

RiskA 计算引擎在核电站概率安全评价中的应用

王家群^{1,2}, 王芳^{1,2}, 汪进^{1,2}, 顾晓慧^{1,2}, 袁润^{1,2}, 殷园^{1,2,3}, 汪建业¹,
李亚洲^{1,2}, 胡丽琴^{1,2}, 吴宜灿^{1,2}, 曾春⁴, 宋明海⁴,
苏长松⁴, 彭晓春⁴, 张刚平⁴

(1 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;
3 深圳大学理学院应用数学系, 广东 深圳 518060; 4 秦山第三核电有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

摘要: 研究分析了 R & R Workstation 平台的计算引擎配置问题, 实现了该平台下调用 FDS 团队自主研发的 RiskA 计算引擎。基于上述工作, 采用真实核电站的概率安全评价模型, 对 RiskA 计算引擎进行了正确性校核, 并与 CQUANT 引擎进行了计算速度比较。测试表明正确实现了在 PRAQUANT 下对于 RiskA 计算引擎调用, RiskA 的定性分析和定量计算结果正确, 在计算速度上 RiskA 远快于 CQUANT。

关键词: RiskA; 计算引擎; 定性分析; 定量计算

中图分类号: TL364 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0918(2011)01-0075-05

Application of calculation engine of RiskA to nuclear power plant's probabilistic safety assessment

WANG Jiā qún^{1,2}, WANG Fā ng^{1,2}, WANG Jī n^{1,2}, GŪ Xiǎo-huì^{1,2}, YUǎN Rū n^{1,2}, YĪN Yuǎn^{1,2,3},
WANG Jiā nyè¹, LĪ Yā-zhōu^{1,2}, HŪ Lì-qī n^{1,2}, WU Yī-cān^{1,2}, ZENG Chū n⁴, SONG Mí ng-hǎi⁴,
SŪ Chā ng-sō ng⁴, PÉNG Xiǎo-chū n⁴, ZHANG Gā ng-pí ng⁴

(1 University of Science and Technology of China, Hefei of Anhui Prov. 230026, China;
2 Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China;
3 School of Science, Shenzhen University, Shenzhen of Guangdong Prov. 518060, China;
4 Third Qinshan Nuclear Power Company, Jiaxing of Zhejiang Prov. 314300, China)

Abstract: PRAQUANT is one of the modules used for accident sequence quantification in

收稿日期: 2011-01-17; 修回日期: 2011-02-21

基金项目: 科技部 ITER 专项(2009GB101006);

中科院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-YW-N35, 095CFR211); 核电项目风险监测器模型及软件系统研发(2008CCD064P)

作者简介: 王家群(1987-), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 主要研究方向为核电站概率安全评价

R&R Workstation, a suite of probabilistic safety assessment software. And CQUANT is the quantification engine of PRAQUANT. RiskA is a fault tree quantification engine developed by FDS Team, which can be integrated into PRAQUANT as a third party quantification engine. The process of the integration was introduced in this paper, as well as the benchmark between RiskA and CQUANT. The results of benchmark showed that the algorithms adopted in RiskA are correct and efficient.

Key words: RiskA; calculation engine; qualitative analysis; quantitative analysis

概率安全/ 风险评价 (Probability Safety/ Risk Assessment, PSA/PRA) 是 20 世纪 70 年代发展起来的一种用于安全和可靠性评价的系统工程方法, 其在核能、航天、电子等领域均已广泛应用。随着近年来在核电站的工程设计、执照管理和维修计划等工作中的应用, PSA 正受到人们越来越多的关注^[1-2]。

核电站一般是包括几十甚至几百个子系统及成千上万个部件的大型复杂系统, 与之相应的 PSA 模型也比较复杂; 另外核电站 PSA 的分析计算工作一般都要有一个迭代的过程, 对于同一个核电站的 PSA 模型要重复计算多次^[3]。为了保证分析过程的可靠性和评价结果的可信性, 目前核电站 PSA 中的分析计算工作一般都借助于 PSA 软件完成, 如瑞典 RELCON Scandpower AB 公司开发的 Risk Spectrum^[4]、韩国 Korea Atomic Energy Research Institute 开发的 FTREX^[5]、美国 Data Systems and Solutions 公司和 Electric Power Research Institute 联合开发的 R&R Workstation^[6] 以及 FDS 团队自主开发的大型集成概率安全评价软件 RiskA 等^[1]。

上述 PSA 软件平台一般支持对于多种计算引擎的调用^[7-9]。对于第三方计算引擎调用的研究, 一方面能够促进对于该计算平台计算流程和分析接口的深入理解; 另一方面通过在同一平台下完成对于不同计算引擎调用, 可以为结果正确性校核、速度比较提供基础。本文主要研究并完成了在 R&R Workstation 平台下对于完全自主知识产权 RiskA 计算引擎的调用, 使用真实核电站的 PSA 模型进行了 RiskA 计算引擎的正确性验证, 并且比较了 RiskA 计算引擎与 CQUANT 计算引擎之间计算速度的差异。

1 软件系统介绍

1.1 R&R Workstation 和 PRAQUANT

美国 Data Systems and Solutions 公司和 Electric Power Research Institute 联合开发的概率安全分析计算机辅助软件包 R&R Workstation, 主要包括 CAFTA(故障树分析)、ETA(事件树分析)、PRAQUANT(事故序列定量计算)、UNCERT(不确定性分析)等模块, 其自带的计算引擎为 CQUANT, 另外该平台还支持用户自己配置其他的计算引擎^[7-10]。目前国内已有几家该软件的用户, 如秦山第三核电有限公司(以下简称“秦山三核”)、中国核动力研究院设计院等。

作为 R&R Workstation 的子模块, PRAQUANT 是一个事故序列定量化计算的工 具, 它使用故障树链接法自动实现事故序列的定量计算。PRAQUANT 可以在计算时使用多种最小割集计算引擎, 如 CQUANT、RELMCS 以及 RSAT 等^[7], 软件包中原有的计算引擎为 CQUANT。CQUANT 求解大规模故障树时耗费计算时间较长, 导致了用户在使用 CQUANT 引擎进行分析计算时要耗费较多的计算时间, 给 PSA 工作效率提升带来了不利影响。利用 R&R Workstation 平台支持用户自己配置第三方计算引擎的特性, 寻找一个在计算速度上优于 CQUANT 的计算引擎是解决上述问题的一条有效途径。

1.2 RiskA

RiskA 是 FDS 团队在广泛调研和深入分析国际现有概率安全分析软件及其关键技术的基础上研发的, 具有自主知识产权的大型概率安全分析软件系统。目前 RiskA 已经发展到了比较成熟的阶段, 其 3.0 版本已通过与国际

同类型软件校核证明了计算结果正确^[11], 并已在多项工程实例中成功应用, 如秦山三期重水堆核电站风险监测系统 TQRM^[12-14]、国际热核聚变实验堆实验包层模块 ITER-TBM 可靠性分析、国家大科学工程全超导托卡马克 EAST 安全分析以及 FDS 系列先进反应堆设计等^[15-16]。

目前 RiskA 3.0 版本的主要功能包括: 系统建模、模型导入、故障树分析、事件树分析、不确定性分析、敏感性分析、重要度分析、数据管理与分析^[11], 其中故障树分析是 PSA 分析的核心(图 1)。

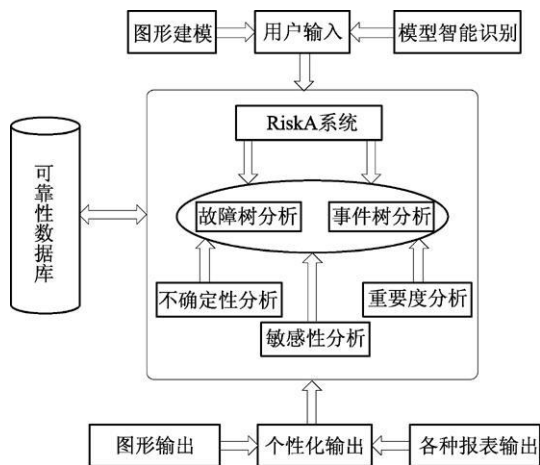


图 1 RiskA 主要功能结构

Fig. 1 Modules of RiskA

2 计算引擎调用

在 PRAQUANT 下使用 RiskA 计算引擎, 可以在更多真实核电站的 PSA 模型中验证 RiskA 计算结果正确, 同时也可以与其他计算引擎进行计算速度的比较。

2.1 计算流程

首先对 PRAQUANT 的计算流程做一简要介绍, 如图 2 中所示。

2.2 关键问题

PRAQUANT 在调用最小割集计算引擎时通过参数传递的方式与计算引擎通信。以 CQUANT 为例, PRAQUANT 调用该计算引擎时与其传递的参数主要包括: 输入文件信息, 输出文件信息, 截断值设定, 以及其他优化设定

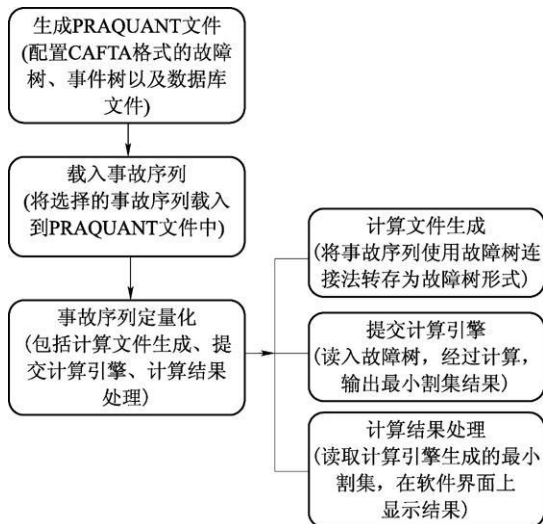


图 2 PRAQUANT 计算流程

Fig. 2 Calculation procedure of PRAQUANT 等^[7]。

图 3 给出了在 PRAQUANT 软件调用计

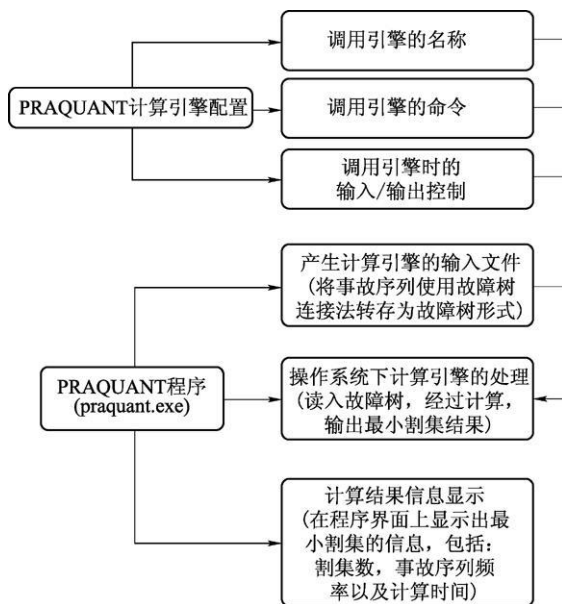


图 3 PRAQUANT 调用计算引擎接口

Fig. 3 Interface between PRAQUANT and calculation engine

算引擎时若干关键的程序接口。

完成 PRAQUANT 下调用 RiskA 计算引擎, 需要解决的关键问题主要有以下 3 个^[7-9]。

(1) 识别 CAFTA 输入文件的格式。由于在 PRAQUANT 调用计算引擎时, 提供给计算

引擎的输入文件格式为 CAFTA 的故障树文件,因此 RiskA 能够正确识别并读入此类故障树文件是所有工作的基础。

(2) 能与 PRAQUANT 通信。上文中已提到, PRAQUANT 通过参数传递的方式在软件界面与计算引擎之间通信。因此, 能否正确接收并执行 PRAQUANT 传递的参数是保证计算结果正确可靠的必要条件。

(3) 生成 PRAQUANT 可识别的最小割集。PRAQUANT 在调用命令正确执行之后会读取计算引擎生成的最小割集文件, 必须保证 RiskA 可以生成能被 PRAQUANT 正确读取的最小割集文件。

其中, 解决 RiskA 与 CAFTA 软件使用文件格式兼容的问题是 RiskA 计算引擎得以成功配置的关键。本文基于 RiskA 已有的工作基础解决了上述关键问题, 并成功实现了 PRAQUANT 下调用 RiskA 计算引擎。

3 测试例题与结果分析

完成 RiskA 计算引擎在 PRAQUANT 下

的调用之后, 以泰山第三核电有限公司基准 PSA 模型为测试例题进行了正确性验证以及与 CQUANT 引擎计算速度的比较。泰山三核基准 PSA 模型复杂且规模大, 使用的基本事件数量达 7 564 个, 逻辑门 5 908 个, PSA 的分析计算使用了 R&R Workstation 软件包^[6]。它包含 50 棵事件树模型以及 26 个用于事故序列量化的故障树模型, 共计 1 007 条导致严重堆芯损伤(SCD, Several Core Damage)的事故序列。测试中各事故序列例题的概率截断值均设为 1. 00E-10, 分别使用 RiskA 计算引擎 3. 0 版本和 CQUANT 4. 0b 版本; 测试用计算机配置的处理器的型号为 Intel Q9400(2. 66 GHz), 内存 3. 5 GB, 操作系统为 Microsoft Windows XP。

3. 1 正确性验证

经泰山三核基准 PSA 模型的验证, PRAQUANT 下调用 RiskA 计算引擎与调用 CQUANT 得到的结果完全相同。囿于篇幅, 表 1 中给出了部分测试例题的结果。

表 1 测试结果
Table 1 Testing result

事故序列名	RiskA 引擎结果		CQUANT 引擎结果	
	最小割集数	频率值	最小割集数	频率值
CL32 S1	13 082	1. 006 3E-07	13 082	1. 006 3E-07
CL32 S2	12 199	4. 581 3E-07	12 199	4. 581 3E-07
FBSS3	30 834	8. 201 3E-09	30 834	8. 201 3E-09
FBSS4	22 602	3. 481 3E-08	22 602	3. 481 3E-08
FBSS7	11 243	1. 621 5E-09	11 243	1. 621 5E-09
FBSS12	9 836	1. 047 5E-06	9 836	1. 047 5E-06
LLFS5	10 113	1. 567 7E-09	10 113	1. 567 7E-09
LLFS26	7 880	9. 410 7E-09	7 880	9. 410 7E-09
MSLF S1	23 979	6. 714 8E-10	23 979	6. 714 8E-10
MSLF S2	37 842	3. 661 1E-09	37 842	3. 661 1E-09
SL-S34	8 189	2. 232 9E-08	8 189	2. 232 9E-08
T-S2	13 227	3. 392 6E-07	13 227	3. 392 6E-07
T-S3	14 728	4. 487 8E-07	14 728	4. 487 8E-07
...

使用文件比较工具分别对 RiskA 和 CQUANT 计算结果进行比较,验证了两者生成的最小割集及其排序完全一致。

3.2 计算速度测试

分别统计了 PRAQUANT 调用 RiskA 和 CQUANT 计算引擎的耗时。通过比较发现,在 PRAQUANT 下使用 RiskA 计算引擎的计算耗时明显少于 CQUANT 引擎,测试中设定条件下未发现 RiskA 计算引擎计算耗时多于 CQUANT 的序列。表 2 中给出了部分序列的测试时间统计, RiskA 计算引擎的计算耗时在 CQUANT 耗时的 1% 以下,例题 PCTR-S49 中达到了 1/3 498。

表 2 计算时间
Table 2 Calculated time

事故序列名	RiskA 耗时/s	CQUANT 耗时/s
BM TR-S33	1	3 462
BM TR-S42	1	2 748
EFBFS49	2	2 826
EFBFS60	1	3 342
HHXM-S29	2	3 318
HHXM-S38	1	3 444
LRVOS49	1	3 294
LRVOS60	1	3 390
PCTR-S49	1	3 498
PTR-S49	2	3 546
PTRS60	2	3 600
...

4 总结

基于 FDS 团队开发的大型集成概率安全分析软件 RiskA,实现了在 PRAQUANT 软件下调用 RiskA 计算引擎。使用真实电站 PSA 模型进行校核,结果表明正确地实现了在 PRAQUANT 下对于 RiskA 计算引擎的配置, RiskA 的定性分析和定量计算结果正确。在计算速度上 RiskA 计算引擎明显优于 CQUANT,测试中部分例题 RiskA 的计算速度高达 CQUANT 的数千倍。

参考文献:

- [1] 吴宜灿,刘萍,胡丽琴,等. 大型集成概率安全分析软件系统的研究与发展[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 270-276.
- [2] William Keller, Mohammad Modarres. A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry: attribute to the late Professor Norman Carl Rasmussen [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 89: 27-285
- [3] PRA Procedures Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants (NUREG/CR-2300) [M].
- [4] 大亚湾核电站 PRA 项目组. 大亚湾核电站概率风险分析[J]. 中南工学院学报, 1999, 13(2): 65-75
- [5] Woo SikJung, Sang HoonHan, Jaejoo Ha. A fast BDD algorithm for large coherent fault trees analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 83: 369-374
- [6] Probabilistic Safety Assessment (PSA) Qinshan CANDU Project, Probabilistic Safety Assessment Report [R]. 98-03600-PSA-001, March, 2003
- [7] CAFTA user manual version 5.2 [M]. America: EPRI and DSS, 2005
- [8] Risk spectrum theory manual version 1.10.00 [M]. Sweden: Relcon AB, 1999
- [9] FORTE user's manual version 3.0a [M]. Korea: KOPREC, 2004
- [10] 张明礼, 吴继伟, 王朝贵, 等. 可靠性与风险分析程序系统及其在概率安全分析中的应用[J]. 核动力工程, 2000, 21(4): 353-356.
- [11] 聂淼, 吴宜灿, 邓小玫, 等. RiskA 和 RiskSpectrum 故障树计算的比较分析[J]. 核科学与工程, 2006, 26(4): 358-362.
- [12] 吴宜灿, 胡丽琴, 李亚洲, 等. 秦山三期重水堆核电站风险监测系统研发进展[J]. 核科学与工程. 2011, 31(1): 70-77.
- [13] 王芳, 汪进, 王家群, 等. 基于 SSH 构架的风险监测系统的设计与实现[J]. 核科学与工程, 2010, 30(4): 355-359
- [14] 汪进, 王芳, 王家群, 等. 适于风险监测系统的零压缩二元决策图基本事件排序方法[J]. 核科学与工程, 2010, 30(4): 360-364
- [15] 胡丽琴, 吴宜灿. 聚变发电反应堆双冷液态锂铅包层的初步概率安全分析[J]. 核科学与工程, 2005, 25(2): 184-187.
- [16] 曹兴焕, 胡丽琴, 李亚洲, 等. EAST 低温系统的故障树分析[J]. 核科学与工程, 2009, 29(2): 170-175