

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 12 月 26 日 (26.12.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/259878 A1

(51) 国际专利分类号:

G21C 17/00 (2006.01) G21C 17/06 (2006.01)
G21C 17/108 (2006.01) G06F 17/18 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2023/131195

(22) 国际申请日: 2023 年 11 月 13 日 (13.11.2023)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:

202310724676.4 2023年6月19日 (19.06.2023) CN

(71) 申请人: 中广核研究院有限公司 (CHINA NUCLEAR POWER TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) [CN/CN]; 中国广东省深圳市福田区上步中路西 1001 号深圳科技大厦 15 层 (1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。中国广核集

团有限公司(CHINA GENERAL NUCLEAR POWER CORPORATION) [CN/CN]; 中国广东省深圳市福田区深南大道 2002 号中广核大厦南楼 33 楼, Guangdong 518028 (CN)。中国广核电力股份有限公司(CGN POWER CO., LTD) [CN/CN]; 中国广东省深圳市福田区深南大道 2002 号中广核大厦南楼 18 楼, Guangdong 518028 (CN)。

(72) 发明人: 于超 (YU, Chao); 中国广东省深圳市福田区上步中路西 1001 号深圳科技大厦 15 层 (1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。卢向晖 (LU, Xianghui); 中国广东省深圳市福田区上步中路西 1001 号深圳科技大厦 15 层 (1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。何明涛 (HE, Mingtao); 中国广东省深圳市福田区上步中路西 1001 号深圳科技大厦 15 层 (1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。黄杰 (HUANG, Jie); 中国广东省深圳市福田区上步中路西 1001 号深圳

(54) Title: ANALYSIS METHOD AND APPARATUS FOR MEASUREMENT UNCERTAINTY OF POWER DISTRIBUTION OF REACTOR CORE, AND DEVICE

(54) 发明名称: 堆芯功率分布测量不确定性的分析方法、装置和设备

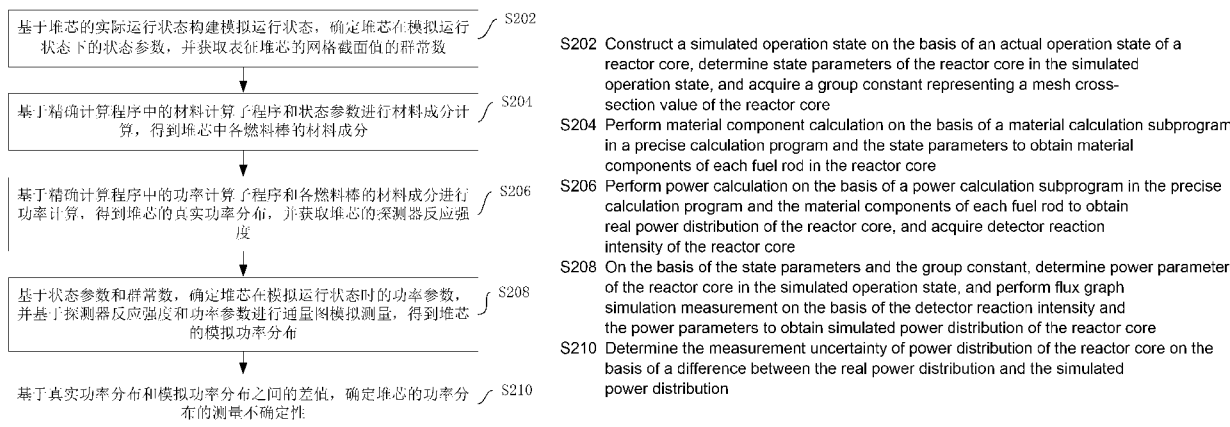


图 2

(57) Abstract: An analysis method and apparatus for measurement uncertainty of power distribution of a reactor core, a device, a storage medium, and a product. The analysis method for measurement uncertainty of power distribution of a reactor core comprises: constructing a simulated operation state on the basis of an actual operation state of a reactor core, determining state parameters of the reactor core in the simulated operation state, and acquiring a group constant of the reactor core (S202); performing calculation on the basis of a material calculation subprogram and the state parameters to obtain material components of each fuel rod in the reactor core (S204); performing calculation on the basis of a power calculation subprogram and the material components of each fuel rod to obtain real power distribution of the reactor core, and acquiring detector reaction intensity of the reactor core (S206); on the basis of the state parameters and the group constant, determining power parameters of the reactor core in the simulated operation state, and performing flux graph simulation on the basis of the power parameters and the detector reaction intensity to obtain simulated power distribution of the reactor core (S208); and determining the measurement uncertainty of power distribution of the reactor core on the basis of a difference between the real power distribution and the simulated power distribution (S210).

科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。柴凡超(CHAI, Fanchao); 中国广东省深圳市福田区上步中路西1001号深圳科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。林俊(LIN, Jun); 中国广东省深圳市福田区上步中路西1001号深圳科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。王鑫(WANG, Xin); 中国广东省深圳市福田区上步中路西1001号深圳科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。段蓉(DUAN, Rong); 中国广东省深圳市福田区上步中路西1001号深圳科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。石夏青(SHI, Xiaqing); 中国广东省深圳市福田区上步中路西1001号深圳科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。齐佳楠(QI, Jianan); 中国广东省深圳市福田区上步中路西1001号深圳科技大厦15层(1502-1504、1506), Guangdong 518031 (CN)。

(74) 代理人: 华进联合专利商标代理有限公司 (ADVANCE CHINA IP LAW OFFICE); 中国广东省广州市天河区珠江东路6号4501房(部位: 自编01-03和08-12单元)(仅限办公用途), Guangdong 510623 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法、装置、设备、存储介质和产品。堆芯功率分布测量不确定性的分析方法包括: 基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态, 确定堆芯在模拟运行状态的状态参数, 并获取堆芯的群常数(S202); 基于材料计算子程序和状态参数进行计算, 得到堆芯中各燃料棒的材料成分(S204); 基于功率计算子程序和各燃料棒的材料成分进行计算, 得到堆芯的真实功率分布, 并获取堆芯的探测器反应强度(S206); 基于状态参数和群常数, 确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数, 并基于功率参数和探测器反应强度进行通量图模拟, 得到堆芯的模拟功率分布(S208); 基于真实功率分布与模拟功率分布的差值, 确定堆芯功率分布的测量不确定性(S210)。

堆芯功率分布测量不确定性的分析方法、装置和设备

相关申请

本申请要求 2023 年 6 月 19 日申请的，申请号为 2023107246764，名称为“堆芯功率分布测量不确定性的分析方法、装置和设备”的中国专利申请的优先权，在此将其全文引入作为参考。

技术领域

本申请涉及反应堆堆芯测量与保护技术领域，特别是涉及一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法、装置、计算机设备和存储介质。

背景技术

堆芯内中子通量测量系统一般用于堆芯功率分布测量或根据测量结果进行堆芯保护系统的触发信号，测量结果为根据部分通道的实际测量值结合理论值重构得到。

传统技术中主要采用堆芯计算程序进行敏感性分析，确认各输入不确定性分量对计算结果的扰动量，通过统计的方式给出最终测量系统的不确定性，但是传统技术在计算的过程中使用到的功率参数均为假想的理论参数，这会使得计算中所认为的堆芯真实功率参数与堆芯的实际参数相差较大，最终导致得到的测量不确定性不合理。

发明内容

根据本申请公开的各种实施例，提供一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法、装置、计算机设备和计算机可读存储介质。

第一方面，本申请提供了一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法，包括：

基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定所述堆芯在所述模拟运行状态下的状态参数，并获取表征所述堆芯的网格截面值的群常数；

基于精确计算程序中的材料计算子程序和所述状态参数进行材料成分计算，得到所述堆芯中各燃料棒的材料成分；

基于所述精确计算程序中的功率计算子程序和各所述燃料棒的材料成分进行功率计算，得到所述堆芯的真实功率分布，并获取所述堆芯的探测器反应强度；

基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态时的功率参数，并基于所述探测器反应强度和所述功率参数进行通量图模拟测量，得到所述堆芯的模拟功率分布；及

基于所述真实功率分布和所述模拟功率分布之间的差值，确定所述堆芯的功率分布的测量不确定性。

第二方面，本申请提供了一种堆芯功率分布测量不确定性的分析装置，包括：

状态构建模块，用于基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定所述堆芯在所述模拟运行状态下的状态参数，并获取表征所述堆芯的网格截面值的群常数；

材料成分计算模块，用于基于精确计算程序中的材料计算子程序和所述状态参数进行材料成分计算，得到所述堆芯中各燃料棒的材料成分；

真实功率分布确定模块，用于基于所述精确计算程序中的功率计算子程序和各所述燃料棒的材料成分进行功率计算，得到所述堆芯的真实功率分布，并获取所述堆芯的探测器反应强度；

模拟功率分布确定模块，用于基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态时的功率参数，并基于所述探测器反应强度和所述功率参数进行通量图模拟测量，得到所述堆芯的模拟功率分布；及

测量不确定性确定模块，用于基于所述真实功率分布和所述模拟功率分布之间的差值，确定所述堆芯的功率分布的测量不确定性。

第三方面，本申请提供了一种计算机设备，包括存储器和一个或多个处理器，所述存储器中储存有计算机可读指令，所述计算机可读指令被所述处理器执行时实现上述的方法的步骤。

第四方面，本申请提供了一个或多个存储有计算机可读指令的非易失性存储介质，计算机可读指令被一个或多个处理器执行时实现上述的方法的步骤。

第五方面，本申请提供了一种计算机可读指令产品，包括计算机可读指令，该计算机可读指令被处理器执行时实现上述的方法的步骤。

附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或传统技术中的技术方案，下面将对实施例或传统技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据公开的附图获得其他的附图。

图 1 为根据一个或多个实施例中堆芯功率分布测量不确定性的分析方法的應用环境图。

图 2 为根据一个或多个实施例中堆芯功率分布测量不确定性的分析方法的流程图示意图。

图 3 为根据一个或多个实施例中堆芯功率分布测量不确定性的分析装置的结构框图。

图 4 为根据一个或多个实施例中计算机设备图。

具体实施方式

下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

本申请实施例提供的堆芯功率分布测量不确定性的分析方法，可以应用于如图 1 所示的应用环境中。其中，终端 102 通过网络与服务器 104 进行通信。数据存储系统可以存储服务器 104 需要处理的数据。数据存储系统可以集成在服务器 104 上，也可以放在云上或其他网络服务器上。服务器 104 根据堆芯实际运行过程中的实际运行状态，构建堆芯的模拟运行状态，并根据堆芯的实际运行状态确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，另外服务器 104 还获取表征堆芯中网格截面值的群常数。服务器 104 使用精确计算程序中的材料计算子程序基于堆芯在模拟运行状态下的状态参数进行燃料棒的材料成分计算，从而得到堆芯中各燃料棒的材料成分。服务器 104 使用精确计算程序中的功率计算子程序基于得到的各燃料棒的材料成分进行功率计算，从而得到堆芯在模拟运行状态下的真实功率分布以及堆芯的探测器反应强度。服务器 104 基于模拟运行状态的状态参数和堆芯的群常数，计算堆芯在模拟运行状态时的功率参数，并使用功率参数和探测器反应强度进行通量图模拟测量，从而得到堆芯在模拟运行状态下的模拟功率分布。服务器 104 根据堆芯在模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的差值，得到堆芯功率分布的测量不确定性。其中，终端 102 可以但不限于各种个人计算机、笔记本电脑、平板电脑等。服务器 104 可以用独立的服务器或者是多个服务器组成的服务器集群来实现。

在一个实施例中，如图 2 所示，提供了一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法，以该方法应用于图 1 中的服务器为例进行说明，包括以下步骤：

步骤 202，基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，并获取表征堆芯的网格截面值的群常数。

其中，状态参数包括反应堆堆芯各网格处的燃耗值 $BU(i,j)$ 、燃料温度 $Tf(i,j)$ 、慢化剂温度 $Tm(i,j)$ 、慢化剂密度 $Dm(i,j)$ 、135 氙浓度 $Xe(i,j)$ 、149 钐浓度 $Sm(i,j)$ 以及每一组控制

棒的插入位置 $CR(m)$ ，其中 i 是堆芯径向上的网格编号 $i=1, \dots, I$ ， j 是堆芯轴向上的网格编号， $j=1, \dots, J$ ， m 是堆芯控制棒的数目， $m=1, \dots, M$ 。

堆芯的实际运行状态指的是堆芯在现实中各种可能的物理状态。堆芯的模拟运行状态是构造出来的，且模拟运行状态的状态参数需要符合实际情况。在构建反应堆堆芯的模拟运行状态时，是基于反应堆堆芯实际运行状态下的组件燃耗及反射层参数所构建的，反射层参数主要包括堆芯硼浓度、燃料温度、慢化剂温度与水密度、控制棒插入状态、燃料深度等。例如，堆芯在模拟状态时各位置的硼浓度应该是近似相等的，且水的密度不会出现巨大的位置分部梯度等。构造模拟运行状态的优势是可以在缺少大量反应堆堆芯测量试验数据的情况下，通过理论计算的方案确认堆芯测量系统在功率分布等方面的测量不确定性。

在进行堆芯的功率分布测量不确定分析之前，还需要确定堆芯的装载方式以及堆芯内探测器类型。由于测量不确定性与堆芯装载有一定的关系，因此确定下来堆芯装载的方式后，即确定了所有分析的基础，后续不再变化，所有的分析均针对装载方式开展，即基于堆芯的装载方式确定堆芯的功率分布测量不确定性的分析方式。其中，堆芯装载方式主要包括 OUT-IN（输出-输入）装载、低泄漏装载等。探测器类型主要包括可移动式微型裂变室、固定式自给能探测器、气动式小球等类型。

可选地，服务器根据堆芯实际运行状态过程中的组件燃耗及反射层参数，构建堆芯的模拟运行状态，并使用堆芯扩散程序确定堆芯在模拟运行状态下各网格处的燃耗值、燃料温度、慢化剂温度、慢化剂密度、 ^{135}I 浓度、 ^{149}Sm 浓度以及每一组控制棒的插入位置。服务器还获取表征堆芯的网格截面值的群常数。

步骤 204，基于精确计算程序中的材料计算子程序和状态参数进行材料成分计算，得到堆芯中各燃料棒的材料成分。

其中，精确计算程序主要包括蒙特卡罗程序、以及与蒙特卡罗程序偏差可比拟的确定论程序等。

材料计算子程序是精确计算程序中用于计算燃料棒剩余材料中各材料的成分或者比例的程序。燃料棒中的材料在燃烧过程中会出现分裂，例如一个材料分裂成两个材料，那么该材料的数量就会发生变化，因此需要计算各材料的成分。材料成分指的是燃料棒在燃烧过程中剩余的各材料的成分，也可以理解为各材料的数量在剩余材料的数量中所占的比例。

可选地，服务器使用蒙特卡罗程序中的材料计算子程序部分，对堆芯中各燃料棒中剩余材料的成分进行计算，从而得到堆芯中各燃料棒的材料成分。

可选地，服务器使用与蒙特卡罗程序偏差可比拟的确定论程序中的材料计算子程序部分，对堆芯中各燃料棒中剩余材料的成分进行计算，从而得到堆芯中各燃料棒的材料成分。

步骤 206，基于精确计算程序中的功率计算子程序和各燃料棒的材料成分进行功率计算，得到堆芯的真实功率分布，并获取堆芯的探测器反应强度。

其中，功率计算子程序是精确计算程序中用于计算堆芯的真实功率分布的值的程序。真实功率分布表征堆芯在模拟运行状态下功率分布的真值。

可选地，服务器使用蒙特卡罗程序中的功率计算子程序部分，对反应堆堆芯在模拟运行状态下的真实功率分布进行计算，从而得到表征堆芯在模拟运行状态下功率分布的真值的真实功率分布，并对堆芯的探测器反应强度进行获取。

可选地，服务器使用与蒙特卡罗程序偏差可比拟的确定论程序中的功率计算子程序部分，对堆芯在模拟运行状态下的真实功率分布进行计算，从而得到表征堆芯在模拟运行状态下功率分布的真值的真实功率分布，并对堆芯的探测器反应强度进行获取。

步骤 208，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数，并基于探测器反应强度和功率参数进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

其中，功率参数主要包括堆芯三维功率分布、功率峰因子、轴向功率偏差等参数因子。模拟功率分布表征堆芯在模拟运行状态下功率分布的测量值。

通量图模拟是通过使用多项式拟合、样条拟合、权重系数等方法，给出与真值较为接近的测量值，即给出与堆芯的真实功率分布测量值较为接近的模拟功率分布测量值。

探测器反应强度指的是堆芯内探测器的活度值，是探测器在堆芯内受中子辐照活化产生的反应强度，与探测器类型相关，但是在探测器规格确定的情况下，仅与堆芯中子通量相关。探测器的反应强度的取值为叠加了探测器制造偏差、探测器电流算法的偏差之后的值，这样可以考虑到现场运行因素相对于理论模拟的偏差，使得计算的结果更加接近于真实的情况。探测器反应强度是在使用蒙特卡罗等精确计算程序计算堆芯的真实功率分布时得到的。探测器反应强度，也为在获取到的初始探测器反应强度的基础上叠加一个表征不确定性的值后，所确定的反应强度。例如，获取到的初始探测器的反应强度为 A ，但是由于具有探测器制造误差和探测器电流算法的误差，因此需要叠加一个表征不确定性的数据 X ，从而得到最终的探测器的反应强度 $A+X$ 。

可选地，服务器根据堆芯在模拟运行状态时的状态参数和表征堆芯的网格截面值的群常数，计算堆芯在模拟运行状态下的堆芯三维功率分布、功率峰因子、轴向功率偏差等功率参数。服务器再基于得到的功率参数和获取到的探测器反应强度，使用多项式拟合、样条拟合、权重系数等方法进行通量图模拟测量，给出与堆芯的真实功率分布测量值较为接近的模拟功率分布测量值。

步骤 210，基于真实功率分布和模拟功率分布之间的差值，确定堆芯的功率分布的测量不确定性。

其中，服务器根据堆芯在模拟运行状态下的真实功率分布的和模拟功率分布之间的差值，从而可以确定堆芯功率分布的测量不确定性。差值主要包括真实功率分布和模拟功率分布中焓升因子、热点因子、组件功率分部、轴向功率等参数的差值。

上述堆芯功率分布测量不确定性的分析方法中，通过根据堆芯的实际运行状态确定堆芯在模拟运行状态，并确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，可以使得构造的堆芯模拟运行状态下的状态参数更加贴合堆芯运行的真实情况，同时也可以使得在缺少大量反应堆堆芯测量试验数据的情况下，通过构造的模拟运行状态和模拟运行状态的状态参数来解决数据缺失的问题；通过先使用材料计算子程序基于状态参数确定燃料棒的材料成分，再使用功率计算子程序基于燃料棒的材料成分确定堆芯的真实功率分布，可以对这两个计算过程进行解耦，避免两个步骤之间的耦合关系对计算的结果和速度造成影响，使得真实功率分布的获取速度和准确性提升，从而使得通过堆芯的模拟功率分布和真实功率分布确定的堆芯功率分布的测量不确定性的准确率提升。

在一个实施例中，获取表征堆芯的网格截面值的群常数，包括：获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数。基于组件燃耗和状态参数，确定堆芯的组件及反射层群常数。

其中，组件燃耗指的是燃料组件的燃耗。核电站的燃料是铀，其有效成分是其中的铀-235，含量为 3% 左右。核燃料被烧成一个圆柱状的二氧化铀陶瓷芯块，叠装在用锆合金做成的包壳管中，做成一根根细长的燃料棒，再把这些燃料棒按一定规则组装成一个个燃料组件，就可供核电站使用。燃耗是对反应堆中核燃料消耗的度量。

组件和反射层参数主要包括堆芯硼浓度、燃料温度、慢化剂温度与水密度、控制棒插入状态、燃料深度等参数因子。

组件燃耗、组件以及反射层参数是基于传统两步法“组件输运计算+堆芯扩散计算”堆芯核设计程序中的组件输运计算程序所确定的。组件输运计算程序是在二维组件几何的基础上，利用多群基本核数据，求解多群中子输运方程，从而得到组件内中子通量密度在空间和能量上的分布，即得到组件燃耗和反射层参数。

可选地，服务器使用组件输运程序计算反应堆堆芯在模拟运行状态过程中燃料组件的燃耗、以及反应堆的堆芯硼浓度、燃料温度、慢化剂温度与水密度、控制棒插入状态、燃料深度等参数因子。然后根据得到的组件燃耗和状态参数，计算反应堆堆芯的组件及反射

层群常数。

本实施例中，通过使用组件输运程序计算反应堆堆芯在模拟运行状态中的组件燃耗和状态参数，可以提高组件燃耗和状态参数的正确率，从而使得基于组件燃耗和反射层参数所确定的组件及反射层群常数的准确率提高。

在一个实施例中，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数，包括：使用堆芯核设计程序，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态下的功率参数。基于功率参数，构建实现堆芯的功率分布重构的理论库。基于理论库进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

其中，堆芯核设计程序是以堆芯几何和等效少群均匀化截面参数为基础，求解少群中子扩散方程，得到全堆芯的少群中子通量分布、功率分布以及堆芯的反应性。在生成理论库时，考虑到核数据的偏差、堆芯设计参数，如功率、控制棒棒位、堆芯入口温度、堆芯燃耗等的偏差等因素，对堆芯核设计程序所使用的理论库叠加了随机的不确定性的数据值，从而可以综合考虑到现场运行因素相对于理论模拟的偏差，使得计算得到结果的更加准确。

功率参数主要包括堆芯三维功率分布、功率峰因子、轴向功率偏差等参数因子。理论库中除了功率参数外，还包括了探测器的截面、理论计算的活度。理论库中所含有的参数均属于通量图模拟测量过程中所使用到的理论计算参数。

可选地，服务器使用堆芯核设计程序，根据反应堆堆芯在模拟运行状态下的状态参数和反应堆堆芯的群常数，计算反应堆堆芯在模拟运行状态下的功率参数。服务器在得到功率参数之后，利用功率参数、探测器的截面以及理论计算的活度生成理论库，并将理论库中的数据作为通量图模拟测量的理论计算参数，进行通量图模拟测量，从而得到反应堆堆芯在模拟运行状态下的模拟功率分布。

本实施例中，通过使用由功率参数构建的理论库进行通量图模拟测量，可以得到准确的堆芯的模拟功率分布，从而提高堆芯的功率分布测量的不确定性的准确率。

在一个实施例中，确定堆芯在模拟运行状态下的功率参数之后，包括：获取探测器的截面。基于功率参数和探测器的截面，生成实现堆芯的功率分布重构的理论库。

其中，在生成用于实现堆芯的功率分布重构的理论库时，还将会用到理论计算的活度，即探测器在堆芯内受中子辐照活化所产生的反应强度。

可选地，服务器获取用于对堆芯进行探测的探测器截面，和在堆芯内受中子辐照活化所产生的反应强度。服务器基于探测器界面、反应强度以及功率参数，生成用于实现堆芯的功率分布重构的理论库。

本实施例中，通过利用功率参数、探测器的截面以及理论计算的活度生成理论库，从而可以在使用理论库进行通量图模拟测量时，得到准确的堆芯的模拟功率分布，从而提高堆芯的功率分布测量的不确定性的准确率。

在一个实施例中，生成实现堆芯的功率分布重构的理论库，包括：基于堆芯中核数据的偏差、堆芯设计参数偏差，确定待叠加至理论库的不确定性的数据值。将不确定性的数据值叠加至理论库，得到叠加不确定性的数据值后的理论库。

其中，堆芯设计参数偏差指的是功率、控制棒棒位、堆芯入口温度、堆芯燃耗等的偏差。

可选地，服务器对堆芯中核数据的偏差、以及功率、控制棒棒位、堆芯入口温度、堆芯燃耗等堆芯设计参数的偏差进行获取，然后基于核数据的偏差、以及功率、控制棒棒位、堆芯入口温度、堆芯燃耗等堆芯设计参数的偏差，确定待叠加至理论库的不确定性的数据值。服务器将不确定性的数据值与理论库中的对应数据进行叠加，从而得到叠加不确定性的数据值后的理论库。

本实施例中，通过对堆芯核设计程序所使用的理论库叠加了随机的不确定性的数据值，从而可以综合考虑到现场运行因素相对于理论模拟的偏差，使得计算得到结果的更加准确。

在一个实施例中，基于精确计算程序中的材料计算子程序和状态参数进行材料成分计

算,得到堆芯中各燃料棒的材料成分,包括:使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序,基于状态参数对堆芯在模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算,得到各组件的燃耗。使用蒙特卡罗程序中的材料计算子程序,基于各组件的燃耗,确定各组件中燃料棒的材料成分。

其中,蒙特卡罗程序也称统计模拟方法,是指使用随机数或者更常见的伪随机数来解决计算问题的方法。蒙特卡罗程序的工作原理是不断抽样和逐渐逼近。例如,在一张黑底图片具有多个白色图形且每个白色图形都是不规则图形,无法通过边长公式等进行面积计算,而蒙特卡罗方法是通过向图上随机打点,然后获取像素点所在的颜色,从而得到白色图形的面积=白色点数/总点数*图片总面积。蒙特卡罗方法基于解耦的思想可以提升得到组件燃耗、燃料棒的材料成分、以及真实功率分布的速度。

可选地,服务器使用蒙特卡罗程序中关于燃耗计算部分的子程序,对堆芯在模拟运行状态下的状态参数进行燃耗计算,从而得到堆芯在模拟运行状态下各组件的燃耗。服务器在得到堆芯在模拟状态下各组件的燃耗后,再使用蒙特卡罗程序中关于材料计算部分子程序,对得到的各组件的燃耗开展材料成分计算,从而得到堆芯在模拟运行状态下各组件中燃料棒的材料成分。

本实施例中,通过使用蒙特卡罗程序中的不同子程序部分计算各组件的燃耗和燃料棒的材料成分,可以对燃耗计算和材料成分计算两个步骤进行解耦,从而能够提升组件燃耗和燃料棒的材料成分的速度,以实现反应堆堆芯的真实功率分布的获取速度的提升。

在一个实施例中,获取堆芯的探测器反应强度包括:获取探测器的制造误差以及探测器的电流算法误差。基于制造误差和电流算法误差,对探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据,得到叠加表征不确定性的数据的探测器反应强度。

其中,探测器的制造误差指的是被加工探测器达到的实际几何参数对设计几何参数的偏离值。在生产实际中,影响加工精度的工艺因素是错综复杂的。对于某些加工误差问题,不能仅用单因素分析法来解决,而需要用概率统计方法进行综合分析,找出产生加工误差的原因,加以消除。在制造误差无法消除时,可以通过叠加不确定性来消除制造误差所带来的不良影响。

探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据指的是在获取到的初始探测器反应强度的基础上再叠加一个值。例如,获取到的初始探测器的反应强度为 A ,但是由于具有探测器制造误差和探测器电流算法的误差,因此需要叠加一个表征不确定性的数据 X ,从而得到最终的探测器的反应强度 $A+X$ 。又例如,获取到的初始探测器的反应强度为 A ,但是由于具有探测器制造误差和探测器电流算法的误差,因此需要叠加一个表征不确定性的数据 $-X$,从而得到最终的探测器的反应强度 $A-X$ 。

可选地,服务器首先获取探测器在制造时出现的制造误差和探测器中电流算法的误差。服务器根据获取到的探测器的制造误差和电流算法误差,对获取到的初始探测器反应强度叠加表征不确定性的数值,从而得到最终用于计算堆芯在模拟运行状态下的真实功率分布的探测器反应强度。

本实施例中,通过在确定探测的反应强度时考虑到探测器的制造误差和探测器的电流算法的误差,能够使得最终确定的探测器的反应强度更加准确,从而提升基于探测器反应强度和功率参数得到的模拟功率分布的准确率。

在一个实施例中,所述获取所述堆芯的探测器反应强度,包括:在堆芯中的探测器规格确定的情况下,获取堆芯中的中子通量。基于中子通量,确定探测器的反应强度。

其中,探测器的规格可以理解为探测器的类型或者型号。中子通量指的是指单位时间内通过单位面积的中子数,是衡量反应堆的一个重要指标。中子通量等于中子密度与其平均速度的乘积,单位常用“中子/平方厘米·秒”表示。按中子能量不同,又可分为热中子通量和快中子通量两种。中子通量分布测量对反应堆的安全运行、燃料管理、最大允许功率的确定、各项实验的进行以及样品的辐照都有极其重要的意义。

可选地,服务器探测器的类型或者型号进行获取,并在确定探测器的类型或者型号的

情况下, 获取堆芯中的中子通量。服务器根据获取到的堆芯中的中子通量, 计算探测器的反应强度。

本实施例中, 通过在堆芯中的探测器规格确定的情况下, 获取堆芯中的中子通量, 从而可以基于中子通量, 实现对探测器的反应强度的确定。

在一个实施例中, 堆芯功率分布测量不确定性的分析方法还包括: 构造堆芯的多个模拟运行状态及堆芯在每一模拟运行状态下的状态参数。获取堆芯在每一模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差。对每一模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析, 得到堆芯的功率分布的测量不确定性。

其中, 统计分析的方法主要包括描述统计、假设检验、信度分析、列联表分析、相关分析、方差分析、回归分析、聚类分析以及双 95 原则等方法。例如, 根据多个模拟运行状态下的偏差结果的分布, 按照双 95 的原则确定最终的功率测量的不确定性。其中, 双 95 原则指的是包络 95% 的数据点, 且具有 95% 的置信度。

可选地, 服务器根据堆芯在运行过程中可能会出现多种情况, 构建表征堆芯每一运行情况的模拟运行状态。服务器根据堆芯在每一模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布, 得到堆芯在每一模拟运行状态下的功率偏差。服务器使用双 95 原则对堆芯在每一模拟运行状态下的功率偏差进行应用统计分析, 最终得到堆芯功率分布测量的不确定性。

本实施例中, 通过构建堆芯的多个模拟运行状态, 然后根据堆芯在每一模拟运行状态下的功率偏差的统计分析结果, 确定堆芯的功率分布测量的不确定性, 可以避免由于单一试验造成的偶然现象的发生, 从而使得最终得到的堆芯功率测量的不确定性更加准确, 减少误差。

本申请还提供一种应用场景, 该应用场景应用上述的堆芯功率分布测量不确定性的分析方法。该堆芯功率分布测量不确定性的分析方法在该应用场景的应用如下: 对于某种反应堆燃料管理, 确认反应堆堆芯的装载方式以及堆芯内探测器的类型。根据堆芯的各种可能的物理运行状态, 即实际运行状态, 使用“组件输运计算+堆芯扩散计算”, 开展堆芯在不同模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数计算, 主要包括堆芯硼浓度、燃料温度、慢化剂温度与水密度、控制棒插入状态、燃料深度等参数。并根据得到的组件燃耗和状态参数, 获取堆芯计算所使用的组件以及反射层群常数。根据堆芯的各种实际运行状态, 构建堆芯的多个模拟运行状态, 并指定堆芯在各模拟运行状态下各网格处的燃耗值 $BU(i,j)$ 、燃料温度 $Tf(i,j)$ 、慢化剂温度 $Tm(i,j)$ 、慢化剂密度 $Dm(i,j)$ 、135 氙浓度 $Xe(i,j)$ 、149 钐浓度 $Sm(i,j)$ 以及每一组控制棒的插入位置 $CR(m)$, 以模拟不同实际运行状态下的堆芯特性。其中 i 是堆芯径向上的网格编号 $i=1,...,I$, j 是堆芯轴向上的网格编号, $j=1,...,J$, m 是堆芯控制棒的数目, $m=1,...,M$ 。使用堆芯核设计程序中的堆芯扩散程序, 根据堆芯在各模拟状态下的状态参数和堆芯的群常数开展堆芯计算, 得到堆芯在各模拟状态下的堆芯三维功率分布、功率峰因子、轴向功率偏差等的功率参数。根据得到的堆芯在各模拟状态下的功率参数和探测器的截面、理论计算的活度等生成实现堆内功率分布重构所需的理论库。使用蒙特卡罗程序中的材料成分计算子程序对堆芯的各种模拟运行状态进行组件燃耗计算, 从而得到燃耗过程中各燃料棒的材料成分。使用蒙特卡罗程序中的功率计算子程序基于各燃料棒的材料成分, 计算得到堆芯在各模拟状态下的真实功率分布和堆芯内探测器的反应强度。使用通量图处理程序, 利用生成的理论库和探测器的反应强度数据, 进行通量图模拟测量, 得到与真实功率分布较为接近的模拟功率分布。统计各种模拟运行状态下模拟功率分布和真实功率分布中各项参数的偏差, 应用统计方法, 最终获得堆芯功率分布测量的不确定性。

应该理解的是, 虽然如上所述的各实施例所涉及的流程图中的各个步骤按照箭头的指示依次显示, 但是这些步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。除非本文中有明确的说明, 这些步骤的执行并没有严格的顺序限制, 这些步骤可以以其它的顺序执行。而且, 如上所述的各实施例所涉及的流程图中的至少一部分步骤可以包括多个步骤或者多个阶段, 这些步骤或者阶段并不必然是在同一时刻执行完成, 而是可以在不同的时刻执行, 这

些步骤或者阶段的执行顺序也不必然是依次进行，而是可以与其它步骤或者其它步骤中的步骤或者阶段的至少一部分轮流或者交替地执行。

基于同样的发明构思，本申请实施例还提供了一种用于实现上述所涉及的堆芯功率分布测量不确定性的分析方法的堆芯功率分布测量不确定性的分析装置。该装置所提供的解决问题的实现方案与上述方法中所记载的实现方案相似，故下面所提供的一个或多个堆芯功率分布测量不确定性的分析装置实施例中的具体限定可以参见上文中对于堆芯功率分布测量不确定性的分析方法的限定，在此不再赘述。

在一个实施例中，如图 3 所示，提供了一种堆芯功率分布测量不确定性的分析装置，包括：

状态构建模块 302，用于基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，并获取表征堆芯的网格截面值的群常数。

材料成分计算模块 304，用于基于精确计算程序中的材料计算子程序和状态参数进行材料成分计算，得到堆芯中各燃料棒的材料成分。

真实功率分布确定模块 306，用于基于精确计算程序中的功率计算子程序和各燃料棒的材料成分进行功率计算，得到堆芯的真实功率分布，并获取堆芯的探测器反应强度。

模拟功率分布确定模块 308，用于基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数，并基于探测器反应强度和功率参数进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

测量不确定性确定模块 310，用于基于真实功率分布和模拟功率分布之间的差值，确定堆芯的功率分布的测量不确定性。

在一个实施例中，状态构建模块包括：

参数获取单元，用于获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数。

群常数确定单元，用于基于组件燃耗和状态参数，确定堆芯的组件及反射层群常数。

在一个实施例中，模拟功率分布确定模块包括：

功率参数确定单元，用于使用堆芯核设计程序，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态下的功率参数。

理论库生成单元，用于基于功率参数，构建实现堆芯的功率分布重构的理论库。

第一模拟功率分布确定单元，用于基于理论库进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

在一个实施例中，材料成分计算模块包括：

燃耗计算单元，用于使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序，基于状态参数对堆芯在模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算，得到各组件的燃耗。

材料成分计算单元，用于使用蒙特卡罗程序中的材料计算子程序，基于各组件的燃耗，确定各组件中燃料棒的材料成分。

在一个实施例中，反应强度获取单元包括：

误差获取子单元，用于获取探测器的制造误差以及探测器的电流算法误差。

反应强度获取子单元，用于基于制造误差和电流算法误差，对探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据，得到叠加表征不确定性的数据的探测器反应强度。

在一个实施例中，堆芯功率分布测量不确定性的分析装置还包括：

状态参数确定单元，用于构造堆芯的多个模拟运行状态及堆芯在每一模拟运行状态下的状态参数。

功率偏差确定单元，用于获取堆芯在每一模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差。

测量不确定性确定单元，用于对每一模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析，得到堆芯的功率分布的测量不确定性。

上述堆芯功率分布测量不确定性的分析装置中的各个模块可全部或部分通过软件、硬

件及其组合来实现。上述各模块可以硬件形式内嵌于或独立于计算机设备中的处理器中，也可以以软件形式存储于计算机设备中的存储器中，以便于处理器调用执行以上各个模块对应的操作。

在一个实施例中，提供了一种计算机设备，该计算机设备可以是服务器，其内部结构图可以如图 4 所示。该计算机设备包括处理器、存储器、输入/输出接口(Input/Output，简称 I/O)和通信接口。其中，处理器、存储器和输入/输出接口通过系统总线连接，通信接口通过输入/输出接口连接到系统总线。其中，该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质和内存。该非易失性存储介质存储有操作系统、计算机可读指令和数据库。该内存为易失性存储介质中的操作系统和计算机可读指令的运行提供环境。该计算机设备的数据库用于存储堆芯的实际运行状态、堆芯的模拟运行状态、堆芯在模拟运行状态下的状态参数、表征堆芯的网格截面值的群常数、堆芯在模拟运行状态时的功率参数、堆芯的模拟功率分布、精确计算程序、各燃料棒的材料成分、堆芯的真实功率分布、堆芯的功率分布的测量不确定性、堆芯在实际运行状态下的组件燃耗和反射层参数、理论库、蒙特卡罗程序、堆芯在模拟运行状态时的探测器反应强度、探测器的制造误差以及探测器的电流算法误差数据。该计算机设备的输入/输出接口用于处理器与外部设备之间交换信息。该计算机设备的通信接口用于与外部的终端通过网络连接通信。该计算机可读指令被处理器执行时以实现一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法。

本领域技术人员可以理解，图 4 中示出的结构，仅仅是与本申请方案相关的部分结构的框图，并不构成对本申请方案所应用于其上的计算机设备的限定，具体的计算机设备可以包括比图中所示更多或更少的部件，或者组合某些部件，或者具有不同的部件布置。

在一个实施例中，提供了一种计算机设备，包括存储器和一个或多个处理器，存储器中储存有计算机可读指令，计算机可读指令被处理器执行时，使得一个或多个处理器执行以下步骤：

基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，并获取表征堆芯的网格截面值的群常数；基于精确计算程序中的材料计算子程序和状态参数进行材料成分计算，得到堆芯中各燃料棒的材料成分；基于精确计算程序中的功率计算子程序和各燃料棒的材料成分进行功率计算，得到堆芯的真实功率分布，并获取堆芯的探测器反应强度；基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数，并基于探测器反应强度和功率参数进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布；及基于真实功率分布和模拟功率分布之间的差值，确定堆芯的功率分布的测量不确定性。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数；及基于组件燃耗和状态参数，确定堆芯的组件及反射层群常数。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

使用堆芯核设计程序，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态下的功率参数；基于功率参数，构建实现堆芯的功率分布重构的理论库；及基于理论库进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序，基于状态参数对堆芯在模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算，得到各组件的燃耗；及使用蒙特卡罗程序中的材料计算子程序，基于各组件的燃耗，确定各组件中燃料棒的材料成分。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

获取探测器的制造误差以及探测器的电流算法误差；及基于制造误差和电流算法误差，对探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据，得到叠加表征不确定性的数据的探测器反应强度。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

构造堆芯的多个模拟运行状态及堆芯在每一模拟运行状态下的状态参数；获取堆芯在每一模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差；及对每一模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析，得到堆芯的功率分布的测量不确定性。

在一个实施例中，一个或多个存储有计算机可读指令的非易失性存储介质，计算机可读指令被一个或多个处理器执行时，使得一个或多个处理器执行以下步骤：

基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，并获取表征堆芯的网格截面值的群常数；基于精确计算程序中的材料计算子程序和状态参数进行材料成分计算，得到堆芯中各燃料棒的材料成分；基于精确计算程序中的功率计算子程序和各燃料棒的材料成分进行功率计算，得到堆芯的真实功率分布，并获取堆芯的探测器反应强度；基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数，并基于探测器反应强度和功率参数进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布；基于真实功率分布和模拟功率分布之间的差值，确定堆芯的功率分布的测量不确定性。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数；及基于组件燃耗和状态参数，确定堆芯的组件以及反射层群常数。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

使用堆芯核设计程序，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态下的功率参数；基于功率参数，构建实现堆芯的功率分布重构的理论库；及基于理论库进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序，基于状态参数对堆芯在模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算，得到各组件的燃耗；及使用蒙特卡罗程序中的材料计算子程序，基于各组件的燃耗，确定各组件中燃料棒的材料成分。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

获取探测器的制造误差以及探测器的电流算法误差；及基于制造误差和电流算法误差，对探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据，得到叠加表征不确定性的数据的探测器反应强度。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

构造堆芯的多个模拟运行状态及堆芯在每一模拟运行状态下的状态参数；获取堆芯在每一模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差；及对每一模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析，得到堆芯的功率分布的测量不确定性。

在一个实施例中，提供了一种计算机可读指令产品，包括计算机可读指令，该计算机可读指令被处理器执行时实现以下步骤：

基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定堆芯在模拟运行状态下的状态参数，并获取表征堆芯的网格截面值的群常数；基于精确计算程序中的材料计算子程序和状态参数进行材料成分计算，得到堆芯中各燃料棒的材料成分；基于精确计算程序中的功率计算子程序和各燃料棒的材料成分进行功率计算，得到堆芯的真实功率分布，并获取堆芯的探测器反应强度；基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态时的功率参数，并基于探测器反应强度和功率参数进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布；及基于真实功率分布和模拟功率分布之间的差值，确定堆芯的功率分布的测量不确定性。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数；及基于组件燃耗和状态参数，确定堆芯的组件以及反射层群常数。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

使用堆芯核设计程序，基于状态参数和群常数，确定堆芯在模拟运行状态下的功率参

数；基于功率参数，构建实现堆芯的功率分布重构的理论库；及基于理论库进行通量图模拟测量，得到堆芯的模拟功率分布。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序，基于状态参数对堆芯在模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算，得到各组件的燃耗；及使用蒙特卡罗程序中的材料计算子程序，基于各组件的燃耗，确定各组件中燃料棒的材料成分。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

获取探测器的制造误差以及探测器的电流算法误差；及基于制造误差和电流算法误差，对探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据，得到叠加表征不确定性的数据的探测器反应强度。

在一个实施例中，处理器执行计算机可读指令时还实现以下步骤：

构造堆芯的多个模拟运行状态及堆芯在每一模拟运行状态下的状态参数；获取堆芯在每一模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差；及对每一模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析，得到堆芯的功率分布的测量不确定性。

需要说明的是，本申请所涉及的用户信息（包括但不限于用户设备信息、用户个人信息等）和数据（包括但不限于用于分析的数据、存储的数据、展示的数据等），均为经用户授权或者经过各方充分授权的信息和数据，且相关数据的收集、使用和处理需要遵守相关国家和地区的相关法律法规和标准。

本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程，是可以通过计算机可读指令来指令相关的硬件来完成，所述的计算机可读指令可存储于一非易失性计算机可读存储介质中，该计算机可读指令在执行时，可包括如上述各方法的实施例的流程。其中，本申请所提供的各实施例中所使用的对存储器、数据库或其它介质的任何引用，均可包括非易失性和易失性存储器中的至少一种。非易失性存储器可包括只读存储器（Read-Only Memory, ROM）、磁带、软盘、闪存、光存储器、高密度嵌入式非易失性存储器、阻变存储器（ReRAM）、磁变存储器（Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM）、铁电存储器（Ferroelectric Random Access Memory, FRAM）、相变存储器（Phase Change Memory, PCM）、石墨烯存储器等。易失性存储器可包括随机存取存储器（Random Access Memory, RAM）或外部高速缓冲存储器等。作为说明而非局限，RAM可以是多种形式，比如静态随机存取存储器（Static Random Access Memory, SRAM）或动态随机存取存储器（Dynamic Random Access Memory, DRAM）等。本申请所提供的各实施例中所涉及的数据库可包括关系型数据库和非关系型数据库中至少一种。非关系型数据库可包括基于区块链的分布式数据库等，不限于此。本申请所提供的各实施例中所涉及的处理器可为通用处理器、中央处理器、图形处理器、数字信号处理器、可编程逻辑器、基于量子计算的数据处理逻辑器等，不限于此。

以上所述实施例的各技术特征可以进行任意的组合，为使描述简洁，未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述，然而，只要这些技术特征的组合不存在矛盾，都应当认为是本说明书记载的范围。

以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式，其描述较为具体和详细，但并不能因此而理解为对申请专利范围的限制。应当指出的是，对于本领域的普通技术人员来说，在不脱离本申请构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本申请的保护范围。因此，本申请专利的保护范围应以所附权利要求为准。

权利要求

1、一种堆芯功率分布测量不确定性的分析方法，其特征在于，所述方法包括：

基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定所述堆芯在所述模拟运行状态下的状态参数，并获取表征所述堆芯的网格截面值的群常数；

基于精确计算程序中的材料计算子程序和所述状态参数进行材料成分计算，得到所述堆芯中各燃料棒的材料成分；

基于所述精确计算程序中的功率计算子程序和各所述燃料棒的材料成分进行功率计算，得到所述堆芯的真实功率分布，并获取所述堆芯的探测器反应强度；

基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态时的功率参数，并基于所述探测器反应强度和所述功率参数进行通量图模拟测量，得到所述堆芯的模拟功率分布；及

基于所述真实功率分布和所述模拟功率分布之间的差值，确定所述堆芯的功率分布的测量不确定性。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述获取表征所述堆芯的网格截面值的群常数，包括：

获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数；及

基于所述组件燃耗和所述状态参数，确定所述堆芯的组件及反射层群常数。

3、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态时的功率参数，包括：

使用堆芯核设计程序，基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态下的功率参数；

所述确定所述堆芯在模拟运行状态下的功率参数之后，包括：

基于所述功率参数，构建实现所述堆芯的功率分布重构的理论库；及

基于所述理论库进行通量图模拟测量，得到所述堆芯的模拟功率分布。

4、根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述确定所述堆芯在模拟运行状态下的功率参数之后，包括：

获取探测器的截面；及

基于所述功率参数和所述探测器的截面，生成实现所述堆芯的功率分布重构的理论库。

5、根据权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述生成实现所述堆芯的功率分布重构的理论库，包括：

基于所述堆芯中核数据的偏差、堆芯设计参数偏差，确定待叠加至理论库的不确定性的数据值；及

将所述不确定性的数据值叠加至所述理论库，得到叠加所述不确定性的数据值后的理论库。

6、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述基于精确计算程序中的材料计算子程序和所述状态参数进行材料成分计算，得到所述堆芯中各燃料棒的材料成分，包括：

使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序，基于所述状态参数对所述堆芯在所述模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算，得到各所述组件的燃耗；及

使用所述蒙特卡罗程序中的材料计算子程序，基于各所述组件的燃耗，确定各所述组件中燃料棒的材料成分。

7、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述获取所述堆芯的探测器反应强度包括：

获取探测器的制造误差以及所述探测器的电流算法误差；及

基于所述制造误差和所述电流算法误差，对所述探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据，得到叠加所述表征不确定性的数据的探测器反应强度。

8、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述获取所述堆芯的探测器反应强度，包括：

在所述堆芯中的探测器规格确定的情况下，获取所述堆芯中的中子通量；及
基于所述中子通量，确定所述探测器的反应强度。

9、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述方法还包括：

构造所述堆芯的多个模拟运行状态及所述堆芯在每一所述模拟运行状态下的状态参数；

获取所述堆芯在每一所述模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差；及

对每一所述模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析，得到所述堆芯的功率分布的测量不确定性。

10、一种堆芯功率分布测量不确定性的分析装置，其特征在于，所述装置包括：

状态构建模块，用于基于堆芯的实际运行状态构建模拟运行状态，确定所述堆芯在所述模拟运行状态下的状态参数，并获取表征所述堆芯的网格截面值的群常数；

材料成分计算模块，用于基于精确计算程序中的材料计算子程序和所述状态参数进行材料成分计算，得到所述堆芯中各燃料棒的材料成分；

真实功率分布确定模块，用于基于所述精确计算程序中的功率计算子程序和各所述燃料棒的材料成分进行功率计算，得到所述堆芯的真实功率分布，并获取所述堆芯的探测器反应强度；

模拟功率分布确定模块，用于基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态时的功率参数，并基于所述探测器反应强度和所述功率参数进行通量图模拟测量，得到所述堆芯的模拟功率分布；及

测量不确定性确定模块，用于基于所述真实功率分布和所述模拟功率分布之间的差值，确定所述堆芯的功率分布的测量不确定性。

11、根据权利要求10所述的装置，其特征在于，所述状态构建模块包括：

参数获取单元，用于获取堆芯在模拟运行状态下的组件燃耗和状态参数；及

群常数确定单元，用于基于所述组件燃耗和所述状态参数，确定所述堆芯的组件及反射层群常数。

12、根据权利要求10所述的装置，其特征在于，所述模拟功率分布确定模块包括：

功率参数确定单元，用于使用堆芯核设计程序，基于所述状态参数和所述群常数，确定所述堆芯在所述模拟运行状态下的功率参数；

理论库生成单元，用于基于所述功率参数，构建实现所述堆芯的功率分布重构的理论库；及

第一模拟功率分布确定单元，用于基于所述理论库进行通量图模拟测量，得到所述堆芯的模拟功率分布。

13、根据权利要求12所述的装置，其特征在于，所述理论库生成单元包括：

截面获取子单元，用于获取探测器的截面；及

理论库生成子单元，用于基于所述功率参数和所述探测器的截面，生成实现所述堆芯的功率分布重构的理论库。

14、根据权利要求13所述的装置，其特征在于，所述理论库生成子单元包括：

数据确定子单元，用于基于所述堆芯中核数据的偏差、堆芯设计参数偏差，确定待叠加至理论库的不确定性的数据值；及

数据叠加子单元，用于将所述不确定性的数据值叠加至所述理论库，得到叠加所述不确定性的数据值后的理论库。

15、根据权利要求10所述的装置，其特征在于，所述材料成分计算模块包括：

燃耗计算单元，用于使用蒙特卡罗程序中的燃耗计算子程序，基于所述状态参数对所

述堆芯在所述模拟运行状态时各组件的燃耗进行计算，得到各所述组件的燃耗；及

材料成分计算单元，用于使用所述蒙特卡罗程序中的材料计算子程序，基于各所述组件的燃耗，确定各所述组件中燃料棒的材料成分。

16、根据权利要求 10 所述的装置，其特征在于，所述反应强度获取单元包括：

误差获取子单元，用于获取探测器的制造误差以及所述探测器的电流算法误差；及

反应强度获取子单元，用于基于所述制造误差和所述电流算法误差，对所述探测器的反应强度叠加表征不确定性的数据，得到叠加所述表征不确定性的数据的探测器反应强度。

17、根据权利要求 10 所述的装置，其特征在于，所述反应强度获取单元包括：

通量获取子单元，用于在所述堆芯中的探测器规格确定的情况下，获取所述堆芯中的中子通量；及

强度获取子单元，用于基于所述中子通量，确定所述探测器的反应强度。

18、根据权利要求 10 所述的装置，其特征在于，所述装置还包括：

状态参数确定单元，用于构造所述堆芯的多个模拟运行状态及所述堆芯在每一所述模拟运行状态下的状态参数；

功率偏差确定单元，用于获取所述堆芯在每一所述模拟运行状态下的真实功率分布和模拟功率分布之间的功率偏差；及

测量不确定性确定单元，用于对每一所述模拟运行状态下的功率偏差进行统计分析，得到所述堆芯的功率分布的测量不确定性。

19、一种计算机设备，包括存储器和处理器，所述存储器存储有计算机可读指令，其特征在于，所述处理器执行所述计算机可读指令时实现权利要求 1 至 9 中任一项所述的方法的步骤。

20、一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机可读指令，其特征在于，所述计算机可读指令被处理器执行时实现权利要求 1 至 9 中任一项所述的方法的步骤。

21、一种计算机可读指令产品，包括计算机可读指令，其特征在于，该计算机可读指令被处理器执行时实现权利要求 1 至 9 中任一项所述的方法的步骤。

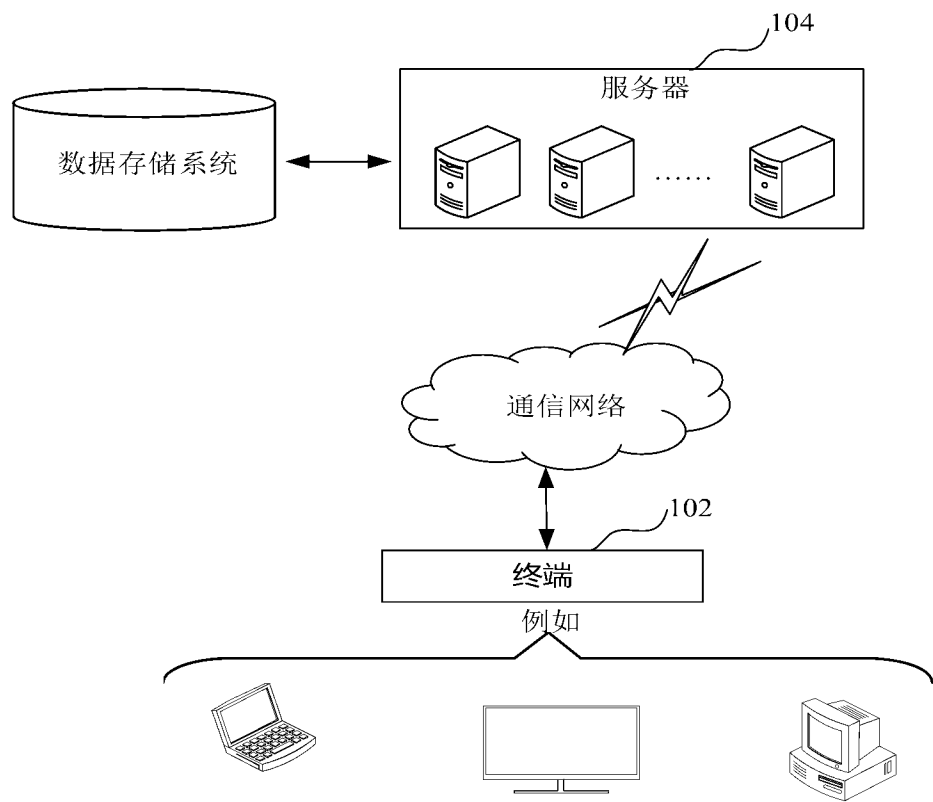


图 1

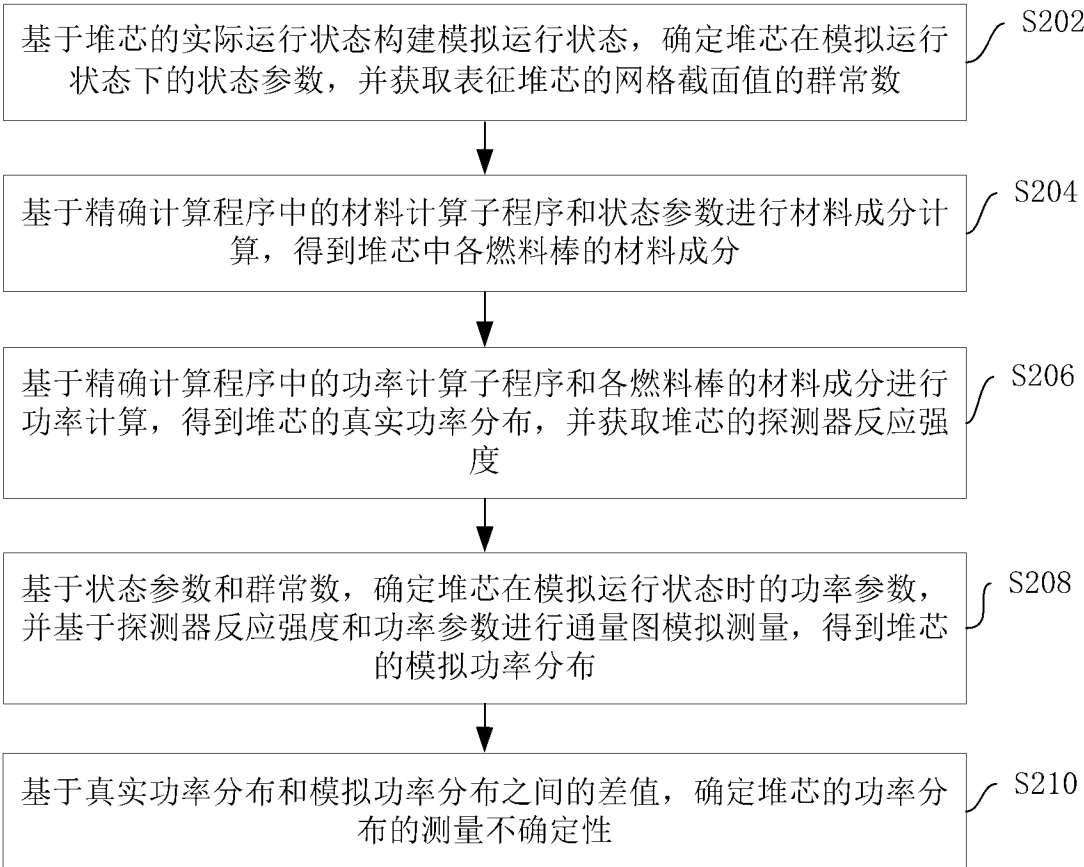


图 2

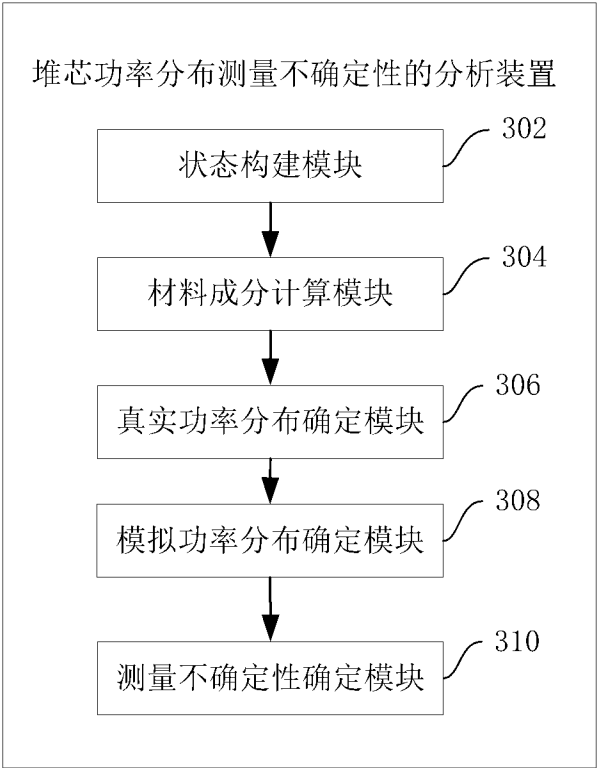


图 3

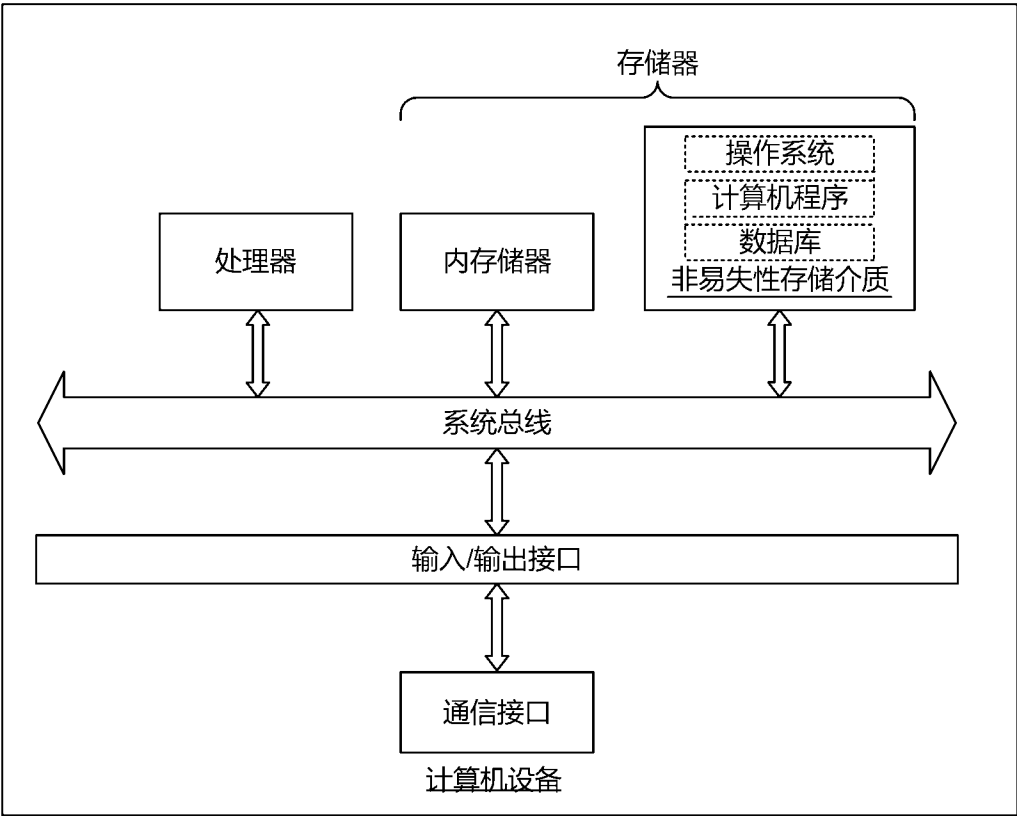


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/131195

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G21C17/00(2006.01)i; G21C17/108(2006.01)i; G21C17/06(2006.01)i; G06F17/18(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G21C17/-, G06F17/- (IPC)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, ENTXTC, DWPI, CNKI: 堆芯, 功率, 分布, 测量, 探测, 不确定性, 不确定度, 模拟, 反应强度, reactor core, power, distribut+, measur+, detect+, uncertainty, imitat+, reaction intensity

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 116682585 A (CHINA GENERAL NUCLEAR POWER CO., LTD. et al.) 01 September 2023 (2023-09-01) claims 1-10, description, paragraphs 0044-0169, and figures 1-4	1-21
A	CN 104036837 A (CHINA NUCLEAR POWER TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. et al.) 10 September 2014 (2014-09-10) description, paragraphs 0050-0113, and figures 1-2	1-21
A	CN 115688358 A (NUCLEAR POWER INSTITUTE OF CHINA) 03 February 2023 (2023-02-03) entire document	1-21
A	CN 114266157 A (NUCLEAR POWER INSTITUTE OF CHINA) 01 April 2022 (2022-04-01) entire document	1-21
A	CN 112966428 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 15 June 2021 (2021-06-15) entire document	1-21
A	CN 111814343 A (SUN YAT-SEN UNIVERSITY) 23 October 2020 (2020-10-23) entire document	1-21

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

08 February 2024

Date of mailing of the international search report

19 February 2024

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/131195

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 113409975 A (NUCLEAR POWER INSTITUTE OF CHINA) 17 September 2021 (2021-09-17) entire document	1-21
A	CN 101755308 A (AREVA NP) 23 June 2010 (2010-06-23) entire document	1-21
A	CN 114239222 A (CHINA GENERAL NUCLEAR POWER CO., LTD. et al.) 25 March 2022 (2022-03-25) entire document	1-21
A	CN 101946253 A (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP. et al.) 12 January 2011 (2011-01-12) entire document	1-21
A	EP 4174875 A1 (FRAMATOME SA) 03 May 2023 (2023-05-03) entire document	1-21
A	WO 2009134498 A2 (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP.) 05 November 2009 (2009-11-05) entire document	1-21
A	US 5171516 A (TOSHIBA K. K.) 15 December 1992 (1992-12-15) entire document	1-21
A	US 2010226468 A1 (RIO GERARD) 09 September 2010 (2010-09-09) entire document	1-21

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/131195

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	116682585	A	01 September 2023	None			
CN	104036837	A	10 September 2014	None			
CN	115688358	A	03 February 2023	None			
CN	114266157	A	01 April 2022	None			
CN	112966428	A	15 June 2021	None			
CN	111814343	A	23 October 2020	None			
CN	113409975	A	17 September 2021	None			
CN	101755308	A	23 June 2010	WO	2009001004	A2	31 December 2008
				WO	2009001004	A3	19 February 2009
				RU	2009148714	A	20 July 2011
				KR	20100030649	A	18 March 2010
				JP	2010529448	A	26 August 2010
				EP	2176866	A2	21 April 2010
				US	2010226468	A1	09 September 2010
				FR	2917228	A1	12 December 2008
CN	114239222	A	25 March 2022	None			
CN	101946253	A	12 January 2011	EP	2240939	A2	20 October 2010
				EP	2240939	A4	21 March 2012
				JP	2011528101	A	10 November 2011
				BRPI	0908354	A2	24 September 2019
				TW	200949856	A	01 December 2009
				WO	2009134498	A2	05 November 2009
				WO	2009134498	A3	30 December 2009
				KR	20100115754	A	28 October 2010
				ZA	201005627	B	29 June 2011
EP	4174875	A1	03 May 2023	WO	2023072937	A1	04 May 2023
WO	2009134498	A2	05 November 2009	None			
US	5171516	A	15 December 1992	JPH	04142498	A	15 May 1992
				JP	3224810	B2	05 November 2001
US	2010226468	A1	09 September 2010	None			

A. 主题的分类

G21C17/00(2006.01)i; G21C17/108(2006.01)i; G21C17/06(2006.01)i; G06F17/18(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G21C17/-, G06F17/- (IPC)

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNTEXT,ENTXTC,DWPI,CNKI: 堆芯, 功率, 分布, 测量, 探测, 不确定性, 不确定度, 模拟, 反应强度, reactor core, power, distribut+, measur+, detect+, uncertainty, imitat+, reaction intensity

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 116682585 A (中广核研究院有限公司 等) 2023年9月1日 (2023 - 09 - 01) 权利要求1-10, 说明书0044-0169段, 图1-4	1-21
A	CN 104036837 A (中科华核电技术研究院有限公司 等) 2014年9月10日 (2014 - 09 - 10) 说明书0050-0113段, 图1-2	1-21
A	CN 115688358 A (中国核动力研究设计院) 2023年2月3日 (2023 - 02 - 03) 全文	1-21
A	CN 114266157 A (中国核动力研究设计院) 2022年4月1日 (2022 - 04 - 01) 全文	1-21
A	CN 112966428 A (清华大学) 2021年6月15日 (2021 - 06 - 15) 全文	1-21
A	CN 111814343 A (中山大学) 2020年10月23日 (2020 - 10 - 23) 全文	1-21
A	CN 113409975 A (中国核动力研究设计院) 2021年9月17日 (2021 - 09 - 17) 全文	1-21

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“p” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2024年2月8日

国际检索报告邮寄日期

2024年2月19日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

王伟宁

电话号码 (+86) 010-62085688

PCT/ISA/210 表(第2页) (2022年7月)

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 101755308 A (阿海珐核能公司) 2010年6月23日 (2010 - 06 - 23) 全文	1-21
A	CN 114239222 A (中广核研究院有限公司 等) 2022年3月25日 (2022 - 03 - 25) 全文	1-21
A	CN 101946253 A (西屋电气有限责任公司 等) 2011年1月12日 (2011 - 01 - 12) 全文	1-21
A	EP 4174875 A1 (FRAMATOME SA) 2023年5月3日 (2023 - 05 - 03) 全文	1-21
A	WO 2009134498 A2 (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP) 2009年11月5日 (2009 - 11 - 05) 全文	1-21
A	US 5171516 A (TOSHIBA KK) 1992年12月15日 (1992 - 12 - 15) 全文	1-21
A	US 2010226468 A1 (RIO GERARD) 2010年9月9日 (2010 - 09 - 09) 全文	1-21

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/131195

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	116682585	A	2023年9月1日	无			
CN	104036837	A	2014年9月10日	无			
CN	115688358	A	2023年2月3日	无			
CN	114266157	A	2022年4月1日	无			
CN	112966428	A	2021年6月15日	无			
CN	111814343	A	2020年10月23日	无			
CN	113409975	A	2021年9月17日	无			
CN	101755308	A	2010年6月23日	WO	2009001004	A2	2008年12月31日
				WO	2009001004	A3	2009年2月19日
				RU	2009148714	A	2011年7月20日
				KR	20100030649	A	2010年3月18日
				JP	2010529448	A	2010年8月26日
				EP	2176866	A2	2010年4月21日
				US	2010226468	A1	2010年9月9日
				FR	2917228	A1	2008年12月12日
CN	114239222	A	2022年3月25日	无			
CN	101946253	A	2011年1月12日	EP	2240939	A2	2010年10月20日
				EP	2240939	A4	2012年3月21日
				JP	2011528101	A	2011年11月10日
				BR- PI	0908354	A2	2019年9月24日
				TW	200949856	A	2009年12月1日
				WO	2009134498	A2	2009年11月5日
				WO	2009134498	A3	2009年12月30日
				KR	20100115754	A	2010年10月28日
				ZA	201005627	B	2011年6月29日
EP	4174875	A1	2023年5月3日	WO	2023072937	A1	2023年5月4日
WO	2009134498	A2	2009年11月5日	无			
US	5171516	A	1992年12月15日	JPH	04142498	A	1992年5月15日
				JP	3224810	B2	2001年11月5日
US	2010226468	A1	2010年9月9日	无			