

核电厂备用系统可靠性模型及其参数评估方法

张永发, 童节娟, 周 羽

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

摘要 由于同时存在备用应力和需求应力, 导致了备用设备可靠性模型的多样化。本文首先给出了只考虑备用失效和需求失效的基本模型, 并对在可靠性和风险评估中使用不同模型所带来的差异进行了研究, 总结了两种基本模型的特点; 然后, 对同时考虑两种应力的综合模型的表达形式和适用性进行了分析, 并提出上述三个模型的基本使用原则; 最后, 针对目前核电厂可靠性数据(包括通用数据库和特定核电厂的典型数据)的积累现状, 对模型参数的评估方法进行了研究, 提出了基于三个不同层次的数据评估方法, 简要介绍了每种评估方法的实施步骤和注意事项, 并在此基础上, 结合中国核电厂可靠性数据的实际情况, 提出了中国核电厂备用设备可靠性模型和参数评估方法的使用建议, 认为在目前情况下, 中国核电厂应该尽可能利用已经积累的电厂典型数据以反映中国电厂的实际情况。

关键词 备用设备; 备用应力; 需求应力; 可靠性数据; 参数评估

中图分类号 TL3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)03-0024-05

Standby System Reliability Model of the Nuclear Power Plant and Its Parametric Evaluation Methods

ZHANG Yongfa, TONG Juanjie, ZHOU Yu

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

Abstract Because a standby equipment is affected by the demand stress and the standby stress simultaneously, its reliability model can take various shapes. This paper first discusses two important models—the standby failure model and the demand failure model. The differences of their assessment of reliability and risk are analyzed to show the characteristics of these two models. Then, an expression considering both the standby stress and the demand stress is proposed, together with its applications, and it is discussed in three aspects. Three evaluating methods for the model parameters are related to the fact that the reliability data include both generic data and special data. The integrated model and the evaluating methods of its parameters are used in evaluating domestic nuclear power plants, where the specific data must be used as much as possible, in order to reflect the realistic states of plants.

Keywords standby equipment; standby stress; demand stress; reliability data; parameter evaluation

0 引言

在核能行业中, 为了确保核动力装置运行达到很高的可靠性水平, 其重要系统和环节往往需要冗余设计。例如, 为了防止核事故发生和放射性物质泄漏, 会设置许多专设安全设施, 这些系统在平时处于备用状态, 只有当运行部件(针对备用部件而言)不可用或发生事故(针对专设安全设施而言)

后, 才需要它们投入。这些设备能否根据需要投入(即可靠性如何)是安全分析所关心的一个重要问题。从设备的任务剖面来看, 其可靠性分析可以划分为两个阶段, 一是部件状态转换时的可靠性分析; 二是部件状态成功转换后的可靠性分析。其中设备状态转换成功之后的可靠性分析与其他运行部件没有差别, 所以本文仅讨论部件状态转换时的可靠性分析

收稿日期: 2009-10-28

作者简介: 张永发, 博士研究生, 研究方向为可靠性及核电厂概率安全评价, 电子信箱: yf-zhang04@mails.tsinghua.edu.cn; 童节娟(通信作者), 副研究员, 研究方向为可靠性及核电厂概率安全评价, 电子信箱: tongjj@tsinghua.edu.cn

问题。

造成备用设备状态转换失效的主要原因分为备用应力和需求应力两类^[1],对于这两类失效力,可以对应于两种不同的可靠性模型,即备用失效模型和需求失效模型。目前,核电厂概率风险评价中往往只采用其中一种模型来描述,这种做法便于实现,但是也存在一些缺陷,比如容易错误估计装置总体风险水平,无法正确进行后续基于风险的应用等。为了克服单一模型的缺陷,研究人员提出同时考虑两种失效力综合模型来评估备用设备的可靠性,这一模型能够比较全面地评估设备备用期间的可靠性,并便于开展后续的技术规格书优化等工作,但使用该模型存在一个重要困难,就是如何利用现有数据(特定电厂的数据比较有限,且记录比较粗泛)合理地评估模型中的可靠性参数。本文在已有研究的基础上^[1-7],根据数据积累的实际情况,对备用设备可靠性参数的评估方法进行了研究,并依据国内核电厂的情况,提出评估方法的使用建议。

1 基本的备用可靠性模型和特点分析

如第1节所述,备用设备的失效主要包括备用应力和需求应力两类原因,它们分别可以利用备用失效模型和需求失效模型来进行描述。下面对两个基本失效模型及其特点进行分析。

1.1 备用失效模型

备用失效模型认为设备在备用期间的任意时刻都可能发生失效,如果部件在 t 时刻是可运行的,则在 t 时刻的失效概率可以表示为

$$Pr(\text{system is in failed state at time } t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

其中 λ 为备用失效率。

该模型一般做两个假设如下:

- 1) 在整个备用期间的备用失效率 λ 保持不变;
- 2) 不同系统以及同一系统在不同备用周期内发生备用失效是独立的。

备用失效模型在原理上与运行失效模型有许多相似之处,它们的一个重要区别在于运行失效发生后,可以立即被发现,但备用失效发生后,一般不会被发现,除非进行试验或有实际的需求。因此,在使用备用失效模型描述状态转换失效时,一般都以备用期间平均失效概率表示部件在备用期间的可靠性水平,即

$$p \approx \lambda t_{\text{test}}/2 \quad (2)$$

其中, λ 为备用失效率, t_{test} 为试验周期。

考虑两个备用设备,在发生非计划需求时,两个设备同时发生需求失效的概率为

$$Pr(\text{both fail}) = \frac{1}{t_{\text{test}}} \int_0^{t_{\text{test}}} (1 - e^{-\lambda s})^2 ds = (\lambda t_{\text{test}})^2/3 \quad (3)$$

1.2 需求失效模型

设备在每次需求时发生失效的概率为 P_d ,此概率与备用

时间无关。该模型一般做以下两点假设:

- 1) 对每一次需求,部件状态转换失败的概率是 P_d ,转换成功的概率为 $1 - P_d$ 。该概率值对所有的需求都是相同的;
- 2) 不同需求之间在统计上是独立的,即一次需求失效不会对另外一次需求失效的概率产生影响。

需求失效模型认为,部件在备用期间不会发生失效,只有当发生需求的瞬间,由于需求应力的作用,才会以一定的概率发生随机失效。应用需求失效模型来描述备用部件时,失效次数期望只与需求次数有关,与备用时间没有关系,这在后面关于试验周期优化中会产生明显的影响,详细分析参见第1.3节。

1.3 两种模型的特点分析与比较

本节对两种模型的特点进行分析,并针对4个重要方面的内容对其进行比较。

1) 评估的方便性

需求失效模型必须知道需求次数和失效次数才能对有关参数进行评估,但备用失效模型仅需要知道总的备用时间和失效次数即可。一般而言,备用时间比需求次数更容易获得(因为备用时间可以通过多个渠道进行推算,而需求次数在数据积累中往往很难完全找到),所以备用失效模型参数的评估也就更加方便。

2) 在故障树割集中的使用

在故障树模型的割集计算中,两者会得到不同的计算结果。比如考虑有两个设备同时共用的情况,每个设备有相同的失效概率。则当使用需求失效模型时,得到

$$Pr(\text{both fail}) = p^2 = [Pr(\text{one fail})]^2 \quad (4)$$

当使用备用失效模型时(两个设备具有相同的试验周期 t_{test}),根据平均失效概率的计算公式可以得到:

$$\begin{aligned} Pr(\text{one fail}) &\approx \lambda t_{\text{test}}/2 \\ Pr(\text{both fail}) &\approx (\lambda t_{\text{test}})^2/3 \end{aligned}$$

显然, $Pr(\text{both fail}) \neq [Pr(\text{one fail})]^2$ 。

3) 统计参数的获取

在相同的统计数据情况下,两个模型会产生不同的基本事件概率。例如,假设每台应急柴油机(EDG)每月通过启动的方式试验一次。在100个月的试验中,观察到2次失效。那么利用最简单的需求失效模型可以得到,需求失效概率 $p = 2/100 = 0.02$ 。使用备用失效模型进行参数估计,得到备用失效率 $\lambda = 0.02/\text{month}$ 。现在考虑在一个试验周期内,发生一次EDG启动失效的概率,如果使用需求失效模型,得到:

$$Pr(\text{EDG fails to start}) = p \approx 0.02$$

如果使用备用失效模型(计算的是一个周期内的平均失效概率),则可得到:

$$Pr(\text{EDG fails to start}) \approx \lambda t/2 \approx (0.02/\text{month}) \times (1\text{month})/2 = 0.01$$

两个模型计算得到的失效概率相差2倍(这里考虑每个试验周期内仅有一次启动需求)。引起差别的原因非常简单,因为可靠性参数评估时考虑的备用时间是一个试验周期,备

用失效模型计算的备用失效概率是一个试验周期内的平均概率,而不是试验周期末尾的备用失效概率(如果偏于保守地采用试验周期末尾的备用概率代表备用失效概率,则备用失效概率等于需求失效概率),因此它与由相同统计数据分析得到的需求失效概率在数值上就相差了2倍。

采用单一模型有以下不足:①无法全面、客观反映设备的可靠性特征;②无法有效开展后续基于风险的技术规格书优化。为了克服上述不足,核工业界和相关研究人员已经提出在条件允许的情况下,使用综合模型来分析备用设备的可靠性问题。利用综合模型进行分析的主要困难在于,如何利用现有的数据基础合理地评估两个重要的可靠性参数(即备用失效率 λ 和需求失效概率 P_d),第2节将针对这一问题进行分析。

2 综合可靠性模型及其参数评估

2.1 综合可靠性模型

对于实际备用设备来说,它们在状态转换时发生失效,一般都是受到备用应力和需求应力的双重作用,因此同时考虑这两种应力的影响是比较合适的^[8-10]。从第1节的讨论可以看到,备用失效模型满足备用失效率为 λ 的指数分布,而需求失效模型可以恒定地描述需求失效概率。因此如果考虑任意时刻均可能发生的随机状态转换失效,则可以表示为

$$p(t)=P_d+\lambda t$$

其中 t 为从上一次试验结束到发生需求的时间。

但是,由于备用设备隐藏失效的特点,其真正的失效时间往往无法获得,因此,可以把整个试验周期内的平均状态转换失效概率作为部件备用期间可靠性的指标,表示为

$$p(T)=P_d+\lambda T_{\text{test}}/2$$

其中 T_{test} 为设备的试验周期。

从综合模型的表达式可以看到,其包括两个重要的可靠性参数,即 P_d 和 λ 。所以,为了有效地评估设备可靠性,必须要能在现有数据基础上获取合理的 P_d 和 λ 数值。目前,国内外核工业界已经积累了相当数量的关于备用设备的试验、维修、失效记录,但是由于记录详细程度、描述重点和方式等差异,使得不同系统所获取的数据差别很大,如何利用这些进行可靠性参数评估存在一定的难度。在第2.2节中,将根据数据特点提出相应的可靠性参数评估方法。

2.2 可靠性参数评估方法

目前核工业界的维修和失效数据来源主要包括两大类,即通用数据库和特定电厂的数据库。本小节以美国核工业界发布的数据^[11]为基础,讨论如何合理利用现有数据进行可靠性参数评估的方法。

对于备用设备而言,验证模型有效性和评估可靠性所需的参数主要包括设备需求失效次数、设备备用失效次数、设备总的需求次数、设备总的备用时间。通过对数据收集现状的调研发现^[12],可以将数据按照表1进行划分。

表1 现有可靠性数据分类情况

Table 1 Classification of currently existing reliability data

序号	数据来源	需求失效次数	备用失效次数	总需求次数	总备用时间	推荐的通用参数	其他
1	通用数据库	✓	✓	✓	✓	✓	
2		✓	✓		✓	✓	
3					✓	✓	仅有总失效次数
4	特定电厂数据	✓	✓	✓	✓		
5		✓	✓		✓	✓	
6					✓		仅有总失效次数

从表1的数据分类可以看到,根据数据积累的丰富程度,可以大致将数据分为3个不同的层次。

A类数据 评估参数的各类型数据均能获取(通用参数值可能有,也可能没有),如表1中序号1、4中对应的设备数据;

B类数据 能够获取需求失效次数、备用失效次数和总备用时间等,且有可用的通用参数值,如表1中序号2、5对应的设备数据;

C类数据 无法明确获取需求失效次数、备用失效次数等的设备数据,如表1中序号3、6对应的设备数据。

根据数据的3个层次及数据来源差异,可以制定不同的参数评估方法,以下分别分析。

1) 对于A类数据,由于各类型的数据均能充分获取,所以可以采用最基本的评估方法对备用设备的可靠性参数进行评估,基本步骤如下。

① 选定要分析的设备

由于可靠性分析的对象是设备,因此在进行可靠性参数评估时,首先要确定所需分析的设备类型、数量、所在系统等。对于来自多个电厂的通用数据源,可能需要统计多个电厂、多个系统、某个类型(例如MOV、MDP、TDP等)设备的失效、维修记录;对于来自单个电厂的特定数据源,则仅需统计电厂内同一类型设备的数据即可。

② 甄别备用失效与需求失效

文献[7]将设备数据分为备用应力相关、需求应力相关、



无法确定事件和不适宜进行分类事件等 4 个类别。具体的划分是依据一系列的关键词或关键词组合来实现。对于可以明确划分的事件,直接列入“备用应力”或“需求应力”相关类别中;对于无统计意义或无可靠性评估价值的事件,则列入“不适宜分类事件”中;对于有可靠性评估价值,但无法从数据描述来确定其失效应力的事件,则列入“无法确定事件”。

备用应力/需求应力相关事件的最终数目主要由两部分组成,一是确定的备用应力/需求应力相关事件数目;二是“无法确定事件”中按“确定事件”中备用应力与需求应力事件的比例所对应的事件数目。

③ 可靠性参数评估

对于各类型设备数据均能获取的情况,参数估计可以采用最基本的评估方法,即

备用失效率=备用失效次数/总备用时间

需求失效概率=需求失效次数/总需求次数

④ 验证模型有效性

根据设备的特性,可以将其分成若干个组,或者根据不同年份将设备数据进行分组,然后分别比较由这些数据所得到的参数情况,检查是否存在重大波动,以验证模型的有效性。

2) 对于 B 类数据,由于无法获得需求总次数,因此,不能用最基本的评估方法进行需求失效概率的评估。具体可以采用以下策略来进行参数评估:

① 备用失效率的评估。由于备用失效次数和总的备用时间都可以获得,因此备用失效率的评估,仍然可以采用基本评估方法;

② 需求失效概率的评估。通过通用参数值与需求失效比例乘积的方法来获取该数值。因为现有的许多数据库中都包含了通用的需求失效概率,如文献[4]中取 1.0×10^{-3} /次,所以假设在该通用值能够反映该类设备的需求失效水平的前提下,可以用需求失效与备用失效的相对比例来估计综合模型中的需求失效概率。

3) 对于 C 类数据,由于数据质量比较差,有关记录不足以对数据进行明确的划分,因此无法用上述的基本评估方法来分别估计两个可靠性参数。美国 NRC 针对这种数据现状,发展了一种可以利用这种低质量数据的方法。该方法只使用时间相关事件的数据,即针对一个特定的部件类型和运行环境,分别估计其不同试验周期情况下的可靠性参数,最后估计该设备的备用失效率和需求失效概率。

该方法的基本步骤可以概括如下:

① 将设备根据试验周期的不同,划分为若干个集合,然后分别利用集合内的失效数据对两个失效参数(需求失效概率 P_d 和备用失效率 λ)进行初步评估;

② 将每个试验周期内估计得到的失效参数 P_d 和 λ ,对试验周期 T 绘制坐标图;

③ 对绘制的曲线图进行线性化处理之后,再根据斜率和

截距来求解最终的 P_d 和 λ 。

更详细的方法可以参考文献[1]。

由于各个国家的数据收集不一致,同一个国家,其不同电厂的数据收集情况也存在差异,因此,实际的数据积累程度会呈现积累层次不同、质量差异较大等特点,应该根据不同的数据特点,制定相应的评估策略。

2.3 对中国核电厂的建议

对于备用设备可靠性模型和综合模型可靠性参数评估方法的确定,应该根据中国的实际情况,合理地加以选择和应用。本文结合中国的情况,对此提出以下建议。

1) 关于使用单一模型还是综合模型的问题

使用单一模型:

① 仅为了评估装置总体风险水平,或为了提高装置模型的计算速度,则可以采用简化的单一模型;

② 可获取的可靠性数据很少,或引进设备时仅提供了单一模型的可靠性参数;

③ 运行经验或分析表明,该类设备基本只受其中某种应力(需求应力/备用应力)作用,则可以只采用表征这种应力的单一模型。

使用综合模型:

① 可获取的失效或维修数据比较丰富,足以支持模型参数评估的情况;

② 有一定数据基础,且是为了满足某些特定应用要求(如优化技术规格书等)的情况;

③ 运行经验或分析表明,该类设备受两种应力影响都比较显著的情况。

2) 综合模型可靠性参数评估方法的选择

① 当综合模型用于评估装置总体风险时,对于同一电厂的不同备用设备应尽可能采用同一种参数评估方法。鉴于目前国内电厂数据积累普遍比较薄弱的事实,建议采用第 2.2 节中第二和第三类评估方法。

② 当综合模型用于备用系统的可靠性评估或改进研究时,应该根据特定设备的数据积累情况,采用相应的参数评估方法,对于一些数据积累比较丰富的设备(例如应急柴油机等),可以用第一类参数评估方法。

3 结论和展望

备用设备的可靠性评估是核电厂风险评价及其应用的重要组成部分,本文首先分析了备用设备的两个基本可靠性模型(单一可靠性模型),并从评估的方便性、在割集中的使用以及统计参数的获取等 3 个方面对它们进行了比较,并分析了单一模型存在的缺陷。

综合可靠性模型是克服单一模型的有效途径,但如何有效地评估综合模型的可靠性参数是应用该模型的主要困难。本文根据目前国内外核工业界的数据现状和特点,将其分成 3 个不同层次。在结合国外研究成果的基础上,分别制定了这

3 个层次的数据所适宜采用的分析方法。最后根据我国核电厂的实际情况,分别从可靠性模型的选择和参数评估方法确定两个方面提出了建议。

为了更好地评估备用设备的可靠性,今后在核电厂运行中应该加强失效、试验、维修数据的收集与整理工作,并且在国内核电领域内加强数据共享,以便尽早地产生一批反映国内电厂和设备的可靠性参数。

参考文献 (References)

- [1] Lofgren E V, Thaggard M. Analysis of standby and demand stress failures modes, NUREG/CR-5823[R]. Washington DC: Division, 1992.
- [2] Houghton J R, Hamzehee H G. Component performance study-turbine-driven pumps, 1987-1998, NUREG-1715, Vol. 1 [R]. Washington DC: Division of Risk Analysis and Application Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, 2000.
- [3] Houghton J R, Hamzehee H G. Component performance study-motor-driven pumps, 1987-1998, NUREG-1715, Vol. 2 [R]. Washington DC: Division of Risk Analysis and Application Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, 2000.
- [4] Houghton J R, Hamzehee H G. Component performance study-air-operated valves, 1987-1998, NUREG-1715, Vol. 3 [R]. Washington DC: Division of Risk Analysis and Application Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, 2000.
- [5] Houghton J R, Hamzehee H G. Component performance study-motor-operated valves, 1987-1998, NUREG-1715, Vol. 4 [R]. Washington DC: Division of Risk Analysis and Application Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, 2000.
- [6] Atwood C L, La Chance J L, Martz H F, et al. Handbook of parameter estimation for probabilistic risk assessment, NUREG/CR -6823 [R]. Washington DC: Division of Risk Analysis and Application Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, 2003.
- [7] Lofgren E V. Time-independent and time-dependent contributions to the unavailability of standby safety system components, BNL-NUREG-64255 [R]. 1997.
- [8] Jain M, Sharma G C, Sharma R. Performance modeling of state dependent system with mixed standbys and two modes of failure [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2008, 32: 712-724.
- [9] Subramanian R, Anantharaman V. Reliability analysis of a complex standby redundant system [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1995, 48: 57-70.
- [10] Yearout R D, Reddy P I, Grosh D L. Standby redundancy in reliability—A review [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1986, R-35 (3): 285-292.
- [11] Eide S A. Historical perspective on failure rates for US commercial reactor components[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2003, 80: 123-132.

(责任编辑 杨书卷)

·学术动态·



“第 20 届全国电磁兼容学术会议”征文

中国电子学会电磁兼容分会与中国通信学会电磁兼容委员会决定于 2010 年 4 月中旬在江苏省无锡市联合举办“第 20 届全国电磁兼容学术会议”。此次会议征文范围及要求如下:天线、探头、传感器;电磁兼容标准、规程;电波传播;静电放电、雷电及电磁脉冲;电磁场理论;地震电磁学;传输线及电缆;信号完整性;串扰与耦合;屏蔽、滤波及接地;散射抗扰度及敏感度;电磁环境;电磁干扰预测分析、抑制技术;电磁干扰源通信中的电磁兼容;非电离辐射及电磁生物效应;汽车、电力工程及电气铁道中的电磁兼容;电磁计算;暗室、混响室、吸波材料;频谱管理;电磁兼容测量。

征文截稿日期:2010 年 3 月 15 日。

联系人:石丹,电话:13681561190,传真:010-62283322,电子信箱:shidan.ml@gmail.com。



“太阳射电天文学——新一代射电频谱日像仪建设进展研讨会”征文

由中国天文学会主办的“太阳射电天文学——新一代射电频谱日像仪建设进展研讨会”将于 2010 年 9 月在内蒙古召开。会议正在征文,具体内容包括:射电频谱日像仪的研制、初步观测结果及相关研讨,射电频谱仪快速精细结构的观测和理论,太阳射电研究与其他观测手段的交叉与结合,日冕磁场的诊断与外推。

联系方式:北京市朝阳区大屯路甲 20 号 中国科学院国家天文台(100012) 颜毅华;电话:010-64851674。