

风险指引的核电站设备分级概述

Review of the Risk-Informed Categorization of NPPs

赵 军/ZHAO Jun, 董节娟/TONG Jie-juan, 何旭洪/HE Xu-hong

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

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

[摘要] 核电站的构筑物、系统及设备(以下简称 SSC)的安全分级是核电站各项管理要求和规定的基础。由于传统确定论分级自身的特点,使基于此分级的核安全法规,一方面对设备的处理上存在过度的保守性,另一方面又在某些方面存在不够保守的地方。为了使法规对设备处理要求的规定更趋于合理,因此有了风险指引设备分级思想的产生。美国核管会及一部分业主对此分级思想的前景持肯定态度,并制定了多项相应的法规、标准及导则,同时有少数业主对此分级方法进行了试点性的研究。这些举措都将促进该风险指引设备分级思想的发展。通过总结与此分级相关的背景、方法及案例研究,对比传统分级和风险指引的分级方法之间的异同,阐述风险指引分级的方法论,使读者对风险指引分级思想的现状及发展有一个总体的概念,并对其以后的发展提出一些展望。

[关键词] 设备分级; 风险指引; 确定论

[中图分类号] TL48, TM623.8

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)08-0069-04

Abstract: The categorization of Structures, Systems and Components (SSC) is one of the cornerstones in the design of the nuclear power plant. The regulation requirements based on the current deterministic categorization are over-conservative in some aspects, and on the contrary, some other requirements are too loose. In order to make the requirements reasonable, the risk-informed categorization of SSCs has been presented. USNRC and some owners affirm that this categorization method is available. Therefore, related requirements, standards and guidelines have been established by USNRC, and on the other hand, some pilot studies have been made by those owners. In this paper, we summarized the background, methods and pilot studies related to this categorization. The relationship and difference between the two methods: exiting deterministic one and the risk-informed one are compared, and the methodology about risk-informed categorization is illuminated. In this way, we expect that the readers have an overview about the current status about risk-informed categorization and bring forward some prospects about its development.

Key Words: SSC categorization; risk-informed; deterministic

CLC Numbers: TL48, TM623.8

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)08-0069-04

1 风险指引设备分级背景及简介

核电站 SSC 的安全分级是其各项管理要求和规定的基础。根据 SSC 的安全等级,业内对其制定了相应的规章要求。尤其对于安全级设备,需要满足很多特殊处理要求。所谓“特殊处理要求”,是指对重要设备规定的、超出普通商业标准或工业标准的要求,以确保这些重要设备能在设计基准的条件下完成其预定的设计功能。这些额外的特殊处理要求会涉及到设计、鉴定、控制、存档、报告、维修、试验、监督以及质量保证等多个方面。

随着核工业实践经验的积累,以及概率风险分析技术(PSA)越来越广泛和深入的应用,人们逐渐认识到,基于传统确定论分级的“特殊处理要求”多数过于保守,给核电带来很多不必要的负担,限制了核电经济性及竞争力的提高;与此同时,也发现存在少数规定不够保守的情况。因而根据风险来合理地优化核电站 SSC 的等级划分,是非常必要的。由此, NRC 颁布了 10CFR50.69^[1],《核电站构筑物、系统及设备的风风险指引处理》。此规定允许业主可以根据风险指引的思想来调整目前对核电站设备的“特殊处理要求”,可以免除某些低风险重要设备的一些不必要的“特殊处理要

求”,降低生产管理负担。要达到此目的,需要利用风险指引的思想来评价设备的风险重要性等级,以确定出哪些设备是有可能可以降低其“特殊处理要求”的,即风险指引的设备分级。

虽然此分级思想尚处于发展的初级阶段,但业内对其发展前景持肯定态度,尤其是在美国。美国核管会陆续颁布了一系列的法规和导则,与此同时,对此分级思想持积极态度的业主也进行了一定的试点研究。Nuclear Energy Institute(以下简称 NEI)为满足业主的需求,制定了相应的执行导则 NEI-00-04^[2]。在为数不多的试点研究中,美国 South Texas 核电站(以下简称 STP)^[3]和西屋业主协会(以下简称 WOG)^[4]进行的试点研究最为深入完善。本文将会在下面内容中对此 2 个试点研究进行讨论。

2 传统分级与风险指引分级

核电站目前通用的传统 SSC 分级是基于核电站系统的三大安全功能的,即评价核电站的 SSC 在设计基准事故状态下是否能够维持以下三大安全功能: 维持反应堆压力边界的完整性; 能够安全停堆并维持停堆状态; 能够阻止或缓解可能引起

收稿日期: 2006-04-26

作者简介: 赵 军,男,清华大学核能与新能源技术研究院,在读博士生,主要研究方向为核科学与技术;

E-mail: zhao-j01@mails.tsinghua.edu.cn

放射性释放的事故。在这种思想下,核电站的 SSC 被划分为“安全相关”和“非安全相关”2个等级。属于“安全相关”的设备需要执行“特殊处理要求”,比如质保、环境鉴定以及技术规范要求等。这样粗略的规定,对设备的处理要求,在一定程度上会加重对一些“安全相关”但并非安全重要的 SSC 的管理负担;同时又可能会忽视一些“非安全相关”但安全重要的 SSC 对电站风险潜在的贡献。

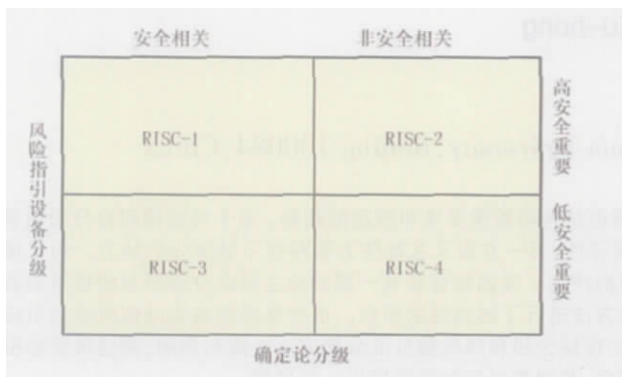


图 1 风险指引的安全分级

Fig. 1 Risk informed safety classifications (RISC)

- 注: 1. RISC-1 是指安全相关,且具有高风险重要性的 SSC;
2. RISC-3 是指安全相关,但仅有低风险重要性的 SSC;
3. RISC-2 是指非安全相关,但具有高风险重要的 SSC;
4. RISC-4 是指非安全相关,且仅有低风险重要性的 SSC。

风险指引分级的目的就是要调整受“特殊处理要求”规定束缚的 SSC 的范围,以便核电站将管理重点及资源集中于真正对安全重要的 SSC 上,以提高核电站运行的安全性,同时降低管理负担,提高电站运行的经济性。如图 1 所示。

由图 1 可知,风险指引分级并非取代现有的传统分级,而是根据设备风险重要性的高低,将现有分级中的“安全相关”和“非安全相关”这 2 个等级进一步细分,以确定出真正对核电站安全有重要贡献的 SSC。这里的高风险重要性是指如果设备损坏或功能劣化,会对纵深防御、安全裕度或风险带来明显的影响。对于图 1 中属于低风险重要的(即 RISC-3 和 RISC-4)SSC,可以尝试降低某些特殊处理要求,用普通的工业标准来要求。但是应该注意,虽然它们不需满足如高风险重要 SSC 那样额外的裕度、质保等方面的要求,但仍必须要确保这些 SSC 能完成它们的设计基准功能。

3 风险指引设备分级的方法

在风险指引的 SSC 分级提出后,少数核电站进行了一定的试点性研究,其中以美国 STP 核电站进行的研究最全面和深入。在此过程中,他们形成了一套系统化的、可操作的分级流程;另一方面,NEI 也根据其业主的需求制定了一套系统化的分级流程导则 NEI-00-04。目前这 2 套分级流程是风险指引分级研究领域较为完整且具有可操作性的指导方法。上面所提到的分级均是针对构筑物、系统和设备(SSC)的,但现阶段进行的一些试点研究中暂时只是针对设备,我们在本文的分析也是针对单纯的设备而言的。下面将简单介绍这 2 套分级流程。

3.1 NEI-00-04 的分级流程^[9]

NEI-00-04 是 NEI 为满足业主需求颁布的风险指引分级执行导则。此方法流程如图 2 所示。它从风险和纵深防御 2 个角度来综合评估设备的风险重要性,包括下面 3 个步骤。

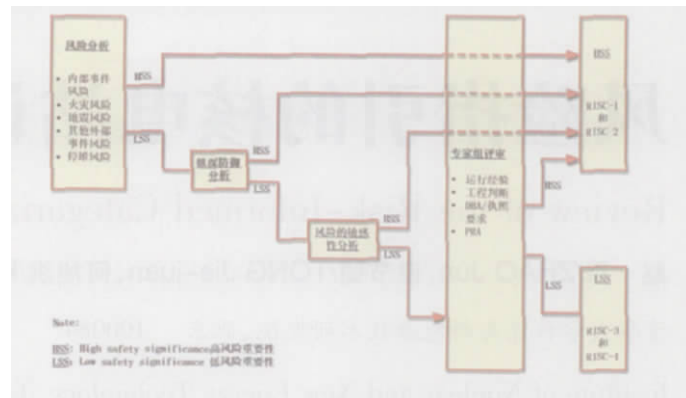


图 2 NEI-00-04 风险指引设备分级过程

Fig. 2 Risk-informed categorization process of NEI-00-04

3.1.1 定量风险分析过程

即利用量化的 PSA 信息对设备风险重要性予以评估,确定模型中属于高风险重要(HSS)和低风险重要(LSS)的设备。此过程是利用设备的 2 个重要度 Fussell-Vesely (FV) 和 Risk Achievement Worth(RAW)准则来评估设备的风险重要性的,只要设备的这 2 个重要度满足 HSS 的标准,则将它们确定为 HSS 的设备。设备重要度的计算应该分别考虑堆芯损坏频率(CDF)和早期大量释放频率(LERF)。

3.1.2 纵深防御分析过程

为确保分级结果的完整性及保守性,要从更为广泛的纵深防御角度来进一步考量那些在 PSA 模型中未包括的及在定量风险分析中确定为 LSS 的设备的安全重要性。此过程是以一系列基于设计基准的定性准则为基础的,以确保系统和设备的冗余度以及多样性。这个评估过程要根据设备功能,对设备以下方面的风险重要性进行评估: 缓解堆芯损伤; 安全壳早期失效/旁通; 保证安全壳长期完整性。如果设备的某个功能在纵深防御的分析过程中被认为是风险重要的,则应该建议将其划分为 HSS。

3.1.3 敏感性分析

对于经过上述 2 个步骤确定为 LSS 的设备,应进行敏感性分析,以确保对 LSS 设备降低处理要求可能带来的影响是在可接受的范围内。

3.2 STP 的分级流程^[9]

STP 的分级方法包括 2 个步骤: 利用 PSA 信息的分级过程; 狭义确定论的分级过程。此处之所以采用“狭义确定论分级”这个名称,是为了区别于传统意义上的确定论分级,因为这个过程是基于电厂专家组及工作组的确性判断以及各方面的经验,在此仅作为分级流程的一部分。这个方法的具体实施过程包括两部分: 对在 PSA 模型中包含的设备,分别利用上述 2 个步骤进行分级,取两者评估结果中较高者作为其分级结果; 对在 PSA 模型中不包含的设备,只进行狭义确定论的分级,此结果就作为其分级结果。此分级的大体流程如图 3 所示。

1) 利用 PSA 信息的分级过程。此过程同样是利用设备的 FV 和 RAW 重要度作为设备安全重要性的筛选准则。

2) 狭义确定论的分级过程。此过程通过评估设备所支持的功能对下面所述事项的贡献程度来评价设备的安全重要性: 此功能是否参与缓解事故或瞬态; 在应急操作规程中是否需要此功能; 此功能的丧失是否会引起别的风险重要系统的失效; 此功能的丧失对于停堆或工况转换是否有安全重要性; 此功能的丧失能否直接引起另一个始发事件。

同样的,STP 的分级流程要求对分级结果中定为 LSS 的设备进行敏感性分析,从总体上来讲,STP 的分级流程与上述 NEI-

00-04 的分级流程并没有本质上的区别,只是在操作的过程中存在一定的区别。

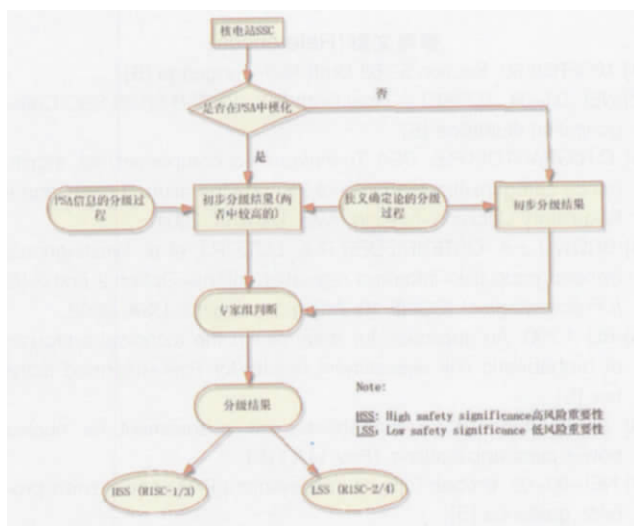


图3 STP 风险指引设备分级过程

Fig. 3 Risk-informed categorization process of STP

3.3 分级方法小结

综上所述,风险指引的设备分级过程综合了概率风险信息和纵深防御的观点,通过系统化的流程,对设备的安全重要性进行综合的评估。STP和NEI-00-04的2套分级流程没有本质上的区别,它们都有如下特点: 分级流程在逻辑上是合理的,在方法论上是完善的,综合考虑了所有可能情况下设备对核电站风险的影响,使分级结果在保持足够保守性的前提下趋于合理; 利用量化的PSA信息,将设备对电站风险的重要性量化地表达出来,利于业主及审查人员更直观地理解设备的重要性; 流程考虑了设备在任何可能情况下的风险重要性,通过层层推进的方式,确保结果的保守性和安全裕度。

上述2套分级流程在执行过程中对每个步骤都确定了明确的标准和规范,因此具有较好的可操作性,并能在一定程度上确保结果的一致性。从二者的执行过程中可以得出,NEI-00-04分级流程的可操作性要强于STP的流程。这是因为: STP分级流程的PSA信息分级步骤中对设备共因失效的处理不够合理; STP的分级流程中对纵深防御评估过程的要求和标准较为模糊,需要专家主观判断的比重较大。相比而言,NEI-00-04的操作流程更全面、细致,便于操作。

此外,在进行风险指引设备分级中还应注意下面2个问题。

1) 分级流程的一个重要组成部分是量化的PSA信息,因而它对执行此分级流程的核电站PSA信息的可靠性和准确性有较高的要求,即对电站的PSA水平要求较高。为此,NRC颁布了导则RG1.200^[9],从总体上明确适用于风险指引分级的PSA模型的质量要求,并通过美国ASME规范^[10]和PSA同行评审导则NEI-00-02^[7]来规范PSA的各组成部分应该达到的具体要求。从原则上讲,适用于风险指引分级的PSA模型应达到ASME规范中的Capability Category II或者达到NEI-00-02中的等级3。

量化的PSA信息分级过程要对设备在内部事件、火灾、地震及其他外部灾害(如台风、水淹等)以及停堆工况下的风险进行评估,以确定设备的风险重要性。严格地说,电站的PSA模型应有能力评估上述的各类风险,即电站PSA应达到Level 2水平,包括满功率和停堆状态下的内部事件PSA模型以及火灾、地震等外部事件PSA模型。考虑到并不是所有电站的PSA模型都能达到如此全面的水平,因此在评估过程中,除了对内部事件必须

采用PSA方法外,其他情况下的评估也可以采用相应的保守评估方法(如,Fire Induced Vulnerability Evaluation-FIVE、Seismic Margin Analysis-SMA等)来进行。满功率状态下的内部事件PSA模型是进行此分级过程最基本的要求。

2) 风险指引的分级流程融合了风险和纵深防御的观点,需要对核电站的设备、系统及其运行等各方面知识背景的支持,因此需要多方面的专家及工作人员共同协作才能完成。

总之,在这些试点经验基础上发展出来的上述分级方法,已具备了很好的系统性、完整性和较高的可操作性。更多核电站可以根据此方法流程进行适当的试点研究,以推动此项技术的发展成熟。

4 案例分析

风险指引设备分级思想在国际上尚处于发展的初期阶段,因而目前国际上进行此分级的试点研究并不多,其中美国的STP及WOG在选定核电站进行的试点研究比较深入完善。在下面的内容中将介绍一些目前国际上进行的此分级的试点研究。

4.1 STP 核电站的案例研究^[9]

STP核电站的风险指引设备分级研究开始得较早,也是目前业内对此方法研究最全面的。此研究将核电站的32个系统、4万多个设备进行了风险指引的设备分级,并向NRC提交了多项豁免申请,其中部分获得批准。分级结果如表1所示。由表1得到,75%的“安全相关”设备被划分为低安全重要性,而这一部分有可能可以降低其处理要求以增加电站的经济性;另一方面仅有1.4%的“非安全相关”设备被划分为高安全重要性,需要对这部分设备提高其管理要求,以提高电站运行的安全性。虽然由于STP核电站系统本身设计的冗余度较大,可能会使可降低处理要求的设备数量较多,但是表1中的结果可以体现出风险指引设备分级的意义所在。

表1 STP 案例分析结果
Tbl. 1 Results of STP case study

传统分级	风险指引分级	数量	所占百分比(%)
安全相关	RISC-1	4 150	24.3%
	RISC-3	12 939	75.7%
非安全相关	RISC-2	381	1.4%
	RISC-4	27 571	98.6%

4.2 WOG 的案例研究^[4]

WOG在Surry电站和Wolf Creek电站也进行了类似的试点研究。在此研究中,选择Surry电站中的化容系统(CVC)和主给水系统(FW)及Wolf Creek中的安全壳喷淋系统(CS)和常规服务水系统(NSW)作为试点系统。其中CVC和CS系统在传统确定论分级中为安全相关的,而FW和NSW系统为非安全相关的。分级的结果如表2所示。从表2中可以得出,此案例中分级结果的趋势与STP案例分级结果相一致,进一步证明了风险指引分级可能带来的益处。

表2 Surry Unit 1 和 Wolf Creek 分级结果
Tbl. 2 Results of Surry Unit 1 and Wolf Creek cases study

传统 分级	风险指引 分级	数量					
		Surry Unit 1 电站				Wolf Creek 电站	
		能动设备		非能动设备		CS	NSW
安全	RISC-1	356(52%)	61(20%)	74(29%)	6	10(6%)	0
相关	RISC-3	329(48%)	249(80%)	183(71%)	0	163(94%)	0
非安全	RISC-2	33(17%)	0	0	26	0	182(42%)
相关	RISC-4	157(83%)	218	24	0	48	251(58%)

4.3 其他案例分析

在除了美国核电站之外的少数电站也进行了类似的案例分析, 相比而言, 他们进行的研究不像前两者那么全面, 而是针对风险指引评价在某个特定方面的应用。

1) 日本压水堆核电站 PCCV^[9]进行的试点研究的目的是, 是利用设备重要度来确定安全重要的设备。此研究是以高压安注系统, 针对在 PSA 模型中模化的设备, 利用设备的 FV 和 RAW 重要度来判定设备的安全重要性, 方法与前面二者类似, 但在 FV 重要度的筛选准则的选取上存在一定的差异。

2) 英国核电站 Sizewell^[10]利用风险指引分级的思想对电站的电磁阀进行了试验性的分级, 并根据此分级对此类阀门的维修等工作提出一定的意见。

3) 韩国核电站 Ulchin^[10]对其 3 号机组的逆止阀进行了风险指引的分级, 此分级研究是针对此类阀门在线维修而进行的。

综上所述, 国际上对风险指引设备分级的试点研究并不多, 在以后的发展中还将需要一段较长的时间, 但是从上述的案例中我们可以看到, 此分级思想对核电站经济性和安全性的贡献是明显的, 因而此分级思想发展的前景是光明的。

5 结论

从前面的讨论中我们可以得出, 由于基于传统分级思想的法规标准在很多方面过度的保守性, 使得利用风险指引的观点来重新评价设备的安全重要性愈显必要。美国核管会也致力于推动此分级思想的发展, 核管会发布的法规导则、业主代表制定的方法执行导则以及业内电站进行的试点性研究, 都将极大地推动此分级思想的发展。

由于此分级思想对核电站各方面要求较高, 以及考虑到各国国情的差异, 使得此思想仅处于发展的初期阶段。可以预见, 鉴于中国核电的基础、各个核电站 PSA 发展水平的差异、监管部门的

政策及其推动的积极性, 若要推动此分级思想在我国核电站的应用, 还需要在多方面对其进行研究。

参考文献 (References)

- [1] 10CFR50.69. Section 50.69 Draft Rule Language [S].
- [2] NEI- 00- 04 (DRAFT - Final Draft R2). 10 CFR 50.69 SSC Categorization Guideline [S].
- [3] C.R.GRANTOM.P.E. PSA Techniques in component risk significance categorization[C]// Use of PSA in Operation of NPPs and in Regulatory Decision- Making. Kyia, Ukraine, 2004.
- [4] BROWN J A, OSTERRIEDER R A, LUTZ RJ, et al. Westinghouse owners group risk- informed regulation efforts- Option 2 and 3 [C] // Proceedings of ICON 10, Arlington, Virginia, USA, 2002.
- [5] RG 1.200. An approach for determining the technical adequacy of probabilistic risk assessment results for Risk- Informed activities [S].
- [6] ASME standard for probabilistic risk assessment for nuclear power plant applications. (Rev.14A.) [S].
- [7] NEI- 00- 02. probabilistic risk assessment(PRA) peer review process guidance [S].
- [8] UCHIDAT. The trial identification of safety significant components with risk importance measures [C]. //The 8th Japan- Korea PSA Workshop, Tokyo, Japan, 2004.
- [9] BROOK K. The use of risk informed decision making in the operation of sizewell B [C]// The Application of Probabilistic Safety Analysis, Cape Town, South Africa, 2002.
- [10] DAEIL KANG. Pilot study on the applications of risk- informed in- service testing method to check valves for ulchin unit 3[C]// The 7th Korea- Japan PSA Workshop, Jeju- Island, Korea, 2002.

(责任编辑 李慧政)

·科技智力游戏·

轻松一刻——九宫填数

该游戏的填数规则为: 在 9×9 的大九宫格内, 出题者已给出若干数字, 其它宫位的数字空留, 需要读者根据逻辑推理填写剩下空格里的数字;

填满数字的大九宫里, 数字之间的关系必须满足: 每一行与每一列都有 1 到 9 的数字, 每个实线所标 3×3 的小九宫格里也有 1 到 9 的数字, 且每个数字在每行、每列及每个小九宫格里只能出现 1 次, 即既不能重复也不能缺少。答案请见下期。

上期答案

上期 2 个九宫格答案相同, 如下所示。

标有相同底色的 2 对数字, 每行中 2 个数字同时调换位置都可以。



2	6	4	3	8	7	5	9	1
8	3	9	4	5	1	7	6	2
7	1	5	2	6	9	3	4	8
5	4	8	9	2	3	1	7	6
1	7	2	6	4	5	9	8	3
3	9	6	7	1	8	4	2	5
6	2	7	5	3	4	8	1	9
4	8	3	1	9	2	6	5	7
9	5	1	8	7	6	2	3	4

(供稿 李建才 责任编辑 李向荣)