的核泄漏事故风险使有关核电的大部分实验与教学无法在真实的核电站中进行。因此, 仿真技术在核电以及相关领域起到不可替代的作用。在核电仿真技术领域, 国外开展研究的时间相对较早, 主要仿真软件有 RELAP 5、ADMIRE、vPower 等。目前, 国内已有多名学者从事核电仿真研究。文献[1] [2] [3]运用 RELAP 5 进行压水堆核电站常规岛热力系统建模; 文献[4]运用 C++Builder 6.0 搭建核电站常规岛仿真平台。

以大亚湾核电站常规岛热力系统为仿真对象, 基于 SimStore 软件包, 结合由矩阵法、定功率法和质量守恒定律改进得来的满负荷下二回路热力参数算法与结合范德瓦尔斯方程改进弗留格公式得来的非满负荷下二回路热力参数算法, 搭建核电站常规岛热力系统仿真模型并在实践中进行改进, 对典型负荷(100%、90%和 70%负荷)进行稳态仿真和 70%~100%负荷升负荷仿真, 获得相关热工参数与变化趋势, 与实际运行参数进行比对, 为核电站常规岛热力系统模拟运行、仿真与优化, 提高相关教育与实践培训的效率和开发海上核动力平台提供参考。改进后的模型部分截图如图 1 所示。

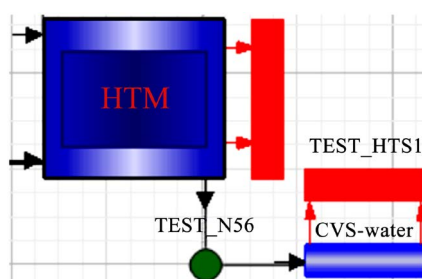


Figure 1. Local diagram of simulation model

图 1. 仿真模型局部图

2. 仿真模型热力参数计算方法

2.1. 满负荷下的热力参数计算方法

2.1.1. 效率计算法

任何热力系统或系统中的设备能够有效利用的能量占外界提供能量的比例, 定义为系统或设备的效

率。效率算法以热力学第一定律为理论基础, 利用系统和设备的热效率对热力系统和设备的能量利用情况进行定量表示[5] [6]。

2.1.2. 热平衡法及矩阵法

热平衡法可分为串联法与并联法。根据热力学第一定律, 对抽汽回热系统中的每一级加热器列出相应热平衡方程, 与其它热量与质量守恒方程联立求解各加热器的抽汽量。矩阵法通过建立各级回热加热器的热平衡方程式, 求解一个包括各级抽汽量的线性方程组, 进而获得热力系统各项参数, 其特点是一次能计算大量未知参数, 具有程序化、通用化、快速化等特点, 是热平衡法的衍生物[7]。以下是矩阵法需要的方程和方程组:

汽轮机装置的功率方程:

当系统的结构、循环参数和抽汽参数确定时, 理论上抽汽回热机组 1 kg 新蒸汽所做的功可表示为

$$N = (h_0 - h_n) - \sum_{i=1}^m \alpha_i (h_{e,i} - h_n) \tag{1}$$

式中: h_0 , $h_{e,i}$, h_n ——新蒸汽焓、抽汽焓和凝汽焓, 单位为 kJ/kg; m ——总抽汽数; α_i ——第 i 级抽汽份额。

定义 h_i^d 为 1 kg 抽汽所引起的做功不足, 即

$$h_i^d = h_{e,i} - h_n \tag{2}$$

方程的向量形式为

$$N = (h_0 - h_n) - [\alpha_i]^T [h_i^d]^{-T} \tag{3}$$

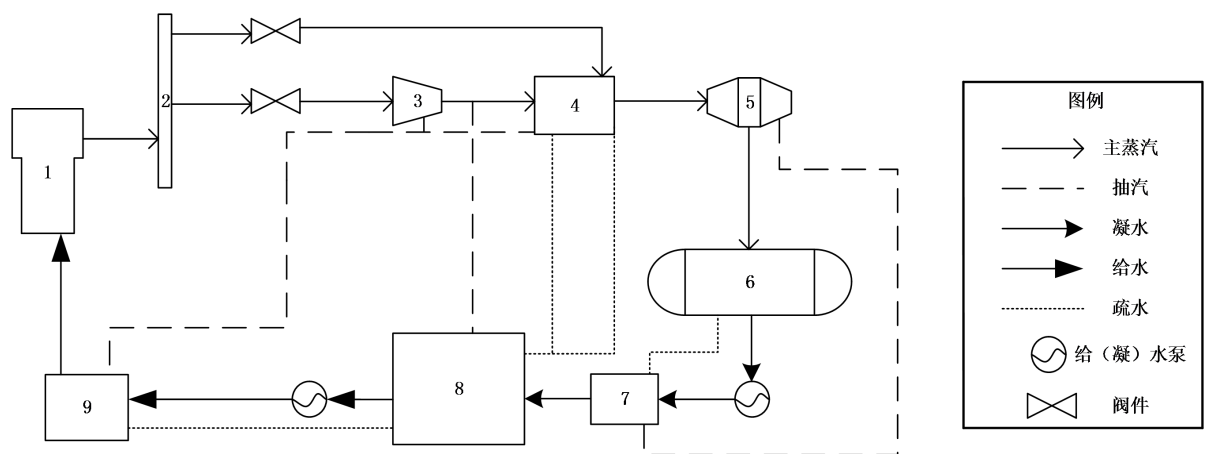
式中:

$$[\alpha_i] = [\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_m]^T \tag{4}$$

$$[h_i^d] = [h_1 - h_n, \dots, h_i - h_n, \dots, h_m - h_n]^T \tag{5}$$

给水加热器热平衡方程式:

如图 2 所示, 系统中的给水加热器存在以下热平衡关系:



1——蒸汽发生器; 2——蒸汽母管; 3、5——高、低压缸; 4——汽水分离再热器; 6——凝汽器; 7、8、9、10——1#、2#、3#、4#低压给水加热器; 11——除氧器; 12#、13#——高压给水加热器。

Figure 2. Schematic diagram of thermal system
图 2. 热力系统原理图

$$\alpha_1 q_1 = \tau_1 \quad (6)$$

$$\alpha_1 \gamma_2 + \alpha_2 q_2 = \tau_2 \quad (7)$$

$$(\alpha_1 + \alpha_2) \gamma_3 + \alpha_3 q_3 = \tau_3 \quad (8)$$

$$\alpha_4 q_4 = (1 - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1) \tau_4 \quad (9)$$

$$\alpha_4 \gamma_5 + \alpha_5 q_5 = (1 - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1) \tau_5 \quad (10)$$

$$\alpha_6 q_6 = (1 - \alpha_5 - \alpha_4 - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1) \tau_6 \quad (11)$$

$$\alpha_7 q_7 = (1 - \alpha_5 - \alpha_4 - \alpha_3 - \alpha_2 - \alpha_1) \tau_7 \quad (12)$$

联立以上各式, 并将其写成标准的矩阵形式, 可得

$$A[\alpha_i] = [b_i] \quad (13)$$

式中矩阵 A 是热力系统的结构矩阵; $[\alpha_i]$ 是抽汽系数向量; $[b_i]$ 是特征向量。其中, 矩阵 A 的每一行代表一个加热器的热平衡方程, 每一列代表了每股抽汽所经历的放热过程; 向量 $[b_i]$ 表示给水从凝汽器开始经过多级加热器的升温过程。

由于需要预处理的参数较多, 逐个设备计算耗时较长。在将源于热平衡法的矩阵法与源于效率计算法的定功率法适当结合的基础上, 结合质量守恒定律, 利用 MATLAB 进行编程, 一次性快速求解满负荷下的常规岛仿真模型的热力参数。

2.2. 非满负荷下的热力参数计算方法

针对满负荷情况下核电站常规岛热力参数的计算方法不适用于非满负荷下的情况。在任何负荷下, 核电站发电与其汽轮机所处工况密切相关, 弗留格尔公式是汽轮机级组在变工况状态下的平衡关系式, 如下所示:

$$\frac{G_2}{G_1} = \sqrt{\frac{p_{21}^2 - p_{22}^2}{p_{11}^2 - p_{12}^2} \frac{T_{02}}{T_{01}}} \quad (14)$$

上式中, G_1 、 G_2 分别为变工况前后机组通流量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; T_{01} 、 T_{02} 分别为变工况前后级组前蒸汽温度, 单位为 K ; p_{21} 、 p_{22} 分别为变工况后的级前与级后压力, 单位为 Pa ; p_{11} 、 p_{12} 分别为变工况前的级前与级后压力, 单位为 Pa 。

然而, 该公式没有考虑到核电站汽轮机通流介质不是理想气体, 导致公式精度差, 需要结合范德瓦尔斯方程改造弗留格尔公式, 获得筛选仿真数据的公式以避免过高或过低数据影响分析, 如下所示:

$$f(p, G, T, x)_i = \frac{G_{2i}}{G_{1i}} \sqrt{\frac{\left(p_{21} + \frac{a_{p_{21}}}{v_{m_2 1}^2}\right)^2 - \left(p_{22} + \frac{a_{p_{22}}}{v_{m_2 2}^2}\right)^2}{\left(p_{11} + \frac{a_{p_{11}}}{v_{m_1 1}^2}\right)^2 - \left(p_{12} + \frac{a_{p_{12}}}{v_{m_1 2}^2}\right)^2} \frac{T_{02}}{T_{01}}} \quad (15)$$

$$f_c = \left| \frac{f(p, G, T, x)_a}{f(p, G, T, x)_b} - 1 \right| \quad (16)$$

其中: x ——湿蒸汽状态干度; a_p ——相应状态范德瓦氏参数; v_m ——相应状态比体积; i 、 a 、 b 、 c ——顺序

与位置; $f(p, G, T, x)$ ——契合度; f_c ——偏离度。

在仿真模型调试完毕后, 先进行不同负荷下的稳态仿真。在利用 Excel 插件, 结合上式计算得到每组仿真数据的契合度 $f(p, G, T, x)_i$ 与每个数据之间的偏离度 f_c 后, 通过 MATLAB 循环程序, 建立 f_c 的行向量或列向量, 得到概率不低于 90% 的情况下, 每组数据中汽轮机级组热力参数的偏离度小于设定值 θ 的相应时刻的测得的全部数据, 求出均值作为仿真数据。经过实践, 当设定 $\theta = 1.0 \times 10^{-2}$ 时, 可保证达到要求。

3. 仿真结果与分析

3.1. 典型负荷稳态仿真

为验证核电站常规岛热力系统仿真模型在稳定工况下的精度, 测量 100%、90% 和 70% 负荷下主要设备的流量、压力、温度等重要热工参数, 与实际运行参数对比, 结果如表 1、表 2 和表 3 所示[8] [9]。

Table 1. 100% Load steady-state simulation results

表 1. 100% 负荷稳态仿真结果

设备	热工参数	仿真结果	运行参数[9]	误差(%)
高压缸	进汽流量(kg·s ⁻¹)	1516.8	1532.7	-1.037
	进汽压力(MPa)	6.69	6.51	2.765
	进汽温度(°C)	275.9	276.7	-0.289
	排汽压力(MPa)	0.795	0.783	1.533
	排汽流量(kg·s ⁻¹)	1270.906	1274.138	-0.254
低压缸	进汽流量(kg·s ⁻¹)	1002.063	1011.634	-0.946
	进汽压力(MPa)	0.73	0.74	-1.351
	进汽温度(°C)	259.3	265.1	2.188
	排汽压力(kPa)	7.8	7.5	4.000
	排汽流量(kg·s ⁻¹)	849.047	829.412	2.367
冷凝器	进汽流量(kg·s ⁻¹)	948.84	961.44	-1.131
	进汽温度(°C)	40.8	40.5	0.741
	进汽压力(kPa)	7.7	7.5	2.667
	出口温度(°C)	40.51	40.32	0.471
除氧器	耗汽量(kg·s ⁻¹)	67.2	64.7	3.864
	出口流量(kg·s ⁻¹)	1602.4	1613.4	-0.682

Table 2. 90% Load steady-state simulation results

表 2. 90% 负荷稳态仿真结果

设备	热工参数	仿真结果	运行参数[9]	误差(%)
高压缸	进汽流量(kg·s ⁻¹)	1328.2	1378.5	-3.649
	进汽压力(MPa)	6.76	6.54	3.211
	进汽温度(°C)	270.5	281.5	-3.908
	排汽压力(MPa)	0.773	0.739	4.601
	排汽流量(kg·s ⁻¹)	1160.980	1200.226	-3.270

Continued

低压缸	进汽流量(kg·s ⁻¹)	1000.630	1048.475	-4.563
	进汽压力(MPa)	0.74	0.71	4.225
	进汽温度(°C)	265.8	279.3	-4.834
	排汽压力(kPa)	5.6	5.3	5.660
	排汽流量(kg·s ⁻¹)	800.155	865.969	-7.600
冷凝器	进汽流量(kg·s ⁻¹)	826.33	900.91	-8.278
	进汽温度(°C)	34.61	33.9	2.094
	进汽压力(kPa)	5.5	5.3	3.774
	出口温度(°C)	34.04	32.51	4.706
除氧器	耗汽量(kg·s ⁻¹)	48.8	44.4	9.910
	出口流量(kg·s ⁻¹)	1414.3	1460.1	-3.137

Table 3. 70% Load steady-state simulation results

表 3. 70% 负荷稳态仿真结果

设备	热工参数	仿真结果	运行参数[9]	误差(%)
高压缸	进汽流量(kg·s ⁻¹)	1115.4	1098.7	1.520
	进汽压力(MPa)	6.84	6.58	3.951
	进汽温度(°C)	284.8	283.8	0.524
	排汽压力(MPa)	0.738	0.681	8.370
	排汽流量(kg·s ⁻¹)	977.527	940.447	3.943
低压缸	进汽流量(kg·s ⁻¹)	749.526	817.203	-8.282
	进汽压力(MPa)	0.72	0.66	9.091
	进汽温度(°C)	264.6	273.9	-3.395
	排汽压力(kPa)	5.4	5.0	8.000
	排汽流量(kg·s ⁻¹)	586.120	640.636	-8.510
冷凝器	进汽流量(kg·s ⁻¹)	678.43	738.84	-8.176
	进汽温度(°C)	33.9	31.8	6.604
	进汽压力(kPa)	5.3	5.0	6.000
	出口温度(°C)	33.45	31.75	5.354
除氧器	耗汽量(kg·s ⁻¹)	28.5	31.0	-8.065
	出口流量(kg·s ⁻¹)	1288.4	1238.6	4.021

如上所示, 由于模型中的各个模块在满负荷状态下进行预处理后按顺序连接, 当负荷降低时, 稳态工况仿真误差超过 5% 的热工参数越多, 热力参数整体偏差程度上升。该模型在中低负荷下进行稳态仿真的可靠性有待提升。然而, 重要热工参数的误差的绝对值未超过 10%, 证明该模型在稳态仿真时精度可以接受。

3.2. 升负荷动态仿真

系统在 70% 负荷下稳定运行 2 分钟后, 进行升负荷操作, 直至满负荷下稳定运行[10]-[15]。

3.2.1. 主要设备流量的变化规律

高压缸的进气流量、低压缸的进气流量、除氧器出口给水流量和蒸汽发生器新蒸汽流量变化如图 3 所示, 曲线由上到下依次是除氧器出口给水流量变化曲线、高压缸的进汽流量变化曲线、低压缸的进汽流量变化曲线和蒸汽发生器的产汽流量变化曲线。

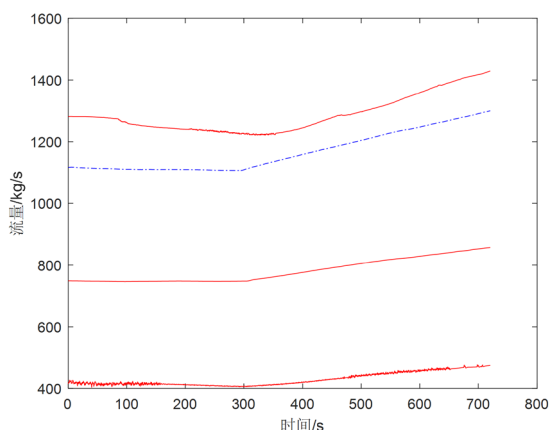


Figure 3. Flow variation

图 3. 流量变化情况

如图 3 所示, 升负荷时, 核岛冷却剂吸热量增加, 蒸汽发生器中二回路侧获得热量随之增加。同时, 高压缸的进汽调节阀开度增大。蒸汽发生器产气流量上升, 整个常规岛的蒸汽流量、给水流量随之上升。蒸汽发生器产生的新蒸汽经过高压缸与低压缸做功后, 在冷凝器中凝结, 在除氧器中加热除氧, 以给水形式回到蒸汽发生器。因此, 升负荷时, 蒸汽发生器的产汽流量最先变化, 高压缸的进汽流量、低压缸的进汽流量和除氧器给水流量的变化相对滞后。

3.2.2. 主要设备压力的变化规律

蒸汽发生器新蒸汽压力、高压缸的进汽压力、低压缸的进汽压力和除氧器出口给水压力变化曲线如图 4 所示, 其中图 4(a)由上至下依次是新蒸汽压力与高压缸的进汽压力, 图 4(b)由上至下依次是低压缸的进汽压力与除氧器出口给水压力。

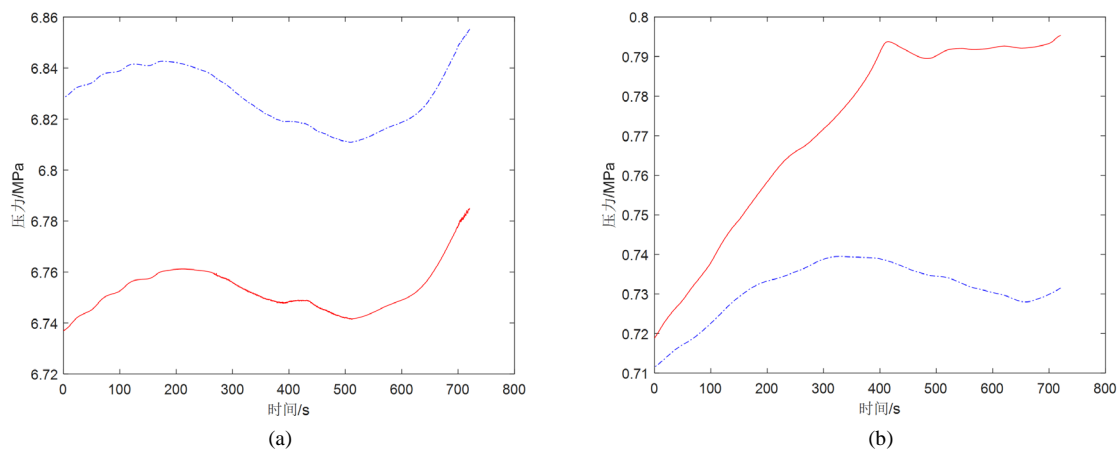


Figure 4. Pressure variation; (a) The new steam pressure and the admission pressure of the high-pressure cylinder, (b) The inlet pressure of the low-pressure cylinder and the outlet feed pressure of the deaerator

图 4. 压力变化规律; (a) 新蒸汽压力与高压缸的进汽压力, (b) 低压缸的进汽压力与除氧器出口给水压力

如图 4(a) 中所示, 升负荷时, 高压缸的进汽调节阀开度增大, 新蒸汽得到释放, 蒸汽发生器新蒸汽压力先于高压缸的进气压力小幅下降。由于负荷与高压缸的进汽调节阀开度的调节是连续性的, 蒸汽发生器新蒸汽压力和高压缸的进汽压力在升负荷过程中产生轻微波动, 达到满负荷状态后逐渐恢复平稳。

在实际的核电站中, 除氧器运行压力略低于低压缸进汽压力。由水蒸汽的焓熵图可知, 在干度变化值不变的情况下, 比熵越小, 压力变化曲线越陡。同样, 负荷升高, 高压缸的进汽压力下降, 在进汽干度基本不变, 即不超过 1% 的情况下(可忽略不计), 进汽比焓增大。在理想状态下, 蒸汽在汽轮机内绝热膨胀, 压力下降。因此, 当汽轮机进、出口蒸汽干度差值基本不变时, 比熵越大, 汽轮机进汽与排汽压力的差值越小, 排汽压力随之上升。实际情况下汽轮机的做功效率对压力和比熵的影响可忽略不计。因此, 高压缸排汽压力在升负荷时逐渐增大, 直至满负荷下稳定运行后趋于稳定。由于系统中, 低压缸的进汽压力与除氧器出口给水压力直接受到高压缸排汽压力的影响, 二者变化如图 4(b) 中所示。

4. 结语

以大亚湾核电站常规岛热力系统为仿真对象, 基于 SimStore 软件包, 搭建仿真模型。在 100%、90% 和 70% 负荷下进行稳态仿真时, 相较于实际运行参数, 大部分热工参数的误差在 10% 以内, 精度可以接受; 对系统进行升负荷瞬态仿真, 主要设备的流量与压力变化符合逻辑。由于各设备按满负荷状态下质量守恒和能量守恒进行预处理与连接, 仿真系统在中低负荷状态下稳定运行时误差超过 5% 的热工参数较多, 有待进一步改进。

基金项目

国家重点研发项目课题(2017YFB0503302)、湖北省科技创新专项和中央高校基本科研专项(413000060)资助。

参考文献

- [1] 许世杰, 林萌, 杨燕华, 等. 基于核电站完整二回路的数学模型[J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 50-53.
- [2] 严思伟. 基于 RELAP5 的核电机组常规岛热力系统建模[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [3] 张帆. 基于 RELAP5 的压水堆二回路全范围模拟及分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [4] 郭亮, 孙宝芝, 宋志宇, 等. 基于 C++Builder 的核电站二回路热力系统建模与实时仿真[J]. 电力建设, 2013, 34(6): 1-6.
- [5] 叶涛, 张燕平. 热力发电厂[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [6] 彭敏俊, 田兆斐. 核动力装置热力分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012.
- [7] 费景洲, 刘友, 王金鑫. 测试技术与虚拟仿真实验教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
- [8] 张小勇, 刘琦, 杨志平, 等. AP1000 核电厂二回路热力系统计算与分析[J]. 热动力工程, 2018, 33(9): 107-113.
- [9] 苏森林, 杨辉玉. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
- [10] 聂万远, 方伟明. 船用核动力装置全系统特性仿真分析研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(1): 94-98.
- [11] 李勇, 杨磊磊. 汽轮机变工况各级热力参数计算方法研究[J]. 汽轮机技术, 2015, 57(5): 321-325+340.
- [12] 祁琳, 赵守智, 王晓坤, 等. 中国示范快堆常规岛图形建模与仿真分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(11): 1982-1988.
- [13] El-Sefy, M., Ezzeldin, M., El-Dakhkhni, W., Wiebe, L. and Nagasaki, S. (2019) System Dynamics Simulation of the Thermal Dynamic Processes in Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.04.017>
- [14] Jewer, S., Buchan, A.G., Pain, C.C. and Cacuci, D.G. (2014) An Immersed Body Method for Coupled Neutron Trans-

port and Thermal Hydraulic Simulations of PWR Assemblies. *Annals of Nuclear Energy*, **68**, 124-135.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.12.018>

- [15] Wang, Y., Li, Y., Cao, Y. and Zhang, T. (2018) Thermal-Fluid Coupling Simulation of Ventilation Cooling System of Generator Based on FLOWMASTER. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, **35**, 516-521.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nst@hanspub.org