

文章编号：0258-0926(2017)02-0161-04；doi:10.13832/j.jnpe.2017.02.0161

# 实时在线风险监测器瞬时风险计算研究

王 琰, 张志俭\*, 张 敏, 张华志, 马颖菲

哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨, 150001

**摘要：**现有风险监测器通过手动输入设备状态的方式获取电厂的配置信息，连续运行设备的历史运行时间和状态信息并未输入到风险监测器中。实时在线风险监测与管理通过自动和手动的方式获取并储存设备的运行状态信息和不同状态下对应的时间，累积失效概率考虑了连续运行设备的历史运行状态和启动到失效的运行时间。以两个并联泵的系统为例给出泵经历了运行、热备用、再运行过程后泵的失效基本事件的分布函数。这个分布函数反映了机组运行过程中瞬时风险与设备历史运行状态和时间有关，瞬时风险曲线随运行时间呈递增趋势。

**关键词：**实时在线风险监测器；历史运行状态和时间；瞬时风险曲线

**中图分类号：**TL364 **文献标志码：**A

## Study on Instantaneous Risk Calculation in Real-Time Online Risk Monitor

Wang Yan, Zhang Zhijian\*, Zhang Min, Zhang Huazhi, Ma Yingfei

Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China

**Abstract:** In the existing risk monitor, the configuration information of specified plant is obtained by manual input. The historical running status and corresponding times of the devices cannot be put into risk monitor. In the Real-Time On-Line Risk Monitor (RORM) the running status and time of the components are collected and stored by automatic mode and manual mode. The historical running status and time from start to failure are considered in the cumulative failure probability of specified successive operating device. For example, two parallel pumps in a system experience the operation, hot reserve and then operation. The cumulative failure distribution functions of running failure basic event of two pumps are given. The functions show the instantaneous risk is related to the historical running status and time. The instantaneous risk curve shows an increasing trend with the time.

**Key words:** Real-time on-line risk monitor, Historical running status and time, Instantaneous risk curve

### 0 前 言

现有的核电厂风险监测器在人-机界面上设置多个系统冗余列或设备的状态修改按钮，操作员首先通过机组控制系统观察到设备或系统某一列不可用以后，手动修改设备状态，然后进行风险计算得到风险结果。但是，概率安全评价的设备数量众多，输入的信息不仅包括故障、定期试验等设备不可用信息，还有冗余列运行时间和运行状态信息，因为这两种可用状态的失效率是不

相同的。在这个离线输入过程中，连续运行设备的历史运行时间和状态信息并没有输入到风险监测器中。

实时在线风险监测与管理包含一个核电厂设备可靠性数据在线采集、分析与储存系统。这个子系统通过核电厂状态监测单元连续获取设备的状态信息，记录设备的可用时间。例如：设备冷却水系统的泵运行时间、热备用时间、预防性维修时间或纠正性维修时间等，在机组一个换

收稿日期：2016-10-29；修回日期：2016-12-20

基金项目：大型先进压水堆及高压气冷堆核电站—国家科技重大专项（2014ZX06004-003）

作者简介：王 琰（1986—），男，博士研究生，现主要从事核动力装置安全与可靠性研究

\*通讯作者：张志俭，E-mail：zhangzhijian@hrbeu.edu.cn

料周期内对概率安全评价范围内的设备都会有完整的运行状态和时间记录。在考虑设备的历史运行信息后,实时在线风险监测与管理系统的风险评价结果与现有风险监测器给出的风险结果是不相同的。

## 1 风险监测器的瞬时风险

现有风险监测器计算设备的不可靠度采用指数模型。由于当前设备制造工艺的提高、设备质量控制措施的实施,制造后质检程序剔除一些早期缺陷所致失效的设备,安装到核电厂后又经过调试阶段,磨合部件之间的联系,使设备渡过了早期失效阶段,进入正常使用期,所以风险计算中设备的失效率为常数。

美国搜集的 5 份设备失效率类型分布统计数据显示,在 6 种失效率模型中,失效率为常数的模型的比例随着工业发展水平的提高而逐渐增大<sup>[1]</sup>。6 种失效率模型中有 5 个模型在正常使用阶段失效率为常数,这 5 个模型代表的设备在所有统计设备中的比例为 83%。这说明风险监测器中在正常使用阶段设备失效率采用常数是合理的。在风险监测器模型中,可修设备维修、试验通常被包括代表维修或试验导致不可用的基本事件模型化。例如:设备冷却水系统 003 泵故障顶事件下面包括泵硬件失效、支持系统失效和泵本体以及电机试验或维修离线不可用。其中,设备试验或维修导致的不可用基本事件更改为房型事件,当设备处于维修或试验状态时,则房型事件置“真”。这种建模方法使得可修设备的模型可以采用传统的不可修部件模型。

现有风险监测器没有采集设备不同可用状态下的运行时间。在每一次进行风险计算时,模型中连续运行设备的计算时间设定为设备参与事故缓解的任务时间,而任务时间由严重事故分析给出不会随核电厂运行时间或运行配置而发生变化。风险监测器中设备的故障概率计算公式如下:

$$F(T_m) = P(T \leq T_m) = 1 - \exp\left(-\int_0^{T_m} \lambda dt\right) \quad (1)$$

式中,  $F(t)$  为设备的累积失效概率;  $\lambda(t)$  为设备某一个可用状态下的失效率,在风险监测器中为常数;  $T$  为失效时间;  $T_m$  为始发事件发生后设备参与事故缓解的任务时间。

假定核电厂的设备没有开展维修或定期试验,也没有发生随机失效,所有设备都处于可用状态(运行和备用),都能执行其应有的功能,并且在没有设备运行状态影响的情况下,根据式(1)对设备累积失效概率的计算,核电厂风险将会一直保持不变,在现有的风险监测器界面上显示为一条直线,如图 1 所示。

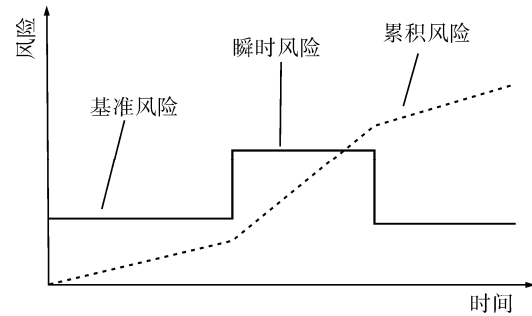


图 1 风险监测器风险曲线示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Risk Curve in Risk Monitor

在发生设备随机失效时,现有风险监测器首先需要更改模型,重新计算在设备不可用配置下的瞬时风险水平,此时瞬时风险会出现阶跃。由于现有风险监测器没有手动采集连续运行设备的运行时间,所以瞬时风险在升高后保持不变,仍然是一条直线。一直到设备恢复可用后,瞬时风险又回到零维修配置下的基准瞬时风险。所以,现有风险监测器给出的瞬时风险变化只受到配置变更的影响,与设备的历史运行状态和时间不相关。因此,现有风险监测器设置一个存储配置风险计算结果的数据库<sup>[2]</sup>,将已经计算过的历史配置信息进行保存,当核电厂再次出现已保存的配置时,直接将保存的风险结果显示给用户,不需要再次进行计算。只有在数据库中查询不到相同的配置时,现有风险监测器才会自动进行计算,给出配置风险信息。

## 2 实时在线风险监测器瞬时风险

实时在线风险监测与管理系统的设置状态监测单元,可以从核电厂数字化仪控系统自动采集设备运行参数,通过逻辑符合判断出设备运行状态,同时以手动输入方式获得不能监测的设备的状态信息。这种混合输入方式降低了用户在信息输入方面的负担,并且减少信息输入过程中可能发生人为错误的事件。核电厂设备可靠性数据在

线采集、分析与储存系统对获取的设备状态信息进行处理，一方面系统可以为在线风险监测器提供设备累积失效概率计算结果，另一方面也可以通过长期积累设备类的失效数据，利用经典估计和贝叶斯估计得到特定机组的设备类失效率。

式(1)中  $T$  是随机变量，定义为产品单元从开始工作到首次失效的时间<sup>[3]</sup>。根据这个定义，在计算某一时刻的风险水平时，必须考虑设备的运行历史。核电厂设备可靠性数据在线采集、分析与储存系统获取了设备的历史运行信息和当前设备运行状态。同时，假设核电厂运行过程中设备的维修（包括预防性维修和纠正性维修）做到恢复如新型维修。对于特定的某个设备，它的运行历史追溯到新设备开始可用的时刻或上一次维修完成后可用的时刻，这个可用包括运行和备用。

核电厂在运行过程中某些设备处于运行状态，有些设备处于备用状态，也有设备在这两个状态之间进行切换。例如：某一个系统有2台泵，机组功率运行状态下有一个泵运行即可满足功能要求，另一台泵处于热备用状态。为了平衡设备的可靠性，2台定期进行状态切换。

0~ $T_1$  时间段内泵 A 运行泵 B 处于热备用状态； $T_1$  时刻泵 B 成功启动投入运行，泵 A 切换到备用状态；在  $T_2$  时刻，泵 A 成功启动切换到运行状态，泵 B 由运行转为备用状态。在这个过程中，泵 A 和泵 B 没有发生运行失效和启动失效。在  $T_3$  时刻，实时在线风险监测器开始进行风险计算。首先实时在线风险监测器通过状态监测单元获得设备的运行状态，然后根据  $T_3$  时刻的设备运行状态将故障树模型更新到图 2 所示的模型。泵 A 处于运行状态，则只有运行失效模式；泵 B 处于热备用状态，则有启动失效、运行失效和试验或维修失效模式。

始发事件发生后，泵 A 和泵 B 参与事故缓解的任务时间是  $T_{ABm}$ ，则泵 A 的运行失效基本事件累积失效概率  $F_{A-FR}(T_3 + T_{Am})$  为：

$$F_{A-FR}(T_3 + T_{Am}) = 1 - \exp\left\{-\left[\lambda_A(T_1 + T_3 + T_{Am} - T_2) + \lambda'_A(T_2 - T_1)\right]\right\} \quad (2)$$

式中， $\lambda_A$  是泵 A 在运行状态的失效率； $\lambda'_A$  是泵 A 在热备用状态的失效率； $T_{Am}$  是始发事件发生后泵 A 参与事故缓解的任务时间。

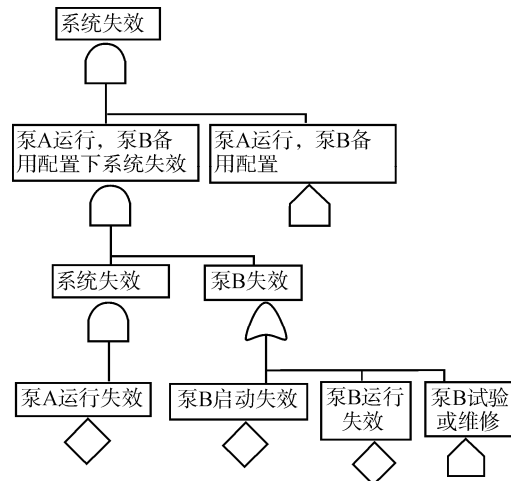


图 2 泵 A 运行泵 B 备用配置的故障树

Fig. 2 Fault Tree of Configuration about Operating Pump A and Hot Spare Pump B

泵 B 在  $T_2 \sim T_3$  时间段处于热备用状态，在  $T_3$  时刻之后只有在泵 A 运行失效且泵 B 成功启动条件下才能参与事故缓解进程。泵 B 的启动失效概率  $F_{B-FS}(T_3 + T_{Bm})$  为常数  $T$ ，与泵 B 的运行时间无关。

泵 B 的运行失效基本事件累积失效概率  $F_{B-FR}(T_3 + T_{Bm})$  的计算公式是：

$$F_{B-FR}(T_3 + T_{Bm}) = 1 - \exp\left\{-\left[\lambda_B(T_{Bm} + T_2 - T_1) + \lambda'_B(T_1 + T_3 - T_2)\right]\right\} \quad (3)$$

式中， $\lambda_B$  是泵 B 在运行状态的失效率； $\lambda'_B$  是泵 B 在热备用状态的失效率； $T_{Bm}$  是始发事件发生后泵 B 参与事故缓解的任务时间。

从式(2)和式(3)可知，用于计算机组瞬时风险的输入项泵 A 和泵 B 的运行失效基本事件的累积失效概率与设备的可用状态和时间相关。这些设备状态和时刻都被实时在线风险监测器记录在系统中，用于基本事件累积失效概率的计算。

实时在线风险监测器的瞬时风险曲线示意图如图 3 所示。随着运行时间的增加，连续运行设备的不可靠度逐渐增加。因此，零维修配置下机组瞬时风险水平随着运行时间的增加而增加。当出现新的配置造成风险升高后，持续时间越长，瞬时风险也不断增加。

### 3 评价方法的不足和解决方法

前文对机械设备的风险评价方法是基于概率统计模型，通过收集大样本失效数据，利用贝叶

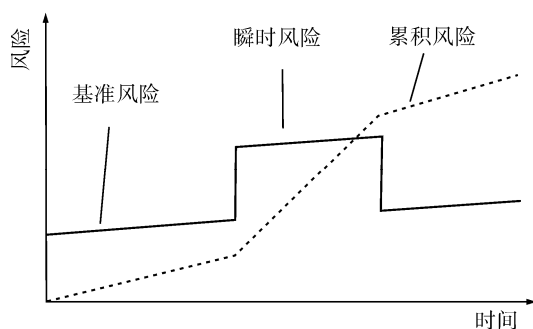


图3 实时在线风险监测器风险曲线示意图  
Fig. 3 Schematic Diagram of Risk Curve in Real-Time On-Line Risk Monitor

斯更新方法结合通用数据库得到特定机组的设备类失效率的分布函数。这个分布函数的平均值作为设备类中某个特定设备的失效率，并且采用失效率为常数的指数模型来计算设备的不可靠度。传统的可靠性评估方法可以给出在规定的条件下与规定的时间内，设备类内一批设备中的某一个设备完成其规定功能的概率。累积的设备失效次数越多，更新后的概率值就越准确，机组的特征会越来越明显。

机械设备采用失效率为常数的指数分布模型具有“使用如新”、“无记忆性”的特征。这与机械设备的实际运行情况是不符合的。机械设备在长期运行之后，都会由于震动、磨损等因素影响设备的可靠性。一个长期运行的特定设备的失效率随运行时间的增加呈现上升趋势<sup>[4]</sup>，在运行阶段或大修期间进行设备预防性维修或纠正性维修，替换一些磨损的零部件，清洗接触面，更换润滑油等措施可以使设备的失效率恢复到接近常数水平。但是某台具体机械设备的失效率分布函数很难获得，无法定量计算长期运行之后失效率增加的程度<sup>[5]</sup>。因此，使用指数模型是一种近似估计设备不可靠度的方法。

另外，在概率安全评价中参数不确定性计算将设备失效率分布作为一个输入项。通过不确定性分析和敏感性分析，找出主要的敏感因素，然后在配置风险管理中采取增加在线维修等措施，将这些设备的可靠性维持在较高的水平，保障机组的安全稳定运行。通过这种方法解决了从设备类统计数据中估计特定设备失效率的问题。

#### 4 结束语

介绍了一种新的实时在线风险监测器，相对

于现有的风险监测器，增加了核电厂设备状态监测单元和核电厂设备可靠性数据在线采集、分析与储存系统。状态监测单元可以通过数字化仪控系统自动获取可监测的设备状态信息和历史运行时间，不可监测的设备状态可以通过手动输入获得。这些信息输入到核电厂设备可靠性数据在线采集、分析与储存系统中，得到设备运行基本事件的累积失效概率。这个累积失效概率的输入包括设备不同可用状态的失效率和可用时间。

以2台切换运行状态的泵为例，当两台泵经历了运行、热备用、运行的状态切换过程后，在某一个时刻实时在线风险监测器进行风险计算。相对于现有风险监测器的设备累积失效概率计算方法，实时在线风险监测器设备累积失效概率计算方法更能反映设备的历史运行状态对当前设备参数事故缓解过程中失效概率的影响。随着运行时间的累积，设备的不可靠度在升高，造成核电厂机组在某一个配置持续状态下瞬时风险水平也不断升高。

但是风险监测器和实时在线风险监测器都是通过大样本概率统计的方法将设备类的平均失效率作为某一个具体设备失效率，并且采用指数分布模型。实际工程中，通过采取在线维修和纠正性维修将设备的失效率维持在接近常数的水平。同时，在配置风险管理中考虑了设备失效率的不确定性和敏感性分析结果。

#### 参考文献：

- [1] Jorge E. Núñez Mc Leod P B, Romina D. Calvo and Selva S. Rivera, Members, Iaeng. Failure Profiles for Maintenance in Industrial Facilities[C]. Proceedings of the World Congress on Engineering 2015 (WCE 2015), 2015: 814-819.
- [2] Agency N E. RISK MONITORS: The State of the Art in their Development and Use at Nuclear Power Plants[R]. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2004: 205-208.
- [3] 劳沙德. 系统可靠性理论：模型、统计方法及应用(第2版)[M]. 郭强, 王秋芳, 刘树林, 译. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [4] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. 机械工程学报, 2014, (14): 27-35.
- [5] 何正嘉, 曹宏瑞, 訾艳阳. 机械设备运行可靠性评估的发展与思考[J]. 机械工程学报, 2014, 2: 171-186.

(责任编辑：王中强)