

HPR1000 Feedwater Heater Drain Recovery System Simulation

Zhengquan Xie

China Nuclear Power Operation Technology Corporation, LTD, Wuhan Hubei
Email: xiezq@cnpn.com.cn

Received: Mar. 18th, 2019; accepted: Apr. 1st, 2019; published: Apr. 8th, 2019

Abstract

Hualong One (Fuqing5/6 Nuclear Power Unit) is the first HPR1000 (Hua-long Pressurized Reactor) project in the world. Its spare FSS simulator is based on the RINSIM2.0-Windows platform developed by CNPO. This article mainly introduces the mathematical mode of flow nets on RINSIM2.0, then takes the HPR1000 feedwater heater drain recovery system as an example, particularly presents the whole process of flow network modeling and testing using graphic modeling tools.

Keywords

HPR1000, Simulation, TFR, RINSIM2.0

HPR1000给水加热器疏水回收系统仿真

谢政权

中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉
Email: xiezq@cnpn.com.cn

收稿日期: 2019年3月18日; 录用日期: 2019年4月1日; 发布日期: 2019年4月8日

摘要

HPR1000 (Hua-long Pressurized Reactor)是中核集团和中广核集团联合研发的先进压水堆, 华龙一号(福清5/6号机组)作为国际首个HPR1000项目, 其全范围模拟机基于CNPO的RINSIM2.0-Windows仿真平台开发。本文主要介绍了RINSIM 2.0平台下流体网络的建模原理, 并以HPR1000给水加热器疏水回收系统(TFR: Feed-water Heaters Drain Recovery System)为例, 详细介绍了图形化建模工具、工艺系统建模及分系统测试过程。

关键词

HPR1000, 仿真, TFR, RINSIM 2.0

Copyright © 2019 by author(s) 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

全球化石能源日趋紧张,核能、太阳能、风能等新能源形式的应用愈来愈多,其中核能以其高稳定性得到广泛应用。福岛核电事故后核安全受到越来越多的关注,全范围培训模拟机无疑扮演着举足轻重的角色,在操作员培训和取证考试中必不可少。全范围模拟机特指用于操纵人员初始培训、再培训以及考试的核电厂模拟机。是以某一特定机组为参考机组。模拟范围应使操纵人员在模拟机上使用参考机组的运行规程处理某一变化过程所采取的操作行动与在参考机组上采取的操作行动相同。模拟范围应允许处理规定的全部变化过程,直到获得一个稳定的工况。

华龙一号(HPR1000)是我国具有自主知识产权的第三代压水堆核电技术,HPR1000 设计全面平衡地贯彻了核安全纵深防御原则及设计可靠性原则,具有先进性和成熟性统一,安全性和经济性的平衡,能动和非能动相结合等特点。本文以给水加热器疏水回收系统为例,介绍华龙一号全范围模拟机的常规岛部分建模仿真流程。

2. RINSIM 仿真平台介绍

RINSIM 仿真平台提供核动力仿真开发运行维护全寿命支持。广泛应用于各类核动力装置、核电厂模拟机、工程仿真机以及设计仿真验证平台。其中用户层提供人机界面与模拟机的开发人员和操作人员交互,提供一体化的开发环境、运行编辑环境、操作环境。

RINSIM 仿真平台目前有支持 Linux 系统的 RINSIM1.0 版本和支持 Windows 系统的 RINSIM2.0 版本。RINSIM1.0 版本由支撑软件 Simbase、图形组态工具 SimDraw、图形化建模工具 SimGen、实时图形调试软件 SimUGD 等部分组成。SimGen 建模时模型类型主要有:仪控系统、热工网络、配电网、流体网络(气体单相可压缩、汽水两相可压缩、液体单相不可压缩)。除支持的系统不同外,RINSIM2.0 与 RINSIM 1.0 不同点在于高度集成的一体化工程师站,其集成了 RINSIM1.0 的 SimDraw, SimGHMI, SimGen, SimWare 及 SimUGD 等功能,实现了部件的开发,工艺建模组态,调试及运行控制等功能,极大的方便了模型工程师的建模及调试工作。该平台已投入华龙一号福清 5/6 号全范围模拟机和巴基斯坦 K2/K3 全范围模拟机的开发。

本文中 HPR1000 给水加热器疏水回收系统建模仿真是采用 RINSIM 2.0 仿真平台进行,其疏水部分采用 simflow1 液体单相不可压缩流网模型,蒸汽的凝结换热过程采用特殊换热器,运行排气采用 simflow2 可压流网模型,集中采用了 RINSIM 仿真平台中的两大流网模型。

3. 给水加热器疏水回收系统介绍

给水加热器疏水回收系统(TFR)是二回路的主要系统之一。它利用汽轮机中压缸及低压缸蒸汽、轴封漏汽及疏水加热凝结水泵来的二回路给水,实现对二回路给水的预热升温;同时实现疏水回收,并将疏

水分别送往 3 号低加的出口及凝汽器，以提高机组的回热系统效率，提高整个机组的经济性。其主要流程见图 1，该系统主要由如下几个部分组成：

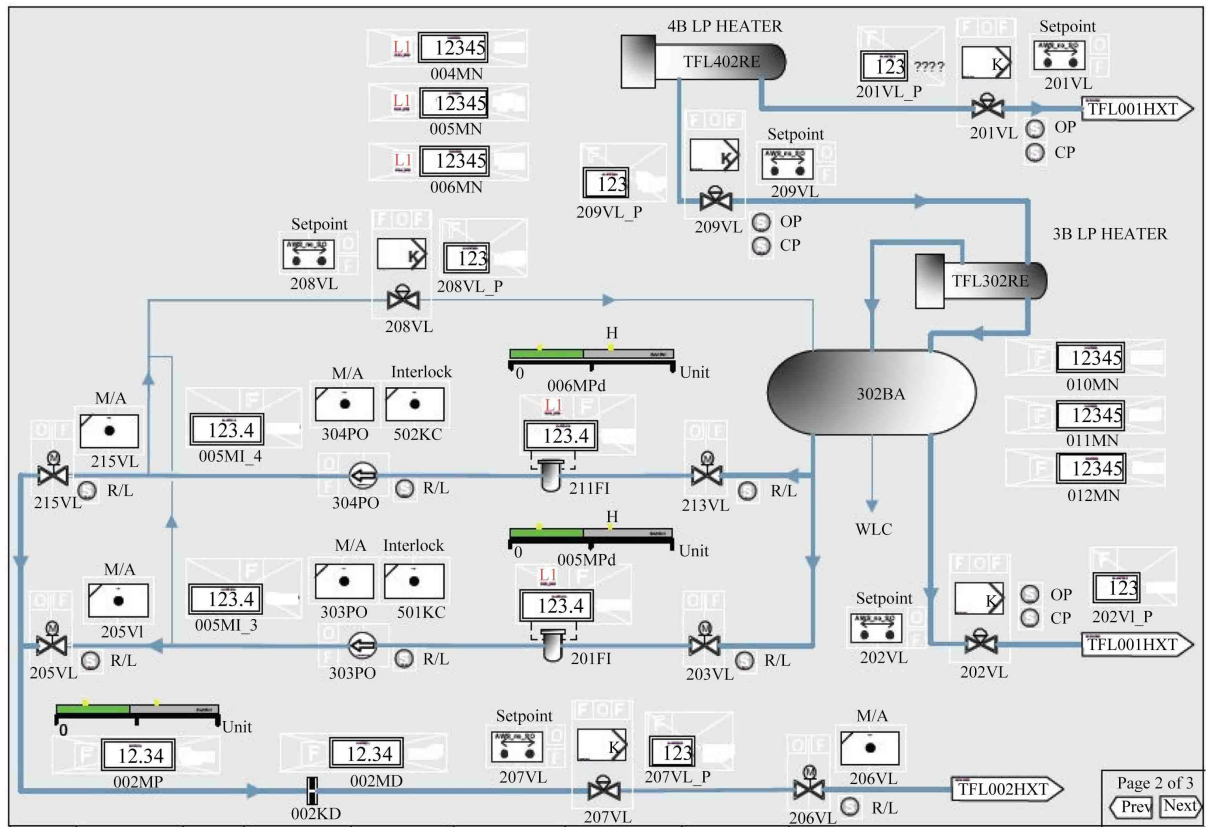


Figure 1. Flow chart of TFR
图 1. TFR 流程图

1) 低压加热器

LP1、LP2 复合式低压加热器分别由两台加热器组成，安装在凝汽器喉部，形成 2 列，每列 50%额定凝结水容量，并有一列 50%凝结水流量的旁通管路。

2) 抽汽系统

两列 LP1、LP2 低压加热器的抽汽来自于汽轮机的两个低压缸。由于 LP1、LP2 低压加热器安装在凝汽器喉部，抽汽管道直而短，疏水直接进入凝汽器，因此 LP1、LP2 低压加热器抽汽管道上没有安装任何阀门。LP3、LP4 低压加热器的抽汽来自于汽轮机的中压缸，并在抽汽管路上布置了气动逆止阀及电动蝶阀。

3) 低压加热器的疏放水

LP1、LP2 低压加热器壳侧疏水：汽轮机低压缸抽汽在蒸汽凝结水凝结成疏水，LP2 低加疏水经流至疏水闪蒸箱，闪蒸后蒸汽进入 LP1 低压加热器，闪蒸后蒸汽疏水流至凝汽器，LP1 低加疏水直接流至凝汽器。LP4 低压加热器壳侧正常疏水排入 LP3，LP3 低压加热器壳侧正常疏水排入疏水箱后经疏水泵加压后送入 LP3 给水侧出口。LP3、LP4 低压加热器紧急疏水排至凝汽器。

4) 排气系统及卸压装置

为了及时排出机组运行时抽汽凝结过程中析出气体，提高加热器管束传热效率，每低压加热器壳侧

均设置运行排气管，将析出气体排向凝汽器。

在 LP1、LP2 低压加热器壳侧没有卸压装置。LP3、LP4 低压加热器的管侧和壳侧均安装了卸压装置。两台 LP3 低压加热器壳侧分别安装弹簧式安全阀 TFL756VV 和 TFL741VV，两台 LP4 低压加热器壳侧分别安装弹簧式安全阀 TFL726VV 和 TFL708VV。

4. 不可压缩流网的数学模型

在进行系统建模时，使用的数学模型建立在以下假设成立的前提下：

- 1) 蒸汽 - 不凝气 - 水的混合物是饱和的，蒸汽和不凝气的温度同是蒸汽分压下的饱和温度；
- 2) 混物流被定义为近似的均匀流，也就是不考虑滑移；
- 3) 蒸汽和不凝气组成的是理想气体混合物，其蒸气 - 不凝气常数依据真实蒸汽性质每个时间步长都不断更正；
- 4) 节点混合物的参数为整个节点的参数。

根据这些假设，我们有以下质量、能量、浓度和动量的平衡方程式[1]：

$$\frac{dm_i}{d\tau} = -\sum_j G_{ij} \quad (1)$$

$$\frac{d\left(m_i \left(\frac{h_i - p_i}{\rho_i}\right)\right)}{d\tau} = -\sum_j G_{ij} * h + Q_i + R_i \quad (2)$$

$$\frac{d(m_i C_i^k)}{d\tau} = -\sum_j G_{ij} * C + J_i \quad (3)$$

$$P_i - P_j + \rho g \nabla Z + k_1 n^2 + k_2 n G + k_3 G^2 - \xi * \frac{G^2}{2S^2 \rho} = \frac{L}{S} * \frac{dG}{d\tau} \quad (4)$$

其中：

G ——两节点之间的质量流量(如果流向从 i 到 j ，为正向流，反之，为负)；

ρ ——节点介质密度；

Q_i ——热交换量(如果该节点为热交换器)；

R_i ——内热源；

J_i ——内浓度源；

$h = h_i, C = C_i$ ——在流向为从 i 到 j 时；

$h = h_j, C = C_j$ ——在流向为从 j 到 i 时；

L ——相邻节点间的管长；

n ——泵的归一化转速；

k_1, k_2, k_3 ——泵的特性曲线常数。

根据上述四个方程，同时忽略密度的变化即可得到不可压缩流网的数学模型。

5. TFR 系统建模流程

- 1) 根据设计资料对给水加热器疏水回收系统流程图进行模拟范围划分，确定需要模拟的设备和管线。
- 2) 使用 RINSIM2.0 平台根据划分模拟范围后的流程图进行建模。
- 3) 根据设计资料对系统主要设备进行数据输入。

4) 适当调整输入参数建立 TFR 的稳态运行状态。

5.1. TFR 系统主要设备输入参数

给水加热器疏水回收系统由两台并列的疏水箱、4 台疏水泵以及其管道阀门组成，两列 LP4 低压加热器的疏水分别经疏水调节阀流进两列 LP3 低压加热器。两列 LP3 低压加热器的疏水直接流入对应的疏水箱。当 LP4 低压加热器出现高高水位时，危急疏水调节阀自动开启，将危急疏水排向凝汽器。

每台疏水箱下方各设有两台疏水泵，将各自疏水箱中的疏水升压后送入各列 LP3 低压加热器凝结水出口管道。

1) 低压疏水泵 TFR301~304PO

本系统每列低价疏水箱配置 2 台 50%容量的低加疏水泵，一用一备，每台机组配置 4 台低加输水泵。

图 2、图 3 为低价疏水泵建模使用的主要输入参数：

变量	连接	程序		
主要				
序号	名称	值	单位	IO
1	pmpdirect	false		static
2	ppump			static
3	ppump4	0.000000		static
4	ppump5	0.13099	Kg2/s2.Pa	static
5	ppump6	101325....	pa	static
6	ppump7	100000....	W	output
7	psuc	0.000000	pa	output
8	pdch	0.000000	pa	output
9	pumpcav	false		output
10	pmpcav_...	false		hard
11	pmpcav_...	false		static
12	pumpsprtd	1500.00...	rpm	input

Figure 2. Main input parameters of the pump

图 2. TFR 疏水泵主要输入参数

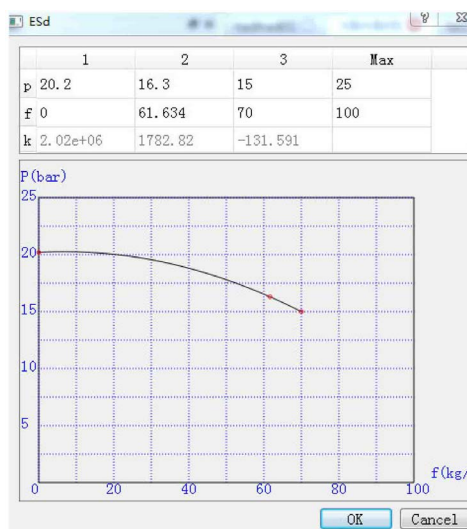


Figure 3. Pump characteristic curve

图 3. TFR 疏水泵特性曲线

2) 低压加热器壳侧

低压加热器有分为两列，LP1-LP4 分别有两台共 8 台。图 4 为 TFR401RE 低压加热器的主要参数输入。

名称	值	单位	类型	IO
foul_mal	0.000000	-	double	hard
zhtpcn	591000	kpa	double	static
+ zoxp...		kpa	double	static
zhtpa	0	kpa	double	static
zhtpsat	591000	kpa	double	static
zhtpv	591000	pa	double	static
zhtp	591000	pa	double	output
zhtpd	591000	pa	double	output
zchtc	25.167	kg/s	double	static
zhtwt	569.914	kg/s	double	input
zhttfi	132.5	c	double	input
zhtitfc	132.5	c	double	static

Figure 4. Shell side of TFR401RE

图 4. TFR401RE 壳侧

3) 低加疏水箱 TFR301BA/302BA

TFR 系统中的箱体主要为低加疏水箱子，箱体均用汽两相箱来模拟。疏水箱上设置低压加热器输水进口，正常输水出口等。主要性能参数如图 5 所示。

变量	连接	程序			
主要					
序号	名称	值	类型	单位	IO
1	remrlevel	0	double	M	hard
2	remrttliq	134.3	double	C	hard
3	remrttamb	134.3	double	C	hard
4	remrppvop	360	double	KPa	hard
5	+ zoxp...		double	KPa	static
6	zopair	0	double	KPa	static
7	zopvop	360	double	KPa	static
8	zopvopl...	360	double	KPa	static
9	zopvsat	360	double	KPa	static
10	zopktot	360	double	KPa	static
11	zopptot	431940	double	Pa	output
12	zoppbot	431940	double	Pa	output

Figure 5. Partial parameters of TFR301BA

图 5. TFR301BA 部分参数

4) 管道流导

流网建模时，连接两个节点或者节点和边界就生成管道。管道流导反应了管路的导通能力，流导越

大，管路导通能力越强，压力损失越小。不可压缩流网中，流导的计算公式如下[2]：

$$\text{cond} = \frac{G^2}{vlf^2 (P_i - P_j + \rho g \Delta Z)} \quad (5)$$

其中：

G ——管道流量，Kg/s；

vlf ——阀门归一化流通面积；

P_i 、 P_j ——分别为前后节点的压力；

ΔZ ——节点 i 与节点 j 间的位高差；

cond ——管道流导。

从公式(5)可以看出，若要计算出管道的流导，需知道管道的流量、阀门流通面积、前后节点的位高差和压差，这些参数大多可以从设计资料中找到相关数据[3]。对于 simflow2 导纳计算，由于从不可压缩流网模型推导而来，与 simflow1 有所不同。由于篇幅所限，导纳计算过程及结果在此不再赘述。本文分别依据 simflow1 及 simflow2 导纳公式完成给 TFR 低压水加热器疏水回收系统的流导计算及导纳输入。

5.2. TFR 系统故障模拟

故障是模拟机的重要组成部分，是操纵员培训必不可少的情景培训。故障的种类和数量要真实反映电厂设计和实际运行情况。模拟机中的故障分为通用故障和特殊故障及 DCS 故障。常见的流体系统故障有管道小破口、大破口、泵堵转卡壳、泵失去电源、泵超速、过滤器堵塞、阀门泄露误动作等都是通用故障。TFR 系统除了模拟上述通用故障外，还模拟了如下 3 个特殊故障(表 1)：

Table 1. List of TFR system failures

表 1. TFR 系统故障清单

序号	故障编号	类型	范围	故障描述
1	M_TFRTFR01A	R*8	0~100%	疏水泵 301PO 吸入口泄漏
2	M_TFRTFR01B	R*8	0~100%	疏水泵 302PO 吸入口泄漏
3	M_TFRTFR01C	R*8	0~100%	疏水泵 303PO 吸入口泄漏
4	M_TFRTFR01D	R*8	0~100%	疏水泵 304PO 吸入口泄漏

5.3. TFR 分系统测试

分系统测试是对单个系统进行测试，与其他系统的接口采用固定的压力边界或流量边界处理。

5.3.1. 正常运行工况测试

电厂正常运行时，TFR 加热器疏水回收系统 2 列均投入运行，LP4 壳侧疏水至 LP3，LP3 壳侧疏水至低加疏水箱子并经泵加压后送至 LP3 给水侧出口[4]。LP1 及 LP2 壳侧疏水排至凝汽器。由于篇幅所限，本文只列出 A 列运行结果。表 2 为在 TMCR 工况下测试结果，可以看出仿真结果与设计值之间的误差均在 1% 以内，满足误差要求。表 3 为 VWO 工况下测试结果，误差在 1% 以内，满足误差要求。

5.3.2. 故障测试

以疏水泵 TFR301PO 吸入口泄漏 M_TFRTFR01B 为例进行故障测试。在 TFR TMCR 稳态正常运行时，插入 M_TFRTFR01B，故障程度 100%，观察表 4 所示的系统主要参数的变化，由于泵入口泄露导致低加疏水箱 TFR301ba 水位下降，箱子压力降低，泵入口压力降低。如果不加控制，低加疏水箱子水位

持续下降报警。由于导致流入泵流量减少，且疏水温度较高从而致使泵气蚀现象，符合实际情况。直到人为干涉，堵住泄露，恢复箱子液位，才能趋于稳定。

Table 2. Running test results in TMCR conditions

表 2. TMCR 工况时运行测试结果

变量名	描述	单位	设计值	模型值	误差
tfr001tfl401rezhttds	4A 主给水出口温度	°C	156.2	156.81	0.39%
tfr001bnd1003flowpb	4A 疏水流量	kg/s	25.167	25.1729	0.023%
tfr001tfl401rezhttd	4A 疏水温度	°C	135.5	135.5123	0.009%
tfr001bnd1003hpp	4A 疏水焓值	kJ/kg	570.1	572.5267	0.43%
tfr001tfl301rezhttds	3A 主给水出口温度	°C	132.3	132.7803	0.36%
tfr001bnd1007flowpb	排出 3A 疏水流量	kg/s	61.634	61.6295	-0.007%
tfr001tfl301rezhttd	排出 3A 疏水温度	°C	134.3	134.3648	0.048%
tfr001tfl301rezhtl	排出 3A 疏水焓值	kJ/kg	564.7	565.0814	0.068%
tfr001tfr301bazopkbot	TFR301ba 压力	Kpa	350	350.7758	0.22%
tfr301baremrlevel	TFR301ba 液位	mm	—	11.9	—
tfr001bnd1008flowpb	进入 TFR301ba 流量	kg/s	61.634	61.6298	-0.0068%
tfr001bnd1013flowpb	排出 TFR301ba 流量	kg/s	61.634	61.6298	-0.0068%
tfr004tfl201re_szhttds	2A 主给水出口温度	°C	95.2	95.21001	0.01%
tfr004bnd1001flowpb	排出 2A 疏水流量	kg/s	43.254	43.254	0
tfr004tfl201re_szhttd	排出 2A 疏水温度	°C	96.7	96.84927	0.15%
tfr004tfl201re_szhtd	排出 2A 疏水焓值	kJ/kg	405	405.7799	0.193%
tfr004tfl101re_szhttds	1A 主给水出口温度	°C	54.7	54.81776	0.21%
tfr004bnd1005flowpb	排出 1A 疏水流量	kg/s	36.908	36.908	0
tfr004tfl101re_szhtd	排出疏水流量焓值	°C	56.2	56.31778	0.2%
tfr004tfl101re_szhttd	排出疏水温度	kJ/kg	235.4	235.66	0.11%

Table 3. Running test results in VWO conditions

表 3. VWO 工况时运行测试结果

变量名	描述	单位	设计值	模型值	误差
tfr001tfl401rezhttds	4A 主给水出口温度	°C	157.3	157.83	0.34%
tfr001bnd1003flowpb	4A 疏水流量	kg/s	26.0394	26.0462	0.026%
tfr001tfl401rezhttd	4A 疏水温度	°C	136.4	136.5646	0.12%
tfr001bnd1003hpp	4A 疏水焓值	kJ/kg	574.1	577.1037	0.523%
tfr001tfl301rezhttds	3A 主给水出口温度	°C	133.2	133.5262	0.25%
tfr001bnd1007flowpb	排出 3A 疏水流量	kg/s	63.7737	63.7671	-0.01%
tfr001tfl301rezhttd	排出 3A 疏水温度	°C	135.2	135.1995	-0.0004%
tfr001tfl301rezhtl	排出 3A 疏水焓值	kJ/kg	568.7	568.6656	-0.006%
tfr001tfr301bazopkbot	TFR301ba 压力	Kpa	357	357.9262	0.26%
tfr301baremrlevel	TFR301ba 液位	mm	—	22.6	—
tfr001bnd1008flowpb	进入 TFR301ba 流量	kg/s	63.7737	63.7672	-0.01%

Continued

tfr001bnd1013flowpb	排出 TFR301ba 流量	kg/s	63.7737	63.7674	-0.001%
tfr004tfl201re_szhttds	2A 主给水出口温度	℃	95.9	95.90372	0.004%
tfr004bnd1001flowpb	排出 2A 疏水流量	kg/s	44.653	44.6536	0.001%
tfr004tfl201re_szhttd	排出 2A 疏水温度	℃	97.4	97.70541	0.31%
tfr004tfl201re_szthtd	排出 2A 疏水焓值	kJ/kg	408	409.3907	0.34%
tfr004tfl101re_szhttds	1A 主给水出口温度	℃	55.2	55.50767	0.56%
tfr004bnd1005flowpb	排出 1A 疏水流量	kg/s	38.552	38.5514	-0.002%
tfr004tfl101re_szthtd	排出疏水流量焓值	℃	56.7	56.99019	0.51%
tfr004tfl101re_szhttd	排出疏水温度	kJ/kg	237.5	238.5475	0.44%

Table 4. Results of TFR failures test

表 4. TFR 故障测试结果

变量名	描述	单位	正常值	插入故障后
tfr001pnt1008ppnt	TFR302po 入口压力	KPa	336.7	325
tfr001bnd1013flowpb	TFR302po 入口流量	kg/s	61.63	48.6
tfr001tfr301bazoppbot	TFR301ba 压力	KPa	350.7	348
tfr001tfr007mnzoyout	TFR301ba 液位	mm	11.9	7.77
tfr001pipe1026fvol	M_TFR1FR01B 泄露流量	kg/s	0	18.1

6. 小结

本文基于 RINSIM2.0 仿真平台针对 HPR1000 给水加热器疏水回收系统(TFR)进行了工艺仿真, 仿真结果符合电厂设计数据要求, 较真实地反应了实际电厂运行的各种工况, 各回路管线的流量、温度、节点压力等参数与设计参数之间误差均在容许范围内, 达到设计要求。

参考文献

- [1] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 36-37.
- [2] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 55-73.
- [3] 林万超. 火电厂热力系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
- [4] 徐传海. 1000 MW 机组低压加热器疏水系统的优化配置[J]. 电力建设, 2006, 27(10): 65-66.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 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