基于离散动态事件树的风险指引的 安全裕度分析方法研究

陈妍,李朝君,张 盼,赵传奇,郑 洁,韩 治*,李 春,依 岩

摘要:风险指引的安全裕度是近十年来核工业界提出的新的安全理念。本文阐述了基于离散动态事件 树的风险指引的安全裕度分析方法,给出该方法下核燃料包壳失效概率均值和标准差的数学表达式。 针对简化压水堆模型下的全厂断电事故,提出了基于离散动态事件树的风险指引的安全裕度计算流程, 计算了两种离散动态事件树分支规则下燃料包壳失效的风险指引的安全裕度及其不确定性。计算结果 表明,不同的分支规则、模型参数分布、系统程序最大时间步长对核燃料包壳失效概率均值和标准差均 有显著影响。提出了一种改进的可变概率阈值的分支方法,以更好地平衡风险指引的安全裕度分析过 程中计算精度与计算资源的匹配问题。

关键词:风险指引的安全裕度;离散动态事件树;分支规则

中图分类号:TL364 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2022)09-1944-08 doi:10.7538/yzk.2022.youxian.0206

Research on Analysis Method of Risk-informed Safety Margin Based on Discrete Dynamic Event Tree

CHEN Yan, LI Chaojun, ZHANG Pan, ZHAO Chuanqi, ZHENG Jie, HAN Zhi*, LI Chun, YI Yan

(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecological Environment, Beijing 102400, China)

Abstract: Risk-informed safety margin is a new safety concept of nuclear power industry in recent ten years. By quantifying the risk-informed safety margin, it may provide a new technical idea to support the management decisions for nuclear power plant life extension, long-term operation, power uprate and some other safety problems. Methodologically, the calculation method of risk-informed safety margin is to generate a series of risk-based scenarios according to the state of knowledge, use the system model to calculate the specific safety parameters value of each scenario, then analyze the relationship between the load and capacity distribution of the safety parameters, and statistically calculate the probability that the load exceeds the capacity of safety parameters. There are several methods to generate the scenarios, which include Monte Carlo method,

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1900305)

discrete dynamic event tree method, combination of Monte Carlo and discrete dynamic event, adaptive sampling and so on. The analysis method of risk-informed safety margin based on the discrete dynamic event tree was described in this paper, which can better reflect the time characteristics of accident evolution. The mathematical expressions of mean and standard deviation of failure probability of nuclear fuel cladding were proposed. Under the simplified pressurized water reactor (PWR) model, the process of risk-informed safety margin for station black out accident based on discrete dynamic event tree was proposed, then the mean value and uncertainty of nuclear fuel cladding failure probability under two kinds of branching rules were calculated. The influence of the branching rules, key model parameter distribution and maximum time step of system program were analyzed. The calculation results show that the risk-informed safety margin can be automatically calculated by the discrete dynamic event tree method and computer programming for specific safety parameters, the distribution of key parameters and the setting of system program have a significant impact on the mean value of failure probability of fuel cladding. With different branching rules, the calculation results of the mean value of fuel cladding failure probability are different. The finer the branching is, the smaller the mean value of fuel cladding failure probability is, the longer running time and the larger storage space of computer are required. Finally, an improved branch method of variable probability threshold was proposed to balance the matching problem between calculation accuracy and calculation resources. It is necessary to further study the uncertainty evaluation of the calculation method for risk-informed safety margin, the verification of the calculation results and the improved efficiency algorithm to balance the calculation accuracy and resources.

Key words: risk-informed safety margin; discrete dynamic event tree; branching rule

2012年,美国爱达荷国家实验室(INL)发 布了轻水堆可持续发展项目的综合计划^[1],以 响应美国能源部核能办公室 2010 年发布核能 研发路线图中的目标"开发能够提高可靠性、维 持安全性和延长现有反应堆寿命的技术和其他 解决方案"。综合计划中给出4个研发方向:核 材料老化和退化、先进轻水反应堆燃料开发、先 进仪控技术以及风险指引的安全裕度特性 (RISMC)分析技术。RISMC 分析技术的目的 是量化安全裕度,尽可能使安全裕度最优化以 及不确定性最小化,进而保障轻水堆在运期间 (尤其是延寿期间)的安全性和经济性都在高的 水平。RISMC 分析技术的计算方法是采用现有 知识产生一系列基于风险的情景,利用系统模型 计算系列情景下的特定安全性能参数,然后比较 分析各情景下安全性能参数负载和能力分布的 关系,最后统计计算系列情景下安全性能参数的 负载大于能力的概率。本质上,RISMC分析技 术是一种计算式的风险评估(CRA)方法^[2],其集成分析一系列概率情景及情景下的物理参数信息,这种多情景计算式方法可能对现有核电站的 某些安全问题提出新的解决方案。

目前美国 INL 已基本建成了 RISMC 的计 算平台,并开展了试点案例的分析计算^[3-4]。法 国电力研究所^[5]、韩国原子能研究所等机构陆 续开展了有关风险指引的安全裕度研究,我国 近几年也开展了有关风险指引的安全裕度分析 方法的研究^[6-9]。但整体上,风险指引的安全裕 度分析的案例尚少,其理论方法及实践分析需 进一步深入研究和完善。离散动态事件树 (DDET)是 RISMC 中产生风险情景的常用方 法之一,本文研究基于 DDET 的风险指引的安 全裕度分析方法,针对简化压水堆模型下的全 厂断电事故,利用 Python 和系统热工水力程 序计算两种 DDET 分支规则下的燃料包壳失 效的风险指引的安全裕度及其不确性,然后探 讨分支规则、模型参数分布、系统程序内置参数设置对燃料包壳失效的风险指引的安全裕度的影响,进一步提出一种改进的可变概率 阈值的分支方法,以更好地平衡风险指引的 安全裕度分析过程中的计算精度与计算资源 的匹配问题。

1 基于 DDET 的风险指引的安全裕度 分析方法

1.1 风险指引的安全裕度分析方法

裕度有确定性裕度和概率性裕度两种表征 方法。确定性裕度通常定义为安全变量的能力 (Capacity)与负载(Load)的差值或比值,概率 性裕度通常定义为负载超过能力的概率。目前 核电站中的安全分析大多数采用确定性裕度表 征安全裕度,而风险指引的安全裕度分析技术 采用概率性裕度来量化安全裕度,是近十年来 核工业界提出的新的安全理念,其期望通过量 化的概率性裕度避免不必要的保守性,为核电 站延寿、长期运行以及扩展功率等有关安全裕 度的管理决策提供必要的技术支持。

风险指引的安全裕度分析框架如图1所 示,其利用失效模式、运行规则等信息产生各种 情景以及相应的情景参数,然后将各情景参数 传递给系统程序(如物理、热工等系统程序),系 统程序计算的过程物理参数也动态反馈给情景 进行分支,最后计算出任务时间内各种情景下 安全变量特性及情景概率,并用统计计算安全 变量的安全裕度及其不确定度,进一步做出管 理决策。风险指引的安全裕度的计算在具体实 现时,需要通过搭建计算平台或开发计算程序, 编程自动产生各种情景参数,计算每个情景的 发生概率,采用系统程序计算每个情景下的重 要物理/热工参数数值,并判断每个情景下计算 的重要参数是否失效及计算每个情景下条件失 效概率,最后统计计算风险指引的安全裕度用 于管理决策。需要指出的是,风险指引的安全 裕度分析方法中的安全变量需根据特定问题设 置(如燃料包壳温度、燃料包壳应力、燃料包壳 氧化物厚度等)。此外,风险指引的安全裕度也 称为概率安全裕度^[4]。目前风险指引的安全裕 度分析方法中常用的情景产生方法有蒙特卡罗 抽样方法、DDET 方法、混合蒙特卡罗动态事件 树等。本文研究基于 DDET 的风险指引的安全裕度分析方法。



图 1 风险指引的安全裕度的分析框架 Fig. 1 Framework of risk-informed safety margin analysis

1.2 基于 DDET 的风险指引的安全裕度的量化

DDET 是一种在离散时间轴上模拟和追踪系统在其任务时间内的所有可能的系统状态演化轨迹的方法,能够给出系统的连续变量与离散变量(硬件状态、人因干预等)之间随时间的演变。假设某系统状态由n个离散变量描述,分别设为 $k_1,k_2,...,k_n$,同时系统有m个连续参数变量,分别设为 $x_1,x_2,...,x_m$, t时刻系统的状态可表示为 $S(K_t,X_t,t)$,其中 $K_t = (k_1,k_2,...,k_n | t)为t$ 时刻系统离散变量取 值组合, $X_t = (x_1,x_2,...,x_m | t)$ 为系统在t时刻 各连续变量的取值组合,初始时刻系统的状态 为 $S(K_0, X_0, t)$,则连续变量与离散变量之间 的关系满足微分方程:

$$\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} = f_{K_{\tau}}(X,\tau) \tag{1}$$

其中:X 为系统的连续变量; f_{K_r} 为 τ 时刻离散 变量为 K_r 的微分方程; K_r 为 τ 时刻的系统离 散变量。 $X_t = g_{K_r}(t - \tau, X_r)$ 为式(1)的解,表示 τ 时刻系统的离散变量和连续变量分别为 K_r 和 X_r ,经历了 $t - \tau$ 时间后,系统的连续变量变 为 X_t 。DDET 的工程应用建模示意图如图 2 所示,即由离散变量在特定时刻产生分支,利用 系统方程得到在时刻t系统的连续变量 X_t ,同 时利用各分支节点处的概率可得到 X_t 的概 率。因此,DDET 能够模拟系统在任务时间内 的所有可能的系统状态并给出所有系统状态概 率的特性,满足风险指引的安全裕度分析的计 算需求。



图 2 DDET 工程建模示意图 Fig. 2 Schematic diagram of DDET modeling

本文研究基于 DDET 的压水堆燃料包壳 温度这一连续安全变量的风险指引的安全裕 度。假设 DDET 方法下任务时间内产生 n 个 事故情景,每个事故情景的概率为 p_i,每个事 故情景下燃料包壳温度的计算值为 x_i,则每个 情景下的燃料包壳失效概率 y_i 为:

$$y_i = \int_{x_0}^{x_i} f(x) \mathrm{d}x \tag{2}$$

其中:f(x)为燃料包壳失效的能力分布;x。为 燃料包壳失效能力分布中的温度下限值。本文 关注燃料包壳失效概率的均值和标准差,燃料 包壳失效的概率均值 ӯ为:

$$\overline{y} = \sum_{i=1}^{n} (p_i \times y_i)$$
(3)

燃料包壳失效概率的样本标准差 s 为:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (p_i \times (y_i - \overline{y})^2)}$$
(4)

式(3)计算的燃料包壳失效概率均值即为 一系列事故情景下的燃料包壳温度的风险指引 的安全裕度,燃料包壳失效概率的样本标准差 定量表征了燃料包壳失效概率的不确定性。值 得注意的是,在风险指引的安全裕度分析方法 中,研究对象和问题不同,安全变量的风险指引 的安全裕度数学表达式也会有差异,具体分析 中需要根据特定的研究问题给出特定的风险指 引的安全裕度计算方法。

2 全厂断电事故的风险指引的安全裕 度分析计算

2.1 热工模型及计算假设

参考 INL 在 RISMC 研究中有关简化压水

堆模型下全厂断电事故(SBO)参数^[10],本文建 立了简化核电站的热工水力模型节点图,如 图 3所示,其模化了反应堆压力容器的下降通 道、下封头、堆芯和上腔室,堆芯部分的 3 个平 行的燃料通道和 1 个旁通通道,两个主环路(每 个环路由热管段、1 个热交换器及其二次侧管 段、冷管段和 1 个主泵组成)以及稳压器。本文 建模假设与 INL 的建模假设存在不同:1)本文 假设主泵惰转,而 INL 假设电站发生 SBO 后 主泵转速立即为 0,应急柴油机(DG)恢复后, 主泵又有一定转速;2) 冷却剂流量、换热器面 积少量参数不同。



在此简化压水堆模型下,SBO 事故的情景 是 200 s 的瞬态开始,201 s 厂外电丧失,核电 站立即停堆,随后主泵惰转,DG 失效,造成冷 却系统不可用,丧失热阱。假设 DG 的恢复时 间(单位为 s)服从正态分布 Normal(2 900, 200),若 DG 在 t 时刻恢复,冷却系统可用。此 外,假设燃料包壳失效温度(单位为 K)服从 Triangular(1 255.37,1 477.59,1 699.82)的三 角分布^[11]以及任务时间为 3 600 s。

2.2 计算流程

为计算一系列事故情景下核燃料包壳失效 的风险指引的安全裕度,本文提出基于 DDET 的风险指引的安全裕度的计算流程,如图 4 所 示,其中关键参数是 DG 的恢复时间 t,用于产 生不同的事故情景,采用 Python 程序及树结 构产生事故情景分支,并调用系统热工水力程 序计算每个情景下的燃料包壳温度,最后统计 计算核燃料包壳温度超过燃料包壳失效温度的 及人误事件等。

概率及其不确定度。鉴于本文关注 DDET 方 法对计算结果的影响,因此选择了简化的事故 情景进行风险指引的安全裕度分析,即计算中 只考虑 DG 在不同恢复时间的需求失效,暂不 考虑外电网和辅助电网在不同恢复时间的需求 失效,也不考虑核电站其他系统的随机失效以





Fig. 4 Calculation process of risk-informed safety margin based on DDET

2.3 两种常用 DDET 分支规则下的风险指引 的安全裕度分析

采用 DDET 常用的等时间步长分支和等 概率阈值分支两种分支规则进行 DDET 分支 计算,其中等时间步长分支是指以特定时间步 长等间隔分支,等概率阈值分支是指每个分支 概率相同。本实例采用 DG 的恢复时间分布产 生不同的事故情景,即在 DDET 分支规则中的 分支概率由 DG 的恢复时间分布的累积分布给 出,等时间步长分支和等概率阈值分支示意图 如图 5 所示,计算中不考虑概率截断,终态规则 是运行到任务时间结束。

在等时间步长分支规则下,假设 DDET 等 时间步长为 100 s(图 5a),即 DDET 在 DG 恢 复时间(单位为 s)为[2 600.0,2 700.0,2 800.0, 2 900.0, 3 000.0, 3 100.0, 3 200.0, 3 300.0, 3 400.0 的时间节点分支,各分支节点对应的 累积分布概率为「0.067,0.158,0.308,0.5, 0.691,0.841,0.933,0.977,0.994],则各分支 的情景概率 $P(t_{i-1} < t < t_i)$ 为 [0.067, 0.091,0. 15, 0. 192, 0. 191, 0. 15, 0. 092, 0. 044, 0. 017] 计算 10 个情景下(其中 DG 恢复的有 9 个情 景,任务时间内 DG 未恢复的有1个情景)的最 大燃料包壳温度(单位为K),分别为[1244.6, 1 244.6,1 277.0,1 311.8,1 349.1,1 378.7, 1 413.2,1 438.2,1 459.8,1 508.0],各情景下 的燃料包壳温度如图 6 所示。本计算实例中的 系统热工水力程序的最大时间步长为 5×10^{-4} s, 计算机配置为 32 核,处理器为 2.10 GHz。

采用式(2)计算各情景下的燃料包壳失效 概率,进而使用式(3)、(4)计算得到平均燃料包



壳失效概率及其标准差分别为 <u>y</u>=0.096,s=0.111。



under each scenario

在等概率阈值分支规则下,假设 DDET 等 概率阈值间隔为 0.1,即累积概率阈值为[0.1, 0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9],概率阈 值对应的 DG 恢复时间(单位为 s)为[2 644, 2 732,2 795,2 849,2 900,2 951,3 005,3 068, 3 156]。分别计算 10 个情景下的最大燃料包 壳温度(单位为 K),分别是[1 244.6,1 250.7, 1 260.0,1 293.7,1 312.5,1 332.5,1 335.4, 1 362.0,1 399.6,1 507.8],计算得到等概率阈 值下平均燃料包壳失效概率及其标准差分别为 $\bar{y}=0.1125,s=0.182$ 。 可以看到,等时间步长分支和等概率阈值 分支规则不同,平均燃料包壳失效概率存在约 30%的差异。在工程实际应用中,可根据特定 的计算需求选择合适的分支规则,如若关注关 键参数(如操作员动作时间等)的等时间分支特 性的计算结果,则采用等时间分支规则,若无等 时间分支特性分析需求,等概率阈值分支规则 可以更好地依据关键参数累积概率分布进行累 积概率的均匀分支。此外,理论上可以计算更 多的分支点,但主要限于计算资源的限制,本文 分支个数设在10 的量级。

3 影响因素分析

3.1 等时间步长分支规则

在等时间步长分支规则计算中考虑如下因 素影响:1)将 DDET 中 DG 恢复的等时间步长 缩短至 80 s,即 DG 恢复时间(单位为 s)为 [2 600, 2 680, 2 760, 2 840, 2 920, 3 000, 3 080, 3 160, 3 240, 3 320, 3 400, 3 480]; 2)将 DDET 中 DG 恢复的等时间步长延长至 150 s, 即 DG 恢复时间(单位为 s)为[2 600, 2 750, 2 900, 3 050, 3 200, 3 350, 3 500]; 3) DG 恢复 时间分布变为 Normal(3 000, 200); 4) DDET 根节点计算中的系统热工水力程序的最大时间 步长修改为 5×10⁻³ s,各种不同因素下的燃料 包壳失效概率均值列于表 1。

表 1 等时间步长分支规则下燃料包壳失效概率均值的影响因素分析 Table 1 Analysis of factor affecting mean value

of fuel clauding	tanure probability under equal	time step b	ranching rule	
影的国事	白吉止盐椰麦护店	左 米 米	写行时间/ :	ちん

影响因素	包壳失效概率均值	标准差	运行时间/min	存储需求/GB
DDET 时间步长 100 s	0.096	0.111	316	48.9
DDET 时间步长延长至 150 s	0.103	0.109	266	32.6
DDET 时间步长缩短至 80 s	0.088	0.109	372	81.5
DG恢复时间分布变为 Normal(3 000,200)	0.153	0.140	320	48.9
系统程序最大时间步长 5×10 ⁻³ s	0.173	0.182	259	26.5

上述计算表明,DDET 的分支时间步长越 小,计算的分支越多,计算的燃料包壳失效概 率均值越小,运行时间越长及存储需求越大。 同时,关键参数分布和系统程序设置不同对 燃料包壳失效概率均值有显著影响,因此也 需要关注关键分布及系统程序参数设置的合 理性。

3.2 等概率阈值分支规则

在等概率阈值分支规则计算中考虑如下因 素影响:1) DDET 等概率间隔置为 0.2, 即累积 概率阈值为[0.2, 0.4, 0.6, 0.8]; 2) 增加累积 概率为 0.05 和 0.95 的概率阈值, 即 DDET 分 支处的累积概率阈值为[0.05,0.1,0.2,0.3, 0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,0.95];3) DG 恢复 时间分布变为 Normal(3 000,200);4) DDET 根节点计算中系统热工水力程序最大时间步长 修改 5×10⁻³ s。各种不同因素下的燃料包壳 失效概率均值列于表 2。

表 2 等概率阈值分支规则下燃料包壳失效概率均值的影响因素分析 Table 2 Analysis of factor affecting mean value of fuel cladding failure probability under equal probability threshold branching rule

影响因素	燃料包壳失效概率均值	标准差	运行时间/min	存储需求/GB
等概率间隔为 0.1	0.112	0.182	305	48.8
等概率间隔为 0.2	0.162	0.237	188	13.8
增加 0.05 和 0.95 概率分支	0.093	0.144	374	67
DG恢复时间分布变为 Normal(3 000,200)	0.161	0.180	316	50.1
系统程序最大时间步长 5×10^{-3} s	0.193	0.256	239	26.1

等概率阈值分支规则计算表明,DDET的 等概率间隔越小,计算的分支越多,计算的燃料 包壳失效概率均值越小,运行时间越长及存储 需求越大。关键参数分布和系统程序设置的影 响,与等时间分支规则下的计算结果类似,两者 也对燃料包壳失效概率均值有显著影响。

3.3 改进的分支规则方法

可以看到,DDET的分支规则不同,燃料包 壳失效概率均值的计算结果不同,分支越细致, 计算结果越小,但需要的运行时间越长和存储 空间越大。本文尝试寻找一种更好平衡风险指 引的安全裕度计算中计算精度与计算资源匹配 的分支规则方法。风险指引的安全裕度在数学 上是计算负载分布与能力分布的重合概率,即 负载上限分布对概率安全裕度的影响更大,负 载下限对概率安全裕度的影响相对较小。本文 提出一种可变的概率阈值分支方法,即在关键 参数的 DDET 分支讨程中,低概率累积分布区 间的分支概率间隔相对大,高概率累积分布区 间的分支概率间隔相对小。此外,本文特定问 题下,若事故情景下计算的燃料包壳温度低于 燃料包壳失效能力分布中的温度下限值,此情 景下的燃料包壳失效概率为 0,则在计算燃料 包壳失效均值时,其对均值的贡献也是0。因 此,可以采用 DDET 根节点(DG 一直未恢复) 燃料包壳温度信息和燃料包壳失效能力分布中 的温度下限值确定温度下限值对应的 DG 恢复 时间,再用 DG 恢复时间和 DG 恢复时间分布, 计算此 DG 恢复时间下的累积概率。选择比此 累积概率略小的概率作为 DDET 计算的概率 阈值起点,这样可适当减少不必要的 DDET 分 支计算及相应的计算资源。

可变的概率阈值分支方法下,设累积概率 阈值为[0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9, 0.95,0.99],概率阈值对应的 DG 恢复时间(单 位为 s) 为 [2 732, 2 795, 2 849, 2 900, 2 951, 3 005,3 068,3 156,3 229,3 365],计算得到平 均燃料包壳失效概率及标准差分别为 0.086 和 0.118,运行时间和存储需求分别为 327 min 和 60.3 GB。若设累积概率阈值为[0.2,0.3,0.4, 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,0.95,0.99,0.9997,概 率阈值对应的 DG 恢复时间(单位为 s)为 [2 732, 2 795, 2 849, 2 900, 2 951, 3 005, 3 068, 3 156,3 229,3 365,3 518, 计算得到平均燃料包 壳失效概率及标准差分别为 0.085 和 0.116,运 行时间和存储需求分别为 350 min 和 72.4 GB。 可以看到,恰当的分支规则可以提高计算效率, 更好地平衡风险指引的安全裕度分析过程中的 计算精度与计算资源的匹配问题。

4 结论与建议

本文研究了基于 DDET 的风险指引的安 全裕度计算方法,针对简化压水堆模型下的 SBO事故,利用 Python 程序计算了两种 DDET 分支规则下燃料包壳失效的风险指引的安全裕 度及其不确定性,分析了分支规则、模型参数分 布、系统热工水力程序内置参数设置对风险指 引的安全裕度的影响。计算结果表明:1)基于 DDET 的风险指引的安全裕度计算方法能够通 过计算机编程自动大量的分支方法给出不同的 事故情景后果和概率,进而定量统计给出特定 问题的风险指引的安全裕度;2)计算关键参数 分布和系统程序设置不同对燃料包壳失效概率 均值有显著影响;3)分支规则不同,燃料包壳 失效概率均值的计算结果不同,分支越细致,计 算的燃料包壳失效概率均值越小,需要的运行 时间越长和存储空间越大;4)可变的概率阈值 分支方法能够更好地平衡风险指引的安全裕度 计算中的计算精度与计算资源的匹配问题。

随着计算机软硬件的快速发展以及先进算 法的持续改进,核电安全分析中计算式的风险 指引的安全裕度分析方法可能会更深入的实 践,但在广泛应用此方法之前,需要更深入地研 究此方法的不确定性评估、计算结果的验证以 及能够有效提高计算效率的算法等问题,以更 客观的辅助核电站在安全裕度方面的科学管理 决策。

参考文献:

- Light water reactor sustainability program integrated program plan, INL/EXT-11-23452 Revision 0[R]. USA: Idaho National Laboratories, 2012.
- [2] Risk-informed applications and science past, present, & future, INL/MIS-20-57017-Revision-0[R]. USA: Idaho National Laboratories, 2020.
- [3] HESS S M, DINH N A M, GAERTNER J P, et al. Risk-informed safety margin characterization, ICONE17-75064[R]. [S. l.]: [s. n.], 2008.
- [4] Risk-informed safety margin characterization (RISMC) pathway technical program plan, INL/ EXT-17-43243[R]. USA: Idaho National Laboratories, 2017.
- [5] SHERRY R R, GABOR J R, HESS S M. Pilot

application of risk informed safety margin characterization to a total loss of feedwater event[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 117: 65-72.

- [6] 杜芸,李焕鑫,梁国兴. 基于 RISMC 方法论的核 电厂小幅功率提升风险响应的量化评估[J]. 核 科学与工程,2020,40(3):383-394.
 DU Yun, LI Huanxin, LIANG Guoxing. Quantitative evaluation of the impact of small power uprate on significant SBO sequence on RISMIC methodology[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(3): 383-394(in Chinese).
- [7] 郑玉涛.风险告知的 PCT 安全裕度量化中认知 不确定性处理方法研究[D].上海:上海交通大 学,2018.
- [8] 孔焕俊,刘子寅,徐安琪,等. 基于 RAVEN 的 SGTR 事故概率安全裕度分析方法研究[J]. 核 动力工程,2021,42(6):120-127.
 KONG Huanjun, LIU Ziyin, XU Anqi, et al. Research on probabilistic safety margin analysis method of SGTR based on RAVEN[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(6):120-127(in Chinese).
- [9] 王贺,孙大彬,徐安琪,等. 核电厂风险指引的安 全裕度特性技术研究[J]. 中国基础科学,2021, 23(4):35-40.
 WANG He, SUN Dabin, XU Anqi, et al. Research on risk informed safety margin characteristics technology of nuclear power plant[J]. China Basic Science, 2021, 23(4): 35-40(in Chinese).
- [10] Deployment and overview of RAVEN capabilities for a probabilistic risk assessment demo for a PWR station blackout, INL/EXT-13-29510[R].
 [S. l.]: [s. n.], 2013.
- [11] ALFONSI A, RABITI C, MANDELLI D, et al. Dynamic event tree through RAVEN, INL/ CON-13-29344[R]. [S. l.]: [s. n.], 2013.