

冷源、热源温度对自然循环系统运行可靠性的影响分析

玉宇, 钱晓明, 高庆瀚, 王晓轩

华北电力大学核科学与工程学院, 北京 102206

摘要 物理过程失效是导致非能动系统运行失效的重要因素之一, 必须在非能动系统可靠性分析中予以考虑。而对于物理过程失效, 目前尚无成熟的分析方法。本文提出采用蒙特卡罗模拟方法研究冷源温度、热源温度在其合理范围内变化对自然循环系统运行可靠性的影响。结果表明, 冷源、热源温度变化对系统物理过程失效具有重要影响, 且运行列数越少, 影响越显著。计算结果说明系统运行失效是物理过程失效与设备失效综合作用的结果, 但并非二者的简单叠加, 物理过程失效与设备失效是互为条件的; 当系统设计安全裕量较大时, 即使参与运行的设备列数不能满足设计要求, 也并不一定导致系统失效。

关键词 物理过程失效; 蒙特卡罗模拟; 非能动系统; 自然循环

中图分类号 TL364+.5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.010

Influence of Heat Sink and Source Temperature on Operation Reliability of Natural Circulation System

YU Yu, QIAN Xiaoming, GAO Qinghan, WANG Xiaoxuan

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract In the Probabilistic Safety Assessment (PSA), Fault Tree (FT) is the approach commonly used for system reliability analysis. And it is the important feature of passive system and the basic difference from the active system that nuclear plant is able to be driven to safe state or shutdown by inherent safety characters of the reactor and physical principles, and is independent of human interfere or the operations of outside equipments, when the reactor is in the abnormal condition. Therefore, the passive system is widely used in new generation Nuclear Power Plant (NPP), such as AP1000 NPPs and high-temperature gas-cooled reactors to improve the safety. At the same time, since the passive system operation is depending on natural force, both the driven force and resistance are influenced by many uncertain factors, physical process failure become one of the significant causes for the system failure, which need to be considered in the system reliability analysis. FT method is not power enough to deal with this condition. For the passive system which is operating based on natural circulation, temperature of heat source and sink are important influence factors on system operation. Monte Carlo (MC) simulation is used to analyze the influence of heat source and sink temperature on system operation. From the result, it could be seen that the less the number of operation train is, the more prominent influence is. And if the safety margin is big enough, the system might not fail even when the system configuration does not satisfy design requirement, that is, the system failure is the integrate result of physical process failure and device failure which are mutually conditional.

Keywords physical failure; MC simulation; passive system; natural circulation

收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2012-06-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (12ZX05)

作者简介: 玉宇, 副教授, 研究方向为反应堆安全, 电子邮箱: yuyu2011@ncepu.edu.cn

0 引言

概率安全评价已成为核电站安全分析的重要内容,传统的故障树分析方法在分析设备故障导致系统失效方面已得到广泛应用。而随着核电技术与应用的不断发展,人们对核电站安全性也提出了越来越高的要求,特别是发生在日本福岛核电站的事故,更以沉重的代价告诉人们,即使在发生地震等外部灾害导致核电站完全丧失电源等支持系统的情况下,应仍然能够保证反应堆处于安全状态。基于此种情况,非能动设计思想——即系统实现其功能是建立在惯性原理、重力法则、热传递法则等自然规律基础上的,无需依赖外来的动力或人员干预——在大型先进压水堆 AP1000 及高温气冷堆等新一代反应堆设计设计中备受关注,引入依赖重力、自然对流和热传递等自然规律运行的非能动系统,减少系统对外部电能和信号以及人员干预的依赖,同时也使系统结构得到简化,无疑是提高核电安全的一个重要手段。依靠自然对流作为系统运行的驱动力这一理念在当前非能动系统设计中得到广泛应用,高温气冷堆非能动余热排出系统^[1-2]、先进大型压水堆 AP1000 非能动余热排出系统^[3-4]等都属于此类系统。

然而,也正因为该类非能动系统依靠自然循环运行,文献[5]指出:由于影响系统运行的诸多因素,如系统压力、环境温度等,都存在不确定性,导致此类系统运行的可靠性是否真正高于能动系统,尚需进一步研究。其主要原因^[5-6]在于:在设计过程中,对于自然循环等物理现象进行定量描述通常需要采用数学模型,进而利用计算机程序来模拟实际物理现象。对于系统所处的运行条件,如温度、压力等物理参数及粗糙度、管径等结构参数,通常在考虑一定安全裕度的情况下确定一个设计值;而在系统的实际运行中,由于存在气候变化以及制造、安装偏差等诸多不确定因素,将使得运行参数偏离其设计值,从而导致系统的运行工况偏离其设计条件,甚至出现自然循环不能建立或维持而引起系统运行失效。这样,物理过程失效——即由于系统运行的物理条件偏离了设计条件,导致自然循环不能建立或不能维持——成为该类系统运行失效的一个重要因素,需要在其系统可靠性评价中给予充分考虑。而对于物理过程失效,目前尚无成熟的分析方法。对于利用自然循环运行的非能动余热排出系统而言,冷源、热源温度是影响其运行的重要影响因素。本文将对冷源、热源温度变化引起的非能动系统运行状态变化及其对运行可靠性的影响进行分析。

1 系统介绍及系统运行可靠性描述

1.1 系统介绍

核电站余热排出系统的主要功能是将反应堆停堆后的剩余发热安全带到最终热阱,从而保证反应堆堆芯的最高温度不超过设计限值。图 1 为采用非能动设计思想的余热排出系统一个运行列的示意图,此类系统不依靠外动力,而仅仅

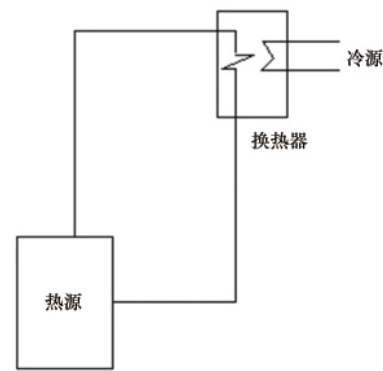


图 1 非能动余热排出系统示意图
Fig. 1 Flow chart for passive residual heat removal system

靠自然对流等非能动的自然机制即可将余热排至最终热阱。对于核电厂而言,堆芯即为热源,最终热阱即为冷源。本文对冷、热源温度变化时该系统的运行可靠性进行分析。对于余热排出系统,为满足安全要求,通常为冗余设计,本文为分析方便,取该系统 3 套独立的余热排出列(即系统包含 3 个独立的图 1 中所示运行列)中 2 列同时运行即可完成所规定的余热排出功能。

1.2 系统运行可靠性描述

研究非能动系统的物理过程失效,需要定义失效准则。对于第 1.1 节所描述的非能动余热排出系统而言,其主要功能是依靠自然循环将堆芯热量排至冷源,冷却剂即为循环水。一旦循环水温度大于沸腾临界温度,产生局部沸腾进而导致传热恶化,系统将丧失设计功能,而循环水流经堆芯时被加热,在换热器内被冷却,温度最高处为堆芯出口处。因此,该系统的失效准则定义为堆芯出口处的冷却水温度大于沸腾临界温度,热工水力模型的输出结果即为堆芯出口处的冷却水温度 T_{out} 与沸腾临界温度 T_c 之差,即过冷度^[1]:

$$\Delta T = T_c - T_{out}$$

如果 $\Delta T \leq 0$,则认为系统发生物理过程失效。

2 蒙特卡罗模拟计算

对于自然循环系统而言,冷源温度与热源温度是影响其物理过程的重要因素,对于第 1 节所述的系统,考虑到目前大型先进压水堆 AP1000^[3-4]、高温气冷堆^[1-2]的余热排出系统最终热阱均为大气,本文中大气作为冷源,而堆芯即为热源,本节将针对大气温度及堆芯功率的变化,采用蒙特卡罗模拟对其引起的堆芯出口处冷却水过冷度变化进行分析。

对于大气温度,其变化规律符合两个正态分布叠加后的概率分布;而功率变化通常符合正态分布规律^[7-8]。对于此种连续分布的参数,采用蒙特卡罗模拟方法,根据参数的概率密度分布曲线随机抽取参数取值进行热工计算,经过多次模拟就可以得到冷却水过冷度的分布规律,具体计算流程见图 2。

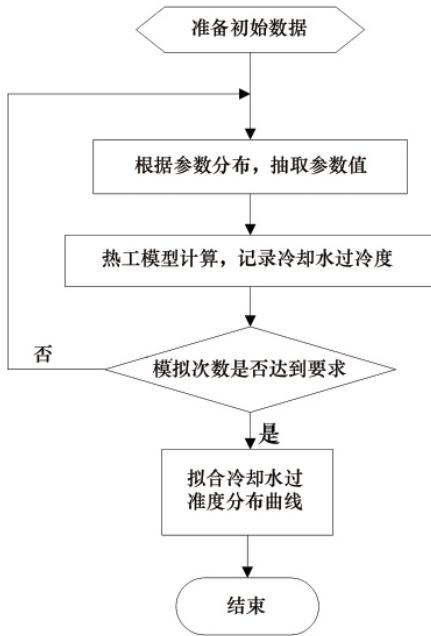


图2 蒙特卡罗模拟分析参数分布影响
计算流程图

Fig. 2 Flow chart of MC simulation for parameter
distribution influence analysis

3 计算结果

对于系统运行的物理过程而言, 系统硬件配置不同, 系统运行的状态也将发生变化, 因此, 本文针对系统1列运行、2列运行和3列运行的情况分别进行分析。

本文首先对冷源温度的影响进行了分析, 其分布呈正态分布叠加的变化规律, 两个正态分布的均值分别为5℃和21℃, 如图3所示。

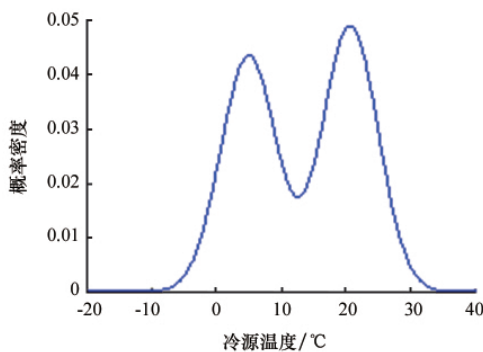


图3 冷源温度分布曲线

Fig. 3 Curve of heat sink temperature distribution

当系统有2列运行时, 计算结果如图4所示。若其他参数为设计值, 则冷源温度在其合理变化范围内取任何值均不能导致系统物理过程失效, 而本系统要求3列中的2列投入运行, 因此上述计算结果与系统设计是符合的。由图4中也可以看出, 冷却水过冷度的变化规律也呈现出两个正态分布叠

加的趋势, 与冷源温度变化规律一致。过冷度曲线中两个正态分布的均值分别为55℃和39℃, 与冷源温度分布曲线中两个正态分布均值所对应的过冷度基本吻合。

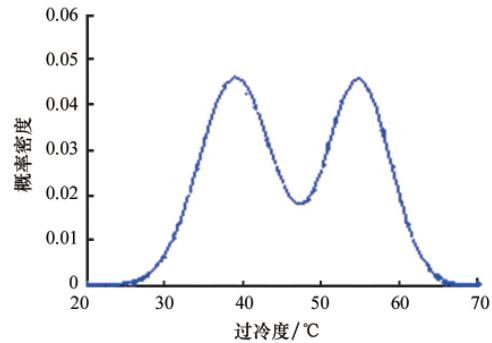


图4 2列余热排出系统运行时冷源温度分布影响计算结果
Fig. 4 Calculation result of heat sink temperature
distribution influence for two trains operation

当系统分别有1列、2列或3列运行时, 计算结果如图5所示。由图可见, 首先, 冷却水过冷度的变化规律均呈现出两个正态分布叠加的趋势(1列运行时计算得过冷度小于0℃的情况即出现物理过程失效的情况, 本文未详细计算其冷却水温度分布), 但其分布的偏差随运行列数的增加而逐渐减小。这是由于运行列数增加, 冷却水量增加, 系统运行对冷源温度变化的敏感度降低。而且, 冷源温度分布曲线中两个正态分布的偏差相同, 而过冷度曲线中过冷度较小(对应大气温度较高)的正态分布其偏差略高于另一个正态分布, 且与冷源温度变化曲线的方差存在差异。这是由于过冷度变化与冷源温度变化并非线性关系, 当冷源温度升高时, 过冷度随冷源温度的变化速度较大。

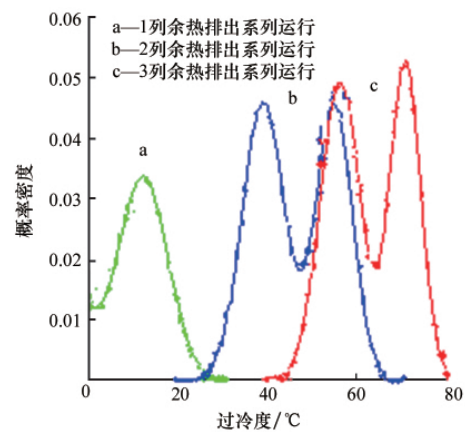


图5 余热排出系统冷源温度影响计算结果
Fig. 5 Calculation result of heat sink temperature
distribution influence

其次, 当系统只有1列参与运行时, 虽然并不能满足系统的设计要求, 但由于设计中冷源温度的取值较为保守, 因

此系统并不一定发生失效,此时计算得系统由于冷源温度变化导致物理过程失效的概率为 0.5。

对功率影响的分析,计算结果见图 6。当系统分别有 2 列或 3 列运行时,若其他参数为设计值,则冷却水过冷度的变化规律均呈现出正态分布规律,与功率分布规律一致,但亦非线性关系。而随着运行列数增加,系统运行对热源温度变化的敏感度亦降低,这同样是由于运行列数增加时,冷却水量增加所致。当系统只有 1 列参与运行时,功率变化导致物理过程失效的概率为 0.9,此时大部分计算点过冷度小于 0,因此未计算冷却水温度分布。

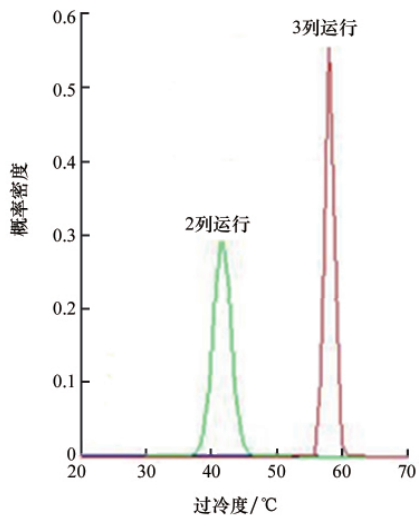


图 6 余热排出系统功率影响计算结果
Fig. 6 Calculation result of system power distribution influence

4 结论

由计算结果可以看出:(1) 冷源温度及功率变化对非能动余热排出系统运行状态具有重要影响,且运行列数越少,影响越明显;(2) 过冷度变化与冷源温度、热源功率变化趋势一致,并呈现出非线性关系;(3) 对于本文计算的余热排出系统,由于其物理参数的设计值安全余量较大,参与运行的设备列数不能满足设计要求并非导致系统失效的充分条件,此时系统具有一定的失效概率。

综上所述,对于依靠自然循环运行的非能动系统,其可靠性评价应综合考虑设备失效与物理过程失效,但系统失效并不是这二者的简单叠加,而是它们综合作用的结果,设备失效与物理过程失效是互为条件的。对于设备失效,传统的故障树分析方法可对其进行评价;而对于物理过程失效,蒙特卡罗模拟是一种可行的评价方法,但在进一步评价系统物理过程失效的过程中,还需考虑各影响因素的综合作用。在系统可靠性分析中还需将二者进行综合评价以得到系统运行的整体可靠性。

参考文献 (References)

- [1] Zhao R C, Zhao J, Liu T, *et al.* Assessing physical process failure probability of passive system in an advanced reactor by using M.C. Method [C]. The 9th Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM9), Hongkong, China, May 15–16, 2008.
- [2] Mackay J F, Apostoiakis E G, Hejzlar P. Incorporating reliability analysis into the design of passive cooling systems with an application to a gas-cooled reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(1): 217–228.
- [3] Schulz L T. Westinghouse AP1000 advanced passive plant [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2006, 236(14–16): 1547–1557.
- [4] 林诚格, 郁祖盛. 非能动安全先进压水堆核电技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
Lin Chengge, Yu Zusheng. Passive safety advanced pressurized water reactor technology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2010.
- [5] Oh J Y, Golay W M. Methods for comparative assessment of active and passive safety systems with respect to reliability, uncertainty, economy, and flexibility [C]. The 9th Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM9), Hongkong, China, May 15–16, 2008.
- [6] Zio E, Pedroni N. Functional failure analysis of a thermal-hydraulic passive system by means of Line Sampling[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(11): 1764–1781.
- [7] Yu Y, Liu T, Tong J J, *et al.* The analytic hierarchy process for the sensitivity analysis of passive safety system [C]//10th International probabilistic safety Assessment & Management Conference (PSAM10). Washington, USA, 2010.
- [8] Yu Y, Liu T, Tong J J, *et al.* Variance decomposition sensitivity analysis of a passive residual heat removal system model[J]. *Social and Behavioral Sciences*, 2010, 2(6): 7772–7773.

(责任编辑 岳臣)