

沈力生. 核电站工程抗震研究进展综述[J]. 华南地震, 2018, 38(S1): 33–38. [SHEN Lisheng. Summary of Research Progress on Seismic Research of Nuclear Power Station[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(S1): 33–38]

## 核电站工程抗震研究进展综述

沈力生

(广东省地震局, 广州 510070)

**摘要:** 核电作为清洁能源之一在世界多国应用较广, 但是强烈地震及其次生灾害威胁着核电站, 从而可能威胁全人类的安全。几十年来, 世界各国在核电工程抗震方面在这一领域展开了一系列的研究, 并取得了有价值的研究成果。本论文总结了世界核电发展史和核电站抗震史, 评价了各国核电站抗震措施。列举了现行的核电站抗震设计基准, 对比世界各国核电站的抗震安全性评估方法, 提出了今后的重点研究课题, 可供这一领域的研究参考。

**关键词:** 核电站; 抗震; “3.11” 东日本大地震; 安全性评估

**中图分类号:** P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)S1-033-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2018.S1.005

## Summary of Research Progress on Seismic Research of Nuclear Power Station

SHEN Lisheng

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Nuclear power, one of clean energy, has a wide application in the world. Strong earthquake and its secondary disasters threat to nuclear plants directly as well as threat to the safety of mankind indirectly. For decades, a series of studies are been launched in the field of nuclear power engineered anti-seismic all over the world and valuable research results have been obtained. This paper summarizes the history of the history of world nuclear power development and engineered anti-seismic history. The anti-seismic measures of the nuclear power plant were been evaluated. the current anti-seismic designs of nuclear power plant benchmark were been listed. The ways of anti-seismic safety assessment were been compared. Based on the above, some key research topics in the future was put forward, and reference for the research of the field.

**Keywords:** Nuclear power station; Aseismic; “3.11” east Japan earthquake; Safety assessment

**收稿日期:** 2018-03-28

**作者简介:** 沈力生(1965–), 男, 工程师, 从事主要从事地震工程研究。

**E-mail:** s13802998139@163.com.

0 前言

核电作为替代化石能源的清洁能源之一，能量密度要远高于太阳能和风能等形式，且没有水电的占地和大量移民问题，因此，作为优化能源结构的重要形式，核电具有很大的发展潜力。

人们所使用的核能是利用可裂变物质核裂变释放出的能量，伴随着核裂变过程，一定会产生裂变物质。这些裂变副产品具有短时间内高放射性以及长时间内低度放射性的物质，对人类和环境生态具有极大的危害。在核发电过程中，人们既需要获取核物质在裂变中发生的热量，又必须将所有核物质包括放射性裂变物质与外界隔离开，

限制在反应堆内。随着核技术的发展，核电发展也在逐步更新换代。

1 核电站发展史

1.1 世界发展史

1954 年前苏联建成了世界上第一座冷堆核电站，从此开启了核电时代。至今核电历经了四代，如表 1 所示。

通过表 1 可知，目前商业运行的核电站属于第二代和第三代，而且第三代正在逐步替代第二代核电站。由于不同国家的核电发展水平不同，因此拥有核电机组和发电量份额也不同。如表 2 所示。

表 1 世界核电发展阶段			
Table 1 World nuclear power development stage			
核电时代	使用时间	商业运行的国家	主要特征
第一代	1950—1970 年代	美国、前苏联、法国、英国	原型堆核电机组
第二代	1970 年代至今	世界上商业运行的绝大部分机组	商业轻水堆、重水堆等核电机组
第三代	2000 年至今	拥有核电的所有国家	比第二代更安全
第四代	预估 2050 年之后	拥有核电的所有国家	防止核扩散，经济性、安全性高和废物产生量少

表 2 世界主要国家机电机组数量和发电量排序		
Table 2 The quantity and power generation of electromechanical units in major countries of the world		
国家	机电机组数量	发电量
美国	1	7
法国	2	1
日本	3	4
俄罗斯	4	—
韩国	5	3
印度	6	—
英国	7	6
加拿大	8	—
德国	9	5
乌克兰	10	2

表 3 中国已开工并投入商业运行的核电站		
Table 3 Nuclear power plants that have been started and put into commercial operation in China		
核电站	开工时间	首台机组投入商业运行时间
大亚湾核电站	1987-08	1994-02
岭澳一期核电站	1997-05	2002-05
秦山核电站	1985-03	1994-04
秦山二期核电站	1996-06	2004-04
秦山三期(重水堆)核电站	1998-06	2002-12
田湾核电站	1999-10	2007-05

1.2 中国核电站情况

我国经过多年发展积累，已经形成了较完整的民用核能应用体系，这为核能电力在我国能源革命中发挥重要的作用奠定了坚实基础。在我国已开工并投入商业运行的核电站如表 3 所示。

表 3 中的秦山二期核电厂是我国第一个具有自主知识产权的商用核电品牌——CNP650，同时也是首座自主设计、建造、管理和运营的商用压水堆核电厂。秦山二期核电厂的建设与运营，实现了我国由自主建设小型原型堆核电站向自主建

设大型商用核电站的重大跨越，为我国自主设计、建设、运营、管理百万千瓦级核电厂奠定了重要的基础，加速了我国核电的国产化进程，并推动了国民经济的发展<sup>[1]</sup>。

除以上投入商业运行的核电站以外，仍有宁德核电厂、红沿河核电厂、阳江核电厂、福清核电厂、防城港核电厂、秦山一期扩建核电厂、海南昌江核电厂、台山核电厂、浙江三门核电厂、徐大堡核电厂、海阳核电厂、石岛湾核电厂、田湾 3、4 号核电站等 30 多个在建核电机组。预计到 2020 年我国核电运行装机容量将达到 7 000 万~8 000 万 kW。

## 2 核电站抗震史

核电高速发展的同时,核电的危险性也在增大。核爆炸中的当量都是折合成多少吨 TNT 来计算的<sup>[2]</sup>。核电站爆炸危机事件还能演化成其他危机事件<sup>[3]</sup>。对于核能源利用所产生的担忧,最具争议的依旧是安全如何得到有效保障。尤其是地震灾害对核电站的威胁。地震灾害虽然具有毁灭性,但其发生的范围局限于地球上某一的地域,其灾情具有一定局限性,绝不可能对全人类的生存构成威胁<sup>[4]</sup>。但是地震造成核电厂发生严重事故的后果非常的严重,对政治、经济和社会,甚至全人类的影响是非常巨大的<sup>[5]</sup>。

在核电站的发展史上已经经历过几次比较大的地震灾害,各国核电厂遭受到的破坏各不相同。

### 2.1 1994 年和 2003 年美国洛杉矶地震

美国洛杉矶市发生过两次较大的地震,分别是 1994 年 1 月 17 日的 6.6 级地震和 2003 年 12 月 22 日的 6.5 级地震。这两次地震造成洛杉矶市人员伤亡、建筑物毁坏。但是震区内的核电站均未受到大的损害。

### 2.2 1999 年中国台湾 7.6 级南投地震

1999 年 9 月 21 日,我国台湾南投县集集镇发生 7.6 级地震。地震发生时,核电机组自动停堆。但是还是受到地震的冲击,岛内中心的两座重要的配电站受到严重破坏。

### 2.3 2007 年日本 7.3 级中越冲地震

2007 年 7 月 16 日,日本关西地区发生里氏 7.3 级中越冲大地震,导致柏崎刈羽核电站发生多起核安全事件。该次地震发生时,正在运行的 4 个机组虽然自动停堆,并保持冷停堆状态,但是柏崎刈羽核电站仍然发生了极少量的核泄露。地震造成变压器起火、装有低水平放射性废弃物的罐子倾倒、含微量放射性物质的水泄漏、含放射性物质的气体排出等。虽然地震水平超出设计地震值,但是由于没有丧失场外电源,因此没有造成全场断电,安全厂用水也没有受影响,因此没有造成放射性物质对环境的失控释放。

### 2.4 2011 年 3 月 11 日东日本 9.0 级大地震

2011 年 3 月 11 日发生在日本福岛附近的东日本 9.0 级超强地震,引发了人类历史上第三次重大核灾难,这次东日本大地震作为有史以来对核

电站产生最大灾难的地震灾害,对全世界造成巨大冲击。地震灾害对核电站安全性的影响再次被全世界所关注。

福岛核电站内共有 6 个沸水反应堆机组。在大地震发生时,4、5、6 号机组正处于停机状态。当检测到地震时,1、2、3 号机组立刻进入自动停机程序。因此,厂内发电功能停止,由于机组与电力网的连接遭受到大规模损毁,只能依赖紧急柴油发电机提供冷却系统。但是,随即而来的大海啸淹没了紧急发电机室,损毁了柴油发电机,冷却系统停止运作,反应堆开始过热。1、2、3 号反应堆发生了堆芯熔毁,发生了几起氧气爆炸事件,导致大量放射性物质泄漏。福岛核电一厂 6 座堆全部废除,意味着完全退出了历史舞台。此次由地震引发的福岛核电站事故造成了广泛性的环境影响,地震灾难后续放射性物质处理远未结束<sup>[6]</sup>。

此次核事故在国际核事件分级表中被评为最高级的第七级,也是 1986 年切尔诺贝利核电站事故以来最严重的核事故。

### 2.5 2011 年美国 5.8 级弗吉尼亚地震

2011 年 8 月 23 日,美国东海岸发生的 5.8 级地震,附近 12 个核电厂均有震感。该次地震中核电机组实现了停堆,核电厂丧失了场外电源,4 台应急柴油机全部启动,核电厂厂房水平方向和竖起方向各加速度反应谱均有超出。反应堆厂房内部的结构墙体出现了裂缝,放射性废物储存罐也发生了滑移。

通过以上各次地震中核电站的抗震性能表现,可知各核电厂在地震灾害发生时都实现了停堆。但是应对两个超设计基准事故叠加的情况,比如 3.11 日本大地震的 9 级地震与超级海啸,核电站的应对能力较差。因此各国针对超设计基准地震采取了一些应对措施。

## 3 各国核电站抗震措施

只要发展裂变核电,就时刻要防止任何形式的核物质和放射性物质的外泄,因此核电站在设计建设之初就作了各种安全预防的措施。对于频繁遭受地震风险的核电站的安全是各国政府都非常关注的,尤其是在 2011 年“3.11”东日本 9 级大地震以来,各国政府都采取了相应的安全保障措施。根据震后的响应表明,国际及各核电国的核安全监督管理机构以及运营单位,立即实

施严格的安全复查,范围包括已竣工投产的机组、正建造安装的机组和在报送核准的机组。

### 3.1 日本核电的抗震情况

日本“3.11”地震引发的福岛核泄露造成巨大的损失,给早已进入“以核电为主力的时代”并且处于地震带上的日本敲响了警钟<sup>[7]</sup>。震后,因此日本核电站采用以下三个方面的抗震措施。

(1) 进行安全评价。“3.11”地震发生4个月之后,日本政府宣布应用欧洲国家的压力测试方法和经验对日本全境核电站进行安全评价。

(2) 加固供电塔。“3.11”地震导致供电塔倒塌使核电站丧失了外部供电功能,因此事故发生后,各核电站都对供电塔进行加固增强其抗震能力。

(3) 采用隔震技术。震后日本政府资助东芝、三菱、日立三大核电工程承包商联合开展核岛隔震设计,以提高核电站抵御超设计基准地震的能力。

### 3.2 欧洲各国

欧盟27个成员国中有14个成员拥有核电站,核电站总数为153个。福岛核事故后,欧洲理事会宣布重新审查欧盟所有的核电站的安全,对欧洲各核电国家开展了评估核电站安全裕量的压力测试,以最大程度确保核安全。其中德国政府决定逐步退出核电领域,直到关闭境内全部核电站。

### 3.3 美国核电的抗震情况

美国有104通过注册的核反应堆,其中69座为压水反应堆,另外35座为轻水反应堆,美国全国电力的20%来自核能发电,因此福岛核事故对没有影响美国发展核电的立场,只是美国进一步加强了核安全举措。核管制委员会要求核电站业主重新对核电站的地震风险进行评估,以确认是否需要根据新的地震风险分析结果来修正安全相关的抗震设计基准。

### 3.4 其他国家核电的抗震情况

除了日本、欧洲和美国之外,其他的拥有核电站的国家也采取了措施。瑞士暂停了新核电站的审批,并开始重新讨论安全标准。同样慎重发展核电的国家还有澳大利亚、以色列、菲律宾、印度、泰国、俄罗斯等国<sup>[8]</sup>。

### 3.5 中国核电的抗震情况

福岛核事故发生后,中国对核电站暂停了新项目的审批工作。成立了民用核设施综合检

查团对大亚湾核电站、岭澳核电站二二期、秦山核电站一二三期、田湾核电站、方家山核电站等在役在建核电项目的选址和地震地质评价、抗震能力评估等情况进行了全面安全检查。

通过检查,国家核安全局总体上认为我国核电站在抗震能力方面没有发现问题,但是对于无抗震设计的一些建筑增加了抗震要求。例如,对于原始设计无抗震要求的应急指挥中心和乏燃料水池监测仪表,安全壳过滤排放系统等。

通过以上对各国的分析可知,对待具有地震风险的核电站,各国的态度不一致,但是各国对核电站都加强了安全检查,并重新修订核电站的抗震设计标准,以加强超设计基准地震安全性的保障作用。

## 4 关于核电站的抗震设计基准

修订抗震设计标准、进行安全性评估都需要建立在核电站的抗震设计基准之上。虽然世界各地发生同等概率水平的地震等级是千差万别,世界各国核电厂的构筑物、系统和设备的抗震设计基准基本都采用国际原子能机构推荐的核电厂安全停堆地震的确定标准。

### 4.1 国际原子能机构

对于核电厂的抗震设计基准下限值,国际原子能机构(IAEA)推荐的《核动力厂地震危险性评价》安全导则强调:无论评价的地震危险性水平如何低,建议每个核电厂对应于SL-2级设计地震动的最小值采用0.1g地面水平峰值加速度。《核电厂的抗震设计与鉴定》(HAD 102/02)要求对应于厂址每年 $10^{-4}$ 超越概率(万年一遇)的设计基准地面运动的地震水平进行设防。《先进轻水反应堆用户要求文件(URD)》中要求核电厂抗震设计方案要适用于美国大部分厂址,因此SSE地面水平峰值加速度定为0.3g;《轻水堆核电厂欧洲用户要求文件(EUR)》中说明设计方案要适用于欧洲大部分厂址,因此SSE地面水平峰值加速度定为0.25g。

### 4.2 我国在建和运行核电厂的抗震设计基准

我国现行核安全导则《核电厂厂址选择中的地震问题》中建议,无论评价的地震危险性水平如何低,每个核电厂对应于SL-2级设计地震动的最小值采用0.1g地面水平峰值加速度。并据此确定了我国核电厂设计标准的要求。

核电厂在选址过程中都进行了地震危害性评价,并确定了厂址的抗震设计水平,多数厂址万年一遇的地震水平低于 0.2 g,少数厂址的地震水平在 0.2~0.3 g 之间。中广核集团的大亚湾、红沿河、宁德、阳江和防城港等核电厂厂址的地震水平分别为 0.18 g、0.18 g、0.15 g、0.19 g 和 0.16 g,都小于设计采用的抗震设计基准 0.2 g。台山核电厂厂址地震水平为 0.18 g,也小于设计采用的抗震设计基准 0.25 g。从厂址的地震危险性评价结果来看,大亚湾、岭澳、红沿河、宁德、阳江、防城港、台山的抗震设计基准都是满足国家标准要求的。

中核集团的 M310 堆型和田湾核电厂的抗震设计基准也保持了原始设计的 0.2 g,海阳核电厂和三门核电厂(AP1000)的抗震设计基准根据 URD 的要求确定为 0.3 g,台山核电厂(EPR 欧洲压水反应堆)的设计基准根据 EUR 的要求确定为 0.25 g,山东石岛湾核电厂(高温气冷堆)设计基准为 0.2 g。

## 5 关于核电站的抗震安全性评估方法

核电站的抗震设计基准确定之后,各核电站的安全性还需要根据定时或者不定时的评估来确定。各国的安全性评估方法也各有不同。

### 5.1 欧洲各国

欧洲的核电站安全评估是建立在全面透明的风险评估的基础之上的。首先评估核电站在抗震设计基准下的抗震情况。对于超设计基准地震激励,采用地震概率安全评价(PSA)方法或抗震裕量分析(SMA)方法,评估核电站是否存在抗震薄弱环节和是否会出现陡边效应,并对如何增强薄弱环节和避免陡边效应提出改进措施。

### 5.2 美国

美国拥有美国联邦法规 10CFR 系列,美国核管会导则 RG 系列,拥有由美国国家标准学会(ANSI)、美国核学会(ANS)、美国材料试验协会(ASTM)、美国机械工程师协会(ASME)、美国土木工程师协会(ASCE)、美国电气工程师协会(AIEE)等制定的工业技术标准等。

美国核安全设备抗震评价最早可追溯到美国联邦法规第 10 部第 50 分部(10CFR50)中有关核能生产和利用设施的执照发放的规定。美国电气和电子工程师协会根据该法规于 1971 年发布,并于

1975 年修订“IEEE 推荐的核电厂 1E 级设备抗震鉴定实施规范”(IEEE Std 344)。，美国核管会(NRC)以管理导则(RG 1.100)的形式,分别于 1976 年和 1977 年对这 2 个版本的抗震鉴定标准在总体上予以认可。IEEE 于 1987 年发布 IEEE Std 344 的第二次修订版,NRC 于 1988 年也发布 RG 1.100 的第二次修订版。1994 年美国土木工程学会发布了“核电厂用能动机械设备的鉴定”。该文件包括了能动机械设备的抗震鉴定和功能鉴定。之后美国土木工程学会又对该标准进行了多次修订<sup>[9]</sup>。

### 5.3 中国

(1) 抗震裕量评估法(seismic margin assessment, SMA)。核电厂的抗震设计具有保守性和裕量,SMA 的目的是分析确定核电厂因其保守的设计具有的承受大于安全停堆地震(SSE)的裕量。从 1980 年代起,美、日、加、韩、欧盟等国相继开展了核电厂抗震裕量评估工作。我国是 2011 年后首次引用<sup>[10]</sup>。

SMA 主要有两种方法:①美国核管制委员会推荐的方法:基于事件树或故障树模型的 SMA;②美国电力研究协会推荐的方法:基于成功路径(一条或两条)的 SMA。两种方法在确定电厂或系统模型上有所不同,但最终目的是获取电厂整体的高置信度低失效概率值<sup>[11]</sup>。

我国的 SMA 的应用主要与美国、法国等公司开展合作。美国西屋公司对 AP1000 核电站进行了 SMA,并向国家核安全局提交了结果,说明 AP1000 具有抵御福岛超强地震冲击的能力;清华大学核能与新能源技术研究院对石岛湾高温气冷堆开展了 SMA 研究员法国阿海珐公司针对台山 EPR 开展 SMA。

根据评估的结果提出了运行核电厂重要外部事件裕量评价工作方案和福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求,以及十二五新建核电厂安全要求等。提出了复核与原、现法规标准体系安全准则的一致性偏差,进一步提出了有针对性的安全改进要求。

(2) 地震概率风险评估(seismic probabilistic risk assessment, SPRA)。地震概率风险评估法是为了确定由地震所引起的不良后果发生的概率分布,用于鉴定核电系统或设备的薄弱环节。通过地震对设备的潜在影响产生的概率性安全评估,综合考虑地震动的随机性以及结构的地震反应和材料能力参数,并将它们整合起来对风险进行概

率性评估。

SPRA 法从全概率角度评估核电厂的地震风险,评估结果具有较大的不确定性(包括地震危险性和地震易损性等引入的大量不确定性),且该方法需要概率论和统计学等数学知识,不利于工程技术人员掌握。

与 SPRA 相比, SMA 法是一种更加直接、简单且争议较少的评估方法国外(特别是美国)对核电厂 SMA 方法的研究与应用较早积累大量的分析数据和评估经验,但该方法目前仍需要依靠专家判断等经验数据,评估结果较保守。应按确定论与概率论两种分析方法兼顾的安全分析体系进行评价,用两种方式分析的结果互相补充,发现可能的引发事故点 [12]。

## 6 结语

通过以上分析,可知:

(1) 现在运行的商业核电站是以第二代和第三代核电站为主。第二代核电站运行年代久,安全性差。但是如果淘汰,对于商业运行成本来说太大,因此可以针对第二代核电站提高抗震基准,增加抗震安全性评估指标和评价次数。

(2) 地震灾害虽然具有毁灭性,但其发生的范围局限于地球上某一的地域。因此世界各国要对核电站所处的区域进行地震安全性评价。对于风险较大的区域加强抗震措施;对于风险较小的区域加强地震次生灾害的预防措施。

(3) 核电站的抗震安全性评估方法较为复杂。不同时期的方法不一样,不同国家的方法也不一样。就算是同样的方法,使用的过程也不一样。遇到重大安全事件,核电站仍然存在着各种风险。因此探索更适合本国条件的评估方法更为重要。

## 参考文献:

- [1] 白文婷. 核电厂抗震设计中的两个问题及厂房结构地震易损性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [2] 张晓东. 由核爆炸毁伤值讨论地震毁伤值[J]. 灾害学, 1990, 5(1): 22-26.
- [3] 陈丽满, 陈长坤, 赵冬月, 等. 基于灾害演化网络的沿海核电站风险分析[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 202-205.
- [4] 单修正. 对灾害研究中几个问题的思考[J]. 灾害学, 1999, 14(4): 85-89.
- [5] 孔宪京, 林皋. 核电厂工程结构抗震研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 62-74.
- [6] 王泽雷, 周涛, 李洋, 等. 福岛核事故对中国核电站厂址选择影响研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12H): 327-331.
- [7] 楼凤升, 徐国庆. 核废物地质处置简介[J]. 灾害学, 1987, 2(3): 94-98.
- [8] 马玉荣, 屈璐璐. 福岛核危机, 对世界能源变局影响几何? [J]. 国际融资, 2011(5): 37-39.
- [9] 孙造占, 路燕, 朱秀云. 关于核安全设备抗震鉴定的监管要求[J]. 核动力工程, 2011(S1): 4-8.
- [10] 王晓磊, 吕大刚. 核电厂抗震裕量评估方法研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(12): 116-122.
- [11] 黎鹏飞, 李忠诚. CPR1000 核岛厂房抗震裕量分析和评估[J]. 工业建筑, 2014, 44(12): 8-11.
- [12] 刘建辉. M310 型二代加核岛 K 厂房地震安全性评价 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.