

核岛内部水淹分析研究方法及防护措施

杜广 赵紫薇 程丹

(中国核电工程有限公司 北京 100142)

摘要: 核电站核岛内部水淹是系统和设备的一种共模故障,设计时必须考虑这种潜在危害,对这种危害进行的防护设计应能确保电厂系统各种安全功能的实现。本文以华龙一号核电机组核岛内部水淹分析研究为基础,遵循先进压水堆的标准、规范要求,借鉴核电站工程设计经验,对核岛内部水淹分析研究方法和防护措施进行研究。首先确定核电站内部水淹防护设计的背景和评价准则,对标准中推荐的淹没危害评价方法进行比较,然后详细分析内部水淹源筛选的步骤和过程,分析水源的漫延路径和水位计算方法,并对分区内的防护设备进行风险分析,进而确定防护措施,对核电站的安全目标给出分析结果。

关键词: 核岛内部水淹; 防护原则; 分析方法

0 引言

核电厂内部水淹事件是指核电厂内部的管道、储水容器等破裂,或消防系统、喷淋系统动作而引起房间内大量积水,淹没设备,或喷淋、飞溅或滴漏的水进入设备并造成设备因受潮而失效的事件。内部水淹是核电厂常见的内部灾害之一,内部水淹的浸没效应会使核安全相关设备失效,进而无法执行其安全功能。为确保核电厂在内部水淹情况下仍能执行安全功能,有必要在核电厂设计时考虑对内部水淹进行防护,并对核电厂进行内部水淹安全评价以验证内部水淹防护目标的实现^[1]。

在华龙一号核电机组的设计中,进行了核电厂安全级厂房内正常运行工况下发生单一水淹源的水淹事件的风险评价。本文对核电厂安全级厂房内正常运行工况下的水淹事件进行研究,与安全相关的重要结构、系统及设备需要着重防护,以确保电厂可以达到并维持安全停堆状态,并防止不可接收的放射性物质泄漏到环境中。

1 核岛内部水淹研究背景及意义

我国目前在役的M310堆型电站中,对其内部水淹防护从确定论的角度进行了分析,但是对水淹源的选择缺少定性分析,水量也缺少定量的计算。因此,也无法给出水源的漫延路径和水淹水位。

华龙一号三代核电站作为吸收国际上三代核电先进设计理念、自主创新的先进压水堆核电站,为实现

更高的安全目标,探索出一套适用于华龙一号核岛内部水淹防护设计方法、充分开展内部水淹研究,并对安全重要设施进行适当的水淹防护是十分必要的。

2 核岛内部水淹的主要分析方法

核岛内部水淹的分析过程中存在以下几个关键要素:

- (1) 确定各专业需防水淹的系统、设备及相关设施;
- (2) 确定潜在水淹源;
- (3) 根据系统和设备运行情况,分析淹水的容积,确定水淹分区内水淹水位的高度;
- (4) 确定防水淹及限制水淹后果需要采取的措施。

根据上述关键要素,对水淹分析流程中的各个内容逐层进行解析,确定以下分析方法和流程:

(1) 在核岛各个厂房之间的连通位置都设置了防火或防水的密封门,孔洞亦进行了相应的封堵,厂房之间的水源不会互相流通,所以首先将分析范围缩小至某一厂房内。若厂房之间无此设置,则需要将连接通道和厂房作为整体进行分析。

(2) 在厂房内部设置有防火分区,防火分区范围内的孔洞、门等连通位置与其他防火分区之间设置有防火封堵、防火门、半气密门等。这些防火封堵、防火门及半气密门能够承受一定的大气压力,具有阻挡水源的作用。因此,每个防火分区就相当于一个密闭空间,可将分析范围缩小至某一防火分区内。

(3) 部分防火分区内涉及辐射分区变化的,还需要进行辐射屏蔽封堵。生物防护屏蔽封堵对 γ 射线的屏蔽作用,与同等厚度的混凝土相当,故此隔间

内有生物防护封堵的孔洞、套筒，其水源在水淹分析时限内不会流出，据此进一步将分析范围缩小至某一隔间或几个小隔间内。

(4) 分析范围确定以后，就可以对某一分区内的假想水源进行筛选。根据文中提到的标准规范确定了水淹源的筛选方法，从水源的种类、水源的质量流量、水源的破损位置等各方面进行分析计算。根据内部灾害的假设原则，仅假设分区内发生一处假想水淹，基于保守考虑，选择最大水量的水源作为分析水源，最终确定水源分析点。

(5) 根据分析范围及水源信息，进行水淹的漫延路径分析。水源在分区内隔间之间的门缝、门洞、地面套筒、楼板开口、楼梯井、坑道等都可以进行漫延。此时分析范围较小，并且经过计算机三维模拟水淹事件后，可以快速得出水淹的漫延路径以及路径上的水位信息。对于房间和孔洞等信息较为简单的分区，可以直接人工进行水位的计算和漫延路径的分析。

(6) 根据水位分析结果，对分区内的防护设备信息进行评判分析。在分析中，对电动机和电气柜来说，要求设备基础位于最高水淹液位以上；对于阀门，要求执行机构中受水淹影响会失效的部分必须布置在最高水淹液位以上。

2.1 通用的水淹分析流程图

水淹分析流程图如图1所示。

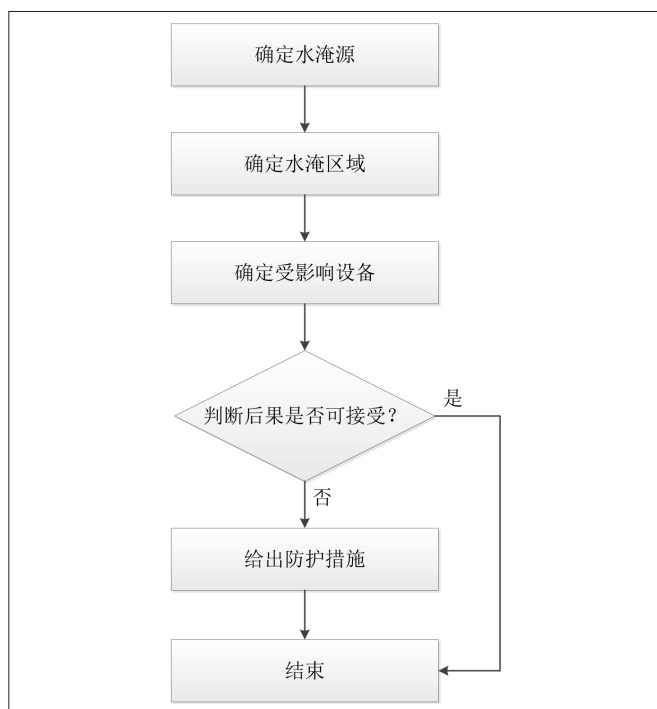


图1 水淹分析流程图

2.2 重要设备的水淹分析

对于重要设备，可采用以下两种水淹分析方法：方法一为源方法，从已确定的水淹源开始，确定对防淹构筑物、系统和部件的影响，评价方法的流程图见图2；方法二为防水淹设备分析的方法，先确定一个防水淹设备，再确定所有可能发生的假想水淹源可能引起的后果，评价方法的流程图见图3。

任何区域的水淹水位都是通过评价流体的流入量、流出量和蓄积量来确定的。流入量由水淹源项确定。核电厂内流体可以通过很多流径从一个区域向另外一个区域输送，计算流出量时需要考虑以下流径：楼板上地面上的疏水设备、楼梯口和楼板的孔洞、楼板上套管、房间内的门等。上述流径流出的水量可按照公式进行计算，蓄积量由纳水空间的容积确定。

3 优化及创新

3.1 水淹源防护设计准则

根据研究中的几个关键点及策划内容，首先需要整体分析过程中的防护原则进行确定。

结合 EJ/T 1079-1998《轻水堆隔间淹没效应防护准则》及 EJ/T 355-1998《轻水堆核电厂假象管道破损事故防护设计准则》等规范，以及国内外水淹事件的经验反馈内容，制定了《ACP1000 核岛内部水淹防护设计准则和水淹源确定原则》。本准则对核岛内部水淹研究参考的标准进行了明确规定；对水淹事件中的系统、设备、运行、时效、封堵材料、喷淋、疏水等进行了规范说明；对水淹源的类型进行了明确区分和定义。

3.2 防淹设备清单的确立

为保证在核岛厂房发生水淹时主要安全功能不丧失，核岛内部水淹分析必须包含需要执行安全系统功能的所有设备。执行电厂安全相关功能的工艺系统和工艺设备应布置在核岛房间内，需要对每个安全相关工艺系统或工艺设备所在的房间进行核查，以确定核岛内部水淹正常工况下的防淹设备清单。在内部水淹分析中，如果安全相关系统、建筑物和设备等没有安全停堆的功能或者当这些物项失效时已经完成安全停堆，这些物项的失效是可以正常接受的。

水淹分析中首先需要根据核电站的安全要求进行防护设备的筛选，这涉及主回路系统、各辅助系统及电气仪控等系统的大量设备。然后按照最终安全目标进行分解，逐条进行分析，具体包括：

(1) 按照系统的功能中要满足冷却剂释放和主泵

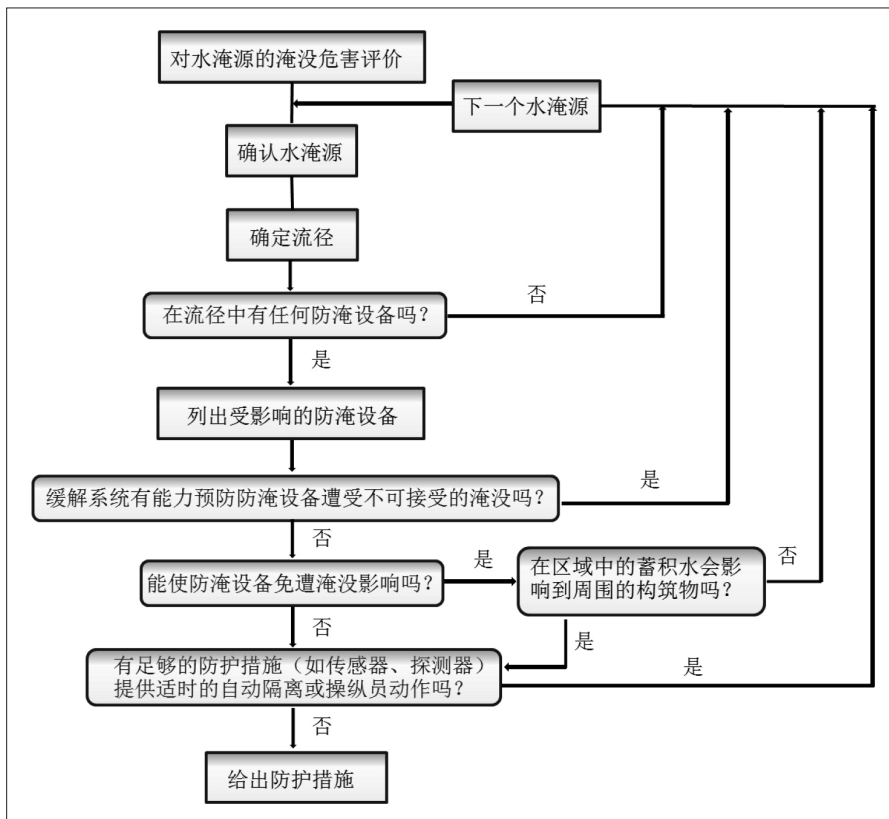


图2 设备淹没评价(源方法)流程图

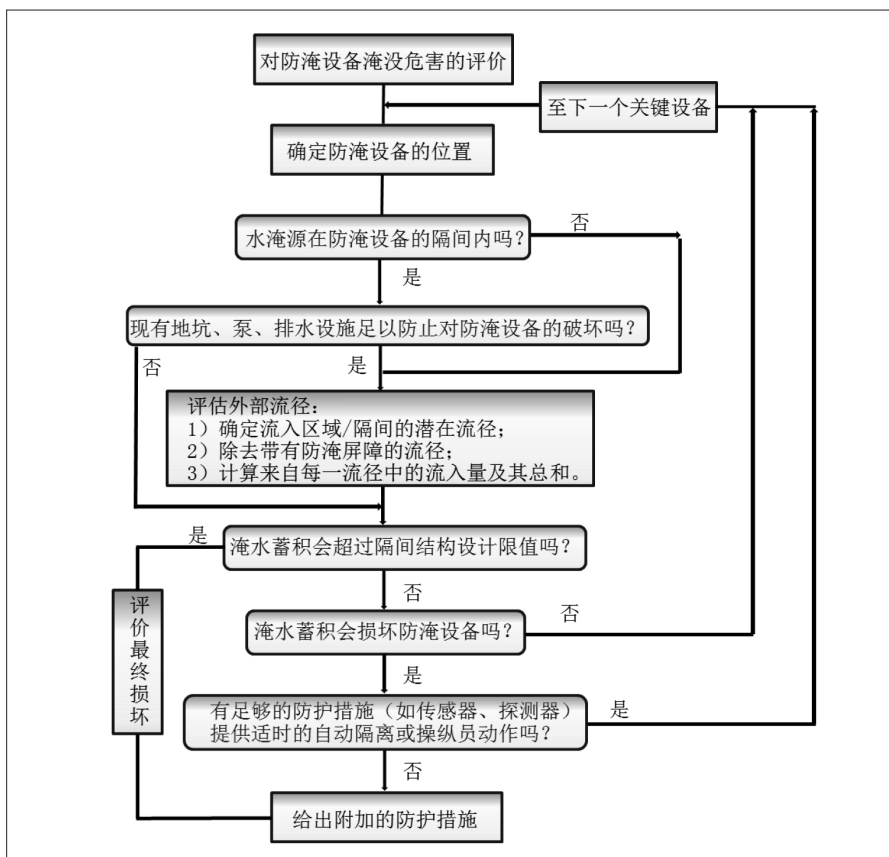


图3 设备淹没评价(防淹设备方法)流程图

密封注入条件的原则，确定防护设备^[2]。

(2) 确保包含反应堆的事故停堆、硼化以及冷态和冷态阶段的余热排出等功能设备运行正常。

(3) 确保事故下的通风系统以及专设安全设施系统下的设备正常运行。

(4) 在水淹分析中，主控室房间所在环境及周围环境需要保持防水淹状态。

(5) 确保各设备就地的可达性。

3.3 水淹源的筛选原则

始发事件，或者在运行工况Ⅲ或Ⅳ下发生的长期被动失效的后果，均不考虑和其他事件或危害同时发生。

在核岛内部存在潜在的内部水淹，它们可能导致如下两种类型水淹：重大水淹和小规模水淹。重大水淹的发生是由于：高能或中能管道破裂或发生裂纹；固定防火系统的喷洒；安全壳喷淋系统的喷淋；最大容积水箱的水可能排空到相关房间，同时由补给水系统带来额外水量。在正常运行中，小规模水淹通常发生在可能有泄漏的系统设备间、因故障而导致泄漏的设备所在房间（长期单一失效准则）、消防时采用消火栓灭火的房间等。

3.3.1 水淹源的筛选

(1) 分析核岛内各厂房之间的连接通道，是否有与厂房内潜在水淹源区域相通的走廊、沟道等。若有，需要将连接通道和此厂房作为整体进行水淹源筛选；若无，则厂房单独进行下一步分析。

(2) 以核电站各个厂房为单位，逐一进行分析，此时可以结合防淹设备的清单，如果厂房内没有防淹物项，可以不必再分析该厂房。

(3) 确定某个厂房后，在建筑作业图中以墙体和门为边界确定防

水淹单元。这些防水淹单元以房间为单位，最小的单元仅含有一个房间，大的单元可能包含若干个房间。

3.3.2 水淹源识别

针对单个防水淹单元内的设备、管道、消防、波纹管等，进行潜在水淹源的筛选，方法如下：

(1) 设备。能动设备泵、阀门等发生泄漏或者密封装置失效引起水淹，将这些设备引起的泄露与本分区内管道破裂、管道破口水淹源的泄露量进行比较，并选取二者的最大值，通常等同于管道破口水量。排水的地坑泵大流量泵（扬程 30m 以上）的最小启动液位是 600mm，小流量泵的最小启动液位是 400mm。

(2) 水箱。假设这类设备中具有冗余真空爆破装置或者具有同大气相通的开口以及受超压保护的抗震 I 类水箱不会失效。对于没有上述设施的抗震 I 类水箱以及其他的非抗震 I 类水箱，应该对淹没效应进行整体评价。假定从水箱失效中流出液体的总量与水箱容积相等。

(3) 波纹管。对循环水系统的波纹管和膨胀节进行特殊的评价，在进行评价时，应假设各个波纹管和膨胀节完全失效，等同于所在管道破裂。

(4) 消防喷淋。对消防系统触发产生的水淹应考虑房间区域内所有消防系统动作的影响，消防喷洒的总量按照 RCC-I 及 GB/T 22158 设计规范的相关要求进行计算： $10 \sim 15\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2) \times \text{时间}(30\text{min}) \times \text{面积}(\text{房间})$ 。同时还要叠加消火栓释放的总量。喷淋强度根据不同的设备来分别确定，除某些特殊房间如柴油发电机厂房内的喷淋强度为 $10\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 外，其他设备间内的喷淋强度均为 $15\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

(5) 安全壳喷淋。安全壳喷淋水与安全壳内置换料水箱 (IRWST) 形成循环冷却，不会对分区造成大量水的滞留，可以不作具体分析。

(6) 高能管道。高能管道有破口和断裂两种形式。按照本课题的分析方法，选取最大水源。对高能管道，选取管道破裂下的水量作为水淹源。

(7) 中能管道。中能管道破口是一个穿透管道壁的圆形小孔，破口截面流通的面积等于管道内径的一半与管壁厚度一半的乘积，即截面可流通的面积为 $t/2 \times D/2$ ， t 为管道壁厚， D 为管道的内径^[3]。

在单个防水淹单元内，上述提到的源项都存在时，取最危险的水源作为分析点，这样确保单元内的水位是最高水位。在确定水淹源物项的破损形状

时，中能管道要考虑管道破口，不需要考虑裂缝；高能管道只需要考虑管道断裂。

3.4 水淹的防护设计

为了保障系统的安全功能，对分析中受水淹影响的区域设置有效的防护措施，主要包括：

(1) 将流体系统和储存水箱与安全设备进行实体隔离布置；

(2) 提供泄漏的探测和隔离装置；

(3) 调整管道的走向和设备的布置，避免安全设备受水淹影响；

(4) 采用地坑、泵、排水通道等，在发生水淹时将水排出；

(5) 设置防水密封（墙体和楼板贯穿件的密封）；

(6) 将部件布置在更高的标高处；

(7) 采用经过鉴定的能承受水淹的设备。

4 结语

本文通过对国内外核电站内部水淹研究技术进行广泛的调研分析，研发了基于确定论的核岛内部水淹分析方法，分析了核岛内各厂房执行安全功能的物项受水淹的影响，并形成相应防护措施。

本文在分析过程中充分考虑厂房、防火分区及辐射分区的影响，提出内部水淹分析的边界划分办法；研究了潜在水淹源的筛选办法，使用最大流量水源进行分析。通过分析研究，验证并完善了华龙一号核岛内部水淹防护设计，进一步论证了本分析方法的合理性，为我国华龙一号三代核电技术的研究奠定了坚实的技术基础，为后续工程的内部水淹分析提供参考和指导。

参考文献：

- [1] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定 :HAF102-2016[S]. 2016.
- [2] 核工业标准化研究所. 轻水堆隔间淹没效应防护准则 :EJ/T 1079-1998[S]. 1998.
- [3] 中国核工业总公司. 轻水堆核电厂假象管道破损事故防护设计准则 :EJ/T 335-1998[S]. 1998.

作者简介：杜广（1985.07-），男，汉族，辽宁锦州人，本科，高级工程师，研究方向：核电站工艺布置设计。