

核电厂重要厂用水系统的物项分级及其影响分析

马逸萍¹, 李武全², 程道仓³

(1. 国网安徽省电力有限公司培训中心, 合肥 230022; 2. 电力规划设计总院, 北京 100011;
3. 华龙国际核电技术有限公司, 北京 100036)

摘要: [目的] 重要厂用水系统负责向核岛提供冷却水源, 并把热量带到最终热阱, 实行物项分级有助于力求经济的前提下实现安全功能最优。[方法] SSG-30 方法是按照物项所承担安全功能的重要性以及失效后果的严重程度进行分级, 依据系统流程对物项的安全功能进行分解, 同一系统的不同功能可以采用不同的安全分类和分级, 同一功能的不同设备可以采用不同的安全分级, 同一设备不同部件可以进一步分级, 可以采用功能冗余的方法满足单一故障准则。[结果] 分级结果可以用来复核系统功能, 如安全级部件必须满足抗震要求并配置应急电源后方可投入运行。不能依据既有压水堆设计中成熟的“工程经验”来降低物项的安全等级。[结论] 运用功能分解进行物项分级的方法可为其他项目设计提供参考。

关键词: 重要厂用水; 安全分级; 功能分解; 冗余; 抗震

中图分类号: TL4; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0084-06

Analysis on Safety Classification of Essential Service Water System and Its Impact Analysis in a Nuclear Power Plant

MA Yiping¹, LI Wuquan², CHENG Daocang³

(1. Training Center of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;
2. National Electrical Planning and Design Institute, Beijing 100011, China;
3. Hualong Pressurized Water Reactor Technology Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: [Introduction] Essential service water system is responsible for providing cooling water to the nuclear island and bringing heat to the ultimate heat sink, implementing safety classification is helpful to achieve the optimal safety function under the premise of economy. [Method] SSG-30 was the method to classify items according to the importance of their safety functions and the severity of their failure consequences. The security functions of the items were decomposed according to the system process, different functions of the same system could be classified and graded differently, different devices of the same function could be classified differently, and different components of the same equipment could be further graded, functional redundancy could be used to satisfy the single failure criterion. [Result] Grading results can be used to review system functions, for example, the safety level components must meet the seismic requirements and be equipped with emergency power supply before they can be put into operation. The safety level of items can not be reduced according to the mature "engineering experience" in the design of existing PWR. [Conclusion] The method of item classification by functional decomposition can provide references for other PWR project design.

Key words: essential service water; safety classification; functional decomposition; redundancy; anti-seismic

目前我国规划和建设的核电项目均为滨海厂址, 以海水作为冷却水源。重要厂用水系统(下简称 SEC)是为核岛提供冷却水源的系统, 在电厂正常运行或事故工况下, 把由设备冷却水系统(下简称 RRI)收集的热负荷输送到最终热阱(海水)。

某核电厂 SEC 采用直流冷却方式, 引水及过滤部分与常规岛凝汽器冷却水系统(下简称 CRF)等厂内海水用户合并建设, 明渠取水, 合建取水泵房, 共用引水明渠及过滤设施。冷却水进入厂区经换热器换热, 排入与 CRF 排水共用的虹吸井后流入大海。单台机组的 SEC 流程示意图如图 1 所示。

收稿日期: 2019-08-28 修回日期: 2019-10-22

基金项目: 华龙国际核电技术有限公司科技项目“华龙一号核电厂功能设计要求研究”(HPR-ZZKY-18007)

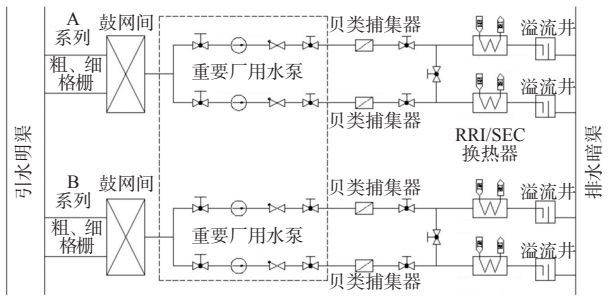


图1 单台机组的SEC流程示意图
(虚线框内为SEC泵房范围)

Fig. 1 SEC flow chart of a single unit
(within dashed frame is SEC pump room)

1 SEC物项分级原理及方法

核电厂在正常运行、灾害、事故过程中的安全是依靠构筑物、系统和部件(统称物项)执行安全功能来实现,物项分级的目的是使质量和可靠性与它们各自的安全重要性相匹配,做到在相对有限的资金和时间条件下,在设计、制造、建造、调试和运行各阶段采用恰当的水平,以满足各物项保证实现各自的安全功能^[1]。

SSG-30是国际原子能机构于2014年发布的一种核电厂物项分级方法,它在考虑了所有电厂状态下,依据各物项对安全功能的贡献及在事故预防或事故后限制放射性后果中所起的作用,采用适宜的屏障安全和功能安全等级进行量化分级,物项分级等级的确定需综合考虑其在执行安全功能和充当辐射屏障两方面重要性来确定^[2]。

物项的安全分级是划分抗震等级、设计规范等级以及质保等级的基础,也是对冗余设置(满足单一故障准则)、实体隔离措施、应急供电和定期试验等要求的重要依据,各级功能分类所对应的功能和系统设计要求请如表1所示。

表1 各功能分类对应的功能和系统设计要求^[2]

Tab.1 Functional classification and system design requirements^[2]

功能分类 (安全功能 分级)	单一 故障准则	实体隔离 电气隔离	应急 供电	定期 试验	环境 鉴定	内外部 灾害防护 (包括抗震)
FC1 (F-SC1)	有 (系统层次)	有	有	有	有	有
FC2 (F-SC2)	有 (功能层次)	有	有	有	有	有
FC3 (F-SC3)	无	特殊 要求	逐个 分析	有	逐个 分析	逐个 分析

2 SEC的安全功能分类

SEC水源取自大海,被提升到厂内与RRI换热后排入大海,全程对外部没有放射性释放的影响,屏障分级为非安全级(NC),后续不再讨论它的屏障分级,只讨论安全功能分级。

安全功能分级的判别主要从:(1)该物项要执行的安全功能的重要性;(2)不能执行安全功能的后果的严重程度;(3)需要该物项执行某一安全功能的频率高低;(4)假设始发事件后需要该物项执行安全功能的时间点或时间段,如有足够的时间来使用到达并维持安全状态,则可以降级。其中:(1)和(3)用于对参与安全功能实现的物项进行初步的分级,在此基础上依据(2)和(4)进行调整^[3]。

安全功能应满足反应性控制、热量导出、放射性物质包容等基本功能^[4]。SEC对基本安全功能之一的“热量导出”功能起着关键作用,根据表2核电厂在不同状态下的安全功能分类清单,在H3和H4类别的功能中,无论是在电厂正常运行还是在事故工况下,SEC都将核岛相关系统传输的热量带到最终热阱。一旦失效,因直流冷却没有缓冲余地,堆芯及反应堆内的热量立即累积,温度、压力超过限值后将导致放射性物质释放超过事故工况的限值,产生严重程度“高”的后果。

表2 安全功能分类清单^[5](摘录)

Tab.2 Security function classification list^[5](excerpted)

基本安全功能	不同电厂状态下分类的功能
反应性控制	(略)
热量导出	H1: 维持RCS充足的水装量用以堆芯冷却
	H2: 从堆芯导出热量至反应堆冷却剂
	H3: 从反应堆冷却剂传递热量至最终热阱
	H4: 维持在RCS外但在厂内储存的燃料热量导出
放射性物质包容	(略)
其他	(略)

以典型的小破口失水事故(SBLOCA)这一设计始发事件为例,安全功能失效后果为严重^[5]。为了将热量从反应堆冷却剂带到最终热阱,把一次侧的热量导出,应确保SEC长期有效。所以,SEC的安全功能级别为安全1类功能(FC1),下面按系统流程分为SEC泵房、引水明渠、过滤设施和排水4个部分进行物项分级,并把SEC泵房作为核心物项排在首位。

3 SEC 泵房及主要设备的分级

对 SEC 来说,因没有缓冲时间和额外的可靠性来执行安全功能,所以其安全重要物项分级必须与执行的安全功能类别一致,即执行安全 1 类功能(F-C1)物项应为安全功能 1 级物项(F-SC1),泵房是 SEC 安全重要构筑物,安全功能分类为 FC1,泵房的分级及泵房内主要设备的功能和系统设计要求如表 3 和表 4 所示。

表 3 SEC 泵房的分级

Tab. 3 Grading of SEC pumping house

名称	功能分类	安全功能分级	规范要求	抗震类别	质保等级
重要厂用水泵泵房	FC1	F-SC1	NB/T 20012 GB 50267	I	Q1

表 4 SEC 泵房内主要设备的功能和系统设计要求

Tab. 4 Functions and system design requirements of main equipment in SEC pump house

名称	安全功能分级	单一故障准则	实体隔离 电气隔离	应急供电	定期试验	环境鉴定	抗震
重要厂用水泵	F-SC1	有(系统备用)	有	有	有	有	10
止回阀	F-SC1	有(系统备用)	有	—	有	有	10
手动阀门	F-SC1	有(系统备用)	有	—	有	有	1F
压力管道	F-SC1	有(系统备用)	有	—	有	有	1F
贝类捕集器 (运行厂房)	F-SC1	有(系统备用)	有	有	有	有	10 /1F

4 引水明渠的分级

SEC 与 CRF 等海水用户共用引水明渠,通过对正常运行与停机工况明渠过流量的比较,以单台机组运行为例,SEC 取水量约为 $1 \text{ m}^3/\text{s}$,而 CRF 约为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[6],虽然引水明渠在系统上未设置冗余,但具备功能冗余,事故工况下 CRF 停运时,仍然可以通过远大于 SEC 的用水量。

若不采取抗震设计,地震时局部堤段因位移而相互搭接甚至两堤合拢,在地震力的作用下堤身发生相互挤压,会造成引水明渠封堵,核电取水口为避免正面波浪采用弯曲型引水流道,更容易发生局部位移而堵住取水口,所以引水明渠应采用抗震设计。

引水明渠属于 SEC 取水的一部分,也实施着 SEC 一样的安全功能,若完全失效则带来一样的严重后果,但即使引水明渠发生故障,到达不能满足 SEC 取水的历时会很长,发生假设始发事件后有充足的时间来使用到达并维持安全状态的功能,其功

能级别可以低于达到可控状态的安全功能级别,所以可以在原来安全功能分级的基础上降级,引水明渠的安全功能分类由 FC1 降为 FC2,相应其它项的级别请如表 5 所示。

表 5 引水明渠的分级

Tab. 5 Grading of diversion open channel

名称	功能分类	安全功能分级	规范要求	抗震类别	质保等级
引水明渠	FC2	F-SC2	NA	II	Q1

只要有漂浮等其它类杂物从引水明渠进入过滤设施内则需要完成过滤、冲洗和垃圾外运等工作,所以,最好能够把海水中的杂物拦截于取水口门之外,利用海水的涨落潮实现过滤设施的自清洁,必要时人工打捞,为此各核电厂在引水明渠的取水口门处设置了多种功能的拦污网。

按照结构形式拦污网可以分为固定式和临时性两种,固定式在海中设有固定支墩或固定桩,多采用金属质网;临时网多采用浮筒下部用铁锚固定。一般临时网设在靠外海侧,固定网靠明渠侧。固定网堵塞后较长时间内会减少过流量,临时网故障时可以应急收起,但会影响后续固定网的正常运行,虽然其本身可以不执行安全功能,但其失效对其它物项实施安全功能产生影响,所以该物项应该采用比固定网低一级的安全级别,并采取相应的设计要求^[7]。固定网的安全功能分类为 FC2、临时网为 FC3,其分级如表 6 和表 7 所示。

表 6 固定拦污网的分级

Tab. 6 Classification of fixed trash retaining nets

名称	安全功能分级	规范级别	抗震类别	质保等级
固定拦污网	F-SC2	NB/T 20012 GB 50267	II	Q2

表 7 临时拦污网的分级

Tab. 7 Classification of temporary blocking nets

名称	安全功能分级	规范级别	抗震类别	质保等级
临时拦污网	F-SC3	NA	NO	Q3

5 过滤设施的分级

5.1 过滤设施的功能和系统设计

过滤设施具有对 SEC 和其它用水的过滤功能,为保证向 SEC 等用户连续可靠供水,每个 SEC 系列设有 2 套相互隔离且独立、50% 过流能力的格栅过滤设备和 1 套鼓形滤网,从上游至下游依次为:

(1) 2 个栅距 200 mm 的粗格栅;(2) 2 个栅距

50 mm 的细格栅并配套格栅除污机；(3) 1 个网孔尺寸 $\Phi 3$ mm 的鼓形滤网。鼓形滤网由 2 台低速电动机或 1 台中速 / 高速电动机驱动；设置 2 套独立的反冲洗水设备，反冲洗泵及鼓网低速电动机采用应急电源备用供电。

过滤设施在正常运行及事故工况向核电机组提供 SEC 和 CRF 等冷却水的过滤功能，失效会导致换热设备堵塞而丧失换热功能。对 SEC 来说，正常运行时每台机组只需要一个系列中的一台泵运行，另一系列停运；停堆工况下只需要一个系列中的两台泵运行，另一系列备用或检修^[8]。同第 5 节的分析，假设始发事件发生后，过滤设施有足够的可靠性和时间来执行安全功能，物项可以降级。但是，只要在设计基准 (DBC) 第 2、3、4 类工况中达到和维持安全停堆状态所需要的功能，其失效会导致“高”的后果，则其安全功能级别不应低于安全 2 类功能 (FC2)。

格栅清污机通过耙齿清除栅条所拦截的漂浮垃圾，所有的电气和转动部件均在海水面上，耐腐蚀且便于维护。若转动或控制部件故障，栅条的过滤拦截功能不受影响，短时间内不会对 SEC 取水产生影响。当假定始发事件发生后，物项若有足够的可靠性和时间来执行安全功能时，物项可以降级。上部清污机可以采用比格栅低一级的安全级别。这样，虽然清污机与细格栅属于同一设备，但根据功能不同，安全级别可以不同。

如图 1 所示，每台机组设置了两个过滤系列，每一系列设置一台鼓网，若工作列设备故障，可以启用另一备用列^[9]。当发生地震、淤积和海生物聚集等假设始发事件，鼓网的过流能力按 SEC 和 CRF 等总用水量设计，滤网堵塞是个较长的过程，在发生滤网堵塞之前，机组已经达到可控状态，若尚未达到安全停堆状态，按照运行规程，这时 CRF 必须停止运行，以满足 SEC 取水。所以，鼓网可以采用比 SEC 的安全功能低一级的安全级别，即安全 2 类功能 (FC2)，整体结构应满足 II 级抗震。

但实际上，根据压水堆核电厂的设计和建造经验，鼓网的几何尺寸较大，系统组成较为复杂，无法进行整体抗震试验，一般只进行抗震计算或分析。因设备本身未经历设计强度地震或抗震试验，抗震计算或分析的输入数据是由理论分析给出的数据，

没有实践和运行数据不能判定设备能够符合抗震要求。将来可以对主要部件(如骨架、轴和轴承、轮毂、密封、润滑、驱动装置)分步进行试验或用整体缩尺模型在设计荷载条件下进行抗震试验，根据应力、应变等试验数据及各部件所承担功能的要求给出具体抗震要求。相应地，技术规格书也应对安全功能提出明确要求。所以，SSG-30 中对物项分级的其它规定：“对于过去压水堆设计中成熟的‘工程经验’也应在物项分级中考虑”，成熟的“工程经验”只可作为设计分级的参考，但不能作为尚未实现而降级的依据。

总之，过滤设施的安全功能分类为 FC2，相应的设备分级请如表 8 所示。

表 8 过滤设施的分级
Tab. 8 Grading of filtration facilities

名称	安全功能分级	抗震类别	规范级别	质保等级
粗格栅	F-SC2	1F	RCC-M3	Q2
细格栅	F-SC2	1F	RCC-M3	Q2
细格栅除污机	F-SC3	NO	indus.	Q3
鼓形滤网	F-SC2	1I	RCC-M3	Q2
冲洗泵 (低速)	F-SC2	1O	RCC-M3	Q2
鼓网冲洗泵	NC	NO	indus.	QNC
冲洗 (中速及高速) 系统	F-SC2	1F	RCC-M3	Q2
过滤器	F-SC2	1F	RCC-M3	Q2
阀门和管道	F-SC2	1F	RCC-M3	Q2
仪表管	F-SC2	1F	RCC-M3	Q2

5.2 小口径海水输送管道的安全级要求

过滤设施运行中必须持续地清理滤出的污物，这由反冲洗完成，反冲洗水来自过滤后的海水，由加压泵输送到滤网的待冲洗部位。若反冲洗功能失效，将导致鼓网阻塞或停运，失去过滤功能。所以，冲洗设备属于安全级，其中的冲洗水管道为 F-SC2 级，必须满足冗余、抗震等设计要求。

以鼓网冲洗水管道为例，管径约 DN100，因海水的腐蚀，各运行电厂先后分别采用了 316 L 不锈钢、双相不锈钢、钢塑复合管和高密度聚乙烯、氯化聚氯乙烯等管材。316 L 不锈钢的防火及力学性能好，但遇到氯离子容易发生点腐蚀，也不属于 RCC-M 系列管材^[10]。双相不锈钢加工难度大、造价高。钢塑复合管类因钢与塑料的膨胀系数差别大，因塑料脱层产生泄漏，另外若安装有调整，现场不具备加工条件。塑料类管材的力学性能相比较差、耐火性能也不好，但与钢管相比，塑料管的耐腐蚀性能优异、水流阻力小，正常工作状态的性能最优；

但在地震时, 自身形状难以维持, 高温和火灾时, 容易变形甚至燃烧, 不满足安全功能。虽然工作性能优, 也不得采用, 必须立即进行技术改进, 比如采用防腐、力学、耐火均满足要求的材料或敷设钢套管。总之, 对于具有安全功能的物项, 工作性能和安全性能都必须满足^[11]。

6 排水部分的分级

SEC 冷却水在 RRI 换热器内完成换热后, 通过管道排入溢流井, 由溢流井经排水暗涵流入与 CRF 共用的排水井和排水渠, 一同排入大海。

6.1 厂房内部分

从 RRI 换热器排出的 SEC 排水管至 SEC 溢流井位于运行厂房内, 若失效会直接导致运行厂房水淹, 致使其他安全设备失效, 所以从 RRI 换热器排出管到溢流井的管段与进水管一样, 为安全 1 类功能 (FC1)^[12], 相应的分级请如表 9 所示。

表 9 厂房内排水系统 (含溢流井) 的分级
Tab. 9 Classification of SEC drainage in workshop (including overflow wells)

名称	安全功能分级	抗震类别	规范级别	质保等级
排水管道	F-SC1	1F	RCC-M3 NB/T 20012	Q1
溢流井	F-SC1	1I	GB 50267	Q1

6.2 厂房外部分

溢流井布置在 RRI 换热器所在构筑物的外墙处, 每台机组两个 SEC 系列的溢流井间设有连通管, 以保持溢流井水位, 从而保证不运行的 SEC 系列也可充满水。两台机组溢流井之间设有带移动盖板的连通沟道, 用于当一台机组的排水堵塞时, 可从另一台机组排水管排水。因此排水管的设计能够同时排出两台机组的排水量。每个 SEC 系列排水至与 CRF 共用的排水井和排水渠, 最终排至大海, 如图 2 所示。

当两台机组 SEC 排水管堵塞时, 排水将溢流至地面, 由核电厂排水系统排走, 地面坡度设计时应考虑排水不会淹到建筑物。所以, SEC 在执行完换热功能后, 由于其本身不具有放射性, 运行厂房以外的部分包括排水暗涵、排水井、排水隧洞和排水明渠为非安全级 (NC), 分级请如表 10 所示。

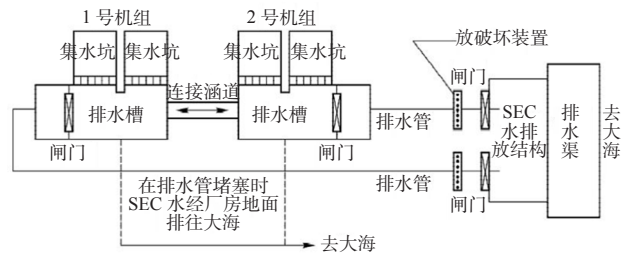


图 2 SEC 排水系统流程示意图

Fig. 2 Flow diagram of SEC drainage system

表 10 室外排水系统的分级

Tab. 10 Classification of outdoor drainage system

名称	安全功能分级	抗震类别	规范级别	质保等级
排水部分	NC	NO	NA	QNC

7 结论

综上所述, SEC 是个有别于核岛内的、需要依赖外部条件的安全支持系统, 其物项分级的特点及后续的关注项主要有:

1) 对于 SEC 与 CRF 引水及过滤系统合并建设的部分, 因 SEC 的取水容量相对较小, 可以利用事故工况下 CRF 停运留下的过流能力为 SEC 提供功能冗余, 为 SEC 不需设置系统备用提供了可能。

2) SEC 与 CRF 合并建设时, 当一个物项执行多个功能, 其分级取决于功能类别最高的功能, 与各自的规模大小无关。

3) 部分设备虽然具备良好的运行功能, 但不能满足安全要求的, 需要按照防火和抗震等方面的要求重新设计, 只有在满足安全级设备的相关要求后方可投入运行。

4) 对于部分难以开展整体实物模型抗震试验的, 应收集各种工况的运行数据或进行局部模型或整体缩尺模型试验, 根据运行和试验数据对数值模型进行率定, 对运行工况内的计算结果进行验证并辅助确定计算过程中的边界条件等。

参考文献:

[1] 国际原子能机构. 核电厂安全: 设计: SSR—2/1 [S]. 维也纳: 国际原子能机构, 2016.
IAEA. Nuclear power plant safety: design: SSR—2/1 [S]. Vienna: IAEA, 2016.

[2] IAEA. Safety classification of structures, systems and components in nuclear power plants: SSG—30 [S]. Vienna: IAEA, 2014.

- [3] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定: HAF102—2016 [S]. 北京: 国家核安全局, 2016.
National Nuclear Safety Administration. Design safety regulations for nuclear power plant: HAF 102—2016 [S]. Beijing: National Nuclear Safety, 2016.
- [4] 国家核安全局. 压水堆核电厂物项分级的技术见解: HAF—J0066 [S]. 北京: 国家核安全局, 1997.
National Nuclear Safety Administration. Technical opinions on item classification of PWR nuclear power plant: HAF—J0066 [S]. Beijing: National Nuclear Safety, 1997.
- [5] 国际原子能机构. 核电厂构筑物、系统和部件安全分级的应用: IAEA—TECDOC—1787 [S]. 维也纳: 国际原子能机构, 2016.
IAEA. Application of safety classification of nuclear power plant structures, systems and components: IAEA—TECDOC—1787 [S]. Vienna: IAEA, 2016.
- [6] 深圳中广核工程设计有限公司. 中广核广东太平岭核电厂一期工程《安全分级总原则》[D]. 深圳: 深圳中广核工程设计有限公司, 2019.
China Nuclear Power Design Co., Ltd. (ShenZhen). CGN Guangdong taipingling nuclear power plant phase I project 《general principles of safety classification》[D]. Shenzhen: China Nuclear Power Design Co., Ltd. (ShenZhen), 2019.
- [7] 胡凌生, 谢小龙, 赵鑫樾, 等. 华龙一号采用 ANSI/ANS 58.14 进行安全分级的研究 [J]. 核科学与工程, 2018, 38(3): 523-531.
HU L S, XIE X L, ZHAO X Y, et al. Safety classification of structures, systems and components in HPR 1000 based on ANSI/ANS 58.14 [J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(3): 523-531.
- [8] 咸春宇. 华龙一号安全设计与防城港二期示范工程进展 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 8-10.
XIAN C Y. HPR1000 Safety Design and the progress of Fangchenggang phase II demonstration project [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 8-10.
- [9] 李永华, 白晋华. 结合福岛核事故探讨 IAEA 核电厂设计安全要求 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 155-158.
LI Y H, BAI J H. Study on the safety requirements of nuclear power plants design based on Fukushima nuclear accident feedback [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 155-158.
- [10] AFCEN. Design and construction rules for mechanical components of PWR nuclear islands: RCC—M [S]. Paris: AFCEN, 2017.
- [11] 夏祖颢, 李韶平, 王晓雯, 等. 近期核电厂抗震设计输入及 AP1000 核岛隔震的总体考虑 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 1-6.
XIA Z F, LI S P, WANG X W, et al. General consideration for seismic input of NPP seismic design and seismic isolated research for AP1000 nuclear island [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 1-6.
- [12] 国家能源局. 核电厂水工设计规范: NB/T 25046—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
National Energy Administration. Code for hydraulic design of nuclear power plants: NB/T 25046—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

作者简介:



马逸萍

马逸萍 (通信作者)

1974-, 女, 江苏南京人, 国网安徽省电力有限公司培训中心讲师, 上海电力学院电气工程及其自动化专业, 从事发电厂及其附属系统的教学、培训和安全理论研究 (e-mail) yper_ma@163.com。

李武全

1967-, 男, 河南南阳人, 电力规划设计总院水环处处长, 教授级高级工程师, 清华大学市政工程硕士, 从事发电厂评审、咨询、评估、科研 (e-mail) wqli@cpecc.net。

程道仓

1973-, 男, 安徽六安人, 华龙国际核电技术有限公司系布所主任设计师, 研究员级高级工程师, 武汉大学给排水学士, 从事核电厂设计和咨询 (e-mail) chengdaocang@hpr.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)

太平岭核电厂效果图

