

设备修复率对系统可靠性的影响研究^①

玉 宇^② 刘 涛 童节娟 赵 军 张阿玲

(清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘 要 采用蒙特卡罗模拟方法对高温气冷堆设备冷却水系统可靠性进行了分析,验证了计算模型的合理性,并进一步研究了系统可靠性随修复率的变化,以及不同修复率下系统失效的主要贡献因素。结果表明,随修复率增加,系统失效概率下降速率变缓,且系统失效的主要贡献因素随修复率不同而发生变化:当修复率极低或不维修时为设备独立失效;随修复率增加,主要贡献因素过渡为设备共因运行失效;修复率进一步增加,设备共因需求失效成为主要贡献因素。分析认为,其原因是随修复率增加,故障设备被修复的概率增大,其再次投入的可能性也随之增加。

关键词 蒙特卡罗模拟,修复率,系统可靠性,故障树,共因失效

0 引 言

20 世纪上半世纪,轻水堆核电厂概率安全分析(probabilistic safety assessment, PSA)技术在经历了几个里程碑式的发展之后已日趋成熟^[1]。PSA 在支持核电厂设计、验证设计平衡性、协助电厂运行管理等方面都发挥着重要作用,已经成为核电厂不可或缺的分析工具。丧失设备冷却水系统是核电厂概率安全评价中必须分析的一类始发事件,一般认为可以通过故障树(fault tree, FT)来评估其发生频率^[2]。然而设备冷却水系统是一个常年运行的系统,作为始发事件评估,任务时间应考虑 1 堆年,应考虑到在备用列投入运行后,故障设备可进行维修,修复后可再次投入运行等情况。这里有两个问题要考虑^[3]。一个问题是设备的运行失效与设备运行时间有关,而设备的运行时间并不是系统任务时间,只要在系统任务时间内有一台设备维持运行就可满足需要。运行中的设备发生失效是一种随机行为,因此设备的运行时间也不是固定的,无法事先获得。另一个问题是冗余设备需求失效是与需求次数相关的,而需求次数也与运行设备发生故障的次数有关,因此也是不能事先获得的。对于常运行系统,故障设备的修复率也是影响系统可靠性的重要因素。综上所述,分析核电厂丧失设备冷却水始发事件发生频率,

不仅需要考虑系统中的设备在一段时间内发生失效的概率,还需要考虑运行(备用)设备失效、故障设备修复之间的时序关系,以使所得结果更加接近实际情况。传统的故障树分析方法是布尔代数为基础的静态逻辑分析方法,处理此类与时序有关的问题,存在一定困难。随着核电技术不断改进,核电安全性不断提高,人们越来越认识到系统的随机演变、过程变量随时间的变化等系统动态特性对于核电站安全评价的重要性,在此情况下,动态可靠性评价方法逐渐发展起来,成为 PSA 领域一个年轻的分支,蒙特卡罗模拟是其中一种发展前景较为广阔的评价方法之一。本文采用该方法对设备冷却水系统在运行 1 堆年中的失效概率进行了分析,并对设备修复率对系统可靠性的影响作了进一步的研究。

1 系统介绍

本文对高温气冷堆设备冷却水系统可靠性进行分析。在高温气冷堆核电厂中,设备冷却水系统的主要功能是为用户设备提供冷却,设备冷却水的热量通过换热器传给厂用水系统,通过冷却塔散往大气。由于此系统的故障会导致核安全重要系统停运,因此,丧失此系统需要在短时间内停堆。

此系统设置 3 台循环水泵,一台工作,一台备用,一台检修,检修列在规定时间内完成检修后即处

^① 国家科技重大专项(2008ZX060902-009)资助项目。

^② 女,1976 年生,博士,助研;研究方向:概率安全评价;联系人, E-mail: yu-yu@mail.tsinghua.edu.cn (收稿日期:2009-06-09)

于备用状态。换热器共两台,一台损坏后可以单台运行,保证反应堆不停堆。系统示意图见图 1。由于循环水泵与换热器是相互独立的,在计算系统失效概率时可分别计算,再将所得结果相加。由于换热器是非能动设备,其失效概率远低于循环水泵,因此本文针对该系统循环水泵进行分析,研究设备修复时间的变化对系统可靠性的影响。

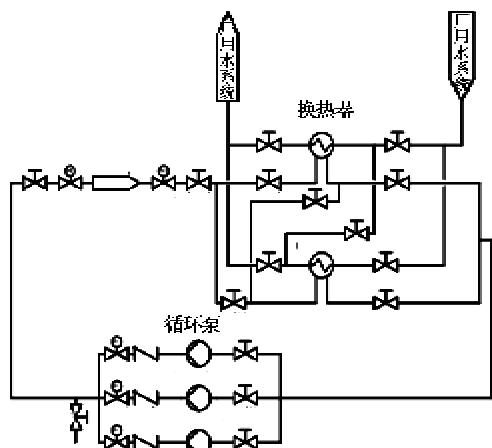


图 1 设备冷却水系统示意图

2 蒙特卡罗模拟方法

由于本文分析设备冷却水系统失效概率的目的是为始发事件频率分析服务的,因此不考虑该系统的支持系统(如电源系统)丧失所导致的系统失效,支持系统丧失已在另外的始发事件中考虑,这里仅以循环水泵本身故障所导致的系统丧失为例进行分析。

由于设备冷却水系统在 1 堆年内的运行呈现出动态特性,其可靠性分析属于动态可靠性范畴,在动态可靠性分析方法中,蒙特卡罗模拟方法^[3-6]是其中一种比较有前景的评价方法,其具体分析方法可参考相关文献^[5,6],这里仅就本文中的应用做简要描述。对一个确定的系统,可以通过一些变量的变化来描述这个系统所处的状态(如运行时间、系统中各元件的状态等),系统的运行就抽象为这些量的变化。也就是说,在计算机上模拟系统的运行实际上就是模拟这些量随着系统的运行如何变化的过程。每轮仿真就是模拟系统运行一次,通过多次模拟来获得系统达到某种状态的概率。采用蒙特卡罗模拟方法对系统进行分析的步骤见图 2。

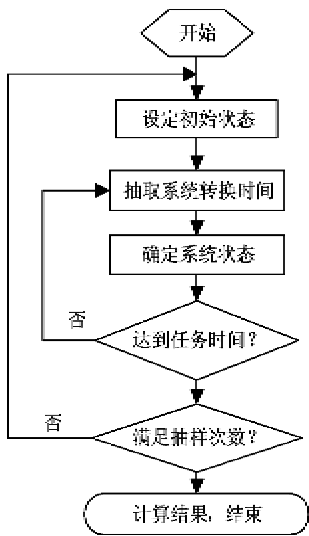


图 2 计算流程图

3 计算结果及分析

图 3 是系统失效概率随设备修复率(平均修复时间的倒数)变化的曲线。可以看出,随修复率上升(平均修复时间缩短),系统失效概率下降;但随修复率上升,系统失效概率下降速度变缓。这是因为系统失效存在不同的失效模式:包括共因需求失效、共因运行失效和独立失效(包括设备独立需求失效和运行失效)。随修复率变化,这几种失效模式对系统失效概率的贡献不同,而系统失效概率的变化是这几种失效模式综合作用的结果。当平均修复时间为 20h 时,系统失效概率为:3.1E-3。文献[7]是根据美国 729 座核电厂在 1987-1995 年间的运行数据得出的统计值,虽然其数据来自于水堆,而本文所分析的是高温气冷堆核电厂设备冷却水系统,但该系统与水堆并无本质差异,因此,本文将计算结果与文献[7]的统计结果进行了比较,偏差较小。

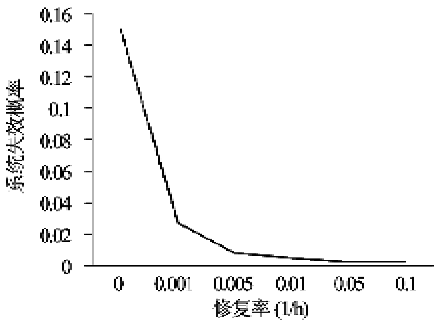


图 3 系统失效概率随修复率变化曲线

图 4 是各种失效模式对系统失效概率的贡献随修复率变化的曲线。如果不对故障设备进行维修,则导致系统失效的主要原因是设备独立失效,占 60%。这是因为设备发生独立运行失效的概率为

$$Q_{\text{独立}} = [(1 - \beta) \cdot \lambda]^{-3} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3$$

式中, Q 为失效概率, β 为共因失效系数(本文中设备需求失效和运行失效的共因失效系数均取为 β), λ 为运行失效率, T_i 为第 i ($i = 1, 2, 3$) 个设备的运行时间。 T 为任务时间, 显然, $T = \sum_{i=1}^{\beta} T_i$ 。

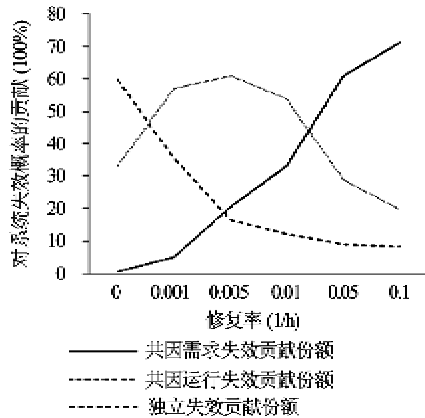


图 4 各种失效模式对系统失效概率贡献随修复率变化曲线

由上式可见,在不对故障设备进行修复的情况下,设备发生独立运行失效的概率与系统任务时间成立方关系,而此情况下共因运行失效与系统任务时间成线性关系。考虑系统运行时间为 1 堆年,设备在任务时间内发生独立失效的概率大于共因失效概率,为主要贡献。

随修复率增加,即设备平均修复时间缩短,冗余设备在故障设备被修复之前发生独立失效的概率降低,因此共因失效的贡献逐渐增加。当修复率在一定范围内时,共因运行失效为系统失效的主要贡献因素,此时运行设备在平均修复时间内发生共因失效的概率较高;修复率进一步增加时,设备平均修复时间进一步缩短,当其接近并逐渐小于设备发生共因运行失效的平均运行时间时,共因运行失效的贡献逐渐降低;而随着设备修复概率的增加,其再次投入运行的可能性增加,共因需求失效逐渐成为系统失效的主要贡献因素。其具体分析可通过图 5 至图 8 进行说明。

图 5 是 10 万次模拟中发生系统失效的次数,图 6 至图 8 分别是共因需求失效、共因运行失效和独立失效导致的系统失效发生次数。由图中可以看

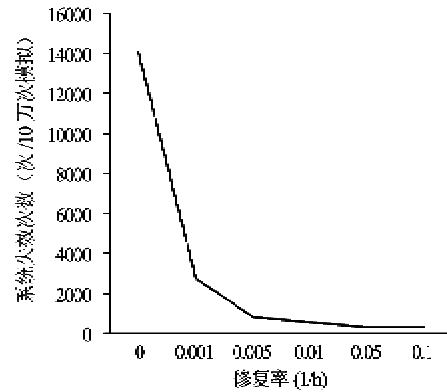


图 5 系统失效次数随修复率变化曲线

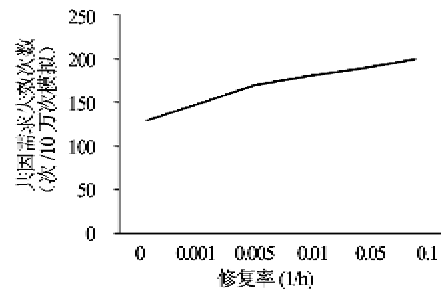


图 6 共因需求失效导致系统失效次数随修复率变化曲线

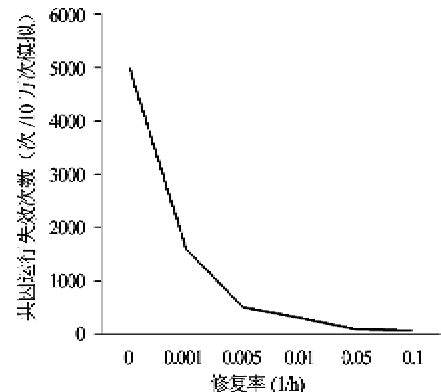


图 7 共因运行失效导致系统失效次数随修复率变化曲线

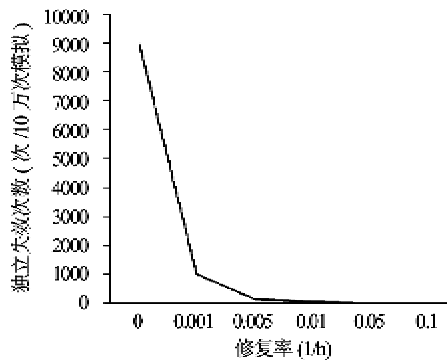


图 8 独立失效导致系统失效次数随修复率变化曲线

出,当不修复或修复率较低时,共因运行失效与独立失效的发生次数远远高于共因需求失效的发生次

数,前两者随修复率上升急剧下降,而此时共因需求失效的作用并不明显,因此系统失效的发生次数下降很快,见图5。

当修复率上升至0.005/h(平均修复时间为200h)左右时,共因需求失效的发生次数与独立失效的发生次数相当,低于共因运行失效的发生次数,此时共因运行失效成为系统失效的主要贡献因素,图4中共因运行失效份额变化曲线在此区域内呈现出峰值。

随修复率继续上升,共因运行失效与独立失效发生次数下降,共因需求失效发生次数上升,当修复率升至0.05/h(平均修复时间为20h)时,共因需求失效发生次数超过共因运行失效的发生次数,成为系统失效的主要贡献因素。

下面分别对各种失效模式随修复率的变化情况进行简要分析。

由图6可见,由共因需求失效所导致的系统失效发生次数是随修复率上升而逐渐上升的。这是由于蒙特卡罗计算模型中考虑到需求失效是与需求次数相关的,修复率上升,意味着故障设备被修复而重新处于备用状态的概率增加,导致设备被要求再次投入运行的概率增加,因此需求失效发生次数增加,也就是说,设备被需求的次数增加,导致了需求失效次数相对增加。

图7是共因运行失效次数随修复率变化的曲线。在蒙特卡罗抽样计算模型中,考虑到运行失效概率是与设备运行时间相关的,因此采用了参考文献[3]中的假设:处在同一共因组中的设备,在发生共因运行失效时,具有相同的累计运行时间。也就是说,当共因组中一个设备发生失效时,同一共因组中的冗余设备处于备用状态,投入运行后并不是立即发生失效,而是在运行与故障设备相同的运行时间后失效。这样,如果冗余设备能够满足在任务时间内接替运行,则系统不会发生失效。

当考虑对故障设备的维修后,随修复率增大,故障设备在运行设备运行到累计运行时间发生共因失效前被修复的概率增加,发生系统失效的次数减少。

图8是设备独立失效导致的系统失效次数变化曲线,通过与图7比较,不难看出,考虑维修后导致的系统失效次数下降速度高于共因运行失效。例如,设备独立失效导致的系统失效次数在不维修时为9000次/10万次模拟,当修复率上升至0.001/h(平均修复时间1000h)时,下降为1000次/10万次模拟,修复率上升至0.005/h(平均修复时间200h)

时,下降至140次/10万次模拟;而设备共因运行失效所导致的系统失效次数在不维修时为5000次/10万次模拟,当修复率上升至0.001/h(平均修复时间1000h)时,下降为1600次/10万次模拟,修复率上升至0.005/h(平均修复时间200h)时,下降至500次/10万次模拟。这是由于发生独立失效的设备之间没有相关性,运行设备的运行时间不受故障设备的影响,因此运行设备的运行时间大于共因失效的情况(发生共因失效时设备的运行时间不超过故障设备的运行时间)。

4 结论

本文采用蒙特卡罗模拟方法对可维修系统的可靠性进行了分析,所得结果与实际情况^[7]较为接近,同时研究了在不同修复率下对系统失效的主要贡献因素:

(1)当不考虑设备修复或修复率很低时,系统失效的主要贡献因素为设备独立失效;

(2)当修复率在一定范围内时,共因运行失效逐渐成为系统失效的主要贡献因素;

(3)修复率进一步增加,系统失效的主要贡献因素逐渐过渡为共因需求失效。

对于设备冷却水等常年运行的系统,故障设备修复之后再次投入运行是保证系统可靠性的一个重要方面,故障设备的维修时间是影响系统可靠性的关键因素之一,而同时也应考虑到缩短维修时间所需的代价。找出导致系统失效的关键设备及其失效模式,有针对性地进行预防性维修以及制定合理的故障维修方案,也是提高系统运行可靠性的有效途径之一。本文的研究结果有助于确定不同情况下导致系统失效的关键因素,从而有助于制定合理的维修策略,提高电厂运行的可靠性、经济性。

本文针对系统任务时间为1堆年时修复率对系统可靠性的影响进行了分析,而不同任务时间下导致系统失效的关键因素会有所不同,针对任务时间对系统可靠性的影响可做进一步研究。

对于系统共因失效系数 β ,其取值也将对分析结果产生影响,针对其影响趋势可作进一步探讨。

参考文献

- [1] 刘涛,玉宇,童节娟等.先进核电厂概率安全分析探讨.科技导报,2009,27(8):35-38
- [2] Barrett R, Campbell J F, Camrino A, et al. Procedures for Con-

- ducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants(level 1) (Safety series No.50-P-4). Vienna : International Atomic Energy Agency,1992.62-64
- [3] Li Y D, Tong J J. A method to estimate the initiating event frequency by Monte Carlo simulation. In: Proceedings of the 9th Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM9), Hongkong, China,2008. Paper ID:0161(in CD)
- [4] 李元丹. 可靠性分析中的动态可靠性方法:[学士学位论文]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院,2007. 9-30
- [5] Labeau P E, Smidts C, Swaminathan S. Dynamic reliability: towards an integrated platform for probabilistic risk assessment. *Reliability engineering & system safety*,2000, 68(6):219-254
- [6] Siu N. Risk assessment for dynamic system: an overview. *Reliability engineering & system safety*,1994,43(1):43-73
- [7] Poloski J P, Marksberry D G, Atwood C L, et al. Rates of Initiating Events at US Nuclear Power Plants: 1987-1995 (NUREG/CR-5750). Washington, D C:US Nuclear Regulatory Commission,1998. 9-12

Analysis of the effect of equipment repair on system reliability

Yu Yu, Liu Tao, Tong Jiejuan, Zhao Jun, Zhang Aling

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

The reliability of the component cooling water system in the high temperature reactor (HTR) was analyzed by using the Monte Carlo simulation, the validness of the Mont Carlo Simulating model was verified, and the effect of the equipment repair rate on the system reliability and the major contributors to the system failure under different repair rates were discussed. The results show that, with the increase of the repair rate, the decreasing rate of the system failure probability decreases, and the main contributors to the system failure vary with the repair rate: when there is no repair or the repair rate is very low, the main contributor is independent failure; with the repair rate increasing, the main contributor is changed to common cause operation failure; and when the repair rate is more higher, the main contributor is common cause demand failure. The reason is that the higher the repair rate, the higher the repair probability of fault devices, so the probability of using these devices again is higher.

Key words: Monte Carlo simulation, repair rate, system reliability, fault tree, common cause failure