

(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
2023 年 12 月 21 日 (21.12.2023)



(10) 国际公布号
WO 2023/240902 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 30/20 (2020.01) **G06F 119/02** (2020.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2022/129720
- (22) 国际申请日: 2022 年 11 月 4 日 (04.11.2022)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202210662224.3 2022年6月13日 (13.06.2022) CN
- (71) 申请人: 中国核电工程有限公司 (CHINA NUCLEAR POWER ENGINEERING CO., LTD.) [CN/CN]; 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。
- (72) 发明人: 邢继(XING, Ji); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。张敏(ZHANG, Min); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。徐钊(XU, Zhao); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。堵树宏(DU, Shuhong); 中国北京市海淀区西三环北

路 117 号, Beijing 100840 (CN)。孙涛(SUN, Tao); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。洪郡滢(HONG, Junying); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。于方小稚(YU, Fangxiaozhi); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。苗壮(MIAO, Zhuang); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。楚济如(CHU, Jiru); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。马心童(MA, Xintong); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。马颖菲(MA, Yingfei); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。

(74) 代理人: 北京天昊联合知识产权代理有限公司(TEE&HOWE INTELLECTUAL PROPERTY ATTORNEYS); 中国北京市东城区东长安街 1 号东方广场东方经贸城西一办公楼 5 层 1, 6-12 室刘杰, Beijing 100738 (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,

(54) Title: RISK PREDICTION METHOD AND PREDICTION SYSTEM FOR NUCLEAR POWER UNIT, AND RISK ASSESSMENT SYSTEM FOR SAME

(54) 发明名称: 核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统

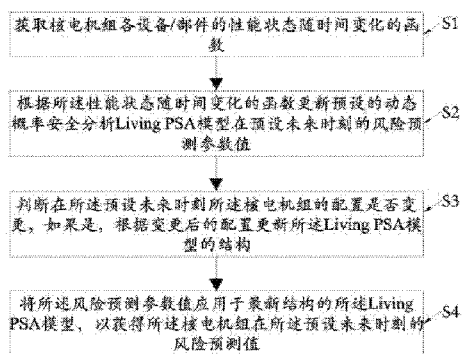


图 1

- S1 Acquire a function of the performance state of each device/part of a nuclear power unit varying along with time
- S2 According to the function of the performance state varying along with time, update a risk prediction parameter value of a preset living probability safety analysis (living PSA) model at a preset future moment
- S3 Determine whether configurations of the nuclear power unit is changed at the preset future moment, and if so, update the structure of the living PSA model according to the changed configurations
- S4 Apply the risk prediction parameter value to the living PSA model of the latest structure, so as to obtain a risk prediction value of the nuclear power unit at the preset future moment

(57) Abstract: Disclosed in the present invention are a risk prediction method and prediction system for a nuclear power unit, and a risk assessment system for same. The method comprises: acquiring a function of the performance state of each device/part of a nuclear power unit varying along with time; according to the function of the performance state varying along with time, updating a risk prediction parameter value of a preset living probability safety analysis (living PSA) model at a preset future moment; determining whether configurations of the nuclear power unit is changed at the preset future moment, and if so, updating the structure of the living PSA model according to the changed configurations; and applying the risk prediction parameter value to the living PSA model of the latest structure, so as to obtain a risk prediction value of the nuclear power unit at the preset future moment. The present invention can realize risk prediction for a nuclear power unit, and improve the accuracy of a risk prediction value of the nuclear power unit, such that a risk of the nuclear power unit at a future moment is foreseen.



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, 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: 本发明公开一种核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统, 所述方法包括: 获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间变化的函数; 根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析Living PSA模型在预设未来时刻的风险预测参数值; 判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更, 如果是, 根据变更后的配置更新所述Living PSA模型的结构; 将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述Living PSA模型, 以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值。本发明能够实现核电机组风险预测, 提高核电机组风险预测值的准确性, 提前预见未来时刻的核电机组风险。

核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统

5 本发明要求申请日为 2022 年 06 月 13 日、申请号为 CN202210662224.3、名称为“核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统”的中国专利申请的优先权。

技术领域

本发明属于核电技术领域，具体涉及一种核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统。

背景技术

10 核安全是核能发展应用的前提和基础。概率安全分析 PSA 方法是国内外广泛应用并纳入核安全法规 HAF102 要求的核安全分析方法。为监测运行阶段配置变更导致的核电机组风险变化，业界提出了 Living PSA 的概念，在机组运行阶段，根据机组实际配置状态，及时更新 PSA 模型，以进行实时的风险评估，并开发了相应的风险监测器。

20 然而，现阶段的风险监测器在进行配置风险评价时仅考虑了设备的运行状态变化，而未涉及设备在不同寿期阶段的性能水平差异，这种差异导致设备在机组运行与事故缓解过程中执行相关任务的可靠性不同，进而导致机组实际风险水平不同，这使得风险监测的准确性不足。

25 此外，现有技术仅在机组配置发生确定性变化（如设备失效）后，评估核电机组的阶跃式风险变化，而无法提前对由设备的性能状态随时间变化导致的渐进式风险进行识别和预测，这可能导致错失提前开展配置管理、避免进入高风险的最有利时机，不利于提升核电机组的安全性和可用率。

发明内容

30 本发明所要解决的技术问题是针对现有技术中存在的上述不

足，提供一种核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统，能够实现核电机组风险预测，提高核电机组风险预测值的准确性，提前预见未来时刻的核电机组风险。

本发明第一方面，提供一种核电机组风险预测方法，包括：

5 获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间变化的函数；

根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值；

判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构；

10 将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值。

优选地，所述获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间变化的函数，具体包括：

获取所述核电机组各设备/部件在当前时刻的运行参数；

15 将所述运行参数与各设备/部件的全寿期数据进行对比，获得各设备/部件当前所处的寿期阶段及性能状态随时间变化的程度；

根据所述当前所处的寿期阶段及性能状态随时间变化的程度，预测获得各设备/部件从当前时刻开始的预设未来时间段内的性能状态随时间变化的函数。

20 优选地，所述风险预测参数值，具体包括：所述 Living PSA 模型中故障树模型的基本事件概率、以及事件树模型的系统失效类始发事件频率和设备/部件失效类始发事件频率；

所述根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值，
25 具体包括：

根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q_{(t)}$ ；

利用所述基本事件概率 $Q_{(t)}$ 分析所述核电机组系统的故障树模型，以获得所述事件树模型在所述预设未来时刻的系统失效类
30 始发事件频率；

根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 。

优选地，所述性能状态随时间变化的函数，具体为设备/部件的剩余使用寿命分布函数。

5 优选地，所述根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q(t)$ ，具体为：

通过下式计算获得所述基本事件概率 $Q(t)$ ：

$$Q(t) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+T_m} \lambda(s) ds\right) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+T_m} \frac{\theta(s)}{1 - \int_0^s \theta(u) du} ds\right)$$

10 其中： t 为所述预设未来时刻； $\lambda_{(s)}$ 为所述基本事件对应的设备/部件失效率； T_m 为实现系统安全运行或缓解事故需要所述对应的设备/部件投入运行的任务时间； $\theta_{(s)}$ 和 $\theta_{(u)}$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 s 和 u 为时间变量时的表达式； s 为从 t 到 $t+T_m$ 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(s)}$ 进行积分使用的时间变量； u 为从0到 s 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(u)}$ 进行积分使用的时间变量。

15

优选地，所述根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} ，具体为：

通过下式计算获得所述设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} ：

$$20 \quad fr_{IEi} = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\theta(t)}{1 - \int_0^t \theta(s) ds} dt$$

其中： $\lambda_{(t)}$ 为所述设备/部件失效类始发事件对应的设备/部件失效率； T 为所述对应的设备/部件在某运行工况下的年平均运行时间； $\theta_{(t)}$ 和 $\theta_{(s)}$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 t 和 s 为时间变量时的表达式； t 为从0到 T 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(t)}$ 进行积分使用的时间变量； s 为从0到 t 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(s)}$ 进行积分使用的时间变量。

25

优选地，所述判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置

是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构，具体包括：

接收 DCS 系统自动监测或通过人机界面手动输入的核电机组的配置，所述配置包括所述核电机组的系统/设备在所述预设未来时刻的状态，并判断所述状态是否有变更；

如果是，更新所述 Living PSA 模型中对应的系统/设备的事件逻辑值，以得到最新结构的所述 Living PSA 模型。

优选地，所述预设未来时刻的风险预测值，具体包括以下至少之一：

所述 Living PSA 模型的事件树/故障树的最小割集、所述核电机组的风险指标、系统失效概率、系统/设备的风险重要度。

优选地，所述将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值之后，所述方法还包括：

在预设未来时间段内选取多个预设未来时刻，获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

优选地，所述获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设时间段内的风险预测结果，具体包括：

获得多个预设未来时刻的所述核电机组的预测风险指标，将所述预测风险指标与时间的关系绘制在坐标图中形成预测风险曲线，并对所述预测风险曲线进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果；和/或，

获得多个预设未来时刻的所述核电机组的关键系统/设备的预测风险重要度，根据所述预测风险重要度与时间的关系建立预测风险列表，并对所述预测风险列表进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

本发明第二方面，提供一种核电机组风险预测系统，包括：

获取模块，用于获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间

变化的函数；

第一更新模块，与所述获取模块连接，用于根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值；

5 第二更新模块，与所述第一更新模块连接，用于判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构；

10 风险预测模块，与所述第二更新模块连接，用于将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值。

优选地，所述风险预测参数值，具体包括：所述 Living PSA 模型中故障树模型的基本事件概率、以及事件树模型的系统失效类始发事件频率和设备/部件失效类始发事件频率；

所述第一更新模块，具体包括：

15 第一参数更新单元，用于根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q_{(t)}$ ；

第二参数更新单元，用于利用所述基本事件概率 $Q_{(t)}$ 分析所述核电机组系统的故障树模型，以获得所述事件树模型在所述预设未来时刻的系统失效类始发事件频率；

20 第三参数更新单元，用于根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 。

优选地，所述系统还包括：

25 结果联合模块，与所述风险预测模块连接，用于在预设未来时间段内选取多个预设未来时刻，获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

优选地，所述结果联合模块，具体包括：

30 预测风险曲线单元，用于获得多个预设未来时刻的所述核电机组的预测风险指标，将所述预测风险指标与时间的关系绘制在

坐标图中形成预测风险曲线，并对所述预测风险曲线进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果；和/或，

预测风险列表单元，用于获得多个预设未来时刻的所述核电机组的关键系统/设备的预测风险重要度，根据所述预测风险重要度与时间的关系建立预测风险列表，并对所述预测风险列表进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

本发明第三方面，提供一种核电机组风险评估系统，包括：

风险监测功能模块，用于执行根据核电机组各设备/部件在当前时刻的性能状态进行风险监测的方法；以及，

风险预测功能模块，用于执行如上所述的核电机组风险预测方法。

本发明提供的核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统，在进行核电机组风险预测时，根据核电机组设备/部件的性能状态随时间变化的函数，预测核电机组未来的渐进式风险，在现有核电机组风险评估技术的基础上，增加了对设备性能状态随时间变化的所引发的风险因素的考虑，能够基于核电机组设备性能变化准确预测核电机组未来的风险水平，能够识别关键薄弱环节，指导核电厂运维人员针对性开展配置风险管理，有利于开展核电机组风险预防工作，提升核电机组运行安全，提高核电机组的可用率，进而提高其经济性，即能够提高核电机组的安全性和经济性。

附图说明

图 1 为本发明实施例中的核电机组风险预测方法示意图；

图 2 为本发明实施例中的核电厂结构示意图；

图 3 为本发明另一实施例中的核电机组风险评估方法示意图；

图 4 为本发明再一实施例中的一种典型的剩余使用寿命分布曲线图；

图 5 为本发明再一实施例中的风险评估时间域和运行时间域

的对应关系示意图；

图 6 为本发明再一实施例中的 TFA001PO 非试验阶段的故障树模型图；

图 7 为本发明再一实施例中的 TFA001PO 试验阶段的故障树模型图；

图 8 为本发明再一实施例中的 CDF 风险曲线图；

图 9 为本发明实施例中的核电机组风险预测系统结构示意图；

图 10 为本发明实施例中核电机组风险评估系统结构示意图。

具体实施方式

下面将结合本发明中的附图，对发明中的技术方案进行清楚、完整的描述，显然，所描述的实施例是本发明的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明的范围。

在本发明的描述中，需要说明的是，术语“上”等指示方位或位置关系是基于附图所示的方位或者位置关系，仅是为了便于和简化描述，而并不是指示或者暗示所指的装置或者元件必须设有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。

在本发明的描述中，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或者暗示相对重要性。

在本发明的描述中，需要说明的是，除非另有明确的规定和限定，术语“连接”、“设置”、“安装”、“固定”等应做广义理解，例如可以是固定连接也可以是可拆卸地连接，或者一体地连接；可以是直接相连，也可以是通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域技术人员而言，可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

在本发明的描述中，所涉及的每个单元、模块可仅对应一个实体结构，也可由多个实体结构组成，或者，多个单元、模块也

可集成为一个实体结构；所涉及的单元、模块可通过软件的方式实现，也可通过硬件的方式来实现，例如单元、模块可位于处理器中。

在本发明的描述中，在不冲突的情况下，本发明的流程图和框图中所标注的功能、步骤可按照不同于附图中所标注的顺序发生。

为了便于理解本发明，首先对核电厂现有风险监测器进行说明。根据我国国家核安全局于 2019 年 12 月 31 日发布的《核电厂配置风险管理的技术政策（试行）》，核电厂营运单位对核电厂运行和维修活动进行配置风险管理，以弥补现阶段技术规格书中的运行要求，对核电厂配置组合的复杂性和多样性考虑不足的缺陷，保证核电厂安全水平得以维持甚至提高，并具体规定了以 Living PSA 方法及基于此方法的风险监测器作为配置风险管理的基本方法和工具。

Living PSA 方法的基础是 PSA 方法，PSA 方法通过事件树与故障树模型，对核电厂核电机组运行中可能产生的安全风险进行全面系统分析，评估机组的风险水平，识别风险源、发展途径以及后果，以指导核电厂设计或运行人员采取针对性地措施，排除或降低风险。

为保证风险评估的有效性，PSA 所采用的模型应该与核电机组的实际配置状态相匹配。而核电机组从设计到退役的整个寿期内，不可避免地会经历配置变更，如系统改造、设备维护等。为监测运行阶段核电机组配置变更导致的风险变化，需要根据实际配置状态及时更新 PSA 模型，进行实时的风险评估，即 Living PSA，现已开发了基于 Living PSA 的风险监测工具软件作为核电厂风险监测器。

但是，由于受限于过往监测技术水平，现有核电厂风险监测器在进行配置风险评价时仅考虑了设备的运行状态变化，如设备从“运行”变为“停运”，或进入“维修不可用”等，而未涉及设备在不同寿期阶段性能水平差异，而这种差异导致其在运行与

事故缓解过程中执行相关任务的可靠性不同，进而导致核电机组实际风险水平不同，使得风险监测的准确性不足。此外，现有技术仅在机组配置变化后进行风险评估，而无法提前对由于设备的性能状态随时间变化的导致的风险的渐进变化进行识别和预测，使得风险监测无法预见未来时刻可能发生的风险。

这为配置管理至少带来如下不利影响：

(1) 因为评估结果存在较大的不确定性，导致配置风险管理信心不足，限制了该技术在核电厂应用的范围、深度和效果；

(2) 因为忽略了设备的性能差异，可能导致对风险的低估，并使得关键风险因素无法被准确识别出来，进而存在非保守决策的风险；

(3) 因为无法预测未来风险，可能导致错失提前开展配置管理避免进入高风险的最有利时机，而一旦进入高风险状态之后可采取的管理措施也较为有限，限制了机组可用率的提升。

近年来，随着信息技术、计算机技术以及人工智能的飞速发展，工业系统及设备的先进监测、诊断和预测技术能力显著提升，使得在核电机组运行中对设备的性能水平进行实时监测和预测变得可行，为解决上述问题提供了技术基础。

实施例 1：

如图 1 所示，本发明实施例 1 提供一种核电机组风险预测方法。

具体在本实施例中，提供一种核电机组风险评估方法，应用于如图 2 所示的核电机组风险评估系统 20，该方法包括核电机组风险监测方法和如图 1 所示的核电机组风险预测方法，用于对图 2 所示的核电厂 100 中的核电机组 10 在其运行阶段进行当前风险监测与未来风险预测，并应用于开发相应的软件，即形成针对核电机组 10 的核电机组风险评估系统 20。更具体地说，该方法是基于核电机组 10 各设备性能随时间变化的关系对核电机组 10 进行风险监测与预测的方法，风险监测是对当前风险的评估，此时设备/部件性能可以测量得到；风险预测是对未来风险的评估，需要考

虑在未来时间设备/部件性能的变化，这是本发明的重点。开发的软件-核电机组风险评估系统 20 计划命名为：基于性能的风险监测与预测系统 PB-RMP (Performance-Based Risk Monitoring and Prediction)，通过在现有核电厂 100 应用的风险监测器的基础上进行改进，引入核电机组 10 各设备性能随时间变化的函数，以准确评估核电机组 10 从当前时刻至往后一段时间内的风险水平变化。通过所建议的 PB-RMP 系统的应用，可以在机组配置及设备/部件性能水平发生变化时，及时地进行风险监测和预测，提高风险评估的准确性和预见性，进而指导运维人员尽早地、针对性地开展配置风险管理，保证核电机组 10 安全经济运行，提高核电厂 100 的安全性和经济性。

另外，如图 1 所示的核电机组风险预测方法也可以单独形成如图 9 所示的核电机组风险预测系统 202，仅用于实现预测核电机组 10 未来的风险。

在一个更具体的实施例中，将以福清核电华龙机组为对象，以其功率运行工况 1 级 PSA 模型为基础，进行设定场景下的风险监测与预测，以对本发明方法的应用效果进行更详细地展示。

S1、获取核电机组 10 各设备/部件的性能状态随时间变化的函数。

具体在本实施例中，如图 3 所示，为了实现对核电机组 10 准确评估其当前时刻以及未来一段时间内的风险，首先需要针对本次风险评估涉及到的核电机组 10 设备/部件获取其性能状态随时间变化的函数，在此仅考虑设备性能随时间退化的情况，因此分别执行步骤 S100：获取性能退化函数，以性能退化函数作为后续 Living PSA 模型参数更新的输入。本发明的风险评估是在机组运行的全过程中连续动态实施的，由于通常设备/部件运行时间越长，性能越差，相应的风险增加，在进行风险评估时考虑了设备/部件性能随时间退化的影响，可以获得随时间逐渐增大的渐进式风险评估结果，能够更加准确地监测当前风险以及预测未来风险。

在一个可选的实施例中，所述获取核电机组 10 各设备/部件

的性能状态随时间变化的函数，具体包括：

获取所述核电机组 10 各设备/部件在当前时刻的运行参数；

将所述运行参数与各设备/部件的全寿期数据进行对比，获得各设备/部件当前所处的寿期阶段及性能状态；

5 根据所述当前所处的寿期阶段及性能状态，预测获得各设备/部件从当前时刻开始的预设未来时间段内的性能状态随时间变化的函数。

10 具体在本实施例中，如图 3 所示，为了获得核电机组 10 各设备/部件的性能退化函数，首先在核电机组 10 必要的设备/部件上设置传感器，由传感器执行步骤 S101：测量运行参数，并将实时获得的运行参数发送给核电机组风险评估系统 20，核电机组风险评估系统 20 接收到相应设备/部件的运行参数后，执行步骤 S102：评估性能，具体可以是根据该设备/部件出厂厂家给定的或核电厂 100 根据自身经验总结的全寿期数据，对比确定运行参数所反应的
15 该设备/部件当前所处的寿期阶段及性能状态，然后根据当前所处的寿期阶段及性能状态，获得该设备/部件从当前时刻开始的预设未来时间段内的性能退化函数。

20 由于预测设备/部件未来性能状态随时间变化涉及设备故障诊断的专门技术领域，工业界已经研究并开发了多种模型方法进行设备性能的监测与预测，实施中可根据具体的设备对象选择适用的模型方法，通过借鉴其它技术领域的设备性能监测与预测方法应用到本领域中，即可实现获取核电机组 10 各设备/部件的性能状态随时间变化的函数，本发明并不需要限定获得性能状态随时间变化的函数的具体方法。

25 在一个可选的实施例中，所述性能状态随时间变化的函数，具体为设备/部件的剩余使用寿命分布函数。

30 具体在本实施例中，如图 3 所示，预测获得设备/部件从当前时刻开始的预设未来时间段内的性能退化函数，具体通过执行步骤 S103：预测剩余使用寿命（RUL，Residual Service Life）来实现。RUL 的描述方式可以有多种，且可互相转化，图 4 展示了一

种典型的剩余使用寿命分布曲线，其中横轴为时间 t ，纵轴为采用可靠性表示的剩余使用寿命分布函数预测值 $\theta(t)$ 。

5 在一个更具体的实施例中，针对福清核电华龙机组，首先设定评估当前时刻至未来 150 小时的预设时间段内核电机组 10 的风险。在此过程中，为了保证设备的可靠性，根据核电厂 100 技术规范的要求，需要定期对辅助给水电泵 TFA001PO 进行试验，假定根据生产计划，将于第 30 小时至第 50 小时对辅助给水电泵 TFA001PO 进行试验。同时，考虑设备冷却水泵 WCC001PO 和上充泵 RCV001PO 在预设时间段内的性能退化。由于基础可靠性数据库升版和更新属于机组换料停堆期间 Living PSA 模型维护的工作内容，运行阶段的风险监测和预测不涉及此类变更，故本例中也不考虑。假设 WCC001PO 和 RCV001PO 服从相同的退化规律，这不影响对本发明实施方式的论述，根据现有公开数据对 WCC001PO 和 RCV001PO 开展剩余使用寿命预测，剩余使用寿命分布采用设备在预设未来时刻单位时间内发生故障的概率描述，其结果见表 1 的第 1 列和第 2 列，该结果在本发明中仅作为风险评估的输入，根据设备故障诊断技术选择适用的模型即可获得，故在此不对预测过程展开论述。

20 S2、根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在所述预设未来时刻的风险预测参数值。

其中，所述预设未来时刻具体可以为预设未来时间段内的任一预设未来时刻，也即某一拟评估风险时刻 t 。

25 具体在本实施例中，如图 3 所示，在获得性能退化函数后，核电机组风险评估系统 20 执行步骤 S200：更新 Living PSA 模型参数。这是本发明的核心关键功能，现有技术仅考虑了当前时刻设备/部件的性能，而没有考虑随着时间的推移，性能逐步下降带来的影响，其对未来风险的预测依然是基于当前性能获得的，这就导致了其对风险的估计是低于实际水平的。

30 在一个更具体的实施例中，现有方法的预测结果的一种典型

示例展示在图 8 中，从图中可以看出，现有方法所示的曲线仅考虑了配置变更时核电机组 10 的阶跃风险，而无法得到本发明建议方法所示的渐进风险。为了获得图 8 中建议方法所示的渐进风险，本发明需要根据性能状态随时间变化的函数获得随时间变化的 Living PSA 模型风险预测参数值，即，根据每个得到的性能状态随时间变化的函数，更新对应设备/部件在预设未来时间段内需要预测风险的时刻的风险预测参数值，风险预测时刻是由评估人员根据预测需要设置的预设未来时间段内若干个时间点，每个风险预测参数值将反应对应设备/部件的风险随时间变化的特点。

在一个可选的实施例中，所述风险预测参数值，具体包括：所述 Living PSA 模型中故障树模型的基本事件概率、以及事件树模型的系统失效类始发事件频率和设备/部件失效类始发事件频率；

所述根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在所述预设未来时刻的风险预测参数值，具体包括：

根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q_{(t)}$ ；

利用所述基本事件概率 $Q_{(t)}$ 分析所述核电机组系统的故障树模型，以获得所述事件树模型在所述预设未来时刻的系统失效类始发事件频率；

根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 。

具体在本实施例中，如图 3 所示，使用 Living PSA 模型进行定量分析的参数，主要包括故障树模型的基本事件概率和事件树模型的始发事件频率，因此，Living PSA 模型参数更新主要包括步骤 S201：更新故障树基本事件概率和 S202：更新事件树始发事件频率。根据触发始发事件的对象不同，始发事件又可分为两类：设备/部件失效类，如管道破裂类事故；系统失效类，如热阱丧失事故。其中，系统失效类始发事件的频率，需利用故障树等系统分析方法计算得到，这是 PSA 模型已知的方法，本发明只是在利

用故障树分析得到系统失效类始发事件的频率时,采用的基本事件概率 $Q_{(t)}$ 考虑了设备/部件的性能状态随时间变化带来的影响。

在一个可选的实施例中,所述根据所述性能状态随时间变化的函数,获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q_{(t)}$,具体为:

通过下式计算获得所述基本事件概率 $Q_{(t)}$:

$$Q(t) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+T_m} \lambda(s) ds\right) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+T_m} \frac{\theta(s)}{1 - \int_0^s \theta(u) du} ds\right)$$

其中: t 为所述预设未来时刻; $\lambda_{(s)}$ 为所述基本事件对应的设备/部件失效率; T_m 为实现系统安全运行或缓解事故需要所述对应的设备/部件投入运行的任务时间; $\theta_{(s)}$ 和 $\theta_{(u)}$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 s 和 u 为时间变量时的表达式; s 为从 t 到 $t+T_m$ 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(s)}$ 进行积分使用的时间变量; u 为从0到 s 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(u)}$ 进行积分使用的时间变量。

在一个可选的实施例中,所述根据所述性能状态随时间变化的函数,获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} ,具体为:

通过下式计算获得所述设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} :

$$fr_{IEi} = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\theta(t)}{1 - \int_0^t \theta(s) ds} dt$$

其中: $\lambda_{(t)}$ 为所述设备/部件失效类始发事件对应的设备/部件失效率; T 为所述对应的设备/部件在某运行工况下的年平均运行时间; $\theta_{(t)}$ 和 $\theta_{(s)}$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 t 和 s 为时间变量时的表达式; t 为从0到 T 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(t)}$ 进行积分使用的时间变量; s 为从0到 t 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta_{(s)}$ 进行积分使用的时间变量。

具体在本实施例中,图5中实线为风险评估的时间,以当前时刻为0点,监测当前时刻和预测未来时刻的核电机组10的风险;

虚线表示设备/部件运行时间域，以其上一次完成检修并投入运行的时刻为 0_1 为零点；实线表示对核电机组 10 进行风险评估的评估时间域， 0_2 为风险评估的零点，也即为当前时刻；显然，设备/部件运行的零点早于风险评估的零点，因为风险评估是在机组运行的全过程中连续动态实施的，而设备/部件可能是机组启动的时候就投入运行了，这段累积运行的影响会体现在性能变化上，也即从上一次完成检修到当前时刻的累积运行时间 T_0 会影响 RUL 分布函数 $\theta(t)$ ，进而影响基本事件概率 $Q(t)$ 和始发事件频率 fr_{IEi} 。图中， t 为拟评估风险的时刻，可以为预设未来时间段内的任一预设未来时刻， $t = 0$ 为监测当前时刻的瞬时风险，也即进行风险监测， $t > 0$ 为预测未来时刻的瞬时风险，也即风险预测。 T_m 为实现核电机组 10 安全运行或缓解事故，需要设备/部件投入运行的任务时间。对于设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 通过对该设备/部件在某运行工况下的年平均运行时间进行积分获得，这是因为基于 PSA 的风险评估需针对不同的运行工况分别建模计算，最后基于不同工况持续时间所占的份额进行加权得到核电机组 10 的年度风险水平。

在一个更具体的实施例中，对于 Living PSA 模型参数更新，首先需分析其影响的范围，即是否对事件树的始发事件及故障树的基本事件产生影响。由于始发事件是核电厂经过系统分析得出的一个具体的事故清单，本例中假设的变更不会导致该清单中的事故发生或发生频率变化，此处只影响故障树的基本事件对应该设备的故障概率，因此需在 0-150 小时内，对故障树的基本事件概率进行监测和预测。根据基本事件概率 $Q(t)$ 的计算公式，可计算得到退化设备 WCC001PO 和 RCV001PO 所对应的模型事件在未来 150 小时内的发生概率，即设备执行缓解事故任务失败的概率，其计算结果见表 1 的第 3 列。本示例仅用于展示本发明的技术方法和效果，故对计算进行了简化，即假设 WCC001PO 和 RCV001PO 服从相同的退化规律，因此，得到的 RUL 分布和 Living PSA 模型参数规律均相同。

表 1: RUL 分布和 Living PSA 模型参数预测结果

RUL 分布		Living PSA 模型参数
t (h)	概率	
0	1.00E-04	2.40E-03
10	2.60E-03	6.06E-02
20	5.00E-03	1.16E-01
30	7.20E-03	1.71E-01
40	9.00E-03	2.24E-01
50	1.00E-02	2.70E-01
60	1.04E-02	3.15E-01
70	1.00E-02	3.50E-01
80	8.80E-03	3.70E-01
90	7.30E-03	3.78E-01
100	6.00E-03	3.85E-01
110	4.80E-03	3.86E-01
120	4.40E-03	4.30E-01
130	5.00E-03	5.65E-01
140	6.20E-03	7.95E-01
150	7.50E-03	9.96E-01

S3、判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构。

5 具体在本实施例中，如图 3 所示，步骤 S300：更新 Living PSA 模型结构具备一个启动条件，即步骤 S303：判断机组配置是否变更，机组配置变更包括如设备失效、运行/备用列切换等情况，若发生机组配置变更，则需要对 Living PSA 模型结构进行更新，之后再进入后续风险评估步骤，反之，则不需要进行 Living PSA 模型结构更新，直接进入后续风险评估步骤。

10 在一个可选的实施例中，所述判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构，具体包括：

接收 DCS 系统自动监测或通过人机界面手动输入的核电机组

的配置，所述配置包括所述核电机组的系统/设备在所述预设未来时刻的状态，并判断所述状态是否有变更；

如果是，更新所述 Living PSA 模型中对应的系统/设备的事件逻辑值，以得到最新结构的所述 Living PSA 模型。

5 具体在本实施例中，如图 3 所示，机组配置变更的判断依据包括：步骤 S301：DCS 系统监测，或者 S302：人机界面输入，依据为 DCS 系统自动监测到的或用户通过人机界面手动输入的系统/设备状态判断机组配置在风险时刻 t 是否发生了变更，如果发生了变更，则根据在拟评估风险时刻 t 发生变更的系统/设备的状态，在
10 拟评估风险时刻 t 更新所述 Living PSA 模型中对应的系统/设备的事件逻辑值。

 在一个更具体的实施例中，如图 6 和 7 所示，TFA001PO 试验阶段的 Living PSA 模型结构变更，红框标记的为变更对象，在 TFA001PO 非试验阶段和试验阶段，该事件的逻辑值分别为
15 “Normal”和“True”，分别表示该事件“存在一定概率不可用”和“确定不可用”，该“一定概率”受设备性能的影响。在本例中，因为其他设备都没有发生状态或性能变化，所以都不变，其他部分的逻辑值根据对应设备的状态决定，如果设备在运行，就是“Normal”，如果设备已经失效，就是“True”，这些是当前
20 已有的 PSA 技术已经固化了的规则。因此，对于 Living PSA 模型结构更新，仅在第 30-50 小时内 TFA001PO 试验不可用时需要考虑，更新方法为：在模型中将 TFA001PO 对应的故障事件逻辑值变更为“True”，即该事件的发生概率被设置为 1，该设备确定不可用，相应的，核电机组 10 的整体风险水平会上升。

25 S4、将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值。

 在一个可选的实施例中，所述预设未来时刻的风险预测值，具体包括以下至少之一：

30 所述 Living PSA 模型的事件树/故障树的最小割集、所述核电

机组的风险指标、系统失效概率、系统/设备的风险重要度。

具体在本实施例中，如图 3 所示，Living PSA 模型的模型及参数更新后，执行步骤 S400：Living PSA 模型评估风险。此部分只是输入模型的参数改变了，其可计算分析得到的结果项与现有风险监测器是一样的，包括：事件树/故障树的最小割集求解、核电机组 100 风险指标计算、系统失效概率预测、系统/设备的风险重要度分析等，其中核电机组 100 风险指标包括：堆芯损毁频率 CDF、放射性释放频率 LERF 等。

在一个可选的实施例中，所述将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值之后，所述方法还包括：

在预设未来时间段内选取多个预设未来时刻，获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

具体在本实施例中，如图 3 所示，在完成对预设时间段内的风险评估后，执行步骤 S500：输出风险信息，以供核电厂 100 维护人员根据风险分析结果对核电机组 10 进行配置风险管理。为了便于维护人员观察风险分析结果，风险信息输出显示时对分析计算所得结果进行二次加工并可视化，具体包括：机组风险信息可视化，如风险曲线、风险重要系统/设备列表等；配置风险管理指标计算和显示：如累积风险增量、允许配置时间等；提供风险信息查询、风险报告打印等人机交互功能；这些功能也是现有风险监测器可以实现的，本发明只是得到的结果所反应的风险大小和趋势与其不同。

在一个可选的实施例中，所述获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果，具体包括：

获得多个预设未来时刻的所述核电机组的预测风险指标，将所述预测风险指标与时间的关系绘制在坐标图中形成预测风险曲线，并对所述预测风险曲线进行可视化显示，以作为所述核电机

组在所述预设未来时间段内的风险预测结果；和/或，

获得多个预设未来时刻的所述核电机组的关键系统/设备的预测风险重要度，根据所述预测风险重要度与时间的关系建立预测风险列表，并对所述预测风险列表进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

在一个更具体的实施例中，由于当前尚未有可实施本发明所述方法的软件工具，因此以业内广泛应用的 PSA 建模与分析软件 Risk Spectrum 为分析计算工具，通过手动多次更改模型参数进行多点计算，在每个拟评估风险时刻 t 的 Living PSA 模型更新完毕后，利用 Risk Spectrum 软件，进行风险分析计算，最终得到的结果包括：

如图 8 所示 CDF 风险曲线，由图可知，在本发明所建议方法中，随着设备的老化，机组的瞬时风险连续上升，在第 30 小时，由于 TFA001PO 试验不可用，机组风险阶跃上升，而在第 50 小时，其试验结束，恢复至初始状态，机组风险阶跃下降，但由于设备性能持续退化，机组的风险水平高于试验前的风险水平。与之对比，现有方法中，则仅能考虑试验不可用发生时的阶跃风险变化，而未包含对设备老化的考虑，这导致机组风险评估结果偏乐观，且不能提前预测机组的高风险状态；以及，

如表 2 所示 WCC001PO 和 RCV001PO 故障事件的 FV 重要度 (Fussel-Vesely Importance)，由表可知，由于设备的性能变化，相关故障事件的重要度也随之变化；虽然二者退化规律相同，但 RCV001PO 故障的重要度随着性能退化迅速增长，明显高于 WCC001PO 的重要度，这是因为 RCV 系统的冗余度较低，因此，虽然二者都接近于失效，但在维修计划制定中应优先考虑对 RCV001PO 的维修，可见，即使假设设备性能退化规律完全相同，其对风险和风险管理措施的影响也不相同。

表 2 FV 重要度排序

时间(t/h)	0	10	20	30	40	50	60	70
RCV001PO 运行失效	113	16	11	8	7	6	5	5

WCC001PO 运行失效	486	124	103	90	76	73	69	68
时间(t/h)	80	90	100	110	120	130	140	150
RCV001PO 运行失效	4	4	4	4	3	3	3	3
WCC001PO 运行失效	66	66	66	66	63	56	44	44

基于以上结果分析表明，本发明所提出的系统方案具有可行性，与现有方案相比，其具有以下优势：（1）在风险评估中考虑了设备性能变化对风险的影响，提供更真实的风险评估结果；（2）可评估设备重要度随其性能退化而产生的变化，从机组层面提出设备维护的优先级建议，使得运维管理更具有针对性，资源调配更优化；（3）通过对设备故障和潜在高风险的提前预测，可避免突发故障导致非计划停堆，并为运维管理争取更长的时间窗口。

实施例 2：

如图 9 所示，本发明实施例 2 提供一种核电机组风险预测系统 202，所述系统包括：

获取模块 1，用于获取核电机组 10 各设备/部件的性能状态随时间变化的函数；

第一更新模块 2，与所述获取模块 1 连接，用于根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值；

第二更新模块 3，与所述第一更新模块 2 连接，用于判断在所述预设未来时刻所述核电机组 10 的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构；

风险预测模块 4，与所述第二更新模块 3 连接，用于将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组 10 在所述预设未来时刻的风险预测值。

在一个可选的实施例中，所述获取模块 1，具体包括：

获取单元，用于获取所述核电机组 10 各设备/部件在当前时刻的运行参数；

评估单元，与所述获取单元连接，用于将所述运行参数与各

设备/部件的全寿期数据进行对比, 获得各设备/部件当前所处的寿期阶段及性能状态;

预测单元, 与所述评估单元连接, 用于根据所述当前所处的寿期阶段及性能状态, 预测获得各设备/部件从当前时刻开始的预设未来时间段内的性能状态随时间变化的函数。

在一个可选的实施例中, 所述风险预测参数值, 具体包括: 所述 Living PSA 模型中故障树模型的基本事件概率、以及事件树模型的系统失效类始发事件频率和设备/部件失效类始发事件频率;

所述第一更新模块 2, 具体包括:

第一参数更新单元, 用于根据所述性能状态随时间变化的函数, 获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q(t)$;

第二参数更新单元, 与所述第一参数单元连接, 用于利用所述基本事件概率 $Q(t)$ 分析所述核电机组系统的故障树模型, 以获得所述事件树模型在所述预设未来时刻的系统失效类始发事件频率;

第三参数更新单元, 用于根据所述性能状态随时间变化的函数, 获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 。

在一个可选的实施例中, 所述性能状态随时间变化的函数, 具体为设备/部件的剩余使用寿命分布函数。

在一个可选的实施例中, 所述第一参数更新单元, 具体用于: 通过下式计算获得所述基本事件概率 $Q(t)$:

$$Q(t) = 1 - \exp \left(- \int_t^{t+T_m} \lambda(s) ds \right) = 1 - \exp \left(- \int_t^{t+T_m} \frac{\theta(s)}{1 - \int_0^s \theta(u) du} ds \right)$$

其中: t 为所述预设未来时刻; $\lambda(s)$ 为所述基本事件对应的设备/部件失效率; T_m 为实现系统安全运行或缓解事故需要所述对应的设备/部件投入运行的任务时间; $\theta(s)$ 和 $\theta(u)$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 s 和 u 为时间变量时的表达式; s 为从 t 到 $t + T_m$ 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(s)$ 进行积分使用的时间变量; u 为从 0 到 s 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(u)$ 进行积分使用的时间变量。

在一个可选的实施例中,所述第三参数更新单元,具体用于:
通过下式计算获得所述设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} :

$$fr_{IEi} = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\theta(t)}{1 - \int_0^t \theta(s) ds} dt$$

其中: $\lambda(t)$ 为所述设备/部件失效类始发事件对应的设备/部件失效率; T 为所述对应的设备/部件在某运行工况下的年平均运行时间; $\theta(t)$ 和 $\theta(s)$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 t 和 s 为时间变量时的表达式; t 为从0到 T 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(t)$ 进行积分使用的时间变量; s 为从0到 t 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(t)$ 进行积分使用的时间变量。

在一个可选的实施例中,所述第二更新模块,具体包括:

接收单元,用于接收DCS系统自动监测或通过人机界面手动输入的核电机组10的配置,所述配置包括所述核电机组10的系统/设备在所述预设未来时刻的状态,并判断所述状态是否有变更;

更新单元,与所述接收单元连接,用于如果判断出所述状态有变更,更新所述Living PSA模型中对应的系统/设备的事件逻辑值,以得到最新结构的所述Living PSA模型。

在一个可选的实施例中,所述预设未来时刻的风险预测值,具体包括以下至少之一:

所述Living PSA模型的事件树/故障树的最小割集、所述核电机组10的风险指标、系统失效概率、系统/设备的风险重要度。

在一个可选的实施例中,所述系统还包括:

结果联合模块,与所述风险预测模块4连接,用于在预设未来时间段内选取多个预设未来时刻,获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合,以获得所述核电机组10在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

在一个可选的实施例中,所述结果联合模块,具体包括:

预测风险曲线单元,用于获得多个预设未来时刻的所述核电机组10的预测风险指标,将所述预测风险指标与时间的关系绘制在坐标图中形成预测风险曲线,并对所述预测风险曲线进行可视

化显示,以作为所述核电机组 10 在所述预设未来时间段内的风险预测结果;和/或,

预测风险列表单元,用于获得多个预设未来时刻的所述核电机组 10 的关键系统/设备的预测风险重要度,根据所述预测风险重要度与时间的关系建立预测风险列表,并对所述预测风险列表进行可视化显示,以作为所述核电机组 10 在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

实施例 3:

如图 10 所示,本发明实施例 3 提供一种核电机组风险评估系统 20,设置于如图 2 所示的核电厂 100 内,包括:

风险监测功能模块 21,用于执行根据核电机组 10 各设备/部件在当前时刻的性能状态进行风险监测的方法;以及,

风险预测功能模块 22,用于执行如实施例 1 所述的核电机组风险预测方法。

具体而言,在本实施例中,核电机组风险评估系统 20 可实现包括当前风险监测和未来风险预测的核电机组 10 风险评估功能,风险监测功能模块 21 的当前风险监测功能可采用与核电厂 100 内现有风险监测器相同的方法实现,风险预测功能模块 22 的未来风险预测功能具体通过在核电机组 10 的相关设备/部件上设置传感器以采集设备/部件的运行参数,核电机组风险评估系统 20 接收传感器数据,根据接收到的传感器数据获取设备/部件的性能状态随时间变化的函数,根据性能状态随时间变化的函数实现对核电机组 10 的风险评估。风险监测功能模块 21 和风险预测功能模块 22 具有相似性的部分功能可以通过计算机程序中相同的程序片段实现,这些程序片段可以被调用以实现风险监测功能模块 21 或风险预测功能模块 22 的功能,并不需要严格区分。

本发明实施例 1-3 提供的核电机组风险预测方法、预测系统及评估系统,在进行核电机组风险预测时,根据核电机组设备/部

件的性能状态随时间变化的函数，预测核电机组未来的渐进式风险，在现有核电机组风险监测技术的基础上，增加了对设备性能状态随时间变化的所引发的风险因素的考虑，能够基于核电机组设备性能变化准确预测核电机组未来的风险水平，提高了核电机组风险评估的准确性和预见性，能够识别关键薄弱环节，指导核电厂运维人员针对性开展配置风险管理，有利于开展核电机组风险预防工作，提升核电机组运行安全，提高核电机组的可用率，进而提高其经济性，即能够提高核电机组安全性和经济性。

本发明实施例 1-3 建议基于设备的真实性能水平对核电机组运行风险进行实时监测和预测，并具体给出了该系统的总体架构和关键功能模块解决方案。与当前核电厂采用的风险监测系统相比，本发明所建议的系统工具可实现对设备性能状态随时间变化的这一风险影响因素的考虑，体现了不同机组、不同设备寿期阶段的差异，实现更准确的风险及其关键贡献项的监测和预测。通过本系统在核电厂的应用，预期可达到以下效果：

提升运行安全性：提供更真实的风险指标，预测并直观显示机组风险水平和重要风险因素的变化情况，帮助运维人员随时了解机组风险水平及发展趋势，针对性的采取管理措施，避免进入高风险状态，加强纵深防御，维持足够的安全裕度，提升运行安全性；

提升运行经济性：提前预知潜在机组高风险，指导运维人员尽早制定响应措施并实施准备工作，减少非计划停机，并缩短停机维修时间，提高机组可用率和经济性。

可以理解的是，以上实施方式仅仅是为了说明本发明的原理而采用的示例性实施方式，然而本发明并不局限于此。对于本领域内的普通技术人员而言，在不脱离本发明的精神和实质的情况下，可以做出各种变型和改进，这些变型和改进也视为本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1.一种核电机组风险预测方法，其特征在于，包括：

获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间变化的函数；

根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值；

判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构；

将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值。

2.根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间变化的函数，具体包括：

获取所述核电机组各设备/部件在当前时刻的运行参数；

将所述运行参数与各设备/部件的全寿期数据进行对比，获得各设备/部件当前时刻的寿期阶段及性能状态；

根据所述当前时刻的寿期阶段及性能状态，预测获得各设备/部件从当前时刻开始的预设未来时间段内的性能状态随时间变化的函数。

3.根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述风险预测参数值，具体包括：所述 Living PSA 模型中故障树模型的基本事件概率、以及事件树模型的系统失效类始发事件频率和设备/部件失效类始发事件频率；

所述根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值，具体包括：

根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q_{(t)}$ ；

利用所述基本事件概率 $Q_{(t)}$ 分析所述核电机组系统的故障树模型，以获得所述事件树模型在所述预设未来时刻的系统失效类

始发事件频率；

根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 。

4.根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述性能状态随时间变化的函数，具体为设备/部件的剩余使用寿命分布函数。

5.根据权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q(t)$ ，具体为：

通过下式计算获得所述基本事件概率 $Q(t)$ ：

$$Q(t) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+T_m} \lambda(s) ds\right) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+T_m} \frac{\theta(s)}{1 - \int_0^s \theta(u) du} ds\right)$$

其中： t 为所述预设未来时刻； $\lambda(s)$ 为所述基本事件对应的设备/部件失效率； T_m 为实现系统安全运行或缓解事故需要所述对应的设备/部件投入运行的任务时间； $\theta(s)$ 和 $\theta(u)$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 s 和 u 为时间变量时的表达式； s 为从 t 到 $t+T_m$ 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(s)$ 进行积分使用的时间变量； u 为从0到 s 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(u)$ 进行积分使用的时间变量。

6.根据权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述根据所述性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} ，具体为：

通过下式计算获得所述设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} ：

$$fr_{IEi} = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\theta(t)}{1 - \int_0^t \theta(s) ds} dt$$

其中： $\lambda(t)$ 为所述设备/部件失效类始发事件对应的设备/部件失效率； T 为所述对应的设备/部件在某运行工况下的年平均运行时间； $\theta(t)$ 和 $\theta(s)$ 分别为所述对应的设备/部件的剩余使用寿命分布函数以 t 和 s 为时间变量时的表达式； t 为从0到 T 时刻对所述剩余使

用寿命分布函数 $\theta(t)$ 进行积分使用的时间变量； s 为从0到 t 时刻对所述剩余使用寿命分布函数 $\theta(t)$ 进行积分使用的时间变量。

7.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述Living PSA模型的结构，具体包括：

接收DCS系统自动监测或通过人机界面手动输入的核电机组的配置，所述配置包括所述核电机组的系统/设备在所述预设未来时刻的状态，并判断所述状态是否有变更；

如果是，更新所述Living PSA模型中对应的系统/设备的事件逻辑值，以得到最新结构的所述Living PSA模型。

8.根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述预设未来时刻的风险预测值，具体包括以下至少之一：

所述Living PSA模型的事件树/故障树的最小割集、所述核电机组的风险指标、系统失效概率、系统/设备的风险重要度。

9.根据权利要求1-8任意一项所述的方法，其特征在于，所述将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述Living PSA模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值之后，所述方法还包括：

在预设未来时间段内选取多个预设未来时刻，获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

10.根据权利要求9所述的方法，其特征在于，所述获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果，具体包括：

获得多个预设未来时刻的所述核电机组的预测风险指标，将所述预测风险指标与时间的关系绘制在坐标图中形成预测风险曲线，并对所述预测风险曲线进行可视化显示，以作为所述核电机

组在所述预设未来时间段内的风险预测结果；和/或，

获得多个预设未来时刻的所述核电机组的关键系统/设备的预测风险重要度，根据所述预测风险重要度与时间的关系建立预测风险列表，并对所述预测风险列表进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

11.一种核电机组风险预测系统，其特征在于，包括：

获取模块，用于获取核电机组各设备/部件的性能状态随时间变化的函数；

第一更新模块，与所述获取模块连接，用于根据所述性能状态随时间变化的函数更新预设的动态概率安全分析 Living PSA 模型在预设未来时刻的风险预测参数值；

第二更新模块，与所述第一更新模块连接，用于判断在所述预设未来时刻所述核电机组的配置是否变更，如果是，根据变更后的配置更新所述 Living PSA 模型的结构；

风险预测模块，与所述第二更新模块连接，用于将所述风险预测参数值应用于最新结构的所述 Living PSA 模型，以获得所述核电机组在所述预设未来时刻的风险预测值。

12.根据权利要求 11 所述的系统，其特征在于，所述风险预测参数值，具体包括：所述 Living PSA 模型中故障树模型的基本事件概率、以及事件树模型的系统失效类始发事件频率和设备/部件失效类始发事件频率；

所述第一更新模块，具体包括：

第一参数更新单元，用于根据所述核电机组设备/部件的所述性能状态随时间变化的函数，获取所述故障树模型在所述预设未来时刻的基本事件概率 $Q_{(t)}$ ；

第二参数更新单元，用于利用所述基本事件概率 $Q_{(t)}$ 分析所述核电机组系统的故障树模型，以获得所述事件树模型在所述预设未来时刻的系统失效类始发事件频率；

第三参数更新单元，用于根据所述核电机组设备/部件的所述

性能状态随时间变化的函数，获取所述事件树模型在所述预设未来时刻的设备/部件失效类始发事件频率 fr_{IEi} 。

13.根据权利要求 11 所述的系统，其特征在于，所述系统还包括：

结果联合模块，与所述风险预测模块连接，用于在预设未来时间段内选取多个预设未来时刻，获得多个预设未来时刻的所述风险预测值并进行联合，以获得所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

14.根据权利要求 13 所述的系统，其特征在于，所述结果联合模块，具体包括：

预测风险曲线单元，用于获得多个预设未来时刻的所述核电机组的预测风险指标，将所述预测风险指标与时间的关系绘制在坐标图中形成预测风险曲线，并对所述预测风险曲线进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果；和/或，

预测风险列表单元，用于获得多个预设未来时刻的所述核电机组的关键系统/设备的预测风险重要度，根据所述预测风险重要度与时间的关系建立预测风险列表，并对所述预测风险列表进行可视化显示，以作为所述核电机组在所述预设未来时间段内的风险预测结果。

15.一种核电机组风险评估系统，其特征在于，包括：

风险监测功能模块，用于执行根据核电机组各设备/部件在当前时刻的性能状态进行风险监测的方法；以及，

风险预测功能模块，用于执行如权利要求 1-10 任意一项所述的核电机组风险预测方法。

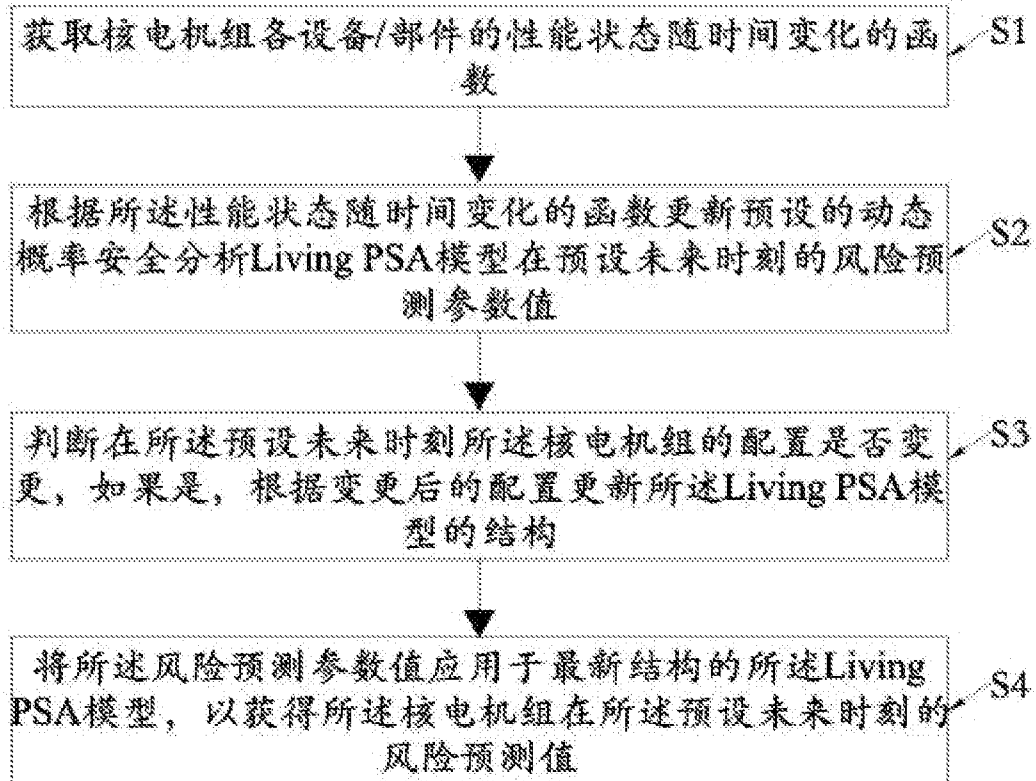


图 1

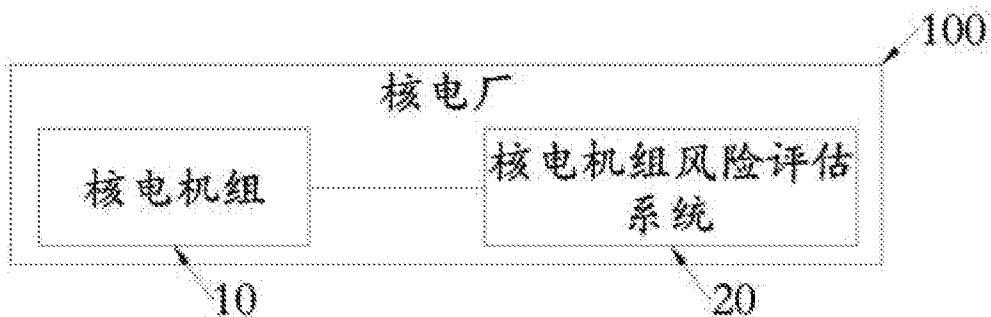


图 2

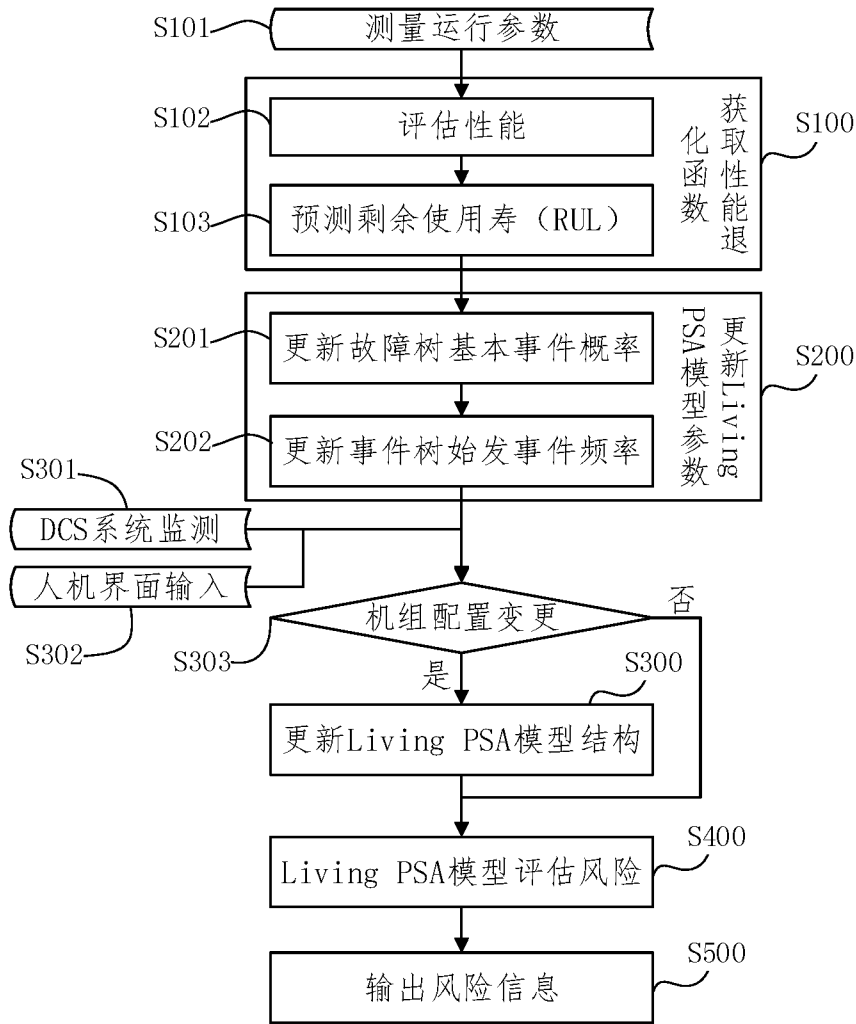


图 3

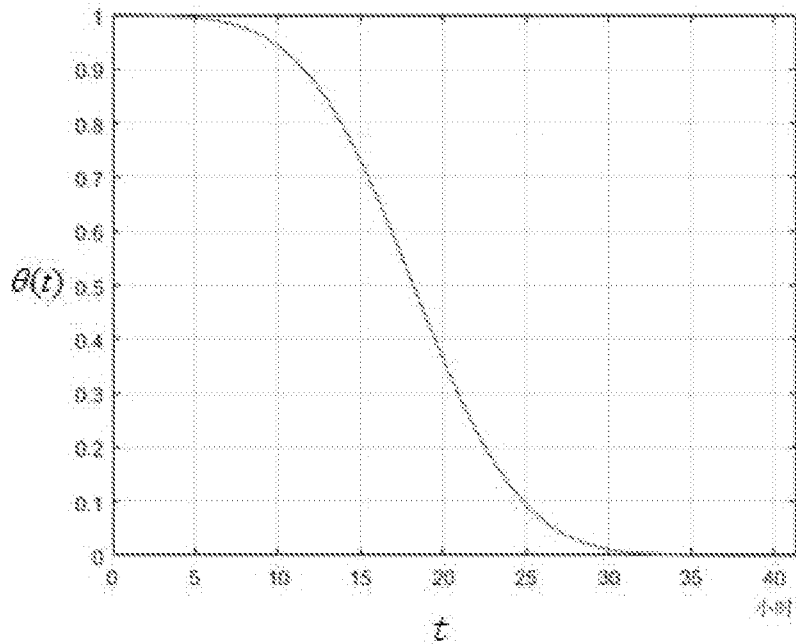


图 4

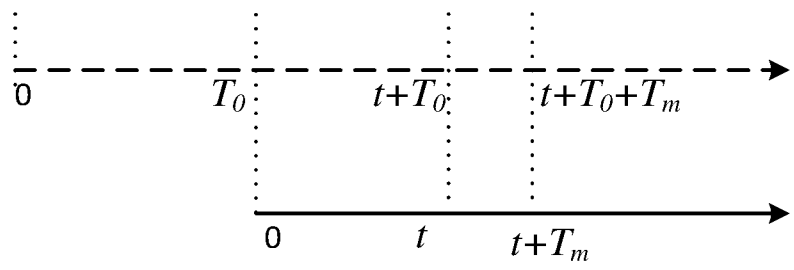


图 5

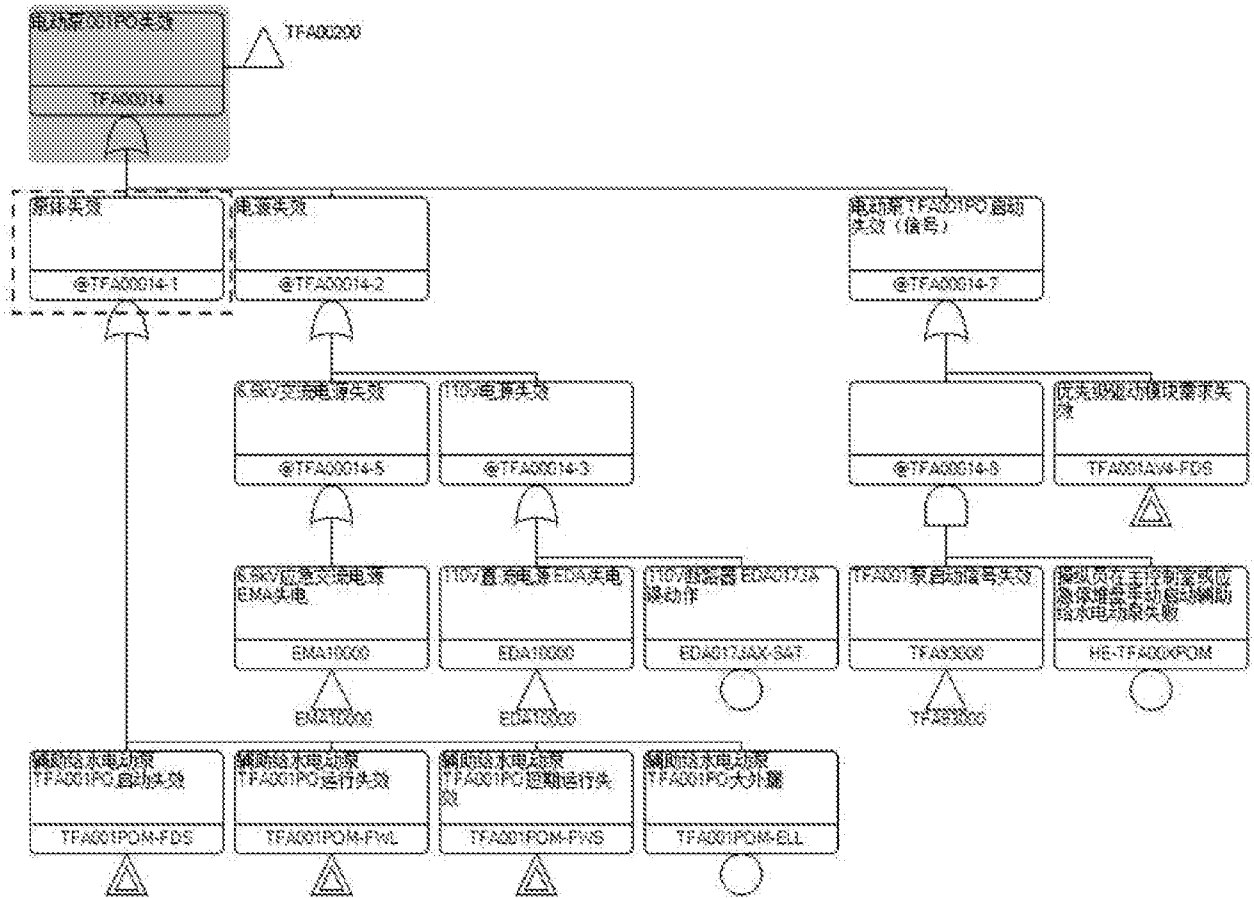


图 6

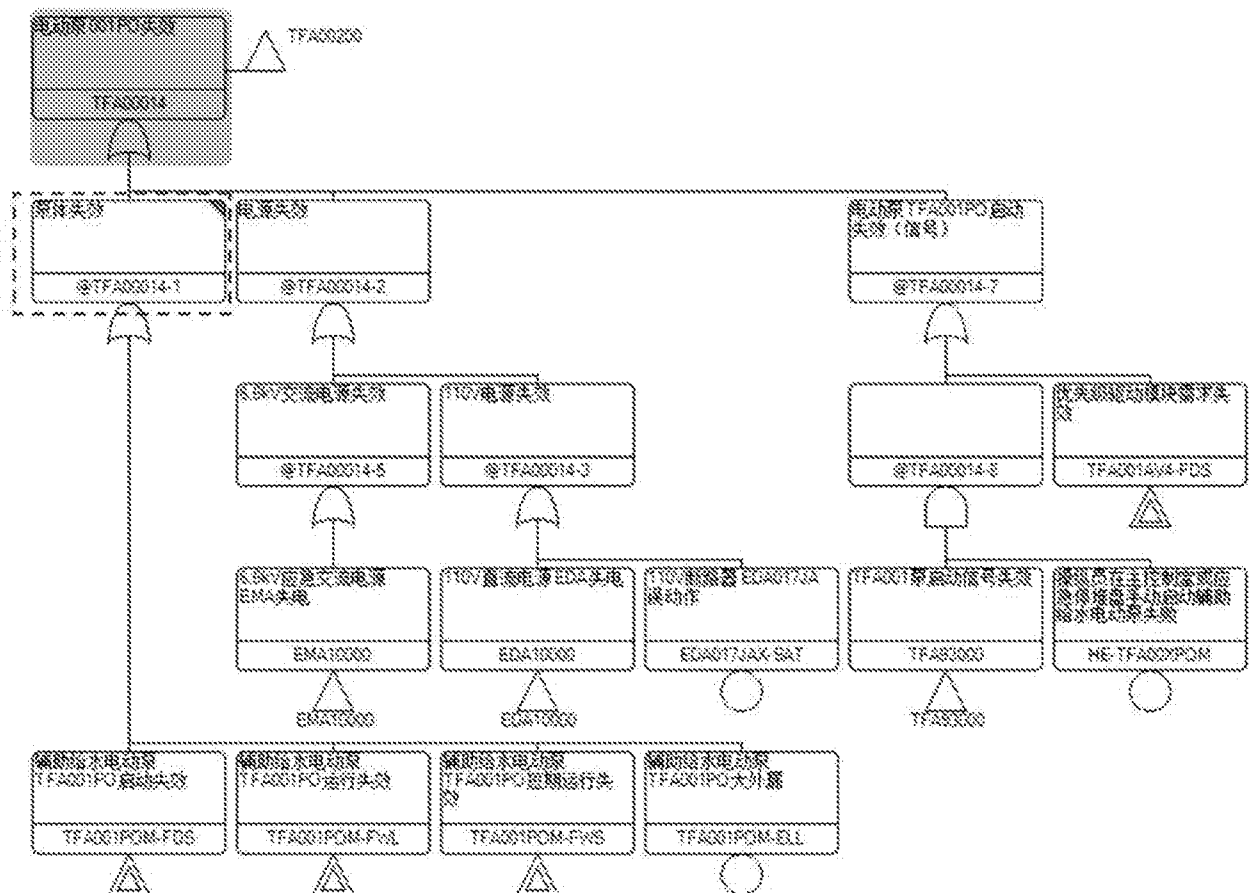


图 7

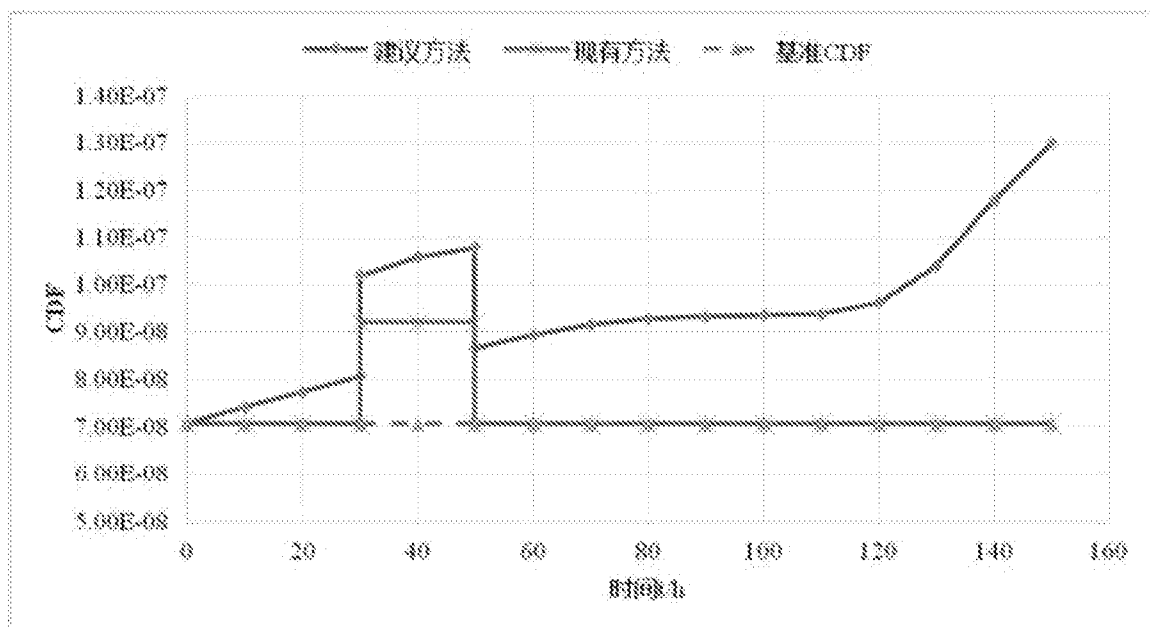


图 8

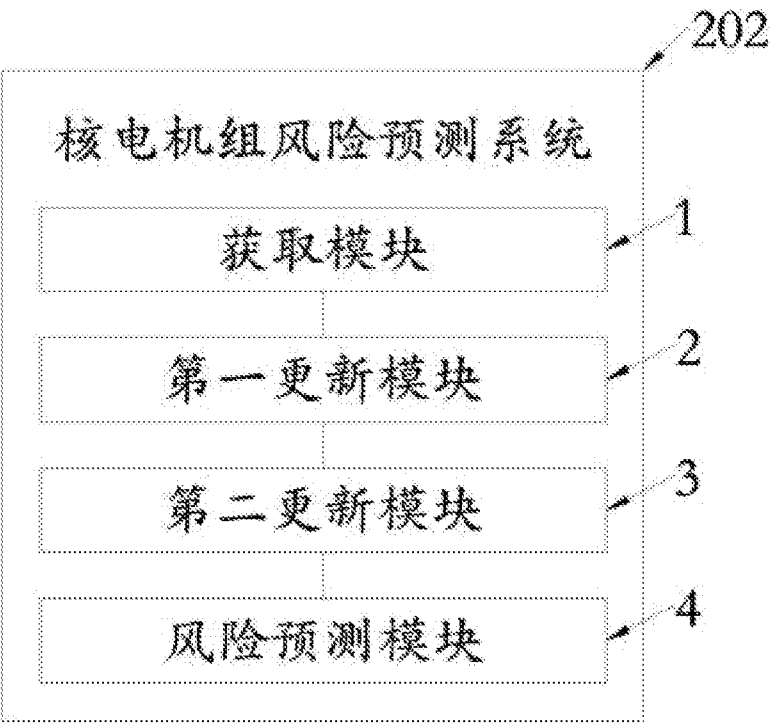


图 9

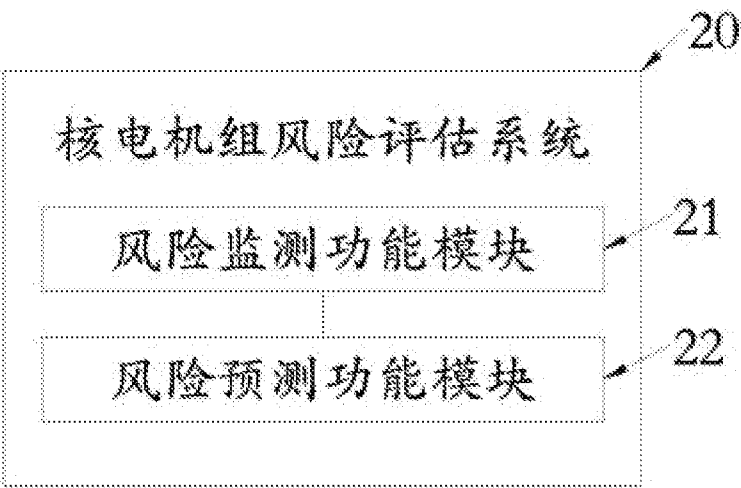


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/129720

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F30/20(2020.01);G06F119/02(2020.01)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)

G06F G06Q

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)

CNABS, CNTXT, WOTXT, EPTXT, USTXT, DWPI, VEN, CNKI, IEEE: 核电, 机组, 风险, 预测, 性能, 时间, 函数, 模型, Living, PSA, 参数, 配置, 寿命, nuclear power, crew, risk, forecast, capability, time, function, model, parameter, configure, life

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 115130284 A (CHINA NUCLEAR POWER ENGINEERING CO., LTD.) 30 September 2022 (2022-09-30) claims 1-15	1-15
A	CN 103400246 A (HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 20 November 2013 (2013-11-20) entire document	1-15
A	CN 104299042 A (CHINA NUCLEAR POWER ENGINEERING CO., LTD. et al.) 21 January 2015 (2015-01-21) entire document	1-15
A	CN 107194586 A (INSTITUTE OF INDUSTRY TECHNOLOGY, GUANGZHOU & CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 22 September 2017 (2017-09-22) entire document	1-15
A	CN 108416526 A (HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY) 17 August 2018 (2018-08-17) entire document	1-15



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

27 January 2023

Date of mailing of the international search report

27 February 2023

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

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2022/129720

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	TW 200717355 A (INSTITUTE OF NUCLEAR ENERGY RESEARCH, AEC) 01 May 2007 (2007-05-01) entire document	1-15
X	张敏 (ZHANG, Min). "核电站及时自动更新的Living PSA方法研究 (Non-official translation: Nuclear Power Station Timely And Automatic Updating Living Psa Method Research)" 万方平台 (Wanfang), 22 June 2021 (2021-06-22), text, and pages 3, 6, and 21-34	1-2, 7-11, 13-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2022/129720

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	115130284	A	30 September 2022	None			
CN	103400246	A	20 November 2013	None			
CN	104299042	A	21 January 2015	WO	2015007038	A1	22 January 2015
CN	107194586	A	22 September 2017	None			
CN	108416526	A	17 August 2018	None			
TW	200717355	A	01 May 2007	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/129720

A. 主题的分类

G06F30/20(2020.01) i; G06F119/02(2020.01) 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)

G06F G06Q

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))

CNABS, CNTXT, WOTXT, EPTXT, USTXT, DWPI, VEN, CNKI, IEEE:核电, 机组, 风险, 预测, 性能, 时间, 函数, 模型, Living, PSA, 参数, 配置, 寿命, nuclear power, crew, risk, forecast, capability, time, function, model, parameter, configure, life

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 115130284 A (中国核电工程有限公司) 2022年9月30日 (2022 - 09 - 30)
权利要求1-15

1-15

A

CN 103400246 A (中国科学院合肥物质科学研究院) 2013年11月20日 (2013 - 11 - 20)
全文

1-15

A

CN 104299042 A (中广核工程有限公司等) 2015年1月21日 (2015 - 01 - 21)
全文

1-15

A

CN 107194586 A (广州中国科学院工业技术研究院) 2017年9月22日 (2017 - 09 - 22)
全文

1-15

A

CN 108416526 A (哈尔滨工程大学) 2018年8月17日 (2018 - 08 - 17)
全文

1-15

A

TW 200717355 A (行政院原子能委员会核能研究所) 2007年5月1日 (2007 - 05 - 01)
全文

1-15



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

2023年1月27日

国际检索报告邮寄日期

2023年2月27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

传真号 (86-10)62019451

授权官员

沈敏洁

电话号码 (+86) 010-53961293

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2022/129720

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
X	张敏，“核电站及时自动更新的Living PSA方法研究” 万方平台，2021年6月22日（2021 - 06 - 22）， 正文第3、6、21-34页	1-2，7-11，13-15

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2022/129720

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	115130284	A	2022年9月30日	无			
CN	103400246	A	2013年11月20日	无			
CN	104299042	A	2015年1月21日	W0	2015007038	A1	2015年1月22日
CN	107194586	A	2017年9月22日	无			
CN	108416526	A	2018年8月17日	无			
TW	200717355	A	2007年5月1日	无			