

ICS 27.120.20

CCS F 65

团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X

代替 T/CMES XXXX—201X

地震条件下核电厂冗余系统失效相关性及 概率分析方法

Failure dependency and probability analysis methods of
redundant system of nuclear power plant under seismic
conditions

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

前 言	III
引 言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 地震危险性分析	3
4.1 地震危险性曲线	3
4.2 地震动参数范围	5
5 设备易损度评估	5
5.1 易损度定义	5
5.2 失效模式与失效准则	5
5.3 抗震能力与易损度	6
6 系统失效概率模型	7
6.1 单元失效相关现象与机理	7
6.2 系统失效概率模型	8
7 地震条件下冗余系统失效概率评估方法	9
7.1 地震条件下冗余系统失效概率模型	9
7.2 考虑置信度的系统失效概率计算公式	10
附 录 A（资料性附录） 地震条件下冗余系统失效概率评估示例	11
参考文献	15

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：东北大学、苏州热工研究院有限公司、雁栖湖基础制造技术研究院（北京）有限公司、沈阳工程学院。

本文件主要起草人：谢里阳、何昭凯、黄乾、杨建峰、郭建兵、李琼哲、周舟、谭坤、马静娴、尹晓伟、张瑞金、钱文学、王雷、吴宁祥。

本文件首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

核电厂通过构建纵深防御屏障与冗余设计等多层级防护机制实现风险控制。国际原子能机构（IAEA）在《核电厂安全设计要求》中明确指出，安全分析须考虑自然事件引发的系统多重失效效应。地震动因其显著的不确定性，导致有关设备之间的失效相关性效应，降低冗余系统的安全保障效果。因此，准确评估地震条件下核电设备的失效概率和可靠性，是核电厂概率安全分析的重要内容之一。

由于地震发生的不确定性，受地震影响的各设备存在失效相关性效应，冗余系统中的多台设备同时发生失效的概率会明显高于各设备失效概率之积。传统核电厂概率安全评价（Probabilistic Safety Assessment, PSA）中采用的设备独立失效假设，无法表征地震载荷下系统中各设备之间的失效相关性。因此，建立地震条件下冗余系统失效概率精确分析方法，量化地震动参数与设备易损性及其相互作用效果，对提升核电厂地震条件下的概率安全评价（SPSA）的有效性，实现核设施精准安全评估具有重要意义。

本文件提供地震条件下冗余系统失效概率及失效相关性分析的统一技术框架，规范地震条件下多设备同时失效概率的量化评估方法与流程，为核电厂开展地震概率安全评价提供技术方法支撑。

中国机械工程学会石油工程分会

地震条件下核电厂冗余系统失效相关性及其概率分析方法

1 范围

本文件提供地震条件下，由多台设备构成的冗余系统失效概率及其各设备之间的失效相关性分析方法框架，明确有关数据采集、预处理和系统失效概率计算原理与方法。

本文件适用于地震条件下设备失效概率分析，旨在为地震条件下冗余系统失效概率评估提供标准化的分析方法和流程。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 18207.2—2005 防震减灾术语第二部分：专业术语

GB/T 9225—2022 核电厂系统与其它核设施可靠性分析应用指南

NB/T 20557—2019 核电厂概率安全评价数据分析导则

NB/T 20037.1—2017RK, NB/T 20037.5—2021 应用于核电厂的一级概率安全评价 第1部分：总体要求

NB/T 20037—2021 应用于核电厂的一级概率安全评价 第5部分：功率运行地震

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

系统 system

在可靠性/失效概率评估意义上的一类分析对象，是由若干个单元按一定的功能逻辑组合而成的。其基本特征是具有可分解性——一个系统可依据功能逻辑分解出多个构成单元。

3.2

单元 unit

在可靠性/失效概率评估意义上划分的系统的组成部分。

3.3

失效 failure

客体（系统或单元）丧失了预期功能的状态。

3.4

共因失效 common cause failure

共因失效是为了区别在相同载荷环境下服役的系统中两个或多个单元独立失效而提出的一个概念，强调系统中单元失效事件之间存在统计相关性。对于系统中存在共因失效的 n 个单元， n 个单元同时失效的概率不等于各单元失效概率之积。

3.5

串联系统 series system

串联系统是具有特定系统功能-单元功能逻辑关系的一类系统，其属性是系统中任一单元失效都导致系统失效。

3.6

冗余系统 redundant system

包含一个或多个备用单元的系统，以实现更高的功能维持能力和可靠性。特点是即使系统中某个或某些单元发生了失效，系统仍能实现其基本功能。并联系统是一种特殊的冗余系统——系统中全部单元都失效才导致系统失效。

3.7

地震危险性 seismic hazard

反映地震动强度和频次的综合指标。

3.8

地震动参数 seismic ground motion parameters

表征地震引起的地面运动的物理参数，包括峰值加速度、持续时间等。本文件中主要指地震峰值加速度。

[来源：GB 18207.2—2005，6.1.1.1，有修改]。

3.9

地面加速度 ground acceleration

由地震波造成的地面运动的加速度，通常用重力加速度单位 g 表示。

[来源：NB/T 20037.1—2011，2.1.37，有修改]

3.10

地震加速度峰值 peak ground acceleration (PGA)

表征地震作用强弱程度的指标，对应于地震动加速度时程上显示的加速度绝对值的最大值。

3.11

超越概率 probability of exceedance

某厂址遭遇大于或等于给定的地震动参数的地震的概率。

[来源：GB 18306—2015，3.6，有修改]

3.12

年超越概率 annual exceedance probability

某厂址在一年内遭遇大于或等于给定地震烈度值或其它地震动参数（例如加速度峰值）的地震的概率。

3.13

地震危险性曲线 seismic hazard curve

表示某厂址在未来一年内，地震动参数（如峰值加速度）超过不同数值的概率曲线。换言之，地震危险性曲线是以峰值加速度为横坐标，年超越概率为纵坐标的曲线，描述地震动强度（地面加速度）的年最大值超过某一值的概率。

3.14

随机不确定性（用于设备地震易损度分析） aleatory uncertainty (as used in seismic fragility analysis)

表征设备抗震能力的不确定性。

[来源：NB/T 20037.5—2021，3.1.7，有修改]。

3.15

认知不确定性（用于设备地震易损度分析） epistemic uncertainty (as used in seismic fragility analysis)

反映模型和模型参数中对设备抗震能力表征的不确定性。

3.16

易损度 fragility

在给定的灾害输入条件下，构筑物、设备等发生失效的条件概率。

[来源：NB/T 20037.1—2011，2.1.35，有修改]

4 地震危险性分析**4.1 地震危险性曲线**

地震危险性曲线定量描述地震动强度与超越概率之间的函数关系。地震危险性曲线以地面加速度峰值 PGA (Peak Ground Acceleration) 为横坐标，以年超越概率 AEP (Annual Exceedance Probability) 为纵坐标，呈负指数衰减特征。也就是说，随着地震动强度 PGA 的增大，其年超越概率 AEP 呈指数规律递减，这一规律客观反映了地震风险的非均匀分布特性。

基于地震事件时空独立性的平稳泊松过程假设，某地在一年内地震动参数 $A \geq a$ 的超越概率可用下式描述。

$$P\{A \geq a\} = 1 - e^{-\lambda(a)} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

a ：地面加速度峰值（量纲：g）；

$\lambda(a)$ ：地震动加速度峰值超过 a 的地震的年发生频次（量纲：次/年）。

在地震危险性分析过程中，若无可用的地震危险性曲线，则需首先获取一系列对应于不同地震动加速度峰值 PGA 的年超越概率值 $P\{A \geq a\}$ ，以此量化特定厂址的地震危险性水平。然后，对一系列离散数据点 $\{(a_1, P\{A \geq a_1\}), (a_2, P\{A \geq a_2\}), \dots, (a_n, P\{A \geq a_n\})\}$ 进行拟合，构建连续曲

线（方程），即地震危险性曲线（也称超越概率曲线）。

需要说明的是，核电厂概率地震危险性分析（Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA）中，由于地震学与地质学领域的研究视角、理论框架及数据解读存在差异，不同学者提出的地震危险性评估方案（参数体系、震源划方案、衰减关系选择等）往往存在分歧，进而会生成不同的地震危险性数据。这一现象体现了地震危险性评估中的不确定性，为量化该类不确定性对地震危险性评估结果的影响，需基于方案的物理合理性、数据支撑强度及工程实践认可度，为每种方案的结果赋予相应的权重系数（本质上是表征方案可信度的主观概率）。在此情况下，需要针对每个PGA值，对不同方案输出的AEP数据进行统计处理，先获得对应主观置信度下的地震危险性统计数据，然后拟合生成连续的地震危险性曲线族。

假设有10个PGA离散数据点（ $a_1、a_2、\dots、a_{10}$ ），每个数据点对应不同的地震动强度水平。基于5种不同的计算方案，可获取5组与上述PGA离散数据点一一对应的超越概率数据，具体数据关系如表1所示。其中， θ_j 表示第j个方案的权重系数； $F(a_i, \theta_j)$ 表示在第j个方案中，地震动峰值加速度超越 a_i 的概率。

为清晰说明多方案超越概率的处理方法，以不同方案对应于地震动 a_1 输出的AEP数据为例进行具体阐述。假设对应于地震动峰值加速度 a_1 ，各方案得到的超越概率满足 $F(a_1, \theta_3) < F(a_1, \theta_5) < F(a_1, \theta_1) < F(a_1, \theta_2) < F(a_1, \theta_4)$ 的排序关系。那么，结合各方案权重系数 θ_j ，通过统计分析，可得到关于地震动峰值加速度 a_1 ，对应于不同主观置信度（例如5%分位数、50%分位数、95%等）的地震危险性统计数据，具体统计结果如表2所示。上述处理方法具有普适性，对于任意地震动强度 a_i ，各方案给出的超越概率值均可先排序，再结合各方案的权重系数，计算得到对应于不同主观置信度的地震危险性统计结果。需要说明的是，在核电站PSHA中，通常会输出数千组计算方案的结果，受权重系数总和为1的约束，每个单独方案对应的权重系数数量级通常小于 10^{-3} ，因此经处理后的危险性数据可得到近似任意置信度的超越概率值。

表1 多方案地震危险性数据示例

PGA/g		a_1	a_2	...	a_{10}	权重系数
超越概率	NO.1	$F(a_1, \theta_1)$	$F(a_2, \theta_1)$	...	$F(a_{10}, \theta_1)$	θ_1
	NO.2	$F(a_1, \theta_2)$	$F(a_2, \theta_2)$	...	$F(a_{10}, \theta_2)$	θ_2
	NO.3	$F(a_1, \theta_3)$	$F(a_2, \theta_3)$	...	$F(a_{10}, \theta_3)$	θ_3
	NO.4	$F(a_1, \theta_4)$	$F(a_2, \theta_4)$	...	$F(a_{10}, \theta_4)$	θ_4
	NO.5	$F(a_1, \theta_5)$	$F(a_2, \theta_5)$	...	$F(a_{10}, \theta_5)$	θ_5

表2 特定地震动强度 a_1 下的超越概率统计数据

多方案超越概率值 (从小到大排列)	$F(a_1, \theta_3)$	$F(a_1, \theta_5)$	$F(a_1, \theta_1)$	$F(a_1, \theta_2)$	$F(a_1, \theta_4)$
权重系数	θ_3	θ_5	θ_1	θ_2	θ_4
置信度	θ_3	$\theta_3 + \theta_5$	$\theta_1 + \theta_3 + \theta_5$	$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5$	100%

基于处理后的地震危险性统计数据，可选用合适的拟合函数，生成不同主观置信度下连续地震危险性曲线。

年最大地震动峰值加速度的概率分布有多种表达方式，例如：

$$P\{A \geq a\} = 1 - e^{k_0 a^{-k}} \tag{2}$$

或

$$P\{A \geq a\} = e^{k'a^{-k_1}} \quad (3)$$

式中， k, k_0, k_1 和 k' 为常数。

图 1 为采用表 A.2 中数据，基于式 (3) 拟合得到的 5%、50% 及 95% 置信度地震危险性曲线示意图。

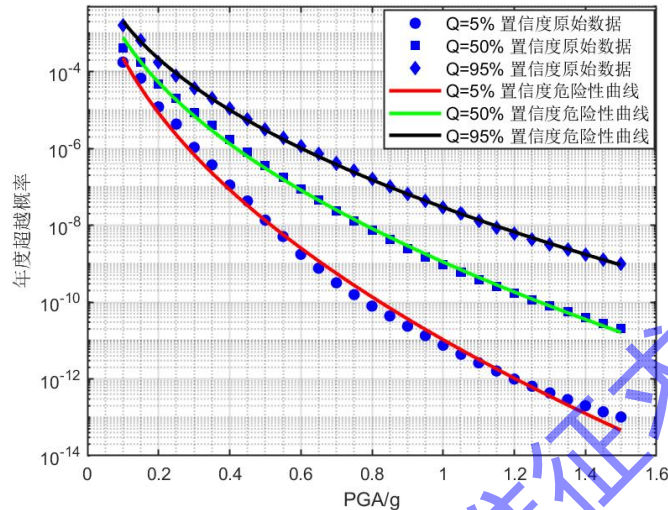


图 1 地震危险性曲线示意图

PGA 区间 (a_1, a_2) 上地震发生概率 H ，可以通过对同一曲线上区间两端点所对应超越概率的差值计算得到，如公式 (4) 所示。

$$H = H(a_1) - H(a_2) \quad (4)$$

式中：

$H(a)$ ：地震危险性曲线在 a 点的取值；

a_1 ：给定地震动区间的下限；

a_2 ：给定地震动区间的上限。

4.2 地震动参数范围

本文件基于设备性能和地震风险量化需求，将需要考虑的地面加速度峰值 (PGA) 下限取为 0.1g，上限取为 1.0g。该阈值基于以下考量：

- 1) 工程抗震设计规范普遍采用 0.1g 作为功能性校验基准；
- 2) 低于 0.1g 的地震动对绝大多数核电设备结构完整性影响可忽略；
- 3) 超过 1.0g 的地震动年超越概率低于 10^{-7} ，属极罕遇事件；
- 4) 1.0g 强度的地震已超出厂址抗灾设计极限，无需精细化定量评估。

如果当地震数据信息足够精确，或有特殊需求时，可适当调整所需考虑地震动范围。

5 设备易损度评估

5.1 易损度定义

地震易损度定义为分析对象（构筑物、系统和部件，统称“客体”）在特定地震动参数（例如地面加速度峰值 PGA）作用下的条件失效概率。

5.2 失效模式与失效准则

5.2.1 失效准则

失效判据是，当地震动载荷（外部激励）超过构筑物、系统和部件的抵抗能力（强度）时，即判定为发生失效。

地震动的强烈程度（地震动载荷）可以通过以下两种参数表征：

- a) 地震动响应谱的加速度均值，该参数能精细地反映频谱特性对结构响应的影响；
- b) 地震动时程的加速度峰值，该参数在地震概率安全分析中被广泛采用。

评估构筑物、系统和部件承受地面加速度的能力可以利用的信息包括：

- a) 核电厂设计文件；
- b) 设计阶段进行的响应计算；
- c) 核电厂竣工后构筑物、系统和部件的结构、尺寸和材料性能等。

5.2.2 失效模式

为了生成设备的易损度曲线，首先要明确定义设备的失效模式。构筑物、系统和部件的失效模式。失效主要包括：

- a) 构筑物失效（如支撑件弯曲变形，地脚螺栓松脱等）；
- b) 设备功能失效（阀门卡死，旋转部件过量偏离）；
- c) 断路器跳闸或继电器震颤；
- d) 管线失效（支持系统失效或压力容器疲劳失效）；
- e) 掩埋设备(包括管线和水箱)失效（侧向土壤压力导致的失效）；
- f) 地震引发的构筑物或系统相互作用导致的失效。

对于给定分析对象，需要考虑多种潜在失效模式，并且针对特定失效模式确定易损度曲线。

5.3 抗震能力与易损度

构筑物、系统和部件的抗震能力 A 通常采用抗震能力中值 A_m 与两个随机变量表示为：

$$A = A_m e_R e_U \dots \dots \dots (5)$$

式中：

A_m ：抗震能力中值；

e_R ：表征抗震能力中值的固有随机性（也称为随机不确定性）的随机变量，服从中值为 1，标准差为 β_R 的对数正态分布；

e_U ：表征认知不确定性（也称为认知不确定性）的随机变量，服从中值为 1，标准差为 β_U 的对数正态分布。

5.3.1 易损度曲线

易损度曲线通常用下式（6）所示的双对数正态分布函数表征：

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{A_m} \right) + \beta_U \Phi^{-1}(Q)}{\beta_R} \right] \dots \dots \dots (6)$$

式中：

A ：地面加速度；

Q ：置信度；

$\Phi[\cdot]$ ：标准正态分布函数。

$\Phi^{-1}[\cdot]$ ：标准正态分布函数的反函数。

在给定设备失效模式与地震易损度模型参数后，基于公式（6），可获得设备在不同置信度下的易损度曲线。例如，对于一个抗震能力中值 $A_m = 0.68$ ，随机不确定性标准差 $\beta_R = 0.26$ ，认知不确定性标准差 $\beta_U = 0.33$ 的设备，其不同置信度下的易损度曲线如图2中的三条虚线所示。

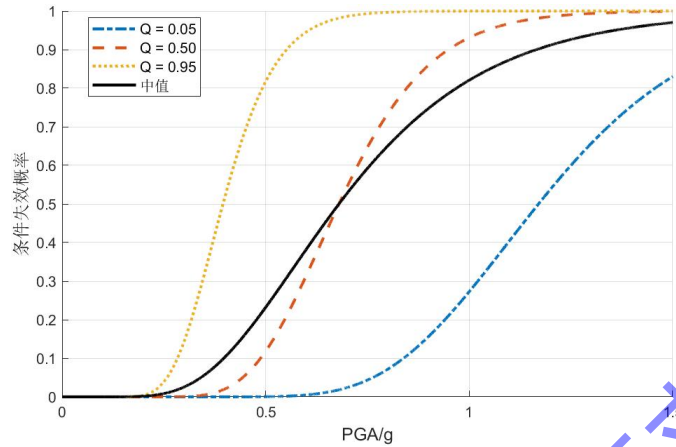


图2 设备地震易损度曲线示例

5.3.2 中值易损度曲线

使用综合标准差变量 β_C ($\beta_C = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}$)，可得到一条易损度曲线，称为中值易损度曲线：

$$F_0 = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{A_m}\right)}{\beta_C} \right] \dots \dots \dots (7)$$

中值易损度曲线见图2中的实线。

6 系统失效概率模型

6.1 单元失效相关现象与机理

实际工程系统服役载荷环境通常具有不确定性。因此，系统中各单元失效事件存在相关性（统计非独立性）。这种单元间的失效相关性会显著削弱冗余的可靠性增益。

从载荷-强度作用机制看，单元失效本质上是载荷大于强度的体现。由于载荷的不确定性与强度的不确定性对单元间失效相关性的作用不同，在系统失效概率分析中必须对二者区别对待。系统中各单元之间的失效相关程度由载荷分布特性与单元性能（强度）分布特性共同决定。系统失效相关程度取决于以下两方面：

a) 载荷随机性：当多个单元承受相同或相关环境载荷时，载荷的不确定性是导致单元失效统计相关的根本原因；

b) 单元性能（强度）分散性：系统中不同单元强度的差异有助于减弱单元失效相关程度。

一般情况下，环境载荷和单元性能均为随机变量，因而大多数系统中的各单元之间都不同程度地存在失效相关性。系统中各单元失效完全独立或完全相关的情况，只出现在特殊情形下：

a) 单元失效完全独立：环境载荷为确定性常量，而各单元性能为随机变量。即，在确定性载荷作用下，各单元失效与否完全取决于其自身性能，彼此无关；

b) 单元失效完全相关：单元性能是确定性量，而其服役环境载荷是随机变量。在此条件下，串联系统失效概率与其最弱单元失效概率相同，并联系统失效概率与其最强单元失效概率相同。

6.2 系统失效概率模型

借助载荷-强度干涉模型计算单元失效概率 p (单元强度 X 小于载荷 Y 的概率) 的模型为:

$$p = P(X < Y) = \int_0^{\infty} h(y) [\int_0^y f(x) dx] dy \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$h(y)$: 载荷 Y 的概率密度函数;

$f(x)$: 单元强度 X 的概率密度函数。

在确定性载荷条件下 (确定性的载荷用正体字母 Y 表示, 载荷-强度干涉关系如图 3 所示), 单元失效概率为:

$$p(Y) = p(X < Y) = \int_0^Y f(x) dx \dots\dots\dots (9)$$

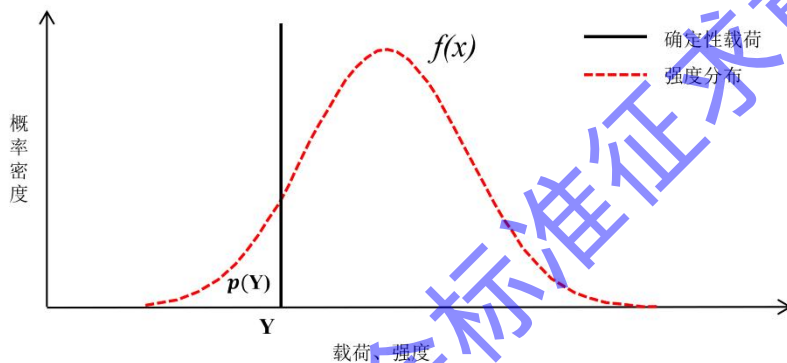


图 3 确定性载荷-随机强度干涉关系图

在此条件下, 系统中各单元的失效是相互独立的, 系统的 n 个单元中有任何 k 个单元失效的概率可运用二项式模型计算:

$$P_s^{k/n} = C_n^k [p(Y)]^k [1 - p(Y)]^{n-k} \dots\dots\dots (10)$$

另一种特殊情况是单元性能为确定性常量 X (单元性能没有分散性), 而载荷为随机变量的情形 (典型的载荷-单元性能关系如图 4)。在所有单元来自同一母体 (各单元强度独立同分布), 所有单元承受同一载荷的条件下, 系统中所有的单元或者同时失效, 或者均不失效, 这是单元失效完全相关的情形。此时, 系统中的 n 个单元同时失效的概率 $p_s^{n/n}$ 与单个单元 (假设所有单元性能相同) 失效概率 p 相同:

$$P_s^{n/n}(X) = p(X) = \int_X^{\infty} h(y) dy \dots\dots\dots (11)$$

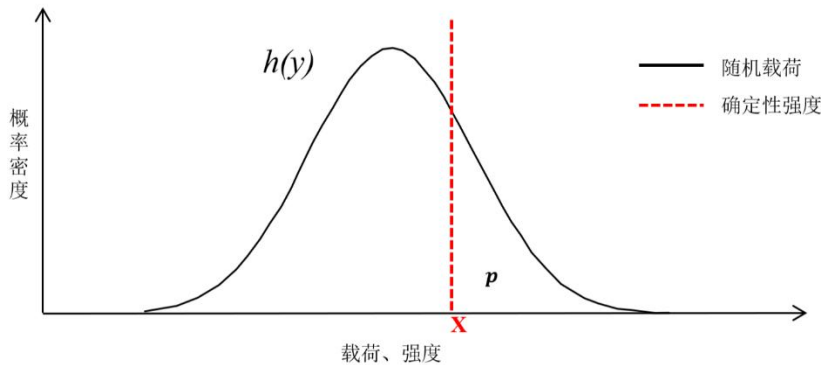


图 4 随机载荷-确定性强度干涉关系图

一般情况是，单元性能与环境载荷都是随机变量（图 5 所示为环境载荷随机变量 y 与单元性能随机变量 x 之间的干涉关系），单元失效概率 p 为单元性能（强度） x 小于环境载荷 y 的概率。在载荷 y 与强度 x 均为连续型随机变量时，在载荷为确定性量 Y 的条件下，单元的条件失效概率为：

$$p(Y) = \int_0^Y f(x)dx \dots \dots \dots (12)$$

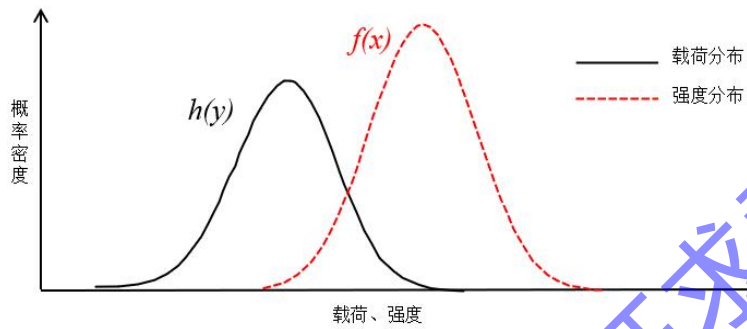


图 5 环境载荷-单元强度干涉关系图

在确定性载荷 Y 作用下，单元失效与否完全由强度分布决定。由于系统中各单元强度通常满足独立同分布假设，因此在给定载荷条件下，各单元失效事件具有条件独立性。

因此，对于指定的载荷 Y ， n 个单元构成的并联系统失效的概率为：

$$[p(Y)]^n = [\int_0^Y f(x)dx]^n \dots \dots \dots (13)$$

考虑载荷 y 的随机性， n 重并联系统失效概率为各种可能载荷下失效概率的统计平均值：

$$P_s^{n/n} = \int_0^\infty h(y) [p(y)]^n dy = \int_0^\infty h(y) [\int_0^y f(x)dx]^n dy \dots \dots \dots (14)$$

公式(14)是通过系统层载荷-强度干涉分析建立的，建模过程没有“单元失效相互独立”假设，因此能够自然而然地体现单元失效相关性（即共因失效）对系统失效概率的影响。

同理，该干涉分析原理可应用于计算冗余系统各阶失效概率。一般而言，系统的 n 个单元中有任意 k 个单元失效的概率为：

$$P_s^{k/n} = C_n^k \int_0^\infty h(y) [p(y)]^k [1 - p(y)]^{n-k} dy \dots \dots \dots (15)$$

7 地震条件下冗余系统失效概率评估方法

7.1 地震条件下冗余系统失效概率模型

基于 k/n 表决系统失效概率计算公式(15)，本文件构建地震条件下冗余系统失效概率模型，以反映各单元之间的失效相关性（共因失效）效应。模型中，载荷概率密度函数 $h(y)$ 由地震危险性曲线获得。依据地震危险性曲线，可获取不同地震动参数的年超越概率（即载荷大于特定值的概率，这里表征载荷的参数为地震加速度峰值 PGA）。条件失效概率 $p(y)$ 基于设备易损性曲线获得，因为易损度曲线表达的即为设备在特定地震加速度峰值 PGA 下的条件失效概率。

将特定厂址的地震危险性曲线和设备地震易损度曲线作为输入信息，即可基于公式（15）计算系统的失效概率。

基于设备性能和地震风险量化需求，给定地震动区间的冗余系统的 n 个单元中 k 个失效的概率

计算公式还可表达为（该式本质上与式（15）相同）：

$$P_s^{k/n} = C_n^k \int_{a_1}^{a_2} \left[-\frac{dH(a)}{da} \right] [g(a)]^k [1 - g(a)]^{n-k} da \dots\dots\dots (16)$$

式中：

a_1 ：给定地震动区间的下限；

a_2 ：给定地震动区间的上限；

$-\frac{dH(a)}{da}$ ：地震加速度峰值 a 的年概率密度函数，其中 $H(a)$ 为地震加速度峰值的年超越概率；

$g(a)$ ：地震加速度峰值 a 条件下的设备失效概率。

实际工程计算中，积分区间可取为 $[0.1g, 1g]$ ，该区间覆盖了工程关注的范围。

公式（16）是连续形式的全概率公式。鉴于危险性曲线 $H(a)$ 通常用离散形式表征，可将式（16）改写为离散化的全概率公式：

$$P_s^{k/n} = C_n^k \sum_{i=1}^q H(i) [g(i)]^k [1 - g(i)]^{n-k} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

q ：地震动参数离散区间总数；

$H(i)$ ：地震加速度位于第 i 个区间 $(a_i - \Delta a/2, a_i + \Delta a/2)$ 的年发生概率；

$g(i)$ ：地震加速度区间中值 a_i 对应的设备条件失效概率。

离散化模型的计算精度与离散区间数 q 呈正相关关系。参照地震概率安全评估规范，工程关注的地震动范围一般为 $0.1g \sim 1.0g$ ，本文件规定离散区间数 $100 \leq q \leq 200$ ，以平衡计算效率与工程精度要求。

需要强调的是，应用离散化模型公式（17），当无法从可得到的地震危险性数据中获取足够多地震动离散点的超越概率值时，需要先基于离散点拟合获取地震危险性曲线（拟合方法见 4.1），基于拟合后的曲线可获取任意 PGA 对应的年度超越概率。

7.2 考虑置信度的系统失效概率计算公式

地震危险性曲线与设备易损度曲线通常以多条对应不同置信度 Q 的曲线簇形式表征。对应于不同置信度的系统失效概率计算公式如下：

$$P_{s|Q}^{k/n} = C_n^k \sum_{i=1}^q H(i|Q) [f'(i|Q)]^k [1 - f'(i|Q)]^{n-k} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$H(i|Q)$ ：置信度为 Q 的地震危险性曲线上，地震动区间 i 的地震年发生概率；

$f'(i|Q)$ ：置信度为 Q 的设备易损度曲线上，地震动区间 i 的设备条件失效概率。

附录 A

(资料性附录)

地震条件下冗余系统失效概率评估示例

A.1 仪控机柜系统

该仪控机柜系统包含四台相同设备，其易损度基本参数值 $A_m=0.55g$ ， $\beta_R=0.26$ ， $\beta_U=0.33$ ，对应不同置信度下易损度曲线可通过下式获得。

$$f(a) = \Phi \left[\frac{\ln\left(\frac{a}{0.55g}\right) + 0.33 * \Phi^{-1}(Q)}{0.26} \right]$$

图 A.1 给出了该设备在 5%、50% 及 95% 置信度下的易损度曲线，横坐标为 PGA，纵坐标为条件失效概率。

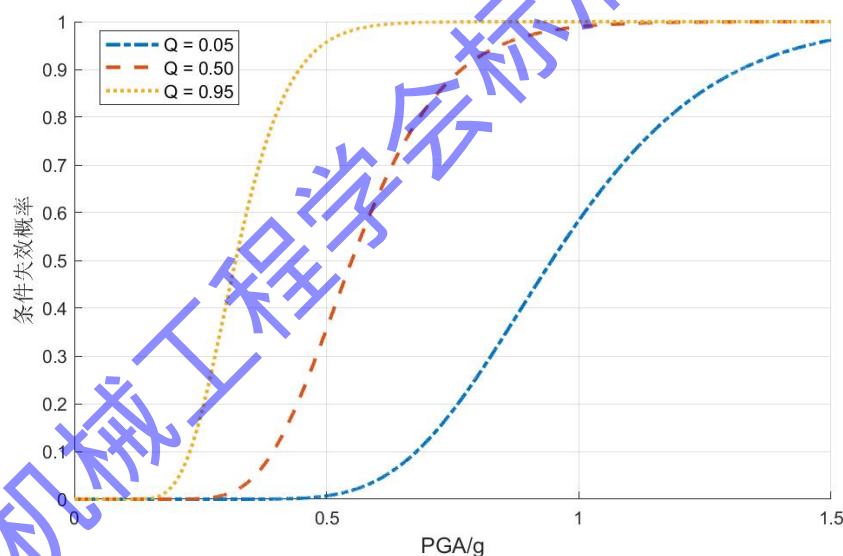


图 A.1 设备易损度曲线示意图

A.2 地震危险性数据处理

根据某厂址 5400 组地震危险性数据（分别来自 5400 套计算方案）开展概率地震危险性分析，可获得该厂址概率地震危险性分布，描述了该厂址地震危险性的不确定性特征，具体结果如表 A.1 所示。针对每条计算地震危险性曲线，根据专家经验确定各方案的权重系数。

在完成各方案权重系数确定的基础上，针对每个预先确定的峰值加速度（PGA）离散值，对所有 5400 套方案输出的年超越概率（AEP）数据进行加权综合计算与排序处理。通过该处理流程，可有效整合不同方案的分析结果，最终获得不同主观置信度下的地震危险性统计数据，为厂址地震危险性评估提供不同置信度的支撑数据，具体处理结果如表 A.2 所示（具体处理方法说明详见 4.1）。

表 A.1 某厂址概率地震危险性分析结果

PAG/g		0.1	0.2	...	0.9	1.0	权重系数
超越 概 率	NO.1	2.336E-03	9.640E-04	...	1.207E-07	5.256E-08	0.0005906
	NO.2	1.822E-03	7.413E-05	...	1.079E-07	5.469E-08	0.0006023

	NO.5399	1.914E-04	7.225E-05	...	6.941E-11	2.359E-11	0.0000355
	NO.5400	1.875E-04	7.881E-05	...	5.524E-10	1.867E-10	0.0000251

表 A.2 某厂址处理后地震危险性数据

PAG/g	0.1	0.2	...	0.9	1.0	置信度
超越 概 率	...	...	...	...	...	...
	1.762 E-04	1.209 E-05	...	2.357 E-11	7.534 E-12	5%

	4.181 E-04	4.715E-05	...	2.450 E-09	9.271 E-10	50%

	1.600 E-03	1.748 E-04	...	6.623 E-08	2.920 E-08	95%

A.3 系统失效概率量化评估

基于表 A.2 中的数据可获得完整的地震危险性曲线，借助公式 (4) 可计算出任意离散区间的载荷发生概率，即该区间段内地震动强度出现的概率大小。同时，该区间段对应的条件失效概率可通过易损度曲线获取，通常取该区间段中点对应的条件失效概率值作为该区间的代表值。

为了保证计算精度，离散区间应取的足够小。当离散区间宽度取值足够小时，计算结果将趋于稳定。这里以离散区间宽度为 0.1g 为例进行说明(实际计算时，区间宽度需要取得足够精细)，具体如表 A.3 所示。

表 A.3 不同 PGA 段的数据结果

PAG 范围(单位: g)	载荷发生概率	条件失效概率
[0.1-0.2)	$H(0.1g) - H(0.2g)$	$f(0.15g)$
[0.2-0.3)	$H(0.2g) - H(0.3g)$	$f(0.25g)$
...
[0.9-1.0)	$H(0.9g) - H(1.0g)$	$f(0.95g)$

在“考虑相关失效”与“独立失效假设”两种场景下，分别计算该系统在地震条件下的各阶失效概率，并对结果进行对比分析。首先，基于公式（18），对由四台仪控机柜构成的系统开展地震失效定量评估（考虑失效相关性）。50%置信度下的各阶失效概率计算过程如下：

$$P_{s|Q=50\%}^{1/4} = C_4^1 * \{[(4.181 \times 10^{-4} - 4.715 \times 10^{-5}) \times 3.9714 \times 10^{-6} \times (1 - 3.9714 \times 10^{-6})^3] + \dots + [(2.450 \times 10^{-9} - 9.271 \times 10^{-10}) \times 0.9892 \times (1 - 0.9892)^3]\}$$

$$P_{s|Q=50\%}^{2/4} = C_4^2 * \{[(4.181 \times 10^{-4} - 4.715 \times 10^{-5}) \times (3.9714 \times 10^{-6})^2 \times (1 - 3.9714 \times 10^{-6})^2] + \dots + [(2.450 \times 10^{-9} - 9.271 \times 10^{-10}) \times 0.9892^2 \times (1 - 0.9892)^2]\}$$

...

基于独立失效假设时，首先计算单个设备在 50%置信度下的失效概率，计算过程类似如下：

$$P_{Q=50\%} = (4.181 \times 10^{-4} - 4.715 \times 10^{-5}) \times 3.9714 \times 10^{-6} + \dots + (2.450 \times 10^{-9} - 9.271 \times 10^{-10}) \times 0.9892$$

基于此，进一步运用单个设备地震失效概率 $P_{Q=50\%}$ 计算系统失效概率，如下：

$$P_s^{k/n} = C_n^k [P_{Q=50\%}]^k [1 - P_{Q=50\%}]^{n-k}$$

表 A.4 与 A.5 分别列出 50%置信度、95% 置信度下，仪控机柜系统在“考虑相关失效”与“独立失效假设”两种场景下的具体计算结果。

表 A.4 50%置信度下仪控机柜系统失效概率结果对比

系统失效阶次	基于独立失效假设	考虑失效相关性
1/4	7.8408 E-07	1.7152 E-06
2/4	3.6887 E-12	3.9661 E-07
3/4	1.9282 E-18	1.3919 E-07
4/4	3.7796 E-25	5.2581 E-08

表 A.5 95%置信度下仪控机柜系统失效概率结果对比

系统失效阶次	基于独立失效假设	考虑失效相关性
1/4	5.1280 E-05	6.7503 E-05
2/4	1.5776 E-08	2.3573 E-05
3/4	5.3937 E-13	1.4100 E-05
4/4	6.9152 E-18	1.2043 E-05

通过两种场景下的具体计算结果的数据对比分析可知：考虑单元失效相关性时，系统的一阶失效概率（单个单元失效概率）与高阶失效概率（多单元同时失效概率）均高于独立失效假设场景下的对应结果。

进一步分析数据趋势可见，在同一置信度下，随着失效阶数（同步失效的单元数量）的升高，两种场景下失效概率差值呈现显著扩大趋势，即高阶失效（两单元及以上同步失效）概率的差值远大于一阶失效，且两种置信度下均呈现这一规律。这充分表明，失效相关性对系统失效概率的影响

具有“阶数依赖性”：阶数越高，相关性的放大效应越显著。因此，对于含多单元协同工作的高阶复杂系统，传统独立失效假设因忽略单元间的失效相关性，会导致系统失效概率被低估，进而影响可靠性评估结果的准确性，故失效相关性在高阶系统的可靠性分析中不可忽视。失考虑失效相关性能更真实地反映系统的失效概率情况，这将为核电系统抗震设计与安全评估提供更可靠的依据。

中国机械工程学会标准征求意见稿

参考文献

- [1] GB 17741—2025 工程场地地震安全性评价
- [2] NB/T 20037.5—2021 应用于核电厂的一级概率安全评价 第5部分：功率运行地震
- [3] GB/T 9225-2022 《核电厂系统与其它核设施可靠性分析应用指南》，国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会
- [4] Cornell C A. 1968. Engineering seismic risk analysis[J]. Bull Seismol Soc Am,58(5):1583-1606.
- [5] 张萌,潘华.一种新的地震危险性表达方法研究[J]. 地震学报,2022,44(06):1099-1110.

中国机械工程学会标准征求意见稿