

核电厂概率安全评价 (PSA) 的发展和应用

The Development and Application of PSA

那福利

(苏州热工研究所, 江苏苏州 215004)

摘要: 作为一种核安全评价方法, PSA近年来发展很快, 本文对PSA的研究和应用进行了综述, 力求能反映出PSA发展的全貌, 以为国内PSA的开发和应用提供参考。

关键词: 概率安全评价 (PSA) 1级PSA 2级PSA 3级PSA

Abstract: Lot of work on probabilistic safety assessment (PSA) which is one of nuclear safety assessment methods has been done in recent years. In this paper, the development of PSA is summarized and its research and application is introduced.

Key words: Probabilistic Safety Assessment (PSA) Level 1 PSA Level 2 PSA Level 3 PSA

作为一项评价技术, 概率安全评价 (PSA) 用于找出复杂工程系统运行中所可能发生的潜在事故、估算其发生概率以及确定它们所可能导致的后果。概率安全评价是由安全性和统计学的概念在工程设计的应用中发展而来的。统计学概念在材料性能研究中的应用可一直追溯到19世纪。然而, 直到20世纪四、五十年代, 使用统计学和概率概念的评价技术才在设备可靠性研究中获得了人们的认可。在那一时期, 人们关注的主要是军用设备的可靠性。在第二次世界大战期间, 由于电子设备的发展, 在基于概率的技术应用中, 电子领域处于领先地位。接下来, 美国空间计划开始采用基于概率的可靠性工程技术。20世纪60年代早期, 贝尔电话实验室开发了故障树分析技术 (PSA的一种分析手段), 之后此技术应用于导弹研究。20世纪60年代末, 在阿波罗系列空间火箭设计中, 基于概率的可靠性分析技术被广泛采用。

虽然可接受的风险概念一直是核工业设计的基础, 但直到1975年“反应堆安全研究”(WASH-1400)的出版, 才将全面的PSA引入到核工业领域。WASH-1400是第一部对核电站进行概率安全评价的出版物, 它奠定了这一分析方法的基础。然而, 在1979年三哩岛事故之前, PSA研究始终徘徊不前。三哩岛事故的发生极大地改变了美国及世界范围内对核工业严重事故的看法。三哩岛事故调查委员会建议在确定核电厂安全状况时应广泛地采用PSA技术, 以为传统的确定论方法提供补充。此建议促进世界范围内的核管机构和营运单位采取了前所未有的努力, 从而增进了对核电厂严重事故的了解和认识。然而, 在核工业领域内, PSA技术作为整体的广泛应用却是始于美国核管会 (NRC) 1986年“核电厂运行安全目标: 政策表述”的出版。政策表述中清晰地规定了定量的和定性的核电厂运行安全目标, 这就把PSA纳入到了美国核管理的中心领域, 同时也极大地推进了PSA在世界范围内的发展和应用。目前, 除美国外, 法国、日本、芬兰、英国、西班牙、韩国等都对PSA进行了广泛的研究和应用, 相应地, 这些国家的核安全管理机构也规定了PSA方面的监管要求。

1 PSA技术综述

所有的概率安全评价基本上都由一套逻辑模型组成, 这些模型中包含与初因事件共同作用从而导致不希望后果的所有其它事件 (功能、系统、设备状态和人因等方面的故障)。核电厂的工程系统非常复杂, 必须确保其安全有效的运行, 这就需要开发出能真实地反映核电厂系统的模型, 进行PSA研究。三哩岛和切尔诺贝利这样的重大核事故使公众对核设施安全性的关注不断增加, 这推进了PSA的研究和应用。PSA主要由下述两部分组成:

a) 确定导致严重后果 (如堆芯熔化、放射性核素外泄等) 的事故序列;

综述
核电设计
工程管理
工程建设
运行维护
核安全
核电前期
核电论坛
核电经济
核电国产化
核电质量保证
核电信息

b) 量化与上述事故序列概率相联系的不确定性。

确定事故序列的过程见图1。此过程以初因事件的选择作为起始点。初因事件是指可导致事故工况（如各种程度的冷却剂丧失事故）的事件。

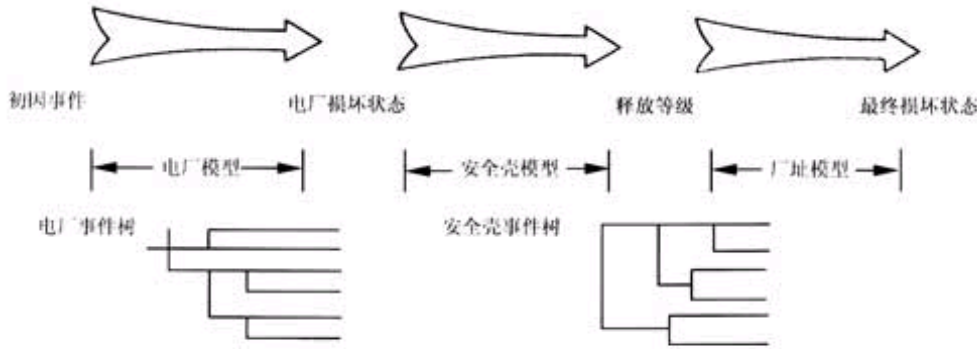


图1 核电厂风险分析过程

核电厂为初因事件构建事件树。每一事件树的分支点代表着该支点上所命名的相关安全系统（或安全功能）可用或不可用的概率。通过事件树便可确定事故序列。这些事故序列将决定着电厂损坏状态。在电厂损坏状态这一点结束的PSA被称为1级PSA。

假设反应堆损害已经发生，此损害已由电厂损坏状态所描述，我们通过跟随堆芯损害后所可能发生的物理现象的进程继续发展事故工况。当事故工况的结束点为放射性对外界环境的不同程度释放时，这一阶段的PSA被称为2级PSA。

最终完成的事故序列将包括可能影响公众健康的厂址特性。这一阶段PSA被称为三级PSA。

在PSA中，为了确定系统失效的机理，通常采用故障树分析技术。通过故障树分析，可产生更多可导致不希望后果的事故工况。

由此可见，PSA可被划分成三种类型，即1级PSA、2级PSA和3级PSA。三种PSA的关系可用图2来进一步说明。

目前，在世界范围内，1级PSA发展得比较成熟和完善，应用也很广泛。

在线PSA（LPSA）和风险管理（RM）都是使用计算机模型技术的PSA具体应用。LPSA是电厂用以确定基于系统和设备不可用的平均风险的PSA模型。此模型定期更新，但更新频率不一定高。它通常由工程人员操作，用以支持中、长期的活动（系统变更、许用检修时间（AOTS）变更、数据库更新等）。RM是用于确定电厂基于系统和设备实际状况的瞬时风险的PSA模型。它以至少与LPSA同样的频率更新电厂设计和数据，而且能反映正在进行中的试验和维修活动的当前状态。RM以LPSA为基础，且与LPSA保持一致。RM通常由电厂负责人员操作，用以支持运行、试验、维修决策的制定。

早期的大多数PSA的开发和应用都是针对电厂的功率运行工况，且不包括外部事件（如地震、外部洪水和火灾等）的影响分析。但近年来，针对低功率运行工况和停堆工况的PSA研究以及地震概率安全评价（SPSA）也获得了长足的进展。进入20世纪90年代，许多核工业及PSA技术发达国家，如美国、法国、瑞典、日本等，都从过去传统的功率工况事故风险研究拓宽到了低功率及停堆状态的潜在事故风险研究，尤其是法国在进行PSA分析时，考虑了所有反应堆工况（包括功率运行、热备用、热停堆、中间停堆及冷停堆等各种运行工况），且研究事故后长期情况而不仅仅限制在事故后24小时内。

美国是较早进行地震PSA（SPSA）的国家，目前主要核电国家都比较关注SPSA的研究和应用，在SPSA领域至今已取得了许多研究和应用成果。目前所进行的SPSA研究主要是1级SPSA和2级SPSA研究。对于1级SPSA，一般包括以下几个步骤：厂址风险评估、电厂结构响应（包括基床—结构交互作用）的计算、假设地震设定、电厂结构和部件的薄弱性概率分析和堆芯熔化概率的确定。2级SPSA主要是对电厂损坏状态、安全壳行为和外放的放射性物质进行确定和量化。

近年来，2级PSA在美国、法国、日本等国家得到了持续的发展和應用，可以说，2级PSA已发展到了一定的成熟度水平，在核电厂安全管理上，其价值正在逐步得到确认。同时，其应用领域也越来越宽，例如，2级PSA已开始被纳入到新电厂的设计中去。

对于3级PSA，研究则相对滞后于1、2级PSA，应用也不太多。

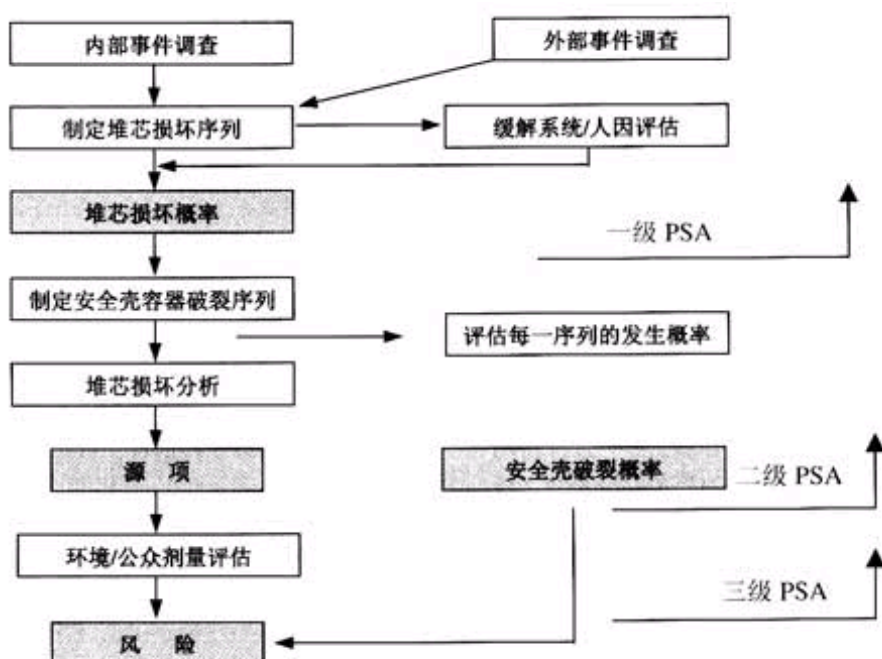


图2 核电厂 PSA 步骤

2 PSA应用

目前，美国在PSA的应用领域处于领先地位。美国核管会新的核电厂监督检查大纲的一个重要建立基础就是PSA的应用。同时，PSA也被广泛应用于NRC的法规制定、修改以及对电厂所提与许可证条件相关的变更申请的审批。美国近几年来有多座核电厂提升了功率，这正是PSA应用所取得的一个重要成果。

总的来说，PSA应用通常可划分为三大类。它们是：

- 设计和程序的适用性确定；
- 运行活动的优化；
- 管理应用。

对于一些应用而言，这种划分是不严格的。例如，技术规格书的优化既是运行活动，又是管理应用。就PSA模型、数据结果表示等而言，每一种应用都有其专门的目的和要求。

设计和程序适用性确定是一种比较成熟的PSA应用。早期执行PSA的主要目的是计算堆芯损坏概率和确定决定整体风险的事故序列。PSA在这方面的具体应用如下：

- 评估设计特点；
- 与安全目标作比较；
- 设计变更/修改；
- 程序的评价/改进。

随着电厂日益认识到PSA在优化运行活动方面的应用不仅能方便运行和增加安全，而且能降低费用，这种应用日趋广泛。这种应用需要对整个PSA进行快速的重复计算，因而需要使用个人计算机和PSA软件。大部分这类应用是基于所确定的设备（活动）的重要性，但是对每一具体应用而言，它都有一些明显的特征。最普通的这类应用包括：

- 维修优化；
- 配置控制；
- 技术规格书的改进。

对于核管理机构而言，PSA是一个有用的工具，许多国家的核电公司被要求执行PSA。虽然PSA被要求

用作现有安全分析和管理的补充,但许多管理决策都是使用PSA理论作出的。PSA在管理领域的应用可包括以下几类:

- 基于风险的管理;
- 事件分析;
- 基于PSA的检查;
- 基于风险的指标。

3 PSA在国内发展现状及展望

20世纪80年代末,我国的一些研究机构,如清华大学、上海核工程研究设计院等单位开始进行PSA方面的跟踪和研究工作。目前,秦山I、II、III期,中国广东核电集团公司等都在对自己的核电厂进行PSA的开发和应用工作,但这些工作仅限于1级PSA,同时,这些分析并没有包含外部事件。对于2级PSA,国内尚处于学习阶段。

当前,我国已有5台核电机组建成运行,另有6台机组正处于建造中,可以说,核电正处于一稳步增长阶段。然而,我们必须关注核电的安全性和经济性。开展PSA的研究和应用,对改善和提高核电厂运行的安全性和经济性具有重要的现实意义。目前,我国在1级PSA方面已进行了一些卓有成效的工作,各个核电公司也都意识到了开展PSA研究和应用的必要性,而国家核安全局也在已经发布的核安全政策表述中明确规定了PSA方面的安全目标,相信在这些因素的推进下,我国PSA工作必将迈入一个新的纪元。

参考文献

[1] The use of PSA in the French regulatory practice, IAEA, Use of probabilistic safety assessment in the regulatory process, Report of technical committee meeting, working material, 1994, 301 p, p86-126

[2] Overview of PSA, IAEA, Div. Of Technical Co-operation Programmes, Workshop on PSA applications, Sofia, Bulgaria, 7-11 October 1996, Lecturing materials, 1997, 248 p, p9-16

[3] PSA, living PSA and risk monitoring key differences and conversion, IAEA, Div. Of Technical Co-operation Programmes, Workshop on PSA applications, Sofia, Bulgaria, 7-11 October 1996, Lecturing materials, 1997, 248 p, p161-172

[4] Living PSA-risk monitoring-current use and developments, Nuclear-Engineering-and-design, (Nov 1997), p197-204

[5] Advances in Probabilistic safety assessment, Nuclear Engineering and Design, (May 1992), p141-148

[6] Probabilistic safety assessment past, present and future. An IAEA perspective. Nuclear Engineering and Design, (2 Feb 1996), p273-285

[7] Probabilistic safety assessments at EDF, NRC, Div. of Systems Research; Sandia National Labs, Albuquerque, NM (USA), CSNI workshop on PSA applications and limitations, Proceedings, Feb 1991, 475p, p111-113

[8] Status of the use of probabilistic safety assessment, IAEA, Topical issues in nuclear, radiation and radioactive waste safety, Proceedings of an international conference Vienna (Austria) IAEA 1999 381p, p307-312