



适用于三级概率安全评价的核反应堆实时风险计算方法

成 杰, 唐秀欢, 陈珊琦, 汪 进, 李亚洲, 李 杰, 王 芳, 蒋洁琼

An Instantaneous Method for Reactors Risk Calculation Applies to Level Three Probabilistic Safety Assessment

Cheng Jie, Tang Xiuhuan, Chen Shanqi, Wang Jin, Li Yazhou, Li Jie, Wang Fang, and Jiang Jieqiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.01.0124>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

概率安全评价在核能安全分析领域的应用和发展

Evaluation and Application of Probabilistic Safety Assessment in Nuclear Energy Safety Analysis

核动力工程. 2020, 41(6): 1-7

核反应堆工业控制系统与企业信息系统互联安全防护体系研究

Research on Interconnection Security Protection System of Nuclear Reactor Industrial Control System and Enterprise Information System

核动力工程. 2020, 41(2): 173-177

西安脉冲堆概率安全分析技术要点及分析框架研究

Study on Key Techniques and Framework of Probabilistic Safety Assessment in Xi'an Pulsed Reactor

核动力工程. 2018, 39(3): 100-106

核电厂地震PSA中的风险量化研究

Research of Quantification Method of Risk in Seismic Probabilistic Safety Analysis in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2021, 42(3): 145-150

西安脉冲堆满功率运行工况内部事件二级概率安全分析

Internal Initiating Event Level 2 Probabilistic Safety Assessment during Full Power Operation of Xi'an Pulsed Reactor

核动力工程. 2019, 40(2): 80-84

基于RAVEN的SGTR事故概率安全裕度分析方法研究

Research on Probabilistic Safety Margin Analysis Method of SGTR Based on Raven

核动力工程. 2021, 42(6): 120-127



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)01-0124-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.01.0124

适用于三级概率安全评价的核反应堆 实时风险计算方法

成 杰^{1,2}, 唐秀欢³, 陈珊琦^{4*}, 汪 进^{4,5}, 李亚洲⁴,
李 杰⁴, 王 芳⁴, 蒋洁琼¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所, 合肥, 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥, 230027;
3. 西北核技术研究所, 西安, 710024; 4. 中子科学国际研究院, 山东青岛, 266199; 5. 三峡大学, 湖北宜昌, 443002

摘要: 风险监测是反应堆安全监管与核应急决策的重要技术基础。面向核反应堆实时风险的三级概率安全评价 (PSA) 提出改进的实时风险计算方法, 解决传统风险监测器重点集中在一级 PSA 的堆芯熔毁频率 (CDF) 计算的问题。针对反应堆运行时的实际系统配置, 通过实时风险模型与在线状态监测进行实时事故频率计算, 并采用放射性释放事故分类与实时气象下大气扩散方式分别实现了事故源项与场外剂量的实时计算。反应堆风险模型的计算案例验证了本研究方法与流程的有效性, 该方法不仅支持堆芯熔毁实时风险计算, 而且支持源项释放实时风险与场外剂量实时风险的计算, 可为核反应堆安全监管与核应急提供技术支持。

关键词: 核反应堆; 风险监测; 概率安全评价 (PSA); 安全监管; 核应急

中图分类号: TL36 **文献标志码:** A

An Instantaneous Method for Reactors Risk Calculation Applies to Level Three Probabilistic Safety Assessment

Cheng Jie^{1,2}, Tang Xiuhuan³, Chen Shanqi^{4*}, Wang Jin^{4,5}, Li Yazhou⁴,
Li Jie⁴, Wang Fang⁴, Jiang Jieqiong¹

1. Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei, 230027, China; 3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024, China; 4. International Academy of Neutron Science, Qingdao, Shandong, 266199, China;
5. China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002, China

Abstract: Risk monitor is a very important technical basis for nuclear reactor safety supervision and nuclear emergency decision-making. Conventional risk monitors only support the core meltdown risk calculation based on the level-1 probabilistic safety assessment. Focusing on the real-time risk monitoring of reactor based on the level-3 probabilistic safety assessment, an improved method is proposed in this paper for risk calculation. For the actual configuration of reactor operation, the accidents frequencies are calculated based on real-time risk model and on-line condition monitoring, and supports the real-time calculation of released source term and off-site dose by accident categorization and dose factors. The case study of reactor risk model shows the effectiveness and provides instantaneous calculation for core damage frequency, large release frequency and off-site risk. The proposed method can provide technical support for nuclear reactor safety regulation and nuclear emergency.

Key words: Nuclear reactor, Risk monitoring, Probabilistic safety assessment, Safety regulation, Nuclear emergency

收稿日期: 2022-02-17; 修回日期: 2022-06-12

基金项目: 国家自然科学基金 (72001201; 71671179; 51805511)

作者简介: 成 杰 (1983—), 男, 工程师, 现从事核安全监管方面研究, E-mail: 13811739593@139.com

*通讯作者: 陈珊琦, E-mail: shanqi.chen@fds.org.cn

0 引言

为确保核设施的安全，国家核安全监管机构依据相关法律法规实施核安全监督管理，主要包括核安全许可管理、定期安全评价、辐射防护管理、核应急准备与响应等方式。其中，定期安全评价、辐射防护管理、核应急准备与响应都包含核反应堆事故风险实时监测与评价的内容。定期安全评价一般针对在运核设施，例如定期的堆芯熔毁评价等。辐射防护管理、核应急准备与响应则需要场外剂量风险评价的支持，特别是核应急准备与响应对实时性要求比较高。

由于核反应堆具有高度复杂性且堆芯长期处于高温与强放射性环境，难以确切掌握熔堆事故的演化进程，这给核事故源项评估带来了很多困难^[1]。事故前后的气象变化，也使公众辐射剂量计算受到很多场外因素的影响^[2-3]，给核安全监管与应急管理决策带来了挑战^[4-5]。核反应堆实时风险监测是风险指引型安全监管与决策的重要技术基础。近年来，国内外实时风险监测研究已经逐渐成熟^[6-8]，风险监测器的应用越来越广泛^[9-10]。然而，传统核反应堆风险监测器采用的是基于一级概率安全评价（PSA）的监测方式，只能提供堆芯熔毁频率（CDF）分析以及维修优化数据等与核电运行管理直接相关的信息^[11-12]，无法基于反应堆实际运行时的系统配置和设备状态，提供反应堆的放射性源项释放风险、场外剂量风险等信息，这也是目前亟需解决的问题之一^[13]。

本文面向核反应堆实时风险监测，基于三级 PSA、实时风险监测等方法及其在西安脉冲堆等核反应堆中的应用研究^[14-16]，将现有风险监测器与核应急辐射场在线计算技术相结合，提出一种适用于三级概率安全评价的核反应堆实时风险计算方法，开展了同时支持堆芯熔毁风险、放射性源项释放风险以及场外剂量风险等一级、二级与三级 PSA 的实时在线风险计算，为核反应堆安全监管与核应急管理决策提供支持。

1 适用于三级 PSA 的风险计算方法

1.1 适用于三级 PSA 的实时风险监测框架与计算流程

无论是定期安全评价还是实时风险监测中，风险分析都包括事故后果分析与事故频率分析 2

方面。不同的反应堆熔堆事故，其事故概率大小不同，向环境释放的放射性源项数量也有差异，这些与事故过程中核反应堆安全系统的响应情况有关。

在实时风险监测中，为了实现 CDF、放射性源项释放、场外剂量风险的实时计算，需要同时支持这三者的事故频率、事故后果的计算。为了减少不必要的计算重复，满足风险监测的实时要求，本文先提出一个适用于三级概率安全评价的实时风险监测的方法框架和计算流程，对 3 个级别 PSA 的计算过程与数据进行整合，然后分别介绍放射性源项释放风险以及场外剂量风险，即二级与三级 PSA 的实时在线风险计算；而一级 PSA 的 CDF 计算方法则采用与传统风险监测器一致的方法。本文按如下框架和步骤进行实时风险计算：

(1) 构建二级 PSA 实时风险模型，根据反应堆事故特性对严重事故的源项释放进行分类，风险模型中的每一个事故序列都对应着某一种源项释放分类。同时，根据事故分析给出源项释放分类的核素种类、数量以及释放时间等信息。

(2) 根据实时风险模型与反应堆实际运行配置，计算 CDF 以及每一种源项释放分类对应的事故序列频率。

(3) 在源项基础上，根据大气扩散、实时气象数据以及剂量公式，计算出每一种源项释放分类对应的场外剂量。

(4) 给出放射性源项释放的实时数据表；根据场外剂量与对应气象条件频率，绘制场外剂量实时风险图。

1.2 放射性源项释放的实时风险计算方法

传统精确计算需要采用热工水力、气体扩散等建模分析程序，难以保证实时性。本文根据源项释放模式、时间、核素类型与数量等进行源项释放事故分类，以支持放射性源项释放的实时风险计算。其中，每一个分类有着不同的核反应堆安全系统响应并分别与风险模型中的事故序列相对应，由此可以根据模型计算每一个分类的事故频率，从而计算其实时风险。

首先，构造二级 PSA 实时风险模型表示反应堆实际运行时的模式及系统部件配置状态，并

用于放射性释放事故的频率计算。按照堆芯熔毁后的放射性源项释放模式及其事故后果,将实时风险模型的所有事故序列分为若干种源项释放类型,每种释放类型对应着一定的反应堆安全系统响应情况以及堆芯放射性核素在事故发生时的总积存量与事故中的释放量。然后,根据实时风险模型计算各个释放类型对应的事事故序列发生频率,并以堆芯放射性核素实时积存量和释放比例为基础,计算每一种源项释放类型的放射性核素活度量。其中,源项释放类型需要根据反应堆事故特性来进行划分,表1给出了一些典型的压水堆事故源项大量释放的类型,以及安全壳失效模式、释放时间等影响源项释放量的事故特点。

放射性源项释放的实时风险计算如式(1)所示。多个源项释放类型的风险可以加权求和得到,如式(2)所示,也可以分别绘制在一个二维的事故后果频率图上,以展示风险计算结果。

$$S_c = \left[\sum_i (B_{ci} \times L_{ci}) \right] \times \sum_j (F_{cj}) \quad (1)$$

$$S = \sum_c (S_c) \quad (2)$$

式中, S_c 为第 C 类型事故的放射性源项释放风险; B_{ci} 为第 C 类型事故中第 i 种堆芯核素的实时积存量; L_{ci} 为第 C 类型事故中第 i 种堆芯核素释放比例; S 为该反应堆总的放射性源项释放风险; F_{cj} 为第 C 类型事故中第 j 个事故序列频率。

1.3 场外剂量的实时风险计算方法

基准 PSA 采用反应堆所在地的年平均气象数据,以二级 PSA 的事故源项为基础,计算放射性物质在大气扩散中导致的公众所受辐射剂量、癌症、死亡等数据。

本文的场外剂量实时风险计算是基于前述放射性源项释放类型的计算结果,以气象观测或实时采集的风向、风力、大气稳定度等气象数据为

输入,采用大气扩散与场外辐射剂量的计算模型,按照瞬时释放或固定时间释放的原则,并根据不同核素的剂量因子计算得到场外剂量。场外剂量实时风险的计算公式为:

$$R_c = S_c P_c Y_c \quad (3)$$

$$R = \sum_c (R_c) \quad (4)$$

式中, R_c 为第 C 类型事故的场外剂量风险; P_c 为第 C 类型事故的扩散因子; Y_c 为第 C 类型事故的剂量因子; R 为总实时剂量风险。第 C 类型事故源项释放对应的场外剂量,可以是全身有效剂量、重点器官剂量等,基于该源项在场外特定距离、特定气象条件下的 P_c 、 Y_c 进行计算,可以是全身有效剂量、重点器官剂量等,这是该类源项释放类型导致的包络剂量。

为了更好地表示场外剂量风险,本文采用余补累积频率分布 (CCFD) 曲线表示场外特定地点的个人剂量值的超越频率。

2 反应堆风险计算与讨论

2.1 反应堆风险模型计算案例

为了对适用于三级 PSA 的风险监测方法进行应用和验证,本文采用西安脉冲堆为例进行计算,其功率为 2000 kW,实时风险模型包括约 10 个事件树、30 个故障树。在该模型中,事故源项释放类型按照事故进程、源项释放时间与释放份额可以分为 6 类 (RC01~RC06)。在稳态满功率运行模式下,所有系统部件正常运行,其放射性源项释放风险如表 2 所示。

在所有系统部件正常运行情况下,二级实时源项风险与基准风险相似。实时 CDF 与这些事故源项风险的计算时间都为数秒至十数秒,在核反应堆风险监测通常要求的 2 min 内,能够满足其实时风险计算要求。

表 1 源项释放类型及特点

Tab. 1 Release Categories and Characteristics

源项释放类型	事故特点
安全壳旁通	放射性源项直接从压力容器通过二回路系统或其他接口系统释放到环境中,在堆芯熔毁之前即发生了安全壳失效。早期释放
安全壳隔离失效	由于安全壳贯穿件系统或阀门等失效,导致放射性源项被释放到环境中。早期释放
事故导致的安全壳早期失效	发生堆芯熔毁事故之后,放射性源项通过严重事故导致的安全壳失效被释放到环境中。次早期释放
事故导致的安全壳中期失效	发生堆芯熔毁与压力容器破损之后,放射性源项通过严重事故导致的安全壳失效被释放到环境中。中期释放
事故导致的安全壳晚期失效	放射性源项通过严重事故导致的安全壳失效被释放到环境中,通常发生在熔堆事故 24 h 后。晚期释放

表 2 源项释放类型及核素组成
Tab. 2 Release Categories and Nuclides Composition

源项释放类型	放射性核素释放量/Bq						频率/a ⁻¹
	⁸⁸ Kr	¹³³ Xe	¹³¹ I	¹³⁷ Cs	¹²⁷ Te	⁹⁰ Sr	
RC01	1.53×10 ¹³	0.85×10 ¹⁴	7.85×10 ⁹	1.37×10 ¹⁰	0×10 ¹⁰	0×10 ⁹	4.80×10 ⁻⁶
RC02	3.95×10 ¹³	1.02×10 ¹⁴	5.57×10 ¹⁰	4.65×10 ¹⁰	0×10 ¹⁰	0×10 ⁹	9.24×10 ⁻⁸
RC03	6.23×10 ¹³	0.80×10 ¹⁴	1.30×10 ¹²	24.40×10 ¹⁰	0×10 ¹⁰	0×10 ⁹	4.33×10 ⁻⁹
RC04	2.43×10 ¹³	1.37×10 ¹⁴	1.19×10 ¹⁰	2.15×10 ¹⁰	2.24×10 ¹⁰	2.28×10 ⁹	1.25×10 ⁻⁸
RC05	6.36×10 ¹³	1.64×10 ¹⁴	8.98×10 ¹⁰	7.49×10 ¹⁰	8.44×10 ¹⁰	7.94×10 ⁹	2.40×10 ⁻¹⁰
RC06	13.4×10 ¹³	1.73×10 ¹⁴	2.80×10 ¹²	52.50×10 ¹⁰	62.90×10 ¹⁰	55.70×10 ⁹	1.35×10 ⁻⁸

随后计算 6 个放射性源项释放导致的厂区边界剂量，假设大气稳定度为 E，风速为 1 m/s，无降雨，反应堆边界为 100 m，农村地形。计算结果见图 1。剂量的计算时间一般为数秒，也符合实时风险监测的要求。

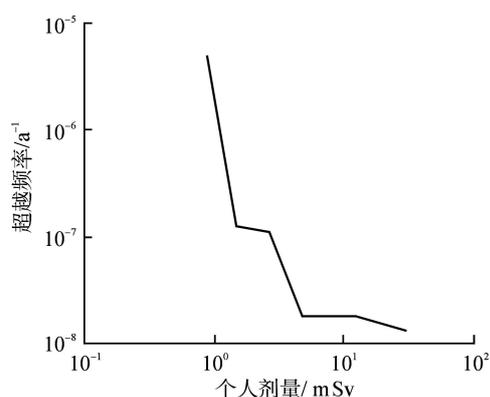


图 1 西安脉冲堆的实时场外剂量风险曲线
Fig. 1 Real Time Off-site Dose Risk of XAPR

2.2 讨论

2.1 节案例只给出了所有系统部件正常运行事故频率，但本文方法适用于其他的反应堆运行模式或配置下的事故频率计算。可以把运行模式与系统配置通过在线状态监测数据反映到实时风险模型中，然后按照风险监测的时间间隔要求，根据实时风险模型进行计算即可。本文计算案例为研究堆，计算量不大，但由于源项和场外剂量计算用时并不随系统的复杂而上升，因此从计算用时看，本文方法也能够满足核电厂等反应堆的核安全监管与核应急决策的实时计算需求。

案例中的场外剂量计算仅考虑了下风向处，即最大剂量方向的典型距离的剂量。而在核安全与应急决策的实际应用中，通常还需要计算反应堆周边各个方向、各个距离的剂量以及在某些情

况下计算公众集体剂量。本文方法为这些计算提供了方法基础。

本文方法根据反应堆系统和气象环境在线监测数据，能够同时支持 3 个级别的 PSA 实时风险计算，并提供不同事故的放射性源项释放量和对事故频率以及不同地点的场外剂量等，其结果信息比现有风险监测系统丰富，有利于在核安全监管与核应急决策中，针对放射性源项释放量及影响范围、公众撤离、应急救援行动等提供信息支持。

3 结论

本文基于二级、三级 PSA 的思想，把现有风险监测器与核应急辐射场计算的技术相结合，提出了一种适用于三级概率安全评价的核反应堆实时风险计算方法。研究结果表明：

(1) 本文方法可同时支持堆芯熔毁风险、放射性源项释放风险以及场外剂量风险等事故风险的实时计算。

(2) 对 3 个级别 PSA 计算的时间分别为数秒至十数秒，计算速度能够满足核反应堆风险监测的实时要求。

(3) 本文方法与流程的有效性通过了研究堆风险模型案例计算的验证，而且从原理上看，本文方法也可支持核电厂等更多不同类型核反应堆的实时风险监测。

本文方法可为核反应堆安全监管与核应急管理决策提供技术支持。后续可在实时风险监测器的研发与改进方面开展进一步的工作。

致谢

本工作得到 FDS 风麟核团队其他成员的支持。

参考文献:

- [1] 冯宗洋, 张建岗, 杨亚鹏, 等. 压水堆释放源项快速估算程序开发[J]. 辐射防护, 2020, 40(06): 504-509.
- [2] 钱永柏, 党同强, 王鑫, 等. 海上核应急辐射场计算评估方法[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2019, 37(02): 60-66.
- [3] 陈黎伟, 陶龙龙, 周百昌, 等. 乏燃料公路运输事故条件下放射性核素弥散模型研究[J]. 核科学与工程, 2020, 40(02): 233-243.
- [4] 李琦, 孙明军, 吴维, 等. 辽宁红沿河核电厂编制重大核事故应急救援协同方案的实践[J]. 核动力工程, 2017, 38(02): 68-71.
- [5] 吴宜灿, 何桃, 胡丽琴, 等. 核与辐射安全仿真系统 SuperMC/RVIS2.3研发与应用[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(S1): 7-15.
- [6] 吴宜灿, 胡丽琴, 李亚洲, 等. 秦山三期重水堆核电站风险监测器研发进展[J]. 核科学与工程, 2011, 31(01): 68-74+85.
- [7] MA Y, ZHANG Z, WANG H, et al. Standby Equipment Reliability Data Analysis on Risk Monitor of Nuclear Power Plant[C]// 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering. 2018.
- [8] ZHANG B, CHEN S, LIN Z, et al. A rapid modeling method and accuracy criteria for common-cause failures in Risk Monitor PSA model[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 53(1): 103-110.
- [9] 高巍, 张琴芳. 核电厂风险监测器系统开发[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(11): 1362-1367.
- [10] FERRETTO D, MAZZINI G, AMBROSINI W, et al. Risk monitor implementation for the LVR-15 research reactor[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 208(19): 107403-107413.
- [11] 顾晓慧, 鲍振利, 于文革, 等. 实时风险监测系统在田湾核电站的研发与应用[J]. 核科学与工程, 2017, 37(04): 691-699.
- [12] 王琰, 张志俭, 张敏, 等. 实时风险监测与管理中允许组态时间研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(03): 104-106.
- [13] 邹旻, 邹树梁. 我国核应急发展现状与前沿动态研究[J]. 中国核电, 2020, 13(01): 114-119.
- [14] 王宝生, 唐秀欢, 沈志远, 等. 西安脉冲堆概率安全分析技术要点及分析框架研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(03): 100-105.
- [15] 唐秀欢, 沈志远, 王宝生, 等. 西安脉冲堆核事故场外后果概率安全评价[J]. 核动力工程, 2017, 38(06): 76-80.
- [16] 唐秀欢, 王宝生, 朱磊, 等. 西安脉冲堆满功率运行工况内部事件二级概率安全分析[J]. 核动力工程, 2019, 40(02): 80-84.

(责任编辑: 王中强)