

氚扩散虚拟仿真系统原型研发及其应用^①



曹欢^{1,2}, 杨子辉², 俞盛朋², 霍前超², 王海霞², 王芳²

¹(安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601)

²(中国科学院 核能安全技术研究所 中子输运理论与辐射安全重点实验室, 合肥 230031)

通讯作者: 王芳, E-mail: fang.wang@fds.org.cn

摘要: 为了研究氚泄漏时的动态扩散机制与事故风险, 本文基于三维图形引擎研发了氚扩散虚拟仿真系统. 采用预先危险性分析方法进行了氚系统安全分析, 通过粒子系统方法模拟了事故中氚扩散的动态过程, 基于虚拟漫游与仿真技术实现了人机交互仿真功能. 以国际热核聚变实验堆 (ITER) 的氚提取系统仿真为案例, 模拟了氢同位素分离柱与管道发生泄漏时氚的动态扩散过程和浓度变化情况, 仿真结果为氚泄漏的安全防护提供了依据.

关键词: 氚泄漏; 动态扩散; 虚拟仿真; 粒子系统

引用格式: 曹欢, 杨子辉, 俞盛朋, 霍前超, 王海霞, 王芳. 氚扩散虚拟仿真系统原型研发及其应用. 计算机系统应用, 2019, 28(9): 118-124. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7045.html>

Development and Application of Tritium Diffusion Simulation Prototype System

CAO Huan^{1,2}, YANG Zi-Hui², YU Sheng-Peng², HUO Qian-Chao², WANG Hai-Xia², WANG Fang²

¹(Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

²(Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to study the dynamic diffusion mechanism and accident risk of tritium, a virtual simulation system for tritium diffusion based on the 3D graphics engine is developed. The accident simulation object is determined by the preliminary hazard analysis method for tritium system. The particle system is applied to simulate the dynamic process of the tritium diffusion, and the human-computer interaction function is realized based on virtual roaming and simulation technology. Finally, take the Tritium extraction system in the International Thermal nuclear Experimental Reactor (ITER) as an example, the dynamic diffusion process and concentration change of tritium is simulated when the hydrogen isotope separation column and pipeline leak. The simulation results provide a basis for the development of safety protection measures when tritium leaks.

Key words: tritium leakage; dynamic diffusion; virtual simulation; particle system

1 引言

国际热核聚变实验堆 (ITER) 是目前全球规模最大的核聚变反应实验系统, 氚作为聚变系统中不可或缺的燃料, 在自然界中含量极少, 需要通过聚变核反应

实现自持. ITER 氚工厂负责在氚自持循环过程中精细、高效、安全处理氚, 包括氚提取、氚燃料纯化分离、氚贮存等子系统. 氚的主要形式为气态氚和氚水, 均具有放射性, 对人体的内辐照危害极大, 且具有极强

① 基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项 (2017YFE0300305); 中国科学院信息化项目 (XXH13506-104); 安徽省重大科技专项 (18030801135)

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2017YFE0300305); CAS Special Fund for Informatization Construction (XXH13506-104); Science and Technology Major Program of Anhui Province (18030801135)

收稿时间: 2019-02-22; 修改时间: 2019-03-08; 采用时间: 2019-03-20; csa 在线出版时间: 2019-09-05

的扩散能力和渗透性^[1],能够溶解于结构中造成材料性能衰变.由于运行条件的复杂性和氙的特殊物理属性,使用常规的工程手段难以达到氙扩散过程的三维可视化分析要求.

目前,国内外对于氙泄露扩散研究较少,研究方法多停留于二维数值模拟阶段.南华大学采用数值模拟方法对实验包层中氙提取系统事故性氙释放过程进行模拟研究^[2];解放军第二炮兵工程大学通过 CFD 方法研究了氙在密闭空间的浓度分布规律和通风对氙浓度的影响^[3,4];西班牙马德里理工大学核聚变研究所基于计算流体力学理论研究了蒸汽发生器发生泄漏后氙的扩散机理,实现了氙泄漏扩散的多尺度分析^[5].现有研究成果以氙扩散浓度分布云图与变化曲线图为主,是一种基于动态过程的静态分析结果,难以达到三维实时动态可视化分析要求,所构建的三维工程几何模型,不能真实直观得展现氙系统和氙扩散场景.因此数值模拟方法在三维实时动态虚拟仿真方面存在一定的局限性.

随着虚拟现实技术的快速发展,虚拟仿真已在核领域研究中得到有效的应用.韩国原子能研究所的 K Jeong 等人以 Unity3D 为虚拟仿真平台,MCNP 为辐射剂量计算工具,对反应堆水池内的辐射剂量进行计算与可视化^[6];中科院核能安全技术研究所基于数字反应堆和辐射虚拟人技术,开展了核与辐射安全仿真系统研发与应用研究^[7,8].

中国科学院核能安全技术研究所·FDS 风麟核能团队围绕反应堆事故诊断、放射性核素环境影响、核应急与公共安全等迫切需求,依托中子输运设计与安全评价软件系统 SuperMC^[9,10]、可靠性与概率安全分析软件系统 RiskA^[11]、核安全云 NCloud 等核心基础,建成了核应急综合仿真平台与数字社会环境下的虚拟核电站 Virtual4DS^[12].

为实现聚变反应堆中实时可视化分析氙扩散机制,本文在 Virtual4DS 平台框架下,开展氙扩散虚拟仿真系统原型研发及应用研究工作.基于三维图形引擎 Unity3D,利用粒子系统与人机交互技术,研发了氙扩散虚拟仿真原型系统.该原型系统能够实现工作人员在高逼真度的虚拟环境下直接与氙系统进行交互,有助于研究氙系统中氙发生泄露时的动态扩散过程与扩散机理,为制定氙泄露时人员防护方案提供依据,模拟分析的结果能够辅助氙工厂中氙安全包容系统的优化设计.

2 系统总体结构设计

氙扩散虚拟仿真系统包括虚拟漫游、粒子系统与事故模拟三个结构模块,具体设计架构如图 1.虚拟漫游模块能够使用户以第一、第三视角在虚拟场景中漫游,且具有贴合实际的物理碰撞效果;粒子系统模块用于实现氙扩散的动态模拟与浓度分布显示;事故模拟模块用于氙浓度值实时查询与模拟过程的实时控制.

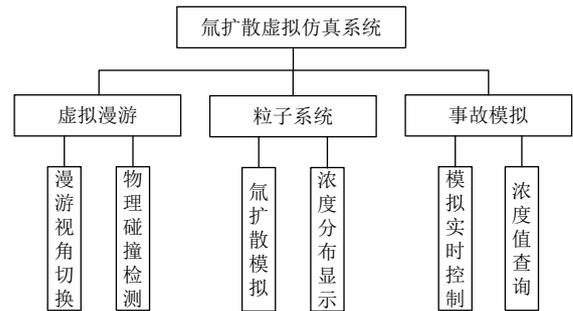


图 1 系统结构设计架构图

3 关键方法

使用 Unity3D 作为虚拟仿真平台进行氙泄漏扩散模拟,在仿真过程中,需要以氙系统中相关氙工艺设备的模型结构与工程参数为参考.具体技术路线如图 2.

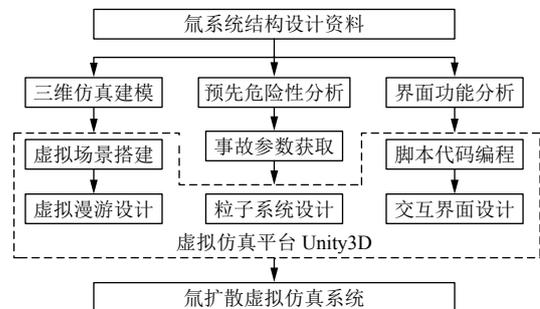


图 2 氙扩散虚拟仿真技术路线图

3.1 氙系统安全分析

采用预先危险性分析 (PHA) 方法进行氙系统安全分析,以确定事故仿真对象. PHA 是一种定性分析评价系统内危险因素与危险程度的方法,分析内容包括系统潜在的危险因素类型、事故发生条件、事故后果等^[13].氙系统安全分析流程如图 3.

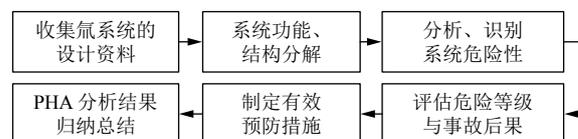


图 3 氙系统 PHA 分析流程

3.2 虚拟场景搭建

为搭建具有较强真实感的三维虚拟场景,在CATIA中依据相关结构尺寸,建立符合实际的氙系统三维几何模型,并导入3ds Max中,进行模型的材质、贴图效果渲染,最后在Unity3D中完成三维虚拟场景的搭建.为提高氙扩散效果的逼真性和模型的辨识度,在三维场景中添加组件名称、灯光与摄像机.

3.3 粒子系统设计

在聚变堆氙系统中,氙的存在形式为气态HT,是一种不规则动态物体.目前模拟动态不规则物体最有效的一种方法是粒子系统图形生成算法.

粒子系统的基本思想是将物体看作大量带有不同属性的粒子集合,包括外观属性(形状、大小、透明度、颜色)、运动属性(位置、速度)与生存属性(数量、生命值),粒子属性依据物体本身的运动状态和物理要素,随时间不断变化^[14].

本文通过粒子系统方法进行氙扩散机制研究,由氙粒子运动体现氙扩散过程,应用粒子系统模拟氙扩散的方法流程如图4.

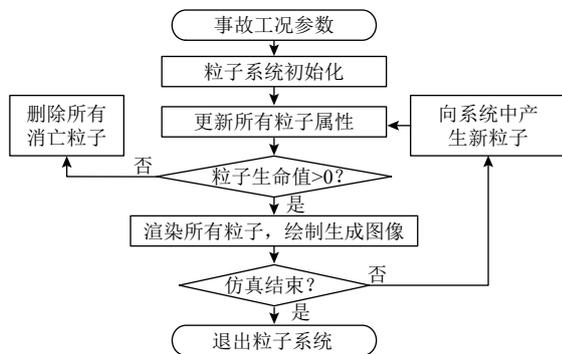


图4 粒子系统模拟氙扩散方法流程图

3.3.1 粒子动力学分析

粒子产生的初始位置位于氙泄漏口处,泄漏时的速度和流量大小与事故工况参数有关,初始泄漏速度的计算公式^[15]为

$$v = C_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1)$$

式中, v 为泄漏速度 (m/s), p_1 为容器内介质压力 (Pa), p_2 为环境压力 (Pa), R 为气体常数,取 8.314, T 为容器内介质温度 (K); k 为绝热指数, C_0 为孔流系数,取 1.

则初始泄漏质量流量的计算公式为:

$$Q = vA\rho \quad (2)$$

式中, Q 为质量流量 (kg/s), ρ 为泄漏点氙密度 (kg/m³), A 为泄漏孔面积 (m²).

氙扩散过程中伴随着浓度变化,为了分析氙泄漏释放的危害性,通过放射性活度与质量的关系式^[16]将质量流量单位进行转化:

$$B = mK(MT_{1/2})^{-1} \quad (3)$$

式中, B 为放射性核素活度 (Bq), m 为放射性核素质量 (kg), M 为摩尔质量, $T_{1/2}$ 为放射性核素的半衰期, K 取 1.3236×10^{16} ,转化后的单位为 Bq/s.

考虑到氙系统的复杂性与氙的特殊物理属性,本文在分析氙粒子运动过程中,有以下假设:

- 1) 氙视为一种不可压缩且无粘性特征的理想流体;
- 2) 氙在整个扩散过程不与任何物质发生化学反应,氙本身状态不发生变化.

当氙发生泄漏时,通排风系统会及时响应,氙由于密度小而产生浮力作用,因此在分析粒子运动过程中,考虑风力 (F_w)、浮力 (F_b) 和重力 (G).

粒子受到的重力大小为:

$$G = mg = \frac{Q}{N}g \quad (4)$$

式中, Q 为质量流量, m 为粒子质量, N 为粒子发射率 (个/s), g 为重力加速度.

粒子受到的浮力大小为:

$$F_b = \rho'Vg = \rho' \frac{m}{\rho} g = \frac{\rho'}{\rho} G \quad (5)$$

式中, ρ' 为空气密度, ρ 为氙粒子密度, V 为粒子体积.根据风速风压公式^[17],粒子受到的风力大小为:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho' v_w^2 s \quad (6)$$

式中, ρ' 为空气密度, v_w 为风速大小, s 为风力对粒子的作用面积.

因此,氙粒子在扩散过程中的运动学方程如下:

$$F = F_w + F_b + G \quad (7)$$

$$v = v_0 + \int a dt = v_0 + \int \frac{F}{m} dt \quad (8)$$

$$S = S_0 + \int v dt \quad (9)$$

式中, v 为当前粒子速度, v_0 为粒子初速度 (风场速度), m 为粒子质量, S 为粒子当前位置, S_0 为粒子初始位置.

粒子在运动过程中会接触空间物体,发生碰撞,使得粒子的速度大小和方向发生变化.粒子与物体间的碰撞过程如图5.

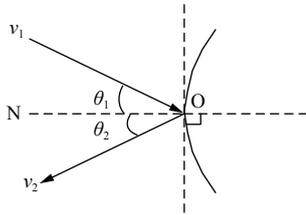


图5 粒子碰撞示意图

由于粒子与物体碰撞过程遵循反射定律,且伴有能量损失,则有:

$$\theta_2 = \theta_1, |v_2| = k|v_1| \quad (10)$$

式中, θ_1 为入射角, θ_2 为反射角, v_1 为粒子碰撞前速度, v_2 为粒子碰撞后速度, k 为碰撞系数,大小范围为0~1.

3.3.2 粒子属性设置

根据氦泄漏时的质量流量大小确定粒子发射率,以带有雾状纹理贴图的球体作为粒子基本图元,将粒子大小设置为确定范围内的随机数.由于氦本身无色,基于 RGBA 色彩空间,赋予粒子颜色属性,从而生动地展现氦扩散的运动过程,通过粒子生命值损耗系数体现粒子在通风作用下的流失状况,采用公告板技术使粒子始终面向摄像机,增强沉浸感.

3.4 虚拟场景漫游

仿真系统设置第一视角与第三视角两种模式进行虚拟漫游.采用三维胶囊体模型作为第一视角虚拟漫游的控制体角色,通过对象的父子节点配置方法,实现视角随角色运动;基于骨骼人物模型,采用动画状态机,设置第三视角中人物角色的动作切换,将摄像机绑定于人物中,通过距离插值方法确保视角随人物平滑移动.采用脚本代码实现交互设备控制虚拟场景中的角色运动,完成角色在场景中漫游.

为了使人物在漫游过程中不会穿越物体,基于物理引擎技术,将碰撞器属性赋予虚拟场景的物体对象,角色控制器属性赋予虚拟人物,通过脚本进行碰撞检测,实现虚拟漫游过程的物理碰撞检测.

通过正方体单元计算氦扩散过程中空间位置浓度值,计算公式如下:

$$C = \frac{nQB}{NV} \quad (11)$$

式中, C 为浓度值大小 (Bq/m^3), n 为单元内粒子数目, N 为粒子发射率, Q 为质量流量, B 为放射性核素活度, V 为监测单元体积.以可移动的正方体单元作为监测点,通过界面输入框确定监测点位置,采用脚本检测出所在位置的浓度值大小,并返回给界面,实现氦扩散过程中浓度值实时显示.

基于 Unity3D 的图形界面开发技术,将脚本代码与按钮组件绑定,实现第一、第三视角的实时切换与氦泄漏事故模拟的实时控制.

4 仿真案例

以 ITER 氦提取系统 (TES) 为例进行氦泄漏扩散仿真,氦提取系统的主要功能是将实验包层产生的氦分离、纯化、储存,并送往聚变堆芯反应.案例仿真的硬件平台为 PC 机 (CPU Q9500@2.83 GHz; 4 GB RAM; Windows 7 64 位操作系统),软件环境包括 Unity3D、CATIA V5、3ds Max2016 和 Visual Studio2013.

4.1 氦提取系统安全分析

考虑到系统的复杂性,将其进行简化,通过分析确定主要涉氦组件与氦的运输流程,得到氦提取系统结构布局图,如图6.

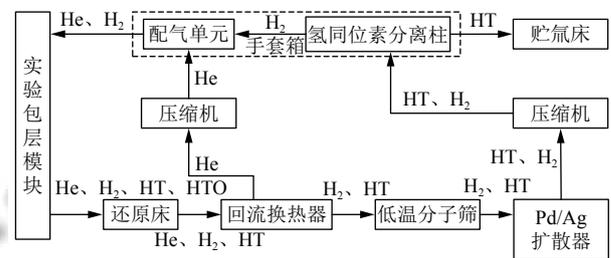


图6 TES系统结构布局图

通过资料分析可知,氦提取系统采用多重包容系统结构,设备管道为初级包容系统,手套箱为次级包容系统,操作室为第三级包容系统,工作人员处于操作室中^[18].结合涉氦组件的工艺条件,对 TES 系统的氢同位素分离柱泄漏和手套箱连接处管道泄露两类事故进行预先危险性分析 (PHA),分析结果见表1和表2.

通过上述分析结果可知,氢同位素分离柱发生泄漏会导致手套箱内氦浓度快速上升,且可能引发燃烧爆炸等严重事故,手套箱连接处管道发生泄露会危害人员健康,因此确定这两类事故作为氦泄露事故虚拟仿真案例.

表1 氢同位素分离柱泄漏 PHA 分析

分析内容	分析结果
发生位置	氢同位素分离柱
原因事件	组件受外力作用发生破裂; 氢氟腐蚀材料结构导致性能失效
事故后果	手套箱内氟快速释放, 氟进入操作室概率增大, 氢氟释放遇高温可发生燃烧爆炸, 造成设备损坏

表2 手套箱连接处管道泄露 PHA 分析

分析内容	分析结果
发生位置	手套箱与操作室内管道的连接处
原因事件	震动、受力等造成连接处密封不严; 不同工况条件引起材料失效
事故后果	氟大量释放到操作室, 危害工作人员健康, 污染操作室, 氟释放到外部自然界环境的概率增大

4.2 氟提取系统虚拟场景搭建

依据 TES 系统相关结构模型的设计尺寸^[18], 进行三维仿真模型的构建, 依照图6 布局连接氟组件, 添加灯光、摄像机, 通过粒子系统模拟正常工况下氟在管道内流动过程, 加入骨骼人物角色模型于场景中. 最终搭建的 TES 系统三维虚拟场景如图7.

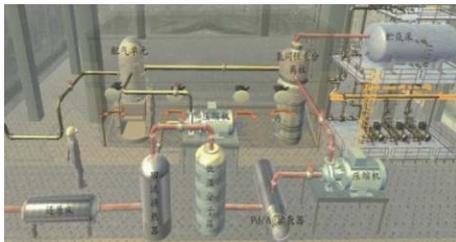


图7 正常工况下的 TES 系统三维虚拟场景图

4.3 氟泄露扩散仿真

事故工况下, 氟在设备发生泄漏处开始向外部扩散, 通排风系统随即响应. 氟的主要物理参数^[19]见表3.

表3 氟的主要物理参数

物质	密度 (kg/m ³)	绝热 指数	摩尔质量 (g/mol)	半衰期 (年)	安全限值 (Bq/m ³)
氟	0.18	1.41	4.024	12.5	2×10 ¹⁰

根据文献[20]获取氢同位素分离柱泄漏 (事故 A) 与手套箱连接处管道泄露 (事故 B) 工况数据, 事故 A: $d=0.01\text{ m}$, $p_1=0.2\text{ MPa}$, $p_2=101.18\text{ KPa}$, $T=173\text{ K}$; 事故 B: $d=0.01\text{ m}$, $p_1=0.12\text{ MPa}$, $p_2=101.32\text{ KPa}$, $T=310\text{ K}$, 通过公式 (1)、(2)、(3)、(5)、(6) 计算出氟泄漏的质量流量, 单个粒子受到的浮力与单个粒子受到的风力, 结合相关系统参数, 得到两类事故下的物理工况参数表 (见表4).

表4 两类事故下的工况参数表

参数	事故 A	事故 B
破口面积 (m ²)	7.85×10^{-5}	7.85×10^{-5}
质量流量 (Bq/s)	1.57×10^{14}	1.08×10^{14}
风力大小 (N)	4.91×10^{-5}	2.02×10^{-4}
浮力大小 (N)	2.07×10^{-4}	1.48×10^{-4}
通风条件 (m/s)	1	2

以本文设计的粒子系统进行氟扩散动态模拟, 经过多次模拟测试, 最终采用锥形粒子发射器, 粒子大小范围为 2.5~3, 粒子发射率 $N=200$, 碰撞系数 $k=0.8$, 出风口边界处粒子生命值损耗系数为 0.3. 结合脚本编程与粒子系统的控制面板界面, 实现事故工况下氟泄漏扩散三维动态仿真, 仿真结果如图8和图9.

由仿真结果可知, 氢同位素分离柱发生泄漏时, 氟在风场与浮力的作用下, 逐渐向左上方扩散, 大约 15 秒与排风口侧面接触, 随后在壁面作用下, 部分氟气体开始往右扩散, 大约 45 秒, 氟充满整个手套箱, 手套箱能够一定程度上将泄露的氟进行包容, 避免释放到房间中. 手套箱连接处管道发生泄漏时, 氟在风场与浮力的作用下, 开始在操作室内扩散, 逐渐充满整个操作室内部.

通过浓度查询功能, 可以获取事故工况下, 氟扩散过程中空间浓度分布情况. 以场景中靠近虚拟人的手套箱左下角为坐标中心点, 获取三维空间中不同位置的氟浓度大小, 具体数值如表5所示.



图8 氢同位素分离柱泄漏事故虚拟仿真



图9 手套箱连接处管道泄露事故虚拟仿真

表5 氚泄漏扩散过程空间位置浓度值

位置坐标	浓度值 (Bq/m ³)
A(13.5, 4.0, 4.5)	8.78×10 ¹⁵
B(3.5, 9.5, 4.5)	5.52×10 ¹⁵
C(15, 3.0, 2.5)	1.84×10 ¹⁵
D(20, 12.5, 4.5)	6.53×10 ¹⁵
E(15, 13.5, 4.5)	3.72×10 ¹⁵
F(4.5, 15.5, 5.0)	9.58×10 ¹⁴

由表5可知,两类事故工况下,空间中氚浓度值均远高于氚安全限值,属于高危险区域,将严重危害氚提取系统的安全性.因此在氚包容系统设计方面,需优化氢同位素分离柱与手套箱连接处管道等高风险结构的包容设计,以此预防事故的发生.

5 结论与展望

本文结合 Unity3D、CATIA V5、3ds Max 2016 和 Visual Studio 2013,通过粒子系统方法模拟氚泄漏事故的动态扩散过程,利用虚拟漫游与界面开发技术实现人机交互功能,最终完成了氚扩散虚拟仿真系统原型的设计与研发.仿真系统具有良好的交互性,可实现用户在虚拟环境中与高危险性氚系统的直接交互,仿真结果直观、实时地显示了氚泄漏的动态扩散过程和浓度变化情况,对科学制定氚扩散的安全防护措施具有积极意义.后续工作将在粒子系统动力学精确设计、氚应急处理系统仿真等方面进一步研究.

参考文献

- 王俊峰. 氚工艺. 北京: 中国原子能出版社, 2012.
- 刘贵议, 付万发, 宋江锋, 等. TBM TES 手套箱泄漏事故下氚浓度与通风关系研究. 核电子学与探测技术, 2017, 37(2): 211-215. [doi: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.02.024]
- 余文力, 王亮. 密闭空间中氚泄漏的浓度分布规律研究. 科技视界, 2012, (28): 132-134, 155.
- 余文力, 王亮, 高云亮, 等. 通排风情况对密闭空间中氚浓度的影响研究. 电子设计工程, 2012, 20(22): 117-119, 122. [doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2012.22.041]

- Fradera J, Velarde M, Perlado JM, *et al.* Multiscale integral analysis of tritium leakages in fusion nuclear power plants. Proceedings of the 26th Symposium on Fusion Engineering. Austin, TX, USA. 2015. 1-6.
- Jeong K, Choi B, Moon J, *et al.* Real-time assessment of exposure dose to workers in radiological environments during decommissioning of nuclear facilities. Annals of Nuclear Energy, 2014, 73: 441-445. [doi: 10.1016/j.anucene.2014.07.027]
- 吴宜灿, 何桃, 胡丽琴, 等. 核与辐射安全仿真系统 SuperMC/RVIS2.3 研发与应用. 原子能科学技术, 2015, 49(S1): 7-15.
- Wu YC. Multifunctional neutronics calculation methodology and program for nuclear design and radiation safety evaluation. Fusion Science and Technology, 2018, 74(4): 321-329. [doi: 10.1080/15361055.2018.1475162]
- 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统 SuperMC. 核科学与工程, 2016, 36(1): 62-71. [doi: 10.3969/j.issn.0258-0918.2016.01.009]
- Wu YC, Song J, Zheng HQ, *et al.* CAD-based monte carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC. Annals of Nuclear Energy, 2015, 82: 161-168. [doi: 10.1016/j.anucene.2014.08.058]
- Wu YC, Team FDS. Development of reliability and probabilistic safety assessment program RiskA. Annals of Nuclear Energy, 2015, 83: 316-321. [doi: 10.1016/j.anucene.2015.03.020]
- Wu YC. Development and application of virtual nuclear power plant in digital society environment. International Journal of Energy Research, 2019, 43(4): 1521-1533. [doi: 10.1002/er.v43.4]
- 陈喜山. 系统安全工程学. 北京: 中国建材工业出版社, 2006.
- 周迎春, 房凌晖, 郑翔玉, 等. 基于粒子系统的虚拟战场烟雾特效仿真. 计算机仿真, 2015, 32(7): 417-420. [doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2015.07.093]
- 黄小美, 彭世尼, 徐海东, 等. 燃气管道泄漏流量的计算. 煤气与热力, 2008, 28(3): 37-42. [doi: 10.3969/j.issn.1000-

- 4416.2008.03.011]
- 16 付万发. TBM 氦系统的氦安全分析研究[博士学位论文]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
 - 17 王新翔, 赵罡, 肖文磊. 虚拟飞行场景中事故特效的实时仿真. 图学学报, 2016, 37(2): 243–248. [doi: [10.11996/JGJ.2095-302X.2016020243](https://doi.org/10.11996/JGJ.2095-302X.2016020243)]
 - 18 Zhang L, Luo TY, Feng KM. Conceptual design on interface between ITER and tritium extraction system of Chinese helium-cooled solid breeder test blanket module. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(10-12): 2213–2216. [doi: [10.1016/j.fusengdes.2010.08.041](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.08.041)]
 - 19 张红霞. 热工基础. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
 - 20 刘贵议. TBM 氦提取系统事故性氦释放的模拟研究[硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2017.

www.c-s-a.org.cn

www.c-s-a.org.cn