

刘德稳, 谭平, 周福霖, 等. 核电站工程防灾减灾研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 149-153. [Liu Dewen, Tan Ping, Zhou Fulin, et al. Disaster Prevention and Reduction of Nuclear Power Stations[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 149-153.]

## 核电站工程防灾减灾研究<sup>\*</sup>

刘德稳<sup>1</sup>, 谭平<sup>1</sup>, 周福霖<sup>1, 2, 3</sup>, 李祥秀<sup>2</sup>, 李洋<sup>3</sup>, 范世凯<sup>1</sup>

(1. 广州大学 教育部工程抗震减震与结构安全重点实验室, 广东 广州 510405;

2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 通过对核电站历次事故概况的回顾, 对核电站进行了防灾减灾的安全分析, 包括核电站选址安全分析、风灾害安全分析、地震灾害安全分析、火灾及爆炸灾害安全分析、风暴潮、海啸等水灾害安全分析、雪灾安全等分析, 对核电站应防灾减灾的研究进展进行了总结, 最后进行了展望并提出了若干关键科学问题。

**关键词:** 核电站; 防灾减灾; 选址; 地震; 海啸; 火灾

**中图分类号:** X43; TL69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)02-0149-05

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.028

核电能源是人类改造自然利用自然的一种清洁高效的能源, 其无污染, 不会产生加重地球温室效应的二氧化碳。1克铀所释放的核能相当于3t煤或2000L石油所产生的能量, 积极发展核电是我国能源的长期重大战略选择。目前我国核电装机容量910万千瓦, 仅占全国总发电量2%, 与全球核电国家平均17%(其中有17个国家的核电在本国发电量中比例超过25%)有很大差距, 根据预测, 我国2020年的核电装机容量将比目前增长10倍左右, 预计未来20到30年, 核电站将在我国各地区成批兴建。但诸多自然灾害使得核电站防灾减灾安全分析成为必要, 本文针对核电站面临的多种灾害, 对核电站防灾减灾进展进行了回顾与前瞻。

区的土壤中至今依然存在这种放射性物质; 2007年日本新潟县6.8级地震, 引发柏崎刈羽核电厂多个装有放射性废料的罐子倾倒、含放射性物质的水泄漏等事故; 2011年3月11日日本东北部海域发生9.0级大地震同时引发巨大海啸, 使得福岛核电站多个机组发生停堆, 强震使得核电站外电网中断, 同时应急柴油发动机也因为海啸丧失功能, 所有电源中断, 冷却功能失效, 内部燃料过热熔毁发生爆炸, 造成核泄漏; 2011年8月下旬美国东部弗吉尼亚州发生5.8级地震, 震中附近一座核电站失去外部电源, 反应堆紧急停机, 另外12座核电站出现异常; 核电站事故会对人类生命、生活及当地经济造成极大影响, 防灾减灾安全分析势在必行。

### 1 核电站事故概况

历史上发生过多起核电站事故供后人吸取经验教训。1979年由于设备机械故障导致美国三哩岛核电站事故; 1986年前苏联切尔诺贝利核事故, 设计方案落后, 没有安全壳, 其中压力管式石墨慢化沸水反应堆的设计缺陷, 尤其是控制棒的设计问题才是导致事故的根本原因, 核电站周围地

### 2 核电站防灾减灾安全分析

#### 2.1 核电站工程选址安全分析

核电站选址是核电站防灾减灾的关键一环。法国核电站选址遵循技术经济、安全、环境和社会经济四项准则; 美国规定了地质和抗震、水文、气象、突发事件、人口密度、生态环境、社会经济、安全计划等核电站选址的一般准则<sup>[1]</sup>。我国

\* 收稿日期: 2013-08-26 修回日期: 2013-10-14

基金项目: 中国工程院学部重点咨询项目“核电站隔震保护技术研究”(2011-XZ-25)

作者简介: 刘德稳(1983-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 讲师, 国家一级结构工程师, 从事核电站与结构、岩土工程防灾方向研究。E-mail: civil\_liudewen@sina.com

作者简介: 谭平(1973-), 男, 湖南常德人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事结构防震减灾方向研究。

E-mail: tanping2000@hotmail.com

在选址安全上规定:核电站不能建在地质不利地段,包括有活动地震断层、泥石流、山坡坍塌、地面沉陷、液化、淤泥等地质不稳定区域,以及容易受海啸影响的海拔高度较低的海边。邓有平等对核电站选址地质灾害进行了研究并给出了防治对策<sup>[2]</sup>。李小军等探讨了核电工程场地设计地震动参数确定几个环节中的关键问题,包括不同地震危险性分析方法的采用、地震动衰减关系的选取和设计地震动参数的综合取值等<sup>[3]</sup>。世界范围内核电站处于沿海的居多,理由是水源丰富和对人类威胁面积低,仅在沿海地区选择核电厂址不能满足未来核电发展的需要,迫切需要在内陆省份建设一批核电站以解决缺能源省份的能源供应。我国有很多处于内陆的核电站的经验,拟规划建设内陆核电站包括江西彭泽核电站、湖北咸宁核电站和湖南桃花江核电站等<sup>[4]</sup>。为应对地震和军事等其他威胁,有专家提出建造地下核电站的建议,我国已有成功建造地下水电站的经验,但核电站不同于地下水电站,设备工艺复杂,稍有疏漏便能造成严重后果,因此在地下核电站的研究和应用当中应当慎重,陆佑楣等对地下核电站进行了可行性分析<sup>[5]</sup>。此外,刘连光等研究了磁暴对于沿海核电站变压器的侵害,并建议核电站选址和变压器选型时应评估磁暴的影响<sup>[6]</sup>。

## 2.2 核电站风灾害安全分析

在核电站选址过程中通过地质勘查,尽量避开了对核安全不利的地质构造,但在沿海核电站中,却常伴有各类极端性气候如台风、龙卷风等,此类较大的风荷载往往可使核电站结构尤其是常规岛厂房发生破坏,摧毁核电设备,严重影响核电站安全。国外学者在数值模拟龙卷风场方面也做了很多工作<sup>[8]</sup>。Sun 等通过理论推导出了适用于核电站风荷载计算的龙卷风简化模型<sup>[7]</sup>。美国第三代核电设计控制文档强调了必须以风洞试验作为核电结构风荷载评估的技术手段<sup>[9]</sup>。汤卓等采用计算流体动力学(CFD)方法研究了核电站常规岛主厂房的龙卷风荷载<sup>[10]</sup>。周向阳等设计制作了刚性测压模型,在考虑核岛及其邻近建筑物干扰的情况下,进行了多种地貌下、多个风向角的刚性测压风洞试验<sup>[11]</sup>,为核电常规岛主厂房结构抗风设计与评估提供了依据。

## 2.3 核电站地震灾害安全分析

### 2.3.1 核电站结构抗震设防标准要求

美国、日本、欧洲的多个国家在不同发展时期提出了各自不同的抗震设防标准。美国在1970年所确定的核电厂地震设计输入安全停堆地震

(SSE)应采用 $10^{-4}/a$ 的概率水平,且提供的RG1.60地面设计反应谱<sup>[12]</sup>已为全世界核能界所广泛接受。美国核管制委员会(NRC)1997年根据对建成核电厂所作的地震风险分析评估活动加以深入研究后推出了RG1.165<sup>[13]</sup>,规定今后新的核电厂SSE的参考概率提升为 $10^{-5}/a$ 。NRC在2007年又出台RG1.208<sup>[14]</sup>。日本2006年版核电厂抗震设计指南JEAG4601<sup>[15]</sup>中指出S2的参考概率水平为 $10^{-5}/a$ 。目前世界核电站抗震设防地震动多为 $0.2g \sim 0.3g$ ,少数大于 $0.3g$ ,极个别大于 $0.6g$ ,设防标准要求逐步提高,我国以往多采用RG1.60谱,目前设计的CPR1000核电站采用RG1.60修正谱,其设计运行安全地震地面震动限于 $0.2g$ 以下。另外,我国目前核电厂大都修建在沿海地区,海域工程取排水构筑物如防波堤、护岸、隔热堤、直立墙和取排水箱涵等构筑物的抗震安全也是保障核电厂安全运行的重要内容,这些构筑物具有掩护核电厂设施防御外海波浪,确保取排水的畅通,保证冷却水供应,紧急情况下能够使反应堆处于安全停堆状态,排除余热等重要作用。国际原子能机构和各国规范标准都要求其具有较一般水工建筑物和工业民用建筑更高的抗震安全性。美国、日本关于核电建筑物规范、标准也都偏重于核岛结构,而很少涉及海域工程取排水构筑物,这严重影响了核电厂海域工程取排水构筑物的抗震安全评价。大连理工大学结构抗震研究所运用土工试验、物模试验和数模分析振动台试验等技术进行抗震安全评价研究取排水构筑物的破坏机理和变形特性,较好的把握了构筑物的抗震性能<sup>[16]</sup>。

### 2.3.2 核电站结构隔震与减震研究与应用

当核电站采用隔震设计方案时,具有满足提高其抗震性能要求的优势,因此隔震核电站的设防目标将会高于按传统抗震技术设计的核电站。人类虽然有着丰富的隔震设计的经验,但是应用的核电站方面的数量还不是太多。法国是世界上把隔震技术应用到核电最早的国家,最先在法国建造了四座隔震核电站,在南非建造了两座隔震核电站,经过隔震设计后的核岛结构基础处的相对位移达 $10\text{ cm}$ 以上,作为自身存在的与核安全有关的重要厂用水地下管道的破断风险未能给出明确的交待<sup>[17]</sup>。日本在1980年也尝试过核岛基础隔震的可行性及技术性研究和方案的试验研究,但对地下管道的风险也作了回避<sup>[18]</sup>。受2007年新泻6.8级地震中柏崎刈羽Koshwazaki-Kariwa核电机组出现超设计地震的工程实例的影响,日本于2008年开始针对第三代核电机组执行了新一轮的核岛

基础隔震试验研究。美国在理论、试验和应用方面都付出了很多努力, 在他们的 ALMR 项目中引用了隔震技术并作了试验, 并在 SAFR 项目中应用了隔震技术<sup>[19]</sup>。NRC 慎重的指出为确保安全, 将隔震技术应用到核电站还有大量工作要做<sup>[20]</sup>。此外, 英国的 Tomess Heysham 核电站也采用了基础隔震技术, 新西兰、韩国等也进行了相关研究。我国上海核工程研究设计院等单位也进行了适合我国的核电站隔震研究。另外, 在核电站中有大量的管道支吊架系统, 其质量的好坏与核安全密切相关。管道的连接和支座处是刚度突变的地方, 而且在地震时管道两端常常不会同步振动, 因此很容易产生应力集中而发生破坏。可以研究管道支吊架系统的隔震减震方案与柔性支承方式, 对管道-支吊架系统采用隔震减震装置的位置与数量进行一体化优化研究。

### 2.3.3 核电站设备抗震减震安全分析

核电站结构中有大量重要设备, 需要在地震作用下给予重点保护。楼层反应谱作为核电厂系统、结构和部件抗震设计的输入, 其计算分析是核电厂设备抗震分析的重要环节。Pentti Varpasuo, Aleksandar P 等为评估地震对核电厂内设备的威胁程度, 对楼层反应谱进行了研究, 包括水平反应谱和竖向反应谱<sup>[21-22]</sup>。李忠献等对核电厂结构考虑土-结构相互作用进行了随机地震反应分析, 着重探讨地基土特性的不确定对核电厂结构楼层反应谱的影响<sup>[23]</sup>。周福霖等利用功率谱密度函数法建立了楼层反应谱, 研究了在增加隔震装置情况下, 土-结构相互作用、主次结构耦合作用和次结构阻尼比等因素对楼层反应谱计算的影响<sup>[24]</sup>。对于设备隔震, 可以采用局部隔震技术如轨道式隔震台等来保护核电站的系统, 也采用三维隔震技术如空气弹簧、螺旋弹簧等能够使重要设备避开竖向共振区域, 减小竖向地震对重要设备的破坏, 日本等学者在三维隔震方面进行了卓有成效的研究<sup>[25-26]</sup>。

### 2.4 核电站火灾及爆炸安全分析

核电站发生火灾和爆炸将造成严重后果, 须予以充分重视。核电站发生火灾和爆炸的原因有以下几种: 变压器等电气设备起火, 如我国台湾核电站“马鞍山一号堆”就发生过发电机火灾事故; 反应堆故障造成的火灾和爆炸, 如英国温切凯尔核电站因为石墨反应堆发热起火, 又如苏联切尔洛贝利核电站事故; 地震引发的火灾, 如 2007 年日本柏崎刈羽核电站变电设施就因地震引起变压器起火, 火势蔓延遭遇核电站内的大型储油罐、应急柴油罐和储氢罐, 容易形成爆炸性火灾<sup>[27]</sup>;

维修动力火灾; 战时常规弹药引发的爆炸等。安全壳内部一旦发生爆炸将产生强烈的冲击波, 空气发生剧烈的膨胀, 造成安全壳内部的压力急剧增大, 当安全壳内壁的压力超过极限内压时, 混凝土的应变达到极限应变, 安全壳就会开裂, 会造成放射性物质外泄。核电站有很多防护屏障来保证不发生核泄漏, 如安全壳作为最后一道屏障, 能够预防爆炸作用下的核泄漏, 但爆炸作用威力极大, 核电站在爆炸作用下的性能表现值得关注。Huang, Y. N 等对核电站爆炸作用下的性能进行了研究<sup>[28]</sup>。王天运等对爆炸冲击波作用下核电站安全壳结构的动力响应进行了数值模拟<sup>[29]</sup>。孔宪京等研究了一种泄压阀, 在爆炸压力达到一定程度的时候泄压, 安全壳内部的压力减小, 安全壳结构就不会破坏, 从而避免发生放射性物质外泄<sup>[16]</sup>。

### 2.5 核电站风暴潮、海啸等水灾害安全分析

地震会给核电站带来灾难, 地震引发的特大海啸同样是一种灾难, 由于地震引发特大海啸, 远超出核电站海域工程设防标准, 造成厂房结构内部发生失水事故, 使得安全壳的降温系统遭到破坏, 安全壳内部的温度升高, 核燃料棒以及外包合金保护层溶蚀, 最终引发厂房结构内部氢气爆炸以及堆芯融化造成压力壳被击穿, 放射性污染扩散等严重后果。海域工程配套设施和防护措施应继续纳入更多的考虑之中, 如防波堤的建设等; 对于来自水文方面的危险性, 由于我国东南沿海属于台风频发地区, 在确定设计基准洪水时风暴潮也被考虑为是最重要的洪水事件, 因此也值得开展研究。王乐铭等滨海核电站可能最大风暴潮(PMSS)研究<sup>[30]</sup>。福岛核电事故对核岛安全壳的设计具有很好的参考作用, 目前的共识是, 福岛核电站的海啸保护体系安全系数不够。当核电站失去厂外电源以后, 就需要开始进行现场交流和直流发电, 用以激活安全系统并阅读仪器。在福岛这些备用的电源一直都被置于保护措施相当糟糕的房间里, 以致于会在海啸中被巨浪带来的海水淹没。用防水和防火的房间放置现场交流和直流电源是最简单和必须的安全保护措施, 帮助核电站抵御洪水、火灾、飓风和龙卷风等自然灾害。福岛灾害发生后, 美国核工业主动加强了针对自然灾害的保护措施。如何彻底解决核电站的安全隐患也成为各方关注的重点, 美国 Weston-house 公司采用非能动安全系统设计的 API000 再次获得了更多的肯定, 该机组在反应堆上方放置若干千吨级水箱, 一旦遭遇紧急情况, 不需要交流电源和应急发电机, 在 72 小时内仅利用地球引力和物体重力等自然力就可驱动核电站的安全

系统<sup>[31]</sup>。

## 2.6 核电站其他灾害安全分析

除了以上几种主要灾害,其他灾害也应引起重视。如雪灾也是核电站需要考虑的一个因素,在核电站中泵能否正常工作决定着反应堆的安全,在雪灾灾害下泵可能会失效。2008 年中国南方大雪灾,中核集团采取了预防措施,特别是对仪表设备采取了相应的防冻措施,保证了温度控制等。另外,还应该关注核电站管道断裂甩动等事故发生。核电站管道不同于其他的一般性管道,其发生破坏所产生的后果是极其严重的,尤其地下的管道,处于非常复杂的环境当中,对其性能的研究涵盖了固体力学、流体力学、断裂力学等大量学科,因此考虑流固耦合、断裂性能等研究被逐步开展。喻丹萍等对机械振动造成的核电站疲劳断裂进行了研究<sup>[32]</sup>。丁凯等对核电站高能管道断裂和防甩管进行了分析,并进行了管道优化布置<sup>[33]</sup>。

## 3 研究展望及存在的若干关键科学问题

### (1) 核电站的跨学科发展。

核电站学科涉及能源、电气、化学、结构、管理等学科,涉及领域越来越广,需要能源学家、电气专家、地震学家、地质学家、结构学家、地球物理学家等共同努力,还有很长的路要走,加强国际合作和实现资源共享,全世界共同致力于核电站对人类造成的危害是十分必要的。

### (2) 核电站标准体系的建立。

目前中国尚没有形成一个统一的核电标准体系,建议地震安全性评价部门加大研究适合我国大部分地区厂址的中国标准反应谱,以在保证地震安全的前提下做到经济合理的设计。

### (3) 核电站的性能评估和可靠度分析。

为了对核电厂的抗震安全有一个科学的认识,核电厂的地震概率风险分析势在必行,在关注新建核电站的安全性能的同时,对已建核电站的安全评估和监测亦不能忽略,当有必要时可对其进行抗震加固等措施。世界范围内有很多核电站面临使用期限到期的情况,面临老化、腐蚀等问题,如果要求其继续使用,需要全方位的评价及考量。陈矛等<sup>[34]</sup>对核电站性能评估做了适当研究。

### (4) 地震及海啸预警和灾后高科技救援。

对地震和海啸进行有效的预警可以减少大自然灾害对核电站的危害。另外核电站事故后可能存在核辐射,在严重的核事故中,如有智能化的

核工业救援机器人配合进行消防和救援行动,则受辐射致病乃至死亡的人数将大大减少。肖雪夫等<sup>[35]</sup>对核电站中的机器人技术进行了可行性分析。

(5) 采用主动,半主动控制、智能控制等技术。

以往核电站大多以抗震和被动控制为主,在其他行业如航天、机械中发展较快应用较广的主动控制、半主动控制、智能控制等先进控制方法,有可能被引用到核电站中更好地为人类服务,但必须经过可靠的理论和试验验证及可行性研究之后方可应用。

## 参考文献:

- [1] International Atomic Energy Agency. Safety Guide No. NS-G - 3.3 evaluation of seismic hazards for nuclear power plants [S]. Vienna: IAEA, 2002.
- [2] 邓有平,王荣明,李坚. 江西某核电站选址地质灾害研究及防治对策[J]. 资源调查与环境, 2008, 29(1): 61-68.
- [3] 李小军,贺秋梅,侯春林. 中国核电工程场地设计地震动参数确定相关问题[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 75-82.
- [4] 张晓鲁. 我国内陆核电站选址问题的研究[J]. 中国电力, 2005, 38(9): 20-23.
- [5] 陆佑楣. 将核电站反应堆置于地下的设想[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 41-45.
- [6] 刘连光,原丽,王智东,等. 磁暴对沿海核电站变压器安全影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 104-108.
- [7] Sun C N, Burdette E G, Barnett R O. Theoretical tornado vortex model for nuclear plant design[J]. Nuclear Engineering and Design, 1977, 44(3): 407-411.
- [8] Maruyama T. Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 99(4): 249-256.
- [9] APP. GW. GL-700. Westinghouse API000 design control document[R]. Westinghouse Electric Corporation LLC, 2004.
- [10] 汤卓,吕令毅. 核电站常规岛主厂房龙卷风荷载的 CFD 模拟[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(60): 1164-1168.
- [11] 周向阳,张略秋,周雷靖. EPR 核电站常规岛主厂房风洞试验与风致响应研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 142-147.
- [12] V. S. Atomic Energy Commission. RG1.60 Rev1 Design response spectra for seismic design of nuclear power Plants [S]. Washington, DC.: U. S. NRC, 1973.
- [13] V. S. Nuclear Regulatory commission. RG 1.165 Identification and characterization of seismic sources and determination safe shutdown earthquake ground Motion [S]. Washington, DC.: U. S. NRC, 1997.
- [14] V. S. Nuclear Regulatory commission. RG 1.208 A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion [S]. Washington, DC.: U. S. NRC, 2007.
- [15] V. S. Nuclear Regulatory commission. NUREG/CR-6241 Technical Guidelines for seismic design of nuclear power plants——

- Translation of JEAG 4601 - 1987. Washington, DC.: NRC: 1994.
- [16] 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.
- [17] Argonne National Laboratory. On the French nuclear industry experience in the design of seismic isolation of NPP [Z]. Project No. 88-571, 1989.
- [18] Fujita T. Progress of applications, R&D and design guidelines for seismic isolation of civil buildings and industrial facilities in Japan, International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibrations of Structures, Taormina, Italy, 1997.
- [19] Clark P W, Aiken I D, Kelly J M, et al. Tests of Reduced-Scale Seismic Isolation Bearings for the Advanced Liquid Metal Reactor (ALMR) Program ASME Pressure Vessel and Piping Conference [Z]. Honolulu, Hawaii, USA, 1995.
- [20] NRC Public Meeting, Use of Seismic Base Isolation for Nuclear Structures, with participants from Bechtel [Z]. INEEL, and University at Buffalo, Rockville, MD, USA, 2004.
- [21] Pentti Varpasuo. The development of the floor response spectra using large 3D model [J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 192: 229-241.
- [22] Aleksandar P, Stefanie R. Deterministic and probabilistic floor response spectra [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 605-618.
- [23] 李忠献, 陈岩, 梁万顺, 等. 核电厂结构的楼层反应谱分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, 33(suppl 1): 62-67.
- [24] 曾奔, 周福霖, 徐忠根. 基于功率谱密度函数法的核电厂增加隔震措施后的楼层反应谱分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(3): 13-16.
- [25] Kageyama M, Iba T, Somaki T, Hino H, et al. Development of cable reinforced 3-dimensional base isolation air spring [Z]. ASME PVP, 2002.
- [26] Inoue K. Development of Three-Dimensional Seismic Isolation Technology for Next Generation Nuclear Power Plant in Japan [Z]. ASME PVP 2004.
- [27] 吕雪峰, 张鑫. 核电站地震次生火灾的扑救与防护[J]. 中国核电, 2011, 4(4): 372-375.
- [28] Huang, Y. N., Whittaker, A. S, and Luco, N. Performance assessment of conventional and base-isolated nuclear power plants for earthquake and blast loadings. MCEER-08-0029, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research [Z]. State University of New York, Buffalo, NY, 2008.
- [29] 王天运, 任辉启, 张力军. 安全壳钢筋混凝土筒支墙抗爆性能分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2004, 25(2): 39-43.
- [30] 王乐铭, 刘建良. 滨海核电站可能最大风暴潮(PMSS)研究[J]. 电力勘测, 1999(2): 21-22.
- [31] 潘华, 李金臣, 吴迪忠. 2007年7月16日日本新潟地震对柏崎刈羽核电站的影响[J]. 国际地震动态, 2007, 347(11): 21-32.
- [32] 喻丹萍, 袁绍波, 周正平. 田湾核电站管道振动问题处理[C]//第16届全国反应堆结构力学会议, 深圳, 2010: 107-111.
- [33] 丁凯. 核电站高能管道断裂防甩分析方法研究及在 AP1000 常规岛第一跨中的应用[C]//第16届全国反应堆结构力学会议, 深圳, 2010: 887-897.
- [34] 陈矛, 卢实. 核电站核安全相关结构基于性能指标的抗震概率设计评估方法探究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 57-61.
- [35] 肖雪夫, 丑武胜, 刘进长. 核工业迫切需要机器人技术[J]. 机器人技术与应用, 2011(3): 17-20.

## Disaster Prevention and Reduction of Nuclear Power Stations

Liu Dewen<sup>1</sup>, Tan Ping<sup>1</sup>, Zhou Fulin<sup>1,2,3</sup>, Li Xiangxiu<sup>2</sup>, Li Yang<sup>3</sup> and Fan Shikai<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Resistance and Absorption Engineering & Structure Safety of Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China; 2. Architecture and Civil Engineering College, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Through review of general situations of historical accidents of nuclear power stations, safety analysis is made for the disaster prevention and reduction of nuclear power stations, including the safety analysis of nuclear power station sitting, wind disaster safety analysis, earthquake safety analysis, fire and explosion disaster safety analysis, safety analysis of storm tide, tsunami and other water disasters, safety analysis of snow disaster etc. The research and development of disaster prevention and reduction of nuclear power stations is reviewed and also it was previewed and some key scientific problems were put forward.

**Key words:** nuclear power station; disaster prevention and reduction; sitting; earthquake; tsunami; fire