

# 大亚湾核电站停堆工况风险研究

柯国土, 许汉铭, 袁履正, 李小华

(中国原子能科学研究院 反应堆工程设计研究所, 北京 102413)

**摘要:**基于传统 PSA 方法学(适用于功率运行工况)及核电站停堆工况特征,提出了一套停堆 PSA 特征方法,包括电站运行状态离散法,分阶段评价法和主逻辑故障树评价。将该方法应用于大亚湾核电站(GNPP)停堆工况 PSA 研究,得到了较真实反映 GNPP 实际情况的结果。研究结果对 GNPP 的停堆运行和管理有实际应用价值,对我国今后核电站设计、运行及管理也有现实意义。

**关键词:**大亚湾核电站;停堆工况;风险研究

**中图分类号:** TL361

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2000)02-0097-08

压水堆核电站寿期中约占四分之一时间的停堆期间的安全性,过去不被重视。随着核电技术的发展和核电运行安全性和经济性要求的提高,尤其是核电运行经验及事故或事故预兆给人们的有益启示,近年来,停堆运行的安全性问题引起普遍关注。

概率安全评价(PSA)作为评价核电站安全性的一种综合分析技术,已成为确定论安全设计及安全审评的必要和有效的补充。它以自身的优势在核电站设计、安全审评、日常运行、维修及管理起着愈来愈重要的作用。国际上核工业发达国家已将 PSA 技术用于停堆运行安全性评价,并取得了良好效果。

鉴于我国核电事业和 PSA 技术及应用研究现状,本工作对大亚湾核电站(GNPP)的停堆安全性采用 PSA 方法进行评价。内容包括:停堆运行安全性研究的现实意义,实施停堆 PSA 的方法、过程与步骤及对 GNPP 停堆运行安全性评价 3 个方面。

## 1 停堆 PSA 研究的必要性和重要性

停堆运行安全研究,尤其是停堆 PSA 研究的必要性和重要性表现在以下几个方面。

1) 人们对核电站安全性的认识存在这么一个误区,即停堆运行风险很小,甚至认为“停堆即安全”。核电站运行经验及事故或事故预兆表明,停堆运行依然存在风险,并非象人们原先所期待的那样;

2) 停堆运行工况约占电站寿期的 25%,若不研究停堆运行的安全性,将很难掌握核电站

收稿日期:1999-05-13;修回日期:1999-06-22

作者简介:柯国土(1965—),男,浙江仙居人,副研究员,博士,反应堆物理专业

安全性的全貌;

3) 停堆工况下电站系统配置及状态复杂多变,且手动操作居多,原有的多道屏障及纵深防御的安全措施已降级或不复存在;

4) 核电站的安全性设计基于设计基准事故,且主要针对功率运行工况,核电站的这种设计特点给停堆运行带来了隐患;

5) 停堆运行期间,进入厂区甚至核岛区域的人员情况复杂,构成了新的不安全因素;

6) PSA 分析技术具有研究整个潜在事故谱,评价事故序列后果及对结果进行量化等特点,用来研究停堆运行安全性更能体现其优越性。

## 2 停堆 PSA 方法学

核电站停堆(或启动)过程中电站系统配置、安全保护措施、运行参数及外部运行环境均在不断变化。停堆工况下,许多安全系统的自动触发功能被闭锁,一些安全系统因维修已不可用,发生事故时主要依靠操作员的干预。停堆工况下的这些系统设计及运行特征给原有的 PSA 方法提出了新的要求,难以直接套用功率 PSA 中已广泛应用的传统的事件树/故障树(ETA/FTA)方法。借鉴国际上类似的研究工作,本文提出了电站运行状态离散法和分阶段评价相结合的实施停堆 PSA 特征方法,并采用主逻辑故障树评价方法进行事故序列定性定量分析。图 1 示出了停堆 PSA 实施方法与步骤。

### 2.1 电站运行状态离散法

电站运行状态离散法就是将核电站整个停堆工况(包括启动过程)划分为数个特征电站运行状态(POS),针对每一特征运行状态建立相应的 PSA 模型(包括电站模型、系统模型和人干预模型),将随时间变化的多状态问题近似求解。

### 2.2 分阶段评价法

因需要对所有特征运行状态下的全部初因进行研究,以致建立起来的模型非常庞杂,工作量浩大,难以求解。采用分阶段评价法既确保不遗漏重要的研究对象,又能大幅度减少计算量。分阶段评价法将停堆 PSA 评价过程划分为定性筛选阶段和详细定量阶段,详细定量仅针对通过定性筛选后得到的对风险确实有贡献的运行状态及初因事件。

### 2.3 主逻辑故障树评价法

该方法将传统的事件树法和故障树法完全合并,把所有的初因事件所导致的事故序列所对应的故障树,通过逻辑“或”门合并到电站主逻辑故障树中。因而,对某一电站的潜在事故风险只进行 1 次运算,而不是象过去需要通过多次运算才能得到。这不仅比以往的事故序列量化方法简便,而且易于进行敏感性研究,产生的 PSA 模型也易于更新和维护。从某种意义上说,采用主逻辑故障树法所产生的是一“活”的 PSA。

## 3 软件及可靠性数据

本文涉及的全部工作(包括建模和分析)均在本课题组自行开发的可视化的系统可靠性分析软件(VIRA)上完成。该软件基于已广泛应用的 PSA 分析软件 SETs,面向 WINDOWS 95 操作系统,具有集成化、可视化及先进的数据库管理特点,操作简便,运行速度快。

鉴于我国核电站设备可靠性数据库的现状,而 GNPP 又属于法国标准 900 MWe 电站,因此,本评价中设备可靠性数据基于法国 750 堆年的核电站运行经验及其可靠性数据库。对与

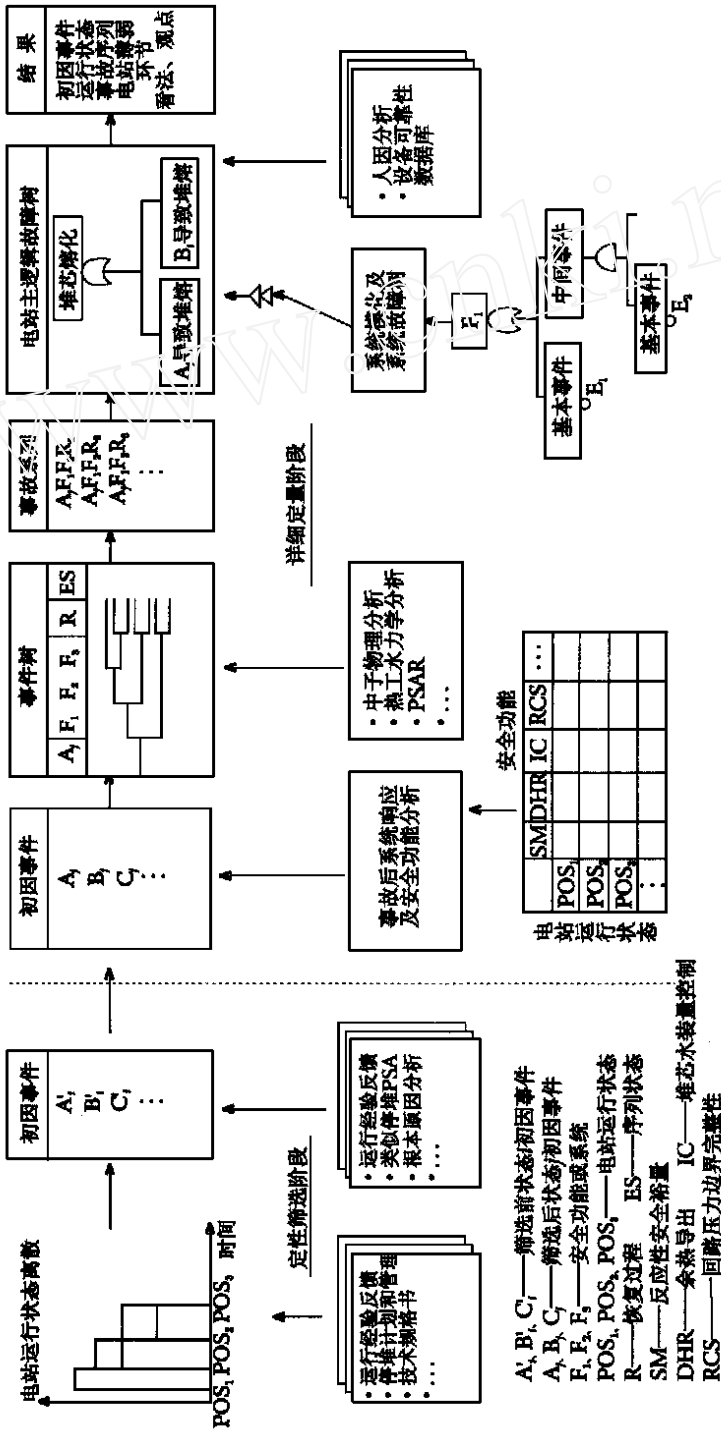


图1 停堆PSA实施方法与步骤

Fig.1 Approach and procedure of shutdown PSA

厂址特性相关(如外电网及最终热阱)及与法国电站设备不同的(如应急柴油发电机组)数据,则根据 GNPP 实际情况取值。人误数据根据法国 EDF 发展的 PHRA 人因分析模型及核电站模拟机实验结果进行评价获得。

#### 4 大亚湾核电站停堆风险分析

基于上文所述停堆 PSA 特征方法、数据及 VIRA 软件,根据 GNPP 实际的系统设计及运行特征,对 GNPP 的停堆运行潜在事故风险进行了 1 级 PSA 分析与评价。这里考虑了所有停堆工况(包括热停堆、中间停堆、正常冷停堆、维修冷停堆及换料冷停堆工况)。基于工作量方面的考虑,主要评价了失冷事故(包括丧失厂外电源)、反应性事故(主要是非均匀的快速硼稀释事故)和 LOCA 三类初因事件。构造得到、并经化简的 GNPP 停堆工况主逻辑故障树主页示于图 2。

##### 4.1 一般结果

停堆工况下 GNPP 三类主要初因(失冷、反应性和 LOCA)可能导致堆芯熔化频率(CDF)为  $6.14 \times 10^{-6}$  / (堆·年)。与功率工况下的堆熔频率比较(表 1)可知:它与功率工况同处一个量级,而停堆工况下单位时间的事故风险值比功率工况下的约大 1 倍。可见,大亚湾核电站停堆工况下的潜在事故风险不可忽视。

表 1 GNPP 停堆工况与功率工况潜在事故风险比较

Table 1 A comparison of risks between shutdown and full power operation for GNPP

运行工况	堆熔频率/堆·年	年平均运行时间/小时	单位时间事故风险/(堆·年)·小时 <sup>-1</sup>
功率工况	$3.33 \times 10^{-5}$	7 450	$4.35 \times 10^{-9}$
停堆工况	$5.27 \times 10^{-6}$	796	$7.71 \times 10^{-9}$

图 3 示出了计算结果中前 20 个割集的统计分布。从割集分布看:GNPP 在系统设计方面较为匀称合理,没有明显的薄弱环节。但仍有约 20 个割集频率超过  $1.0 \times 10^{-7}$  / (堆·年),与法国 EDF 要求的由任一事件族造成不可接受后果不超过  $10^{-7}$  / (堆·年)的规定有一定距离。可见,GNPP 在系统设计及运行方面尚存在一些有待改进和完善之处。

##### 4.2 堆熔频率随初因事件的分布

堆熔频率随初因事件的分布示于图 4。从图 4 可看出:失冷事故和反应性事故是大亚湾核电站停堆运行时的支配性初因,它们对堆熔的贡献约占 86.6%。工况 D(维修冷停堆)下丧失厂外电源,工况 H(热停堆及中间停堆)下丧失 ASG,工况 A(热停堆)下一团清水快速硼稀释及冷却剂管道半平面运行(Middoop)工况下丧失 RRA 等是支配性子初因。它们对堆熔的贡献分别约为 18.6%、12.7%、12.2%和 8.0%。除丧失厂外电源初因外,法国对上述其余初因均给予足够的重视,并在系统设计及规程等方面采取了相应的措施,部分措施在岭澳核电站设计中已采用。GNPP 对厂外电源丧失事故也在软硬件上采取了一定措施。

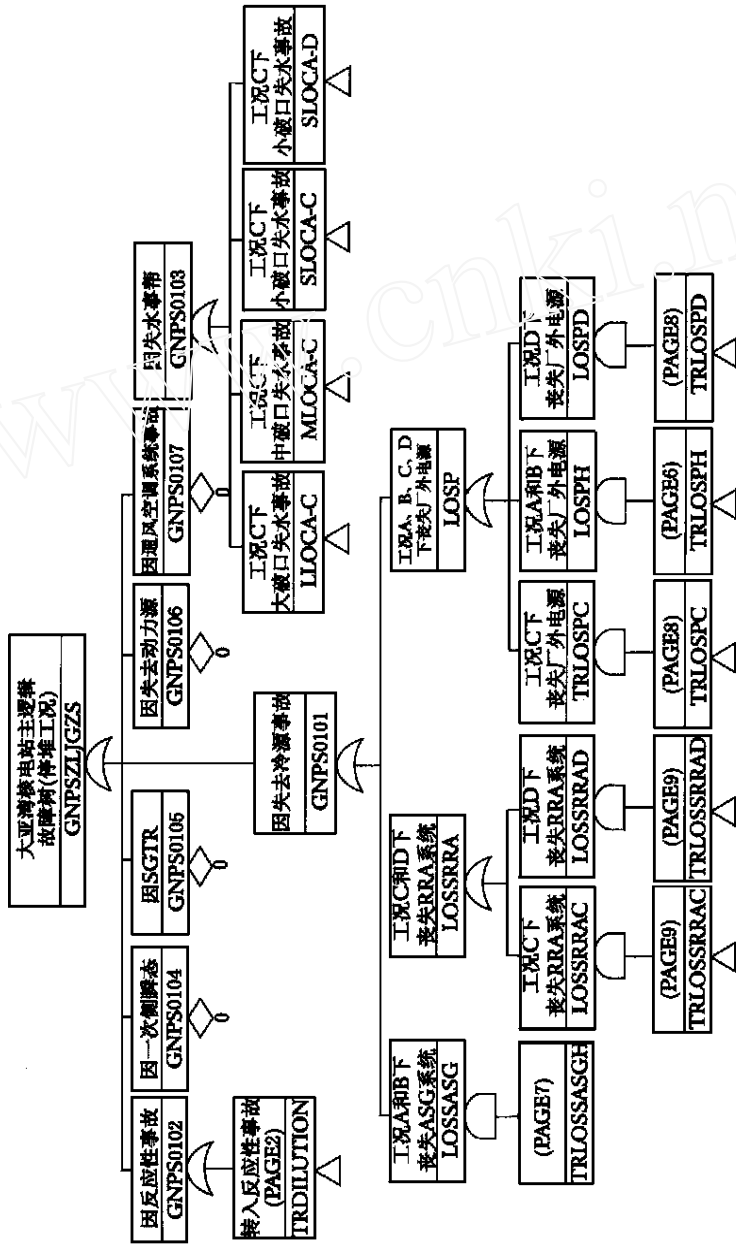


图2 大亚湾核电站停堆工况主逻辑故障树  
 Fig.2 Master logical fault tree of GNPP at shutdown condition

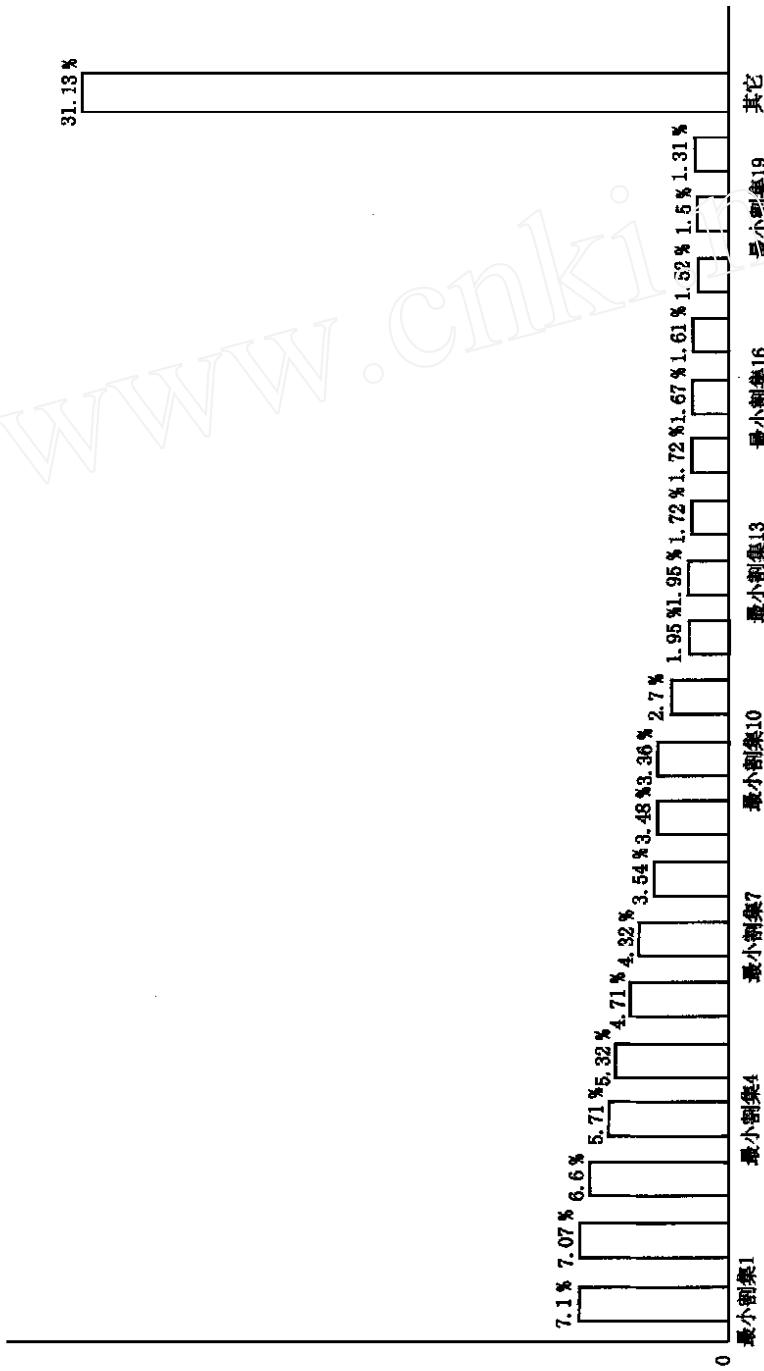


图3 大亚湾核电站停堆工况堆芯熔毁频率分布  
Fig.3 Core damage frequency distribution of GNPP at shutdown condition

### 4.3 堆熔频率随核电站运行工况的分布

堆熔频率随运行工况的分布示于图 5。

从图可见:堆熔频率随运行工况分布极不均匀。

维修工况下绝对风险值最大,它对堆熔贡献占 41%,且主要是人误所致。在该工况下,手动操作多而复杂,又缺乏系统严格的操作程序和事故规程,这是造成人误率高的主要因素。

热停堆工况绝对风险虽不大,但该工况运行时间很短,单位时间风险最大,约为其余工况的 1 倍。导致热停堆工况高风险的主要原因是:在该工况下,ASG 系统、蒸汽发生器及其旁通系统是堆芯冷却的唯一手段。提高供电可靠性,从而提高 ASG 运行可靠性,或增加启动给水系统(APD,在岭澳核电站设计中已采用),从而增加堆芯冷却的冗余手段,均是行之有效的办法。热停堆工况下风险高的另一原因是:存在一团清水硼稀释的风险。严格控制快速硼稀释操作,提高供电可靠性,及如法国 M310 型电站那样增加自动隔离硼稀释(自动切换 RCV 泵及入口)系统均可有效地降低该类事故风险。

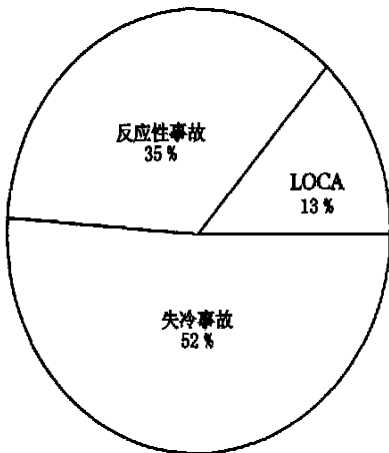


图 4 大亚湾核电站停堆工况下堆熔频率随初因事件分布

Fig. 4 Core damage frequency distribution of GNPP versus initiators at shutdown

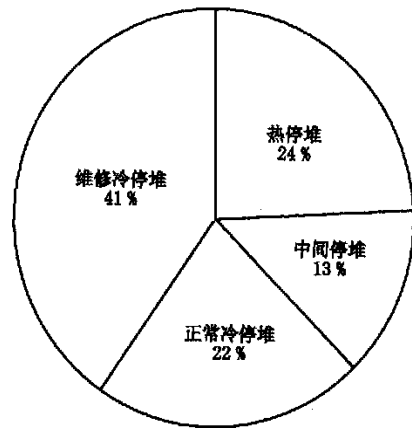


图 5 大亚湾核电站停堆工况下堆熔频率随运行工况分布

Fig. 5 Core damage frequency distribution of GNPP versus operational conditions at shutdown

### 4.4 堆熔频率随失效原因的分布

统计分析结果表明:与人误有关的割集发生频率为  $4.37 \times 10^{-6}$  / (堆·年),对堆熔的贡献占 71.29%。由此可见,以下措施是降低人误的有效措施:

- 1) 电站管理科学化、规范化,从而提高电站管理水平;
- 2) 编制行之有效的管理程序、操作程序及事故规程,提高运行、维修人员操作水平及处理事故能力;
- 3) 加强技术培训,加深对事故机理认识,提高员工素质;
- 4) 普及核安全文化,树立风险意识;
- 5) 加强经验反馈,不断总结并吸取经验教训。

计算结果还表明:应急柴油发电机组(EDG)的可靠性是影响停堆运行安全性的重要因素,

与 EDG 失效有关的割集对堆熔的贡献为 32.6 %。大亚湾核电站对 EDG 可靠性问题已非常重视,且取得了良好效果。增设的第 5(9) 台柴油发电机对降低该类事故风险将起一定作用。

## 5 结束语

系统地进行核电站停堆 PSA 研究在我国尚属首次。本文所提出的电站运行状态离散法、分阶段评价法及主逻辑故障树评价法等停堆 PSA 特征方法是进行多状态的停堆 PSA 研究的有效手段。

评价结果表明:

1) GNPP 停堆工况下潜在事故风险与功率工况同处一个量级,人们尤其是电站员工在思想观念上对核电站停堆运行安全性应给予高度重视,对高风险的工况及初因进一步开展研究,并采取适当的措施;

2) 人误及 EDG 失效为 GNPP 停堆运行风险的支配性因素,维修工况和热停堆工况为高风险运行工况,失冷事故和硼稀释事故为支配性初因等结论真实地反映了目前 GNPP 的实际情况,这对 GNPP 的停堆运行和管理具有一定的实际参考价值,对我国今后同类核电站的设计、运行和管理也具有现实意义。

# Risk Assessment for Shutdown Condition of Guangdong Daya Bay Nuclear Power Plant ( GNPP)

KE Guo-tu, XU Han-ming, YUAN Lu-zheng, LI Xiao-hua

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-45, Beijing 102413, China)

**Abstract** :Based upon traditional PSA methodology used in full power condition and the features of NPPs (nuclear power plants) at shutdown operation, a specific approach to conduct shutdown PSA practically and feasibly is proposed. This Approach includes mainly discretization of POSs (plant operation states), phased evaluation and master plant logical fault tree. This feature approach is applied in shutdown PSA for GNPP, and some results and suggestions, which reflect the realistic situation of GNPP, are obtained. These recommendations and conclusions are of practical value to shutdown operation at GNPP and they are also of great significance for design, operation and management for other domestic NPPs.

**Key words** :Daya Bay nuclear power plant; shutdown condition; risk assessment