

# 基于Modelica语言的压水堆稳压器建模及其仿真

郑剑香, 郝俊伟, 边博深

(厦门大学 能源学院, 福建 厦门 361102)

**摘要:** 稳压器是压水堆核电站的重要设备之一。使用面向对象的建模工具Modelica/OpenModelica仿真软件对稳压器进行新模型的开发, 并将模型仿真结果与希平港核电站减负荷试验结果进行比较, 验证新建模型的有效性, 可为核电站其它系统设备的建模仿真的应用提供参考。Modelica语言对象导向的特性为核电站系统设备全生命周期的模型开发实现继承和延伸管理。

**关键词:** Modelica; 稳压器; 建模; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2016.04.022  
文章编号: 1671-1041(2016)04-0068-04

## Modeling and Simulation for PWR Rressurizer Based on Modelica

Zheng Jianxiang, Hao Junwei, Bian Boshen

(School of Energy, Xiamen University, Xiamen Fujian 361102, China)

**Abstract:** Pressurizer is one of the important equipment in the pressurized water reactor nuclear power plant. Using oriented object modeling tool Modelica/OpenModelica simulation software, the new model of Presssurizer was developed, and simulation results and Shippingport nuclear power plant loss load test results were compared and the validity of the new model was verified. It can provide a reference for the application of the modeling and simulation of other system and equipment in the nuclear power plant. Modelica language object oriented characteristics can achieve the inheritance and extension management of nuclear power plant system and equipment modeling development for the whole life cycle.

**Keywords:** modelica; pressurizer; modeling; simulation

## 0 引言

稳压器是压水堆核电站的重要设备之一, 它的主要作用是维持冷却剂系统回路的压力, 防止冷却剂水在一回路中汽化。为了更真实反映稳压器的运行特点和动态特性, 利用仿真软件建立稳压器模型很有必要。稳压器的模型化工作已经比较成熟。

本文主要目的是采用三区模型描述稳压器, 并应用一种基于 Modelica 语言的、新的面向对象的开源软件平台 OpenModelica 来对稳压器进行建模仿真分析, 目的是充分利用该软件的特点来开发一个开放的可扩展模型, 同时为核电站其他系统和设备的建模仿真提供参考。

基于复杂计算流体动力学代码 RELAP5 的模拟非常适合进行核电站设计特点的事故分析和安全导向评估。由于涉及细节数量不足, 这些模拟无法用于控制导向的动态模拟。使用 Modelica 语言提供一种可行的解决方案, 由此可以开发足够详细且计算要求有限的动态模拟器用于控制导向分析。

## 1 Modelica 语言

Modelica 是基于方程表达式的建模语言, 可用于多学科的物理系统建模。Modelica 采用数学方程对物理现象进行描述, 并通过微分代数方程实现仿真运行。它的模型与实际物理系统相似, 建模工作相对简单。Modelica 面向对象的建模特征, 使模型具有可复用性、可重构性和可继承性等优点。同时, 它拥有多学科标准组件库, 以及强大的求解微分代数方程的能力。Modelica 作为一种新兴的多学科建模语言, 已得到了迅速发展和应用<sup>[1,2]</sup>。

Modelica 已广泛应用于汽车、航空、电力系统等领域的建模和仿真工作。在国外, 已应用 Modelica 开展很多电厂相关方面的仿真研究。2003 年意大利米兰理工大学 F. Casella 和 A. Leva 介绍了模拟发电厂用的 Modelica 开放库 ThermoPower, 阐述开发模型的建模原则与主要特征, 采用实验室鼓筒式锅炉得出的实验数据对该库进行对比, 验证模型和数据良好的一致性<sup>[3]</sup>; 2005 年意大利 Antonion Cammi 等人, 介绍了应用 Modelica 语言对

收稿日期: 2016-03-01

作者简介: 郑剑香(1981-), 女, 工程师, 硕士, 现主要从事核能系统建模仿真技术研发。

IRIS 核电站(国际联盟开发的创新型轻水反应堆)的建模、仿真和控制,阐述了利用 ThermoPower 程序库部件以及定制核部件开发的核电站模型,并最终变成现实的数字控制系统模型<sup>[4]</sup>。

近年来,Modelica 在一些重要行业的典型产品的开发中得到成功应用。2006 年法国达索公司宣布以 Modelica 为技术标准实施“knowledge inside”,国外重要企业及研究结构也以 Modelica 为模型表达标准。2009 年法国电力公司 EDF 研发中心 Franck David 和 Annick Souyri 介绍了采用 Modelica 对钠冷快堆蒸汽发生器的建模工作,开发了蒸汽发生器的仿真新模型,并将结果数据与实际 SuperPhenix 蒸汽发生器数据结果进行比较<sup>[5]</sup>。

目前,国内的许多高校和研究所也开始利用 Modelica 在航空、汽轮机、电力系统、汽车等领域来开展有关的研究工作。上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室利用 Modelica 对航空发动机的主要部件进行建模,搭建了双轴涡扇发动机的系统级模型,并对启动过程进行仿真<sup>[6]</sup>。华北电力大学电气与电子工程学院利用 Dymola 进行电力系统的建模与仿真<sup>[7]</sup>,电站设备状态监测与控制重点实验室开展基于 Modelica 和 Dymola 的除氧器建模与仿真<sup>[8]</sup>。而针对核电站系统和过程的工作正处在起步阶段。

## 2 稳压器工作原理

稳压器是压水堆核电站一回路的主要设备之一,它的主要作用是维持冷却剂系统回路的压力,防止冷却剂水在一回路中汽化。另一作用是吸收一回路系统水容积的迅速变化。核电站冷却剂与稳压器波动管相连。稳压器装有喷淋系统、电加热器、泄压阀和安全阀等。

稳压器的的工作原理是:当冷却剂水温度升高时,冷却剂体积产生膨胀,冷却剂水通过波动管流入稳压器,稳压器内液相质量增加,汽相空间压缩,造成稳压器压力升高。当冷却剂水温度降低时,冷却剂水通过波动管流出稳压器。喷淋和蒸汽释放是辅助降压动作。如果喷淋不能抑制稳压器压力的上升,当压力达到规定值时,会启动泄压阀排放蒸汽。如果压力仍继续上升达到安全限值时,会引发安全阀起跳,从而保证核反应堆的安全。稳压器通过电加热器来升高压力<sup>[9]</sup>。稳压器主要依靠上充和下泄流量来控制水位。

## 3 稳压器数学模型<sup>[10-12]</sup>

### 3.1 模型简述

本文采用非平衡三区模型描述稳压器,模型将稳压器容积分为汽相区和两个液相区。稳压器上部空间为蒸汽空间,下部为水空间。水空间分为主液相区和波动液相区。模型考虑了气泡上升、液滴下落、喷雾冷凝、阀门和电加热器模型等。稳压器建模示意图见图 1。

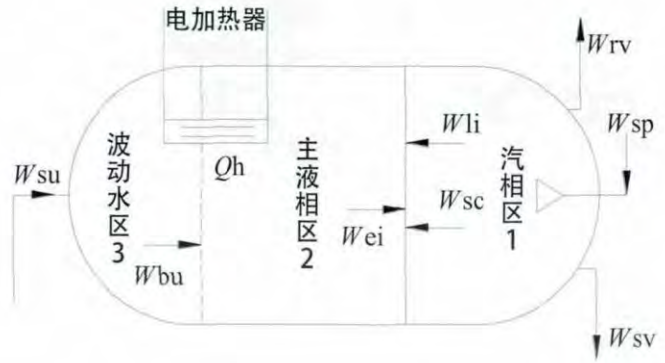


图 1 稳压器模型示意图  
Fig.1 Schematic Diagram of Pressurizer Model

### 3.2 建模假设

非平衡三区模型,在建模时作以下假设:

- 1) 稳压器三区的压力相等,此压力即为回路系统压力。
- 2) 稳压器总体积不变。
- 3) 三个区在每一时刻分别具有各自的比焓。
- 4) 喷淋水在离开汽相区前就达到饱和,波动管流入的水焓和喷淋水的焓不变。
- 5) 不考虑稳压器器壁冷凝以及汽液交界面的传热。

稳压器内汽液热力状态,是通过汽/液相的焓与相应压力下饱和汽/液焓的比较来确定。如果液相区焓小于相应压力下的饱和液焓,则液相处于过冷状态,否则,处于饱和状态;相同地,如果汽相焓大于相应压力下的饱和汽焓,则汽相处于过热状态,否则,处于饱和状态。如果主液相区处于过冷,则波动水区也只能处于过冷状态。因此,稳压器内就可能有 6 种热力状态。

### 3.3 数学模型

#### 3.3.1 汽相区

单位时间内蒸汽区蒸汽质量变化的方程:

$$\frac{dM_1}{dt} = W_{ei} - W_{li} - W_{rv} - W_{sv} - W_{sc}$$

单位时间内蒸汽区蒸汽能量变化的方程:

$$\begin{aligned} \frac{d(M_1 h_1)}{dt} = & W_{sp}(h_{sp} - h_f) + W_{ei} h_g - (W_{rv} + W_{sv}) h_1 \\ & - (W_{li} + W_{sc}) h_f + V_1 \frac{dP}{dt} \end{aligned}$$

$W_{ei}$  为主液相区水汽化进入汽相区的流量,  $W_{li}$  为汽相区蒸汽液化进入主液相区的流量。

$W_{rv}$ 、 $W_{sv}$ 、 $W_{sp}$ 、 $W_{sc}$  为泄压阀、安全阀和喷淋、喷雾冷凝的流量。

$$W_{sp} = W_{spm} \frac{P - P_{off}}{P_{on} - P_{off}}$$

其中,  $W_{spm}$  为喷淋最大流量,

$$W_{sp} = \begin{cases} 0, & P < P_{off} \\ W_{spm}, & P > P_{on} \end{cases}$$

$$W_{sc} = W_{sp} \frac{h_f - h_{sp}}{h_g - h_f}$$

$h_{sp}$  为喷雾流体焓, 取冷腿焓值。

### 3.3.2 主液相区

单位时间内质量和能量变化的方程分别为:

$$\frac{dM_2}{dt} = W_{sp} + W_{sc} + W_{li} + W_{bu} - W_{ei}$$

$$\frac{d(M_2 h_2)}{dt} = (W_{bu} - W_{ei})h_g + (W_{sp} + W_{sc} + W_{li})h_f + Q_{h2} + V_2 \frac{dP}{dt}$$

$W_{bu}$  为波动水区的气泡上升流量。 $Q_h$  为电加热器的加热功率。稳压器的电加热器采用比例加热, 比例加热功率可用下列式子:

$$Q_h = Q_{pm} \frac{P_{off} - P}{P_{off} - P_{on}}$$

其中,  $Q_{pm}$  为电加热器最大功率,

$$Q_h = \begin{cases} 0, & P > P_{off}, L < L_{off} \\ Q_{pm}, & P > P_{on} \end{cases}$$

### 3.3.3 波动水区

单位时间内质量和能量变化的方程分别为:

$$\frac{dM_3}{dt} = W_{su} - W_{bu}$$

$$\frac{d(M_3 h_3)}{dt} = W_{su} h_{su} - W_{bu} h_g + Q_{h3} + V_3 \frac{dP}{dt}$$

$W_{su}$  为波动流量。 $h_{su}$  波动流焓值:

$$h_{su} = \begin{cases} h_{su} & \text{正波动 (取冷腿焓值)} \\ h_3 & \text{负波动} \end{cases}$$

瞬态过程中, 当过冷水达到饱和时, 液相区内产生气泡并上升到汽相区。当过热蒸汽到达饱和状态时, 汽相区的冷凝液滴下落到液相区。

主液相区、波动水区气泡上升流量可用下式计算:

$$\alpha_L A_{12} U_{bub} \rho_g$$

汽相区液滴下落流量由下式决定:

$$\alpha_v A_{12} U_d \rho_f$$

$\alpha_L$ : 液相区的空泡份额,  $U_{bub}$ : 气泡速度 (m/s),  $\rho_g$ : 饱和蒸汽密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

$\alpha_v$ : 汽相区的液相份额,  $U_d$ : 液滴下落速度 (m/s),  $\rho_f$ : 饱和液密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

### 3.3.4 总体积守恒

总体积守恒方程:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(M_1 v_1)}{dt} + \frac{d(M_2 v_2)}{dt} + \frac{d(M_3 v_3)}{dt} = 0$$

式中,

$$v_i = \begin{cases} v_i (h_i, P) & \text{单相} \\ x_i v_g + (1 - x_i) v_f & \text{两相} \end{cases} \quad (i=1,2,3)$$

由总体积方程可得到压力的变化为:

$$\frac{dP}{dt} = -\sum_{i=1}^3 (M_i V H_i \frac{dh_i}{dt} + v_i \frac{dM_i}{dt}) \div \sum_{i=1}^3 (M_i V P_i)$$

式中,

$$V H_i = \begin{cases} \frac{\partial v_i}{\partial h_i} & \text{单相} \\ \frac{v_{fg}}{h_{fg}} & \text{两相} \end{cases}$$

$$V P_i = \begin{cases} \frac{\partial v_i}{\partial P} & \text{单相} \\ x_i \frac{\partial v_{fg}}{\partial P} + \frac{\partial v_f}{\partial P} - \frac{v_{fg}}{h_{fg}} (x_i \frac{\partial h_{fg}}{\partial P} + \frac{\partial h_f}{\partial P}) & \text{两相} \end{cases}$$

稳压器水位变化的公式表达式:

$$\frac{dL}{dt} = \sum_{i=2}^3 (M_i V H_i \frac{dh_i}{dt} + v_i \frac{dM_i}{dt} + M_i V P_i \frac{dP}{dt}) / A_{12}$$

式中,  $A_{12}$  为稳压器横截面积,

$$A_{12} = \begin{cases} \pi R^2 & L \geq R \\ \pi(2RL - L^2) & L < R \end{cases}$$

以上各式中,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ : 一、二、三区的质量;  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ : 一、二、三区的体积;  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ : 一、二、三区的焓值;  $h_g$ : 蒸汽饱和焓值;  $h_f$ : 液体饱和焓值;  $P$ : 稳压器压力;  $L$ : 稳压器水位;  $R$ : 稳压器内径;  $v_i$ : 比容;  $x_i$ : 质量含汽率。

## 4 建模及仿真结果

### 4.1 建模过程

在 OpenModelica 仿真软件平台上建立一个名为 NPP\_



Model 的模型库，并在该库中新添加一个 Pressurizer 模块。依据第 3 节中的稳压器数学模型，在该模块的 OMEdit 编程窗体中的“model”下声明稳压器汽液相三区的质量、能量平衡和体积不变方程中相应的变量及参数量，在“equation”下编写相关的方程。最后进行编译，并对仿真时间进行仿真配置，得到仿真结果并实现输出。

建模过程中，使用 SIunits 库进行物理量的定义，同时在计算水和蒸汽热力性质时充分利用了 Media 库下 Water 物性标准函数库。

### 4.2 仿真结果

美国希平港核电站稳压器的主要参数见下表<sup>[13, 14]</sup>。本工作使用该核电站稳压器的相关实验数据对稳压器仿真结果进行对比验证和分析。

希平港核电站减负荷实验，分别从电功率 74MW、105MW 开始减负荷，其波动流量见图 2<sup>[15]</sup>。OpenModelica 平台上稳压器的压力和液位的变化曲线如图 3 和图 4，图中给出与文献<sup>[13, 16]</sup>数据的对比，仿真结果总体趋势一致。核电站甩负荷后，导出一回路的热量减少，冷却剂温度上升，稳压器压力瞬时升高。喷淋触发开启，并随着堆功率的下降，冷却剂温度下降，稳压器压力下降。下降过程触发电加热器开启，约 400s 后又出现了一个类似的压力正负波动过程。稳压器经历了两个正负波动的瞬态过程。仿真结果也反映了该变化过程。稳压器水位的变化是指汽液两相区界面位置的变化，仿真结果与 MVPZR 数据<sup>[16]</sup>和实验数据的趋势

表 1 希平港稳压器主要参数  
Table 1 Main Parameters of Pressurizer in Shippingport NPP

主要参数	数值
运行额定压力	13.7 MPa
稳态水位	2.413 m
运行冷腿/热腿温度	264/282
稳压器体积	7.419 m <sup>3</sup>
稳压器内径	1.3716 m
加热器功率	80 MW
加热器开启压力	13.6516 MPa
加热器关闭压力	13.7895 MPa
喷淋流量	2.397 kg/s
喷淋阀开启压力	14.272 MPa
喷淋阀关闭压力	13.962 MPa

一致。稳压器水位值与 MVPZR 数据相近，但高于实验值，原因是希平港稳压器实验工况和运行值的准确数据无法获取，现有数据存在一定偏差。

### 5 结论

本文基于稳压器的数学模型，利用 OpenModelica 开放和面向对象的建模平台，初步建立了压水堆核电站稳压器模型。从仿真结果和实验数据的对比分析情况可以看出，采用 OpenModelica 对稳压器进行模型的设计和仿真是可行的，可以在核电站其它系统和设备的仿真研究中得到推广和应用。同时可以进一步利用平台良好的通用性和扩展能力，实现对稳压器系统单独的仿真分析，或是作为一个独立子模块扩展到核电系统回路。

### 参考文献:

- [1] 赵建军, 吴紫俊. 基于 Modelica 的多领域建模与联合仿真 [J]. 计算机辅助工程, 2011,20(1):168-172.
- [2] 王磊杰, 张鸣, 朱煜. 基于 Modelica 的直线电机控制系统建模与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2012,24(8):1737-1740.
- [3] Francesco Casella, Alberto Leva. "Modelica open library for power plant simulation: design and experimental validation". Proceedings of the 3rd International Modelica Conference, Linkoping, Sweden, Nov. 3-4, 2003:41-50.
- [4] Antonio Cammi, Francesco Casella, Marco Ricotti and Francesco Schiavo. "Object-Oriented Modeling, Simulation and Control of the IRIS Nuclear Power Plant with Modelica". Proceedings of the 4th International Modelica Conference, Hamburg, Germany, Mar. 7-8, 2005:423-432.
- [5] Franck David, Annick Souyri. "Modelling Steam Generators for Sodium Fast Reactor with Modelica". Proceedings of the 7th Modelica Conference, Como, Italy, Sep. 20-22, 2009 : 694-701.
- [6] 任志彬, 等. 基于 Modelica 和 Dymola 的航空发动机建模与性能仿真 [J]. 燃气涡轮实验与研究, 2005,18(4):40-44.
- [7] 李志为, 赵洪山. 基于 Modelica 语言的电力系统建模与仿真 [J]. 华东电力, 2012,40(3):425-428.
- [8] 吴立强, 谭文, 王艳红. 基于 Modelica 和 Dymola 的除氧器建模与仿真 [J]. 现代电力, 2008, 25(5): 57-62.

(下转第77页)

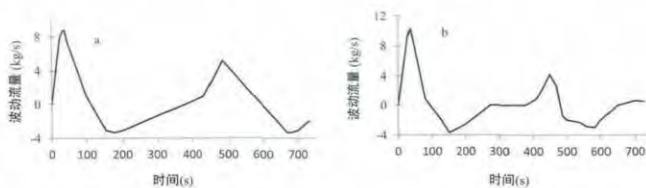


图 2 74MW(a) 和 105MW(b) 甩负荷波动流量变化  
Fig.2 Surge flow rate during loss of load from 74MW(a) and 105MW(b)

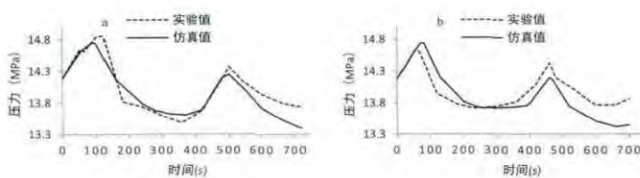


图 3 74MW(a) 和 105MW(b) 甩负荷稳压器压力变化对比  
Fig.3 Pressurizer pressure comparison due to loss of load from 74MW(a) and 105MW(b)

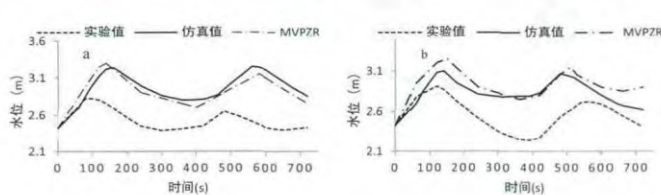


图 4 74MW(a) 和 105MW(b) 甩负荷稳压器水位变化对比  
Fig.4 Pressurizer water level comparison due to loss of load from 74MW(a) and 105MW(b)

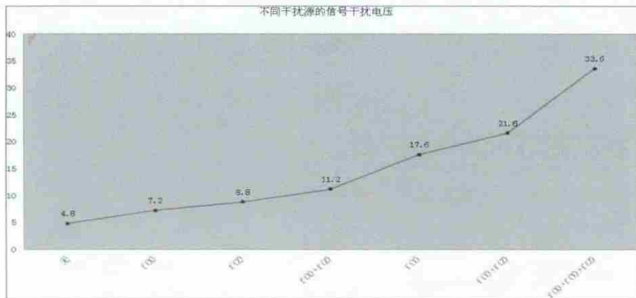


图1 f(X)、f(Y)、f(Z) 干扰波动幅度图  
Fig.1 f(X), f(Y), f(Z) in FIG interference fluctuations

为消除3种干扰源对电导表测量带来的影响，分别采用如下3种措施：

将电导电极送至电导表的信号电缆单独布置，与控制柜混床气动阀动作的电磁阀完全分开，设置两个单独的走线槽，以消除交变电源所产生的交变磁场对信号电缆所传输的信号的影响；

将电导率表金属表头与其所在的控制柜接地铜牌用地线连接后，金属表头上积聚的静电电荷导入大地，以消除静电感应造成的干扰对信号电流的影响。

将电导电极信号传输电缆通过带屏蔽的信号电缆转接，接入显示表表头，且将转接的信号电缆的屏蔽层单侧接地。即对电缆信号电缆采取屏蔽保护措施，以避免现场环境中的其他复杂电磁场所带来电磁感应干扰的影响。

在电导率表采取针对性的消除干扰的措施后，其输出至控制室的信号电流在工艺稳定状态下保持基本稳定，现场干扰对仪表测量及输出影响消除。

### 3 总结

在核电厂这个复杂的电磁环境中，干扰产生的可能性和危害性会大大提升，降低干扰应该从核电站设计和安装

阶段就开始考虑：

电源电缆和信号电缆的分开布置，桥架电缆走线；机柜内的走线，仪表的供电电缆与信号电缆的匹配问题等。

防雷接地系统设置的合理性，以避免人为的将雷电感应信号引入弱电信号回路<sup>[3]</sup>。

干扰源的屏蔽：对于设备本身就是干扰源的设备，应注意对干扰源本身的屏蔽，避免其对其他设备的正常运行造成干扰。

仪表本身作为一个极易受到干扰的设备，其本身的抗干扰性需要加强：如仪表外壳的接地，信号处理回路与表壳之间的绝缘等。

仪表信号电缆本身绝缘性及电缆屏蔽层的接地等。

由于现场安装接口，如系统接口，仪表与控制柜之间的接口等的不匹配性或不可预知性，信号回路中的干扰已经形成，如何消除信号传输回路中存在干扰的关键在于找到信号干扰源，而这些干扰源往往是有迹可循的，仔细地分析现场环境，查找一切可能造成干扰的元素，采取相应消除干扰源的措施；对于某些因碍于现场环境的限制无法消除干扰源的，可对已产生的干扰信号进行相应的处理，如感应电压挂接负载、增加屏蔽层等。这将能极大的提高现场显示仪表及控制室所获得机组运行参数的可靠性，有助于准确地判断机组的真实运行状态，从而采取适当的措施，保证电厂的安全高效运行。

### 参考文献：

[1] 刘家磊, 卢玉成, 等. 外部信号干扰及安装调试中的排出方法[J]. 安装, 2004(5):23-24.  
 [2] 单有文. 浅谈静电的产生与防护[J]. 电气防爆, 2006(3):11-12.  
 [3] 黄春燕, 施可登. 仪控系统信号干扰和卡件安全问题浅析与防范[J]. 工业控制计算机, 2004, 17(1):51-52.

(上接第71页)

[9] 薛汉俊. 核动力装置[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.  
 [10] 崔震华, 贾斗南, 俞尔俊. 稳压器模型化与仿真[J]. 核动力工程, 1993, 14(3):205-212.  
 [11] 马进, 刘长良, 李淑娜. 稳压器压力水位控制系统建模与仿真[J]. 核科学与工程, 2010, 30(1):9-14.  
 [12] 沈季. 基于Relap5的核动力装置故障诊断数据平台研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
 [13] J.A. REDFIELD, V. PRESCOP, and S.G. MARGOLIS. Pressurizer performance during loss of load tests at Shippingport: Analysis and test

[J]. Nuclear Application, 1967, 4:173-181.  
 [14] 王伟伟, 苏光辉, 田文喜, 等. 基于多区非平衡模型的稳压器动态仿真与验证[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(3):310-315.  
 [15] Amir N.N, Suresh M. An improved pressurizer model with bubble rise and condensate drop dynamics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1970, 12:135-147.  
 [16] 尤洪君, 崔震华, 程轶平. 核动力稳压器多区非平衡模型[J]. 核动力工程, 2001, 22(2):133-137.

## 《仪器仪表用户》

欢迎投稿，欢迎订阅，欢迎刊登广告。