



(12) 发明专利



(10) 授权公告号 CN 116842752 B

(45) 授权公告日 2024. 04. 12

(21) 申请号 202310886523.X

(22) 申请日 2023.07.19

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 116842752 A

(43) 申请公布日 2023.10.03

(73) 专利权人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72) 发明人 崔成成 张俊礼 沈炯

(74) 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司
32206

专利代理师 蒋昱

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 17/15 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109783936 A, 2019.05.21

US 2014314194 A1, 2014.10.23

CN 1274162 A, 2000.11.22

CN 109404071 A, 2019.03.01

CN 109098788 A, 2018.12.28

CN 101183246 A, 2008.05.21

CN 108469744 A, 2018.08.31

CN 106773666 A, 2017.05.31

CN 102279901 A, 2011.12.14

WO 2023116189 A1, 2023.06.29

葛斌;张俊礼. 核电机组二回路建模与动态仿真. 电力自动化设备. 2012, (06), 全文.

陈登科;张大发;张耀;江玮. 压水堆核电厂负荷跟踪建模与控制方法研究. 原子能科学技术. 2010, (S1), 全文.

葛斌;吴毅. 压水堆机组二回路热力系统实时仿真研究. 中国电机工程学报. 2002, (06), 全文.

彭敏俊;杜泽. 船用压水堆核动力装置双恒定运行方案静态特性研究. 核科学与工程. 2001, (04), 全文.

成守宇;彭敏俊;赵强;邓祥鑫. 多堆核动力装置控制策略仿真研究. 兵工自动化. 2013, (12), 全文. (续)

审查员 杜琳琳

权利要求书2页 说明书7页 附图1页

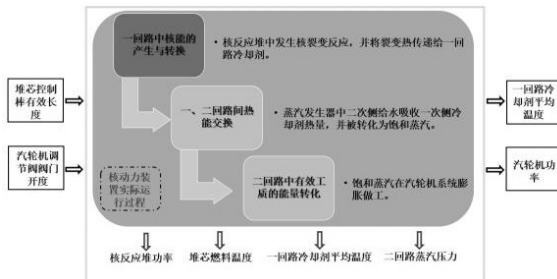
(54) 发明名称

一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法

(57) 摘要

一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法:1核能在核反应堆中的产生及其向热能的转换;2核动力装置一、二回路间的能量交换;3二回路中饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀做工。本发明将一回路冷却剂平均温度和汽轮机功率确定为模型的输出变量,将堆芯控制棒有效长度和汽轮机调节阀阀门开度确定为模型的输入变量,其由机理分析确定,模型框架基于各过程的守恒方程得到;模型参数基于压水堆核动力系统大范围运行数据由分析、推导、拟合和非线性最小二乘法辨识确定。本发明在保证模型结构简单

的前提下,能够全面捕捉压水堆核动力装置系统级的运行特征及其在大范围运行条件下的非线性特性,可满足压水堆核动力装置系统级特性分析及协调控制设计需求。



[转续页]

[接上页]

(56) 对比文件

Zhang Jun-li等.Application of genetic

algorithm in feed heating's distribution
of PWR nuclear power unit.Proceedings of
the CSEE.2005,全文.

1. 一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法,其特征在于:包括:

1) 将压水堆核动力装置实际运行过程简化为3个过程:

一回路中核能的产生与转换、蒸汽发生器中一、二回路侧的能量交换、饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀做工;

2) 提取能够表征压水堆核动力装置过程的核反应堆功率、堆芯燃料温度、一回路冷却剂平均温度、蒸汽发生器蒸汽压力及汽轮机功率为关键要素;

选取核反应堆功率、堆芯燃料温度、一回路冷却剂平均温度、二回路蒸汽压力为模型的状态变量,选取一回路冷却剂平均温度和汽轮机功率为模型的输出变量,选取堆芯控制棒有效长度和汽轮机调节阀阀门开度为模型的输入变量;

3) 基于各过程的守恒原理和机理分析确定模型框架;

压水堆核动力装置系统级简化非线性模型为:

$$\begin{cases} \frac{dW_{rp}}{dt} = \frac{rou(L) + \alpha_{rf} \Delta T_{rf} + \alpha_{ave} \Delta T_{ave}}{d_1} W_{rp} \\ \frac{dT_{rf}}{dt} = \frac{W_{rp} + (kA)_{fc} (T_{ave} - T_{rf})}{d_2} \\ \frac{dT_{ave}}{dt} = \frac{(kA)_{fc} (T_{rf} - T_{ave}) - (kA)_{sgh} (T_{ave} - T_{sg})}{d_3} \\ \frac{dp_{sg}}{dt} = \frac{(kA)_{sgh} (T_{ave} - T_{sg}) + G_{st} (h_{fw} - h_g)}{d_4 \cdot f_1(p_{sg}, T_{ave})} \end{cases} \quad (1)$$

$$W_{st} = f_5(G_{st}) \cdot (G_{st} h_g - G_{fw} h_{fw} - Q_{chc}) \quad (2)$$

$$T_{sg} = f_2(p_{sg}) \quad (3)$$

$$h_g = f_3(p_{sg}) \quad (4)$$

$$G_{st} = f_4(RV) \cdot p_{sg} \quad (5)$$

$$Q_{chc} = f_6(G_{st}) \quad (6)$$

$$h_{fw} = f_7(G_{st}) \quad (7)$$

模型包含2个输入变量、4个状态变量及2个输出变量:

$$u = \begin{bmatrix} L \\ RV \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} W_{rp} \\ T_{rf} \\ T_{ave} \\ p_{sg} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} T_{ave} \\ W_{st} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,u表示输入向量,包含控制棒有效长度L单位为Bu、汽轮机调节阀阀门开度RV单位为%;x表示状态向量,包含核反应堆功率 W_{rp} 单位为kW、堆芯燃料温度 T_{rf} 单位为℃、一回路冷却剂平均温度 T_{ave} 单位为℃、蒸汽发生器蒸汽压力 p_{sg} 单位为bar;y为输出向量,包含一回路冷却剂平均温度 T_{ave} 单位为℃、汽轮机功率 W_{st} 单位为kW;rou(L)表示控制棒的感生反应性; α_{rf} 表示堆芯燃料温度对堆芯反应性的负反馈系数; α_{ave} 表示一回路冷却剂平均温度对堆芯反应性的负反馈系数; ΔT_{rf} 表示堆芯燃料温度变化单位为℃; ΔT_{ave} 表示一回路冷却剂平

均温度变化单位为 $^{\circ}\text{C}$; $(kA)_{fc}$ 表示堆芯燃料与一回路冷却剂间的换热作用单位为 kW/K ; $(kA)_{sgh}$ 表示蒸汽发生器一、二回路间的换热作用单位为 kW/K ; T_{sg} 表示蒸汽发生器二次侧蒸汽饱和温度单位为 $^{\circ}\text{C}$; p_{sg} 表示蒸汽发生器内蒸汽压力单位为 bar ; G_{fw} 表示给水流量单位为 kg/s ; h_{fw} 表示给水比焓单位为 kJ/kg ; G_{sg} 表示蒸汽发生器蒸汽流量单位为 kg/s ; h_g 表示饱和蒸汽比焓单位为 kJ/kg ; h_f 表示饱和水比焓单位为 kJ/kg ; ρ_f 表示饱和水密度单位为 kg/m^3 ; ρ_g 表示饱和蒸汽密度单位为 kg/m^3 ; V_{sgf} 表示蒸汽发生器内液相区体积单位为 m^3 ; V_{sgg} 表示蒸汽发生器内汽相区体积单位为 m^3 ; V_{sg} 表示蒸汽发生器总体积单位为 m^3 ; Ψ 为单位转换系数; G_{st} 表示进入汽轮机的蒸汽流量单位为 kg/s ; Q_{chc} 表示二回路工质在凝汽器中被吸收的热量单位为 kW ; d_1-d_4 为待确定的模型动态参数; f_1-f_7 为待确定函数;

所述步骤3) 中压水堆核动力装置实际运行过程中模型简化基于如下假设:

(1) 一回路中的稳压器已配有独立的控制器以保证其内部压力和水位的稳定, 二回路中蒸汽发生器、凝汽器、高压加热器、除氧器和低压加热器已配有独立的控制器以保证其内部水位的稳定, 认为二回路给水流量、蒸汽发生器蒸汽流量和进入汽轮机的蒸汽流量三者相等;

(2) 蒸汽发生器内工质始终处于饱和状态;

(3) 饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀做工的过程认为是一个静态过程;

4) 采用数据分析、推导、拟合和辨识的方法获取模型参数。

一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法

技术领域

[0001] 本发明属于核能控制领域,具体为一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法。

背景技术

[0002] 核能以其能量密度大、续航能力强、不依赖空气工作的特点在船舶领域得到了广泛的重视。发展船用核动力系统对我国的国防和国民经济具有战略意义。然而,由于船舶的机动性,它需要频繁、快速、大范围变负荷以满足其移动需求,这对系统的协调运行和控制提出了更高的要求。

[0003] 目前核动力系统的相关控制仍以传统的PID控制为主要手段。虽然PID具有设计简单、易于实施的特点,但其更擅长处理线性、单变量过程的控制问题。而船用核动力系统各设备、参数间耦合严重,且其在大范围变负荷过程中呈现出较强的非线性,因此,PID并不能满足船用核动力装置系统级的协调控制及大范围灵活运行需求。而善于解决多变量、耦合、非线性过程控制问题的模型预测控制(Model predictive control, MPC)是一个极好的选择。但MPC是一种基于模型的控制算法,其预测模型的建立是MPC控制器设计的关键。

[0004] 现有的船用核动力系统相关的动态机理模型主要有2种:(1)基于局部环节建立的单个设备的模型;(2)包含多个设备的核动力装置全系统机理模型。其中,局部设备模型仅能描述局部环节运行特征,无法满足核动力装置系统级仿真和控制设计需求;包含多个设备的核动力装置全系统机理模型能全面反映系统运行特性,但该模型涉及变量过多、结构复杂,并不适合控制设计。此外,能反映核动力装置大范围运行特性的建模思路还有纯数据驱动的黑箱模型,如神经网络模型,以及基于多个线性模型加权的多模型。然而,前者内部结构未知,仅由有限数据支撑,无法应对系统运行过程中的未知情况,从而给系统运行带来安全问题;而后者仅由个别线性模型组合得到,对系统大范围运行特性的描述能力有限。

[0005] 现有技术如下:

[0006] 与专利CN109783936A“压水堆核电站核岛变工况蓄热增量的计算方法”的技术对比:

[0007] 专利CN109783936A是为了在核电机组不具备真机试验的条件下实现核电机组核岛变工况蓄热增量的计算,而我们的方法旨在提供一种核动力装置系统级简化非线性模型以推动基于模型的控制算法在核能控制领域的应用。

[0008] 专利CN109783936A中的核电机组核岛变工况蓄热增量的计算模型是一种稳态模型,反映的是各主要变量之间基于能量守恒方程的稳态关系,而我们所提出的压水堆核动力装置系统级简化非线性模型是一种动态模型,能全面反映核动力装置的动态运行过程。

[0009] 专利CN109783936A中冷却剂平均温度-核动力功率计算模型是基于平衡点附近微小摄动线性理论通过一元线性回归法得到的,其本质上是一种线性模型,而在我们所提出的建模方法中,模型结构由系统机理分析得到,模型参数基于系统大范围变工况运行数据由辨识方法得到,其本质上是一种非线性模型。

[0010] 专利CN109783936A所提出的核电机组核岛变工况蓄热增量的计算方法所涉及的关键参数仅与核动力装置中的核反应堆、一回路冷却剂和蒸发器相关,无法反映核动力装置全系统特性,而我们所提出的压水堆核动力装置系统级简化非线性模型所涉及参数涵盖核动力装置各主要设备,能够全面反映核动力装置全系统特性。

[0011] 专利CN109783936A所提出的计算方法仅能用于计算核电机组核岛蓄热增量,而我们所提出的模型是基于各环节的能量、质量、动量、体积守恒关系得到的,能够全面支撑核动力系统热工水力过程的分析与计算。

[0012] 与专利CN102279901A“一种针对第三代压水堆核电机组的建模方法”的技术对比:

[0013] 专利CN102279901A旨在为核动力装置系统分析提供建模思路,所提模型被用作仿真平台和被控对象,而我们所提出的压水堆核动力装置系统级非线性简化模型旨在为控制服务,其功能是被用作控制模型。

[0014] 专利CN102279901A提建模方法涉及参数众多,模型结构复杂,无法支撑基于模型的控制算法在核动力系统堆机协调控制中的应用,而我们所提的简化非线性模型仅涉及四个关键状态变量,模型结构简单,可以推动基于模型的控制算法在核动力控制领域的应用。

[0015] 专利CN102279901A所提的建模方法未考虑汽轮机抽汽,而我们提出的建模思路考虑了来自汽轮机的抽汽对给水温度的影响。

[0016] 专利CN102279901A所建立压水堆核电机组模型未考虑回热加热器、除氧器的动态过程对系统时间常数的影响,而我们所提出的建模方法考虑了高、低压回热加热器、除氧器对系统整体动态过程的影响,该考虑更符合实际。

[0017] 综上所述,目前在船用核动力控制领域,缺乏一种高质量、结构简单的核动力装置系统级动态模型以推动基于模型的控制算法在核能控制领域的应用。

发明内容

[0018] 为解决上述技术问题,本发明提出了一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法,该模型既能全面描述大范围运行条件下压水堆核动力装置系统级运行特征,又具有结构简单、安全可靠的特点,能够支撑基于模型的控制算法在船用核动力装置系统级协调运行设计中的应用。

[0019] 为实现上述目的,本发明采取的技术方案是:

[0020] 一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法,包括:

[0021] 1) 将压水堆核动力装置实际运行过程简化为3个过程:

[0022] 一回路中核能的产生与转换、蒸汽发生器中一、二回路侧的能量交换、饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀做工;

[0023] 2) 提取能够表征压水堆核动力装置过程的核反应堆功率、堆芯燃料温度、一回路冷却剂平均温度、蒸汽发生器蒸汽压力及汽轮机功率为关键要素;

[0024] 3) 基于各过程的守恒原理和机理分析确定模型框架;

[0025] 4) 采用数据分析、推导、拟合和辨识的方法获取模型参数。

[0026] 作为本发明进一步改进,所述步骤1)中压水堆核动力装置实际运行过程中模型简化基于如下假设:

[0027] (1) 一回路中的稳压器已配有独立的控制器以保证其内部压力和水位的稳定,二

回路中蒸汽发生器、凝汽器、高压加热器、除氧器和低压加热器已配有独立的控制器以保证其内部水位的稳定,认为二回路给水流量、蒸汽发生器蒸汽流量和进入汽轮机的蒸汽流量三者相等;

[0028] (2) 蒸汽发生器内工质始终处于饱和状态;

[0029] (3) 饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀做工的过程认为是一个静态过程。

[0030] 作为本发明进一步改进,选取核反应堆功率、堆芯燃料温度、一回路冷却剂平均温度、二回路蒸汽压力为模型的状态变量,选取一回路冷却剂平均温度和汽轮机功率为模型的输出变量,选取堆芯控制棒有效长度和汽轮机调节阀阀门开度为模型的输入变量;

[0031] 压水堆核动力装置系统级简化非线性模型为:

$$[0032] \quad \begin{cases} \frac{dW_{rp}}{dt} = \frac{rou(L) + \alpha_{rf}\Delta T_{rf} + \alpha_{ave}\Delta T_{ave}}{d_1} W_{rp} \\ \frac{dT_{rf}}{dt} = \frac{W_{rp} + (kA)_{fc}(T_{ave} - T_{rf})}{d_2} \\ \frac{dT_{ave}}{dt} = \frac{(kA)_{fc}(T_{rf} - T_{ave}) - (kA)_{sgh}(T_{ave} - T_{sg})}{d_3} \\ \frac{dp_{sg}}{dt} = \frac{(kA)_{sgh}(T_{ave} - T_{sg}) + G_{st}(h_{fw} - h_g)}{d_4 \cdot f_1(p_{sg}, T_{ave})} \end{cases} \quad (1)$$

$$[0033] \quad W_{st} = f_5(G_{st}) \cdot (G_{st}h_g - G_{fw}h_{fw} - Q_{chc}) \quad (2)$$

$$[0034] \quad T_{sg} = f_2(p_{sg}) \quad (3)$$

$$[0035] \quad h_g = f_3(p_{sg}) \quad (4)$$

$$[0036] \quad G_{st} = f_4(RV) \cdot p_{sg} \quad (5)$$

$$[0037] \quad Q_{chc} = f_6(G_{st}) \quad (6)$$

$$[0038] \quad h_{fw} = f_7(G_{st}) \quad (7)$$

[0039] 模型包含2个输入变量、4个状态变量及2个输出变量:

$$[0040] \quad u = \begin{bmatrix} L \\ RV \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} W_{rp} \\ T_{rf} \\ T_{ave} \\ p_{sg} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} T_{ave} \\ W_{st} \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0041] 其中,u表示输入向量,包含控制棒有效长度L单位为Bu、汽轮机调节阀阀门开度RV单位为%;x表示状态向量,包含核反应堆功率 W_{rp} 单位为kW、堆芯燃料温度 T_{rf} 单位为℃、一回路冷却剂平均温度 T_{ave} 单位为℃、蒸汽发生器蒸汽压力 p_{sg} 单位为bar;y为输出向量,包含一回路冷却剂平均温度 T_{ave} 单位为℃、汽轮机功率 W_{st} 单位为kW;rou(L)表示控制棒的感生反应性; α_{rf} 表示堆芯燃料温度对堆芯反应性的负反馈系数; α_{ave} 表示一回路冷却剂平均温度对堆芯反应性的负反馈系数; ΔT_{rf} 表示堆芯燃料温度变化单位为℃; ΔT_{ave} 表示一回路冷却剂平均温度变化单位为℃;(kA)_{fc}表示堆芯燃料与一回路冷却剂间的换热作用单位为kW/K;(kA)_{sgh}表示蒸汽发生器一、二回路间的换热作用单位为kW/K; T_{sg} 表示蒸汽发生器二次侧蒸

汽饱和温度单位为 $^{\circ}\text{C}$; p_{sg} 表示蒸汽发生器内蒸汽压力单位为bar; G_{fw} 表示给水流量单位为 kg/s ; h_{fw} 表示给水比焓单位为 kJ/kg ; G_{sg} 表示蒸汽发生器蒸汽流量单位为 kg/s ; h_{g} 表示饱和蒸汽比焓单位为 kJ/kg ; h_{f} 表示饱和水比焓单位为 kJ/kg ; ρ_{f} 表示饱和水密度单位为 kg/m^3 ; ρ_{g} 表示饱和蒸汽密度单位为 kg/m^3 ; V_{sgf} 表示蒸汽发生器内液相区体积单位为 m^3 ; V_{sgg} 表示蒸汽发生器内汽相区体积单位为 m^3 ; V_{sg} 表示蒸汽发生器总体积单位为 m^3 ; Ψ 为单位转换系数; G_{st} 表示进入汽轮机的蒸汽流量单位为 kg/s ; Q_{chc} 表示二回路工质在凝汽器中被吸收的热量单位为 kW ; d_1-d_4 为待确定的模型动态参数; f_1-f_7 为待确定函数。

[0042] 与现有技术相比,本发明具有以下优点和有益效果:

[0043] 本发明的优点在于,提出了一种新型的压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法,在该方法中,模型结构由系统的机理分析确定,确保了模型能够全面地提取到压水堆核动力装置系统级的运行特征;模型参数由压水堆核动力装置大范围、非线性运行数据经分析、推导、拟合、辨识得到,使得模型能够捕捉到压水堆核动力装置在大范围运行过程中由于负荷变化而引起的非线性特性。与现有的核动力装置模型相比,本发明提供的压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法能同时满足模型结构简单和能全面描述装置系统级的运行特征的要求,所提出的模型可用于控制设计,能够支撑基于模型的控制算法在核能领域的应用,以实现和改善核动力装置大范围、系统级协调运行设计。

附图说明

[0044] 图1为本发明的一种实施例的系统过程分解图;

[0045] 图2为本发明的一种实施例的模型精度对比图。

具体实施方式

[0046] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述:

[0047] 本发明公开了一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法,具体实施如下:

[0048] 步骤1:将压水堆核动力装置的实际运行过程简化为3个主要过程:一回路中核能的产生与转换、蒸汽发生器中一、二回路侧的能量交换、饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀工,如图1所示;

[0049] 步骤2:提取能够表征压水堆核动力装置主要过程的核反应堆功率、堆芯燃料温度、一回路冷却剂平均温度、蒸汽发生器蒸汽压力及汽轮机功率为关键要素;

[0050] 步骤3:基于各过程的守恒原理和机理分析确定模型框架;

[0051] 步骤4:在仿真软件Simulink/MATLAB平台搭建模型;

[0052] 步骤5:基于已验证的船用压水堆核动力装置复杂机理模型提取压水堆核动力装置大范围、非线性运行数据;

[0053] 步骤6:基于采集到的数据,采用分析、推导、拟合和辨识的方法获取模型参数。

[0054] 模型的简化基于如下假设:

[0055] (1) 一回路中的稳压器已配有独立的控制器以保证其内部压力和水位的稳定,二回路中蒸汽发生器、凝汽器、高压加热器、除氧器和低压加热器已配有独立的控制器以保证其内部水位的稳定,认为二回路给水流量、蒸汽发生器蒸汽流量和进入汽轮机的蒸汽流量

三者相等；

[0056] (2) 蒸汽发生器内工质始终处于饱和状态；

[0057] (3) 饱和蒸汽在汽轮机系统膨胀做工的过程认为是一个静态过程。

[0058] 核反应堆功率可表示为：

$$[0059] \quad \frac{dW_{rp}}{dt} = \frac{rou(L) + \alpha_{rf}\Delta T_{rf} + \alpha_{ave}\Delta T_{ave}}{d_1} W_{rp} \quad (1)$$

[0060] 其中, W_{rp} 表示核反应堆功率单位为kW; $rou(L)$ 表示控制棒的感生反应性; α_{rf} 表示堆芯燃料温度对堆芯反应性的负反馈系数; α_{ave} 表示一回路冷却剂平均温度对堆芯反应性的负反馈系数; ΔT_{rf} 表示堆芯燃料温度变化单位为℃; ΔT_{ave} 表示一回路冷却剂平均温度变化单位为℃; d_1 为待确定的模型动态参数。

[0061] 堆芯燃料温度可表示为：

$$[0062] \quad \frac{dT_{rf}}{dt} = \frac{W_{rp} + (kA)_{fc}(T_{ave} - T_{rf})}{d_2} \quad (2)$$

[0063] 其中, T_{rf} 表示燃料温度单位为℃; T_{ave} 表示冷却剂平均温度单位为℃; $(kA)_{fc}$ 表示堆芯燃料与一回路冷却剂间的换热作用单位为kW/K; d_2 为待确定的模型动态参数。

[0064] 在蒸汽发生器中, 一回路侧冷却剂与二回路侧工质间的热量交换可表示为：

$$[0065] \quad \frac{dT_{ave}}{dt} = \frac{(kA)_{fc}(T_{rf} - T_{ave}) - (kA)_{sg}(T_{ave} - T_{sg})}{d_3} \quad (3)$$

[0066] 其中, $(kA)_{sg}$ 表示蒸汽发生器一、二回路间的换热作用单位为kW/K; T_{sg} 表示蒸汽发生器二次侧蒸汽饱和温度单位为℃; d_3 为待确定的模型动态参数。

[0067] 蒸汽发生器内蒸汽压力可表示为：

$$[0068] \quad \frac{dp_{sg}}{dt} = \frac{(kA)_{sg}(T_{ave} - T_{sg}) + G_{fw}h_{fw} - G_{sg}h_g - \frac{\rho_f h_f - \rho_g h_g}{\rho_f - \rho_g}(G_{fw} - G_{sg})}{V_{sgf} \cdot (\rho_f \frac{dh_f}{dp_{sg}} + \frac{h_g - h_f}{\rho_f - \rho_g} \rho_g \frac{d\rho_f}{dp_{sg}}) + V_{sgg} \cdot (\rho_g \frac{dh_g}{dp_{sg}} + \frac{h_g - h_f}{\rho_f - \rho_g} \rho_f \frac{d\rho_g}{dp_{sg}}) - \Psi V_{sg}} \quad (4)$$

$$= \frac{(kA)_{sg}(T_{ave} - T_{sg}) + G_{fw}h_{fw} - G_{sg}h_g - \frac{\rho_f h_f - \rho_g h_g}{\rho_f - \rho_g}(G_{fw} - G_{sg})}{Z}$$

[0069] 其中, p_{sg} 表示蒸汽发生器内蒸汽压力单位为bar; G_{fw} 表示给水流量单位为kg/s; h_{fw} 表示给水比焓单位为kJ/kg; G_{sg} 表示蒸汽发生器蒸汽流量单位为kg/s; h_g 表示饱和蒸汽比焓单位为kJ/kg; h_f 表示饱和水比焓单位为kJ/kg; ρ_f 表示饱和水密度单位为kg/m³; ρ_g 表示饱和蒸汽密度单位为kg/m³; V_{sgf} 表示蒸汽发生器内液相区体积单位为m³; V_{sgg} 表示蒸汽发生器内汽相区体积单位为m³; V_{sg} 表示蒸汽发生器总体积单位为m³; Ψ 为单位转换系数; Z 代表方程右侧分母部分。根据蒸汽发生器内的换热机理, Z 有如下表达形式：

$$[0070] \quad Z = f_1(p_{sg}, T_{ave}) \quad (5)$$

[0071] 其中, $f_1(\cdot)$ 为待定函数。

[0072] 蒸发器内饱和蒸汽的温度 T_{sg} 和比焓 h_g 与蒸发器内蒸汽压力 p_{sg} 存在如下关系：

$$[0073] \quad T_{sg} = f_2(p_{sg}) \quad (6)$$

[0074] $h_g = f_3(p_{sg})$ (7)

[0075] 其中, $f_2(\cdot)$ 和 $f_3(\cdot)$ 为待定函数;

[0076] 进入汽轮机的蒸汽流量的计算公式为:

[0077] $G_{st} = f_4(RV) \cdot p_{sg}$ (8)

[0078] 其中, G_{st} 表示进入汽轮机的蒸汽流量单位为 kg/s; RV 表示汽轮机调节阀阀门开度单位为 %; p_{sg} 表示蒸汽发生器内蒸汽压力单位为 bar; $f_4(\cdot)$ 为待定函数。

[0079] 汽轮机功率可由下式得到:

[0080] $W_{st} = f_5(G_{st}) \cdot (G_{st} h_g - G_{fw} h_{fw} - Q_{chc})$ (9)

[0081] 其中, W_{st} 表示汽轮机功率单位为 kW; Q_{chc} 表示二回路工质在凝汽器中被吸收的热量单位为 kW; $f_5(\cdot)$ 为待定函数。

[0082] 给水比焓 h_{fw} 和二回路工质在凝汽器中被吸收的热量 Q_{chc} 主要受汽轮机流量 G_{st} 的影响, 可表示如下:

[0083] $Q_{chc} = f_6(G_{st})$ (10)

[0084] $h_{fw} = f_7(G_{st})$ (11)

[0085] 其中, $f_6(\cdot)$ 和 $f_7(\cdot)$ 为待定函数;

[0086] 将压水堆核动力装置二回路侧各设备的热工过程对系统时间常数的影响作为一个动态参数 d_4 加入到蒸汽发生器蒸汽压力的求解方程中:

[0087]
$$\frac{dp_{sg}}{dt} = \frac{(kA)_{sgh}(T_{ave} - T_{sg}) + G_{fw} h_{fw} - G_{sg} h_g - \frac{\rho_f h_f - \rho_g h_g}{\rho_f - \rho_g} (G_{fw} - G_{sg})}{d_4 \cdot f_1(p_{sg}, T_{ave})}$$
 (12)

[0088] 其中, d_4 为待确定的模型动态参数。

[0089] 压水堆核动力装置系统级简化非线性模型为:

[0090]
$$\begin{cases} \frac{dW_{rp}}{dt} = \frac{rou(L) + \alpha_{rf} \Delta T_{rf} + \alpha_{ave} \Delta T_{ave}}{d_1} W_{rp} \\ \frac{dT_{rf}}{dt} = \frac{W_{rp} + (kA)_{fc}(T_{ave} - T_{rf})}{d_2} \\ \frac{dT_{ave}}{dt} = \frac{(kA)_{fc}(T_{rf} - T_{ave}) - (kA)_{sgh}(T_{ave} - T_{sg})}{d_3} \\ \frac{dp_{sg}}{dt} = \frac{(kA)_{sgh}(T_{ave} - T_{sg}) + G_{st}(h_{fw} - h_g)}{d_4 \cdot f_1(p_{sg}, T_{ave})} \end{cases}$$
 (13)

[0091] $W_{st} = f_5(G_{st}) \cdot (G_{st} h_g - G_{fw} h_{fw} - Q_{chc})$ (14)

[0092] $T_{sg} = f_2(p_{sg})$ (15)

[0093] $h_g = f_3(p_{sg})$ (16)

[0094] $G_{st} = f_4(RV) \cdot p_{sg}$ (17)

[0095] $Q_{chc} = f_6(G_{st})$ (18)

[0096] $h_{fw} = f_7(G_{st})$ (19)

[0097] 该模型包含 2 个输入变量、4 个状态变量及 2 个输出变量:

$$[0098] \quad u = \begin{bmatrix} L \\ RV \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} W_{rp} \\ T_{rf} \\ T_{ave} \\ p_{sg} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} T_{ave} \\ W_{st} \end{bmatrix} \quad (20)$$

[0099] 其中, u 表示输入向量, 包含控制棒有效长度 L 单位为 Bu、汽轮机调节阀阀门开度 RV 单位为 %; x 表示状态向量, 包含核反应堆功率 W_{rp} 单位为 kW、堆芯燃料温度 T_{rf} 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 、一回路冷却剂平均温度 T_{ave} 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 、蒸汽发生器蒸汽压力 p_{sg} 单位为 bar; y 为输出向量, 包含一回路冷却剂平均温度 T_{ave} 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 、汽轮机功率 W_{st} 单位为 kW。

[0100] 待确定的模型参数包括 4 个静态参数 $((kA)_{fc}, (kA)_{sgh}, \alpha_{rf}, \alpha_{ave})$ 、7 个待确定函数 (f_1-f_7) 和 4 个动态参数 (d_1-d_4) 。

[0101] 基于上述模型结构, 在 Simulink/MATLAB 平台搭建上述得到的压水堆核动力装置系统级简化非线性模型, 并基于已经验证的船用压水堆核动力装置复杂机理模型提取的压水堆核动力装置大范围、非线性运行数据, 采用分析、推导、拟合的方法获取其静态参数和待确定函数。同样基于采集到的压水堆核动力装置大范围、非线性运行数据, 采用非线性最小二乘法辨识确定模型的动态参数。非线性最小二乘法在求解过程中遵循如下目标函数:

$$[0102] \quad d^* = \arg \min_d \sum (Y_p - Y_m)^2 \quad (21)$$

[0103] 其中, d 为待确定的动态参数, $d = [d_1, d_2, d_3, d_4]$; Y_p 为来自待构建的压水堆核动力装置系统级简化非线性模型的数据集, $Y_p = [W_{rp}, T_{rf}, T_{ave}, p_{sg}]$; Y_m 为压水堆核动力装置大范围、非线性运行数据, $Y_m = [W_{rp}, T_{rf}, T_{ave}, p_{sg}]$ 。

[0104] 确定好模型参数后, 将本发明所提出的压水堆核动力装置系统级简化非线性模型 (simplified model) 与船用压水堆核动力装置复杂机理模型 (data) 作对比, 验证了所提出的模型的精度, 如图 2 所示。

[0105] 由此, 本发明提供一种压水堆核动力装置系统级简化非线性建模方法能够准确、全面地捕捉船用核动力装置大范围运行条件下的系统级的运行特征。

[0106] 以上所述, 仅是本发明的较佳实施例而已, 并非是对本发明作任何其他形式的限制, 而依据本发明的技术实质所作的任何修改或等同变化, 仍属于本发明所要求保护的范围内。

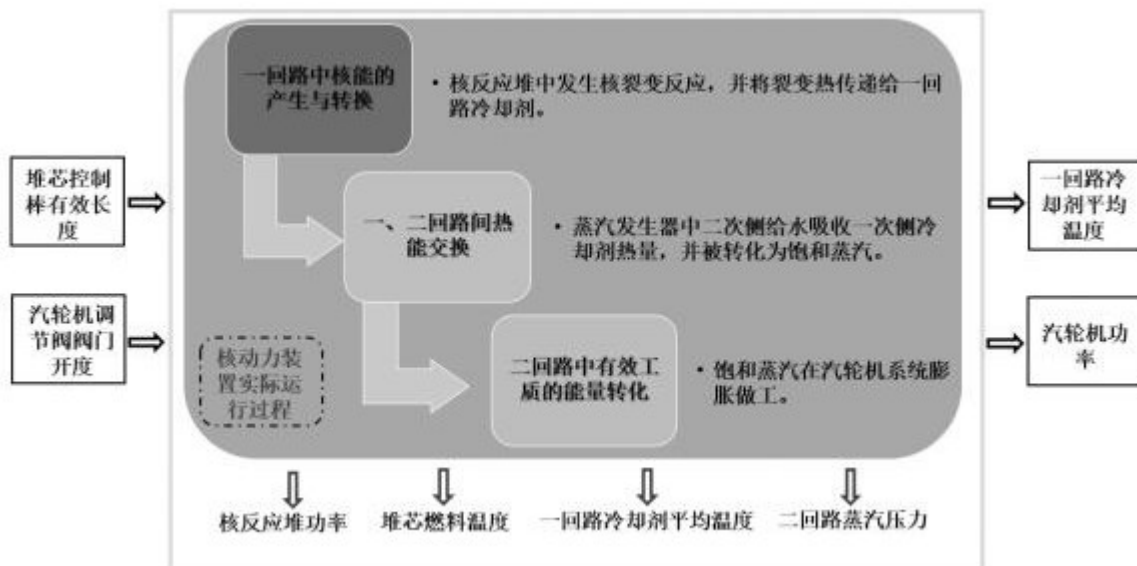


图 1

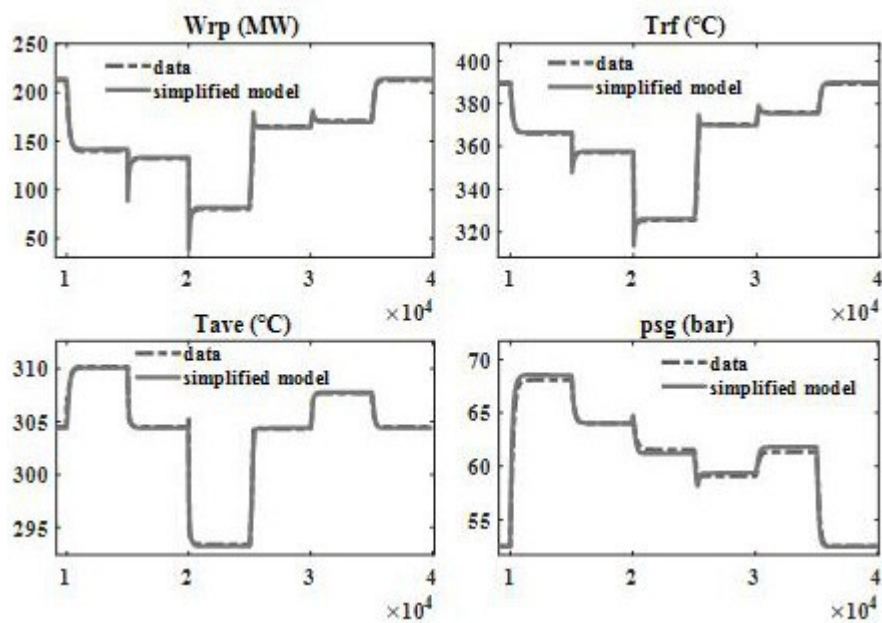


图 2