

核电站电气柜地震易损性分析的一般方法 概述与相关问题讨论

尹益辉^{1,2}, 万强^{1,2}, 吴瑞安^{1,2}

(1.中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2.工程材料与结构冲击
振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 基于若干实际评估的经验, 概述了核电站安全评估中对电气柜进行地震易损性分析的一般方法, 包括获取分析的前提条件、对电气柜进行保守确定性分析以辨识其潜在失效模式、对最可能失效模式进行确定性分析以确定危险点、以及对各危险点进行不确定性失效分析以获得电气柜的地震易损度等。然后从评估经验的角度, 介绍了评估分析中遇到的一些问题及其处理方法, 包括对评估前提条件缺失的解决方法、对确定性和不确定性参数值的取定方法、以及对电气柜螺栓连接与焊接连接的比较。这些方法有助于评估分析人员更加容易地开展相关评估工作, 并合理解决评估中可能出现的问题。

关键词: 核电站; 核安全评估; 电气柜; 地震反应谱; 地震易损性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.014

中图分类号: X946; F416.23

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0070-04

General Method and Related Issues of Analysis on Seismic Fragility of Electronic Control Cabinet in Nuclear Power Plant

YIN Yi-hui^{1,2}, WANG Qiang^{1,2}, WU Rui-an^{1,2}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Based on practical assessments, the general method of analyses on seismic fragility of the electronic control cabinets were introduced which consist of getting the premise conditions of analysis, performing qualitatively determinacy analyses to realize the prospective failure modes, performing determinacy analyses to the most risk failure mode to determine the most risk part, and obtaining the seismic fragility degree of the most risk electronic control cabinet through the non-determinacy analysis. Then as experience, some encountered issues and related dealing methods were discussed, including how to replenish the lost premise conditions and choose values of the determinacy and non-determinacy parameters. Meanwhile, the differences between bolt connection and weld connection of the electronic control cabinets were compared in the assessment. These methods made the assessment easier to be carried out and related issues easier to be solved.

KEY WORDS: nuclear power plant; nuclear safety review; electronic control cabinet; seismic response spectrum; seismic fragility

服役一定年限后, 核电站能否继续运行需要综合评估, 以保证既运行安全, 又充分发挥其服役潜能^[1]。

在核电站的安全评估中, 包括对各种配电盘和电气柜的地震易损性进行分析, 如应急配电盘、反应堆

保护与控制系统机柜等，以掌握这些设备在地震中能否正常发挥作用，能否达到防控核事故的目的。笔者团队近年来对某核电站的一些配电盘和机柜进行了地震易损性分析，总结分析前和分析过程中的各种情况，有必要对分析的一般方法予以归纳，以便为今后的分析人员提供更加直接而实用的方法。同时对分析中遇到的问题进行了讨论，以便为今后的类似分析提供借鉴。

1 一般方法概述

1.1 基本流程

对电气柜地震易损性分析的基本流程如图1所示，包括获取分析的前提条件、进行保守确定性分析以辨识潜在的失效模式、对最可能失效模式进行确定性分析以确定危险零部件、对危险零部件进行不确定性分析、最后获得电气柜的地震易损度。

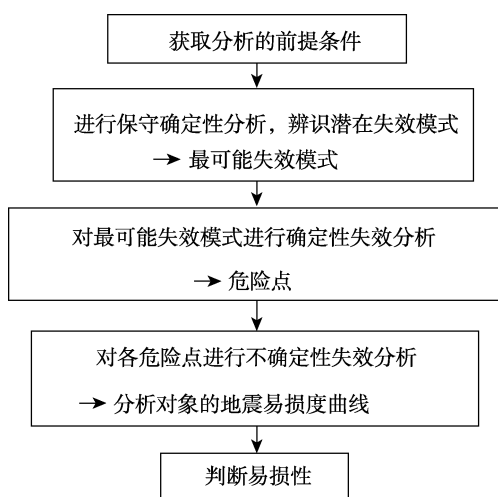


图1 电气柜地震易损性分析基本流程

1.2 主要内容与相应方法

1.2.1 前提条件与确定方法

分析前，需获取并消化分析要用到的各种前提条件。从力学分析角度，这些条件可分为四类：一是电气柜及其安装在上面的电子元器件的结构几何尺寸与质量分布，以及电气柜与地板或楼板相连接的紧固连接件的几何尺寸；二是电气柜及其与地板或楼板相连接的紧固连接件的材料参数；三是电气柜在厂房中的安装位置与与楼板的连接固定工艺参数；四是安装楼层标高的地震设计谱，包括不同阻尼比时水平和垂直方向的安全停堆地震（SSE）反应谱——加速度-频率曲线。

这些前提条件越准确、充分，评估误差就越小。一般情况下，通过查阅和消化核电站的设计与建设文件资料及其相关资料，就可以确定这些分析前提

条件。

1.2.2 保守确定性失效分析

在地震条件下，电气柜不能发挥正常功能即为失效。以某配电盘为例，其作用是向核电站应急厂用电动机和变压器供电，其发挥正常功能的前提就是其中的电路和电器不损坏，能够正常工作。在地震条件下，当电气柜发生摇晃时，可能引起电路扯断或内部电子元器件之间的接触松动/松脱；当电气柜倾倒时，还可能引起电器摔坏。同时，这些情况都可能使电气柜失去正常功能，需要逐个予以保守确定性分析。

1) 电子元器件之间的接触松动。地震载荷下电气柜内部电子元器件之间的接触松动，取决于各种电子元器件的电气参数与力学控制参量之间的关系。一旦获得了电气参数与力学控制参量之间的关系，便可以通过分析电气柜的力学响应而确定该种失效模式。事实上，由于电气柜内部功能组件多、构成复杂，全面建立电气参数与力学控制参量之间的关系是很难的。鉴于此，目前通行的做法是将电气柜的振动加速度响应分析与其抗振动能力鉴定试验相结合进行校核，通过比较分析结果和试验结果评估该种失效模式。

2) 电气柜摇晃。一般来说，核电站电气柜固定部分为全钢形式的格架加蒙皮结构，底部和楼层上的锚固铁件通过地脚螺钉或焊接固定，电气柜结构在宽度方向和深度方向的横向摇晃受到与整个电气柜底板接触的楼层地板的约束，因此电气柜整体刚度相当大，地板对电气柜摇晃的限制相当强。因此，只要连接部位不破坏，电气柜不倾倒，则电气柜的摇晃位移就是有限的。与之相应，进、出电缆在电气柜上方的走线槽和在底板下方的走线地沟中都预留了足够的长度，在电气柜晃而不倒的情况下，不会扯断电线或扯脱连接接头。因而，对电气柜摇晃导致失效的模式无需进行力学分析评估。

3) 电气柜倾倒。电气柜倾倒的前提是其某个受拉力最大的地脚螺钉或焊缝与预埋铁块一起从楼层地板中拔出，或受力最大的地脚螺钉或焊缝发生拉-剪断裂，或电气柜底板在螺钉头-垫片-压板作用下发生局部断裂、洞穿，以至螺头-垫片-压板从底板断裂孔中脱出。就确定性分析而言，这三种方式分别取决于预埋铁件抵抗从楼层混凝土地板中拔出的强度安全系数、螺钉和底板上螺孔邻近区域的强度安全系数。若在给定地震载荷下，这三种情况的任何一种发生，则电气柜倾倒就难以避免。因此，该种失效模式是电气柜地震易损性分析的重点。针对该种失效模式，通过确定性分析，找出安全裕度最小的零部件——危险零部件，然后对其进行进一步的不确定性分析，进而获得电气柜的地震易损性。

通过上述保守确定性失效分析可知，导致电气柜功能失效的潜在结构失效模式有两种：一是电气柜内

部电子元器件之间的接触松动/松脱；二是电气柜倾倒。一般来说，在地震易损性分析中都需要考虑这两种失效模式。由于没有相关试验结果，文中不对电子元器件之间的接触松动模式进行讨论，仅讨论电气柜倾倒这一失效模式。

1.2.3 确定性分析内容与方法

在地震载荷下，当电气柜受到的倾覆力矩大于极限值时，电气柜就会倾倒。电气柜倾倒的具体分析内容和方法包括：

1) 结构模态计算。根据 1.2.1 小节确定的第一种前提条件，建立分析对象的结构有限元模型，开展有限元计算，获得电气柜宽度、厚度和高度三个方向的模态——基本振型和频率。

2) SSE 地震载荷下结构的加速度响应。根据电气柜三个方向的基本频率，查阅 1.2.1 小节确定的第四种前提条件中的相关图表^[2]，得到 SSE 地震载荷下的加速度值。

3) SSE 地震载荷下电气柜及其紧固连接件应力强度的有限元计算。对分析对象的结构有限元模型，沿竖直方向和相互正交的两个水平方向同时施加 2) 中确定的对应加速度载荷，其中竖直方向还要施加竖直方向的自重，计算电气柜及其紧固连接件的应力。根据计算结果找出强度裕度最小的零部件，将其作为强度评估的关键件——危险零部件。

1.2.4 危险零部件的不确定性分析与地震易损度评估方法

对 1.2.3 小节确定的危险零部件进行不确定性分析和易损度评估，需要考虑各种不确定性和随机性因素，评估相应的影响因子。

首先根据文献[2-3]，给出危险零部件最大等效应力中值 $\bar{\sigma}_{e\max}$ 和标准差 $\beta_{\sigma e}$ 计算公式：

$$\bar{\sigma}_{e\max} = f_{ss} f_{L/A} f_f f_d f_{mc} f_m (SF) \sigma_{e\max} \quad (1)$$

$$\beta_{\sigma e} = \sqrt{\beta_{ss}^2 + \beta_{L/A}^2 + \beta_f^2 + \beta_d^2 + \beta_{mc}^2 + \beta_m^2} \quad (2)$$

式中： f_{ss} 为地震响应谱谱形差异因子，随机变量； $f_{L/A}$ 为最大输入与平均输入比例因子，随机变量； f_f 为频率不确定性影响因子，随机变量； f_d 为阻尼不确定性影响因子，随机变量； f_{mc} 为模态组合随机性因子，随机变量； f_m 为模型不确定性影响因子，随机变量； SF 为以地面加速度均方根值作为参考计算载荷相比于以地面峰值加速度 (PGA) 作为参考计算载荷的放大因子； $\sigma_{e\max}$ 为确定的危险零部件的最大等效应力。式 (1) 和式 (2) 中，各随机变量的均值和标准差可参照相关文献中的图表^[4]，并结合分析对象逐一确定。当直接采用楼层设计谱时，取 $SF=1$ 。

考虑危险零部件的材料屈服强度折减系数 α_1 、特征几何尺寸 (如螺钉横截面有效应力区面积) 折减系数 α_2 ，则危险零部件的有效屈服强度均值为：

$$\bar{\sigma}_s = \alpha_1 \alpha_2 \sigma_s \quad (3)$$

式中： σ_s 为材料屈服压力。

根据相关文献或通过材料性能实测，取定材料屈服应力的随机因子 $\beta_{\sigma_s R}$ 和不确定性因子 $\beta_{\sigma_s U}$ 。

由式 (1) 和式 (3) 得到危险零部件等效应力中值强度因子：

$$\bar{F}_s = \frac{\bar{\sigma}_s}{\sigma_{e\max}} \quad (4)$$

同时由式 (2) 得到与式 (4) 相应的随机因子 β_R 和不确定性因子 β_U 。

再由式 (4)，得到危险零部件能够承受的峰值地面加速度中值能力：

$$\bar{PGA} = \bar{F}_s \times 0.2g \quad (5)$$

进一步由易损度计算公式：

$$f' = \Phi \{ [\ln(PGA / \bar{PGA}) + \beta_U \Phi^{-1}(Q)] / \beta_R \} \quad (6)$$

计算并绘制置信度 $Q=95\%$ 、 $Q=50\%$ 和 $Q=5\%$ 水平下电气柜的地震易损度曲线，如图 2 所示。

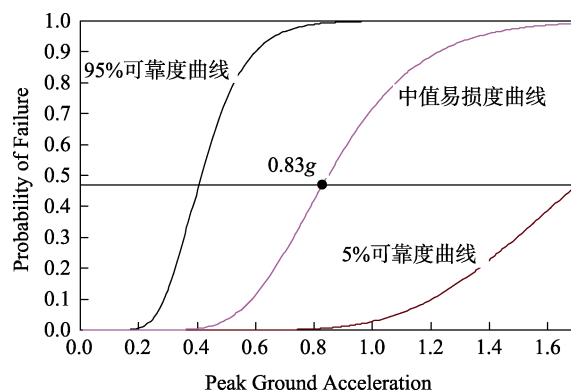


图 2 危险零部件地震易损度曲线

基于如图 2 所示曲线，就可得到电气柜能够承受的峰值地面加速度中值能力和在地震载荷的地面峰值加速度为 $0.2g$ 、置信度分别为 95% 和 50% 情况下电气柜危险零部件的失效概率，也就是电气柜的失效概率。如图 2 中某电气柜能够承受的峰值地面加速度中值能力为 $0.83g$ ，在地震载荷的地面峰值加速度为 $0.2g$ 、置信度分别为 95% 和 50% 情况下的失效概率分别为 0.0056 和 2.40×10^{-7} 。

2 易损性分析相关问题讨论

近几年，笔者团队采用前述一般方法对某核电站中多组配电盘、柴油机控制和保护系统机柜、反应堆保护与控制系统机柜的地震易损性进行了分析，给出了例如图 2 所示的各评估分析对象的地震易损度曲线，达到了评估的目的。在评估分析中，也遇到了一些问题，并通过对问题的解决，得到了一些体会。下面对这些问题予以讨论，以供今后的评估借鉴。

2.1 对评估前提条件缺失的解决方法

由于核安全评估都是针对已服役较长时间的设备开展的,因此,评估的前提条件需要从较早时期的设计和建设资料中获取。由于年代久远等因素导致的资料缺失等问题,从原有设计资料中不一定能够获得全部而准确的前提条件。如在笔者团队的评估分析中,出现了缺乏某个场地的地震载荷数据、评估对象的几何尺寸数据和内部质量分布数据等问题。在此情况下,为了获得准确的前提,笔者团队采用了两种方法:一是从原有设计、分析资料中寻找,对这些资料中的示意图进行量测和按比例反算,再根据这些资料中的分析结果,结合再现性的参数化数值建模和分析,反演确定所缺数据;二是到现场进行实测,补充确定所缺数据。通过这两种方法,补充获得了缺乏的安装位置载荷参数和结构几何与质量分布参数,如期完成了评估。

在笔者团队对某个场地电气柜的评估分析中,出现过漏掉尺寸较小、易损性相对大的电气柜,而将尺寸较大、易损性相对小的电气柜选作评估对象的情况,导致评估结果与核电站方的预期不一致的问题。后来通过重新了解该场地电气柜的布置情况,重新确定尺寸较小的电气柜为评估对象,最终给出了有效的评估结果。

2.2 对确定性和不确定性参数的适当加严处理

式(1)~(3)的计算涉及多个随机和不确定性参量,它们的取值直接影响评估结果。为了提高评估准确性,必须尽量考虑实际情况,对随机和不确定性参量选取符合实际的值。在笔者团队的评估中,除借鉴相关文献中的取值方法外,还结合所获得的分析前提条件的准确程度和结构有限元分析的准确程度,对这些随机和不确定性参量进行取值,并适当加严处理,如对电气柜地脚螺钉的材料屈服强度考虑了较大的折减系数 0.9、横截面有效应力区面积也考虑了较大的折减系数 0.8。在这种加严处理后,评估的结果是电气柜足够安全时,则直接认可,否则就需按更接近实际的情况重新取值和评估。同样,笔者团队的评估结果为“合格”,故没再放松这些随机和不确定性参量取值而重新开展不确定性强度分析和评估。

2.3 螺栓连接与焊接连接的比较

在评估实例中,电气柜与预埋于楼板中的铁件既有螺栓连接,也有焊接,如图 3 所示。图 3 中,前侧两个部位有螺栓连接时就无焊接,有焊接时就无螺栓连接,后侧也一样。在其他条件相同的情况下,比较采用螺栓连接与焊接时电气柜强度及地震易损性的差别,有助于引起今后分析人员的注意和今后对电气柜安装方式的优化改进。



图 3 电气柜底板与锚固铁件的连接示意图(仰视图)

在某个电气柜的地震易损性评估中,根据电气柜与锚固铁件连接部位的支反力计算结果和连接参数,取 M12 连接螺栓的螺纹螺栓应力截面积 $A_s=84.3 \text{ mm}^2$ 、焊缝应力截面积 $A_w=210.0 \text{ mm}^2$ 。通过计算,得到该电气柜底板四个固定部位全焊接连接时连接焊缝的最大等效应力为 54.99 MPa,前面两个部位焊接+后面两个部位螺栓连接时连接焊缝的最大等效应力为 64.29 MPa,连接螺栓的最大等效应力为 58.55 MPa。可见,当采用全焊接时,由于焊缝受力面积比螺栓受力面积大,焊接连接抵抗倾覆弯矩的力臂也比螺栓连接的大,因此,焊缝的最大等效应力要比采用焊接+螺栓连接方式的小一些。因此,对于电气柜的如此连接方式,在地震易损性分析时,应该特别关注焊接+螺栓连接电气柜中焊缝部位的强度及其控制的地震易损性问题。而就连接方式来说,在工艺允许的条件下,应该采用全焊接或全螺栓连接的方式。对于全螺栓连接的情况,由于螺栓材料的屈服极限都大于焊缝材料的,螺栓的安全系数相对也不会小。

3 结语

文中概述了核电站安全评估中对电气柜进行地震易损性分析的一般方法,包括获取分析的前提条件、对电气柜进行保守确定性分析以辨识其潜在失效模式、对最可能失效模式进行确定性分析以确定危险点、以及对各危险点进行不确定性失效分析以获得电气柜的地震易损度等。讨论了分析中应注意的问题和相关的处理方法,包括对评估前提条件缺失的解决方法、对确定性和不确定性参数值的取定方法、以及对电气柜螺栓连接与焊接连接比较。文中的方法有助于评估分析人员更加容易地开展相关评估工作,并合理解决评估中可能出现的问题。

参考文献:

- [1] 张家倍,李明高,马琳维,等.核电厂抗震安全评估[M].上海:上海科学技术出版社,2013.
- [2] BENJAMIN R J, ASSOCIATES I. Methodology for Developing Seismic Fragilities[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1994.
- [3] REED J W, KENNEDY R P, BUTTEMER D R, et al. A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1991.
- [4] Electric Power Research Institute. Seismic Fragility Application Guide[K]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1994.