

## 七、核安全与技术

### 1. 光纤辐射探针及阵列

#### 项目概述

利用从国外引进的光纤辐射测量方法，制作出了光纤辐射探针及探测阵列。这种探针可以对 X 射线、 $\gamma$  射线进行有效的探测，从而对产生这种辐射、或有潜在辐射危险的区域进行实时监控。此外，由于光纤弯曲灵活、直径小，也可以进装置内部进行辐射测量或监测。也可以制成光纤探测阵列，对发射的辐射场分布进行分析。

#### 项目成熟情况

项目组已经制成两代样机，在合作单位多次实验，传感器的稳定性非常好，线性度比现有产品好很多，灵敏度达到国外同类产品 10 倍以上。

#### 应用范围

核电等需要辐射监控的领域。

### 2. 高精度低功耗节流管伺服调节阀系统

#### 项目概述

传统的电动及气动调节阀驱动装置存在体积大、能耗高、控制精度差、响应特性慢等缺点。节流管伺服调节阀具有自主知识产权，获得授权专利以及软件著作权，是一种利用介质压差来驱动阀头运行的新型调节阀，具有智能化程度高、驱动功率小（驱动功率只有几瓦）、体积小、响应速度快等优点。配合 PLC 可编程逻辑控制器和压力传感器可以完成压力自动控制功能，配合流量传感器可以完成流量自动控制。

该阀门目前在军用核动力装置辅蒸汽系统上已经得到应用，可以军转民用。辅蒸汽系统 20#改进减压阀是由哈尔滨工程大学按照军方特定需要而改进研制的压力自动调节控制阀门，阀门规格为公称通径输入端 80mm，输出端公称通径 100mm，适用于核动力装置辅蒸汽系统作为压力调节控制设备。采用模块化设计，各模块功能独立实现，减少相互影响，通过分别提高各功能块精度、稳定性、可

靠性和可维修性来提高调节系统的相应特性。全系统耗电不大于 40W，驱动电机功率仅为 25W。辅蒸汽工作压力  $2.15 \pm 0.10$  MPa，通过 20#G 阀减压为  $0.60 \pm 0.025$  MPa，控制精度较高。该阀减压工作的可靠性，对造水系统的运行和安全具有重要意义。

### 项目成熟情况

如上所述，该类型阀门在军用核动力系统上得到了应用，技术成熟。对于不同口径、不同大小、不同压力等级的调节阀，可根据需要进行快速研制。节流管伺服调节阀配合驱动与控制装置平均电功耗 <50 瓦，压力调节精度通过软件可调且最小可达 0.02MPa，最大压力调节比 20。

### 应用范围

在核能领域、发电站、化工厂、石油工业、船舶工业等具有流体调节的领域具有广阔的应用前景，尤其在高参数、高温高压、高磅级的关键调节阀方面，可以替代进口产品，满足国产化要求，可为黑龙江当地阀门企业增加高端阀门品类，提高竞争力。

## 3. 管道式高效离心分离器

### 项目概述

在核能、动力、石油、化工等领域，为了保证系统的安全运行和生产效率的提高，需要对气-液、液-液等两相流体进行相分离。在实际应用中，由于工况和两相流体配比的变化，往往呈现流型复杂、流量范围宽的特点，并且对分离设备的空间布置也有极高的要求。针对这样的应用背景，以多项科研项目为依托，研制出了可实现在线分离的管道式高效离心分离器。该分离设备可直接布置在流动管线中，具有体积小、重量轻、结构紧凑、无运动部件、分离速度快、处理量大等优点。该型分离设备分为气-液分离和液-液分离两个类型，对于气-液分离，可以有效降低流型变化对分离效率的影响，不但适用于含气率较低情况下的气-液分离，在含气率较高的不稳定流型下也具有优异的分离性能，能够实现分离出的气相中基本不含液，分离出的液体中无可见气泡；对于液-液分离，可以根据使用的工质特点来调整分离器的关键结构参数，以达到高效分离的目标，现有的分离器可实现密度差  $\geq 100 \text{ kg/m}^3$  下的油-水分离，分离效率能够达到 99% 以上。

目前研制的气-液和液-液分离设备均已获得国家发明专利授权。

### 项目成熟情况

与目前工业生产中使用的传统分离设备相比，管道式高效离心分离器可以有效解决占地面积大、分离效率低、分离时间长、造价高、维护难等问题，能够实现高效的在线分离，具有广阔的应用前景。目前，该型分离设备已推广应用于石油和天然气的开采之中，技术指标满足相应的设计要求。

技术成熟度 8 级，对于该管道式高效离心分离器，已经开展了长期的理论和实验研究，掌握了相关原理，形成了一套成熟的设计和优化方法，设计结果经过了试验验证，保证了技术的可行性和可靠性，研究结果得到了用户的认可，能够应用于实际的工业生产中。

### 应用范围

应用于核能、动力、石油、化工以及其他需要进行两相分离的领域。

## 4. 钠冷快堆仿真培训系统

### 项目概述

本项目是“十二五”核能开发项目，课题以中国实验快堆（CEFR）为研究对象，研究实验快堆仿真系统。实验快堆仿真系统需连续模拟真实 CEFR 的实时运行环境，据此确定本仿真系统为全范围模拟系统。根据 CEFR 的工作原理、流程和系统组成和运行特性，一、研究确定了仿真范围；二、采用模块化系统建模方法，分系统建立基于实际物理过程的实验快堆仿真模型；三、仿真模型计算的数据通过网络接口在仿真主控室相应的虚拟仪表和 CRT 等设备上输出、显示和报警，操作员在仿真主控室虚拟盘台上的操作也可以通过网络接口输入仿真计算机，用于仿真模型计算；四、将 CEFR 模型划分为：堆芯物理仿真模型、一回路热工流体仿真模型、二回路热工流体仿真模型、三回路热工流体仿真模型、快堆控制保护仿真模型等 11 个子系统模型，71 个仿真模块程序；五、考虑程序计算的一致收敛性与稳定性要求，确定仿真模块间的数据传输与接口关系；六、最后设计了实验快堆仿真系统的体系结构。实验快堆仿真系统仿真了反应堆本体、反应堆冷却剂系统、核辅助系统、蒸汽—电力转换系统（三回路）、专设安全设施系统等总计 71 个子系统（组）。模拟的工况包括从冷启动到额定功率运行及各

种故障、事故工况。主要仿真的始发事件包括：管道和设备的泄漏、反应性的意外变化、堆内燃料组件排热恶化、主回路系统失热阱或排热增加等 86 个。同时设置了 11 类，共计 1043 个通用故障点。该项目鉴定成果为国际先进水平，项目已结题验收。该项目模型技术已成熟，并已应用于实验快堆仿真项目，该项目原投资为 2389 万。

### **项目成熟情况**

仿真模型技术已成熟并且软硬件仿真系统集成技术也成熟，具备不同机组批量生产。

### **应用范围**

本成果技术可应用已建成的实验快堆和在未来我国建设的示范快堆，主要包括钠冷快堆电站人员培训、钠冷快堆电站工程验证、钠冷钠冷快堆电站仪控技术设计与验证、钠冷快堆电站操作规程设计与验证等领域。

## **5. 民用核电站仿真技术**

### **项目概述**

核电站全范围仿真机能够模拟核电机组运行的各类工况，可用于操纵员培训、核电机组的设计和验证、运行规程的编制和验证、运行安全研究等工作，有效地提高核电机组运行的安全性和经济性，因而每座核电站都配备了全范围的核电仿真机。目前，只有美国、俄罗斯、法国、加拿大、日本等少数几个国家能制造核电站全范围仿真机，国内核电站正在运行的核电机组全范围仿真机绝大部分都花巨资从国外引进。

哈尔滨工程大学核科学与技术学院核动力仿真研究中心长期从事核动力运行与仿真的研究工作，取得了一批创新性的研究成果，完成的核动力装置全范围仿真机于 2006 年获得国家科技进步二等奖，在核动力运行与仿真研究领域处于国内领先地位，并积极寻求与美国 GSE 公司、中国核动力研究设计院、北京神州普惠科技有限公司合作开发核电仿真机，在核电仿真技术领域积累了丰富的设计经验，具有大量的高水平技术储备，具备了开发压水堆核电机组全范围仿真机的能力。

自主开发核电机组全范围仿真机，可以大大提高我国核电仿真技术水平，促

进我国核电机组运行安全性和经济性的提高，并且可以打破国外的技术壁垒，为国家节省大量外汇。

### **市场需求和产品成熟度**

技术成熟，国内领先地位。

### **应用范围**

主要用于主控制室操纵员执照考试前的培训及持照人员的复训，其次是电厂事件重现或演习、演练。

## **6. 核动力快速建模仿真系统**

### **项目概述**

核动力仿真技术发展自上世纪 70 年代，随着计算机技术的发展，为核动力系统数学仿真创造了环境，这些仿真系统广泛应用于核动力装置安全分析、热工水力仿真计算以及核动力控制系统设计等方面。著名的分析程序包括 RETRAN、COBRA、RELAP 5、MELCOR 等。在核电厂全范围纺织机领域，国内外一些公司和研究机构开发了一系列的仿真建模和运行调试平台，如美国 GSE 公司的 JADE 系列图形化建模工具和 SimeEXEC 仿真支撑平台，美国 WSC 公司的 3KeyMaster 仿真平台，法国 CORYS 公司的 ALICES 仿真系统开发平台以及国内武汉核电运行技术公司的 RINSIM 仿真平台，这些仿真建模平台和工具虽然应用了图形化等技术，可以用于建立用于培训的全范围仿真系统，但是其仿真模型是建立在已有设计资料的基础上，并且需要较为全面和详细的设计资料，如果缺少相关资料，便无法建立仿真系统模型。因此这类仿真系统对于新系统（没有详细设计资料）建模仿真就无法做到。

核动力装置快速建模仿真系统主要针对设计单位以及评估单位，对于新系统的论证分析以及相关计算验证。可以在缺少设计资料的条件下，利用仿真系统自带的成熟模型和经验数据，利用图形化的界面快速构建新系统的仿真模型，从而可以地实现在概念设计阶段对新系统的稳态和瞬态运行特性进行较为准确地仿真，为系统的设计和改进行提供参考。通过推广核动力快速建模仿真平台可为核电设计单位，船用核动力研究和设计单位以及核动力设计评估单位提供一种高效的验证分析和评估手段，可降低分析和论证成本，提高效率。

该系统可针对不同类型压水堆核动力装置进行仿真建模，由于采用高精度的三维堆芯物理模型和多节点、高精度的设备仿真模型，该平台所构建的核动力仿真系统可满足核动力安全分析需求。

### 项目成熟情况

项目目前处在样品阶段，已经进行了多个核动力装置系统的仿真验证工作，目前已提交测试版本，正在应用测试版本在某核动力装置的评估中建立其仿真系统进行测试。

### 应用范围

核动力装置的设计验证个评估，现有系统的运行分析等领域。

## 7. 核动力运行支持系统

### 项目概述

船舶核动力装置长时间在海洋条件下运行，运行环境恶劣，容易发生故障，操纵员容易发生人因失误危及核动力装置安全运行。产品利用计算机和人工智能技术，可以有效辅助操纵员对系统进行监测、分析和决策，减轻操纵员的工作负荷和减少人因失误的发生。

产品提供核动力装置状态监测、故障识别、应急操作规程提示以及图形化人机交互功能，具有以下技术特点：

运行支持范围包括稳态功率运行和事故工况；故障诊断采用基于功能模型的方法专家系统诊断方法，故障诊断专家知识库容易建立、修改和扩充；可从可靠性的角度分析操纵员操作、系统组态变化或设备故障对系统完成预期功能的影响；运行支持系统既可以在线使用，也可作为操纵员培训、组态管理、维修规划分析等离线功能使用。

产品技术指标如下：

可对 576 个系统运行参数的实时监测，可有效检测系统组态的变化。故障诊断采用多层流模型技术，可以快速建立、修改和扩充故障诊断专家知识库。采用前向预测和双向推理诊断功能可对总计 100 种通用故障和典型故障进行快速识别，诊断结果全面，诊断速度满足实时性要求。故障诊断结果以日志方式存储并可追溯，支持因果关系图显示功能，便于系统调试和对故障诊断结果进行确认。

系统可靠性监测技术采用 GO-FLOW 方法，采用模块化技术，建立了对应 LOCA、SGTR 和给水管道破裂等 3 个事故序列中 13 个题头事件、以及设备冷却水、海水系统和电力系统等支持功能总计 252 个可靠性监测模型，无需手动修改模型即可对系统组态变化进行可靠性分析。

通过对状态监测、故障诊断和系统动态可靠性分析等关键技术集成，实现了依据系统运行状态及时更新系统可靠性模型，可在 16 秒内高效实现一次性对 30 天内船用核动力装置不同系统的各种组态变化进行可靠性分析，并可实时监测并评估操纵员操作和设备故障对系统可靠性的影响。项目通过了全范围仿真机功能验证和国防科工局组织的技术鉴定，达到了国际先进水平。

### 项目成熟情况

自 2001 年起开始产品的概念设计，2005 年完成原理样机，通过了国防科工局组织的技术鉴定，认为达到了国际先进水平，2010 年获得国防科技进步二等奖。2010-2013 年间对增加了产品的在线可靠性监测和风险监测功能。目前产品关键技术已应用到小型船用核动力装置、改进型船用核动力装置等运行支持系统研制中。

### 应用范围

适用于核电、常规电站、石油、化工和航天等各种大规模、高风险工业系统等领域。

## 8. 核电站虚拟现实教学系统

### 项目概述

核电站虚拟现实实验教学主要包括核电站系统与设备虚拟现实教学系统、核电站虚拟实时仿真系统、核动力装置辅助设计系统三个部分，可用于核工程与核技术专业本科生、核科学与技术学科研究生的实验教学，核电站新员工的岗前培训，以及面向全校学生的通识教育。

核电站虚拟现实教学系统包含压水堆核电站厂区及主要厂房（反应堆厂房、汽轮机厂房、泵房）的虚拟漫游环境，主要工艺系统（反应堆冷却剂系统、化学和容积控制系统、余热排出系统、安全注射系统、凝给水系统等）和主要设备（反应堆压力容器、蒸汽发生器、稳压器、主泵、汽轮发电机组等）的三维虚拟模型；

钠冷快堆电站厂区虚拟漫游环境,主要工艺系统和设备的三维虚拟模型主要用于演示教学,可以展示核电站的整体概貌,包括厂区构筑物布局、各厂房内建筑结构、设备布置、管路连接情况,以及核电站系统的整体运行过程(工质流动和能量转换过程),使学生对核电站的总体组成、设备结构、工作流程有直观和感性的认识,加深对所学知识的理解。

核电站全范围实时仿真系统包括 300MW 压水堆核电站实时仿真系统和钠冷快堆电站实时仿真系统两部分,原理和架构类似于核电站全范围培训模拟器,可用于人员培训、设计验证、规程制定以及试验方案评估。

核动力装置辅助设计系统包括核动力装置热线图平衡计算程序和核动力装置概念设计软件。核动力装置热线图平衡计算程序主要用于压水堆核动力装置二回路热力系统热线图方案设计、计算和分析;核动力装置概念设计软件主要用于对核动力装置主要设备如蒸汽发生器、稳压器、汽轮机、冷凝器、给水加热器、除氧器等的概念设计。

### **项目成熟情况**

技术成熟,可以应用,2014 年获得全国多媒体课件大赛一等奖。

### **应用范围**

核电站虚拟现实系统可用高等学校核工程与核技术、反应堆工程等专业本科生、研究生的教学和学生创新,也可用于相关专业的虚拟实验教学。