



核电厂 概率安全分析及其应用



曹 勇
薛新才

尹志刚
赵志德

马明泽
陶 钧
李卓群

主 编
副主编

中国核工业集团公司 编

原子能出版社

核电厂概率安全分析 及其应用

主 编 马明泽

副主编 曹 勇 尹志刚 陶 钧 薛新才
赵志德 李卓群

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电厂概率安全分析及其应用/马明泽主编. —北京:

原子能出版社, 2010. 7

ISBN 978-7-5022-4983-0

I. ①核… II. ①马… III. ①核电厂—安全管理—技术培训—教材 IV. ①TM623.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 131794 号

内 容 简 介

本书系统、全面地讲解了在核电厂中开发和应用概率安全分析(PSA)的方法和过程。全书分为九章,第一章介绍了 PSA 技术的发展及核安全监管中相关的法规和标准;第二章至第六章依次介绍了 PSA 分析中涉及的各项要素,内容包括事件树分析、故障树分析、数据分析、人因分析和定量化计算;第七章描述了 PSA 分析工作实施的一般过程;第八章介绍了 PSA 应用的准则和方法;第九章结合秦山核电厂的实际情况,对于 PSA 的开发、应用、管理进行了综合性描述。

本书可以作为从事核电厂 PSA 相关工作人员的培训教材使用,能帮助学员系统性的掌握 PSA 的相关知识,使其能够独立的担任一级 PSA 开发和应用的相关工作。本书也可作为电厂、院校相关人员了解 PSA 方法的参考资料。

核电厂概率安全分析及其应用

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 王 丹

技术编辑 丁怀兰 王亚翠

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 8.125 字 数 196 千字

版 次 2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4983-0 定 价 42.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

中国核工业集团公司 核电培训教材编审委员会

总 编 孙 勤
副 总 编 余剑锋 叶奇蓁

编辑委员会

主 任	陈 桦					
副 主 任	程慧平	孙习康	张 涛			
委 员	马明泽	刘志勇	刘明章	李苏甲	李和香	
	赵 云	邹正宇	杨树录	段光荣	顾颖宾	
	商幼明	戚屯锋	缪亚民	仲卫东	周建虎	

编委会办公室

姜福明	朱 黎	张红军	程建秀	黄 芳
方朝霞	沈 阳	宫育锋	章 超	丁怀兰
王亚翠	陈茂松	万德华	张曰智	郭维贺

执行编委

谢 波	马寅军	叶丹萌	莫银良	高小林
吴向东	鲁忆迅	唐锡文	蔡黎勇	刘 朔
肖 武	浦胜娣	刘玉山	王海平	

《核电厂概率安全分析及其应用》

编 辑 部

主 编 马明泽

副 主 编 曹 勇 尹志刚 陶 钧 薛新才 赵志德
李卓群

编 者 (按姓氏拼音排序)
曹 勇 姜 赫 雷 霞 陶 钧 尹志刚

统审专家 宋明海 赵 博

总 序

核工业作为国家高科技战略性产业,是国家安全的重要基石、重要的清洁能源供应,以及综合国力和大国地位的重要标志。

1978 年以来,我国核工业第二次创业。中国核工业集团公司走出了一条以我为主发展民族核电的成功道路。在长期的核电设计、建造、运行和管理过程中,积累了丰富的实践和理论经验,在与国际同行合作过程中,实现了技术和管理与国际先进水平相接轨,取得了骄人的业绩。

中国核工业集团公司在三十多年的核电建设中,经历了起步、小批量建设、快速发展三个阶段。我国先后建成了秦山、大亚湾、田湾三大核电基地,实现了我国大陆核电“零”的突破、国产化的重大跨越、核电管理与国际接轨,走出了一条以我为主,发展民族核电的成功之路。在最近几年中,发展尤为迅猛。截至 2008 年底,核电运行机组 11 台,装机容量 907.82 万千瓦,全部稳定运行,态势良好。

进入新世纪,党中央、国务院和中央军委对核工业发展高度重视、极为关怀,对核工业做出了新的战略决策。胡锦涛总书记指出:“无论从促进经济社会发展看,还是从保障国家安全看,我们都必须切实把我国核事业发展好”。发展核电是优化能源结构、保障能源安全、满足经济社会发展需求的重要途径。2007 年 10 月,国务院正式颁布了《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》。核电进入了快速、规模化、跨越式发展的新阶段。

在中国核电大发展之际,中国核工业集团公司继续以“核安全是核工业的生命线”的核安全文化理念和“透明、坦诚和开放”的企业管理心态,以推动核电又好又快又安全发展为己任,为加速培养核电发展所需的各类人才,组织核电领域专家,全面系统地对核电设计、工程建造、电站调试、生产准备和生产运营等各阶段的知识进行了梳理,构造了有逻辑性、系统性的核电知识体系,形成了覆盖核电各阶段的核电工程培训系列教材。

这套教材作为培养核电人才的重要工具,是国内目前第一套专业化、体系化、公开出版的核电人才培养系列教材,有助于开展培训工作,提高培训质量、节约培训成本,夯实核电发展基础。它集中了全集团的优势,突出高起点、实用性强,是集团化、专业化运作的又一次实践。是中国核工业 50 余年知识管理的积淀,是中国核工业 10 万人多年总结和实践经验结晶。

21 世纪是“以人为本”的知识经济时代,拥有足够的优秀人才是企业持续发展的重要基础。中国核工业集团公司愿以这套教材为核电发展开路,为业界理论探讨、实践交流提供参考。

我们要继续以科学发展观为指导,认真贯彻落实党中央、国务院的指示精神,积极推进核电产业发展。特别是要把总结核电建设经验作为一项长期的工作来抓,不断更新和完善人才教育培训体系。

核电培训系列教材可广泛用于核电厂人员培训,也可用于核电管理者的学习工具书,对于有针对性地解决核电厂生产实践和管理问题具有重要的参考价值。

中国核工业集团公司总经理



2009 年 9 月 9 日

前 言

在浙江杭州湾钱塘江入海口,有一座郁郁葱葱、鸥鸟栖飞的小山,曾因秦始皇“登以望东海”而得名秦山。自 1991 年 12 月 15 日以来,18 年间,秦山目睹了中国人自己设计、建造的秦山 30 万千瓦核电机组首次并网发电的“中国核电的起步”,见证了“民族核电的丰碑”,聆听了“中国人成功的故事”,感受到“核电发展的春天”。

18 年来,持续管理改进和技术改造是公司创造优良运行业绩的保证。秦山核电厂安全稳定,没有发生任何核安全事故,没有发生任何影响公众及环境的放射性事件,其运营水平已进入国际中值水平以上。电站自 2001 年以来连续取得了五个燃料循环的长周期安全运行业绩,创造了连续运行天数从 331 天、443 天、448 天到 469 天的当时国内最好运行纪录。电站 18 年的安全运行实践证明我国自主设计、自主建造和自主管理运营的成功。一流的运行业绩为我国核电事业发展积累了经验,培养了人才,打下了基础。截止到 2009 年 12 月 15 日,秦山核电站累积运行约 5500 天,累计发电约 357 亿千瓦时。

秦山核电有限公司为适应 PSA 技术的发展形势,给核电厂员工普及 PSA 知识,并且为核电厂内建造运行 PSA 模型、应用 PSA 技术提供参考,总结秦山核电厂运行经验,组织编写核电厂概率安全分析及其应用教材。《核电厂概率安全分析及其应用》教材以秦山核电有限公司 30 万千瓦机组的运行经验为基础,补充了大量的国内外文献。适用于中国核工业集团公司所属各核电厂从事 PSA 相关工作人员的培训,也可作为电厂、院校相关人员了解 PSA 方法的参考资料。各核电厂在使用本教材时,注意结合自身的特点加以充实。另外随着核电厂的快速发展,先进的 PSA 技术也不断地发展,各核电厂需根据行业发展趋势调整、优化各自电站的 PSA 技术应用。

本教材共分九章内容,第一章至第六章介绍了 PSA 的基础知识,第七章和第八章介绍了核电厂 PSA 工作的开发流程和应用方法,第九章以秦山核电厂(30 万千瓦机组)PSA 开发和应用过程为例,结合编者自己的工作经验和体会详

细介绍了 PSA 开发过程中涉及的各项工作内容。与传统的 PSA 教材不同,本书 PSA 基础理论介绍较简单,偏重于核电厂内了解、开发、应用 PSA,对于核电厂 PSA 工作者具有很强的针对性。根据国内 PSA 的开发情况和编者水平的限制,本教材主要针对一级 PSA 的开发和应用,对于二级、三级 PSA 很少涉及。

本教材由秦山核电有限公司马明泽主持编辑,核动力运行研究所和原子能出版社的有关同志对本教材也做了仔细的审读。在教材的编制过程中,虽经反复推敲核证,仍难免有不妥甚至错谬之处,诚望广大读者提出宝贵意见,以便于加以修正。

主 编

2010 年 1 月 5 日

目 录

第一章 PSA 分析方法概述

1.1	PSA 的发展史	1
1.2	我国的 PSA 法规和规范	3
1.2.1	核安全法规与导则	3
1.2.2	新建核电厂设计中几个重要安全问题的技术政策	3
1.2.3	概率安全评价报告的标准格式和内容	4
1.2.4	技术政策:概率安全评价技术在核安全领域中的应用	5
1.2.5	应用于核电厂的概率安全评价	6
1.3	PSA 方法的特点	6
1.3.1	确定论安全分析方法	7
1.3.2	概率安全评价方法	8
1.3.3	不确定性	9
1.4	PSA 的研究范围和分类	11
	复习思考题	12

第二章 事件树分析

2.1	始发事件分析	13
2.1.1	安全功能的确定	13
2.1.2	确立始发事件清单	13
2.1.3	始发事件的分组	15
2.1.4	始发事件频率	16
2.1.5	始发事件故障树分析方法	16
2.2	事故序列分析	21
2.2.1	概述	21

2.2.2 事件树示例	22
2.2.3 事件的排序	23
2.3 成功准则分析	23
复习思考题	24

第三章 故障树分析

3.1 失效模式和影响分析	25
3.1.1 分析格式	26
3.1.2 分析方法	26
3.2 失效模式及模型	26
3.2.1 基本事件的定义	26
3.2.2 失效模型	28
3.2.3 备用系统	28
3.2.4 运行系统	29
3.2.5 启动后处于运行模式下的备用系统	29
3.3 故障树建模	30
3.4 相关性的处理	31
3.4.1 相关性	31
3.4.2 共因失效的参数模型	32
3.4.3 β 因子法	32
3.4.4 多希腊字母(MGL)模型	32
复习思考题	33

第四章 人因分析

4.1 人因失误的类型	35
4.2 人员可靠性分析的方法	35
4.2.1 事故前人因分析	36
4.2.2 事故后人因分析	37
4.3 人因分析文档	37
复习思考题	38

第五章 数据分析

5.1 数据源和数据类型	39
5.1.1 数据源	39
5.1.2 数据类型	40
5.2 设备可靠性数据分析	40
5.2.1 一般方法	40
5.2.2 数据收集	40
5.2.3 定义数据需求	41
5.2.4 电厂原始数据	41
5.2.5 电厂特定数据分类	41
5.2.6 电厂特定参数与其不确定性估算	42
5.2.7 电厂特定事件与其不确定性估算	43
5.2.8 通用数据库的利用	43
5.2.9 形成最终数据库	43
5.3 设备共因失效参数	44
5.4 试验和维修不可用度	45
复习思考题	46

第六章 事故序列定量化

6.1 事故序列定量化分析	47
6.1.1 概述	47
6.1.2 系统故障树模型的定量化	47
6.1.3 事故序列的定量化	49
6.2 不确定性分析	51
6.2.1 不确定性分析目的	51
6.2.2 不确定性分析范围	51
6.2.3 不确定性分析方法和过程	51
6.3 重要度分析	52
6.3.1 重要度分析的目的	52

6.3.2 重要度分析的范围	52
6.3.3 重要度分析的方法和过程	52
6.4 敏感性分析	54
6.4.1 敏感性分析目的	54
6.4.2 敏感性分析方法和过程	54
复习思考题	55

第七章 PSA 的开发

7.1 设计 PSA 开发的介绍	56
7.1.1 法规要求	56
7.1.2 核电厂设计改进过程中 PSA 的作用	56
7.2 运行 PSA 开发的基本流程	57
7.2.1 熟悉电厂及收集信息	57
7.2.2 始发事件分析	58
7.2.3 事件树分析	58
7.2.4 系统建模	58
7.2.5 事故序列量化	59
7.3 其他电厂的 PSA 开发介绍	59
复习思考题	59

第八章 PSA 应用

8.1 PSA 应用的一般过程	60
8.2 PSA 应用的依据	62
8.3 PSA 应用的范围	63
8.3.1 维修活动的风险分析	63
8.3.2 技术规格书的变更和优化	63
8.3.3 风险指引在役检查	63
8.3.4 构筑物、系统、设备的风险指引特殊要求	64
8.3.5 工程改造的风险分析	64
8.3.6 为特许申请提供支持	64

8.3.7 对已经发生的安全重要事件的风险分析	64
8.4 风险监测器	64
8.5 PSA 应用展望	66
复习思考题	67

第九章 秦山核电厂的开发实例

9.1 概述	68
9.1.1 背景、目的和范围	68
9.1.2 组织机构和人员要求	69
9.1.3 项目开发历程	71
9.2 PSA 各要素分析	71
9.2.1 始发事件分析	71
9.2.2 事故序列的模型化	80
9.2.3 数据分析	84
9.2.4 人员可靠性分析	105
9.3 质量保证	107
9.3.1 质量保证要求	107
9.3.2 文件体系	107
9.3.3 项目评审	108
9.4 PSA 成果及应用	109
9.4.1 PSA 主报告	109
9.4.2 经验与不足	110
9.4.3 PSA 在秦山核电厂中的应用	111
复习思考题	113
附录 名词术语表	114
参考文献	116

第一章 PSA 分析方法概述

PSA 是 Probabilistic Safety Assessment 的简写,翻译成中文是概率安全评价,这种方法诞生于美国,在美国一直称为概率风险评价(Probabilistic Risk Assessment, PRA)。为了宣传核电是一种安全清洁的能源,IAEA 倡导从正面的角度、从抵御事件危害能力的角度来进行描述这一概念,称为 PSA,在我国也沿用 PSA 这种概念。

概率安全评价是 20 世纪 70 年代以后发展起来的一种系统工程方法。它采用系统可靠性评价技术(故障树、事件树分析)与概率风险分析方法对复杂系统的各种可能事故的发生和发展过程进行全面分析,从它们的发生概率以及造成的后果综合进行考虑。现在这种方法在核电领域得到了广泛的应用,它通过对核电厂各种因素进行综合的安全评价,对核电厂安全程度做出定量的估计,以此增强对电厂设计、运行特性的了解,深化对电厂的认识,找出核电厂设计、建造和运行中的薄弱环节,提出确保核电厂安全运行的改进建议。

1.1 PSA 的发展史

概率安全评价技术发展可以追溯到更早的时期,但 1975 年 10 月美国核管会发表的 Rasmussen Report 报告(WASH1400,《反应堆安全研究:美国核动力厂事故风险评价》),是核领域中被公认的第一份真正意义上的概率风险评价报告。WASH1400 报告选取了 Surry 压水堆核电厂和 Peach Bottom 沸水堆核电厂,利用事件树和故障树方法系统地研究了大量可能导致堆芯熔化的事故序列,建立了一套相对完整的核电厂概率风险分析(PRA)技术。但 WASH1400 报告发表后,引起了相当大的争论,赞成者和批评者兼而有之,在技术上也还未引起足够的重视。

1979 年的美国三哩岛核电厂事故,证明了 WASH1400 报告的预见性,改变了对概率安全评价技术作用的认识,两个主要的三哩岛核电厂事故调查报告(Kemeny 和 Rogovin 研究报告)都建议在核电厂安全分析中应用更多的概率安全评价技术来支持传统的非概率论的方法。自此以后 PRA 技术在全世界范围内得到响应,从而极大地促进了 PRA 技术的发展。

作为对三哩岛事故的响应,同时为了推动概率风险评价方法的发展,20 世纪 80 年代 NRC 开始推行 IPE(Individual Plant Evaluation)计划,几乎所有业主不约而同地(或者早有准备地)选择了提交 PRA 报告作为它们完成 IPE 的主要方式。NRC 在收到全部报告并对其进行审评和修改后,选择了具有代表性的 Surry、Zion、Sequoyah、Peach Bottom 以及 Grand Gulf,作为 Severe Accident Risks Report(NUREG1150,《严重事故风险:5 座美国核电厂的评价》)的主要内容。与 WASH1400 相比,这份报告取消了难以量化的经济分析,采用了最新的概率风险评价模型与改进的严重事故序列、严重事故源项和放射性后果的分析方法。这份报告总结了自概率安全评价技术发展以来数十年的研究成果,对以后的概率安全评价工作起到了重要的指导作用,同时,也为美国核管会执行安全监管时如何应用这些分



析技术提供了有益的见解。

1995年,为了促进概率安全评价技术的应用并规范核安全监管要求,美国核管会发布了政策声明 60CFR42622《概率风险评价在核安全监管活动中的应用》。为配合相关的监管要求,美国核管会于1998年先后发布了管理导则 RG1.174~1.178,对概率风险准则、PSA 技术在质量保证中的应用、PSA 技术在技术规格书中的应用以及 PSA 技术在管道在役检查中的应用等提供了具体的指导和要求。

1998年,美国核管会为确定联邦法规 10CFR50 的修改方向,提出了三个选择方案:(1)不做改变的选择 I,该方案将中止核管会工作人员以风险为导向对现有 10CFR50 作全面改变而进行的活动,对于已制定出的一些导则,核管会工作人员可以继续使用,对于正在进行的包含风险指引的导则的制定活动仍继续进行;(2)对质量保证、技术规格书、环境鉴定和设备规范等可做特殊处理的选择 II,在 II 选择下需要对 10CFR50 中涉及的构筑物、系统和设备需要特殊处理的范围作出修改,但此选择不涉及改变电站的设计或设计基准事故,对根据风险评价得出的低安全重要性的构筑物、系统和设备,将降低管理要求;(3)改变某些管理要求并在 10CFR50 中加入风险决策条款的选择 III,在这种方案下,要对 10CFR50 本身进行改变,使之在要求中包括风险评价的属性。1999年6月美国核管会同意了这个建议,采取分阶段的方法来进行该项工作,根据第二种选择开始工作,并同时第三种选择进行研究,对于按第一种选择开展的法规制定工作要继续进行。目前属于选择 II 和选择 III 的多项法规已制定完毕或在制定过程中。

最近,美国核管会正式启动了核动力厂执照申请新法规框架的研究项目。美国核管会计划建立一套全面的可应用于各类核反应堆技术的基于绩效、风险指引和具有普适性的新法规体系(10CFR53),作为目前执照申请法规(10CFR50)的备选。这一法规将充分吸收运行经验、现行法规制定中得到的教训并充分考虑采用风险指引技术带来的益处,以确保法规的实施可以让核安全监管部门和核工业界将资源应用于改进核动力厂中最薄弱的环节,从而更好地保证公众的健康和安全。可以预见,未来该法规的实施,必将对核动力厂的设计产生深远的影响,也必将在核安全监管领域引发一场重大的变革。

国际原子能机构也在大力推动概率安全评价技术,先后出版了 1、2、3 级概率安全评价实施指南和审查指南以及大量的概率安全评价应用的技术文件,并在其新的安全标准中明确加入了完成概率安全评价等要求。世界上越来越多的国家都不同程度上开展了 PSA 相关的工作,并且尝试越来越多地应用。

核工业界一直是推动概率安全评价技术应用的积极力量,美国的南德克萨斯核电厂在推动部件特殊处理中作出了开创性的贡献。美国的电力研究院、美国核能研究所、美国核学会和美国机械工程协会等也编制了大量的概率安全评价技术指导文件或标准。近年来国际电气和电子工程师协会、欧洲经合组织等国际组织也开始制定有关概率安全评价应用的政策声明及标准。与此同时韩国等国家也制订了相应的概率安全评价应用计划并正在逐步实施以推动概率安全评价在核领域中的应用。

PSA 的开发和计算一般是通过专用的计算机软件实现,伴随着 PSA 技术的发展,PSA 应用软件也在不断发展,到目前为止,国际上使用最多的软件主要是 Relcon 的 Risk Spectrum, EPRI 的 CAFTA 和 INPO 的 SAPHIRE。在我国,中国科学院合肥物质科学研究院开发了 RiskA 软件,但尚未在核电厂得到应用。当前我国进行的 PSA 开发项目中,秦山三

期核电厂使用了 CAFTA 软件,其他的项目都是使用 Risk Spectrum 完成。

1.2 我国的 PSA 法规和规范

1.2.1 核安全法规与导则

目前国内秦山核电厂、大亚湾核电厂和岭澳核电厂、秦山第三核电厂、田湾核电厂已在不同程度上完成了内部事件的一级概率安全评价,一些核电厂也开展了二级 PSA 和外部事件 PSA 的研究,一些新建的核动力厂也都陆续开展了相关的工作。国内一些核电厂已开始尝试概率安全评价技术在电厂运行管理中的应用,比如在维修中采用风险评价来优化大修策略、在运行中采用风险监测器来实时监测核电厂风险等,同时国内的有关设计院也初步应用了概率安全评价技术来评价核电厂的设计方案。这些工作为概率安全评价在核领域中的进一步应用奠定了坚实的基础。国家核安全局作为我国的核安全监管机构一直致力于推动我国概率安全评价技术的发展和运用,从 20 世纪 80 年代中期就组织国内相关单位开展概率安全评价研究工作。我国政府在中华人民共和国《核安全公约》国家报告中明确表示“中国核行业主管部门、核安全监督部门都非常重视并努力推广概率安全评价技术在核安全领域中的应用”。

2004 年 4 月国家核安全局颁布新版 HAF102《核动力厂设计安全规定》和 HAF103《核动力厂运行安全规定》。《核动力厂设计安全规定》提出了必须在安全评价中采用确定论和概率论分析方法的要求;针对严重事故,结合概率论、确定论和工程判断,确定严重事故重要事件序列的要求。《核动力厂运行安全规定》规定核动力厂营运单位必须收集和保存运行经验的数据,以用作核动力厂老化管理、核动力厂剩余寿期评价、概率安全评价和定期安全审查的输入数据,必须考虑使用概率安全评价作为定期安全审查的输入等要求。2006 年 6 月国家核安全局批准发布核安全导则 HAD102/17《核动力厂安全评价与验证》,对概率安全评价的方法、范围以及需要满足的目标给出了明确的指导。

1.2.2 新建核电厂设计中几个重要安全问题的技术政策

国家核安全局参考国际原子能机构所发布的一系列标准,建立了一套比较完整的核安全法规体系,使我国在核安全标准上与国际水平接轨,基本满足了前段时期中国核安全管理的需求。实践证明这套核安全法规体系是行之有效的,在新建核电厂的设计中仍需遵守。但是由于对未来核电厂的核安全水平提出了更高要求,国际原子能机构和许多国家的核安全当局已经或正在修订核安全法规和标准,以适应这种变化。为了跟踪这个趋势,使我国的核安全要求和核安全水平与国际上保持一致,需要对现行核安全法规某些方面,例如严重事故等领域的要求进一步明确。鉴于修订法规需要一定周期,为了适应当前我国核电发展的需要,国家核安全局对可能影响新建核电厂设计的几个重要安全问题,以发布技术政策的形式表达原则立场,并准备在今后的一段时间内逐步将他们具体体现到修订的核安全法规中。为此,核安全局在 2002 年发布了《新建核电厂设计中几个重要安全问题的技术政策》,在这份政策中,明确概率论方法是确定论方法的辅助和补充,应该在核电厂设计中得到应用,在整个设计阶段,可以分步完成概率安全评价工作,如概念设计阶段可以完成简化的概率安全