

基于模型的气冷反应堆虚拟仿真*

祁琳¹ 乔仕岭¹ 李宗洋² 刘黎丽¹ 刘天才¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 中核战略规划研究总院, 北京 100048)

摘要: 气冷反应堆耦合布雷顿循环的发电方式效率高, 对大功率空间堆电源和核电推进的发展具有重要意义。为了实现气冷反应堆运行仿真效果的可视化分析, 研究了基于气冷反应堆系统瞬态分析技术和三维可视化技术的虚拟仿真技术, 建立了气冷反应堆系统瞬态分析模型和三维结构模型, 完成了基于模型的气冷反应堆虚拟仿真, 实现了对三维对象进行虚拟操作并模拟运行工况, 为项目的演示验证和人员培训提供了有效工具。

关键词: 气冷反应堆 瞬态分析 三维可视化 虚拟仿真

中图分类号: TL365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-9082(2022)10-0226-04

空间核反应堆电源具有环境适应性好、功率覆盖范围广、结构紧凑以及大功率条件下质量功率比小等突出优点, 在军民航天任务中具有广阔的应用前景^[1]。随着人类足迹的不断拓展, 开发更高效的热电转换系统, 从而降低重量、提升效益, 是空间核反应堆的一个重要发展趋势。将高温燃气轮机循环耦合到气冷反应堆上, 空间应用的效率可达35%, 如此显著的效率改进将使大功率空间核反应堆电源及核电推进成为可能。NASA Prometheus计划中确定了输出电功率为200kWe的气冷反应堆加布雷顿循环的空间堆电源系统方案, 建造了布雷顿发电机样机并开展了相关试验。俄罗斯实施了兆瓦级空间核动力飞船研发计划^[2], 空间堆电源同样采用超高温气冷反应堆设计, 气体布雷顿循环发电, 目前已完成兆瓦级空间核反应堆电源初步设计、反应堆燃料元件入堆考验以及反应堆本体技术试验工作。

空间核反应堆电源技术融核能、航天、材料、信息、控制、环境等科学为一体, 是一门综合性的前沿科学技术, 技术跨度广、难度大、安全性要求高, 很有必要在设计初期, 利用虚拟样机技术将虚拟对象与虚拟试验环境结合起来, 在设计早期及时发现潜在的问题, 进行调整修正、实现优化。

本文开展基于模型的气冷反应堆虚拟仿真, 完成对气冷反应堆电源系统构型的逼真呈现、物理状态的生动可视化, 以及运行过程的精确仿真, 从而真正达到虚拟仿真与反应堆型号研制、运行相结合, 对加快空间堆研发步伐具有重要意义。

一、研究内容

1. 研究对象

本文的研究对象为132kWe气冷空间堆系统, 堆芯产生

的热量由氦氘混合气体带出, 流经透平做功, 再流经回热器放热, 最后流经气体冷却器释放余热, 排出的冷却工质经压气机压缩和回热器加热, 再次回到堆芯, 如图1所示。



图1 气冷反应堆(a)和闭式布雷顿循环系统(b)示意图

①-堆芯, ②-涡轮透平, ③-回热器, ④-气体冷却器, ⑤-压气机, ⑥-辐射散热器, ⑦-发电机; 1→2-压气机压缩过程, 2→3-回热加热过程, 3→4-堆芯加热过程, 4→5-冲转做功过程, 5→6-回热放热过程, 6→1-气体冷却过程。

2. 虚拟仿真技术

虚拟仿真技术是基于先进建模技术、多领域仿真技术、交互式用户界面技术、虚拟现实技术等的应用技术。虚拟仿真系统将不同工程领域的开发模型结合在一起, 能够从外观、功能和行为上模拟真实产品^[3]。其中, 从外观上模拟反应堆需要解决三维结构可视化技术, 从功能上模拟反应堆需要解决系统瞬态仿真技术, 此外, 还需要将生成的仿真数据送入可视化环境, 最终从外观、功能以及在虚拟环境中的各种行为上表达反应堆。

法国的AREVA公司与达索公司合作, 将虚拟现实技术应用到反应堆工程的设计、建造、运行和维护过程, 以三维模型为基础实现了反应堆运行过程的动态仿真。

中国核动力研究设计院利用Delmia、UG等软件完成了反应堆的结构样机, 并在此基础上建立了虚拟检修系统^[4]。

武汉核动力运行研究所核电仿真中心开发了用于工作

* 基金: 稳定基础科研计划资助项目(BJ19002020)。

人员操作培训的虚拟仿真系统，为核电站人员熟悉工作环境、掌握设备特性、演习工作流程提供支撑，是虚拟仿真技术在核工业领域的一次成功应用^[5]。

3. 关键问题及研究思路

根据国内外在虚拟仿真技术方面的研究成果，主要是在结构仿真或功能仿真的基础上开发专用样机模拟特定的行为，并没有真正地将结构仿真与功能仿真耦合起来，同步处理运动学信息和动力学信息，从而实现反应堆的整体表达。

因此，多领域仿真程序的交互和信息的实时传递是虚拟仿真的关键问题之一，本研究将面向气冷空间堆安全分析、演示验证、运行培训等功能需求，主要解决系统瞬态仿真技术和三维结构可视化技术，在此基础上建立交互式数据与指令接口，完成运行仿真和可视化的一体化综合解决方案。

二、研究方法

1. 气冷反应堆瞬态仿真程序开发

为了掌握气冷反应堆的动态特性，建立其系统设备的动力学模型，主要模型及求解公式如下。

1.1 六组缓发中子的裂变功率模型

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^{n_r} \lambda_i C_i(t) + S_0 \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n_r \quad (2)$$

$$\rho(t) = \rho_{insert}(t) + \rho_{feedback}(t) \quad (3)$$

其中， n -裂变功率 (W)； $\rho(t)$ -总反应性； β -缓发中子总份额； β_i -第*i*组缓发中子份额； Λ -中子代时间 (s)； λ_i -第*i*组缓发中子衰变常数 (s⁻¹)； $C_i(t)$ -第*i*组缓发中子的裂变功率 (W)； S_0 -初始源 (W)； $\rho_{insert}(t)$ -控制棒引入的反应性； $\rho_{feedback}(t)$ -反应性反馈。

1.2 四组裂变产物的衰变功率模型

$$P_{DE} = \sum_{i=1}^4 \lambda_h^i h_i \quad (4)$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \beta_h^i n - \lambda_h^i h_i \quad (5)$$

$$P_{rx} = n + P_{DE} \quad (6)$$

其中， P_{DE} -衰变功率 (W)； λ_h^i -第*i*组裂变产物衰变常数 (s⁻¹)； $\lambda_h^i h_i$ -第*i*组裂变产物衰变功率 (W)； β_h^i -第*i*组裂变产物的份额； P_{rx} -核功率 (W)。

1.3 功率分布模型

$$Q_{V_{JK}} = P_{rx} \Phi_{JK} / V_{JK} \quad (7)$$

其中， $Q_{V_{JK}}$ -燃料控制体体积释热率 (W/m³)； Φ_{JK} -燃料控制体功率份额； V_{JK} -燃料控制体体积 (m³)。

1.4 反应性反馈模型

$$\rho_{feedback}(t) = \alpha_{fuel}(T_{fuel} - T_{init}) + \alpha_{lattice}(T_{lattice} - T_{init}) + \alpha_{BeO}(T_{BeO} - T_{init}) \quad (8)$$

其中， α -反馈系数；下标fuel表示燃料，下标lattice表示格架，下标BeO表示反射层，下标init表示初始。

1.5 燃料和冷却剂温度求解模型

$$\frac{dT_f}{dt} = \kappa_f \cdot P_{rx} - \gamma_f \cdot (T_f - T_{34}) \quad (9)$$

$$\frac{dT_{cav}}{dt} = A_0 \gamma_f \cdot (T_f - T_{cav}) - m_{dot} c_p \kappa_{cav} (T_4 - T_3) \quad (10)$$

其中， T_f -燃料温度 (K)； κ_f -燃料的比热容倒数 (K/J)； γ_f -燃料向冷却剂传热的时间常数倒数 (1/s)； κ_{cav} -冷却剂的比热容倒数 (K/J)； T_{cav} -冷却剂平均温度 (K)； T_3 、 T_4 -堆芯冷却剂进出口温度 (K)； A_0 -燃料与冷却剂的换热面积 (m²)； C_p -冷却剂比热容 (J/kgK)； m_{dot} -冷却剂质量流量 (kg/s)。

1.6 回热器结构材料温度求解模型

$$\frac{dT_{rep}}{dt} = \frac{hA_{rep}}{M_{rep} \times Cp_{rep}} (T_{56} - T_{rep}) - \frac{hA_{rep}}{M_{rep} \times Cp_{rep}} (T_{rep} - T_{23}) \quad (11)$$

其中， T_{rep} -回热器结构材料温度 (K)； h_{rep} -回热器传热系数 (W/m²K)； A_{rep} -回热器换热面积 (m²)； C_{pre} -回热器结构材料比热 (J/kgK)； T_2 、 T_3 -回热器热侧进出口温度 (K)； T_{23} 是回热器热侧进出口平均温度 (K)； T_5 、 T_6 -回热器冷侧进出口温度 (K)。

1.7 输出功率求解模型

$$P_x = P_{turb} - P_{comp} - P_{load} \quad (12)$$

$$P_{turb} = m_{dot} \cdot c_{pHeXe} \cdot (T_{o4} - T_{o5}) \quad (13)$$

$$P_{comp} = m_{dot} \cdot c_{pHeXe} \cdot (T_{o2} - T_{o1}) \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} Nrpm = \frac{P_x}{I_{tac} \cdot Nrpm \cdot 4\pi^2} \quad (15)$$

$$m_{fill} = \frac{P_{o4} V_{hp}}{R_0 T_{o3}} + \frac{P_{o1} V_{lp}}{R_0 T_{o6}} \quad (16)$$

其中， P_x -旋转轴的额外功率 (W)； P_{turb} -涡轮机产生的功率 (W)； P_{comp} -压缩机消耗的功率 (W)； P_{load} -负载功率 (W)； $Nrpm$ -旋转轴转速 (1/s)； I_{tac} -旋转轴惯性 (kgm²)； V_{hp} 、 V_{lp} -高低压缸体积 (L)； R_0 -氦氙混合气体常数 (J/kgK)； T_1 、 T_2 、 T_6 -压缩机进出口温度和气体冷却器进口温度 (K)。

此外，还建立了管道模型、腔室模型、辐射散热器模型、管网模型、泵模型等参与回路的计算，均采用集总参数模型，求解质量、动量、能量守恒方程。基于Fortran语言，开发了气冷反应堆瞬态仿真程序。

2. 气冷反应堆三维可视化程序开发

为了对反应堆系统的整体及各部件结构进行多角度三维

展示，为虚拟仿真系统提供拟高视效的三维环境，研究三维可视化技术，建立气冷反应堆的全三维数字资产，实现虚拟运行等可视化应用场景。三维结构模型的建立将直接影响运行、操作、控制的效果和培训的逼真度。

本研究中，气冷堆的三维模型展示是通过自研软件“反应堆三维展示与虚拟装配平台”（下简称虚拟装配平台）来实现的。虚拟装配平台采用的是C#语言、结合SQL Server数据库和EON三维引擎，实现了反应堆模型的三维可视化、虚拟装配设计等功能，如图2所示。

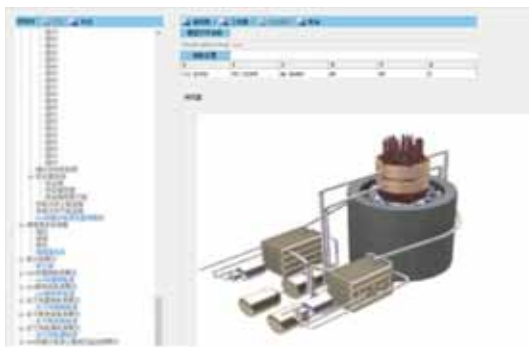


图2 反应堆三维展示与虚拟装配平台

3.交互式接口程序开发

为了将仿真过程中产生的实时数据、历史数据、设施设备的操作记录、维护数据等在三维场景中进行叠加显示与交互，需要开发交互式程序接口，实现3KeyMaster仿真平台与气冷堆安全分析程序的连接，以及3KeyMaster平台与气冷堆三维模型展示平台的连接。

根据仿真需求，选用基于共享内存^[6]的方式实现数据交互，如图3所示。将瞬态仿真程序编译成动态链接库（Dynamic Link Library，简称DLL）的形式，重新编写一个C++程序调用动态链接库，并且同时调用api函数，实现与task的C++程序的连接；虚拟装配平台通过C#语言实现数据交换，C#语言调用windows API，可以通过DllImport属性，将windows系统DLL文件中的API函数导入到C#工程中，供C#工程直接调用。



图3 接口设计方案示意图

4.时间步长的控制

时间步长的控制采用windows事件的方式进行调控，

windows事件即相当于一个windows系统级别的全局变量，用于不同进程之间的信息传递。windows事件实现基本运行功能及时间步长控制的原理如图4所示，将全部数据根据其内存地址映射到共享内存区，并根据进程、按规定的频率建立中断机制，使每一帧具有精确的周期^[7]，最终实现3KeyMaster与气冷反应堆瞬态仿真程序、虚拟装配程序的同步运行。



图4 事件功能原理图

三、气冷反应堆虚拟仿真系统

气冷反应堆虚拟运行仿真系统具备运行流程三维演示、虚拟操作、工况模拟等功能。

1.系统开发

采用先进仿真开发平台3KeyMaster、商用工业三维引擎EON、多专业自研理论模型结合相应软件与数据库开发平台共同构成开发环境^[8]，如图5所示，利用自主开发的瞬态仿真模型和系统结构模型产生仿真数据和虚拟对象，完成它们在第三方支撑平台上的叠加显示。用户进行虚拟运行仿真时，只需要在第三方支撑平台上打开两套模型，引入用户所需的操作，则虚拟对象和仿真数据同步发生相应的变化。



图5 虚拟仿真系统架构

图6是气冷反应堆虚拟仿真系统工作界面，包括二维图形仿真界面、关键参数趋势图界面、三维动态操作界面。



图6 气冷反应堆虚拟运行仿真系统界面

2. 气冷反应堆工况仿真

2.1 反应性瞬变

额定工况下引入+68pcm的外加反应性，核功率和堆芯最高温度的响应如图7、图8所示。随着功率升高，堆芯燃料温度逐渐上升，随后由于燃料和冷却剂温度负反馈使功率升高减慢。

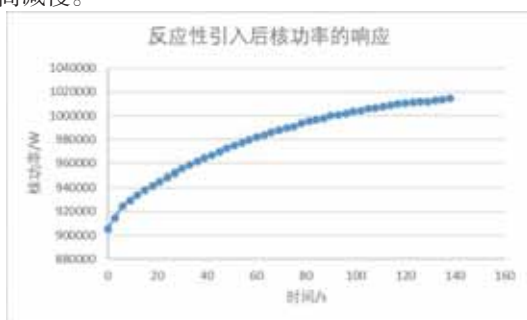


图7 引入正反应性后核功率的响应

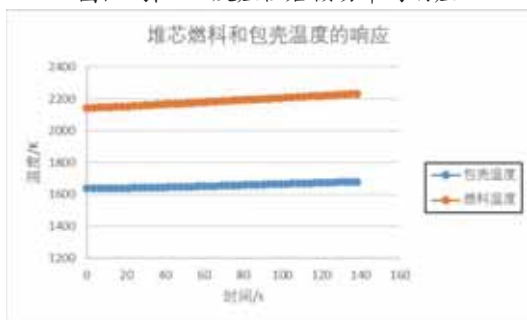


图8 引入正反应性后堆芯温度的响应

2.2 单个布雷顿机械故障

额定工况下引入某环路布雷顿机械失流，核功率和堆芯最高温度的响应如图9、图10所示。随着冷却剂流量逐渐减少，堆芯燃料温度逐渐上升，随后由于燃料和冷却剂温度负反馈使功率降低，随后堆芯温度升高速度减慢。

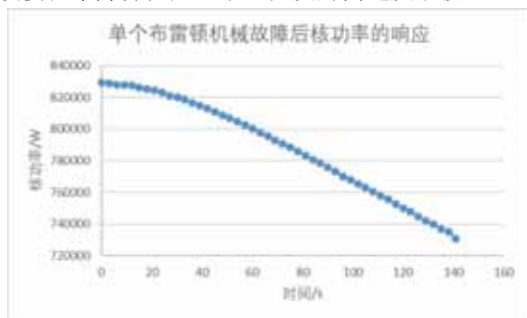


图9 单个布雷顿机械故障后核功率的响应

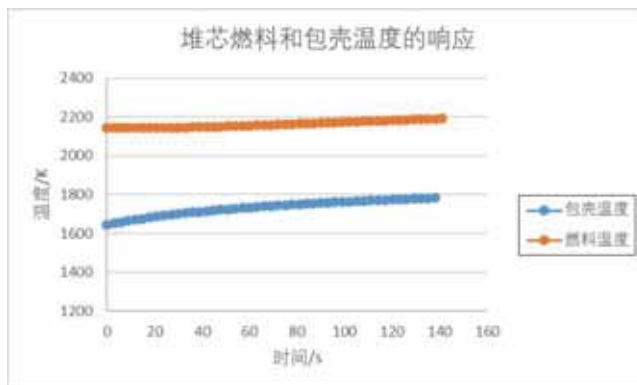


图10 单个布雷顿机械故障后堆芯温度的响应

结语

本文面向气冷反应堆开展虚拟运行仿真技术研究，首先开发了反应堆和闭式布雷顿循环系统的动态仿真模型，以及三维可视化结构模型；然后通过交互式接口开发，实现了不同专业模型基于统一平台的同步运行和叠加显示；最终建立了气冷反应堆虚拟仿真系统，并开展了仿真实验。为支持气冷反应堆的动态特性分析、仪控验证、虚拟装配与运行提供了一种参考途径。

参考文献

- [1]胡古,赵守智.空间核反应堆电源技术概览[J].深空探测学报.2017,4(05):430-443.
- [2]许春阳.俄罗斯兆瓦级空间核动力装置研发进展(内部报告)[R].北京:中国核科技信息与经济研究院,2012.
- [3]熊光楞,李伯虎,柴旭东.虚拟样机技术[J].系统仿真学报.2001(01):114-117.
- [4]廖玮,于洋,刘东.开发数字化反应堆提升反应堆设计与研发能力[J].中国核工业,2016(2):4.
- [5]郭江华,聂鑫,谢诞梅.虚拟仿真技术在核工程与核技术专业教学中的应用探讨[J].中国电力教育.2011(09):37-38+55.
- [6]王超,吕崇德,睦喆.仿真一体化支撑平台技术[J].系统仿真学报.2003(07):956-961.
- [7]田兆斐,李磊,郝琛.核动力装置建模与仿真[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.
- [8]刘志宾,马进,孟庆军,等.基于虚拟现实技术的核电站全范围仿真机研究[J].仪器仪表用户.2017,24(12):66-70.

作者简介：祁琳（1993年7月27日—），女，汉族，山西省襄汾县，硕士，助理研究员，反应堆仿真。