

## (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  
2022 年 11 月 3 日 (03.11.2022)



(10) 国际公布号  
**WO 2022/227679 A1**

(51) 国际专利分类号:  
**G06F 30/20** (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/143463

(22) 国际申请日: 2021 年 12 月 31 日 (31.12.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:  
202110474473.5 2021 年 4 月 29 日 (29.04.2021) 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: 刘美汝(LIU, Meiru); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。 杨健(YANG, Jian); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。 邓伟(DENG, Wei); 中国北京市海淀区西三环北路 117 号, Beijing 100840 (CN)。 马超(MA, Chao); 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 室邓伯英, 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, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,

(54) Title: PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS-BASED FIRE PROTECTION SELECTION METHOD AND APPARATUS FOR CABLES IN NUCLEAR POWER PLANT

(54) 发明名称: 基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法及装置

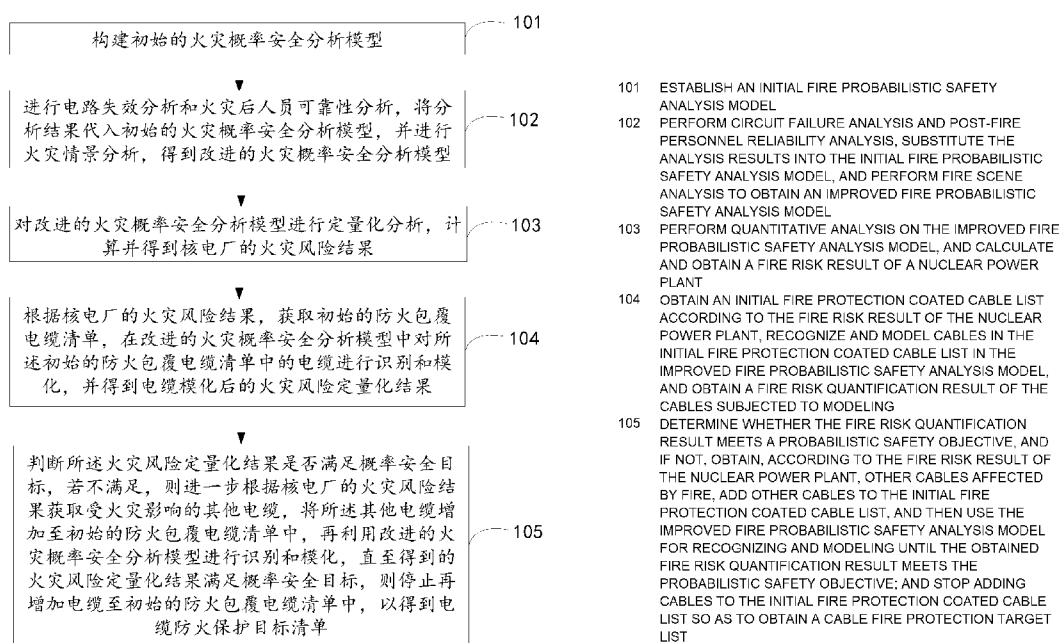


图 1

(57) Abstract: A probabilistic safety analysis-based fire protection selection method and apparatus for cables in a nuclear power plant. The method comprises: performing quantitative analysis on an improved fire probabilistic safety analysis model, and calculating and obtaining a fire risk result of the nuclear power plant; obtaining an initial fire protection coated cable list, recognizing and modeling cables in the initial fire protection coated cable list in the model, and obtaining a fire risk quantification result; and determining whether

CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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:

一 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

the fire risk quantification result meets a probabilistic safety objective, and if not, adding other cables affected by fire to the initial fire protection coated cable list until the fire risk quantification result meets the probabilistic safety objective, so as to obtain a cable fire protection target list. By means of the method, cables having critical risks can be quantitatively recognized as cables that require fire protection, and the fire protection investment of the nuclear power plant is optimized, such that the maximum balance between safety and economy is achieved.

(57) 摘要: 一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法及装置, 方法包括: 对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析, 计算并得到核电厂的火灾风险结果; 进而获取初始的防火包覆电缆清单, 在模型中对初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化, 并得到火灾风险定量化结果; 判断火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标, 若不满足, 则将受火灾影响的其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中, 直至火灾风险定量化结果满足概率安全目标, 以得到电缆防火保护目标清单。该方法可定量化地识别出风险重要的电缆作为需进行防火保护的电缆, 优化核电厂的防火投入, 实现安全性和经济性的最大平衡。

## 基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法及装置

本公开要求申请日为 2021 年 04 月 29 日、申请号为 202110474473.5、名称为“基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取设计方法”的中国专利申请的优先权。

### 技术领域

本发明属于核电厂设计技术，具体涉及一种基于概率安全分析（PSA，Probabilistic Safety Assessment）的核电厂电缆防火保护选取方法及选取装置。

### 背景技术

核电厂中存在的大量电缆是重要的内部火灾风险源，而电缆一旦起火或受到火灾损坏也会对电厂运行和安全功能造成重要影响。特别是由于火灾的蔓延特性，在较严重的火灾情形下，很可能会造成部分区域的大量电缆受损，若冗余安全列的电缆也在同一场火灾中受到损坏，就会对核安全造成严重危害。因此，对于在电厂中可能引起共模失效的电缆，需要进行防火包覆或物理隔离。

当前电缆防火保护分析采用的是传统确定论的定性分析方法，在施工设计后期，基于电缆数据库针对核安全厂房每个防火区或防火小区开展定性的火灾薄弱环节分析，通过潜在火灾共模点的鉴别、功能分析、火灾风险分析、已确认火灾共模点的处理确定电缆防火保护清单。目前的确定论电缆防火保护分析无法给出定量化的风险结果，从而得到的电缆防火保护清单无法使核电厂实现安全性和经济性的平衡。

### 发明内容

本发明要解决的技术问题是针对现有技术存在的上述不足，提供一种基

于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法及选取装置，可量化地识别出风险重要的电缆作为需进行防火保护的电缆，优化核电厂的防火投入，实现安全性和经济性的最大平衡。

本发明实施例提供一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，包括如下步骤：构建初始的火灾概率安全分析模型；进行电路失效分析和火灾后人员可靠性分析，将分析结果代入初始的火灾概率安全分析模型，并进行火灾情景分析，得到改进的火灾概率安全分析模型；对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析，计算并得到核电厂的火灾风险结果；根据核电厂的火灾风险结果，获取初始的防火包覆电缆清单，在改进的火灾概率安全分析模型中对所述初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化，并得到电缆模化后的火灾风险定量化结果；判断所述火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标，若不满足，则进一步根据核电厂的火灾风险结果获取受火灾影响的其他电缆，将所述其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中，再利用改进的火灾概率安全分析模型进行识别和模化，直至得到的火灾风险定量化结果满足概率安全目标，则停止再增加电缆至初始的防火包覆电缆清单中，以得到电缆防火保护目标清单。

优选地，在所述得到电缆防火保护目标清单之后，基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法还包括：计算电缆防火保护目标清单中电缆组合实施包覆与否的风险结果，判断电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的大小，并根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单。

优选地，所述根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单，具体包括：若判断结果为电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的差值小于预设阈值，则在电缆防火保护目标清单中剔除所述电缆组合的相应电缆，以得到优化后的电缆防火保护目标清单，若否，则在电缆防火保

护目标清单中保留所述电缆组合的相应电缆。

优选地，预设阈值为概率安全指标要求的 0.1%。

优选地，所述构建初始的火灾概率安全分析模型，具体包括：以核电厂内部事件一级概率安全分析模型为基础，考虑火灾风险特点后由事件树、故障树和基本数据构建风险逻辑模型；获取火灾隔间的划分、火灾概率安全分析的设备和火灾概率安全分析的电缆，以及火灾隔间的点火频率，并将三者均作为所述风险逻辑模型的输入条件，得到初始的火灾概率安全分析模型。

优选地，所述获取火灾隔间的划分、火灾概率安全分析的设备和火灾概率安全分析的电缆，以及火灾隔间的点火频率，具体包括：定义核电厂分析边界，并基于消防设计中的防火分区将核电厂分析边界中的区域划分成若干个火灾隔间；识别火灾隔间中的火灾概率安全分析设备，确定火灾概率安全分析范围，以获取火灾概率安全分析的电缆；以火灾概率安全分析的电缆为基础，识别出火灾隔间中的火灾概率安全分析设备，并建立电缆与火灾概率安全分析设备的关联；识别火灾隔间中的点火源并计算得到火灾隔间的点火频率。

优选地，所述获取火灾概率安全分析的电缆，具体包括：建立初始的火灾概率安全分析设备清单，根据核电厂的系统设计资料、电气及工艺设备布置资料，将所有可能受到火灾损坏的设备都列入初始的火灾概率安全分析设备清单中；对初始的火灾概率安全分析设备清单中的设备进行失效模式及影响分析，对于设备失效不会对核电厂的正常运行及安全停堆造成影响的设备在所述初始的火灾概率安全分析设备清单中去除。

优选地，所述点火源包括固定点火源和临时性火灾两类，所述计算得到火灾隔间的点火频率，具体包括：计算火灾隔间的所述点火频率为隔间内所有点火源的点火频率 $\lambda_{IS,J}$ 之和，以得到火灾隔间的点火频率，其中，单个点火源的点火频率 $\lambda_{IS,J}$ 计算公式如下：

$$\lambda_{IS,J} = \lambda_{IS} W_L W_{IS,J,L}$$

其中，

$\lambda_{IS}$  为点火源 IS 的通用点火频率；

$W_L$  为点火源的位置权重因子；

$W_{IS,J,L}$  为点火源权重因子，表示火灾隔间 J 中对应电厂区域 L 的 IS 类点火源的数量权重。

优选地，进行电路失效分析，具体是：分析导致目标设备失效的电缆或电路的失效模式，并确定失效模式发生的概率值。火灾后人员可靠性分析，具体是：采用人因分析方法评估火灾对人员动作的影响，确定和量化火灾概率安全分析模型的开发和定量过程中出现的人员失效事件及人员失效事件的概率值。

优选地，所述根据核电厂的火灾风险结果，获取初始的防火包覆电缆清单，具体包括：根据核电厂的火灾风险结果，识别出风险重要电缆，与基于确定论得到的防火包覆电缆清单进行合并，形成初始的防火包覆电缆清单。

进一步地，本发明实施例还提供一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取装置，包括建模模块、计算模块、获取模块、确定模块。建模模块，用于构建初始的火灾概率安全分析模型。计算模块，与建模模块连接，用于进行电路失效分析和火灾后人员可靠性分析，将分析结果代入初始的火灾概率安全分析模型，并进行火灾情景分析，得到改进的火灾概率安全分析模型，并对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析，计算并得到核电厂的火灾风险结果。获取模块，与计算模块连接，用于根据核电厂的火灾风险结果，获取初始的防火包覆电缆清单，在改进的火灾概率安全分析模型中对所述初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化，并得到电缆模化后的火灾风险定量化结果。确定模块，与获取模块连接，用于判断所述火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标，若不满足，则进一步根据核电厂的火灾风险结果获取受火灾影响的其他电缆，将所述其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中再利用改进的火灾概率安全分析模型进行识别和模化，直至得到的火灾风险定量化结果

满足概率安全目标，则停止再增加电缆至初始的防火包覆电缆清单中，以得到电缆防火保护目标清单。

优选地，基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取装置还包括优化模块。计算模块，还用于计算电缆防火保护目标清单中电缆组合实施包覆与否的风险结果。优化模块，与计算模块和确定模块连接，用于根据计算模块得到的火灾风险定量化结果，判断电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的大小，并根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单。

本发明的有益效果如下：本发明提出了一种基于概率安全分析技术来选取需进行防火保护的电缆的方法，通过 PSA 方法定量识别出风险重要的电缆，得到电缆防火保护目标清单，该方法不仅可以识别逻辑复杂的共模失效和叠加失效，还能精确的定量评价每根电缆包覆所引起的电厂风险变化情况，可在最小经济投入下得到最大的安全性提升。同时，采用本方法也可以有效减少确定论的分析设计中的保守性，在保证核电厂安全性不受影响的同时，优化核电厂的防火投入，减轻核电厂的经济负担，充分平衡核电厂的安全性和经济性。

## 附图说明

图 1 为本发明实施例 1 的一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法的流程图；

图 2 为本发明实施例 2 的一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法的流程图；

图 3 为本发明具体实施例中火灾概率安全分析事件树模型示意图（1）；

图 4 为本发明具体实施例中火灾概率安全分析事件树模型示意图（2）；

图 5 为本发明具体实施例中火灾概率安全分析事件树模型示意图（3）。

## 具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

### 实施例 1：

如图 1 所示，本实施例提供一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，包括如下步骤：

步骤 101，构建初始的火灾概率安全分析模型（火灾 PSA 模型）。

步骤 102，进行电路失效分析和火灾后人员可靠性分析，将分析结果代入初始的火灾概率安全分析模型，并进行火灾情景分析，得到改进的火灾概率安全分析模型。

步骤 103，对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析，计算并得到核电厂的火灾风险结果。

步骤 104，根据核电厂的火灾风险结果，获取初始的防火包覆电缆清单，在改进的火灾概率安全分析模型中对所述初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化，并得到电缆模化后的火灾风险定量化结果。

步骤 105，判断所述火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标，若不满足，则进一步根据核电厂的火灾风险结果获取受火灾影响的其他电缆，将所述其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中，再利用改进的火灾概率安全分析模型进行识别和模化，直至得到的火灾风险定量化结果满足概率安全目标，则停止再增加电缆至初始的防火包覆电缆清单中，以得到电缆防火保护目标清单。

本实施例中，通过改进的火灾概率安全分析模型识别和模化需要进行防火包覆的电缆，得到火灾风险定量化结果，再根据火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标确定是否将受火灾影响的其他电缆增加至清单中，从而得到电缆防火保护目标清单。相比于基于确定论得到的电缆防火保护清单，本实施例得

到的电缆防火保护目标清单是基于定量分析得到，从而得到的清单更为准确，能够实现安全性和经济性的最大平衡。

可选地，在所述得到电缆防火保护目标清单之后，基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法还包括：计算电缆防火保护目标清单中电缆组合实施包覆与否的风险结果，判断电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的大小，并根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单。

本实施例中，电缆防火保护目标清单中的电缆可划分为多种电缆组合，分别计算各电缆组合实施包覆或者未实施包覆的相应的风险结果，根据两种风险结果的对比进一步优化电缆防火保护目标清单中的电缆数量，可在保证核电厂安全性的基础上，进一步优化防火保护的经济投入。

可选地，所述根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单，具体包括：若判断结果为电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的差值小于预设阈值，则在电缆防火保护目标清单中剔除所述电缆组合的相应电缆，以得到优化后的电缆防火保护目标清单，若否，则在电缆防火保护目标清单中保留所述电缆组合的相应电缆。可选地，预设阈值为概率安全指标要求的 0.1%。

本实施例中，当电缆组合 A 的第一风险结果（指未实施包覆）与第二风险结果（指实施包覆）的差值小于概率安全指标要求的 0.1%，说明对电缆组合 A 实施包覆的风险结果与对电缆组合 A 不实施包覆的风险结果基本持平，反而实施包覆会产生较大的经济投入，为达到核电厂安全性和经济性的平衡，故在电缆防火保护目标清单中剔除电缆组合 A 所包括的相应电缆。

可选地，步骤 101：构建初始的火灾概率安全分析模型，具体包括：以核电厂内部事件一级概率安全分析模型为基础，考虑火灾风险特点后由事件树、故障树和基本数据构建风险逻辑模型；获取火灾隔间的划分、火灾概率安全分析

的设备和火灾概率安全分析的电缆，以及火灾隔间的点火频率，并将三者均作为所述风险逻辑模型的输入条件，得到初始的火灾概率安全分析模型。

本实施例中，获取火灾隔间的划分、火灾概率安全分析的设备和火灾概率安全分析的电缆，以及火灾隔间的点火频率的具体处理过程在实施例2中详述。

可选地，进行电路失效分析，具体是：分析导致目标设备失效的电缆或电路的失效模式，并确定失效模式发生的概率值。火灾后人员可靠性分析，具体是：采用人因分析方法评估火灾对人员动作的影响，确定和量化火灾概率安全分析模型的开发和定量过程中出现的人员失效事件及人员失效事件的概率值。

可选地，所述根据核电厂的火灾风险结果，获取初始的防火包覆电缆清单，具体包括：根据核电厂的火灾风险结果，识别出风险重要电缆，与基于确定论得到的防火包覆电缆清单进行合并，形成初始的防火包覆电缆清单。

本实施例中，在基于确定论得到的防火包覆电缆清单的基础上，合并本实施例步骤103根据核电厂的火灾风险结果得到的重要电缆清单，以形成初始的防火包覆电缆清单，使得该初始的防火包覆电缆清单更为全面，满足核电厂的安全性。此外，通过对后续得到的电缆防火保护目标清单进行优化，能获取基于确定论得到的防火包覆电缆清单中过于保守所选取的具体电缆，更体现出本实施例的优越性，即获取安全性与经济性的最优的电缆防火保护清单。

## 实施例2：

本实施例提供的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法的流程如图2所示，包括如下步骤：

### 步骤（1） 划分火灾影响区域，即获取火灾隔间的划分结果

定义核电厂分析边界，并基于消防设计中的防火分区将核电厂分析边界中的区域划分成若干个火灾隔间。核电厂分析边界定义的目的是所定义的分析边界能够包容所有对火灾风险具有明显的潜在贡献的区域。核电厂分析边界从电

厂的保护区开始，包括与反应堆正常和应急运行、支持系统以及电力生产（如汽轮机厂房）相关的全部电厂区域。对核电厂分析边界中的区域，需要划分成若干火灾隔间，以开展内部火灾概率安全分析（PSA）。火灾隔间划分的目的是将核电厂划分为一系列的实体分析单元，将电厂的设备与电缆对应到这些区域以研究火灾的影响。

本实施例中，以某压水堆核电厂为例，火灾影响区域包括反应堆厂房、安全厂房、电气厂房、核辅助厂房、柴油发电机厂房等，火灾隔间包括反应堆厂房防火区、安全厂房中压安注泵房间、蓄电池 A 列房间、直流及交流不间断配电 A 列、仪控电子设备间等几百个火灾隔间。

#### 步骤（2）识别火灾隔间中的火灾 PSA 设备

识别火灾隔间中的火灾概率安全分析（PSA）设备，确定火灾概率安全分析范围，以获取火灾 PSA 设备。火灾 PSA 设备即火灾 PSA 电厂响应模型中所涉及的电厂设备。火灾不会造成钢等高熔点金属的损坏，非能动的机械设备如手动阀、截止阀、过滤器、热交换器等不需要包含在火灾 PSA 设备的清单中。为了保证火灾 PSA 设备清单的完整性，首先，建立初始的火灾概率安全分析设备清单，根据核电厂的系统设计资料、电气及工艺设备布置资料等，将所有可能受到火灾损坏的设备都列入了初始火灾 PSA 设备清单中。初始的火灾 PSA 设备清单包括了所有火灾失效可能直接导致堆芯损坏或导致始发事件，以及用于缓解火灾始发事件使核电厂达到安全稳定状态所需的构筑物、系统和设备（SSC），火灾 PSA 设备清单的范围确定了火灾 PSA 的分析范围。

在初始的火灾 PSA 设备清单中，包含了所有可能受到火灾影响的设备，但是其中某些设备的失效并不会对核电厂的正常运行及安全停堆造成影响，无需在火灾 PSA 模型中进行模化。因此，需要进一步对初始的火灾概率安全分析设备清单中的设备进行筛选，形成便于支持内部火灾 PSA 建模分析工作的火灾 PSA 设备清单。

在对设备清单进行筛选前，需要对初始的火灾概率安全分析设备清单中的设备进行失效模式及影响分析（FMEA），分析设备在火灾中的失效模式可能造成的后果，再通过一定筛选准则确定是否保留在火灾 PSA 设备清单中（例如，对于设备失效不会对核电厂的正常运行及安全停堆造成影响的设备在所述初始的火灾概率安全分析设备清单中去除）。

本实施例中，以某压水堆核电厂直流及交流不间断配电 A 列房间为火灾隔间示例，该火灾隔间内主要设备见下表 1。

表 1 火灾 PSA 设备

| 设备编码     | 设备类型       | 设备描述        |
|----------|------------|-------------|
| EDA001TB | 配电盘        | 110V 直流配电柜  |
| EDG001TB | 配电盘        | 110V 直流配电柜  |
| ECC001TB | 配电盘        | 48V 直流配电柜   |
| EAG001TB | 配电盘        | 220V 交流配电柜  |
| EDA001RD | 蓄电池充电器和逆变器 | 110V 蓄电池充电器 |
| EDA002RD | 蓄电池充电器和逆变器 | 110V 蓄电池充电器 |
| ECC001RD | 蓄电池充电器和逆变器 | 48V 蓄电池充电器  |
| ECC002RD | 蓄电池充电器和逆变器 | 48V 蓄电池充电器  |
| EAG001DL | 蓄电池充电器和逆变器 | 220V 逆变器    |
| EAG001TR | 变压器        | 旁路变压器       |

### 步骤（3） 识别火灾隔间中的火灾 PSA 电缆

火灾 PSA 电缆即与火灾 PSA 设备相关的电缆。火灾 PSA 电缆的选取以火灾 PSA 设备清单为基础，选取火灾 PSA 设备相关的电缆，包括供电、控制、显示及仪表电缆等。在此步骤中将所有可能影响设备运行的电缆列入火灾 PSA 电缆清单中，建立起火灾 PSA 电缆与火灾 PSA 设备的关联。

本实施例中，火灾 PSA 电缆清单对火灾隔间内的每一根电缆建立“电缆—关联设备—敷设位置”这三者之间的相关性，该火灾隔间内主要电缆见下表 2，其中表 2 中的关联设备指与该火灾隔间内电缆相关联的可影响设备运行的设备，例如，该火灾隔间内的火灾 PSA 电缆的一端连接该火灾隔间内的火灾 PSA 设备，

另一端连接其他火灾隔间的可因电缆故障产生影响设备运行的设备，或者该火灾隔间内的火灾 PSA 电缆的两端分别连接的火灾 PSA 设备均在其他火灾隔间内。

表 2 火灾 PSA 电缆

| 电缆编码     | 系列 | 关联设备     | 不利的失效模式 |
|----------|----|----------|---------|
| TFAC0595 | A  | TFA081VV | 拒关      |
| EAWB0234 | A  | TFA081VV | 拒关      |
| PRSC0164 | A  | PRS208VV | 误关闭     |
| PRSC0169 | A  | PRS308VV | 误关闭     |
| ETEB0242 | A  | PRS208VV | 误关闭     |
| ETEB0244 | A  | PRS308VV | 误关闭     |
| ETEB0241 | A  | PRS208VV | 误关闭     |
| ETEB0243 | A  | PRS308VV | 误关闭     |
| ETEB0240 | A  | PRS108VV | 误关闭     |
| PRSC0159 | A  | PRS108VV | 误关闭     |
| ETEB0239 | A  | PRS108VV | 误关闭     |
| ETEB0241 | A  | PRS208VV | 误关闭     |
| ETEB0243 | A  | PRS308VV | 误关闭     |
| PCSC0102 | A  | PCS101VD | 误动作     |
| PCSC0112 | A  | PCS103VD | 误动作     |
| PCSC0122 | A  | PCS112VD | 误动作     |
| PCSC0202 | A  | PCS201VD | 误动作     |
| PCSC0212 | A  | PCS203VD | 误动作     |
| PCSC0222 | A  | PCS212VD | 误动作     |
| PCSC0302 | A  | PCS301VD | 误动作     |
| PCSC0312 | A  | PCS303VD | 误动作     |
| PCSC0322 | A  | PCS312VD | 误动作     |

#### 步骤（4） 点火源识别和计算火灾隔间的点火频率

点火源即可能导致火灾的火源，核电厂中的点火源包括固定点火源和临时性火灾两类。固定点火源是指在核电厂设计中就已经存在的位置固定、燃烧参数已知的点火源，如电气柜、电机等；另一种是由于临时性贮存或人员活动引入的位置和燃烧参数均无法确定的临时性火灾。

点火频率计算是进行火灾情景分析和火灾定量化的基础。火灾隔间的点火频率为隔间内所有点火源的点火频率 $\lambda_{IS,J}$ 之和。点火源的点火频率由以下公式计算：

$$\lambda_{IS,J} = \lambda_{IS} W_L W_{IS,J,L}$$

其中：

$\lambda_{IS}$  为点火源 IS 的通用点火频率；

$W_L$  为点火源的位置权重因子；

$W_{IS,J,L}$  为点火源权重因子，表示火灾隔间 J 中对应电厂区域 L 的 IS 类点火源的数量权重。

本实施例中，固定点火源包括蓄电池、电动泵、柴油发电机、空气压缩机、充电器、电气柜、母线、接线盒、氢气罐等。临时火灾包括焊接和切割引起的电缆火灾、焊接和切割引起的临时火灾、临时和高温作业等。通过统计房间内的点火源数量计算点火频率，该火灾隔间内的点火频率见表 3。

表 3 火灾隔间的点火频率

| 电厂运行状态         | 始发事件   | 始发事件频率 (/堆年) |          |          |
|----------------|--------|--------------|----------|----------|
|                |        | 固定点火源        | 临时点火源    | 总计       |
| A: 满功率         | 丧失 EDA | 6.29E-04     | 3.33E-05 | 6.62E-04 |
| B: 低功率         | 丧失 EDA | 2.54E-06     | 1.35E-08 | 2.67E-06 |
| C: SG 冷却的停堆模式  | 丧失 EDA | 4.76E-06     | 9.48E-07 | 5.71E-06 |
| D: RHR 冷却的停堆模式 | 丧失 EDA | 1.35E-05     | 2.68E-06 | 1.62E-05 |
| E: 一回路微开口      | 丧失 EDA | 4.21E-06     | 8.35E-07 | 5.05E-06 |
| F: 一回路开口       | 丧失 EDA | 6.35E-06     | 1.26E-06 | 7.61E-06 |

#### 步骤 (5) 开发火灾 PSA 模型

火灾 PSA 模型是考虑火灾风险特点后由事件树、故障树和基本数据等构成

的风险逻辑模型。火灾隔间的划分、设备和电缆的选取以及点火频率的计算都是火灾 PSA 模型的输入条件。火灾 PSA 模型可以对核电厂在火灾情形下的真实响应进行模拟，计算火灾所导致的堆芯损伤频率（CDF），定量化火灾给核电厂所带来的风险。核电厂火灾 PSA 模型的建立是在已有的功率工况、低功率和停堆工况内部事件一级 PSA 模型基础上完成，并反映电厂的实际设计、竣工、运行（即已有的运行经验）情况。

火灾 PSA 模型的建立以内部事件一级 PSA 模型为基础，内部事件一级 PSA 模型中的下列技术要素也都包含在火灾 PSA 模型中：

电厂运行状态分析；

始发事件分析；

事件序列分析；

系统分析；

人员可靠性分析；

数据分析。

本实施例中，该火灾隔间的始发事件为丧失 A 列直流电源。事件序列分析主要参考已有事故处理规程，可转入内部事件丧失 A 列直流电事件树中处理。在火灾中设备会有特定的失效模式和失效概率，需要对内部事件模型中的故障树进行修改或增补。火灾的发生会对人员动作的执行产生多种不利影响，人员可靠性分析考虑火灾的影响，重新计算火灾影响下的人误事件失效概率。该火灾隔间内的火灾风险模型如图 3-图 5 的示例。

#### 步骤（6） 电路失效分析

电路失效分析的主要目的是分析导致目标设备失效的电缆或电路的失效模式，并确定失效模式发生的概率值。

电路失效模式分析是通过对与目标设备相关的电缆、电路开展详细分析，确定设备对电缆或电路失效模式的响应，筛选不会影响设备执行需求功能的电

缆。电路的失效主要源于电缆暴露于火灾中，从而导致电缆绝缘功能损害，进而引起电路故障，因此电路失效模式分析主要是电缆失效模式及其相应的电路响应的分析。

本实施例中，根据电路的特性，确定电路失效模式的发生概率。该火灾隔间电路失效分析结果如表 4 所示。

表 4 火灾导致失效的电缆

| 电缆编码     | 系列 | 关联设备     | 不利的失效模式 | 失效原因(对地短路/热短路) | 失效概率值 |
|----------|----|----------|---------|----------------|-------|
| TFAC0595 | A  | TFA081VV | 拒关      | 接地             | 1     |
| EAWB0234 | A  | TFA081VV | 拒关      | 接地             | 1     |
| PRSC0164 | A  | PRS208VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| PRSC0169 | A  | PRS308VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0242 | A  | PRS208VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0244 | A  | PRS308VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0241 | A  | PRS208VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0243 | A  | PRS308VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0240 | A  | PRS108VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| PRSC0159 | A  | PRS108VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0239 | A  | PRS108VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0241 | A  | PRS208VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| ETEB0243 | A  | PRS308VV | 误关闭     | 热短路            | 0.4   |
| PCSC0102 | A  | PCS101VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0112 | A  | PCS103VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0122 | A  | PCS112VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0202 | A  | PCS201VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0212 | A  | PCS203VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0222 | A  | PCS212VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0302 | A  | PCS301VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0312 | A  | PCS303VD | 误动作     | 未分析            | 1     |
| PCSC0322 | A  | PCS312VD | 误动作     | 未分析            | 1     |

#### 步骤 (7) 火灾后人员可靠性分析

采用合适的人因分析方法评估火灾对人员动作的影响，确定和量化火灾 PSA

模型的开发和定量过程中出现的人员失效事件及其概率值。火灾人员可靠性分析（HRA）分析中，始发事件前人员可靠性分析与内部事件 PSA 相同，始发事件后（C 类）人员可靠性分析主要参考 NUREG-1921 导则推荐的方法，按筛选值、Scoping 和详细分析三个阶段进行。

本实施例中，根据核电厂现场人因访谈，得到火灾后人员响应过程。火灾人员响应具有以下特点：1) 事故情景更加复杂。2) 人员压力和工作负荷更高。3) 执行动作的环境因素更加恶劣。4) 针对火灾情景的培训和演练相对较少，熟练程度相对较低。5) 主控室火灾需特定分析。

人员可靠性分析定量化分析主要基于 NUREG-1921 导则，在人员可靠性分析分析中，大致将火灾情景分为主控室火灾和非主控室火灾，对于主控室火灾情景中操纵员工作站退防和主控室后撤等在火灾 PSA 中新增的人误事件，鉴于其分析的复杂性，在定量化过程中主要采用专家判断的方法进行量化。

#### 步骤（8） 火灾情景分析

火灾情景是描述火灾事件的一组要素。火灾情景根据一个或多个点火源的火灾的特征和结果进行定义。

对于在风险较高的隔间需要开展火灾情景级别的详细分析。将火灾隔间级别的分析细化为火灾情景级别的分析并在火灾 PSA 模型中模化，评估各火灾情景的火灾风险。

初步的定量化分析是以火灾隔间为单位进行的，基于“任一点火源起火就会导致隔间内所有设备和电缆损坏”的保守假设进行了初步的火灾风险定量化。但实际上火灾的发展和蔓延过程是与点火源类型、环境条件等密切相关的，某些点火源起火可能只会影响到有限的范围，并不会造成火灾隔间内所有设备和电缆损坏。因此，为了更加真实的评估火灾风险，对于定量筛选中保留的火灾隔间需要开展火灾情景级别的分析。

本实施例中，该火灾隔间的初步定量化结果为  $7.84\text{E}-05$ /堆年，需要进行详

细分析，将电路失效分析和火灾后人员可靠性分析结果代入火灾 PSA 模型。

#### 步骤 (9) 火灾风险结果定量化

通过对火灾 PSA 模型进行定量化分析，计算并得到核电厂的火灾风险，确定火灾 CDF 的主要贡献。具体计算方法为本领域的公知技术，通过在软件中构建逻辑模型，按模型逻辑计算生成最小割集 (MCS)，然后通过调取模型中的数据输入进行计算。

#### 不确定性分析

不确定性分析的目的就是对分析结果中的不确定性给出定性讨论和定量评价。尽管 PSA 模型试图模化核电厂的现实情况，但是，有时为了简化模型及工作的顺利进行，不可避免地会对复杂的过程和现象引入一些简化或理想化的假设，这些都会给分析结果带来不确定性。

#### 敏感性分析

敏感性分析的目的包括评价 CDF 对始发事件、人误等数据的敏感性，分析讨论对结果有潜在重大影响的建模假设，通过确定一系列敏感性分析案例，将案例参数值变化 10 倍（敏感性因子一般设为 10），计算其影响程度。

本实施例中，对火灾 PSA 模型进行定量化分析，计算并得到该房间的火灾情景分析定量化结果如表 5 所示，这是未考虑电缆防火保护的基准风险结果。

表 5 未考虑电缆防火保护的基准风险结果

| 电厂运行状态         | 始发事件   | 频率 (/堆年) | CDF (/堆年) |
|----------------|--------|----------|-----------|
| A: 满功率         | 丧失 EDA | 6.62E-04 | 6.63E-08  |
| B: 低功率         | 丧失 EDA | 2.67E-06 | 2.58E-10  |
| C: SG 冷却的停堆模式  | 丧失 EDA | 5.71E-06 | 6.96E-09  |
| D: RHR 冷却的停堆模式 | 丧失 EDA | 1.62E-05 | 2.49E-09  |
| E: 一回路微开口      | 丧失 EDA | 5.05E-06 | 3.43E-10  |
| F: 一回路开口       | 丧失 EDA | 7.61E-06 | 1.59E-08  |

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| $\Sigma$ | 9.66E-04 | 9.23E-08 |
|----------|----------|----------|

#### 步骤（10） 识别并模化初步防火包覆电缆清单

基于内部火灾 PSA 模型定量分析结果，识别出风险重要电缆，与确定论防火包覆电缆清单进行对比、合并，形成初步防火包覆电缆清单，在火灾 PSA 模型中对这些电缆进行识别和模化。

本实施例中，该火灾隔间内的电缆涉及到辅助给水系统（TFA）、二次侧非能动余热导出系统（PRS）和非能动安全壳热量导出系统（PCS）。由于表 4 中 TFA 和 PRS 相关设备是执行同一项安全功能所必须的，因此这些电缆必须同时保护，否则任一根电缆的防火包覆取消将导致 CDF 增量大于  $1\text{E}-8/\text{堆年}$ 。PCS 是执行另一项安全功能的，其设计为 3 列配置，PSA 中认为该系统执行功能最少需两列成功运行，因此需至少保证表 4 中 PCS 电缆有两列得到防火包覆。在模型中识别出 TFA、PRS 和 PCS 相应的目标电缆，分别依据以下三种方案对火灾 PSA 模型进行修改：

1. 保护 TFA 和 PRS 相关电缆；
2. 保护 PCS 一列电缆；
3. 保护 PCS 两列电缆。

#### 步骤（11）判断火灾风险定量化结果是否满足安全目标

定量化步骤（9）考虑初步防火包覆清单后的火灾 PSA 模型，如果风险定量化分析结果不能满足概率安全目标（以中国为例， $\text{CDF}_{\text{ALL}}$  为  $1\text{E}-5/\text{堆年}$ ， $\text{LRF}_{\text{ALL}}$  为  $1\text{E}-6/\text{堆年}$ ），则进一步通过模型识别出受火灾影响的关键电缆，继续提出增加防火包覆的要求，直至概率安全目标满足。

本实施例中，定量化步骤（10）三种方案的火灾 PSA 模型，定量化风险结果满足概率安全目标。

#### 步骤（12）计算实施包覆与否的风险变化量

通过对电缆防火保护清单反复迭代和模型定量化计算，计算电缆组合实施包覆与否的风险变化量。在概率安全目标满足的前提下，对多种方案（即不同的电缆组合）的风险进行比较分析，采取合理的筛选准则，对于风险增量较小的情景，可以选择不进行防火包覆，可接受的风险增量可由以下方式计算：

根据核电厂所在国家的核安全监管要求，确定总的概率安全指标要求， $CDF_{ALL}$ ， $LRF_{ALL}$ ，如果某根电缆的防火包覆取消导致的风险增量小于概率安全指标要求的 0.1%，则可以考虑接受。以中国为例， $CDF_{ALL}$  为  $1E-5$ /堆年， $LRF_{ALL}$  为  $1E-6$ /堆年，因此如果某根电缆的防火包覆取消导致  $CDF$  增量小于  $1E-8$ /堆年， $LRF$  增量小于  $1E-9$ /堆年，则可以考虑接受。

本实施例中，针对目标电缆进行防火包覆和不进行防火包覆两种情景分别计算，评估两种情景的堆芯损坏频率。以不进行防火保护为基准方案，分别计算三种防火保护方案的风险结果，如表 6 所示。

表 6 考虑不同电缆防火保护方案的风险结果

| POS            | 基准方案<br>(/堆年) | TFA 和 PRS 相关<br>电缆进行保护<br>(/堆年) | PCS 一列电缆<br>进行保护<br>(/堆年) | PCS 两列电缆<br>进行保护<br>(/堆年) |
|----------------|---------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| A: 满功率         | 6.63E-08      | 1.13E-09                        | 6.63E-08                  | 5.24E-08                  |
| B: 低功率         | 2.58E-10      | 1.99E-12                        | 2.58E-10                  | 2.03E-10                  |
| C: SG 冷却的停堆模式  | 6.96E-09      | 5.59E-11                        | 6.96E-09                  | 6.84E-09                  |
| D: RHR 冷却的停堆模式 | 2.49E-09      | 2.49E-09                        | 2.49E-09                  | 2.08E-09                  |
| E: 一回路微开口      | 3.43E-10      | 3.43E-10                        | 3.43E-10                  | 2.92E-10                  |
| F: 一回路开口       | 1.59E-08      | 1.59E-08                        | 1.59E-08                  | 1.59E-08                  |
| $\Sigma$       | 9.23E-08      | 1.99E-08                        | 9.23E-08                  | 7.77E-08                  |

步骤 (13) 得到优化后的电缆防火保护清单

通过步骤 (10) 到步骤 (12) 的反复迭代，对电缆防火保护方案进行对比分析，在概率安全目标满足的前提下，选择同时兼具安全性和经济性的最优解，得到最终优化后的电缆防火保护清单。

本实施例中，对表 6 的风险结果进行比较分析得到，保护 TFA 和 PRS 相

关电缆方案获得的风险平衡收益最大,即确定对该房间中的 EAWB0234、TFAC0595、ETEB0242、ETEB0241、PRSC0164、ETEB0244、ETEB0243、PRSC0169、ETEB0240、ETEB0239、PRSC0159 电缆进行防火保护以降低火灾风险。

针对全厂高风险火灾隔间均可依据上述步骤进行防火保护电缆选取。

### 实施例 3:

本实施例提供一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取装置,包括建模模块、计算模块、获取模块、确定模块。

建模模块,用于构建初始的火灾概率安全分析模型。

计算模块,与建模模块连接,用于进行电路失效分析和火灾后人员可靠性分析,将分析结果代入初始的火灾概率安全分析模型,并进行火灾情景分析,得到改进的火灾概率安全分析模型,并对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析,计算并得到核电厂的火灾风险结果。

获取模块,与计算模块连接,用于根据核电厂的火灾风险结果,获取初始的防火包覆电缆清单,在改进的火灾概率安全分析模型中对所述初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化,并得到电缆模化后的火灾风险定量化结果。

确定模块,与获取模块连接,用于判断所述火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标,若不满足,则进一步根据核电厂的火灾风险结果获取受火灾影响的其他电缆,将所述其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中再利用改进的火灾概率安全分析模型进行识别和模化,直至得到的火灾风险定量化结果满足概率安全目标,则停止再增加电缆至初始的防火包覆电缆清单中,以得到电缆防火保护目标清单。

可选地,基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取装置还包括优化模块。

计算模块，还用于计算电缆防火保护目标清单中电缆组合实施包覆与否的风险结果。

优化模块，与计算模块和确定模块连接，用于根据计算模块得到的火灾风险定量化结果，判断电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的大小，并根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单。

对于本领域技术人员而言，显然本发明的结构不限于上述示范性实施例的细节，而且在不背离本发明的精神或基本特征的情况下，能够以其他的具体形式实现本发明。因此，无论从哪一点来看，均应将实施例看作是示范性的，而且是非限制性的，本发明的范围由所附权利要求而不是上述说明限定，因此旨在将落在权利要求的等同要件的含义和范围内的所有变化囊括在本发明内。不应将权利要求中的任何附图标记视为限制所涉及的权利要求。

此外，应当理解，虽然本说明书按照实施方式加以描述，但并非每个实施方式仅包含一个独立的技术方案，说明书的这种叙述方式仅仅是为清楚起见，本领域技术人员应当将说明书作为一个整体，各实施例中的技术方案也可以经适当组合，形成本领域技术人员可以理解的其他实施方式。

## 权 利 要 求 书

1. 一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，包括如下步骤：

构建初始的火灾概率安全分析模型；

进行电路失效分析和火灾后人员可靠性分析，将分析结果代入初始的火灾概率安全分析模型，并进行火灾情景分析，得到改进的火灾概率安全分析模型；

对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析，计算并得到核电厂的火灾风险结果；

根据核电厂的火灾风险结果，获取初始的防火包覆电缆清单，在改进的火灾概率安全分析模型中对所述初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化，并得到电缆模化后的火灾风险定量化结果；

判断所述火灾风险定量化结果是否满足概率安全目标，若不满足，则进一步根据核电厂的火灾风险结果获取受火灾影响的其他电缆，将所述其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中，再利用改进的火灾概率安全分析模型进行识别和模化，直至得到的火灾风险定量化结果满足概率安全目标，则停止再增加电缆至初始的防火包覆电缆清单中，以得到电缆防火保护目标清单。

2. 根据权利要求1所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，在所述得到电缆防火保护目标清单之后，还包括：

计算电缆防火保护目标清单中电缆组合实施包覆与否的风险结果，判断电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的大小，并根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单。

3. 根据权利要求2所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方

法，其特征在于，所述根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单，具体包括：

若判断结果为电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的差值小于预设阈值，则在电缆防火保护目标清单中剔除所述电缆组合的相应电缆，以得到优化后的电缆防火保护目标清单，若否，则在电缆防火保护目标清单中保留所述电缆组合的相应电缆。

4. 根据权利要求 3 所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，预设阈值为概率安全指标要求的 0.1%。

5. 根据权利要求 1 所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，所述构建初始的火灾概率安全分析模型，具体包括：

以核电厂内部事件一级概率安全分析模型为基础，考虑火灾风险特点后由事件树、故障树和基本数据构建风险逻辑模型；

获取火灾隔间的划分、火灾概率安全分析的设备和火灾概率安全分析的电缆，以及火灾隔间的点火频率，并将三者均作为所述风险逻辑模型的输入条件，得到初始的火灾概率安全分析模型。

6. 根据权利要求 5 所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，所述获取火灾隔间的划分、火灾概率安全分析的设备和火灾概率安全分析的电缆，以及火灾隔间的点火频率，具体包括：

定义核电厂分析边界，并基于消防设计中的防火分区将核电厂分析边界中的区域划分成若干个火灾隔间；

识别火灾隔间中的火灾概率安全分析设备，确定火灾概率安全分析范围，以获取火灾概率安全分析的设备；

以火灾概率安全分析的设备为基础，识别出火灾隔间中的火灾概率安全分析电缆，并建立电缆与火灾概率安全分析设备的关联；

识别火灾隔间中的点火源并计算得到火灾隔间的点火频率。

7. 根据权利要求6所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，所述获取火灾概率安全分析的设备，具体包括：

建立初始的火灾概率安全分析设备清单，根据核电厂的系统设计资料、电气及工艺设备布置资料，将所有可能受到火灾损坏的设备都列入初始的火灾概率安全分析设备清单中；

对初始的火灾概率安全分析设备清单中的设备进行失效模式及影响分析，对于设备失效不会对核电厂的正常运行及安全停堆造成影响的设备在所述初始的火灾概率安全分析设备清单中去除。

8. 根据权利要求6所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法，其特征在于，所述点火源包括固定点火源和临时性火灾两类，

所述计算得到火灾隔间的点火频率，具体包括：

计算火灾隔间的所述点火频率为隔间内所有点火源的点火频率 $\lambda_{IS,J}$ 之和，以得到火灾隔间的点火频率，其中，单个点火源的点火频率 $\lambda_{IS,J}$ 计算公式如下：

$$\lambda_{IS,J} = \lambda_{IS} W_L W_{IS,J,L}$$

其中，

$\lambda_{IS}$  为点火源 IS 的通用点火频率；

$W_L$  为点火源的位置权重因子；

$W_{IS,J,L}$  为点火源权重因子，表示火灾隔间 J 中对应电厂区域 L 的 IS 类点火源的数量权重。

9. 根据权利要求 1 所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法, 其特征在于, 进行电路失效分析, 具体是: 分析导致目标设备失效的电缆或电路的失效模式, 并确定失效模式发生的概率值;

火灾后人员可靠性分析, 具体是: 采用人因分析方法评估火灾对人员动作的影响, 确定和量化火灾概率安全分析模型的开发和定量过程中出现的人员失效事件及人员失效事件的概率值。

10. 根据权利要求 1 所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取方法, 其特征在于, 所述根据核电厂的火灾风险结果, 获取初始的防火包覆电缆清单, 具体包括:

根据核电厂的火灾风险结果, 识别出风险重要电缆, 与基于确定论得到的防火包覆电缆清单进行合并, 形成初始的防火包覆电缆清单。

11. 一种基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取装置, 其特征在于, 包括建模模块、计算模块、获取模块、确定模块,

建模模块, 用于构建初始的火灾概率安全分析模型,

计算模块, 与建模模块连接, 用于进行电路失效分析和火灾后人员可靠性分析, 将分析结果代入初始的火灾概率安全分析模型, 并进行火灾情景分析, 得到改进的火灾概率安全分析模型, 并对改进的火灾概率安全分析模型进行定量化分析, 计算并得到核电厂的火灾风险结果;

获取模块, 与计算模块连接, 用于根据核电厂的火灾风险结果, 获取初始的防火包覆电缆清单, 在改进的火灾概率安全分析模型中对所述初始的防火包覆电缆清单中的电缆进行识别和模化, 并得到电缆模化后的火灾风险定量化结果,

确定模块, 与获取模块连接, 用于判断所述火灾风险定量化结果是否满足

概率安全目标，若不满足，则进一步根据核电厂的火灾风险结果获取受火灾影响的其他电缆，将所述其他电缆增加至初始的防火包覆电缆清单中再利用改进的火灾概率安全分析模型进行识别和模化，直至得到的火灾风险定量化结果满足概率安全目标，则停止再增加电缆至初始的防火包覆电缆清单中，以得到电缆防火保护目标清单。

12. 根据权利要求 11 所述的基于概率安全分析的核电厂电缆防火保护选取装置，其特征在于，还包括优化模块，

计算模块，还用于计算电缆防火保护目标清单中电缆组合实施包覆与否的风险结果，

优化模块，与计算模块和确定模块连接，用于根据计算模块得到的火灾风险定量化结果，判断电缆组合的未实施包覆的第一风险结果与实施包覆的第二风险结果的大小，并根据判断结果得到优化后的电缆防火保护目标清单。

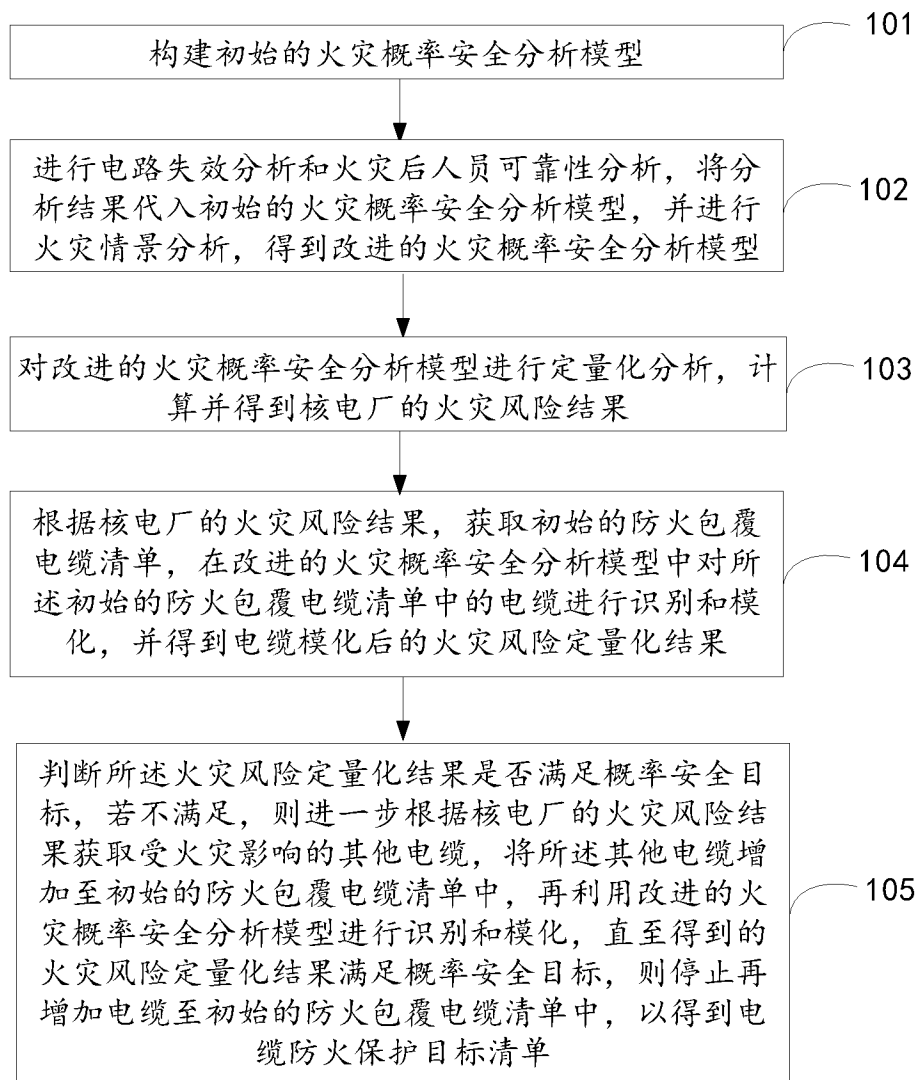


图 1

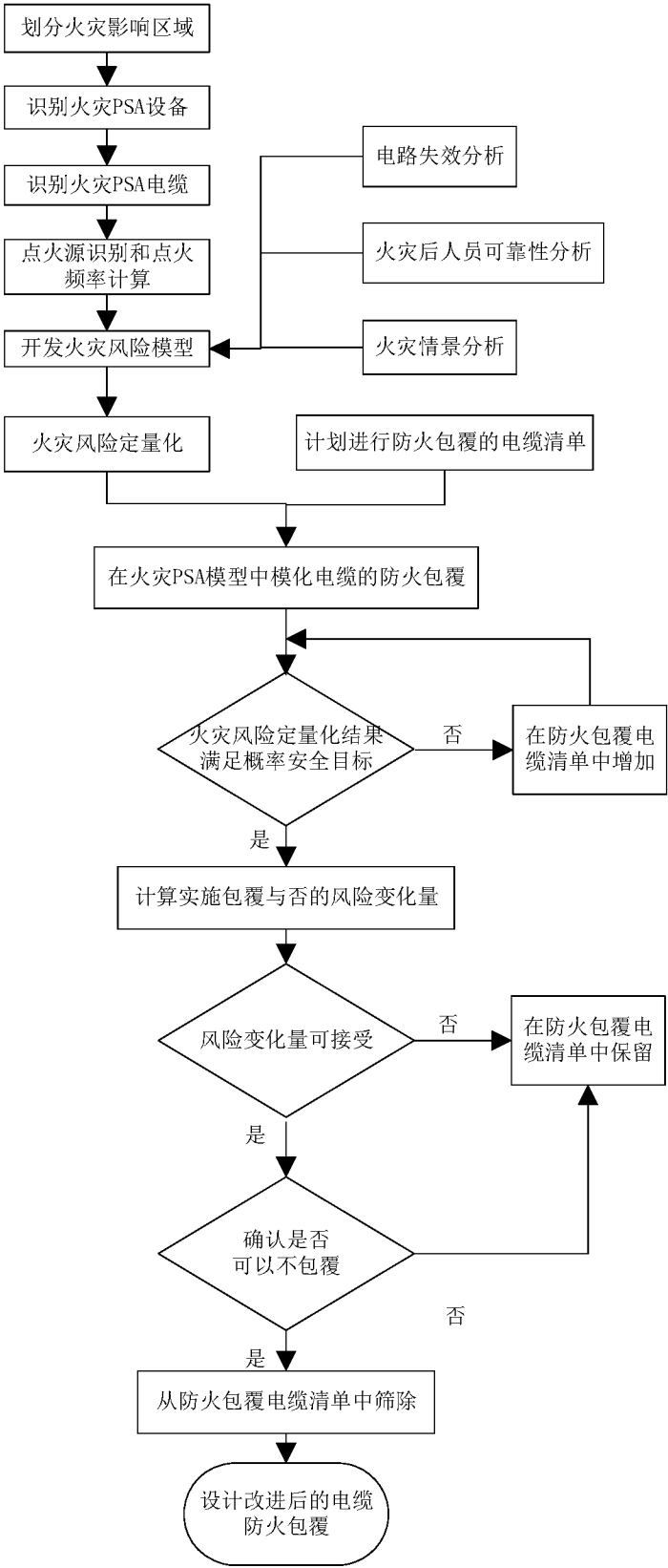


图 2

|                         |            |                                   |                        |                 |     |       |             |             |
|-------------------------|------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------|-----|-------|-------------|-------------|
| POSA/B<br>火灾<br>导致丧失EDA | 切换到<br>辅供电 | 控制棒<br>卡棒<br>1) 卡棒<br>3束及以上<br>2) | 应急堆<br>注入系<br>统 (1/2 ) | 设备冷<br>却水系<br>统 |     |       |             |             |
| AB_F_LED A              | D03        | A02                               | B02                    | W02             | No. | Freq. | Conseq.     | Code        |
|                         |            |                                   |                        |                 | 1   |       | AB_ET_LEX   |             |
|                         |            |                                   |                        |                 | 2   |       | AB_ET_TWCC  | W02         |
|                         |            |                                   |                        |                 | 3   |       | AB_ET_LEX   | A02         |
|                         |            |                                   |                        |                 | 4   |       | CD.TIFSHXI  | A02-B02     |
|                         |            |                                   |                        |                 | 5   |       | AB_ET_ATWSI | A02(3)      |
|                         |            |                                   |                        |                 | 6   |       | AB_ET_LOOP  | D03         |
|                         |            |                                   |                        |                 | 7   |       | AB_ET_LOOP  | D03-A02     |
|                         |            |                                   |                        |                 | 8   |       | CD.TIFSHXI  | D03-A02-B02 |
|                         |            |                                   |                        |                 | 9   |       | AB_ET_ATWS2 | D03-A02(3)  |

图 3

|                        |             |                            |                                        |             |                   |             |     |          |             |             |
|------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------------------|-------------|-------------------|-------------|-----|----------|-------------|-------------|
| POSA/B,<br>丧失丧失<br>冷却水 | 3/3主系<br>停运 | 1/1开启<br>的稳压器<br>安全<br>阀回座 | 二次侧<br>事故冷<br>却: 1/4TFA<br>泵, 1/3<br>列 | 2/3列<br>PRS | 充排冷<br>却 (功<br>率) | 3/3列<br>PCS |     |          |             |             |
| AB_ET_TWCC             | P01         | S03                        | G01                                    | Y01         | F01               | E02         | No. | Freq.    | Conseq.     | Code        |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 1   | 5.37E-04 | OK          |             |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 2   | 1.37E-07 | OK          | G01         |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 3   | 4.32E-11 | OK          | G01-Y01     |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 4   | 1.88E-12 | CD.TISSHT   | G01-Y01-E02 |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 5   | 2.28E-10 | CD.TIFSHI   | G01-Y01-F01 |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 6   | 3.18E-12 | AB_ET_SLOCA | S03         |
|                        |             |                            |                                        |             |                   |             | 7   | 1.27E-10 | AB_ET_SLOCA | P01         |

图 4

|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             |     |          |             |                 |
|---------------------|---------|----------------------|----------------------------|----------------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------|-------------|-----|----------|-------------|-----------------|
| POSA/B<br>丧失<br>外电源 | 1/2 EDG | 接入<br>EAE360<br>CR带载 | 1/1开启<br>的稳压器<br>安全<br>阀回座 | 二次侧<br>事故冷<br>却: 1/4TFA<br>泵, 1/3<br>列 | 2/3列<br>PRS | 充排冷<br>却 (功<br>率) | 1/2 CSP<br>热<br>交换器<br>成功 | 3/3列<br>PCS |     |          |             |                 |
| AB_ET_LOOP          | D01     | D04                  | S03                        | G01                                    | Y01         | F01               | E01                       | E02         | No. | Freq.    | Conseq.     | Code            |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 1   | 1.61E-02 | OK          |                 |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 2   | 4.62E-07 | OK          | G01             |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 3   | 1.07E-09 | OK          | G01-Y01         |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 4   |          | OK          | G01-Y01-E01     |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 5   |          | CD.TISSHT   | G01-Y01-E01-E02 |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 6   | 2.33E-11 | CD.TIFSHI   | G01-Y01-F01     |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 7   | 9.77E-11 | AB_ET_SLOCA | S03             |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 8   | 1.51E-05 | OK          | D01             |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 9   | 4.10E-08 | OK          | D01-G01         |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 10  | 6.22E-11 | CD.TIFSHI   | D01-G01-Y01     |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 11  |          | CD.SIFFHTI  | D01-S03         |
|                     |         |                      |                            |                                        |             |                   |                           |             | 12  | 1.51E-08 | CD.TIFSHI   | D01-D04         |

图 5

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/143463

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G06F 30/20(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

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 概率, 安全, 分析, 核电厂, 防火, 电缆, 模型, 清单, 定量, 识别, 模化, 保护, 防护, 包裹, 包裹, 剔除, 分区, 二次风险, 阈值, 事件树, 故障树, 隔间, 边界, 关联, 频率, 电路, 人员, 可靠性, PSA, probability, safety, analy+, nuclear power plant, fire, protect+, cable, model+, list, quantification, identify+, cladding, wrap+, reject+, zon+, secondary risk, threshold, event tree, fault tree, compartment, boundary, associat+, frequency, circuit, personnel, reliability

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                 | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| PX        | CN 113297727 A (CHINA NUCLEAR POWER ENGINEERING CO., LTD.) 24 August 2021 (2021-08-24)<br>claims 1-11, description paragraphs [0038]-[0140], figure 1                              | 1-12                  |
| A         | 孙凤 等 (SUN, Feng et al.). "关于核电厂火灾概率风险的研究 (Research on Fire PRA for NPPs)"<br>《原子能科学技术》 (Atomic Energy Science and Technology),<br>No. 05, 31 May 2017 (2017-05-31),<br>pp. 872-878 | 1-12                  |
| A         | CN 111814337 A (SHANGHAI NUCLEAR ENGINEERING RESEARCH & DESIGN INSTITUTE CO., LTD.) 23 October 2020 (2020-10-23)<br>entire document                                                | 1-12                  |
| A         | CN 109064035 A (SUZHOU NUCLEAR POWER RESEARCH INSTITUTE et al.) 21 December 2018 (2018-12-21)<br>entire document                                                                   | 1-12                  |



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  
 "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

17 March 2022

Date of mailing of the international search report

29 March 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

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

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

**PCT/CN2021/143463****C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                   | Relevant to claim No. |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 104915891 A (SUZHOU NUCLEAR POWER RESEARCH INSTITUTE et al.) 16<br>September 2015 (2015-09-16)<br>entire document | 1-12                  |
| A         | US 2010082318 A1 (KOREAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE et al.) 01<br>April 2010 (2010-04-01)<br>entire document   | 1-12                  |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2021/143463**

| Patent document<br>cited in search report |            |    | Publication date<br>(day/month/year) | Patent family member(s) |             |    | Publication date<br>(day/month/year) |
|-------------------------------------------|------------|----|--------------------------------------|-------------------------|-------------|----|--------------------------------------|
| CN                                        | 113297727  | A  | 24 August 2021                       | None                    |             |    |                                      |
| CN                                        | 111814337  | A  | 23 October 2020                      | None                    |             |    |                                      |
| CN                                        | 109064035  | A  | 21 December 2018                     | None                    |             |    |                                      |
| CN                                        | 104915891  | A  | 16 September 2015                    | None                    |             |    |                                      |
| US                                        | 2010082318 | A1 | 01 April 2010                        | KR                      | 20100036083 | A  | 07 April 2010                        |
|                                           |            |    |                                      | KR                      | 100962278   | B1 | 11 June 2010                         |
|                                           |            |    |                                      | US                      | 8340947     | B2 | 25 December 2012                     |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/143463

## A. 主题的分类

G06F 30/20 (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

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))

WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 概率, 安全, 分析, 核电厂, 防火, 电缆, 模型, 清单, 定量, 识别, 模化, 保护, 防护, 包覆, 包裹, 剔除, 分区, 二次风险, 阈值, 事件树, 故障树, 隔间, 边界, 关联, 频率, 电路, 人员, 可靠性, PSA, probability, safety, analy+, nuclear power plant, fire, protect+, cable, model+, list, quantification, identify+, clading, wrap+, reject+, zon+, secondary risk, threshold, event tree, fault tree, compartment, boundary, associat+, frequency, circuit, personnel, reliability

## 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 113297727 A (中国核电工程有限公司) 2021年8月24日 (2021 - 08 - 24)<br>权利要求1-11, 说明书第[0038]-[0140]段, 图1      | 1-12    |
| A    | 孙凤 等. “关于核电厂火灾概率风险的研究”<br>《原子能科学技术》, 第05期, 2017年5月31日 (2017 - 05 - 31),<br>第872-878页             | 1-12    |
| A    | CN 111814337 A (上海核工程研究设计院有限公司) 2020年10月23日 (2020 - 10 - 23)<br>全文                               | 1-12    |
| A    | CN 109064035 A (苏州热工研究院有限公司 等) 2018年12月21日 (2018 - 12 - 21)<br>全文                                | 1-12    |
| A    | CN 104915891 A (苏州热工研究院有限公司 等) 2015年9月16日 (2015 - 09 - 16)<br>全文                                 | 1-12    |
| A    | US 2010082318 A1 (KOREAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE 等) 2010年4月1日<br>(2010 - 04 - 01)<br>全文 | 1-12    |

☐ 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

“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

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2022年3月17日

国际检索报告邮寄日期

2022年3月29日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

李敏

电话号码 86-(10)-53961526

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/143463

| 检索报告引用的专利文件 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利 |             |    | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|----|----------------|------|-------------|----|----------------|
| CN          | 113297727  | A  | 2021年8月24日     | 无    |             |    |                |
| CN          | 111814337  | A  | 2020年10月23日    | 无    |             |    |                |
| CN          | 109064035  | A  | 2018年12月21日    | 无    |             |    |                |
| CN          | 104915891  | A  | 2015年9月16日     | 无    |             |    |                |
| US          | 2010082318 | A1 | 2010年4月1日      | KR   | 20100036083 | A  | 2010年4月7日      |
|             |            |    |                | KR   | 100962278   | B1 | 2010年6月11日     |
|             |            |    |                | US   | 8340947     | B2 | 2012年12月25日    |