

AP1000 核电厂设备可靠性数据库开发及应用

曲天佐¹, 方奇术^{2,✉}, 乔彦龙²

(1. 山东核电有限公司, 山东烟台 216600; 2. 国家电投集团电站运营技术(北京)有限公司, 北京 120029)

摘要: [目的] 设备可靠性数据在核电厂 PSA、RCM、维修规则、可靠性保障大纲、风险指引管理等领域的重要价值, 提出了开发 AP1000 设备可靠性数据库的必要性。[方法] 对 AP1000 核电厂特定数据库开发过程中的一些重要问题, 如独立失效的分析流程, 设备和设备类的选取, 可靠性参数估计方法, 共因失效的分析方法和流程, 核电厂特定数据以及通用数据收集和分析以及可靠性数据的应用等方面进行了探讨。[结果] 提出了开发 AP1000 电站特定的设备可靠性数据库的技术路线。[结论] AP1000 核电厂设备可靠性数据库的建立和应用, 可以积累宝贵的核电厂特定运行、维修、失效、试验等数据, 为核电厂运行 PSA 提供可靠性参数, 为运行维修优化、安全管理等多个领域提供重要参考。

关键词: 概率安全评价 (PSA); 设备可靠性库; 经典估计; 贝叶斯估计; 共因失效

中图分类号: TL4; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0125-06

开放科学(资源服务)二维码:



Development and Application of AP1000 Nuclear Power Plant Equipment Reliability Database

QU Tianzuo¹, FANG Qishu^{2,✉}, QIAO Yanlong²

(1. Shandong Nuclear Power Co., Ltd., Yantai 216600, Shandong, China;

2. SPIC Power Station Operation Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 112209, China)

Abstract: [Introduction] The important value of equipment reliability data in nuclear power plant PSA, RCM, maintenance rules, reliability assurance program, risk guide management and other fields, puts forward the necessity of developing AP1000 equipment reliability database. [Method] Some important issues in the development process of AP1000 nuclear power plant specific database, such as independent failure analysis process, equipment and equipment category selection, reliability parameter estimation method, common cause failure analysis method and process, nuclear power plant specific data and general data. The collection and analysis of nuclear power plant specific data and general data collection and analysis, as well as the application of reliability data, etc. were discussed. [Result] The technical route for the development of AP1000 power plant specific equipment reliability database was proposed. [Conclusion] The establishment and application of AP1000 nuclear power plant equipment reliability database can accumulate valuable nuclear power plant specific operation, maintenance, failure, test and other data, provide reliability parameters for nuclear power plant operation PSA, provide an important reference for optimize operation and maintenance, safety management and other fields.

Key words: probabilistic safety assessment (PSA); component reliability database; classic estimate; bayesian estimate; common cause failure

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

设备可靠性数据是核电厂开展概率安全分析

(PSA)^[1]、维修规则(MR)^[2]、以可靠性为中心的维修(RCM)^[3]等安全评价和可靠性相关工作的重要基础, 其准确性将直接影响 PSA、MR 和 RCM 等工作的质

收稿日期: 2021-06-17 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家科技重大专项资助“核电站 Living-PSA 和在线风险监测与管理技术研究”(2014ZX06004-003)

量。设计阶段所使用的设备可靠性数据,大部分是来自国外同类电站或国际上公布的一些通用数据,例如美国 NUREG/CR-6928(2007 版)。通用数据通常并不能反映国内电站设备的真实运行状况,从核电厂自身运行经验获取电站设备的特定数据,才能真正反映电厂实际的设计、建造、制造、运行状态。国内目前开发的设备可靠性数据库大多基于 M310 机组或重水堆, AP1000 核电厂与之相比存在一些特殊性,比如采用了非能动安全系统设计,导致设备分组,失效模式等有一些新的变化。其次,运行阶段的 PSA 也要求尽量使用电厂特定数据^[4-5]。

此外,可靠性保证大纲,设备可靠性过程(AP-913)、维修准则(MR)、RCM(以可靠性为中心的维修)、风险指引管理(RI-ISI, RI-IST, AOT)等应用领域,也都需要电厂特定的设备可靠性参数作为重要支撑。基于以上原因,开发 AP1000 电站特定的设备可靠性数据库是具有重要意义。

1 设备可靠性数据库总体介绍

设备可靠性数据库包括独立失效可靠性数据子库以及共因失效数据子库。其工作主要包括如下两个部分:开发设备可靠性数据收集和软件平台;制定一套有效、完整的设备可靠性数据采集规程,确保输入数据的有效性。设备可靠性数据库与外部的接口主要包括电站 ERP 系统(或电站信息系统)或其它电站数据库如工单工作票系统,定期试验数据库,操纵员日志等。通过从这些系统自动获取电站运行数据,由数据分析人员在后台以 C/S 的方式进

行分析和审核并将数据导入到设备可靠性数据库中。数据库将统计分析后的结果,如设备失效率,平均故障维修时间,不可用度,共因失效因子等设备可靠性参数,以 B/S 方式提供给 PSA 用户,RCM 等用户浏览和使用^[6]。设备可靠性数据库架构如图 1 所示。

2 独立失效可靠性数据子库

2.1 独立失效分析流程

典型的设备可靠性数据库开发工作流程,包括确定分析范围(定义设备和设备类),确定分析分析方法(经典估计和贝叶斯估计),数据收集和分析(通用数据和电厂特定数据)的工作在下文进行介绍。美国 NRC 发布的“NUREG/CR-6823-Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment”对独立失效数据库的分析流程和方法进行了详细的介绍,数据分析的流程如图 2 所示。

为了指导国内运行核电厂开展设备可靠性数据采集工作,国家核安全局于 2014 年印发《关于开展核电厂设备可靠性数据采集工作的通知》(国核安发[2014]30 号)并发布了《核电厂设备可靠性数据采集》(试行版),并于 2015 年对其进行了修订和完善,2019 年再次对其进行了适应性升版,同时将文件名修改为《核电厂设备可靠性数据采集指南》。根据指南的要求,在原有数据的基础上,以美国 NUREG/CR-6928(2007 版)作为通用数据源,采用适当的数据处理方法进行了参数估计,对各核电厂新报送的数据进行了整合和处理,形成《中国核电厂设备可靠性数据报告》^[7]。

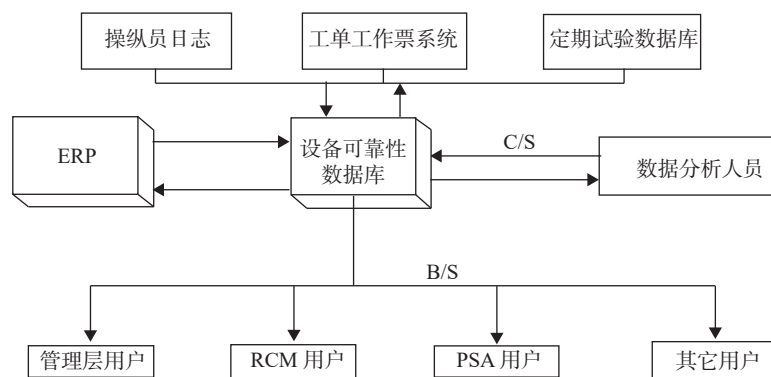


图 1 设备可靠性数据库架构

Fig. 1 Equipment reliability database architecture

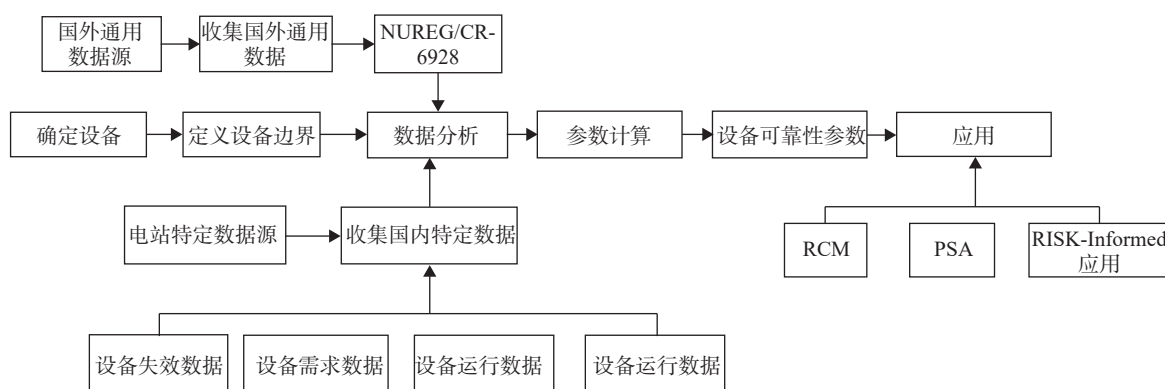


图 2 独立失效分析流程

Fig. 2 Independent failure analysis process

2.2 设备和设备类选取

设备和设备类选取的目的是规定一定统计样本, 从而获得统计学意义上的参数。基本原则是满足 PSA 分析所需的, 如有必要对于电厂经济性影响较大的设备也可纳入分析范围。设备类表示具有相似的工艺性能、相似的功能和相似的运行条件的一组设备, 设备类所包含的设备称之为样本。AP1000 核电厂设计阶段 PSA 报告中选取了 58 个设备类, 包括泵和风机、阀门、开关、其它机械设备、电气设备等大类, 每个类型又包含若干子类。设备的失效模式通常基于对特定设备的故障模式影响分析, 如启动失效, 运转失效, 不能开, 不能关等。为了方便对这些信息进行存储, 需要将这些设备和设备类进行编码。编码的规则以方便 PSA 应用为原则, 如 PM-ES 表示电动泵(PM)启动失效(ES)。AP1000 核电厂设备可靠性数据库的设备和设备类选取工作可以参照 PSAR 或者 FSAR 阶段 PSA 报告设备可靠性数据相关章节来进行选取。

2.3 设备可靠性参数估计

2.3.1 经典估计方法

经典估计方法认为被估计参数是一个未知的常量, 通常仅根据抽样信息得到的观测数据来估计可靠性参数, 即根据样本信息估计总体信息。经典估计通常给出被估量的点估计, 区间估计和误差。对于在数据收集时间段内没有收集到相关的失效数据, 或者失效次数为 0 的情况, 美国 NUREG/CR-6823 文件中并没有明确进行说明。法国和加拿大的同类型数据库中采用的处理办法是按照 $\chi^2(Khi-2)$ 在 50% 的规则来处理, 失效率的点估计值约为 $0.7/T$ 和 $0.7/N$ 。

我国国标 GB 5080.4—85 则建议取 $1/3T$ 和 $1/3N$, 相比较而言取 0.7 次更加保守。对于 AP1000 设备可靠性数据库而言, 建议采用法国和加拿大的数据处理方法。^[8]

对于误差因子的取值, 美国 URD 文件中可靠性数据误差因子主要来源于 NUREG/CR-4550; NUREG/CR-2728; 专家判断。在失效次数不为 0 的情况, 误差因子可借鉴对数正态分布误差因子的定义取为 90% 置信区间上限与 90% 置信区间下限之比开方; 而对于没有失效数据的情况保守的取 10, 或者参考专家意见。误差因子只是对参数估计的不确定性的表述, 其绝对值意义并不是很大。

2.3.2 贝叶斯估计方法

贝叶斯方法是一种根据贝叶斯定理进行统计推断的方法, 假设被估参数的不确定性服从某种分布, 其核心是将以往经验与本次试验观测的样本信息数据相结合并作出判断, 因此能得到更符合实际的后验数据。这种方法假设被估参数是服从某一以往经验的随机变量。按照贝叶斯定理, 通过实际电厂运行数据的似然函数分布以及通用数据的分布似合得到的后验分布。

通常似然函数较易求得, 而先验分布的选取则是应用贝叶斯方法的关键之处。在进行贝叶斯估计中通常以同型电站的通用可靠性数据为先验分布, 结合特定核电厂自身设备的特定数据得到该核电厂的后验分布数据。通常在先验数据源中已给出先验分布的类型和先验分布参数, 假如没有合适的先验数据来源, 则使用无信息先验分布^[9-10]。

3 共因失效数据子库建立流程

共因失效是指一个系统中由于某种共同原因而引起两个或两个以上单元的同时失效。核电站是由很多复杂系统组成,含有许多冗余设备,因此共因失效是不可避免的。AP1000 和 EPR 的 PSA 分析结果表明,共因失效 CDF 份额分别是 AP1000 57% 和 EPR 94%。如果在 PSA 模型中只考虑独立失效,会过低估计系统的失效概率,造成偏危险的分析结果,因此共因失效分析是核电站概率安全分析中的一个很重要的内容。共因失效分析的数据分析流程如图 3 所示^[11]。

共因失效分析方法有 α 因子模型、MGL 多希腊字母模型、 β 因子模型、BFR 二项失效率模型等。AP1000 的 PSA 报告中采用的是多希腊字母(MGL)方法,在 PSA 报告中给出了 11 个共因设备组的共因失效参数,这些数据可以作为通用数据来使用。我们建立的电厂特定共因失效数据库,拟采用 α 因子模型,理由如下: α 因子模型可以从核电厂统计数据得出,并有成熟的应用经验,如美国 NRC 采用 α 因子模型计算分析了压水堆 31 个设备和沸水堆 12 个

设备的数据;可以使用国外数据作为通用数据使用贝叶斯方法可以获得更好的参数估计; α 因子可以方便地转换成其它模型,应用较方便。美国 NUREG/CR-6268 文件中对共因失效数据库和共因失效分析方法进行了详细的描述。

注意的是,共因分析中对失效的定义以及失效模式与单因失效分析中失效模式可能有所区别。此外,共因设备组(CCCG)考虑 2~16,大于 16 部件数的用 16 进行计算,但是 CCG 数值越大计算越复杂甚至于超出计算机的计算能力,所以我们一般只考虑 2~4 部件组(美国目前统计的通用数据中亦只到 CCG=6)。在共因组选取上以 AP1000 的 PSA 模型为基础。

4 数据收集和分析

4.1 电站特定数据收集和分析

电站特定数据需要获取的电站数据包括,设备的基本信息、机组的状态信息、设备的运行时间、备用时间、失效次数、需求次数、故障维修时间、维修次数、试验不可用时间、维修不可用时间等。这些信息可以从电厂的系统手册、技术规格书、PSA 报

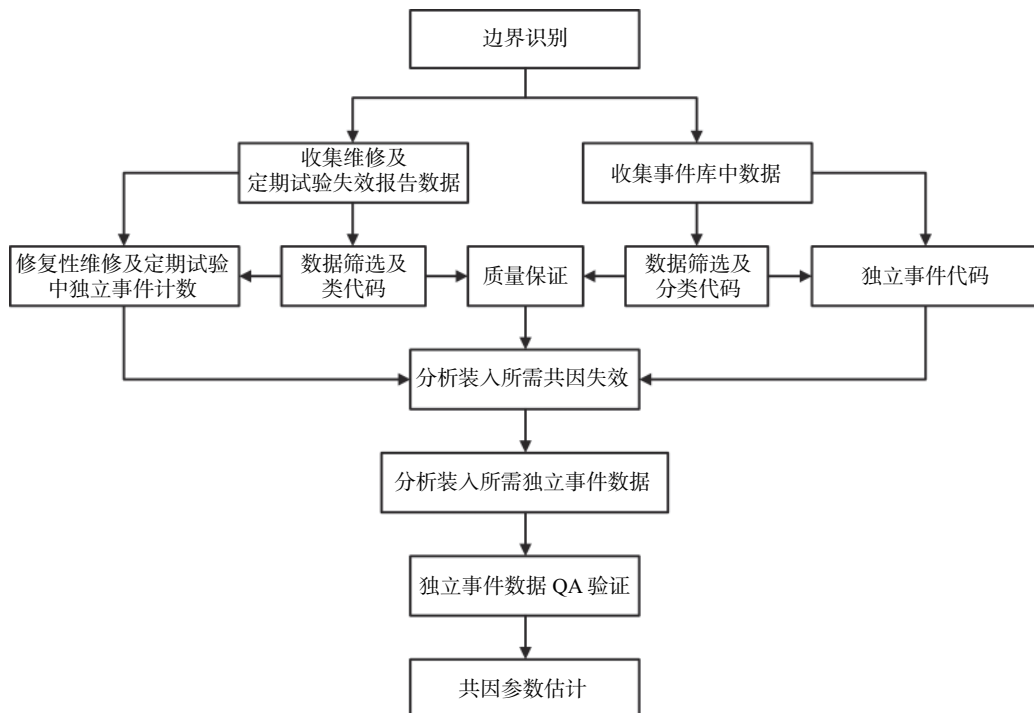


图 3 CCF 数据分析流程

Fig. 3 CCF data analysis process

告、运行规程以及设备管理系统、设备工单工作票系统、事件报告系统、电子日志等电站数据源获取。数据收集的方式可以通过人工收集和系统自动收集相结合的方式,并通过标准化的表格和编码来收集,确保一致性。

设备失效数据分析是重点,在电厂设备失效数据比较少,有的设备可能从未发生过失效。为了得到失效数据,必须检索设备在数据收集时间段内产生的所有故障、维修和试验记录。设备失效的准则,在设计 PSA 中或其参考的数据库中通常有简单的定义。一般来说,其判断准则为在规定的任务时间内是否能执行其所规定的功能。设备失效数据的分析,包括确定相应的失效模式,故障维修时间,不可用时间等数据,需要数据分析人员的经验。

当设备的不可用数据、失效数据和运行数据收集整理后,数据分析人员把这些数据提交相应专业的 PSA 技术支持工程师,联络协调相应专业技术人员进行确认,以确保所得到数据的正确性和合理性。

电站特定数据更能反映出本电站实际的运行状况,但前提是电站特定数据具有足够的数量和质量。NUREG/CR-6823 中根据 EPRI TR-100381 (EPRI 1992) 的经验给出了使用电站特定数据的准则:在统计时间段内没有出现失效的情况,可以用 95% 置信区间上限来衡量数据是否充分,即观察时间应大于 $3/\lambda$ 。当统计时间段内有失效记录时,设备类累计运行或者备用的时间应大于观察到 2 次失效的时间 ($2/\lambda$)。

4.2 电站通用数据收集和分析

ASME 中列举的可供 PSA 参考的通用数据源有,设备失效率和失效概率: NUREG/CR-4639, NUREG/CR-4550; 设备共因失效: NUREG/CR-5497, NUREG/CR-6268。AP1000 设计阶段 PSA 中使用的可靠性数据,主要采用了 EPRI Advanced Water Reactor Utility Requirements Document (URD) 中的数据。URD 用到的主要数据源包括 Oconee PRA (Duke 1984)、Seabrook 概率安全研究 (PLG 1983) 和来自执照事件报告的参数估计,这些执照事件报告包括 NUREG/CR-1363 (Battle 1983)、NUREG/CR-1205 (Trojovsky 1982)、柴油发电机 NUREG/CR-1362 (Poloski 和 Sullivan 1980)。当 URD 数据不可用时,采用了 NUREG/CR-2728, IEEE Std. 500 Reliability Data, NSAC-154, Other sources 等数据源。EPRI 在使用这些数据的时候经过了细致

的适用性分析,因此应用这些数据作为通用数据是比较好的选择^[6]。

核电厂通用数据是经过其它行业或同类型核电厂多年运行经验积累统计得到的,往往不能反映本电厂特定的一些特征。在没有电站特定数据或者特定数据不满足要求的情况下,可选择使用通用数据。

贝叶斯方法是以通用数据为先验数据,同时,以特定历史数据为样本数据,经过贝叶斯方法处理得到并可进一步用于 PSA 定量化的后验数据,综合考虑了这两方面的数据,因此我们通常推荐使用贝叶斯处理后的数据。

核电厂通用数据是核电厂重要数字资产,除了记录核电厂各类设备的运行历史状况外,还能监控安全相关设备的状态,主要应用包括 PSA 分析、在线风险评价与管理、故障原因分析、预防性维修优化、大修优化、RCM,同时还能为定期试验以及维修计划的制定提供指导,大大提升核电厂的安全水平和经济业绩。

5 结论

AP1000 核电厂设备可靠性数据库的建立和应用,为核电厂特定运行、维修、失效、试验等宝贵数据进行积累,不仅可以给核电厂运行 PSA 提供可靠性参数,而且为核电厂运行维修优化,安全管理等多个领域提供重要参考。同时,设备可靠性数据库也是数据共享,经验反馈的一个重要平台,另外还可以将设备可靠性数据库作为核电厂安全管理的一个辅助工具,如进行趋势分析,分析核电厂设备的性能趋势,失效模式,失效部件等。

AP1000 核电厂可利用该数据库对设备失效、异常事件、相应维修情况等数据进行监控、记录、跟踪和使用;并可及时地对新数据和修正数据进行填写维护。核电站安全管理和风险管理部门可通过本系统大大降低人工筛选和检索设备可靠性数据的工作量,并提高电站数据管理的效率和可信性,为管理部门提供信息和决策支持,更好地为核电厂管理服务。

AP1000 核电厂设备可靠性数据库一方面需要基于《核电厂设备可靠性数据采集指南》(国核安发[2019]5号)的要求进行数据收集并建立,另一方面需要非能动核电厂的自身特性进行扩充。

参考文献:

- [1] 唐小江, 张超. PSA风险分析方法在核电厂中的应用研究 [J]. *电工技术*, 2019(20): 102-104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2019.20.045.
TANG X J, ZHANG C. Application of PSA risk analysis method in nuclear power plant [J]. *Electrical Engineering*, 2019(20): 102-104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2019.20.045.
- [2] 程彬, 陈宇, 张涛. 维修规则与设备可靠性管理的关系探讨 [J]. *设备管理与维修*, 2019, 3(5): 22-24. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2019.03.10.
CHENG B, CHEN Y, ZHANG T. Discussion on the relationship between maintenance rules and equipment reliability management [J]. *Equipment Management and Maintenance*, 2019, 3(5): 22-24. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2019.03.10.
- [3] 邹维祥, 邹家懋. 海阳核电厂RCM的应用研究 [J]. *核动力工程*, 2014, 35(3): 170-172. DOI: 10.13832/j.jnpe.2014.03.0170.
ZOU W X, ZOU J M. Study on application of RCM in haiyang NPP [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2014, 35(3): 170-172. DOI: 10.13832/j.jnpe.2014.03.0170.
- [4] 罗娅彬, 祁军, 刘志军, 等. 核电厂PSA可靠性数据采集问题分析 [J]. *机电产品开发与创新*, 2013, 26(5): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6673.2013.05.019.
LUO Y B, QI J, LIU Z J, et al. PSA reliability data collecting problem analysis for nuclear power plant [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2013, 26(5): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6673.2013.05.019.
- [5] 陶殷勇. 核电厂PSA设备可靠性数据库数据自动获取机制探讨 [J]. *科技创新导报*, 2020, 17(17): 12-13. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2020.17.012.
TAO Y Y. Discussion on automatic acquisition mechanism of reliability database data of nuclear power plant PSA equipment [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2020, 17(17): 12-13. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2020.17.012.
- [6] 张威. 中国核电设备可靠性标准体系需求分析 [J]. *装备维修技术*, 2019(2): 53. DOI: 10.16648/j.cnki.1005-2917.2019.02.038.
ZHANG W. Demand analysis of China's nuclear power equipment reliability standard system [J]. *Equipment Maintenance Technology*, 2019(2): 53. DOI: 10.16648/j.cnki.1005-2917.2019.02.038.
- [7] EIDE S A, WIERMAN T E, GENTILLON C D, et al. Industry-average performance for components and initiating events at U. S. commercial nuclear power plants [R]. USA: The U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2007.
- [8] 刘德志, 余康兴, 李晓智. 参数估计中的三种经典方法探讨 [J]. *统计与决策*, 2020, 36(16): 5-8. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyc.2020.16.001.
LIU D Z, YU K X, LI X Z. Discussion on three classical method in parameter estimation [J]. *Statistics and Decision*, 2020, 36(16): 5-8. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyc.2020.16.001.
- [9] 姚丽. 二项分布参数的经典估计与Bayes估计相等的关系 [J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(4): 622-623. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1402.2014.04.040.
YAO L. The equal relationship between classical estimation and Bayesian estimation of a binomial distribution [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2014, 32(4): 622-623. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1402.2014.04.040.
- [10] 吴东昕, 赵炳全, 周绍杰. 简化贝叶斯方法在核电厂设备可靠性研究中的应用 [J]. *原子能科学技术*, 2000, 34(3): 193-198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2000.03.001.
WU D X, ZHAO B Q, ZHOU S J. The application of simplified bayes estimation to study on the nuclear power plant equipment reliability [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2000, 34(3): 193-198. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2000.03.001.
- [11] 刘学锋. 核电厂共因失效数据分析 [C]//中国机械工程学会. 2010年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第四届可靠性工程分会第二次全体委员大会, 中国湖南湘潭, 2010-01-01. 中国湖南湘潭: 中国机械工程学会可靠性工程分会, 2010: 63-65.
LIU X F. Common cause failure data of nuclear power plant [C]// Chinese Mechanical Engineering Society. 2010 National Mechanical Industry Reliability Technology Academic Exchange Conference and reliability Engineering Subcommittee general Meeting, Xiangtan, Hunan, China, 2010-01-01. Xiangtan, Hunan, China: Reliability Engineering Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, 2010: 63-65.

作者简介:



曲天佐

曲天佐(第一作者)

1984-, 男, 山东莱州人, 高级工程师, 工学学士, 主要从事核电厂核岛相关系统设备管理和技术攻关(e-mail)qutianzuo@163.com。



方奇术

方奇术(通信作者)

1986-, 男, 江西浮梁人, 高级工程师, 材料专业硕士, 主要从事核电站设备可靠性管理研究工作(e-mail)fangqishu@spic.com.cn。

乔彦龙

1988-, 男, 河北石家庄人, 工程师, 材料专业硕士, 主要从事核电站设备可靠性管理研究工作(e-mail)qiaoyanlong@spic.com.cn。

(责任编辑 李辉)