

基于设计数据集的核电热力参数计算模块开发

杨 宵, 许恺丽, 谢政权

核动力运行研究所, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年3月27日; 录用日期: 2023年4月3日; 发布日期: 2023年4月26日

摘 要

核电机组二回路热力性能的可靠性和经济性正成为核电运行评估分析重点。本文基于热力学机理及设计数据集开发稳态计算的某M310型机组核电二回路热力参数计算模块, 通过输入汽轮机初、终参数和少量约束条件下实施系统整体热力计算, 最终获取系统详细热力参数和性能指标。基于该模块可实现核电机组二回路热力系统计算并进行变工况计算分析, 为后续热力性能监督平台等软件开发提供理论依据。

关键词

核电机组, 二回路, 热力性能分析, 设计数据集

Development of Nuclear Power Thermal Parameter Calculation Module Based on Design Dataset

Xiao Yang, Kaili Xu, Zhengquan Xie

Institute of Nuclear Power Operations, Wuhan Hubei

Received: Mar. 27th, 2023; accepted: Apr. 3rd, 2023; published: Apr. 26th, 2023

Abstract

The reliability and economy of the thermal performance of the second circuit of nuclear power units are becoming the focus of nuclear power operation evaluation and analysis. Based on the thermodynamic mechanism and design data set, this paper develops a steady-state calculation module for the second circuit of nuclear power of an M310 unit, and implements the overall thermal calculation of the system by entering the initial and final parameters of the steam turbine and

a small number of constraints, and finally obtains the detailed thermal parameters and performance indicators of the system. Based on this module, the calculation of the second-circuit thermal system of nuclear power units and the calculation and analysis of variable working conditions can be realized, which provides a theoretical basis for the subsequent software development of thermal performance supervision platform and other software.

Keywords

Nuclear Power Units, Second Circuit, Thermal Performance Analysis, Design Dataset

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 前言

截至 2022 年 8 月底,我国商运核电机组 53 台,总装机容量 5559 万千瓦,另外在建核电机组 23 台,总装机容量 2419 万千瓦,在建核电机组规模保持高速增长[1]。根据十四五规划,我国将会继续加快推进能源革命,提高能源供给保障能力,“加快发展非化石能源”,“建设华龙一号、国和一号、高温气冷堆示范工程、积极有序推动沿海三代核电建设”。

随着国内核电装机容量的快速上升,如何分析评价机组二回路热力性能,提高机组运行可靠性和经济性,并为机组二回路系统及设备故障诊断提供计算基础成为了核电运行评估分析的重点[2]。通过对中核集团旗下电厂调研,发现没有一套统一的可实现机组出力在线监测及诊断的软件工具,处理过程耗时耗力不够智能化,结果分析周期较长,无法实时响应机组状态变化,缺乏热力性能监督相关工具,缺少机组模型用于优化分析。

本文基于上述问题,开展针对某 M310 型机组二回路核电热力参数计算模块研究。开发基于热力学机理建模(质量守恒、能量守恒、焓熵物性库等)的稳态计算数学模型,满足核电机组二回路热力系统计算,基于该计算功能,可根据机组设计数据集和实际运行数据计算二回路主要设备热力参数,获取能够表征二回路关键工艺的隐变量,实现二回路主要热力设备态势感知,掌握二回路主要设备状态及性能,为后续热力性能监督平台等软件开发提供理论依据。

2. 热力参数计算的范围和目标

汽轮机热力系统参数计算范围,包括汽轮机本体、回热加热器系统、除氧器、凝汽器、循环水系统及其相关辅助设备,是多系统、多设备的耦合计算。如图 1 为某 M310 型机组二回路流程图。

汽轮机热力系统参数计算的目标,输入汽轮机初、终参数和少量约束条件情况下,通过建立的热力系统机理模型,实施系统整体热力计算,最终获取系统详细热力参数和性能指标数据。

3. 核电厂二回路热力系统主要特点

核电厂二回路热力系统(核电厂汽轮机热力系统)有如下主要特点[3]:

1) 焓-熵图上,汽轮机汽态线分布在饱和线附近,其中高压缸汽态线处于湿蒸汽区,中压缸汽态线处于过热蒸汽区,低压缸汽态线横跨过热蒸汽和湿蒸汽两区;

2) 汽水分离再热器 MSR 的热源来自主蒸汽抽汽和高压缸抽汽,MSR 与高压缸两者的热力参数存在

强耦合性；

3) 低压缸抽汽处布置了抽水出口，低负荷下存在部分抽水口无抽水工况。

以上特点有别于一般火电厂汽轮机系统，对核电二回路热力参数建模和计算方式存在较大影响。

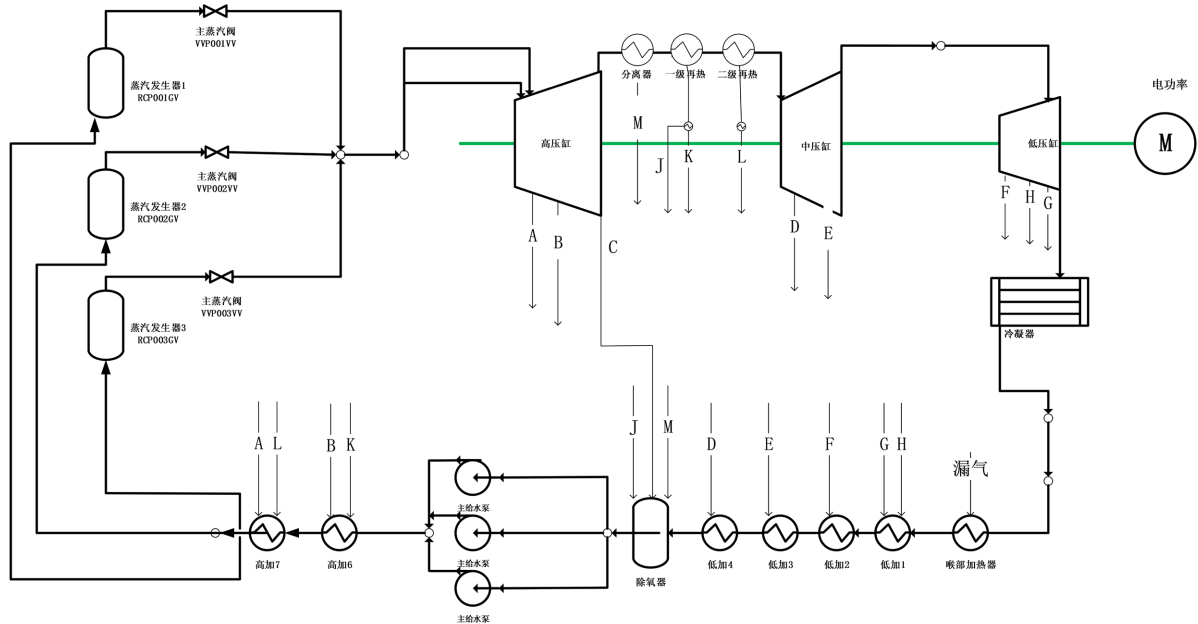


Figure 1. Flow chart of second circuit of M310 unit

图 1. 某 M310 型机组二回路流程图

4. 热力参数计算开发及实现

4.1. 输入模块

输入模块的功能是输入热力系统的初、终参数以及少量约束，以设定软件计算的工况。包括如下参数：

- 1) 主蒸汽压力(调门前)；
- 2) 主蒸汽干度(调门前)；
- 3) 主蒸汽流量(高加出口给水流量)；
- 4) 高温再热器出口蒸汽温度；
- 5) 凝汽器压力(排汽压力)；
- 6) 给水泵出口压力；
- 7) 给水泵出口水温度。

后续如果能获取主汽门、给水泵等设备的相关特性数据，以上输入参数还可以进一步减少。

4.2. 汽轮机级组

从主汽门开始，依次按抽汽位置将汽轮机本体分为 9 个级组：

- 1) 高压缸 A 抽汽前级组；
- 2) 高压缸 B 抽汽前级组；
- 3) 高压缸 C 抽汽前级组；
- 4) 中压缸 D 抽汽前级组；

- 5) 中压缸 E 抽汽前级组;
- 6) 低压缸 F 抽汽(水)前级组;
- 7) 低压缸 H 抽汽(水)前级组;
- 8) 低压缸 G 抽汽(水)前级组;
- 9) 低压缸排汽级组。

每级组入口参数由前一模块的出口与相应轴封、抽汽(水)模块结合,按质量、能量守恒计算得到。每个级组的出口参数计算分为两部分:首先,按弗留格尔公式计算得到出口压力[4],再依据标准工况同级组的汽态线特性计算得到出口比焓、干度、比熵等参数,弗留格尔公式在变工况前后未达到临界状态且考虑温度修正时,公式如下。

$$\frac{G_1}{G} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_0^2 - p_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \quad \text{公式(1)}$$

其中 G 、 G_1 为变工况前后通过级组的流量, P_0 和 P_2 为变工况前级组的前后压力, P_{01} 和 P_{21} 为变工况后级组的前后压力, T_0 和 T_{01} 为变工况前后级组前的绝对温度。

4.3. 汽水分离再热器模块

由汽水分离器、一级再热器和二级再热器三个模块构成,三个模块的管侧参数按顺序连接,两级再热器的壳侧参数需要迭代计算。汽水分离器模块主要计算其出口蒸汽流量和 M 抽水流量,出口蒸汽干度按热平衡图设定。

一级再热器壳侧入口蒸汽来自高压缸抽汽和二级再热器壳侧出口蒸汽,这两部分的流量需要先假设后校验。一级再热器热平衡计算按如下图 2 步骤进行。

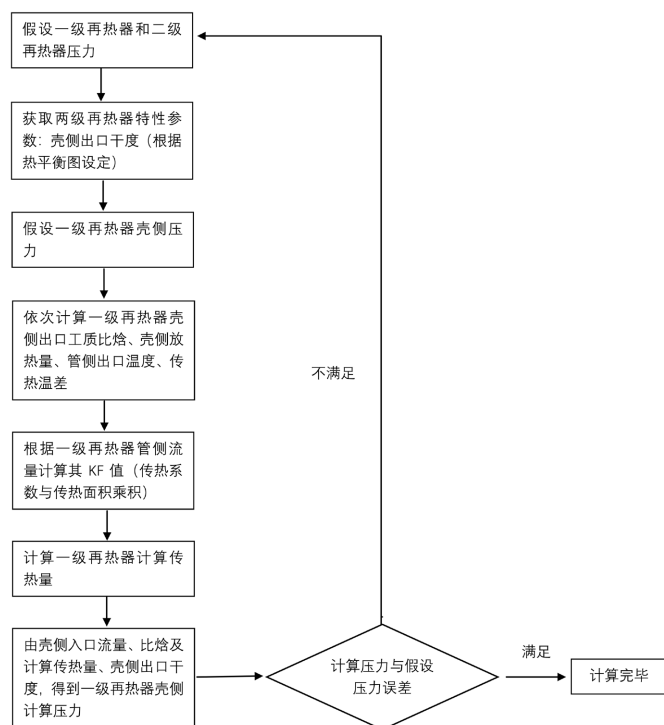


Figure 2. Procedure for calculating heat balance of primary reheat

图 2. 一级再热器热平衡计算步骤

由于二级再热器热管侧出口温度是输入量(约束), 二级再热器平衡计算方式与一级再热器不同, 步骤如下:

- 1) 根据管侧进出口参数, 计算二级再热器管侧吸热量;
- 2) 根据二级再热器管侧流量计算其 KF 值(传热系数与传热面积乘积);
- 3) 计算二级再热器传热温差;
- 4) 计算二级再热器上端差及饱和温度;
- 5) 计算壳侧出口比焓;
- 6) 结合主蒸汽比焓, 计算壳侧入口蒸汽流量(主蒸汽抽汽流量)。

二级再热器热平衡计算获得的主蒸汽抽汽流量, 将与前面计算中假设值进行比较, 确定新的迭代值。

4.4. 凝结水泵模块

凝结水泵模块整合了凝泵性能曲线数据, 模块计算分为两部分: 一是根据凝结水流量确定运行状态(单泵、双泵); 二是由凝结水量计算凝泵出口压力。

4.5. 加热器模块

加热器模块包括有疏水冷却的加热器和无疏水冷却的加热器两类数学模型, 涵盖了系统中所有的回热加热设备, 包括: 1 个轴封加热器、4 个低压加热器和 2 个高压加热器。在实际计算时每个加热器设备构成一个计算模块, 共计 7 个模块。

有疏水冷却器加热器的热力计算步骤如图 3 所示。

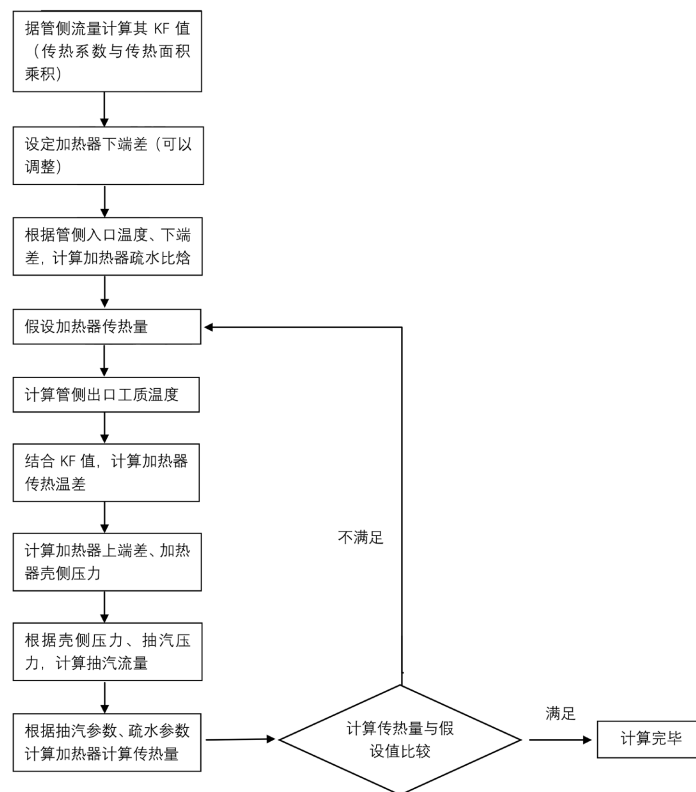


Figure 3. Procedure for calculating heat balance of heater with drain cooler

图 3. 有疏水冷却器加热器热平衡计算步骤

最后的抽汽流量将与前面级组计算中的假设值进行校验和迭代计算。
无疏水冷却器加热器的热力计算步骤如图 4 所示。

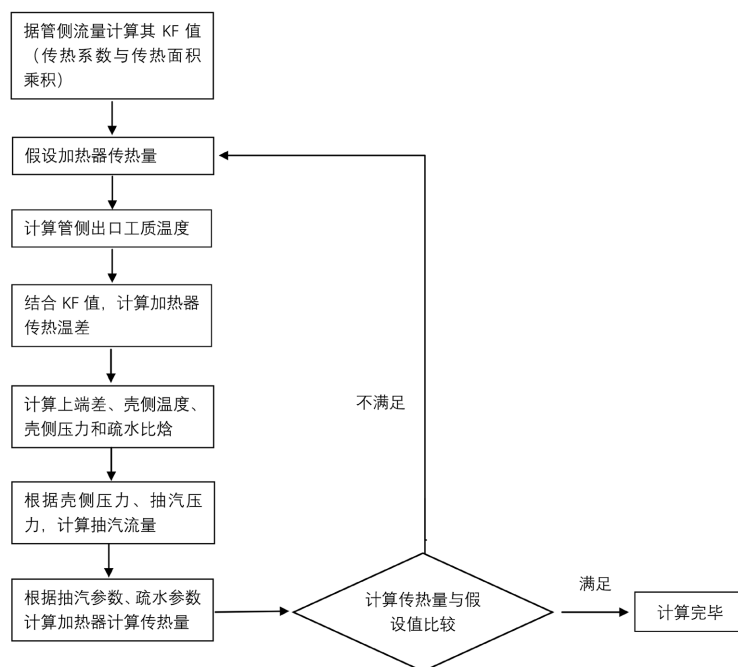


Figure 4. Procedure for calculating heat balance of heater without drain cooler
图 4. 无疏水冷却器加热器热平衡计算步骤

最后的抽汽流量将与前面级组计算中的假设值进行校验和迭代计算。

4.6. 抽汽模块

抽汽模块是对汽轮机各级抽汽(水)参数计算的封装。这样处理主要为了便于抽汽参数的迭代计算。模块包括如下子模块的参数(流量、压力、干度等)计算:

- 1) 主蒸汽去二级再热器抽汽;
- 2) 高压缸 A 抽汽;
- 3) 高压缸去一级再热器抽汽;
- 4) 高压缸 B 抽汽;
- 5) 高压缸 C 抽汽(高压缸排汽);
- 6) 中压缸 D 抽汽;
- 7) 中压缸 E 抽汽(中压缸排汽);
- 8) 低压缸 F 抽汽、I 抽水;
- 9) 低压缸 H 抽汽、H-H 抽水;
- 10) 低压缸 G 抽汽、G-H 抽水。

4.7. 一回路热力计算模块

一回路热力计算模块主要根据一回路进出口工质参数计算其在核堆中的吸热量, 结合二回路给水参数和主蒸汽压力, 最终计算得到主蒸汽干度。

4.8. 机组特性数据模块

机组特性数据主要包括：

- 1) 作为标准工况的汽轮机级组进口参数(流量、压力、温度、干度等)；
- 2) 加热器传热特性数据(主要是 KF)；
- 3) 轴封系统特性数据；
- 4) 抽汽(水)流量 - 阻力特性、干度特性数据；
- 5) 用于迭代计算的初值序列。

4.9. 性能计算模块

二回路性能计算是在整个二回路热力系统参数迭代计算完成后进行的。

主要性能指标参考火电机组汽轮机系统[5]，主要包括：级组内效率、级组内功率、高压缸效率、中压缸效率、低压缸效率、汽轮机效率、热耗率、汽耗率等，如下表 1 所示。

Table 1. Main Parameters of Power plant performance calculation

表 1. 电厂性能计算主要参数

机组/全厂性能	厂用电率、功率因数、补给水率、电功率、汽耗率、热耗率
汽轮机性能	低压缸排汽计算、高/中/低压缸效率，汽轮机循环效率、汽轮机热耗率
给水加热器性能	加热器端差、给水温升、抽汽流量等
凝汽器性能	端差、过冷度、循环水温升、清洁系数

5. 计算模块验证及结果

5.1. 验证方法

软件验证的目的是检验核电厂二回路热力参数计算模型的正确性和软件中迭代算法设置的稳定性和有效性。将机组热平衡图提供的 T-MCR 工况作为标准工况，按软件输入模块规定，分别输入热平衡图中的 90%工况、70%工况和 50%工况的接口参数，依次对比各工况的软件计算参数数据与热平衡图相应数据吻合情况(验证正确性)。计算参数与设计参数对比，偏差率不超出±2%。下图表 2 为 90%工况计算初始值输入。

5.2. 验证结果

- 1) 90%标准工况验证

Table 2. Input of the initial value of 90% working conditions

表 2. 输入 90%工况初始值

项目	单位	输入数值
主蒸汽压力(调门前)	MPa	6.61
主蒸汽干度(调门前)		0.9961
高温再热器出口蒸汽温度	°C	270.7
高加出口给水流量(主蒸汽流量)	kg/h	5152680
高加出口给水压力	MPa	7.723
高加出口给水温度	°C	219.77

Continued

给水泵出口压力	MPa	8.529
给水泵出口水温度	℃	173.32
凝汽器压力(排汽压力)	kPa	4.8
凝结水过冷度	℃	0
机械效率	-	0.987

基于上述计算输入，经过热力参数计算模块计算获得计算值，与设计值对比如表 3 所示。

Table 3. Comparison results between parameter calculation values and design values under 90% working conditions
表 3. 90%工况下参数计算值与设计值对比结果

序号	参数名称	单位	计算值	设计值	偏差率
1.	A 抽气前级组出口压力	MPa	2.452673897	2.452	0.03%
2.	A 抽气前级组出口比焓	kJ/kg	2637.643949	2638.9	-0.05%
3.	A 抽气前级组出口干度	-	0.910996397	0.9113	-0.03%
4.	B 抽气前级组出口压力	MPa	1.651095315	1.650	0.07%
5.	B 抽气前级组出口比焓	kJ/kg	2576.526376	2577.2	-0.03%
6.	B 抽气前级组出口干度	-	0.887348909	0.8875	-0.02%
7.	C 抽气前级组出口压力	MPa	0.862390804	0.861	0.16%
8.	C 抽气前级组出口比焓	kJ/kg	2485.234973	2485.3	0.00%
9.	C 抽气前级组出口干度	-	0.859514706	0.8595	0.00%
10.	汽水分离器进口蒸汽流量	kg/h	3979894.004	3980198	-0.01%
11.	高压缸排汽压力	MPa	0.862390804	0.852	1.22%
12.	高压缸排汽比焓	kJ/kg	2485.234973	2485.3	0.00%
13.	高压缸排汽干度	-	0.859514706	0.8598	-0.03%
14.	分离器出口压力	MPa	0.84539207	0.844	0.16%
15.	分离器出口干度	-	0.9949575	0.995	0.00%
16.	分离器出口蒸汽比焓	kJ/kg	2760.258207	2760.3	0.00%
17.	分离器出口饱和水比焓(M 抽水)	kJ/kg	731.1112396	730.8	0.04%
18.	分离器出口蒸汽流量	kg/h	3440473.579	3440859	-0.01%
19.	分离器出口饱和水流量(M 抽水)	kg/h	539420.4256	539339	0.02%
20.	低再管侧流量	kg/h	3440473.579	3440859	-0.01%
21.	低再管侧出口蒸汽比焓	kJ/kg	2867.606743	2867.6	0.00%
22.	低再管侧出口压力	MPa	0.837292597	0.836	0.15%
23.	低再管侧出口蒸汽温度	℃	213.0540154	213	0.03%
24.	低再 J 饱和蒸汽流量	kg/h	6291.609474	6292	-0.01%
25.	低再 J 饱和蒸汽比焓	kJ/kg	2801.433984	2801.4	0.00%
26.	低再 K 饱和水流量	kg/h	220842.3065	220851	0.00%
27.	低再 K 饱和水比焓	kJ/kg	950.1277289	949.8	0.03%
28.	低压缸排汽流量	kg/h	2668214.622	2668048	0.01%
29.	1 号低加管侧进口水温度	℃	32.33941985	32.6	-0.80%

Continued

30.	1号低加管侧进口水焓	kJ/kg	137.7727278	137.7	0.05%
31.	1号低加管侧出口水焓	kJ/kg	250.1918548	250.2	0.00%
32.	1号低加管侧出口水温度	℃	59.32349148	59.5	-0.30%
33.	1号低加H抽汽流量	kg/h	14461.95002	14461	0.01%
34.	1号低加H抽汽比焓	kJ/kg	2553.137482	2554.3	-0.05%
35.	1号低加H-H抽水流量	kg/h	34350.93685	34348	0.01%
36.	1号低加H-H抽水比焓	kJ/kg	342.6810192	343.9	-0.35%
37.	1号低加G抽汽流量	kg/h	128292.6897	128279	0.01%
38.	1号低加G抽汽比焓	kJ/kg	2485.804989	2488.7	-0.12%
39.	1号低加G-H抽水流量	kg/h	49729.84511	49725	0.01%
40.	1号低加G-H抽水比焓	kJ/kg	265.7302898	265.3	0.16%
41.	6号高加管侧出口水焓	kJ/kg	841.372562	841.1	0.03%
42.	6号高加管侧出口水温度	℃	196.9119379	196.9	0.01%
43.	电功率	kW	971206.5088	971301	-0.01%

根据表3可知, 90%工况的数据最大偏差参数为高压缸排汽压力, 偏差率为1.22%, 95.3%的数据偏差小于 $\pm 0.5%$, 所有参数偏差均在 $\pm 2%$ 要求内, 与设计参数相比基本吻合, 满足数据准确性验证要求。另外对比70%及50%工况70%工况最大偏差为-1.05%, 50%工况最大偏差为1.21%, 且3个工况下均有90%以上的数据偏差率在 $\pm 0.5%$ 以内, 满足标准工况数据准确性验证要求。

6. 结论

本文基于热力学机理及设计数据集开发稳态计算的某M310型机组核电二回路热力参数计算模块, 通过输入汽轮机初、终参数和少量约束条件情况下实施系统整体热力计算, 最终获取系统详细热力参数和性能指标。模块计算结果与90%、70%、50%等标准工况数据对比, 满足计算精度。基于该模块可实现核电机组二回路热力系统计算并进行变工况计算分析, 为实现二回路主要热力设备态势感知, 掌握二回路主要设备状态及性能打下有力基础。

参考文献

- [1] 张廷克, 李闽榕, 尹卫平, 等. 中国核能发展报告[R]. 2022.
- [2] 刘琦. 核电机组二回路系统热力计算与性能分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学; 华北电力大学(北京), 2018.
- [3] 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]. 热能动力工程, 2018, 33(9): 107-113.
- [4] 徐大懋, 邓德兵, 王世勇, 等. 汽轮机的特征通流面积及弗留格尔公式改进[J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 473-477.
- [5] 方轶. 大型火电机组在线性能监测系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2011.