

1 总则

1.0.1 本规范编制旨在贯彻国家防震减灾及核安全相关法律法规，严格执行民用核设施安全第一的方针，确保核电厂运行安全、质量可靠、技术先进、经济合理。

1.0.2 本规范适用于极限安全地震动加速度峰值不大于 0.5g 地区的新建压水堆核电厂的抗震设计，其基本原则和抗震计算方法也适用于重水堆、气冷堆和快中子堆核电厂。

1.0.3 核电厂工程厂址必须进行地震安全性评价以确定厂址的设计基准地震动。

1.0.4 按本规范设计的核电厂，当遭受极限安全地震动影响时，应能确保反应堆冷却剂压力边界完整、反应堆安全停堆并维持安全停堆状态，且放射性物质释放对环境的影响不超过国家规定的限值；当遭受运行安全地震动影响时，需停堆进行安全检查，在确认核电厂相关物项保持安全功能的前提下可恢复正常运行。

1.0.5 核电厂物项的抗震设计应满足核电厂的整体安全要求；核电厂物项应依抗震分类实施抗震设计，抗震分类应与核电厂各物项的安全重要性分级相对应。

1.0.6 核电厂物项的抗震分类可划分为抗震 I 类、抗震 II 类和非核抗震类。各具体物项的抗震分类可采用相关技术标准的规定。

1.0.7 抗震 I、II 类物项的抗震设计应采用本规范规定的方法；非核抗震类物项的抗震设计应满足适用的非核设施抗震设计规范的要求。

1.0.8 核电厂抗震设计除应符合本规范规定外，尚应符合相关技术标准的规定。

2 术语和符号

2.1 主要术语

2.1.1 物项 structure, system and component, SSC

核电厂建筑物、构筑物、系统和部件的统称。

2.1.2 地震动 ground motion

地震引起的地壳岩土介质的运动，由地震动时程和相应的峰值、谱和持续时间等参数表述。

2.1.3 设计基准地震动 design basis ground motion

核电厂抗震 I、II 类物项抗震设计中作为输入采用的地震动，包括极限安全地震动和运行安全地震动两个水准。

2.1.4 极限安全地震动 ultimate safety ground motion

核电厂设计基准地震动的较高水准，是对应极限安全要求的地震动，通常为预估的核电厂所在地区可能遭遇的最大潜在地震动，对应的年超越概率为 10^{-4} 。

2.1.5 运行安全地震动 operational safety ground motion

核电厂设计基准地震动的较低水准，主要用于对核电厂运行安全控制、设计中的荷载组合与应力分析等，该地震动具有与极限安全地震动不同的用途。

2.1.6 厂址特定地震反应谱 site-specific response spectra

考虑具体核电厂厂址区域地震背景和场地特性的设计基准地震反应谱。

2.1.7 标准设计反应谱 normalized response spectra

不考虑具体核电厂厂址区域地震背景和场地特性的具有包络谱特点的设计基准地震反应谱。

2.1.8 抗震设防烈度 seismic precautionary intensity

按国家规定的权限批准、作为一个地区非核工程设施抗震设防依据采用的地震烈度，一般情况下采用 50 年内超越概率 10% 的地震烈度。

2.1.9 要求反应谱 required response spectra, RRS

设备抗震鉴定试验中由相关技术标准规定的输入反应谱。

2.1.10 试验反应谱 test response spectra, TRS

设备抗震鉴定试验中实际采用的输入反应谱。

2.2 主要符号

2.2.1 地震动

$|F(f)|$ 、 $|F(\omega)|$ ——地震动加速度时程平稳段的傅立叶振幅谱；

$S(f)$ 、 $S(\omega)$ ——地震动加速度时程的功率谱；

T_d ——地震动加速度时程平稳段的持续时间；

a ——地下直管高程处的最大地震动加速度；

a_{max} ——地震动加速度峰值；

c ——	地基中沿管道传播的地震波的视波速；
f_{max} ——	考虑的地震动最高频率；
m_1 、 m_2 ——	分别为地震动加速度时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的均值；
$\{x_b\}$ ——	输入的地基水平地震动位移矢量；
v_e ——	地下直管所在高程处的最大地震动速度；
λ ——	地震波视波长；
ρ_{12} ——	地震动加速度时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 间的相关系数；
σ_1 、 σ_2 ——	分别为地震动加速度时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的标准差。

2.2.2 结构参数和结构分析

C_x 、 C_z 、 C_ϕ ——	分别为基础沿水平、竖向和摆动方向的阻尼系数；
$[C]$ ——	结构的阻尼矩阵；
K_n 、 K_t ——	分别为沿管道轴向和横向的基床系数；
K_x 、 K_z 、 K_ϕ ——	分别为地基的水平、竖向和摆动方向的弹簧刚度；
K_x' 、 K_z' 、 K_ϕ' ——	分别为基础置于地表时的地基水平、竖向和摆动方向的弹簧刚度；
K_x'' 、 K_z'' 、 K_ϕ'' ——	分别为考虑基础置效应时的地基水平、竖向和摆动方向的附加弹簧刚度；
$[K]$ ——	结构的刚度矩阵；
$[K_s]$ ——	地基弹簧刚度矩阵；
M ——	结构质量；
$[M]$ ——	结构的质量矩阵；
$R_n(f)$ ——	反应谱；
S_a ——	设备所在楼层反应谱的最大谱值；
S_{ai} ——	对应频率 i 的反应谱值；
$[S]$ ——	动力阻抗矩阵；
$[U_{bs}]$ ——	位移影响矩阵；
ZPA ——	输入反应谱中对应零周期的加速度谱值，即输入加速度峰值；
ZPA_i ——	i 支承点处反应谱的零周期加速度谱值；
f_i 、 f_j ——	分别为对应 i 振型与 j 振型的频率；
f_n ——	结构最低固有频率；
k_n 、 k_t ——	分别为沿管道轴向和横向的地基弹簧刚度；
$\{\ddot{x}_b\}$ ——	输入结构体系的加速度矢量；
$\{x_b(t)\}$ ——	支承点的输入位移矢量；
$\{\ddot{x}_b(t)\}$ ——	支承点的输入加速度矢量；
ε_{ij} ——	i 振型与 j 振型的相关系数；
η_x 、 η_z 、 η_ϕ ——	分别为地基水平、竖向和摆动方向的辐射阻尼比；
ξ ——	阻尼比；
ξ_i 、 ξ_j ——	分别为对应 i 振型与 j 振型的阻尼比；
λ_m ——	子结构总质量与主结构总质量的比值；
λ_f ——	子结构基本频率与主结构主导频率的比值；
ω_1 ——	结构的基本自振圆频率。

2.2.3 作用和作用效应

A ——	事故条件下产生的荷载效应；
C ——	与吊车有关的荷载效应（亦记为 C_{cr} ）；
D ——	永久荷载效应；
E_o ——	运行安全地震作用效应；
E_s ——	极限安全地震作用效应；
F ——	流体压力效应，设备质心的等效地震作用；

$\{F\}$	作用于结构的水平地震作用矢量；
G	设备总重力载荷，地基、基础承受的永久荷载效应（含自重效应、固定设施荷载效应和上浮力效应）；
H	侧向土压力效应；
H_a	结构内部溢水或外部水淹产生的荷载效应；
L	活荷载效应；
L_r	屋面活荷载效应；
M	荷载组合在基础底面引起的倾覆力矩；
M_a	自重和其他持续荷载引起的组合弯矩；
M_b	运行安全地震动引起的弯矩和其他偶然荷载引起的弯矩之和；
M_i	机械荷载与地震作用引起的组合弯矩；
N	正常运行和停堆期间承受的荷载效应，荷载组合在基础底面引起的竖向力；
P	D级使用荷载引起的压应力，设计压力，基础底面平均压应力设计值；
P_0	工作压力的变化幅值；
P_a	设计基准事故工况下的压力荷载效应；
P_{\max}	B级使用荷载引起的压力峰值，基础底面边缘的最大压应力设计值；
P_v	安全壳内部或外部压力引起的外压荷载效应；
Q	施加预应力产生的荷载效应；
R	雨荷载效应，空间地震作用最大值；
R_0	正常运行或停堆期间的管道和设备反力效应；
R_a	设计基准事故工况下管道和设备反力效应；
R_I	I 方向地震作用最大值；
$R_I(t)$	I 方向地震反应时程；
$R_I(t)_{\max}$	I 方向地震反应时程中的最大值；
$R_{I\max}$	最大的单向地震作用；
R_i	i 振型的总地震作用最大值；
R_{pI}	I 方向周期性地震作用分量最大值；
R_{pi} 、 R_{pj}	分别为对应 i 振型与 j 振型的周期性地震作用最大值；
R_{rI}	I 方向刚性地震作用分量最大值；
S	荷载组合作用效应（内力、变形）设计值，雪荷载效应；
S_i	第 i 种作用效应组合设计值；
S_{ijk}	第 i 种组合中的第 j 种作用效应标准值；
T_0	正常运行或停堆期间的温度作用效应；
T_a	设计基准事故工况下温度作用效应；
T_a 、 T_b	分别为总体结构不连续或材料不连续的 a 、 b 两端的平均温度；
Y_j	管道破裂时在结构上产生的喷射冲击荷载效应；
Y_m	管道破裂时施加于结构的飞射物撞击荷载效应；
Y_r	管道破裂时破裂管道在结构上产生的荷载效应；
Y_y	设计基准事故工况下的局部作用效应；
a_x 、 a_y 、 a_z	分别为作用于设备或延伸机构质心的三个正交方向的地震加速度反应；
f_a	计算压缩应力；
f_b	计算弯曲应力；
f_r	计算拉伸应力；
f_n	单位管长管壁与周边岩土间的最大摩擦力；
u	管道柔性接头处的最大轴向线位移；

u_i	——	i 支承点处的最大位移;
$\{x\}$	——	结构地震位移反应水平矢量;
$\{x_s(t)\}$	——	结构的静态位移反应矢量;
$\{\ddot{x}_d(t)\}, \{\dot{x}_d(t)\}, \{x_d(t)\}$	——	分别为结构的加速度反应、速度反应和动态位移反应矢量;
θ	——	管道柔性接头处的最大角位移;
σ_b	——	管道弯曲应力;
σ_l	——	局部薄膜应力;
σ_m	——	总体薄膜应力;
σ_n	——	地下直管最大轴向地震应力。

2.2.4 材料性能和抗力

E	——	材料的弹性模量;
E_l	——	地基介质表层的弹性模量;
E_d	——	地基介质底层的弹性模量;
E_{ab}	——	结构不连续或材料不连续的 a 、 b 两侧弹性模量的平均值;
E_c	——	混凝土的弹性模量;
E_s	——	钢材的弹性模量;
F	——	峰值应力强度;
F_a	——	许用压缩应力;
F_b	——	许用弯曲应力;
F_t	——	许用拉伸应力;
F_{tb}	——	工作温度下的许用拉应力;
F_v	——	许用剪切应力;
F_{vb}	——	工作温度下的许用剪应力;
G	——	地基介质平均剪切模量, 与地震作用下地基最大应变幅值相应的地基介质的剪切模量;
G_c	——	混凝土的剪切变形模量;
G_s	——	钢材的剪切变形模量;
G_i	——	地基介质 i 层的剪切模量;
P_b	——	弯曲应力强度;
P_e	——	膨胀应力强度;
P_l	——	局部薄膜应力强度;
P_m	——	总体薄膜应力强度, 一次薄膜应力强度;
P_t	——	与荷载变形曲线峰值对应的极限强度;
Q	——	二次应力强度;
R	——	截面承载力或变形的限值;
S	——	容许应力值或许用应力;
S_h	——	工作温度下的许用应力;
S_a	——	疲劳极限;
S_m	——	材料的许用应力强度或设计应力强度;
S_{Ri}	——	第 i 种作用效应限值;
S_u	——	材料的抗拉强度;
S_{ut}	——	由实际使用的材料应力-应变曲线取得的抗拉强度值;
S_y	——	材料的屈服强度, 工作温度下的屈服强度;
V_s	——	地基介质剪切波速;
f_{SE}	——	调整后的地基土抗震承载力设计值;
α_a 、 α_b	——	分别为总体结构不连续或材料不连续的 a 、 b 两侧在室温下的热膨胀系数;
ν	——	泊松比;
ρ	——	地基介质平均密度。

2.2.5 几何参数

A_n	地下直管管壁的净截面面积;
C_c	长细比控制参数;
C_x	焊脚长度;
D	管道直径;
D_0	管道外直径;
D_1	渐缩管大端外直径;
D_2	渐缩管小端外直径;
D_m	主管平均直径;
H	基础深度;
I	管道的截面惯性矩;
L	集中弹簧间距, 两柔性接头间的管道长度, 水平运动正交方向的基础边长;
R	弯头或弯管的名义半径;
R_m	主管平均半径;
S	斜接件中心线上的间距;
T_b	支管名义壁厚;
T_b'	连接支管的名义壁厚;
T_r	主管名义壁厚;
Z	管道的截面模量;
a	翘离情况下基础底面实际接地宽度;
b	基础宽度或水平运动方向的基础边长;
d_a 、 d_b	分别为总体结构不连续或材料不连续的 a 、 b 两侧内直径;
d_i	地基介质 i 层中心至基础底面的距离;
d_m	支管平均名义直径;
h	地基有限元模型单元高度;
h_i	地基介质 i 层的厚度;
l	元件的自由长度;
l_b	元件在弯曲平面上的自由长度;
r	截面旋转半径, 基础底面半径或等效半径, 与三通和弯头相配的管道平均半径;
r_0	计算点至管截面中性轴的距离;
r_b	相对弯曲轴线确定的旋转半径;
r_m	管道平均半径;
r_m'	与接管座连接的管道半径;
r_p	补强接管或连接支管的外半径;
r_z	补强支管接头半径;
t	管道名义壁厚;
t_1	渐缩管大端壁厚;
t_2	渐缩管小端壁厚;
t_a 、 t_b	分别为距离 $\sqrt{d_a t_a}$ 、 $\sqrt{d_b t_b}$ 内的平均壁厚;
t_b	补强区支管壁厚;
t_e	补强壁厚;
t_n	管道名义壁厚;
t_{max}	锥型管过渡段最大壁厚;
β	基础底面接地率;
θ	相邻斜接件轴线之间夹角的一半。

2.2.6 计算参数

B_1 、 B_2	管件的一次应力指数;
---------------	------------

C_1 、 C_2 、 C_3	管件的二次应力指数；
C_v	地基弹性模量的变异系数；
F_x 、 F_z 、 F_φ	分别为地基介质在水平、竖向和摆动方向的等效弹簧刚度计算系数；
K	设备分析中的长度系数；
h	管道设计中的柔度特性；
i	管道设计中的应力增强系数；
k	计算等效地震作用的放大系数，承载力调整系数，管道设计中的柔性系数；
k_i	对应第 i 种作用效应的调整系数；
n	基础底面以上地基介质的分层数；
α_a 、 α_b	分别为地下管道轴向应力和弯曲应力计算中的波速系数；
α_i	振型组合中的刚性反应系数；
β	地基有限元高度计算系数，岩土弹簧刚度计算系数；
β_x 、 β_z 、 β_φ	分别为在水平、竖向和摆动方向的基础底面等效半径计算系数；
γ_{ij}	第 i 种组合中的第 j 种作用效应的分项系数；
δ	地下管道轴向应力计算系数；
η	多频效应系数。

2.2.7 其他

H	场地覆盖土层厚度；
N	实测标准贯入锤击数；
N_0	标准贯入锤击数基准值；
P	超越概率，对应某种极限状态的结构抗震失效概率；
P'	确定的地震作用下对应某种极限状态的结构抗震条件失效概率；
P_F	对应某种极限状态的结构抗震目标失效概率；
P_L	液化概率；
d_s	标准贯入试验点深度；
d_w	地下水埋深。

3 抗震设计的基本要求

3.1 抗震概念设计原则

3.1.1 结构宜满足以下有关体形和构件布置的要求：

- 1 结构重心尽可能低；
- 2 结构的平面和立面外形尽可能简单规则，避免局部突出或收进；
- 3 结构的刚度和质量分布尽可能均匀，刚度中心尽量接近质量中心。

3.1.2 结构体系应满足以下基本要求：

- 1 应有明确的计算简图和合理的地震作用传递途径；
- 2 应具备必要的抗震承载力及安全裕度；
- 3 应避免出现局部薄弱部位，若有局部薄弱部位应予加强。

3.2 计算模型

3.2.1 核电厂结构抗震计算模型应符合以下要求：

- 1 质量和刚度分布不对称的结构，应采用平动和扭转耦联作用计算模型；
- 2 采用集中质量模型时，集中质量的个数不宜少于拟考虑振型数的两倍；
- 3 结构地基岩土的平均剪切波速大于 2400m/s、或地基刚度大于上部结构刚度的两倍时，可不考虑地基与结构的相互作用；不满足以上条件时，上部结构的抗震计算应计入地基与结构的相互作用、且满足以下要求：

1) 地基近似为均质弹性介质时，可采用集中参数模型；其中，当基础埋深与基础底面等效半径之比小于 1/3 时，可不考虑基础埋置效应；

2) 非均质地基宜采用有限元模型；

3) 相互作用分析可采用附录 A 中的方法，亦可采用其它适用方法。

4 结构模型应考虑支承构件刚度对其动力反应的影响；

5 结构模型应计入结构附属构件和结构中液体的质量；

6 储存液体的结构，应计入液体晃动效应和其它液压效应；

7 当允许结构发生水平方向的大变形时，应考虑竖向力和竖向地震作用引起的 $P-\Delta$ 效应。

3.2.2 由主结构（支承结构）和子结构（被支承结构）组成的结构体系的抗震计算，应符合以下要求：

1 宜考虑主结构与子结构的动力相互作用，建立耦联模型进行抗震计算；

2 当子结构单点支承于主结构时，若符合下列条件之一，可不进行体系的耦联计算；

1) $\lambda_m < 0.01$

2) $0.01 \leq \lambda_m \leq 0.1$ ，且 $\lambda_f \leq 0.8$ 或 $\lambda_f \geq 1.25$ 。

式中 λ_m ——子结构总质量与主结构总质量的比值；

λ_f ——子结构基本频率与主结构主导频率的比值。

3 当子结构以两点或两点以上支承于主结构、且子结构对主结构的质量和刚度产生不可忽略的影响时（如反应堆冷却剂系统），应采用耦联模型进行分析。

3.3 地震作用计算方法

3.3.1 结构应就两个正交水平方向和一个竖直方向计算地震作用，水平地震作用方向应对应结构平面主轴，或取对结构最不利的方向。

3.3.2 结构地震作用一般可采用弹性方法计算；弱非线性结构可采用较大阻尼比的弹性方法计算，非线性土体和弹塑性支承构件可采用等效线性化方法计算，强非线性结构的计算可采用弹塑性方法。

3.3.3 结构地震作用计算通常可采用反应谱方法、时程分析法和频域传递函数法；当有充分依据可以得出更保守的结果时，也可采用等效静力方法。

3.3.4 采用反应谱方法计算结构地震作用时，地震作用最大值应取各振型地震作用的组合；采用时程分析方法计算结构地震作用时，可同时或分别就相互正交的两个水平方向和竖向进行计算。空间地震作用最大值应组合各单向地震作用最大值确定。地震作用最大值的计算方法见附录 B。

3.3.5 子结构各支承点处运动不一致时，可优先采用耦联模型进行时程分析或反应谱分析，不采用耦联分析的子结构的多点输入分析方法见附录 C。

3.3.6 地震动相关输入应满足以下要求：

- 1 不考虑地基与结构的相互作用时，支承于地基的结构动力分析，应输入结构基础底面的设计地震反应谱或地震动时程；
- 2 考虑地基与结构的相互作用时，相互作用体系的地震动输入处可选择地表、基础底面或地基；
- 3 解耦后的支承于主结构的子结构的计算，应输入支承点处的设计楼层反应谱或地震反应时程。

3.4 楼层反应谱

3.4.1 楼层反应谱一般可由主结构相应楼层（或高程）的地震加速度反应时程计算得出；楼层反应谱应包括两个正交水平方向的谱和一个竖向谱。计算楼层反应谱时，应满足以下要求：

- 1 主结构质量和刚度对称分布时，某一方向的楼层反应谱可由该方向地震动单独输入时的楼层地震加速度反应时程得出；主结构质量和刚度非对称分布时，每一方向的楼层反应谱可由三向地震动单独输入时该方向楼层地震加速度反应的代数和得出。
- 2 计算楼层反应谱时，频率增量宜按表 3.4.1 采用。

表 3.4.1 反应谱的频率增量（Hz）

频率范围	0.2~3.0	3.0~3.6	3.6~5.0	5.0~8.0	8.0~15.0	15.0~18.0	18.0~22.0	22.0~33.0
频率增量	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	1.00	2.00	3.00

3.4.2 设计楼层反应谱的确定和使用应满足以下要求：

- 1 设计楼层反应谱应是平滑化的反应谱；
- 2 考虑地震动和结构动力参数的不确定性，设计楼层反应谱应对本规范 3.4.1 条所述楼层反应谱进行修正，含谱峰值的折减和峰值在频域的拓宽，修正方法见附录 D；

- 3 利用反应谱法进行结构分析时，若子结构有一个以上的自振频率在设计楼层反应谱拓宽的峰值范围内时，可对采用的设计楼层反应谱进行修正，修正方法见附录 D；
- 4 当子结构受楼层扭转振动的影响明显时，应考虑偶然偏心的影响。

3.5 结构和材料的力学参数

3.5.1 结构和材料的力学参数应采用试验或计算方法得出，一般可采用相关技术标准规定的数值。

3.5.2 结构的振动耗能特性应采用适当的阻尼模拟；一般可用比例阻尼模拟结构耗能特性，比例阻尼可采用瑞利阻尼、刚度阻尼或质量阻尼。阻尼的采用应满足以下要求：

- 1 各类物项的阻尼比可按表 3.5.2 采用；

表 3.5.2 物项的阻尼比

物项	阻尼比 (%)	
	运行安全地震动 ⁽¹⁾	极限安全地震动
焊接和摩擦型螺栓连接钢结构	3	4
承压型螺栓连接钢结构	5	7
预应力混凝土结构	3	5
钢筋混凝土结构	4	7
管道系统	3	4
满载的电缆桥架系统	7	10
空载的电缆桥架系统	5	7
HVAC 风道	5	7
HVAC 焊接风道	3	4
电动机、风机、压缩机 (保护壳、结构支承)	2	3
压力容器、热交换器 泵阀(压力边界)		
电气设备的柜和盘		
焊接的仪器格架等	2	3
储液金属罐(考虑脉冲效应)	2	3
储液金属罐(考虑晃动效应)	0.5	0.5

注：(1) 此列阻尼比值适用于运行安全地震动大于或等于 1/3 极限安全地震动的情况。

- 2 频域分析中，可采用有充分依据的与频率相关的阻尼比；
- 3 非线性时程分析中，可采用有充分依据的非线性本构关系模拟非线性耗能，但这类耗能不能与等效粘滞阻尼相重复；
- 4 土体等效线性化分析中，等效阻尼比应依据土样试验资料由应力水平确定；
- 5 地基采用有限元模型进行分析时，应考虑振动能量向计算域外的传播（即辐射阻尼）；
- 6 不同材料构成的组合结构的阻尼比宜采用刚度加权或质量加权方法确定；
- 7 阻尼器的阻尼效应由实验确定。

3.5.3 抗震分析计算时，混凝土和钢材的力学参数取值如下：

- 1 混凝土的弹性模量 E_c 可按表 3.5.3 取值，剪切变形模量 G_c 可按弹性模量的 40% 采

用，泊松比可按 0.2 采用；

表 3.5.3 混凝土的弹性模量 (10^4N/mm^2)

混凝土 强度等级	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70
E_c	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70

注：(1) 当考虑到混凝土可能开裂的影响时，混凝土的弹性模量可进行折减；
(2) 当混凝土中掺有大量矿物掺合料时，弹性模量可按规定龄期根据实测数据确定。

2 钢材的弹性模量 E_s 可取 $206 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ ，剪切变形模量 G_s 可取 $79 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ ，泊松比可取 0.3。

3.5.4 地基岩土土的等效弹簧刚度可采用实测或计算方法确定；各类结构分析中的地基等效弹簧刚度可采用本规范相关各章规定的方法确定，当有依据时也可采用其他方法确定；采用有限元模型时，地基的等效弹簧刚度可由静力分析确定。

3.6 作用效应组合和抗震验算

3.6.1 地震作用效应与核电厂各种工况下的荷载效应（包括正常运行荷载效应、预期运行事件引起的附加荷载效应和事故工况引起的附加荷载效应等）进行最不利的组合。

3.6.2 核电厂抗震 I、II 类物项均应基于设计基准地震动进行抗震验算，并满足以下要求：

1 抗震 I 类物项应满足核电厂在极限安全地震动和运行安全地震动作用下的结构完整性和设计功能要求；

2 抗震 II 类物项应满足在极限安全地震动作用下结构完整性要求；当运行安全地震动超过极限安全地震动的 1/3 时，尚应满足运行安全地震动作用下的功能性要求；

3 核电厂各物项在抗震验算中具体采用的荷载组合和分项系数，应满足本规范相关各章的要求。

3.6.3 抗震验算包括承载力验算、变形验算、稳定性验算、裂缝宽度验算、疲劳效应验算等；应满足以下要求。

1 构件截面抗震承载力验算的原则表达式为：

$$S \leq k \times R \quad (3.6.3-1)$$

式中 S ——荷载组合作用效应（内力）设计值；

k ——承载力调整系数；

R ——截面承载力限值。

2 结构变形验算的原则表达式为：

$$S \leq R \quad (3.6.3-2)$$

式中 S ——荷载组合作用效应（变形）设计值；

R ——变形限值。

3 抗震验算的具体表达式、承载力调整系数和相应限值应满足本规范各章的要求；本规范未作具体规定时，可采用相关技术标准的规定。

3.6.4 抗震设计宜结合不同堆型核电厂以及厂址区域的地震活动背景进行地震裕量或抗震安全概率分析，以评估超设计基准工况的影响。基于性能的抗震安全概率评估参考方法见附录 E。

3.7 抗震措施

3.7.1 复杂或不规则的建筑物和构筑物，应经分析确定是否设置防震缝分割结构体系。

1 当能建立合理的分析模型且有可靠的加强结构的抗震构造措施时，可不设置防震缝；

2 防震缝可将复杂的结构体系分割为较为规则、宜于分析的部分；防震缝应有足够宽度防止两侧结构在地震作用下发生碰撞。

3.7.2 抗震 I 类和抗震 II 类结构宜坐落于基岩或剪切波速大于 300m/s 的地基上，地基性质不应有显著差异。

3.7.3 为减少相邻地上结构间的差动，在可能条件下宜将这些结构建在同一基础上。

3.7.4 可采用阻尼器增加结构体系的耗能能力、可采用隔振器减小设备的振动。

3.7.5 在进行技术和经济可行性的充分论证后，建筑物和构筑物可采用基底隔震技术。

3.7.6 应采取措施保障非结构构件（天花板、装饰贴面、隔断、照明灯具等）的抗震安全。

3.7.7 抗震 I、II 物项的抗震构造措施除应满足本规范各章的要求之外，不宜低于相关非核设施抗震技术标准中相对设防烈度提高一度的要求。

4 设计地震动

4.1 基本规定

- 4.1.1** 核电厂抗震 I、II 类物项的设计基准地震动不应小于相应水准的厂址设计基准地震动。
- 4.1.2** 地震安全性评价应提供对应不同设计基准期、不同超越概率的地震动时程和相应地震动参数，并应充分考虑其不确定性。
- 4.1.3** 核电厂非核抗震类物项的抗震设防烈度及相应设计地震参数可根据我国地震动参数区划图确定或经厂址地震安全性评价确定。
- 4.1.4** 地震安全性评价除应遵守本章要求外，尚应符合国家标准《工程场地地震安全性评价》和《核电厂工程地震调查与评价规范》的相关规定。

4.2 设计基准地震动参数

- 4.2.1** 核电厂设计基准地震动参数应符合下列要求：
- 1 设计基准地震动参数包括水平方向和竖直方向的设计基准加速度峰值和相应的设计基准地震反应谱。
 - 2 竖向设计加速度峰值与水平向设计加速度峰值的比值由厂址地震安全性评价结果确定，取值范围为 $2/3 \sim 1$ 。
- 4.2.2** 设计基准地震动参数的作用基准点定义于厂址地表、场地平整后的地表或地基标高处的自由场。
- 4.2.3** 设计基准地震动加速度峰值包括极限安全地震动加速度峰值和运行安全地震动加速度峰值。无论厂址地震安全性评价结果如何，对应反应谱零周期的水平向极限安全地震动加速度峰值的取值不应小于 $0.15g$ 。运行安全地震动加速度峰值主要用于核电厂运行安全的控制；若用于抗震设计，其取值可综合考虑厂址地震安全性评价结果、设计中的荷载组合与地震作用效应计算方法、相关物项的完整性及功能要求等综合确定。
- 4.2.4** 设计基准地震反应谱可采用经相关主管部门批准的厂址特定地震反应谱或标准设计反应谱；采用的标准设计反应谱（示例见附录 F）应包络厂址特定地震反应谱。

4.3 设计地震动加速度时程

- 4.3.1** 设计地震动加速度时程可调整与厂址地震背景和场地条件相近的实测强震加速度时程得出，或采用其它数学方法生成。
- 4.3.2** 设计地震动加速度时程可生成单组或多组，每组应包括两个正交水平方向和一个竖直方向的时程。
- 4.3.3** 设计地震动加速度时程应符合下列要求：
- 1 加速度时程的傅立叶相位谱具有在 $0 \sim 2\pi$ 相角范围内均匀随机分布的特征；
 - 2 在满足加速度时程包络函数的条件下，可以采用频域或时域的调整方法，使设计地震动加速度时程的反应谱能包络不同阻尼比的设计基准地震反应谱（目标反应谱），谱值低于目标反应谱的控制点数不得多于 5 个，相对误差不得超过 10%，且反应谱控制点处谱值总和不得低于目标反应谱的相应值；

3 在 0.2~33Hz 频率范围内,反应谱的控制点数不得少于 75 个,且应大体均匀分布于频率的对数坐标上,各频段的频率增量可按本规范表 3.4.1 采用;

4 每条设计地震动时程的强震持续时间不应小于 6s,可取 6~15s;总持续时间不宜小于 25s。

4.3.4 设计地震动加速度时程尚应满足以下要求:

1 仅生成单组设计地震动加速度时程时,可采用如下两种方法并满足相应要求。

1) 基于功率谱调整加速度时程。由设计地震动时程计算得出的在 0.3~24Hz 频率范围内的功率谱的平均幅值,不小于对应频率区间内由目标反应谱得出的功率谱的 80%。设计地震动加速度时程的功率谱 $S(f)$ 依式 4.3.4-1 计算。

$$S(f) = \frac{|F(f)|^2}{\pi T_d} \quad (4.3.4-1)$$

式中 T_d ——时程平稳段的持续时间;

$|F(f)|$ ——时程平稳段的傅立叶振幅谱。

频率 f 处的功率谱平均幅值取频带 $[f - 0.2f, f + 0.2f]$ 内功率谱 $S(f)$ 的平均幅值。与设计地震反应谱对应的功率谱的计算方法见附录 G。

2) 基于反应谱调整加速度时程。生成的设计地震动时程应满足如下要求:

a 时程的离散时间间隔不得大于 0.01s;

b 计算设计地震动时程的 5%阻尼比反应谱所需控制点数在频带 $[f, 10f]$ 范围内不得少于 100 个,且在对数坐标下均匀分布于 0.1~50Hz 频段内;

c 设计地震动时程在所有控制点处的反应谱值不得低于目标反应谱的 10%;

d 反应谱的每个控制点,在其相应频率 $\pm 10\%$ 的频带内,谱值不能全部低于目标反应谱;

e 设计地震动时程的 5%阻尼比反应谱在所考虑频段内的所有控制点处,谱值不得超过 5%阻尼比目标反应谱的 1.3 倍。

2 当生成多组(至少 4 组)设计地震动加速度时程时,同一方向上各加速度时程反应谱的平均值应包络相应阻尼比的目标反应谱。

3 每两条设计地震动时程间的互相关系数不应大于 0.16。时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 间的互相关系数由下式计算:

$$\rho_{12} = \frac{E[(x_1(t) - m_1)(x_2(t) - m_2)]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (4.3.4-2)$$

式中 ρ_{12} —— 时程 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 间的互相关系数;

$E[\cdot]$ —— 数学期望;

m_1, m_2 —— 分别为 $x_1(t), x_2(t)$ 的均值;

σ_1, σ_2 —— 分别为 $x_1(t), x_2(t)$ 的标准差。

4.4 非基准点处的设计地震动

4.4.1 非基准点处的设计地震动可依据基准点处的设计基准地震动,经相关场地的地震反应分析得出。

4.4.2 场地地震反应分析方法及结果应满足以下要求:

1 水平均匀成层场地可采用一维波动方法或水平剪切悬臂梁方法计算,得出不同深度处的地震动;分析中可考虑场地介质的非弹性;地基模型底部刚性边界可取剪切模量大于地表剪切模量的 10 倍处。

2 非均匀场地可建立场地的二维有限元模型，计算不同地点和深度处的地震动，可考虑场地介质的非弹性；计算应满足以下要求：

- 1) 有限元网格的划分和时程分析时间步长的选择应可靠模拟地震动的不同频率成分；
- 2) 有限元计算域应包括相关核电厂物项和设计基准地震动作用基准点所在地基；
- 3) 有限元计算域的侧边界应采用适当的耗能边界（如粘性边界或透射边界）；当计算域底边界介质的剪切模量大于或等于地表剪切模量的 10 倍时，底边界可采用刚性假定；当底边界介质剪切模量小于地表剪切模量的 10 倍时，底边界可采用粘性边界；

3 可在底部边界输入地震动加速度时程，计算场地各点的地震反应时程和相应地震反应谱；经试算直至在基准点处得出的地震反应谱与设计基准地震反应谱相协调（宜满足本规范 4.3.3 条 2 款的要求）。

4.4.3 反应堆厂房基础底面标高处对应反应谱零周期的水平向极限安全地震动加速度峰值不应小于 0.15g。

5 地基、基础和边坡

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于抗震 I、II 类物项的地基、基础以及与抗震 I、II 类物项安全有关的边坡的抗震验算。

5.1.2 抗震 I、II 类物项不应采用液化土或软弱土构成的天然地基，也不宜选取水平方向力学性质差异大的岩土作为地基；同一结构单元的地基不应一部分为人工地基而另一部分为天然地基。

5.1.3 除本章规定者外，地基和基础的抗震设计尚应符合国家标准《建筑地基基础设计规范》和《建筑抗震设计规范》的相关规定。

5.2 地基和基础的抗震验算

5.2.1 本节适用于静承载力特征值大于 0.34MPa 或剪切波速大于 300m/s 的地基。

5.2.2 基础的抗震承载力验算和基础裂缝宽度验算应满足本规范第 6 章的要求。

5.2.3 抗震 I、II 类物项的地基和基础应进行抗震稳定性验算。

5.2.4 基础抗倾覆及基础底面抗滑移验算可采用拟静力法。作用效应组合及抗震验算安全系数见表 5.2.4，作用效应组合应考虑对基础稳定性最不利的作用方向。

表 5.2.4 基础稳定性验算的作用效应组合及最小安全系数

抗震物项分类	作用效应组合	最小安全系数	
		抗倾覆	抗滑移
I 类	$G+H+E_s$	1.1	1.1
I、II 类	$G+H+E_o$	1.5	1.5

注：(1) 表中 G 为永久荷载效应，含自重效应、固定设施荷载效应和上浮力效应； H 为侧向土压力效应； E_s 和 E_o 分别为极限安全地震和运行安全地震作用效应，包括基础自身和上部结构传给基础的地震作用效应，地震作用效应考虑水平和竖直方向。

(2) 当基础上作用有对稳定性不利的活荷载时，作用效应组合中尚应包括该活荷载作用效应。

(3) 各作用效应的分项系数均取 1.0。

5.2.5 天然地基的承载力验算应符合以下要求：

1 当与运行安全地震作用效应 E_o 组合时，基础底面接地率应大于 75%，且应满足下式要求：

$$P \leq 0.85f_{SE} \quad (5.2.5-1)$$

$$P_{max} \leq 0.90f_{SE} \quad (5.2.5-2)$$

式中 P 、 P_{max} ——分别为基础底面平均压应力设计值和基础底面边缘的最大压应力设计值；
 f_{SE} ——调整后的地基抗震承载力设计值，取值按国家标准《建筑抗震设计规范》

GB50011采用。

2 当与极限安全地震作用效应 E_s 组合时，基础底面接地率应大于50%，且符合本条式（5.2.5-1）和式（5.2.5-2）的要求。

5.2.6 矩形基础底面接地率可按下式计算。

$$\beta = (a/b) \quad (5.2.6-1)$$

$$a = 3b[1/2 - M/(N \cdot b)] \quad (5.2.6-2)$$

式中 β ——基础底面接地率(%);
 a ——翘离情况下基础底面实际接地宽度(m);
 b ——基础宽度(m);
 M 、 N ——分别为荷载组合在基础底面引起的倾覆力矩($N \cdot m$)和竖向力(N)，后者包括结构与设备自重、竖向地震作用(方向与重力相反)和上浮力等。

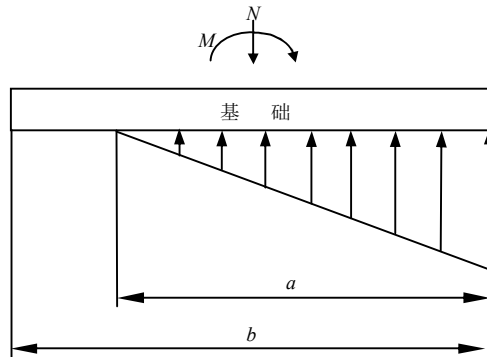


图5.2.6 矩形基础底面接地率计算

5.2.7 地基抗震稳定性验算可采用拟静力法、动力有限元法等进行，采用动力有限元方法进行计算时，可使用有效应力法或总应力法。

5.2.8 地基抗震稳定性验算的地震动输入和地基计算域应满足以下要求：

1 采用拟静力法时，地基各单元重心处的地震动加速度取地表面设计地震动加速度、不随深度变化；

2 采用有动力限元法时，地基底面输入的地震动加速度时程应基于核电厂厂址基准点处的设计基准地震动通过具体场地的地震反应分析得出，地震反应分析应满足本规范 4.4.2 条要求；地基计算域范围可依本规范附录 A.2 节确定。

5.2.9 地基抗震稳定性验算的作用效应组合及最小安全系数见表 5.2.9，作用效应组合应考虑对地基稳定性最不利的作用方向。

表 5.2.9 地基抗震稳定性验算的作用效应组合及最小安全系数

抗震物项分类	作用效应组合	最小安全系数	
		拟静力法	动力有限元法
I、II类	G+H+E _s	2.0	1.5

注：有关作用效应组合的说明可参见表 5.2.4。

5.3 边坡的抗震稳定性验算

5.3.1 与抗震 I、II类物项安全相关的边坡应进行抗震稳定性验算。

5.3.2 应进行稳定性验算的边坡包括：距抗震 I、II类物项外边缘的水平距离小于 1.4 倍边

坡高度的可能危及其安全的边坡，以及在上述距离之外但地震地质勘查表明对抗震Ⅰ、Ⅱ类物项安全有威胁的边坡。

5.3.3 边坡抗震稳定性验算可采用拟静力法和动力有限元等方法。

5.3.4 采用拟静力法进行边坡抗震稳定性验算时，各单元重心处的地震动加速度取地表面设计地震动加速度的1.5倍、不随深度变化；当采用动力有限元法进行边坡抗震稳定性分验算时，边坡底面输入地震动加速度时程应基于核电厂厂址基准点处的设计基准地震动通过具体场地的地震反应分析得出，地震反应分析应满足本规范4.4.2条要求；边坡计算域应充分包括可能失稳的岩土体。

5.3.5 边坡抗震稳定性验算的作用效应组合及最小安全系数见表5.3.5。

表 5.3.5 边坡抗震稳定性验算的作用效应组合及最小安全系数

抗震物项分类	作用效应组合	最小安全系数	
		拟静力法	动力有限元法
Ⅰ、Ⅱ类	G+H+Es	1.5	1.3

注：有关作用效应组合的说明可参照表5.2.4。

5.4 地基液化判别

5.4.1 对存在饱和砂土和饱和粉土地基，应进行液化判别。对存在饱和黄土、饱和砾砂的地基，其液化可能性应进行专门评估。

5.4.2 饱和砂土和饱和粉土地基的液化判别可采用标准贯入试验判别方法。当未经杆长修正的实测标准贯入锤击数小于或等于液化判别标准贯入锤击数临界值时，饱和土可判为液化土。在地面下20m深度范围内，液化判别标准贯入锤击数临界值可按式计算：

$$N_{cr} = N_0 [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (5.4.2)$$

式中 N_{cr} —— 液化判别标准贯入锤击数临界值；

N_0 —— 液化判别标准贯入锤击数基准值，可按表5.4.2采用；

d_s —— 饱和土标准贯入点深度（m）；

d_w —— 地下水位（m）；

ρ_c —— 粘粒含量百分率，当小于3或为砂土时，应采用3；

表5.4.2 液化判别标准贯入锤击数基准值 N_0

极限安全地震动加速度峰值（g）	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
标准贯入锤击数基准值 N_0	10	12	14	16	18	20

注：当极限安全地震动加速度峰值不等于表中数值时，可经线性插值确定相应的标准贯入锤击数基准值。

5.4.3 可按国家标准《建筑抗震设计规范》规定的方法计算液化指数并确定地基液化等级。液化等级为中等或严重的地基，不应用作抗震Ⅰ、Ⅱ物项的地基。液化等级为轻微的地基，可在采取消除液化危害的措施后用作抗震Ⅰ、Ⅱ物项的地基。

6 安全壳、建筑物和构筑物

6.1 一般规定

6.1.1 本章适用于混凝土安全壳、钢安全壳及其它抗震I、II类建筑物和构筑物的抗震设计。

6.1.2 安全壳宜采用有限元计算模型，其他建筑物、构筑物宜采用有限元模型或板、壳等计算模型，整体基础底板宜采用有限元模型或厚板计算模型；应力计算可采用弹性分析方法。

6.1.3 当应力计算采用的模型与地震作用计算采用的模型不同时，可将地震作用的计算结果转换为应力计算模型中的等效作用。

6.1.4 当考虑结构、基础与地基的相互作用时，可采用整体方法或子结构方法进行分析；结构可采用有限元模型或集中质量模型，地基可采用有限元模型或集中参数模型。

6.1.5 当设置防震缝时，防震缝的宽度应按地震反应变形确定，应大于或等于防震缝两侧物项地震变形平方和的平方根的2倍；伸缩缝和沉降缝的设计应满足防震缝的要求。

6.2 作用效应及其组合

6.2.1 安全壳和其他建筑物、构筑物的抗震设计应考虑下列各类作用效应。

1 正常运行和停堆期间承受的作用效应 N ，包括以下各项：

1) 永久荷载效应 D ，包括自重效应和固定设备荷载效应；

2) 活荷载效应 L ，包括任何可活动的设备荷载效应以及施工前后的临时荷载效应；

3) 施加预应力产生的荷载效应 Q ；

4) 正常运行或停堆期间的温度作用效应 T_0 ；

5) 正常运行或停堆期间的管道和设备反力效应 R_0 ，但不包括永久荷载和地震作用产生的反力效应；

6) 侧向土压力效应 H ；

7) 流体压力效应和未在本款列出的重力效应之外的其它作用效应 F ；

8) 与吊车有关的荷载效应 C （亦记为 C_{cr} ），如吊车的最大轮压，吊车移动所产生的竖向、横向及纵向力效应，且应计及动力系数；

9) 雨荷载效应 R ；

10) 雪荷载效应 S ；

11) 安全壳内部或外部压力引起的外压荷载效应 P_v ；

12) 屋面活荷载效应 L_r 。

2 严重环境条件下运行安全地震动产生的地震作用效应 E_0 ，包括运行安全地震动引起的管道和设备反力效应。

3 极端环境条件下极限安全地震动产生的地震作用效应 E_s ，包括极限安全地震动引起的管道和设备反力效应。

4 事故条件下产生的作用效应 A ，包括下列各项：

1) 设计基准事故工况下的压力荷载效应 P_a ；

2) 设计基准事故工况下温度作用效应 T_a ，包括正常运行或停堆期间的温度作用效应 T_0 ；

3) 设计基准事故工况下管道和设备反力效应 R_a , 包括正常运行或停堆期间的管道反力效应 R_0 ;

4) 设计基准事故工况下的局部作用效应 Y_y , 包括以下各项:

- a 管道破裂时破裂管道在结构上产生的荷载效应 Y_r ;
- b 管道破裂时在结构上产生的喷射冲击荷载效应 Y_j ;
- c 管道破裂时施加于结构的飞射物撞击荷载效应 Y_m 。

5 设计基准事件中, 内部溢水或外部水淹施加于结构的荷载效应 H_a 。

6.2.2 抗震设计应考虑下列作用效应的组合:

1 钢筋混凝土安全壳和钢安全壳采用如下作用效应组合:

- 1) 正常运行作用与严重环境作用的效应组合 $N+E_0$;
- 2) 正常运行作用与严重环境作用以及事故工况下作用的效应组合 $N+E_0+A$;
- 3) 正常运行作用与严重环境作用以及事故工况后水淹作用的效应组合 $N+E_0+H_a$;
- 4) 正常运行作用与极端环境作用的效应组合 $N+E_s$;
- 5) 正常运行作用与极端环境作用以及事故工况下作用的效应组合 $N+E_s+A$ 。

2 安全壳以外其他抗震 I类建筑物和构筑物采用本条1款中的4)、5)类作用效应组合或1)、2)、4)、5)类作用效应组合。

3 抗震II类建筑物和构筑物采用本条1款中的1)、2)类作用效应组合或4)、5)类作用效应组合。

6.2.3 各种作用效应组合的采用尚应符合下列要求:

1 除 $N+E_0$ 以外的各种作用效应组合中, 若不均匀沉降、徐变或收缩产生的作用效应比较显著, 应按永久荷载加入组合; 其作用效应应按实际情况进行计算。

2 作用效应 P_a 、 T_a 、 R_a 、 Y_y 均应乘以相应的动力系数, 侧向土压力效应 H 中应计入动土压力, 活荷载效应应包括运动荷载的冲击效应。

3 在包含设计基准事故工况下局部作用效应 Y_y 的各种作用效应组合中, 首先可在不考虑 Y_y 的情况下进行承载力验算; 在充分论证任何与安全有关的系统不致丧失其应有功能的条件下, 容许加入 Y_y 后部分截面的内力超过其承载力。

4 作用效应 P_a 、 T_a 、 R_a 和 Y_y 均应取最大值, 但经时程计算判断后, 可考虑上述作用效应的滞后影响。

6.2.4 作用效应组合及各种作用效应的分项系数可按本规范附录H的规定采用。

6.3 抗震验算

6.3.1 抗震I、II类建筑物和构筑物应满足构件承载力的验算要求。

6.3.2 抗震验算通用表达式为

$$k_i \times S_{Ri} \geq S_i = \sum \gamma_{ij} \times S_{ijk} \quad (6.3.2)$$

式中 S_{Ri} ——第i种作用效应限值, 除本规范规定者外, 可采用其他相关技术标准的规定;

k_i ——对应第i种作用效应的调整系数; 除本规范规定者外, 可采用其他相关技术标准的规定;

S_i ——第i种作用效应组合设计值;

γ_{ij} ——第i种组合中的第j种作用效应的分项系数;

S_{ijk} ——第i种组合中的第j种作用效应标准值。

6.3.3 混凝土安全壳应验算下列各项承载力:

- 1 正截面受压、受拉和受弯承载力；
 - 2 径向受剪承载力；
 - 3 切向受剪承载力，此时可不计入混凝土的抗剪强度；
 - 4 当有轴向拉力存在时，集中力作用下的受冲切承载力可不计入混凝土的冲切抗剪强度；
 - 5 扭矩作用下的受扭承载力。
- 6.3.4** 混凝土安全壳和抗震I、II类建筑物、构筑物的混凝土基础底板除应满足规定的承载力要求外，尚应验算裂缝宽度，最大裂缝宽度不应超过0.3mm。裂缝宽度计算中，各种作用效应的分项系数均取1.0。

7 地下结构和地下管道

7.1 一般规定

- 7.1.1 本章适用于抗震 I、II 类地下结构和地下管道的抗震设计。
- 7.1.2 地下结构和地下管道宜修建在均匀、密实的地基上。
- 7.1.3 地下结构周边岩土应充分满足地震作用下的稳定性要求。
- 7.1.4 地下结构各高程处的地震动,除本章有专门规定者外,应采用本规范 4.4 节方法确定。

7.2 地下结构的地震作用

- 7.2.1 本节适用于地下取水口、排水口、地下竖井和取水泵房等的地震作用计算。
- 7.2.2 地震作用计算可采用下列方法进行:
- 1 半埋或浅埋(埋深约一倍洞径)的地下结构,可采用反应位移法或反应加速度法(见附录 J)计算地震作用;埋深较大时,若结构尺寸与地震波长相比较小,可根据周边岩土变形计算地下结构的地震作用;
- 2 地下结构和半地下结构均可采用动力有限元法计算地震作用。
- 7.2.3 地下结构地震作用计算中,周边岩土的压缩刚度和剪切刚度应考虑岩土介质的动力特性、地下结构的形状和刚度等,通过试验或计算确定。
- 7.2.4 计算地下结构的地震反应时,可不计入竖向地震作用。

7.3 地下管道的地震作用

- 7.3.1 本节适用于地下直埋管道(含管廊和隧洞等)的地震作用计算。
- 7.3.2 地下管廊应进行横向和纵向地震作用计算。
- 7.3.3 均匀地基中远离接头、弯头、分岔等部位的地下直管的地震作用效应计算可采用以下方法:
- 1 管截面最大轴向地震应力可按式(7.3.3-1)计算。

$$\sigma_n = \frac{EV_e}{\alpha_a c} \quad (7.3.3-1)$$

式中 σ_n ——地下直管最大轴向地震应力 (N/m^2);

E ——直管材料的弹性模量 (N/m^2);

V_e ——地下直管所在高程处的最大地震动速度 (m/s);

c ——地基中沿管道传播的地震波的视波速 (m/s);

α_a ——轴向应力波速系数,可根据起控制作用的地震波型按表 7.3.3 采用。

表 7.3.3 波速系数

波型	压缩波	剪切波	瑞利波
轴向应力波速系数 α_a	1.0	2.0	1.0
弯曲应力波速系数 α_b	1.6	1.0	1.0

2 地震作用引起的管壁与周边岩土间的摩擦力所产生的管截面最大轴向应力可按式 (7.3.3-2) 计算。

$$\sigma_n = \frac{f_n \lambda}{\delta A_n} \quad (7.3.3-2)$$

式中 f_n ——单位管长管壁与周边岩土间的最大摩擦力 (N)；

λ —— 地下直管所在高程处起控制作用的地震波的视波长 (m)，当地下直管采用柔性分段接头时，应取分段的管长；

A_n ——地下直管管壁的净截面面积 (m²)。

δ —— 计算系数，取 4.0。

3 管截面最大地震弯曲应力可按式 (7.3.3-3) 计算。

$$\sigma_b = \frac{Er_0 a}{(\alpha_b c)^2} \quad (7.3.3-3)$$

式中 σ_b —— 地下直管的最大地震弯曲应力 (N/m²)；

a —— 地下直管高程处的最大地震动加速度 (m/s²)；

r_0 —— 应力计算点至管截面中性轴的距离 (m)；

α_b —— 弯曲应力波速系数，可根据起控制作用的地震波型按表 7.3.3 采用。

4 管截面最大地震轴向应力应取式 (7.3.3-1) 和式 (7.3.3-2) 计算结果的较小值；地下管道按最大轴向应力与最大弯曲应力进行设计。

7.3.4 地下管道沿线的地形和地质条件有明显变化时，应进行专门的地震反应计算，可按弹性地基梁方法计算其轴向应力和弯曲应力。

1 可根据管道沿线地形和地质条件的变化选用下列任一种地基模型计算管道高程处的地震动：

1) 采用分段一维模型，将地基土沿管长进行分段，各段按一维剪切波动方法分别计算，计算时可考虑地基土的非线性特性；

2) 采用集中质量模型，将地基土沿管长进行分段，各段以等效集中质量和弹簧模拟，各集中质量间用反映地基岩土刚度的弹簧连接；

3) 采用有限元模型，沿管道走向将周边适当范围的地基岩土划分为有限元网格，计算范围的侧边界可采用透射边界，底边界可采用粘性边界或透射边界。

2 地基岩土的弹簧刚度可根据现场试验或计算确定。初步计算时可采用下列公式：

$$k_t = DLK_t \quad (7.3.4-1)$$

$$k_n = \beta DLK_n \quad (7.3.4-2)$$

$$K_t = 3G \quad (7.3.4-3)$$

$$K_n = \beta K_t \quad (7.3.4-4)$$

式中 k_n 、 k_t ——分别为沿管道轴向和横向的地基弹簧刚度 (10⁶N/m)；

K_n 、 K_t ——分别为沿管道轴向和横向的基床系数 (MPa/m)；

G ——与地震作用下地基最大应变幅值相应的地基岩土剪切模量；
 β ——计算系数，可取 1/3；
 D ——管道直径（m）；
 L ——集中弹簧间距（m）。

7.3.5 地下管道弯头段、分岔段和锚固点的地震应力计算可采用弹性地基梁方法。管道周围地基的轴向和横向弹簧刚度可按 7.3.4 条 2 款方法确定。管道柔性接头的刚度应采用管道轴向弹簧和转动弹簧模拟。

7.3.6 在地下管道与其它工程结构的连接处或管道转折处，应计算管道与周围岩土间或管道两端点间相对运动在管道内产生的附加应力。相对运动产生的管道附加应力与地震应力可按平方和的平方根法（SRSS）组合。

7.3.7 地下管道采用分段柔性接头连接时，应计算接头变形；接头处的最大轴向相对位移和角位移可按下列公式计算：

$$u = \frac{V_e L}{\alpha_a c} \quad (7.3.7-1)$$

$$\theta = \frac{aL}{(\alpha_b c)^2} \quad (7.3.7-2)$$

式中 u 、 θ ——分别为管道柔性接头处的最大轴向线位移和角位移；

L ——两柔性接头间的管道长度，数值不大于地震波视波长的 50%。

7.3.8 当地下管廊、隧洞的截面很大而壁厚相对较薄时，地震引起的环向应变可按本规范 7.2 节方法进行补充计算。

7.4 抗震验算

7.4.1 地下结构和地下管道的作用效应组合应符合下列要求：

- 1 抗震Ⅰ类地下结构和地下管道的正常作用效应组合应包括极限安全地震作用效应；
- 2 抗震Ⅱ类地下结构和地下管道的正常作用效应组合应包括运行安全地震作用效应，特殊作用效应组合应包括极限安全地震作用效应。
- 3 地下结构和地下管道承载力计算中所考虑的地震作用，应包括结构及其支承设备的地震作用、地震动水压力和地震动土压力。

7.4.2 地下结构和地下管道的基础、地基应进行承载力和稳定性验算。

- 1 地下结构和地下管道地基的抗震承载力和抗震稳定性验算，应满足本规范第 5 章的要求；
- 2 取水口、排水口等地下结构基础的抗震承载力和抗震稳定性验算应满足本规范第 5 章的要求。
- 3 地下结构和地下管道的截面抗震验算应符合下列要求：
 - 1) 混凝土地下结构和地下管道应按国家标准《水工钢筋混凝土结构设计规范》中Ⅰ级和Ⅱ级建筑物的有关要求强度和抗裂验算；
 - 2) 地下钢管可参照国内相关技术标准的要求进行验算。

7.4.3 地下管廊变形缝最大允许位移和管道接头变形限值可参照国内相关技术标准采用。

7.5 抗震措施

7.5.1 为消除地下结构和地下管道地基的不均匀沉降，可采用换土或人工地基等措施改善地基，同时加强结构自身抗震能力。

7.5.2 现浇钢筋混凝土廊道可沿长度方向每隔 20~25m 设置防震缝，防震缝宽度可按计算确定，不能以后浇带替代。

7.5.3 地下廊道纵向钢筋的最小配筋率每侧不宜小于 0.3%，钢筋直径不小于 12mm，并宜在廊道中部相当于廊段长度 1/3 的范围内适当增加纵向钢筋面积。当廊道位于软弱地基中时，其顶、底板纵向钢筋的配筋量尚应适当增加。

8 设备和部件

8.1 一般规定

8.1.1 设备(含部件)安全等级的划分,应符合现行国家核安全导则《用于沸水堆、压水堆和压力管式反应堆的安全功能和部件分级》(HAD102/03)的规定。

8.1.2 设备的抗震设计应符合下列规定:

1 抗震 I 类和 II 类设备的抗震设计应满足本规范第 3 章的基本要求。

2 安全一级设备应考虑地震动引起的低周疲劳效应;疲劳计算可假定遭受一次极限安全地震动和 5 次运行安全地震动作用;或假定遭受两次极限安全地震动作用;每次地震动引起的设备应力循环次数可由地震反应时程分析确定,或假定每次地震至少引起 10 次最大应力循环。

3 设备设计中应采取措施避免设备与支承结构发生共振;设备的基本自振频率应在支承结构基本自振频率的 0.5~2.0 倍范围之外。

4 地震时和地震后,设备应保证其结构完整性(包括承压边界的完整性),抗震 I 类的能动设备还应保证其可运行性。相邻设备之间或设备与相邻结构之间不得因动态位移发生碰撞而影响结构的完整性或可运行性。

5 支承节点的设计应符合设备技术规格书的规定。

6 设备应牢固地锚固于支承结构;浮置于基础的设备不得在地震时发生倾覆、滑移、翘离和被抛掷。

7 除另有说明者外,设备抗震计算均应采用弹性分析方法。

8 起重运输设备的抗震要求可参见我国《起重机设计规范》(GB/T 3811)等技术标准。薄壁贮液容器应验算器壁压应力,临界压应力的计算可参考相关技术标准的规定。

8.2 地震作用和地震作用效应

8.2.1 抗震 I 类和 II 类设备可通过抗震分析、试验或两者结合的方法确定其地震作用效应。抗震分析可采用时程分析法、反应谱法或等效静力法。能动设备可采用试验方法验证其可运行性;验证试验可采用本规范附录 K 的规定。

8.2.2 等效静力法可用于以单质点模型或单梁模型等模拟的设备,但不适用于反应堆冷却剂系统的设备。

采用等效静力法时设备质心的地震作用可按下式计算:

$$F = \eta \frac{G}{g} S_a \quad (8.2.2)$$

式中 F ——设备质心的地震作用 (N);

G ——设备总重力荷载,包括设备、保温层、正常贮存物、有关附件及支承件等的自重 (N);

g ——重力加速度 (m/s^2);

S_a ——设备所处楼层反应谱的最大谱幅值 (m/s^2);

η ——多频效应系数, 对于单自由度系统可取 1, 其它系统宜采用 1.5。

8.2.3 采用反应谱法进行抗震计算时应符合下列规定:

1 根据设备所在位置可分别采用地震反应谱或楼层反应谱作为输入进行计算。多个振型和三个分量地震作用的组合可采用本规范附录 B 的方法;

2 当设备支承于同一结构或两个以上结构的多个支座、且各支承点处的运动有很大差别时, 应采用各支承点处的反应谱作多点输入分析, 或采用各支承点处反应谱的上包络线进行计算(见附录 C), 并应计入各支承点处相对位移的影响。支承点处的最大位移可由结构动力计算得出, 或按下式计算:

$$u_i = \frac{ZPA_i}{\omega_1^2} \quad (8.2.3)$$

式中 u_i —— i 支承点处的最大位移值 (m);

ZPA_i —— i 支承点处反应谱的零周期加速度值 (m/s^2);

ω_1 ——结构的基本自振圆频率 (rad/s)。

3 上述各支承点处的位移应按最不利组合施加于设备的相应节点, 计算由支座相对位移引起的应力。

8.2.4 采用时程分析法计算设备地震作用时应符合下列规定:

1 非线性系统的分析应采用直接积分法, 线性系统或具有间隙的几何非线性系统的分析可采用振型叠加法;

2 当设备多个支承点的输入运动不同时, 可采用时程法进行多点输入动力反应分析(见附录 C)。

8.2.5 储液容器地震作用计算应符合下列规定:

1 贮液容器在抗震计算时应计入其承受的水平动液压力; 水平动液压力应包括脉冲压力和回流压力, 一般可采用刚性器壁理论计算; 薄壁贮液容器应计入器壁柔度的影响。

2 乏燃料贮存格架及其他浸入水中的部件应计入地震时的动水压力和阻尼, 可通过对部件引入附加质量和附加阻尼进行计算。

3 计算中应考虑竖向地震作用产生的竖向液压力的影响; 位于楼板或地面上的贮液容器还应考虑其摇摆所产生的动液压力, 以及贮液与柔性地基动力相互作用产生的动液压力。

8.2.6 不与支承结构耦合的设备, 其地震作用应根据设备支承处的支承结构地震反应时程或楼层反应谱确定; 与支承结构耦合的设备, 其地震作用应根据支承结构底部或基底的地震动时程或地震反应谱确定。耦合的判别方法见本规范 3.2.2 条。

8.2.7 楼层反应谱除应符合本规范第 3 章规定外, 当设备主轴与支承结构的主轴方向不一致时, 应取最不利的地震作用作为设备的输入。

8.3 作用效应组合和设计限值

8.3.1 设备的抗震设计应采用地震作用效应和各级使用荷载效应的最不利组合。

8.3.2 除极限事故工况下需要正常运行并执行相关设计安全功能的设备(如人员闸门)外, 设备的使用荷载通常分为 A、B、C 和 D 四级。A 级使用荷载与核电厂正常运行工况相对应, B 级使用荷载与核电厂可能发生的中等概率事故(异常工况)相对应, C 级使用荷载与紧急工况相对应, D 级使用荷载与极限事故相对应。

8.3.3 除设备设计规格书中有具体规定者外, 抗震 I 类物项中的安全一级设备各级使用荷

载与地震动作用效应组合应符合以下规定。

- 1 设计工况荷载应考虑适用的设计荷载；
- 2 A 级或 B 级使用荷载效应应与运行安全地震动作用效应组合（如适用）；
- 3 C 级使用荷载效应不需要与地震动作用效应组合；
- 4 D 级使用荷载作用效应应与极限安全地震动作用效应组合。

8.3.4 除设备设计规格书中有具体规定者外，抗震 I 类物项中的安全二级和三级设备的荷载作用效应组合可采用 8.3.3 条的规定。

8.3.5 除设备设计规格书中有具体规定者外，抗震 II 类物项中的设备荷载作用效应组合可采用 8.3.3 条的规定。

8.3.6 设备应进行强度验算，相邻设备应进行防碰撞位移验算，贮液容器应进行器壁受压失稳验算，设备的基础和地脚螺栓应进行稳定性和强度验算，浮放的或高径比大的贮液容器应进行抗滑移，抗倾覆及抗翘离验算。

8.3.7 设备抗震验算的应力限值和设计限值可采用本规范附录 L 的规定。

9 工艺管道

9.1 一般规定

9.1.1 本章适用于金属架空工艺管道的抗震设计。工艺管道抗震设计除应符合本规范第 3 章的规定外，尚应满足本章的具体要求。

9.1.2 工艺管道安全等级的划分，应符合现行国家核安全导则《用于沸水堆、压水堆和压力管式反应堆的安全功能和部件分级》(HAD 102/03)确定的分级原则；消防管道等级划分可按《压水堆核电站防火设计规范》(GB/T 22158)执行。

9.2 地震作用和地震作用效应

9.2.1 管道的地震作用效应计算应符合本规范第 3 章的规定。

9.2.2 管道计算模型应满足下列规定：

1 计算模型应以锚固点或其他已知边界条件的点为边界；

2 应计入管道上的阀门及其它附件的自重，应考虑偏心距及偏心质量的影响。

3 计算中应满足支承点处的位移和约束要求、支承间的最大跨距要求、管道支承的最小刚度要求。当管道分担的支架质量对抗震计算结果影响较大时，应考虑管道分担的支架质量的影响。

9.2.3 管道地震作用计算可采用等效静力法、反应谱法或时程分析法。抗震 I 类管道应采用动力分析法（即反应谱法或时程法）进行抗震分析。抗震分析中，应考虑两个水平方向和一个竖直方向的振动输入；对具有两个或两个以上支承的管道系统，应考虑各支承点间的相对位移差；此外，尚应满足以下要求：

1 采用动力分析法时应考虑管道间的相互作用、外部约束、水力荷载和非线性等重要因素的影响；

2 管道采用本规范 8.2.2 条规定的等效静力法计算时应同时满足以下要求：

1) 有充分依据表明实际结构可用简单的模型模拟，且可导致保守的计算结果；

2) 可采用 1.5 倍包络反应谱的最大谱加速度作为输入，若采用小于 1.5 的系数，需进行充分论证。

9.2.4 管道抗震分析中采用的阻尼比可区别以下情况确定：

1 一般情况下阻尼比宜按本规范表 3.5.2 采用，表中数值适用于等效静力法、反应谱法和时程分析法；

2 当采用多支承点的包络谱对管道系统进行地震作用效应计算时，可根据管道的自振频率按下列规定采用阻尼比：

1) 当自振频率小于或等于 10Hz 时，阻尼比可取 5%；

2) 当自振频率大于或等于 20Hz 时，阻尼比可取 2%；

3) 当自振频率大于 10Hz 但小于 20Hz 时，阻尼比可基于本款 1)、2) 给出的数值由线性插值确定。

4) 在使用本款规定的与频率相关的阻尼比时，应当满足以下条件：

a 管道系统所包含的设备，可根据设备类型采用本规范 3.5.2 条规定的阻尼比；

b 若用于管道系统的修改和优化，应检查因设计保守性降低而引起的管道间距及相关设备地震作用的变化。

c 频率相关的阻尼比，不可用于依靠支承塑性变形耗散能量的管道系统和曾经观察

到应力腐蚀断裂的管道系统。

9.2.5 安全一级管道部件应验算地震引起的低周疲劳效应。疲劳计算应满足本规范 8.1.2 条 2 款的规定。

9.2.6 管道计算模型应包含足够数量的节点和自由度。可按以下步骤检查自由度数量是否足够。

1 检查各振型曲线是否光滑，振型曲线不光滑表明计算自由度数量不够；

2 振型曲线光滑时，对管道模型输入 $1g$ 加速度进行静力计算，将计算结果与相应分布质量模型的静力计算结果作对比，若支承或支承附近两者计算结果相差较大，仍表明自由度数量不够。

9.2.7 由支承管道和被支承管道组成的管道系统建模时，是否采用耦联模型应满足本规范 3.2.2 条的要求。另外，也可按支承管道和被支承管道的直径或截面惯性模量的比值进行判断；若被支承管道与支承管道的外径比小于 $1/4$ ，或被支承管道与支承管道的截面惯性模量比小于 $1/100$ ，抗震分析模型中可将被支承管道解耦。

9.2.8 被支承的管道系统建模时，振动输入取其与支承管道连接点处的地震反应，含连接点处的反应谱、加速度时程及位移。若采取其它简化输入方法，应验证其保守性。

9.2.9 管道支架抗震分析应满足以下要求：

1 应根据管道系统支架设计要求确定支架的功能及类型；支架的安全等级与被支承设备和管道的安全等级有关，当级别不同的两个或两个以上管道或设备共用一个支架时，支架安全等级应取被支承物项的最高等级。

2 管道抗震分析可取支架的实际刚度，也可对支架作刚性简化；采用后者方法时支架实际刚度应大于最小刚度限值，最小刚度限值取决于管道名义直径和壁厚等级。当一个支架支承多个管道时，不同位置的支架刚度应就各管道分别确定；采用刚性支架假设应进行论证。

3 支架分析的许用应力可采用本规范附录 L 的规定。

9.2.10 多支承的管道系统的抗震计算应考虑各支承点之间的位移差。当采用反应谱法计算管道系统地震反应时，位移差产生的作用效应按最不利组合叠加。计算位移差时应考虑振动相位差的影响。支承在单体混凝土建筑（如屏蔽和辅助厂房、安全壳内部结构等）内的管道系统，各支承点间的位移按同相考虑。不同建筑之间管道支承点的位移按异相考虑。

9.2.11 管道地震作用的组合可采用本规范附录 B 的方法计算。抗震 I 类系统管道因偏心质量导致的扭转效应被认定不可忽略时，应在分析模型中予以考虑。

9.2.12 应考虑抗震 I 类管道系统与非抗震 I 类管道系统的相互作用，并满足以下要求。

1 非抗震 I 类管道系统若与抗震 I 类管道系统的隔离不可实施或无效，则非抗震 I 类管道系统应满足与抗震 I 类管道系统相同的抗震设计要求。

2 非抗震 I 类管道系统若与抗震 I 类管道系统直接相连，则前者应包含在后者的分析模型中；非抗震 I 类管道系统自交界部位到相邻的第一个固定点间的部分，在极限安全地震动作用下，不应导致抗震 I 类管道系统的失效。

9.2.13 抗震 I 类管道系统可采用涉及材料非线性和几何非线性的非线性分析方法，只要相关指标（如承载力、最大裂纹长度、失去压紧及最大延性等）的抗震验算能满足与其抗震类别相适应的安全裕度。结构不可逆转行为（如与接合点的极限延性相关的行为）的出现应与预期的地震相关现象的出现频率相匹配。在任何情况下，规定的可接受准则（如密封性、最大相对位移、功能性等）应依据其抗震类别进行确切评估。

9.2.14 管道材料的选择应以经适当质保程序认定的材料性能参数为依据。应对材料、结构、系统与设备进行适当的老化评估以确保其长期运行的安全性。

9.2.15 应用 LBB 设计原则时，应通过分析或试验，采用被管理部门认可的程序，评估裂纹稳定性时，应考虑地震作用。

9.3 作用效应组合和设计限值

9.3.1 工艺管道的抗震设计应采用地震作用效应与核电厂各工况使用荷载效应的最不利组合。

9.3.2 工艺管道的使用荷载通常可分为 A、B、C、D 四级，A 级使用荷载与工艺管道的正常运行工况相对应；B 级使用荷载与工艺管道的异常工况相对应；C 级使用荷载与工艺管道的紧急工况相对应；D 级使用荷载与工艺管道的事故工况（极限事故）相对应。

9.3.3 除设计规格书中有具体规定者外，抗震 I 类物项中的安全一级管道各级使用荷载与地震动作用效应组合应符合以下规定。

- 1 设计工况荷载应考虑适用的设计荷载；
- 2 A 级或 B 级使用荷载效应应与地震动作用效应组合（如适用）；
- 3 C 级使用荷载效应不需要与地震动作用效应组合；
- 4 D 级使用荷载作用效应应与极限安全地震动作用效应组合。

9.3.4 除设计规格书中有具体规定者外，抗震 I 类物项中的安全二级和三级管道的荷载作用效应组合可采用 9.3.3 条的规定。

9.3.5 除设计规格书中有具体规定者外，抗震 II 类物项中的管道荷载作用效应组合可采用 9.3.3 条的规定。

9.3.6 工艺管道容许应力可参照下列规定采用：

- 1 安全一级管道的容许应力强度值 S_m 依本规范附录 L.1.1 条采用；
- 2 安全二级、三级管道的容许应力值 S 依本规范附录 L.1.3 条采用。

9.3.7 抗震 I 类物项安全一级管道的设计限值可采用本规范附录 M.1.1 条规定。

9.3.8 抗震 I 类物项安全二、三级管道的设计限值可采用本规范附录 M.1.2 条规定。

9.3.9 抗震 II 类物项管道的设计限值可采用本规范附录 M.1.3 条规定。

9.3.10 管道部件的应力指数可采用本规范附录 M.2 节规定。

9.4 抗震措施

9.4.1 管道支承应确保相关连接结构能以预期方式执行其功能，能够可靠传递设计荷载。

9.4.2 应尽可能避免管道系统与支承结构的主频发生共振。在可能发生共振的情况下，应适当修改设计以增加系统的阻尼。

9.4.3 为使管道系统具有足够的抗震约束且又允许发生热胀变形，可采用阻尼器或限位装置；分析中应考虑其实际阻尼效应。

9.4.4 管道的支承布置应使传递到设备上的荷载降至最小。

9.5 阻尼器

9.5.1 采用阻尼器以满足结构抗震或防冲击要求时，应符合本节规定。

9.5.2 应考虑管道系统和设备与阻尼器的相互作用，就以下因素评估阻尼器的疲劳强度：

- 1 未约束的管道位移或振动幅值；
- 2 传递给阻尼器的荷载以及管道系统或设备的运动受约束而产生的反应；
- 3 振动频率或承受的荷载循环次数；
- 4 防冲击作用的阻尼器若满足以下条件之一时无须进行疲劳评估。
 - 1) 电厂正常运行时阻尼器承受的荷载循环次数小于 2500 次，或
 - 2) 电厂正常运行时阻尼器的运动位移在其使用限值范围内。

9.5.3 阻尼器力学性能参数的确定应满足以下要求：

- 1 在管道系统或设备的结构分析中应考虑阻尼装置的组合有效刚度；
- 2 阻尼器刚度应基于结构与液压的协调确定，且考虑任何温度变化影响阻尼器刚度的因素；
- 3 若一个约束方向使用一对阻尼器时，应分别考虑端部间隙、启动值或锁紧后最大松弛

率的误差等确定各阻尼器的承载状态；当存在端部间隙误差时，不能假设两个阻尼器的承载状态相同。阻尼器承载力的分担应由设计规格书和技术条件控制。

9.5.4 阻尼器设计规格书应包括以下向供应商提出的要求：

- 1 总体的功能要求；
- 2 运行环境要求；
- 3 适用的技术标准；
- 4 材料、液压流体与润滑剂的技术标准；
- 5 考虑环境、结构与运行状态的阻尼器设计验证试验（含动态试验）要求；
- 6 产品组件的功能验证试验与认证要求；
- 7 包装、运输、装卸和储存要求；
- 8 附件和安装的说明；
- 9 阻尼器样机应提供型式试验报告；
- 10 阻尼器出厂时，应百分之百检验合格。

9.5.5 核电厂建造中或运行后增设的阻尼器亦应满足本节设计要求，以确保其正常工作和安全性。

10 地震监测与报警

10.1 一般规定

10.1.1 核电厂必须设置地震监测与报警系统。

10.1.2 地震监测与报警系统在平时和遭遇设计基准地震动时应运行可靠,地震报警指标应经充分论证。

10.1.3 核电厂地震监测与报警系统除满足本章要求之外,尚应符合其他相关技术标准的规定。

10.2 系统设备的布设

10.2.1 核电厂单堆布设三轴向加速度传感器的位置和数量不宜低于表10.2.1的规定。

表10.2.1 加速度传感器的布设位置和数量

设置位置		传感器数量	备注
自由场地		1	信号供系统触发和地震报警使用
反应堆基础底板		1	信号供系统触发和地震报警使用
反应堆 厂房内	设备(或管道)支承处	1	传感器布设点对应同一设备(或管道)及其支承处
	设备(或管道)	1	
反应堆 厂房外	抗震Ⅰ类设备(或管道)支承处	1	传感器布设点对应同一设备(或管道)及其支承处
	抗震Ⅰ类设备(或管道)	1	

注: (1) 由自由场地和反应堆基础底板处的传感器记录信号决定是否触发系统运行和是否发布地震报警信号;

(2) 可选择有代表性的或关键的设备(或管道)设置加速度传感器。

10.2.2 加速度传感器在被监测物项上的设置点应能反映该物项的基本振动性态,其设置方向应与物项抗震分析的主轴方向一致。

10.2.3 加速度传感器应设置在能确保自身正常工作、便于安装和检修的位置,且不影响核电厂运行。

10.2.4 加速度传感器应锚固于设置点,并设防护罩;应避免周边结构的破坏危及传感器的完整性和技术性能;设置于自由场的加速度传感器应有锚固墩,且有防雷、防雨、防潮、防电磁干扰等措施。

10.2.5 记录器和中心处理系统可就核电厂各反应堆独立设置或共同使用。

10.2.6 报警单元可设置于中心处理系统的机柜内,报警信号应传送至各反应堆主控制室。

10.3 设备功能与指标

10.3.1 加速度传感器宜满足以下性能指标:

1 动态范围不低于100dB;

2 在DC~80.0Hz频段有平直的响应曲线、且具线性相移特性,或通过校正计算得到的加速度记录具有上述特性;

- 3 粘滞阻尼常数在55%~70%范围内;
 - 4 在DC~80.0Hz频段内无伪共振现象;
 - 5 竖向加速度传感器的横向灵敏度不超过1%;
 - 6 最大量程不低于2g。
 - 7 在相应工作环境（包括温度、湿度、压力、振动和放射性等）下，传感器总体测量误差不大于全量程的5%，线性度变化在全量程的 $\pm 1.5\%$ 或0.01 g以内。
- 10.3.2** 记录器宜满足以下功能及技术指标。
- 1 记录数据存储于非易失性介质;
 - 2 动态范围不低于100dB;
 - 3 具备可靠的触发功能，不发生误触发和漏触发；触发阈值可在0.005 g~0.02 g范围内依需求设置;
 - 4 在DC~80.0Hz频段有平直的响应曲线，且具线性相移特性;
 - 5 具备预存储、零位显示和GPS校时功能;
 - 6 具备24小时以上自供电能力（包括对传感器供电）。
- 10.3.3** 中心处理系统宜满足以下功能和技术指标。
- 1 接收信号的通道数宜有冗余，且包括至少一个单独的参考时标记录通道;
 - 2 能不间断的读取记录器的输出数据；一旦触发即可存储数据，能保存加速度传感器触发前20秒和地震信号低于触发值后30秒的全部数据;
 - 3 具备数据实时传输、波形显示能力，能按要求绘制三轴向加速度时程曲线和地震反应谱，操作人员可在不影响正常地震监测的情况下在线分析数据;
 - 4 除可实施地震事件报警外，宜具备地震监测系统设备故障报警功能;
 - 5 可在现场对地震监测系统进行测试和标定。
- 10.3.4** 报警单元应满足以下功能要求：
- 1 接收地震事件报警信号并通过干触点继电器硬件实现报警;
 - 2 适应设定的地震事件报警阈值;
 - 3 报警信息在主控制室内由声、光等方式显示。

10.4 设备维护与检修

- 10.4.1** 地震监测报警系统的设备维修时间间隔不应超过18个月，可在反应堆大修期间进行。
- 10.4.2** 应根据实际采用的仪器设备制定仪器维护与检修技术规程。
- 10.4.3** 设备技术参数标定结果应在仪器维护与检修技术规程规定的限值内，技术参数不符合要求的仪器设备不能使用；仪器维护与检修后，应将重新标定的技术参数输入记录器。

附录 A 地基与结构的相互作用分析

A.1 地基的集中参数分析模型

A.1.1 不考虑地基介质动力参数的频率相关性时,可采用以下方法确定其等效弹簧刚度和等效阻尼系数。

1 等效弹簧刚度可采用下式计算:

$$\begin{aligned} K_x &= K'_x + K''_x \\ K_z &= K'_z + K''_z \\ K_\phi &= K'_\phi + K''_\phi \end{aligned} \quad (\text{A.1.1-1})$$

式中 K_x 、 K_z 、 K_ϕ ——分别为水平、竖向和摆动弹簧刚度;

K'_x 、 K'_z 、 K'_ϕ ——分别为基础置于地表时的水平、竖向和摆动弹簧刚度,计算公式见表 A.1.1-1 和表 A.1.1-2;

K''_x 、 K''_z 、 K''_ϕ ——分别为考虑基础埋置效应时的附加水平、竖向和摆动弹簧刚度,可由下式计算。

$$\begin{aligned} K''_x &= 2.17 \sum_{i=1}^n h_i G_i \\ K''_z &= 2.57 \sum_{i=1}^n h_i G_i \\ K''_\phi &= 2.17 \sum_{i=1}^n h_i G_i (d_i^2 + h_i^2 / 12) + 2.52 r^2 \sum_{i=1}^n h_i G_i \end{aligned} \quad (\text{A.1.1-2})$$

式中 n ——基础底面以上地基介质的分层数;

G_i ——地基介质各层的剪切模量;

h_i ——地基介质各层的厚度;

d_i ——地基介质各层中心至基础底面的距离;

r ——基础底面半径;矩形基础等效半径取以下三式计算结果的最大者。

$$\begin{aligned} r_x &= (1+\nu)(7-8\nu)\beta_x \sqrt{bL} / [16(1-\nu)] \\ r_z &= \beta_z \sqrt{bL} / 4 \\ r_\phi &= \sqrt[3]{3\beta_\phi b^2 L / 8} \end{aligned} \quad (\text{A.1.1-3})$$

式中 ν ——地基介质的泊松比;

β_x 、 β_z 、 β_ϕ ——计算系数,取值见图 A.1.1;

b ——水平运动方向的基础边长;

L ——水平运动正交方向的基础边长。

2 等效阻尼系数的计算公式见表 A.1.1-1 和表 A.1.1-2。

表 A.1.1-1 圆形基础的等效弹簧刚度和等效阻尼系数

运动方向	等效弹簧刚度	等效阻尼系数
水平	$K_x' = 32(1-\nu)Gr/(7-8\nu)$	$C_x = 0.576K_x r \sqrt{\rho/G}$
竖向	$K_z' = 4Gr/(1-\nu)$	$C_z = 0.85K_z r \sqrt{\rho/G}$
摆动	$K_\phi' = 8Gr^3/[3(1-\nu)]$	$C_\phi = 0.30K_\phi r \sqrt{\rho/G}/(1+\beta), \quad \beta = 3(1-\nu)J_0/(8\rho r^5)$

注： ν 为地基介质的泊松比， G 为地基介质的平均剪切模量， r 为圆形基础底面半径， ρ 为地基介质的平均密度， J_0 为上部结构和基础绕摆动轴的转动惯量。

表 A.1.1-2 矩形基础的等效弹簧刚度和等效阻尼系数

运动方向	等效弹簧刚度	等效阻尼系数
水平	$K_x' = 2(1+\nu)G\beta_x \sqrt{bL}$	同圆形基础相应计算公式，但其中基础等效半径应取矩形基础等效半径（见式 A.1.1-3）。
竖向	$K_z' = G\beta_z \sqrt{bL}/(1-\nu)$	
摆动	$K_\phi' = G\beta_\phi b^2 L/(1-\nu)$	

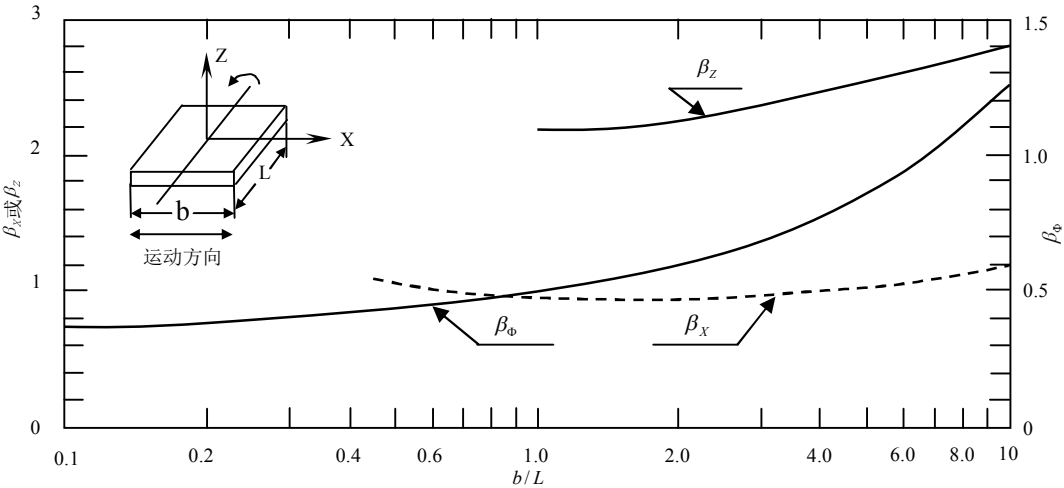


图 A.1.1 矩形基础的计算系数 β_x 、 β_z 和 β_ϕ

3 地基介质等效阻尼比的数值可由表 A.1.1-3 确定，当地基介质剪切波速 V_s 不等于表中给定数值时，可根据表中数值的线性插值确定。

表 A.1.1-3 地基介质的等效阻尼比

地基介质剪切波速 V_s (m/s)		500	1500
等效阻尼比 ζ (%)	水平方向	30	10
	摆动方向	10	5

A.1.2 考虑地基介质动力参数的频率相关性时，可采用以下方法确定其等效弹簧刚度和等效阻尼系数。

1 地基介质等效弹簧刚度可按式计算。

$$\begin{aligned} K_x &= G r F_x \\ K_z &= G r F_z \\ K_\phi &= G r F_\phi \end{aligned} \tag{A.1.2-1}$$

式中 G ——地基介质剪切弹性模量(MPa)， $G=E/[2(1+\nu)]$ ， E 为弹性模量， ν 为泊松比；

r ——基础等效半径 (m);
 F_x 、 F_z 、 F_φ ——无量纲系数, 表达式如下:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{f_{x1}}{(f_{x1})^2 + (f_{x2})^2} \\ F_z &= \frac{f_{z1}}{(f_{z1})^2 + (f_{z2})^2} \\ F_\varphi &= \frac{f_{\varphi1}}{(f_{\varphi1})^2 + (f_{\varphi2})^2} \end{aligned} \quad (\text{A.1.2-2})$$

式中 f_{x1} 、 f_{x2} 、 f_{z1} 、 f_{z2} 、 $f_{\varphi1}$ 和 $f_{\varphi2}$ 的数值见表 A.1.2-1、表 A.1.2-2 和表 A.1.2-3。

2 地基介质等效阻尼比等于地基内阻尼和地基辐射阻尼比的一半之和, 地基辐射阻尼比可按式计算。

$$\begin{aligned} \eta_x &= -\frac{1}{2} \frac{f_{x2}}{f_{x1}} \\ \eta_z &= -\frac{1}{2} \frac{f_{z2}}{f_{z1}} \\ \eta_\varphi &= -\frac{1}{2} \frac{f_{\varphi2}}{f_{\varphi1}} \end{aligned} \quad (\text{A.1.2-3})$$

表 A.1.2-1 地基介质水平传递系数

α	$\nu=0.01$		$\nu=0.25$		$\nu=0.40$		$\nu=0.50$	
	f_{x1}	f_{x2}	f_{x1}	f_{x2}	f_{x1}	f_{x2}	f_{x1}	f_{x2}
0.00	0.2688	0.0000	0.2364	0.0000	0.2161	0.0000	0.2026	0.0000
0.25	0.2636	-0.0404	0.2324	-0.0323	0.2127	-0.0281	0.1955	-0.0259
0.50	0.2491	-0.0779	0.2215	-0.0625	0.2034	-0.0546	0.1910	-0.0502
0.75	0.2267	-0.1099	0.2045	-0.0890	0.1889	-0.0780	0.1778	-0.0718
1.00	0.1988	-0.1346	0.1833	-0.1103	0.1707	-0.0971	0.1610	-0.0894
1.25	0.1684	-0.1520	0.1597	-0.1257	0.1504	-0.1112	0.1424	-0.1025
1.50	0.1377	-0.1590	0.1354	-0.1349	0.1294	-0.1200	0.1231	-0.1108
1.75	0.1087	-0.1596	0.1118	-0.1384	0.1089	-0.1240	0.1043	-0.1146
2.00	0.0829	-0.1542	0.0899	-0.1369	0.0897	-0.1236	0.0866	-0.1144

表 A.1.2-2 地基介质竖向传递系数

α	$\nu=0.01$		$\nu=0.25$		$\nu=0.50$	
	f_{z1}	f_{z2}	f_{z1}	f_{z2}	f_{z1}	f_{z2}
0.00	0.2675	0.0000	0.2026	0.0000	0.1351	0.0000
0.25	0.2533	-0.0518	0.1928	-0.0365	0.1285	-0.0258
0.50	0.2356	-0.0985	0.1818	-0.0698	0.1211	-0.0495
0.75	0.2032	-0.2355	0.1604	-0.0971	0.1066	-0.0695
1.00	0.1629	-0.1600	0.1332	-0.1165	0.0878	-0.0888
1.25	0.1202	-0.1709	0.1034	-0.1270	0.0669	-0.0935
1.50	0.0799	-0.1691	0.0743	-0.1290	0.0457	-0.0969
1.75	0.0459	-0.1570	0.0484	-0.1236	0.0259	-0.0949
2.00	0.0206	-0.1381	0.0274	-0.1128	0.0090	-0.0887

注: (1) $\alpha = 2\pi f r \sqrt{\rho/G}$, 其中, f 为地基与上部结构的第一阶模态频率, 需进行迭代计算得出; ρ 为地基介质平均密度。

(2) 表中没有的参数数值, 可以采用线性插值法确定。

表 A.1.2-3 地基介质摆动传递系数

α	$\nu=0.01$		$\nu=0.25$		$\nu=0.40$		$\nu=0.50$	
	$f_{\theta 1}$	$f_{\theta 2}$	$f_{\theta 1}$	$f_{\theta 2}$	$f_{\theta 1}$	$f_{\theta 2}$	$f_{\theta 1}$	$f_{\theta 2}$
0.00	0.4280	0.0000	0.3242	0.0000	0.2594	0.0000	0.2161	0.0000
0.25	0.4361	-0.0018	0.3295	-0.0001	0.2635	-0.0008	0.2197	-0.0007
0.50	0.4587	-0.0137	0.3445	-0.0085	0.2752	-0.0063	0.2299	-0.0053
0.75	0.4874	-0.0435	0.3642	-0.0270	0.2908	-0.0202	0.2437	-0.0170
1.00	0.5128	-0.0941	0.3831	-0.0590	0.3064	-0.0445	0.2577	-0.0376
1.25	0.5252	-0.1632	0.3952	-0.1039	0.3174	-0.0788	0.2683	-0.0670
1.50	0.5160	-0.2434	0.3949	-0.1578	0.3196	-0.1208	0.2719	-0.1033
1.75	0.4801	-0.3240	0.3782	-0.2147	0.3098	-0.1664	0.2655	-0.1434
2.00	0.4177	-0.3931	0.3439	-0.2674	0.2863	-0.2102	0.2477	-0.1829

A.2 地基的有限元分析模型

A.2.1 地基与结构相互作用分析中地基有限元计算域宜满足以下要求：

- 1 有限元计算域底部边界的深度不宜小于基础底面深度 H 的 3 倍；
- 2 有限元计算域底部边界处地基介质的剪切波速 V_s 不小于 2400m/s、或底部边界处地基介质的弹性模量 E_d 不小于地基介质表层弹性模量 E_1 的 10 倍时，底部边界可视为刚性边界；
- 3 不满足上述 2 款要求时，底部边界宜设置为粘性边界；
- 4 有限元计算域侧边界至基础同侧边缘的距离不宜小于同一方向基础宽度 b 的 3 倍；
- 5 有限元计算域侧边界应设置为耗能边界，可采用透射边界或粘性边界。

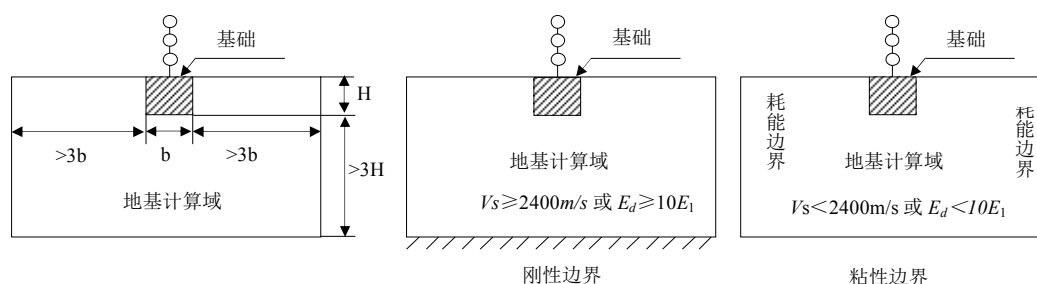


图 A.2.1 地基有限元计算域

A.2.2 地基有限元单元高度 h 应满足下式要求。

$$h \leq \beta \frac{V_s}{f_{\max}} \quad (\text{A.2.2})$$

式中 β ——计算系数，取值范围为 1/5~1/12；

V_s ——地基介质剪切波速；

f_{\max} ——应考虑的地震动最高频率。

A.3 相互作用体系的子结构分析方法

A.3.1 自由场地震动作用下，求解结构、基础与地基相互作用体系地震反应的子结构法运动方程如下：

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sb}] \\ [S_{bs}] & [S_{bb}] + [S_{bb}^{\infty}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{X_s\} \\ \{X_b\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{P_s\} \\ [S_{bb}^f] \{X_{fb}\} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3.1})$$

式中 $[S_{ss}]$ ——上部结构（含基础）自身位移与内力关系的动力阻抗矩阵；
 $[S_{sb}]$ ——分界面位移与上部结构内力关系的动力阻抗矩阵；
 $[S_{bs}]$ ——上部结构位移与分界面上作用力关系的动力阻抗矩阵；
 $[S_{bb}]$ ——分界面自身作用力与位移关系的动力阻抗矩阵；
 $[S_{bb}^{\infty}]$ ——缺口地基子结构自身位移与内力关系的动力阻抗矩阵；
 $[S_{bb}^f]$ ——自由场地基自身位移与内力关系的动力阻抗矩阵；
 $\{X_s\}$ ——上部结构的位移矢量；
 $\{X_b\}$ ——分界面的位移矢量；
 $\{X_{fb}\}$ ——自由场地震动位移矢量；
 $\{P_s\}$ ——作用于上部结构的外界扰力（如机械振动或外部撞击）矢量。

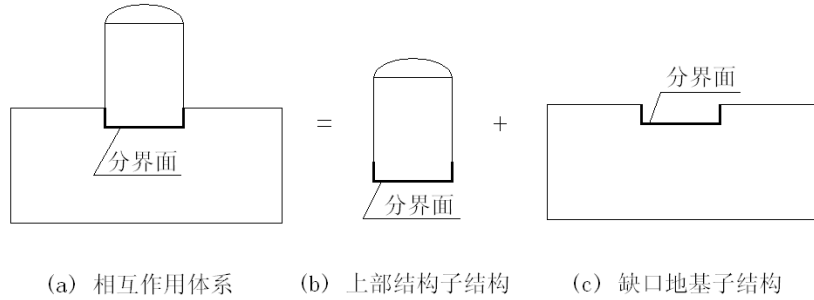


图 A.3.1 相互作用体系模型示意图

A.3.2 缺口地基子结构动力阻抗矩阵 $[S_{bb}^{\infty}]$ 可由下式计算：

$$[S_{bb}^{\infty}] = [S_{bb}^f] - [S_{bb}^e] \quad (\text{A.3.2})$$

式中 $[S_{bb}^f]$ ——自由场的动力阻抗矩阵；
 $[S_{bb}^e]$ ——缺口岩土子结构自身的动力阻抗矩阵。

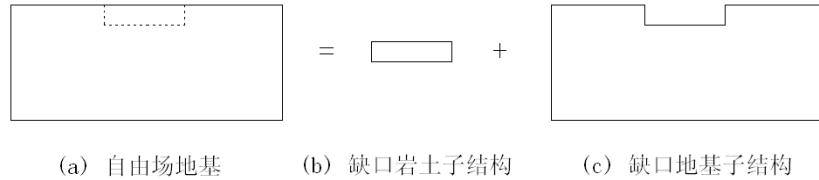


图 A.3.2 自由场地基模型示意图

A.3.3 动力阻抗矩阵 $[S]$ 由下式计算：

$$[S] = -\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K] \quad (\text{A.3.3})$$

式中 ω ——振动圆频率；
 i ——虚数单位；
 $[M]$ ——结构质量矩阵；
 $[C]$ ——结构粘滞阻尼矩阵；
 $[K]$ ——结构刚度矩阵。

附录 B 地震作用最大值的组合

B.1 振型叠加反应谱分析中的组合方法

B.1.1 单一方向 I 的地震作用最大值可采用以下方法计算。

$$R_I = \sqrt{R_{rI}^2 + R_{pI}^2} \quad (\text{B.1.1-1})$$

式中 R_I —— I 方向地震作用最大值；

R_{rI} —— I 方向刚性地震作用分量最大值；

R_{pI} —— I 方向周期性地震作用分量最大值。

$$R_{rI} = M \times ZPA \quad (\text{B.1.1-2})$$

式中 M ——结构质量；

ZPA ——输入反应谱中对应零周期的加速度谱值，即输入加速度峰值；

$$R_{pI} = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^n \varepsilon_{ij} R_{pi} R_{pj}} \quad (\text{B.1.1-3})$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{8(\xi_i \xi_j f_i f_j)^{1/2} (\xi_i f_i + \xi_j f_j) f_i f_j}{(f_i^2 - f_j^2)^2 + 4\xi_i \xi_j f_i f_j (f_i^2 + f_j^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_j^2) f_i^2 f_j^2}$$

式中 ε_{ij} —— i 振型与 j 振型的相关系数， n 为反应谱分析中包含的总振型数；

R_{pi} 、 R_{pj} ——分别为对应 i 振型与 j 振型的周期性地震作用最大值；

f_i 、 f_j ——分别为对应 i 振型与 j 振型的频率；

ξ_i 、 ξ_j ——分别为对应 i 振型与 j 振型的阻尼比。

$$R_{pi} = \sqrt{1 - \alpha_i^2} R_i \quad (\text{B.1.1-4})$$

$$\alpha_i = ZPA / S_{ai}$$

式中 α_i ——刚性反应系数，各振型反应中刚性分量所占比例， $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ；当振型频率低于加速度反应谱平台段对应的最低频率 f_c 时（见图 B.1.1），取 $\alpha_i = 0$ ；

R_i —— i 振型的总地震作用最大值；

S_{ai} ——对应频率 i 的反应谱值。

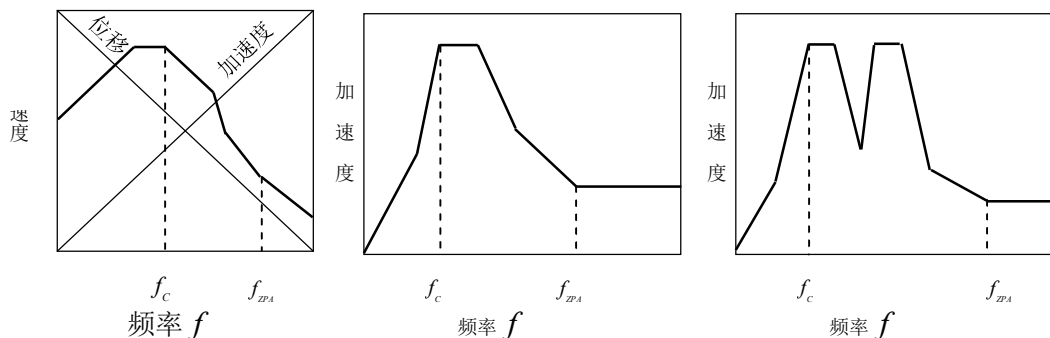


图 B.1.1 加速度反应谱平台段对应的最低频率 f_c

B.1.2 空间地震作用最大值可采用以下任一种方法计算。

1 空间地震作用最大值可采用平方和的平方根（SRSS）方法计算：

$$R = \sqrt{\sum_{I=1}^3 R_I^2} \quad (\text{B.1.2-1})$$

式中 R ——考虑空间效应的作用于任意方向的地震作用最大值；

R_I ——沿相互正交的两个水平方向和竖向的地震作用最大值，由 B.1.1 条方法计算。

2 空间地震作用最大值可采用百分比组合方法计算：

$$R = 1.0|R_{I\max}| + 0.4|R_j| + 0.4|R_k| \quad (\text{B.1.2-2})$$

式中 $R_{I\max}$ ——单向地震作用中的最大者，由 B.1.1 条方法计算；

R_j 、 R_k —— $R_{I\max}$ 之外的两个方向地震作用最大值，由 B.1.1 条方法计算。

B.2 时程分析中的组合方法

B.2.1 沿两个水平正交方向和竖向分别进行时程分析时，空间地震作用最大值可采用 SRSS 方法计算。

$$R = \sqrt{\sum_{I=1}^3 R_I^2(t)_{\max}} \quad (\text{B.2.1})$$

式中 R ——空间地震作用最大值；

$R_I(t)_{\max}$ ——沿相互正交的两个水平方向和竖向的地震反应时程中的最大值。

B.2.2 当三个方向的输入时程统计独立、且分别进行三方向输入的时程分析时，空间地震作用最大值 R 可由三分量地震作用时程的代数和确定：

$$R = \text{MAX}[\sum_{I=1}^3 R_I(t)] \quad (\text{B.2.2})$$

式中 $R_I(t)$ ——沿相互正交的两个水平方向和竖向的地震反应时程；

$\text{MAX}[\cdot]$ ——就各时刻 t 的地震反应取最大值。

附录 C 多点输入地震反应分析

C.0.1 具有多个支承点且各支承点的运动明显不同的结构，可采用多点输入地震反应分析方法进行计算；支承点的运动可以是地震动或支承结构（主结构）的地震反应。

C.0.2 多点输入地震反应分析可采用总位移法或分解位移法。

1 结构的总位移为静态位移（即由支承点的位移引起的结构牵连位移）和动态位移（动力作用产生的位移）之和。采用总位移法求解地震反应需同时输入各支承点的加速度、速度和位移，只能采用时程分析方法。

2 分解位移法分别求解结构的静态位移和动态位移。求解静态位移采用静力学方法，需输入支承点的位移。求解动态位移采用动力学方法，需输入支承点的加速度；当结构处于弹性状态或弱非线性状态时，动态位移的求解可采用时程分析方法或振型叠加反应谱方法。

C.0.3 分解位移法的计算公式和计算步骤如下：

1 计算静态位移的公式为：

$$\{x_s(t)\} = [U_{bs}]\{x_b(t)\} \quad (\text{C.0.3-1})$$

式中 $\{x_s(t)\}$ ——结构的静态位移反应；

$[U_{bs}]$ ——位移影响矩阵，是某支承点施加单位位移、其他支承点固定时的结构位

$\{x_b(t)\}$ ——支承点的输入位移。

2 当阻尼比甚小时，计算动态位移的运动方程为：

$$[M]\{\ddot{x}_d(t)\} + [C]\{\dot{x}_d(t)\} + [K]\{x_d(t)\} = [M][U_{bs}]\{\ddot{x}_b(t)\} \quad (\text{C.0.3-2})$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵；

$\{\ddot{x}_d(t)\}$ 、 $\{\dot{x}_d(t)\}$ 、 $\{x_d(t)\}$ ——分别为结构的加速度、速度反应和动态位移反应；

$\{\ddot{x}_b(t)\}$ ——支承点的输入加速度。

3 求解运动方程（C.0.3-2）的振型叠加反应谱方法有如下两种。

1) 包络反应谱方法。对应某计算方向和阻尼比，将各支承点反应谱的包络值作为结构的输入反应谱，相当于将包络反应谱视为各支承点的一致运动参数进行地震反应分析；此时得出的地震反应一般是相当保守的，但并不能总能保证每个支承点附近结构的地震反应计算结果都是保守的。

2) 多点反应谱方法。输入每个支承点的反应谱分别进行结构的地震反应分析，而后叠加地震作用。

4 叠加静态地震作用和动态地震作用。

C.0.4 不论采用时程分析方法或振型叠加反应谱方法，各方向地震作用和空间地震作用最大值均可采用本规范附录 B 的方法确定。

C.0.5 多点输入地震反应分析的输入包括支承点的加速度和位移，当位移时程由加速度时程积分得出时，可能出现位移偏离基线的现象，并导致结构地震反应偏离基线；故应对输入和计算结果进行检查，出现偏移时应予校正。

附录 D 设计楼层反应谱的调整

D.0.1 按照本规范 3.4.1 条规定得出的楼层反应谱，如果子系统的阻尼比小于 10%，可削减峰值的 15%、同时拓宽峰值对应的频率区间后作为设计楼层反应谱使用。方法见图 D.0.1。

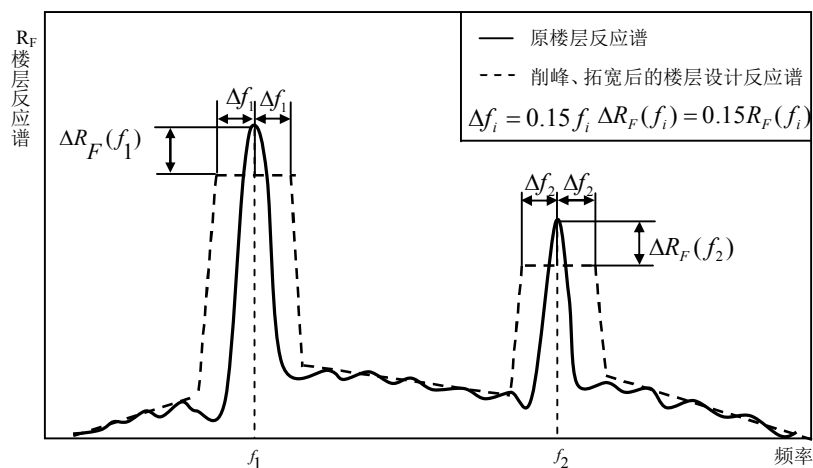


图 D.0.1 反应谱的削峰和拓宽

D.0.2 当主结构地震作用计算考虑地基与结构的相互作用时，可改变地基的剪切模量 G ，采用 $G(1+C_v)$ 和 $G/(1+C_v)$ 分别计算主结构的地震反应（ C_v 为地基弹性模量的变异系数，取标准差系数），再依据主结构地震加速度反应时程计算楼层反应谱。

1 当厂址地基勘察数据充分时， C_v 取值不应小于 0.5，当厂址地基勘察数据欠充分时， C_v 取值不应小于 1.0。

2 设计楼层反应谱取上述两个反应谱的包络。

D.0.3 当主结构地震反应分析采用概率可靠度方法时，只要抗震系统可靠度不低于 90%，设计楼层反应谱的削峰幅度可不受 15% 的限制。

D.0.4 当子结构有一个以上的自振频率在设计楼层反应谱拓宽的峰值范围内时，为了不使计算结果过分保守，设计楼层反应谱可通过平移或延长谱线进行调整（见图 D.0.4）；不同调整方案中取对子结构综合影响最不利者。

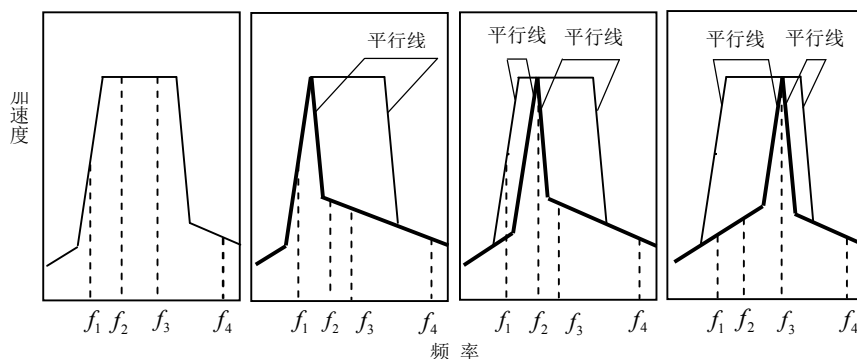


图 D.0.4 楼层反应谱的调整示例

—— 调整后的楼层反应谱 —— 原楼层反应谱

（图中频率 f_1 、 f_2 、 f_3 为处于原楼层反应谱拓宽的峰值范围内的子结构自振频率）

附录 E 基于性能的抗震安全概率评估参考方法

E.0.1 本附录方法可供结构、系统或部件的抗震性能概率评估参考。

E.0.2 基于性能的抗震安全概率评估包括以下内容：

- 1 确定各物项的抗震分类；
- 2 确定各物项的抗震性能极限状态；
- 3 根据地震危险性分析确定设计地震动；
- 4 计算各物项对应抗震性能极限状态的失效概率 P ；
- 5 基于失效概率 P 和相应目标失效概率 P_F 评估各物项的抗震裕度。

E.0.3 物项抗震分类应区别放射性及有毒物质对运行人员、公众和环境影响的严重程度确定，一般可分为5类。1类为与放射性和有毒物质无关的物项，5类为存储大量放射性材料、与核安全相关的物项。

E.0.4 各物项的抗震性能极限状态可分为A、B、C、D四种，各性能极限状态的表述见表E.0.4。

表E.0.4 性能极限状态

极限状态	性能描述
A	严重破坏，发生大永久变形，接近倒塌
B	可修复的破坏，发生中等永久变形
C	轻微破坏，发生有限的永久变形
D	无破坏，基本保持弹性状态

E.0.5 性能概率分析的地震动输入应满足以下要求：

1 设计基准地震动应由地震危险性分析确定，给出地震危险性概率曲线族、概率一致地震反应谱 $UHRS(\omega)$ 和地震动时程；对应抗震分类 3、4 和 5 类物项的设计基准地震动的年超越概率 H_D 见表 E.0.5-1。

2 设计反应谱 $DRS(\omega)$ 由调整概率一致地震反应谱 $UHRS(\omega)$ 得出，计算方法如下：

$$DRS(\omega) = DF \times UHRS(\omega) \quad (E.0.5-1)$$

$$DF = \max(DF_1, DF_2) \quad (E.0.5-2)$$

$$DF_2 = 0.6(A_R)^a \quad (E.0.5-3)$$

$$A_R = \frac{SA_{0.1H_D}}{SA_{H_D}} \quad (E.0.5-4)$$

式中 DF ——设计因子；

$\max(\cdot)$ ——取最大值；

A_R ——坡降因子；

SA_{H_D} ——年超越概率为 H_D 的概率一致地震反应谱的谱幅值；

$SA_{0.1H_D}$ ——年超越概率为 $0.1H_D$ 的概率一致地震反应谱的谱幅值。

式中参数取值见表 E.0.5-1：

表 E.0.5-1 确定设计反应谱的参数

抗震分类	H_D	DF_1	α
3	4×10^{-4}	0.8	0.40
4	4×10^{-4}	1.0	0.80
5	1×10^{-4}	1.0	0.80

3 地基不同深度处的地震动时程和地震动参数的生成, 以及竖向地震动的确定应满足相关技术标准的规定。

4 结构基底的设计反应谱零周期加速度 ZPA (即地震动加速度峰值) 不应小于表 E.0.5-2 中规定的数值。

表 E.0.5-2 结构基底加速度峰值

抗震分类	3	4	5
ZPA(g)	0.06	0.08	0.10

E.0.6 物项地震反应分析可采用等效静力法、反应谱法、线性时程分析法、非线性静力分析法 (PUSHOVER 法) 和非线性时程分析法。

E.0.7 地震反应分析中采用的物理力学参数和计算参数应满足相关技术标准的规定。

E.0.8 各物项抗震设计应满足由相关技术标准确定的承载力验收准则和变形验收准则。

E.0.9 在设计基准地震动作用下, 各物项不满足相应性能极限状态的条件失效概率 P' 应小于 1%; 在 150% 设计基准地震动作用下, 各物项不满足相应性能极限状态的条件失效概率 P' 应小于 10%。

E.0.10 各物项不满足相应性能极限状态的概率 P 应根据需要, 给出平均值、中值、5% 保证率和 95% 保证率的计算结果。

E.0.11 各物项对应性能极限状态的概率分析应考虑地震动的随机性和结构计算模型的不确定性; 上述两类不确定性可采用对数分布概率模型表述。

E.0.12 各物项的失效概率 P 等于地震动年发生概率 H_D 与物项不满足相应性能极限状态的条件失效概率 P' 的乘积; 失效概率 P 不应大于相应目标失效概率 P_F 。对应不同物项抗震分类的目标失效概率见表 E.0.12。

表 E.0.12 目标失效概率

抗震分类	目标失效概率 P_F
3	1×10^{-4}
4	4×10^{-5}
5	1×10^{-5}

附录 F 标准设计反应谱

F.0.1 美国核管会导则RG1.60规定的水平方向标准地震反应谱见表F.0.1和图F.0.1。本附录并不排斥使用其它适用的水平方向地震标准反应谱。

表 F.0.1 水平向设计反应谱控制点放大系数

阻尼比 (%)	控制点的放大系数				
	加速度				位移
	A (33Hz)	B (9Hz)	C (2.5Hz)	D (0.25Hz)	D (0.25Hz)
0.5	1.00	4.96	5.95	0.74	3.20
2.0	1.00	3.54	4.25	0.57	2.50
5.0	1.00	2.61	3.13	0.47	2.05
7.0	1.00	2.27	2.72	0.43	1.88
10.0	1.00	1.90	2.28	0.39	1.70

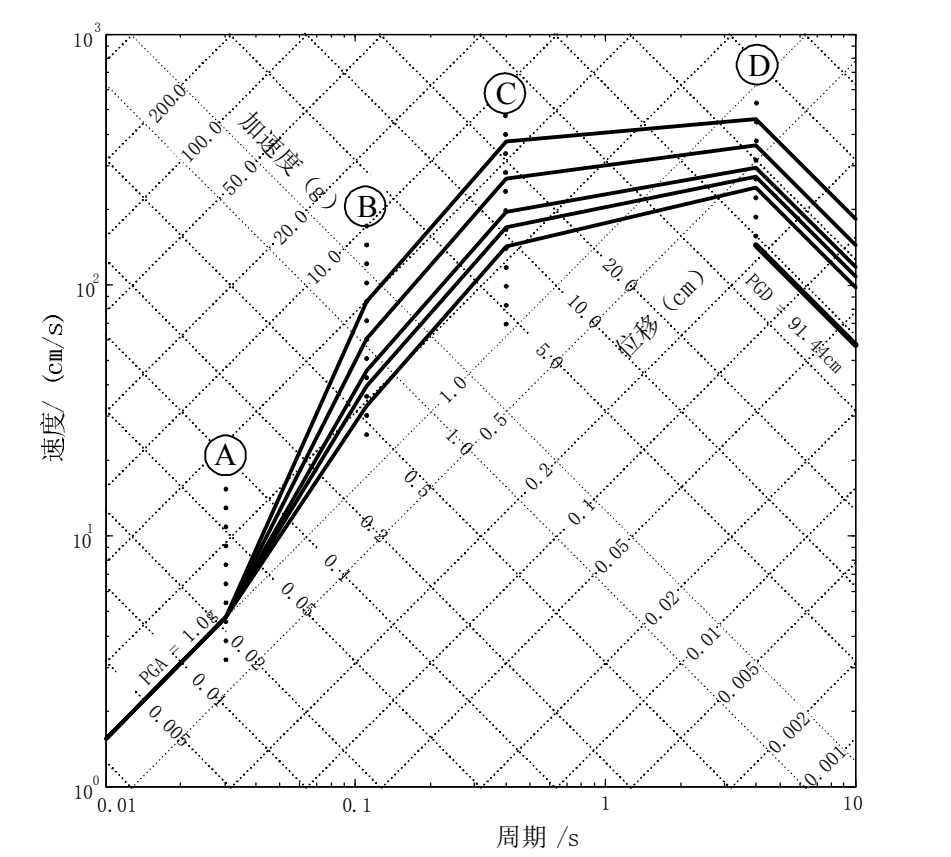


图 F.0.1 水平向反应谱

F.0.2 美国核管会导则RG1.60规定的竖直方向标准地震反应谱见表F.0.2和图F.0.2。本附录并不排斥使用其它适用的竖直方向地震标准反应谱。

表 F.0.2 竖向设计反应谱控制点放大系数

阻尼比 (%)	控制点的放大系数				
	加速度				位移
	A (33Hz)	B (9Hz)	C (3.5Hz)	D (0.25Hz)	D (0.25Hz)
0.5	1.00	4.96	5.67	0.49	2.13
2.0	1.00	3.54	4.05	0.38	1.67
5.0	1.00	2.61	2.98	0.32	1.37
7.0	1.00	2.27	2.59	0.29	1.25
10.0	1.00	1.90	2.17	0.26	1.13

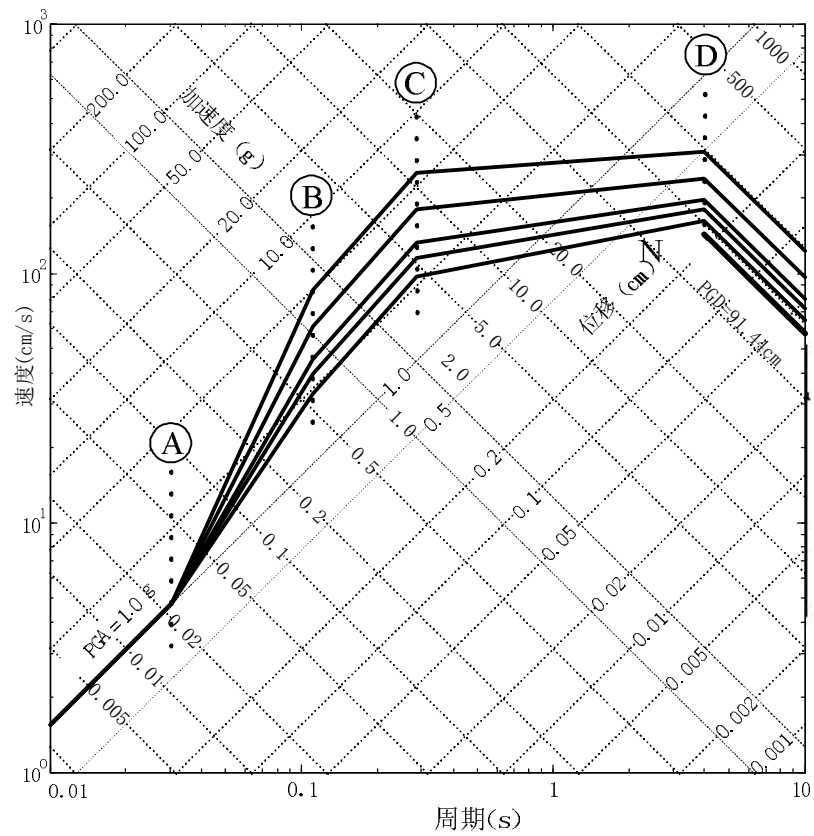


图 F.0.2 竖向反应谱

附录 G 目标功率谱密度的参考计算方法

G.0.1 RG1.60 水平标准反应谱 $R_0(f)$ (以 $a_{\max}=1.0g$ 标定) 在 0.3~24Hz 频率区间内的功率谱 $S_0(f)$ 为:

$$\left. \begin{array}{ll} f = 0.3 \sim 2.5\text{Hz} & S_0(f) = 4193.54(f/2.5)^{0.2} \\ f = 2.5 \sim 9.0\text{Hz} & S_0(f) = 4193.54(2.5/f)^{1.8} \\ f = 9.0 \sim 16.0\text{Hz} & S_0(f) = 418.06(9.0/f)^3 \\ f = 16.0 \sim 24.0\text{Hz} & S_0(f) = 74.19(16.0/f)^8 \end{array} \right\} \quad (\text{G.0.1})$$

式中 f ——频率;

$S_0(f)$ ——对应 RG1.60 水平标准反应谱的功率谱密度函数 (cm^2/sec^3);

$R_0(f)$ ——RG1.60 水平标准反应谱;

a_{\max} ——地震动加速度峰值。

G.0.2 一般反应谱 $R_n(f)$ (以 $a_{\max}=1.0g$ 标定) 对应的功率谱 $S_n(f)$ 为:

$$S_n(f) = S_0(f) \cdot a_{\max}^2 [R_n(f)/R_0(f)]^2 \quad (\text{G.0.2})$$

式中 $S_n(f)$ ——对应一般反应谱的功率谱密度函数;

$R_n(f)$ ——一般反应谱;

附录H 建筑物、构筑物的作用效应组合和分项系数

H.0.1 混凝土安全壳的作用效应组合及作用分项系数可按表H.0.1采用。

表H.0.1 混凝土安全壳作用效应组合及作用分项系数

作用效应组合 S_i		作用分项系数													
		D	Q	L	G	R ₀	T ₀	R _a	T _a	P _a	Y _y	E _o	E _s	H _a	P _v
S_1	$N + E_o$	1.0	1.0	1.3	1.0	1.0	1.0					1.5			1.0
S_2	$N + E_o + A$	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0	1.0	1.25		1.25			
S_3	$N + E_o + H_a$	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0					1.0		1.0	
S_4	$N + E_s$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0						1.0		1.0
S_5	$N + E_s + A$	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0	1.0	1.0	1.0		1.0		

注：表中 G 是启动卸压阀或其他高能装置引起的荷载。

H.0.2 混凝土建筑物、构筑物的作用效应组合及作用分项系数可按表H.0.2采用。

表H.0.2 混凝土建筑物、构筑物作用效应组合及作用分项系数

作用效应组合 S_i		作用分项系数											
		D	F	L	H	R ₀	T ₀	R _a	T _a	P _a	Y _y	E _o	E _s
S_1	$N + E_o$	1.4	1.4	1.7	1.7	1.7						1.7	
S'_1	$N + E_o$	1.05	1.05	1.3	1.3	1.3	1.2					1.3	
S_2	$N + E_s + A$	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0	1.0	1.15	1.0	1.15	
S_4	$N + E_s$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0						1.0
S_5	$N + E_s + A$	1.0	1.0	1.0	1.0			1.0	1.0	1.0	1.0		1.0

H.0.3 钢安全壳的作用效应组合及作用分项系数可按表H.0.3采用。

表H.0.3 钢安全壳作用效应组合及作用分项系数

作用效应组合 S_i		作用分项系数											
		D	H _a	L	R ₀	T ₀	P _o	R _a	T _a	P _a	Y _y	E _o	E _s
S_1	$N + E_o$ (Level B)	1.0		1.0	1.0	1.0	1.0					1.0	
S_2	$N + E_o + A$ (Level B)	1.0		1.0				1.0	1.0	1.0		1.0	
S_3	$N + E_o + H_a$ (Level D)	1.0	1.0	1.0								1.0	
S_4	$N + E_s$ (Level C)	1.0		1.0	1.0	1.0	1.0						1.0
S_5	$N + E_s + A$ (Level C)	1.0		1.0				1.0	1.0	1.0			1.0
S'_5	$N + E_s + A$ (Level D)	1.0		1.0				1.0	1.0	1.0	1.0		1.0

H.0.4 钢结构构件的作用效应组合及作用分项系数可按表H.0.4采用。

表H.0.4 钢结构构件作用效应组合及作用分项系数

作用效应组合 S_i		作用分项系数											
		D	L	R ₀	T ₀	R _a	T _a	P _a	Y _y	E ₀	E _s	L _r (或 S 、 R)	C _{cr}
S_1	$N + E_o$	1.2	0.8	1.2	1.0					1.6		0.2	1.0
S_4	$N + E_s$	1.0	0.8	1.0	1.0						1.0		1.0
S_5	$N + E_s + A$	1.0	0.8			1.0	1.0	1.0	1.0		0.7		

注：当出现某种荷载会减小其他荷载效应时，若可以证明该项荷载总是出现或者与其他荷载同时出现，则该荷载系数取为 0.9，其余情况下该荷载系数取为 0。

附录 J 地下结构抗震计算的拟静力方法

J.1 反应位移法

J.1.1 反应位移法的基本方程如下：

$$[K]\{x\} + [K_s](\{x\} - \{x_b\}) = \{F\} \quad (J.1.1)$$

式中 $[K]$ ——结构刚度矩阵，可将结构模拟为梁单元的集合经计算确定；

$[K_s]$ ——地基弹簧刚度矩阵，每个弹簧支承点含压缩和剪切两个分量，弹簧刚度可由本规范 3.5.4 条方法确定；

$\{F\}$ ——作用于结构的水平地震作用矢量，包括结构和设备的地震作用、地震动水压力以及结构顶面和底面承受的地震剪力， $\{F\}$ 为自平衡力系；

$\{x\}$ ——待求的结构水平地震位移反应矢量；

$\{x_b\}$ ——输入的地基水平地震动位移矢量。

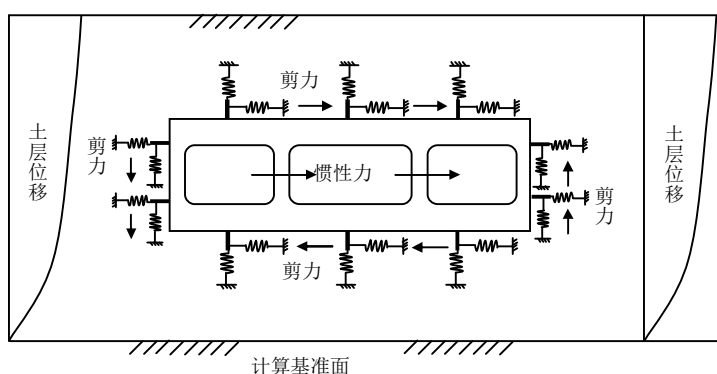


图 J.1.1 反应位移法计算模型示意图

J.1.2 等效地震作用矢量 $\{F\}$ 中所含的地震作用可按等效静力法或一维剪切波动模型计算。顶面剪力可取地基土层相应高程上的地震剪力，底面剪力等于地震作用（含地震动水压力）与顶面剪力之和；侧面剪力可取顶面剪力与底面剪力之和的二分之一。

J.2 反应加速度法

J.2.1 反应加速度法一般适用于较均匀的地基介质中地下结构的地震反应计算。反应加速度法算式如下：

$$[K]\{x\} = [M]\{\ddot{x}_b\} \quad (J.2.1)$$

式中 $[K]$ 、 $[M]$ ——分别为结构体系（含地下结构和周边介质）的刚度矩阵和质量矩阵；
 $\{x\}$ ——待求的结构体系水平位移矢量；
 $\{\ddot{x}_b\}$ ——输入的结构体系加速度矢量。

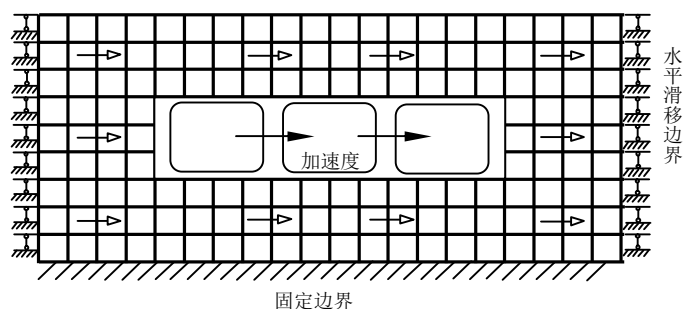


图 J.2.1 反应加速度法计算模型

J.2.2 计算模型中的地基介质采用平面应变单元离散，地下结构可采用梁单元离散。

J.2.3 输入结构体系的加速度矢量可由地基地震反应分析确定。地下结构承受的等效加速度可取对应地下结构顶面和底面高程的地基介质发生最大相对位移时的加速度，然后将其转换为等效力作用于地下结构各单元。

J.2.4 地基有限元计算域可参照土层地震反应分析模型或地基与结构相互作用模型中的地基有限元计算域确定，侧边界可取为水平滑移边界。

附录 K 设备抗震鉴定试验

K.1 一般要求

K.1.1 核电厂中所有抗震 I 类设备均应进行抗震鉴定。抗震 I 类设备包括所有安全级机械设备和安全级（1E 级）电气设备。一些不执行安全功能的、但在地震时发生坠落会影响其它安全级设备的架空设备（如起重机、通风管道等）也需进行抗震校核。

K.1.2 抗震 I 类设备是能承受运行安全地震动作用和极限安全地震动作用、并保证在地震发生时和地震后均能履行其安全功能的设备，这些安全功能是：

- 1 维持和保证反应堆冷却剂系统承压边界的完整性；
- 2 使反应堆安全停堆并保持安全停堆状态；
- 3 堆芯余热排出；
- 4 能减少和防止放射性物质向环境释放，并保证不超过规定限值。

K.1.3 设备抗震鉴定可采用分析方法、试验方法或分析与试验相结合的方法，亦可采用经验反馈方法进行推理论证。当分析方法不足以合理、可信地证实抗震 I 类设备（如控制棒驱动线、泵、阀、继电器、电气设备及测量仪表等）的完整性和可运行性时，必须用试验法进行鉴定。

K.1.4 鉴定试验旨在测定设备的自振频率、振型、阻尼等振动参数和（或）地震反应，考核设备的刚度（变形）、强度和位移，检验设备在地震作用下能否保持其完整性和可运行性、执行其安全功能。

K.1.5 抗震鉴定试验的试件应是经老化试验后的试件。

K.1.6 对未能达到满意试验结果的设备组件或器件进行修理、修改或更换时，设备试验必须重复进行。如果试验中更换某些部件，则必须按有关规定先对其进行老化处理。

K.1.7 抗震鉴定试验中采用的试验反应谱的谱值应包络要求反应谱谱值，但特定情况下可做适当调整。

K.2 激振装置及外围设备

K.2.1 地震模拟振动台（或其它激振设备）应有足够宽的工作频率范围和良好的低频特性，其工作频段至少为 1~100Hz。振动台应能按照要求反应谱（RRS）由计算机系统生成符合要求的人工地震动时程并在台面产生相应的模拟地震动，或能在 1~100Hz 范围内的各指定频率上产生要求的单频波（一般为正弦拍波），使设备的响应达到设备技术规格书中的要求反应谱或要求的加速度值。振动台承载能力应大于设备的重量，台面尺寸应大于设备安装面积。振动台最好能同时产生水平和竖向的运动，输出的波形和幅值应能方便地用计算机控制。

K.2.2 鉴定试验中，应根据试验规格书的要求，利用计算机、必要的传感器和其他仪器仪表，对涉及设备结构特性、振动特性（如自振频率、振型和临界阻尼比等）、功能特性、运行特性（如压力、温度、流量、电流、电压等）、地震反应（如各典型点的位移、速度、加速度，应力、应变等）等各种数据进行监测。应有足够的测量通道、数据采集及分析系统对测量数据进行记录和分析处理，必要时也可利用其他外加仪表设备。

K.3 试件和测点布置

K.3.1 试验试件应满足以下要求：

1 试件一般应采用原型设备；试验装置不能支承大尺寸原型设备时，可采用缩尺模型进行试验，但必须满足模型相似准则。

2 当某些部件装配在整体设备中，但整体设备的抗震试验有困难时（如设备过大无法激振，或设备复杂不便操作等），可首先用计算方法或试验方法得到整体设备承受地震作用时该部件支承处的加速度反应谱，再以此加速度反应谱作为输入，对单独部件进行抗震试验。

3 经过振动台抗震鉴定试验的试件一般不应再安装用于核电厂，除非能证明抗震鉴定试验中应力循环所引起的疲劳效应不会使设备降级、影响其执行安全功能的能力。

4 原件和缩尺模型均应满足试件在地震时的静载运行条件，否则应予以说明。

K.3.2 试件的安装方式应与实际安装条件（含安装方向和固定方式）相符，应满足以下要求：

1 试件固定方式，如螺栓连接或焊接，地脚螺栓的数量和大小、排列方式，焊缝的型式和焊接长度等应与实际相符；外接电缆、水管、气管、油管等应尽可能与实际安装情况相同。

2 设备与振动台之间的固定连接件（如夹具，支架等）应足够刚劲，其固有频率应大于 33 Hz 或不低于楼层反应谱 ZPA 频率，不致引起设备基底输入运动的频率和幅值的变化。

3 支承处的输入运动和加载方式应模拟真实情况。

4 加载方向之一应取对设备抗震最不利的方向（如设备刚度最小的方向）。

5 若地震模拟振动台只能进行单向加载，或受试验安装条件限制设备只能在一个方向运动时，可采用单向试验方法。

K.3.3 测点布置应满足以下要求：

1 应在设备的典型部位（预计对功能有影响的部件或应力、变形较大的部位）布置类型和数量满足要求的传感器；若无明确规定，加速度传感器可设于设备的重心处、设备的最高处和最低处；应在试件安装基座处设置加速度传感器，监测试验输入的正确性。

2 传感器及其测试数据应能提供以下信息：

1) 设备在试验中和试验后的工作情况，其功能特性，功能参数的变化是否在允许范围内；

2) 设备的密封泄漏状况，完整性是否破坏；

3) 设备的动力响应、动力特性参数及其变化。

3 试验大纲应描述试验设备、监测仪表和监测方法，所有测点应有文字和图件说明。

K.4 试验程序和步骤

K.4.1 设备抗震鉴定试验的程序如下：

1 列出抗震 I 类设备一览表。该表应标注各种设备的类型编号，制造厂名称，荷载型式（压力、温度、机械力等）以及设备在厂房中的位置。如设备属于冷却剂压力边界，应予以说明。

2 考虑设备类型、承受荷载及尺寸等因素，在结构相似的设备中选择有代表性的设备（称为典型设备）进行鉴定试验。典型设备的选取原则是：不同制造厂家和不同类型的设备应各选一种；不同的荷载和尺寸，应选对抗震不利的一种；对批量生产或使用的设备或部件，应按统计理论确定其抽样率，以不失代表性。

3 确定鉴定方法、鉴定程序以及鉴定验收标准（即编制试验大纲）；

4 对典型设备和试验文件的完整性进行检查，并确认设备是否已进行老化试验；

5 对典型设备进行抗震试验前的功能试验（亦称基准试验，若老化试验后已进行该项试

验，可不必重复)；

- 6 对典型设备进行抗震试验（含功能检验）；
- 7 对典型设备进行抗震试验后的功能试验和震后检查（含拆检）；
- 8 编撰鉴定报告，并按设计规格书的要求对鉴定结果做出评价。

K.4.2 抗震鉴定试验应按以下步骤实施：

- 1 抗震性能试验前的功能试验（亦称基准试验），功能试验应就老化试件进行（无老化机理者除外）；
- 2 动态特性探查试验；
- 3 抗震性能试验（含功能试验）和（或）必要时的极限性能试验；
- 4 最终检验，包括抗震性能试验后的性能试验（以便与基准试验进行对比）和拆检。

K.5 动态特性探查试验

K.5.1 动态特性探查试验应实现以下目标：

- 1 通过探查试验可查明设备的自振频率、振型和阻尼等，了解设备的固有动态特性。可以根据实测的振型确定测点的布置。如果抗震性能试验采用单频拍波方法，可以根据实测的设备自振频率和探查试验的其它结果、结合设计要求反应谱选择激励的频率和幅值。
- 2 通过探查试验，验证数学模型的合理性，并据此论证设备地震反应计算结果的正确性。
- 3 根据实验结果修正数学模型，并为数学模型的正确性提供依据。

K.5.2 动态特性探查试验应满足以下要求：

- 1 动态特性探查试验可采用以下方法：
 - 1) 输入幅值 0.2g 的正弦扫描波，频率范围取 1~100~1Hz，或从 1Hz 到要求反应谱的高频截止频率。沿试件三个主轴的每一方向作正弦扫频探查试验，扫描速度不超过 2 倍频程/min。通过试件对输入运动在不同频率处的响应放大探测其自振频率。
 - 2) 结构形式简单的部件可采用敲击激励法，通过传递函数确定自振频率。即通过快速傅里叶变换，用数据处理装置把敲击法得到的信号的时域图像（幅度-时间）转变成频域图像（幅值-频率）；传递函数是信号幅值（输出/输入）与频率的关系图，其最大幅值对应的频率为共振频率。
 - 3) 输入幅值不大于 0.2g 的白噪声在试件的每一正交轴方向激振。如果已知设备的阻尼值，白噪声幅值应不低于 0.25g，试验时间 T(s) 应不小于 $8/(f_0 \cdot \xi)$ ；其中， f_0 为最低固有频率， ξ 是以小数表示的临界阻尼比（如 4% 表示为 0.04）；且白噪声输入的激振时间应不小于 120s。
- 2 当设备的动力响应为非线性时，应取不同幅值的输入进行探查试验。输入激励应有足够长的持续时间，以保证自振频率和振型的测试精度。
- 3 对于正常运行时的充液设备（如阀、泵等），进行探查试验时应充满液体，但可不加压。

K.6 抗震性能试验

K.6.1 抗震性能试验的目的是考核设备在规定的地震作用下，能否执行其规定的安全功能。在试验中和试验前后应对设备的功能特性和可运行能力进行测量，对其承压边界的结构完整性进行监测。

K.6.2 抗震性能试验首先应对试件进行 5 次运行安全地震模拟试验，再作 1 次极限安全地震模拟试验；电气设备可用 2 次极限安全地震模拟试验代替 5 次运行安全地震模拟试验；阀门可用 2 次幅值为极限安全地震反应值的 2/3 的正弦扫描试验代替 5 次运行安全地震模拟试验。运行安全地震模拟试验的加速度幅值不应小于 1/2 极限安全地震模拟试验的加速度幅值。

K.6.3 抗震性能试验宜按设备的实际运行工况在加温加压状况下进行。

K.6.4 抗震性能试验可采用以下方法并满足相应要求：

1 多频反应谱方法适用于支承于建筑物楼板上的设备（如机械设备中的泵，风机，仪控电气设备中的台、盘、柜等）。输入激励为基于设备所在楼层的要求反应谱生成的人工模拟加速度时程，由该加速度时程生成的试验反应谱（TRS）应包络相同阻尼比的要求反应谱。

2 单频包络谱方法适用于安装地点不确定或难以实现现场安装条件的设备（如安装在管道上的阀门、安装位置不固定的单个传感器或安装在台、盘、柜上的单个仪表等）。输入激励一般采用正弦扫描波或单频正弦拍波。扫描波或拍波激起的设备重心处的反应值不得低于给定的包络反应谱的幅值。

3 极限性能试验可采用多频反应谱方法或单频包络谱方法，所用的方法、步骤与地震验证试验相同，可以逐级提高激振幅度直至观察到设备失常。设备失常前的最高激振幅度超出极限安全地震动的量可视为设备的鉴定裕量。极限性能试验代价很高，只在必要时才进行；设备制造商可用此试验进行产品定型鉴定。

4 抗震性能试验亦可采用静荷载试验方法。静荷载试验适用于第一阶固有频率大于33Hz的刚性设备。静荷载试验一般仅适用阀门（口径小于DN100的阀门除外）。试验应在可施加地震等效静荷载的台架上进行。等效静力荷载由下式计算：

$$F = k \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \times M \quad (\text{K.6.4})$$

式中 F ——等效静力荷载，施加于设备或延伸机构的重心，作用于结构刚度弱轴方向；
 k ——放大系数（不小于1.1）；
 M ——设备或延伸机构的质量；
 a_x 、 a_y 、 a_z ——分别为计算得出的作用于设备或延伸机构质心的三个正交方向的地震加速度。

K.6.5 抗震性能试验中设备的临界阻尼比一般可按表 K.6.5 取值。

表 K.6.5 抗震试验中设备的临界阻尼比 ξ (%)

设备种类			运行安全地震动	极限安全地震动
机械设备			2	4
电气设备	控制屏、 台、柜	螺栓固定	7	
		焊接固定	4	
	其他设备及元器件		5	

K.7 最终检验及合格性评定

K.7.1 抗震性能试验后的设备，应就其外形、结构和功能进行测试和检查，并与试验前的基准数据进行比较，以证明设备在地震后的完整性、功能性和可运行性。必要时可进行拆卸检查，重大损伤应记录在鉴定试验报告中，并进行评价。

K.7.2 确定设备合格性一般考虑以下因素：

- 1 是否发生破坏设备结构完整性的损伤，如裂纹、泄漏、功能部件损坏、松动；
- 2 设备典型部位应力、应变、位移、变形是否超过允许值；
- 3 设备是否发生功能性和可运行性故障，如机械设备中的阀杆运动受阻、阀门转动力矩过大，泵或风机的转动件（如转子、叶轮）与固定部件（如壳体）发生碰撞等；
- 4 仪控电气设备的电器仪表失去输出信号（含开路或短路），给出乱真的输出，如继电器触点抖动超过规定值；
- 5 在整个工作范围内，仪表或控制设备的整定值或脱扣整定值的漂移大于规定的准确度、或刻度值变化大于规定的准确度。

K.8 鉴定试验报告

K.8.0 鉴定试验报告应包括以下内容：

- 1 被试设备的类型编号、特性参数和生产厂商；
- 2 被试设备的选择、模型简化情况及其依据；
- 3 被试设备的安装、固定方式，运行条件，环境条件，边界条件（如输入、输出连接件和安装固定件等）与实际情况的比较；
- 4 振动台的名称、主要特性、所属单位，数据采集和分析系统、测试仪表和测试通道数的描述，包括仪表的标定日期和其它实验室条件的描述；
- 5 被试设备所采用的试验反应谱和要求反应谱（包括相应的人工加速度时程和功率谱），及前者包络后者的情况；
- 6 试验目的、要求和内容，试验方法和步骤；
- 7 试验前的检测结果，包括各基准数据的测量结果，即老化试验（热老化、辐照老化、机械磨损老化或振动老化等运行老化）后的功能试验结果，依据试验大纲检查的被试设备的控制装置、固定装置和驱动装置的功能特性结果；
- 8 测点的选择与布置，测点布置图及其说明；
- 9 试验结果（含以下内容）：
 - 1) 动态特性探查试验的结果以及试验数据分析结果；
 - 2) 被试设备的各次抗震性能试验结果（如果有的话，也包括极限性能试验的结果），包括输入的试验反应谱及其功率谱对要求反应谱及其功率谱的包络情况，以及各激振方向之间的相关系数和相干系数的测量结果。设备可运行性的验证，包括试验前、试验过程中和试验后的功能情况（正常或失效）及各参数（如应力、应变、加速度、位移、变形、压力、温度、流量、电流、电压等）的测量结果，包括实测数据、照片和试验期间所进行的任何调整，以及更换的记录及故障分析；
 - 3) 试验过程中的目视检查结果和其它观察到的异常情况的纪录和说明；
 - 4) 对设备进一步改进的建议；
 - 5) 与计算分析结果的比较（如有可能时）；
 - 6) 结论。
- 10 试验负责人，试验单位，试验日期。

附录 L 设备、部件的容许应力和设计限值

L.1 容许应力

L.1.1 安全一级部件非螺栓材料的设计应力强度值 S_m 应符合下列规定。

1 铁素体钢的设计应力强度值 S_m 应按下列规定计算并取其最小值：

- 1) 常温下最小抗拉强度的 1/3；
- 2) 工作温度下抗拉强度的 1/3；
- 3) 常温下最小屈服强度的 2/3；
- 4) 工作温度下屈服强度的 2/3。

2 奥氏体钢、镍-铬-铁合金和镍-铁-铬合金的设计应力强度值 S_m 应按下列规定计算并取其最小值：

- 1) 常温下最小抗拉强度的 1/3；
- 2) 工作温度下抗拉强度的 1/3；
- 3) 常温下最小屈服强度的 2/3；
- 4) 工作温度下屈服强度的 90%。

L.1.2 安全一级部件螺栓材料的设计应力强度值 S_m 应按下列规定计算并取其较小值：

- 1 常温下最小屈服强度的 1/3；
- 2 实际工作温度下屈服强度的 1/3。

L.1.3 安全二级及三级部件非螺栓材料的容许应力值应符合下列规定。

1 铁素体钢的容许应力值 S 应按下列规定计算并取其最小值：

- 1) 常温下最小抗拉强度的 1/4；
- 2) 工作温度下抗拉强度的 1/4；
- 3) 常温下最小屈服强度的 2/3；
- 4) 工作温度下屈服强度的 2/3。

2 奥氏体钢和有色金属的容许应力值 S 应按下列规定计算并取其最小值：

- 1) 常温下最小抗拉强度的 1/4；
- 2) 工作温度下抗拉强度的 1/4；
- 3) 常温下最小屈服强度的 2/3；
- 4) 工作温度下屈服强度的 90%。

3 安全三级部件许用应力采用特殊规定，带有焊接连接的部件和零件的许用应力应为

L.1.3 条 1 款和 L.1.3 条 2 款中的许用应力乘以系数 0.85，但下述情况除外：

- 1) 圆筒形零件或锥形零件与旋转零件或环形零件之间采用环焊缝连接；
- 2) 连接接管或支管采用焊接连接；
- 3) 仅承受压应力的焊接连接。

L.1.4 安全二级部件和三级部件螺栓材料的容许应力应符合 L.1.3 条 1 款和 2 款的规定，但对经过热处理的材料尚应满足以下要求的较小值：

- 1 常温下最小抗拉强度的 1/5；
- 2 常温下最小屈服强度的 1/4。

L.2 设计限值

L.2.1 安全一级容器的应力限值见表 L.2.1。

表 L.2.1 安全一级容器的应力限值

使用荷载	一次应力		一次应力+二次应力	一次应力+二次应力+峰值应力
	P_m	P_m (或 P_l) + P_b	$\Delta(P_m(\text{或 } P_l) + P_b + P_e + Q)$	$\Delta(P_m(\text{或 } P_l) + P_b + P_e + Q + F)$
设计使用荷载	$1.0S_m$	$1.5 S_m$	无要求	无要求
A 级使用荷载	无强制要求		$3.0 S_m$	$2 S_a$
B 级使用荷载	$1.1 S_m$	$1.65 S_m$	$3.0 S_m$	$2 S_a$
C 级使用荷载	$1.2 S_m$	$1.8 S_m$	无要求	无要求
D 级使用荷载	(1)	P_m 限值的 1.5 倍	无要求	无要求

注：(1) 对于奥氏体钢，取 $2.4S_m$ 和 $0.7S_u$ 的较小值；对于铁素体钢，取 $0.7S_u$ 。

(2) 表中 P_m 为总体薄膜应力强度； P_l 为局部薄膜应力强度； P_b 为弯曲应力强度； P_e 为膨胀应力强度； Q 为二次应力强度； F 为峰值应力强度； S_m 为设计应力强度； S_a 为疲劳极限，由相应的疲劳曲线确定； S_u 为材料的抗拉强度。

L.2.2 安全一级容器在 D 级使用荷载下除满足表 L.2.1 的要求外，还应满足以下要求：

- 1 承受纯剪切的截面上的平均一次剪应力不超过 $0.42 S_u$ ；
- 2 静荷载或当量静荷载应不大于下列规定：
 - 1) 极限分析破坏荷载的 90%，进行极限分析时屈服强度取 $2.3 S_m$ 和 $0.7 S_u$ 的较小值；
 - 2) 塑性分析破坏荷载的 100%；
 - 3) 试验破坏荷载的 100%。

L.2.3 堆内支承结构在设计使用荷载、A 和 B 级使用荷载下的应力限值应满足表 L.2.1 中相应准则下的规定，且在 A 和 B 级使用荷载下承受纯剪切的截面上的平均一次剪应力不超过 $0.6S_m$ ，最大一次剪应力不超过 $0.8 S_m$ 。在 C 级使用荷载下一次薄膜应力强度不大于 $1.5 S_m$ ，一次薄膜加弯曲应力强度不大于 $2.25 S_m$ 。在 D 级使用荷载下应符合下列规定：

1 规定的动荷载或当量静荷载不得超过由试验值 P_l 得到的极限荷载的 80%， P_l 定义为荷载变形曲线出现水平切线时的荷载；或规定的荷载不得超过原型或模型试验荷载组合的 80%；

2 容许将系统的弹性分析与部件的非弹性分析相结合，此时一次薄膜应力强度和一次薄膜加弯曲应力强度限值如下：

$$P_m \leq 0.67 S_u \quad (\text{L.2.3-1})$$

$$P_m + P_b \leq \max \begin{cases} 0.67 S_{ut} \\ S_u + (S_{ut} - S_y) / 3 \end{cases} \quad (\text{L.2.3-2})$$

且
$$P_m + P_b \leq 0.9 S_u \quad (\text{L.2.3-3})$$

式中 P_m —— 一次薄膜应力强度；

$P_m + P_b$ —— 一次薄膜加弯曲应力强度；

S_{ut} —— 由实际使用的材料应力-应变曲线取得的抗拉强度值；

S_y —— 材料的屈服强度；

S_u —— 材料的抗拉强度；

S_m —— 材料的许用应力强度。

L.2.4 安全一级泵的应力限值应满足以下要求：

- 1 按分析法设计的安全一级非能动泵的应力限值应满足表 L.2.1 的规定。
- 2 按分析法设计的安全一级能动泵在 D 级荷载下的应力限值采用表 L.2.1 的 B 级荷载下的应力限值要求，其他荷载下的规定与表 L.2.1 相同，并应通过试验或详细的应力和变形分析验证地震下的可运行性。

L.2.5 安全一级阀门的应力限值应满足以下要求：

1 按分析法设计的安全一级非能动阀门（不包括阀瓣、阀杆、阀座或包容在阀体和阀盖范围内的阀门其它零件）的应力限值应满足表 L.2.1 的规定。

2 按分析法设计的安全一级能动阀门（不包括阀瓣、阀杆、阀座或包容在阀体和阀盖范围内的阀门其它零件），无论在 A、B 或 D 级荷载下的应力限值应采用表 L.2.1 的设计荷载下的应力限值要求，并应通过试验或详细的应力和变形分析验证地震下的可运行性。

L.2.6 安全二级和三级部件的应力限值见表 L.2.6。

表 L.2.6 安全二级和三级部件的应力限值

使用荷载	一次应力	泵和阀门		容器
		能动	非能动	
设计使用荷载	σ_m	1.0S	1.0S	1.0S
	$\sigma_m(\text{或 } \sigma_l)+\sigma_b$	1.5S	1.5S	1.5S
A 级使用荷载	σ_m	1.0S	1.0S	1.0S
	$\sigma_m(\text{或 } \sigma_l)+\sigma_b$	1.5S	1.5S	1.5S
B 级使用荷载	σ_m	1.1S	1.1S	1.1S
	$\sigma_m(\text{或 } \sigma_l)+\sigma_b$	1.65S	1.65S	1.65S
C 级使用荷载	σ_m	1.1S	1.5S	1.5S
	$\sigma_m(\text{或 } \sigma_l)+\sigma_b$	1.65S	1.8S	1.8S
D 级使用荷载	σ_m	1.1S	2.0S	2.0S
	$\sigma_m(\text{或 } \sigma_l)+\sigma_b$	1.65S	2.4S	2.4S

注：（1）薄壁容器应考虑可能发生局部失稳或整体失稳的情况；

（2）本表所列应力限值不适用于阀瓣、阀杆、阀座或包容在阀体和阀盖范围内的其它部件，且不适用于安全释放阀；

（3）满足表中应力限值并不保证设备的可运行性。

（4）表中 S 为容许应力， σ_m 为总体薄膜应力； σ_l 为局部薄膜应力； σ_b 为弯曲应力。

L.2.7 支承件的应力限值应满足以下要求：

- 1 安全一级部件板壳型支承件的应力限值见表 L.2.7-1。

表 L.2.7-1 安全一级部件板壳型支承件的应力限值

使用荷载	一次应力 (1)		一次应力+膨胀应力
	P_m	$P_m(\text{或 } P_l)+P_b$	$P_m(\text{或 } P_l)+P_b+P_e$
设计	1.0S _m	1.5 S _m	无要求
A 级和 B 级	1.0 S _m	1.5 S _m	3.0 S _m
C 级	1.2 S _m	1.8 S _m	无要求
D 级	(2)	1.5 倍的 P _m 限值	无要求

注：（1）由于管道自由端位移和锚固点运动受到约束而在支承件上引起的应力认为是一次应力；

（2）取 1.2S_y 和 1.5S_m 的较大值，但不超过 0.7S_u。

（3）表中 P_m 为总体薄膜应力强度；P_l 为局部薄膜应力强度；P_b 为弯曲应力强度；P_e 为膨胀应力强度；S_m 为许用应力强度；S_u 为材料的抗拉强度；S_y 为材料的屈服强度。

安全一级部件板壳型支承件的应力限值除满足表 L.2.7-1 的要求外，还应满足以下规定：

1) 承受纯剪切荷载的截面上，设计使用荷载、A 级、B 级和 C 级使用荷载下平均一次剪应力不超过 0.6S_m，最大一次剪应力不超过 0.8S_m，在 D 级使用荷载下平均一次剪应力不超过 0.42S_u；

2) 稳定性的要求：在设计使用荷载、A 级、B 级和 C 级使用荷载下，板型支承件的压应力均不应大于 0.5 倍临界屈曲应力，壳型支承件的压应力均不应大于 0.33 倍临界屈曲应力。D 级使用荷载下板壳型支承件的压应力不应大于 0.67 倍的临界屈曲应力。其中临界屈曲强度应根据工作温度下的材料性质计算。

3) 在 D 级使用荷载下对支承件进行弹性分析时，其静荷载或当量静荷载应不大于：

- a 极限分析破坏荷载的 90%（所用的屈服强度取 1.2S_y 和 0.7S_u 的较小值）；

- b 塑性破坏荷载的 100%；
- c 试验破坏荷载的 100%。

2 安全二级和三级部件板壳型支承件的应力限值见表 L.2.7-2

表 L.2.7-2 安全二级和三级部件板壳型支承件的应力限值

使用荷载	一次应力	
	σ_m	$\sigma_m(\text{或 } \sigma_l) + \sigma_b$
设计、A 级、B 级	$1.0S$	$1.5S$
C 级	$1.2S$	$1.8S$
D 级	取 S_y 和 $0.5S_u$ 的较小值	取 $1.5S_y$ 和 $0.8S_u$ 的较小值

注：（1）由于管道自由端位移和锚固点运动受到约束而在支承件上引起的应力认为是一次应力。

（2）表中 σ_m 为总体薄膜应力； σ_l 为局部薄膜应力； σ_b 为弯曲应力； S_u 为材料的抗拉强度； S_y 为材料的屈服强度； S 为许用应力。

安全二级和三级部件板壳型支承件除满足表 L.2.7-2 的要求外，还应满足以下规定：

1) 承受纯剪切荷载的截面上，在设计使用荷载、A 级、B 级和 C 级使用荷载下平均一次剪应力不超过 $0.6S$ ，最大一次剪应力不超过 $0.8S$ ，在 D 级使用荷载下平均一次剪应力不超过 $0.42S_u$ ；

2) 稳定性的要求：在设计使用荷载、A 级、B 级和 C 级使用荷载下，板壳型支承件的压应力均不应大于 0.5 倍临界屈曲应力，在 D 级使用荷载下板壳型支承件的压应力不应大于 0.67 倍的临界屈曲应力。其中临界屈曲强度应根据工作温度下的材料性质计算。

3 安全一、二、三级部件线型支承件在设计使用荷载、A、B 级使用荷载下的应力限值列于表 L.2.7-3，这里仅考虑一次应力，因管道自由端位移和锚固点运动受到约束而在支承件上引起的应力被认为是一次应力。

表 L.2.7-3 线型支承件在设计、A 级、B 级使用荷载下的应力限值

一次应力		应力限值
许用拉伸应力 F_t	净截面	$0.6S_y$ 和 $0.5S_u$ 的较小值
	截面减弱	$0.45S_y$ 和 $0.375S_u$ 的较小值
	抗撕裂破坏	$0.30S_y$ 和 $0.25S_u$ 的较小值
许用剪切应力 F_v		$0.40S_y$ 和 $0.33S_u$ 的较小值
许用压缩应力 F_a		见本款 1) 项
许用弯曲应力 F_b		$0.66S_y$ 和 $0.55S_u$ 的较小值
复合应力	轴向拉伸和弯曲应力	$\frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$
	轴向压缩和弯曲应力	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx}f_{bx}}{(1-f_a/F_{ex})F_{bx}} + \frac{C_{my}f_{by}}{(1-f_a/F_{ey})F_{by}} \leq 1$ $\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$ <p>当 $f_a/F_a \leq 0.15$ 时，可用下式替代上述两式：</p> $\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$

1) 当长细比小于 C_c 时，压缩应力极限为：

$$F_a = \left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] S_y \left/ \left[\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3} \right] \right. \quad (\text{L.2.7-1})$$

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 E}{S_y} \right)^{1/2}$$

当长细比大于 C_c 时，压缩应力极限为：

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \quad (\text{L.2.7-2})$$

当梁长细比大于 120 且 l/r 大于 120 时, 受轴向压缩的十字构件、支承元件、横梁和其它稳定辅助构件, 作用于总截面上的压应力不应超过:

$$F_{as} = \frac{|F_a|}{1.6 - l/(200r)} \quad (\text{L.2.7-3})$$

这里, 当比值 l/r 小于 C_c 时, F_a 采用方程 (L.2.7-1) 计算; 当比值 l/r 大于 C_c 时, F_a 采用式 (L.2.7-2) 计算。

2) 表 L.2.7-3 中, 复合应力中的下标 x 和 y 表示适用于某一特定应力或设计性能的弯曲轴线, 且:

$$F'_e = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl_b/r_b)^2} \quad (\text{L.2.7-4})$$

对于不同级别的使用载荷, F'_e 应乘以相应的应力限制系数。

式中: S_y ——屈服强度;

S_u ——抗拉强度;

E ——弹性模量;

K ——长度系数;

l ——元件的自由长度;

r ——截面的旋转半径;

f_t ——计算拉伸应力;

f_a ——计算压缩应力;

f_b ——计算弯曲应力;

C_m ——可参考相关规范取值;

r_b ——相对弯曲轴线而确定的旋转半径;

l_b ——元件在弯曲平面上的自由长度。

3) 线型支承件在 C 级使用荷载下的许用应力为设计使用荷载、A、B 级使用荷载下许用应力的 1.33 倍。在 D 级使用荷载下的许用应力为设计使用荷载、A、B 级使用荷载下许用应力的 r 倍, r 值由下式确定:

$$r = \min \begin{cases} 2 & \text{若 } S_u \geq 1.2S_y \\ 1.167S_u/S_y & \end{cases} \quad (\text{L.2.7-5})$$

$$r = 1.4 \quad \text{若 } S_u < 2S_y \quad (\text{L.2.7-6})$$

式中 S_y ——材料的屈服强度;

S_u ——材料的抗拉强度。

此外, 线型支承件还应满足以下规定:

a 对 D 级使用荷载, 截面拉伸应力应不超过 $1.2S_y$ 和 $0.7S_u$ 的较小者, 总截面剪应力应不超过 $0.7S_y$ 和 $0.42S_u$ 的较小者;

b B 级和 C 级使用荷载下的剪应力不大于 $0.42S_u$;

c 稳定性的要求为: 在 B 级、C 级和 D 级使用荷载下的压缩应力不大于 0.67 倍的临界屈服应力。

L.2.8 受内压部件的螺栓紧固件连接的应力限值应满足以下规定:

1 一级部件在不同级别使用荷载下螺栓的应力限值为: 在设计使用荷载下, 螺栓中产生的平均应力不大于设计温度下的许用应力强度 S_m 。在 A、B、C 级使用荷载下, 螺栓中的实际使用应力应满足下列要求:

1) 不计应力集中, 沿螺栓横截面的平均应力不大于 $2S_m$;

2) 不计应力集中, 在螺栓横截面的周边上由拉伸和弯曲引起的使用应力, 其最大值不大于 $3S_m$ 。

在 D 级使用荷载下, 按弹性方法计算的螺栓有效拉伸应力区域的平均拉应力不大于 $0.7S_u$ 和 S_y 中的较小值, 有效剪切面积上螺栓平均剪应力不大于 $0.42S_u$ 和 $0.6S_y$ 中的较小值。螺栓荷载应是外荷载和连接件变形产生的分离作用所引起的任何拉力的总和。

2 安全二、三级部件螺栓在 A、B、C、D 级使用荷载下的准则与一级部件在 A 级使用荷载下的准则相同, 仅需用 S 代替 S_m 。

L.2.9 非受压部件的螺栓紧固件连接的应力限值应满足以下规定:

1 设计使用荷载、A、B 级使用荷载下螺栓的应力应满足以下规定:

1) 受纯拉的螺栓, 其平均拉应力应在下列规定的 F_{tb} 值以下:

——对于铁素体钢 $F_{tb} = 0.5S_u$;

——对于奥氏体钢 $F_{tb} = 0.3S_u$ 。

另外, 上述限值不应超过材料工作温度下的屈服强度。由预应力荷载产生的应力 F_{tb} 应满足以下规定:

$$F_{tb} \leq 0.9S_y \quad (\text{L.2.9-1})$$

2) 受纯剪的螺栓, 其平均剪应力应在下列规定的 F_{vb} 值以下:

$$\text{——对于铁素体钢 } F_{vb} = \frac{0.62S_u}{3}$$

$$\text{——对于奥氏体钢 } F_{vb} = \frac{0.62S_u}{5}$$

3) 受拉剪联合作用的螺栓, 拉应力和剪应力应满足下式要求:

$$\frac{f_t^2}{F_{tb}^2} + \frac{f_v^2}{F_{vb}^2} \leq 1 \quad (\text{L.2.9-2})$$

式中 f_t ——计算的拉应力;

f_v ——计算的剪应力;

F_{tb} ——工作温度下的许用拉应力;

F_{vb} ——工作温度下的许用剪应力;

S_u ——工作温度下材料的抗拉强度;

S_y ——工作温度下材料的屈服强度。

2 B、C、D 级使用荷载下螺栓的拉伸应力和剪切应力的限制系数见表 L.2.9。

表 L.2.9 不同级别下螺栓应力限制系数

使用荷载	设计	A 级	B 级	C 级	D 级
限制系数	1.0	1.0	1.15	1.25	(1)

注：(1) 表示 D 级使用荷载下螺栓应满足的要求，具体如下：

- 平均拉应力不大于 $0.7S_u$ 和 S_y 的较小值；
- 有效剪切面积上螺栓平均剪应力不大于 $0.42S_u$ 和 $0.6S_y$ 中的较小值；
- 受拉剪联合作用的螺栓应符合 L.2.9 条 1 款 3) 的规定。

L.2.10 地脚螺栓的应力限值应按 L.2.9 条取值。

L.2.11 设备在 A、B、D 级使用荷载下的应变或变形限值，应满足设计技术规格书提出的要求。

L.2.12 抗震 I 类起重运输设备在地震时应保持稳定，不得发生倾覆或滑移，并应保证起吊的重物不致坠落。

L.2.13 抗震 II 类设备的应力限值可采用表 L.2.6 中相应 B 或 D 级使用荷载的规定。

附录 M 工艺管道应力限值和应力指数

M.1 管道设计限值

M.1.1 安全一级管道设计限值应符合下列规定：

1 运行安全地震作用效应与设计荷载效应组合时应满足下式要求：

$$B_1 \frac{PD_0}{2t} + B_2 \frac{D_0}{2I} M_i \leq 1.5S_m \quad (\text{M.1.1-1})$$

式中 B_1 、 B_2 ——管道部件的一次应力指数，见表 M.2.1；

P ——设计压力 (N/mm²)；

D_0 ——管道外径 (mm)；

t ——管道的名义壁厚 (mm)；

I ——管道的截面惯性矩 (mm⁴)；

M_i ——设计机械荷载与运行安全地震作用引起的组合弯矩 (N·mm)；

S_m ——许用应力强度值 (MPa) (可采用附录 L.1.1 的规定)。

2 运行安全地震作用效应与 A 级使用荷载效应组合时应满足下式要求：

$$C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + C_2 \frac{D_0}{2I} M_i + C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \leq 3S_m \quad (\text{M.1.1-2})$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 ——管件的二次应力指数，可采用表 M.2.1 的规定；

M_i ——系统从一组荷载转变到另一组荷载并承受运行安全地震作用时产生的组合弯矩 (不计入重力荷载效应)，可取下列两种情况的较大值：
——地震作用引起的弯矩的一半和其他荷载引起的弯矩相组合；
——仅由地震作用引起的弯矩。

T_a 、 T_b ——分别为总体结构不连续 (或材料不连续) 的 a 、 b 两侧的平均温度 (°C)，
对于通常的圆柱形结构， T_a 是距离 $\sqrt{d_a t_a}$ 上的平均温度， T_b 是距离 $\sqrt{d_b t_b}$ 上的平均温度；

d_a 、 d_b ——分别为总体结构不连续 (或材料不连续) 的 a 、 b 两侧内径 (mm)；

t_a 、 t_b ——分别为距离 $\sqrt{d_a t_a}$ 、 $\sqrt{d_b t_b}$ 内的平均壁厚 (mm)，须用试算法求解；

α_a 、 α_b ——分别为总体结构不连续 (或材料不连续) 的 a 、 b 两侧在室温下的热膨胀系数 (1/°C)；

E_{ab} ——总体结构不连续 (或材料不连续) 的 a 、 b 两侧在室温下的平均弹性模量 (N/mm²)；

P_0 ——工作压力的变化幅值 (N/mm²)。

其它符号同式 (M.1.1-1)。

3 运行安全地震作用效应与 B 级使用荷载效应组合时应满足式 (M.1.1-1)，其中压力 P 和力矩 M_i 为 B 级使用荷载，其容许应力值应为容许应力强度 S_m 的 1.8 倍，但不得大于工

作温度下屈服强度值 S_y 的 1.5 倍。

4 当采用包含 A 级或 B 级使用荷载的组合时, 疲劳分析中应考虑地震作用引起的疲劳效应, 其周波数应符合本规范 9.2.5 条的规定;

5 极限安全地震作用效应与 D 级使用荷载效应组合时应满足下式要求; 且当 3 倍 S_m 大于工作温度下屈服强度 S_y 的 2 倍时, 应以 2 倍 S_y 代替 3 倍 S_m 。

$$B_1 \frac{PD_0}{2t} + B_2 \frac{D_0}{2I} M_i \leq 3S_m \quad (\text{M.1.1-3})$$

式中 P ——D 级使用荷载引起的压应力 (N/mm^2)

M_i ——D 级使用荷载与极限安全地震作用引起的组合弯矩值;

其他符号同式 (M.1.1-1)。

6 应满足设计技术规格书规定的分别与 A、B、C、D 级使用限制相应的任何变形或挠度限值。

M.1.2 安全二、三级管道设计限值应符合下列规定:

1 运行安全地震作用效应与 B 级使用荷载效应组合时应满足下式要求; 且当 $1.8S_h > 1.5S_y$ 时, 应以 $1.5S_y$ 代替 $1.8S_h$ 。

$$B_1 \frac{P_{\max} D_0}{2t} + B_2 \frac{(M_a + M_b)}{Z} \leq 1.8S_h \quad (\text{M.1.2-1})$$

式中 P_{\max} ——B 级使用荷载引起的峰值压力 (N/mm^2);

M_a ——自重和其他持续荷载引起的组合弯矩 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

M_b ——运行安全地震动引起的弯矩和其他偶然荷载引起的弯矩之和 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

Z ——管道的截面模量 (mm^3);

S_y ——工作温度下的屈服强度 (N/mm^2);

S_h ——工作温度下的许用应力 (N/mm^2);

t ——管道的名义壁厚 (mm);

B_1 、 B_2 ——管道部件的一次应力指数, 见表 M.2.2。

2 极限安全地震作用效应与 D 级使用荷载效应组合时应满足下式要求; 且当 $3S_h > 2S_y$ 时, 应以 $2S_y$ 代替 $3S_h$,

$$B_1 \frac{PD_0}{2t} + B_2 \frac{(M_a + M_b)}{Z} \leq 3S_h \quad (\text{M.1.2-2})$$

式中 P_{\max} ——D 级使用荷载引起的峰值压力 (N/mm^2);

M_b ——极限安全地震动引起的弯矩和其他偶然荷载引起的弯矩之和 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

其它符号同式 (M.1.2-1)。

M.1.3 抗震 II 类物项管道的设计限值可按式 (M.1.2-1) 或 (M.1.2-2) 计算。

M.2 管道部件的应力指数

M.2.1 安全一级管道部件的应力指数可按表 M.2.1 采用。

表 M.2.1 安全一级管道部件的应力指数⁽¹⁾

管道制品和连接接头	内压		力矩		热作用
	B_1	C_1	B_2	C_2	C_3
远离焊缝或远离不连续段的直管	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
直管纵向对接焊缝					
(a)磨平的	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
(b)不打磨的 $t \geq 4.7\text{mm}$	0.5	1.1	1.0	1.2	1.0
(c) 不打磨的 $t < 4.7\text{mm}$	0.5	1.4	1.0	1.2	1.0
等壁厚管件间的环向对接焊缝 ⁽²⁾					
(a)磨平的	0.5	1.0	1.0	1.0	0.6
(b)不打磨的	0.5	1.0	1.0	1.0	0.6
插套焊配件、插套焊阀门、活套法兰或插套法兰的环向角焊缝 ⁽³⁾	0.75	1.8	1.5	2.1	1.0
过渡段焊缝 ⁽⁴⁾					
(a)磨平的	0.5	-	1.0	-	-
(b)不打磨的	0.5	-	1.0	-	-
1:3 锥形过渡段的焊缝 ⁽⁵⁾					
(a)磨平的	0.5	-	1.0	-	-
(b)不打磨的	0.5	-	1.0	-	-
同心渐进管的对接焊缝 ⁽⁶⁾	1.0	-	1.0	-	1.0
弯管或对接焊弯头 ⁽⁷⁾	-	-	-	-	1.0
支管连接焊接头 ⁽⁸⁾	0.5	-	-	-	1.8
对接焊三通 ⁽⁹⁾	0.5	1.5	-	-	1.0

注：（1）未列入表 M.2.1 的管道制品的应力指数应通过实验分析或理论分析确定，实验数据和理论分析应包括在设计报告中。

（2）表 M.2.1 中等壁厚管件间的环向对接焊缝的应力指数不适用于焊接材料径向收缩与管道名义壁厚的比值大于 0.25 的情况，名义壁厚 t 小于 6mm 的管件间的环向对接焊缝的应力指数应为 $C_2=1.0+2.4/t$ ，但不大于 2.1。

（3）未列入表 M.2.1 的插套焊配件、插套焊阀门、活套法兰或插套法兰的环向角焊缝的应力指数应为： $B_1=0.75(t_n/C_x) \geq 0.5$ ， $B_2=1.5(t_n/C_x) \geq 1.0$ ， $C_1=1.8(t_n/C_x) \geq 1.4$ ， $C_2=2.1(t_n/C_x) \geq 1.3$ ，其中 t_n 为接管或补强的支管连接的壁厚， C_x 为焊脚尺寸。

（4）未列入表 M.2.1 的过渡段不打磨焊缝的应力指数应为： $C_1=0.5+0.33(D_0/t)^{0.3}+1.2/t$ ，但不大于 1.8； $C_2=1.7+2.4/t$ ，但不大于 2.1； $C_3=1.0+0.03(D_0/t)$ ，但不大于 2.0。未列入表 M.2.1 的磨平的过渡段焊缝和壁厚 $t \geq 6\text{mm}$ 管件间的未磨平焊缝的应力指数应为 $C_1=0.5+0.33(D_0/t)^{0.3}$ ，但不大于 1.8； $C_2=1.7$ 。

（5）未列入表 M.2.1 的 1:3 锥形过渡段焊缝的应力指数应为： $C_1=1.0+1.2/t$ ，但不大于 1.8； $C_2=t_{\max}/t+2.4/t$ ，但不大于 $(1.33+0.04(D_0/t)^{0.5}+2.4/t)$ 或 2.1 中的较小值；式中 t_{\max} 是过渡区内的最大壁厚；若 $t_{\max}/t \leq 1.1$ ，则可采用环向对接焊缝的应力指数。未列入表 M.2.1 的 1:3 锥形过渡段磨平的焊缝和 $t > 6\text{mm}$ 的管件间的未磨平的连接焊缝应力指数应为： $C_1=1.0$ ； $C_2=t_{\max}/t$ ；但不大于 $1.33+0.04(D_0/t)^{0.5}$ 或 2.1 中的较小值； $C_3=0.35(t_{\max}/t)+0.25$ ，但不大于 2.0。

（6）未列入表 M.2.1 的同心渐进管对接焊缝的应力指数应为： $B_1=0.5$ （圆锥角不大于 30° ）， $B_1=1.0$ （圆锥角大于 30° ，但不大于 60° ）；过渡段半径不小于 0.1 倍的较大名义内径时， $C_1=1.0+0.0058\alpha(D_n/t_n)$ ， $C_2=1.0+0.36\alpha^{0.4}(D_n/t_n)^{0.4(D_2/D_1-0.5)}$ ，式中 (D_n/t_n) 是 (D_1/t_1) 和 (D_2/t_2) 中的较大值；过渡段半径小于 0.1 倍的较大名义内径时， $C_1=1.0+0.00465\alpha^{1.285}(D_n/t_n)^{0.39}$ ， $C_2=1.0+0.0185\alpha(D_n/t_n)^{0.5}$ 。

（7）未列入表 M.2.1 的弯管或对接焊弯头的应力指数应为： $B_1=-0.1+0.4h$ ，但不小于 0，且不大于 0.15，式中 $h=tR/r_m^2$ ， R 为曲管或弯头的名义弯曲半径， r_m 为管道的平均半径； $B_2=1.3/h^{2/3}$ ，但不小于 1.0； $C_1=(2R-r_m)/[2(R-r_m)]$ ； $C_2=1.95/h^{2/3}$ ，但不小于 1.5。

（8）未列入表 M.2.1 的支管连接焊接头的应力指数应为： $B_{2b}=0.5C_{2b}$ （支管），但不小于 1.0； $B_{2r}=0.75C_{2r}$ （主管），但不小于 1.0； $C_1=1.4\left(\frac{D_m}{T_r}\right)^{0.182}\left(\frac{d_m}{D_m}\right)^{0.367}\left(\frac{T_r}{t_n}\right)^{0.382}\left(\frac{t_n}{r_2}\right)^{0.148}$ ，但不小于 1.2。式中 D_m 为主管的平均直径， d_m 为补强或非补强支管的平均名义直径， T_r 为主管的名义壁厚， r_2 为补强支管接头半径， t_n 为接管或补强连接的支管的壁厚，当 $r_2/t_n > 12$ 时，取 $r_2/t_n = 12$ 。
 $C_{2b}=1.5\left(\frac{R_m}{T_r}\right)^{2/3}\left(\frac{r'_m}{R_m}\right)^{1/2}\left(\frac{T'_b}{T_r}\right)^{0.382}\left(\frac{r'_m}{r_p}\right)$ （支管），但不小于 1.5，式中 r'_m 为与接管座连接的管道平均半径， r_p 为补强接管或连接支管的外半径， T'_b 为连接支管的名义壁厚。
 $C_{2r}=1.15\left(\frac{r'_m}{t_n}\right)^{1/4}$ （主管），但不小于 1.5。

（9）未列入表 M.2.1 的对接焊三通的应力指数应为： $B_{2b}=0.4(R_m/T_r)^{2/3}$ （支管），但不小于 1.0； $B_{2r}=0.5(R_m/T_r)^{2/3}$ （主管），但不小于 1.0； $C_{2b}=0.67(R_m/T_r)^{2/3}$ （支管），但不小于 2.0； $C_{2r}=0.67(R_m/T_r)^{2/3}$ （主管），但不小于 2.0。

M2.2 安全二、三级管道部件的应力指数和应力增强系数可按表 M.2.2 采用。

表M.2.2 安全二、三级管道常用部件的应力指数和应力增强系数⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

部件描述		一次应力指数		柔度特性 h	柔度系数 k	应力增强系数 i
		B_1	B_2			
弯头 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾				$\frac{t_n R}{r^2}$	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$
焊接三通 ⁽⁶⁾		0.5	支管端 $B_{2b} = 0.4 \left(\frac{r}{t_n} \right)^{2/3}$	$\frac{4.4 t_n}{r}$	1	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$
			主管端 $B_{2r} = 0.5 \left(\frac{r}{t_n} \right)^{2/3}$			对缩进管接头的支管 $\frac{0.9}{h^{2/3}} \left(\frac{r_b'}{T_r} \right)$
补强制造三通 ⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾		0.5	$0.75i$	$\frac{(t_n + \frac{t_e}{2})^{5/2}}{r t_n^{2/3}}$	1	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$
						对缩进管接头的支管 $\frac{0.9}{h^{2/3}} \left(\frac{r_b'}{T_r} \right) \geq 2.1$
支管连接或无补强制造三通 ⁽⁶⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾		0.5	支管端: $r_m'/R_m \leq 0.9$ $B_{2b} = 0.75 \left(\frac{R_m}{T_r} \right)^{2/3} \left(\frac{r_m'}{R_m} \right)^{1/2} \left(\frac{T_b'}{T_r} \right) \left(\frac{r_m'}{r_p} \right)$ $r_m'/R_m = 1.0$ $i_b = 0.9 \left(\frac{R_m}{T_r} \right)^{2/3} \left(\frac{r_m'}{r_p} \right)$ $0.9 < r_m'/R_m < 1.0$ 使用线性插值	—	1	支管端: $r_m'/R_m \leq 0.9$ $i_b = 1.5 \left(\frac{R_m}{T_r} \right)^{2/3} \left(\frac{r_m'}{R_m} \right)^{1/2} \left(\frac{T_b'}{T_r} \right) \left(\frac{r_m'}{r_p} \right) \geq 1.5$ $r_m'/R_m = 1.0$ $i_b = 0.9 \left(\frac{R_m}{T_r} \right)^{2/3} \left(\frac{r_m'}{r_p} \right) \geq 1.5$ $0.9 < r_m'/R_m < 1.0$ 使用线性插值
			主管端: $B_{2r} = 0.9 \left(\frac{r_m'}{t_b} \right)^{1/4}$			主管端: $i_r = 0.8 \left(\frac{R_m}{T_r} \right)^{2/3} \left(\frac{r_m'}{R_m} \right) \geq 2.1$
30°锥形过渡	$t_n < 6.02\text{mm}$	0.5	1	—	1	$1.3 + 0.0036 \frac{D_0}{t_n} + \frac{2.87}{t_n} \leq 1.9$
	$t_n \geq 6.02\text{mm}$	0.5	1	—	1	$1.3 + 0.0036 \frac{D_0}{t_n} \leq 1.9$
同心和偏心渐缩管 ⁽¹¹⁾		$\alpha \leq 30^\circ$ 时取 0.5, $30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ 时取 1.0	1.0	—	1	$0.5 + 0.01 \alpha \left(\frac{D_2}{t_2} \right)^{1/2} \leq 2.0$
环向角焊或承插焊 ⁽¹⁰⁾		$0.75 \left(\frac{t_n}{C_x} \right) \geq 0.5$	$1.5 \left(\frac{t_n}{C_x} \right)$	—	1	$2.1(t_n/C_x)$ 但不小于 1.3 对于不等边焊缝, C_x 取焊缝短边长度
钎焊		0.5	$0.75i$	—	1	2.1
环向对接焊		0.5	1.0	—	1	1.0
螺纹管接头或螺纹法兰连接的管道		0.5	$0.75i$	—	1	2.3
波纹直管或弯头 ⁽¹²⁾		0.5	$0.75i$	—	5	2.5

- 注: (1) 表中各符号定义为: D_0 为管道名义外径; r 为管道平均半径(与三通和弯头相配管子); r_m 为支管平均半径; t_n 为管道名义壁厚; R 为弯头或弯管的名义半径; R_m 为主管平均半径; θ 为相邻斜接件轴线之间夹角的一半; S 为斜接件中心线上的间距; t_e 为补强壁厚; t_b 为补强区支管壁厚; T_b 为支管名义壁厚; T_r 为主管名义壁厚; D_1 、 D_2 分别为渐缩管大端和小端外径, t_1 、 t_2 分别为渐缩管大端和小端壁厚。
- (2) 表 M.2.2 中柔度系数 k 、应力增强系数 i 和应力指数 B_2 适用于任何平面内的弯曲, 不能取小于 1 的值。各系数适用于弯头和斜接弯头的有效弧长范围内, 并适用于三通的交叉点。
- (3) 表 M.2.2 中一次应力指数适用于 $D_0/t_n \leq 50$ 的管道, 应力增强系数适用于 $D_0/t_n \leq 100$ 的管道。
- (4) 弯头设计中, 在法兰连接到一端或两端的情况下, k 和 i 的值应由系数 c 进行修正: 乘以系数 c 后, k 和 i 的值不能小于 1.0。一端法兰时, $c = h^{1/6}$; 两端法兰时, $c = h^{1/3}$ 。
- (5) 弯头设计中, 应考虑铸造的对接焊弯头的壁厚可能大于与其连接的管道壁厚而产生的影响。
- (6) 各类三通设计中的支管应力校核时 $Z = \pi(r'_m)T'_b$; 主管应力校核时, $Z = \pi(R_m)^2 T_r$; Z 为管道截面模量。
- (7) 对于补强制造三通, 当 $t_e > 1.5t_n$ 时, $h > 4.05t_n/r$ 。
- (8) 对于补强制造三通、支管连接或无补强制造三通, 如果满足下列条件, 则表 M.2.2 中的公式适用:

- 1) 满足相应规范的补强面积要求;
 - 2) 支管的轴线垂直于主管壁表面;
 - 3) 对于管道上的支管连接接头, 沿主管表面测得相邻支管中心线之间的弧间距, 在轴向方向上不能小于它们内半径之和的 3 倍, 或者沿主管的周向不能小于它们内半径之和的两倍;
 - 4) 主管为直管。
- (9) 对于支管连接或非补强制造三通, 如果外半径 r_2 不小于 $T_b/2$ 、 $(T'_b + y)/2$ 或 $T_r/2$ 中的较大值, 则 i_b 和 i_r 的计算值可以除以 2, 但须满足 $i_b \geq 1.5$ 和 $i_r \geq 1.5$ 。
- (10) 对于活套法兰和插套焊法兰的环向角焊或承插焊, C_X 取为焊角长度, 且 $C_X \geq 1.25t_n$; 对于插套焊接装配件, $C_X \geq 0.75t_n$; 对于不等焊脚长度, C_X 取其中较小的焊脚长度。
- (11) 同心和偏心渐缩管若满足下列条件, 则表 M.2.2 中的公式适用:
- 1) 圆锥角不超过 60° , 而且渐缩管是同心的;
 - 2) D_1/t_1 和 D_2/t_2 的较大者不超过 100;
 - 3) 渐缩管整体厚度不小于 t_1 , 但小端圆筒部分和紧靠小端圆筒部分除外, 这部分壁厚不小于 t_2 ;
- (12) 对于波纹直管或弯头, 表 M.2.2 中系数适用于弯曲, 抗扭挠性系数等于 0.9。

本规范用词说明

为了便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可时，采用“必须”；
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做时：
正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”；
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做时：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做时，采用“可”。

引用标准名录

- 1 《工程场地地震安全性评价》(GB 17741)
- 2 《核电厂工程地震调查与评价规范》(GB/T 50572)
- 3 《压水堆核电厂物项分级》(GB/T 17569)
- 4 《混凝土结构设计规范》(GB 50010)
- 5 《钢结构设计规范》(GB 50017)
- 6 《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)
- 7 《水工钢筋混凝土结构设计规范》(GB 50010)
- 8 《建筑抗震设计规范》(GB 50011)

中华人民共和国国家标准

核电厂抗震设计规范

G B 50267- 20XX

条文说明

修编说明

住房和城乡建设部 2008 年发布《2007 年工程建设标准复审结果》，确定《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 应予修订。根据中国地震局要求，中国地震局工程力学研究所会同有关管理、研究、设计单位和高等院校于 2010 年 9 月开始对《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 进行全面修编。

核电相关部门的专家一致认为，自《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 编制以来，国外核电厂抗震设计相关技术标准已经进行了修订，有必要跟踪国外核电抗震领域的发展动态，采用新的设计要求。另外，自上世纪九十年代以来，我国核电事业发展迅速，在核电厂设计建造中积累了宝贵的经验，应将这些经验纳入技术标准。再者，《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 系全文强制国家标准，实践表明不能适应我国核电建设的现实需求。规范修编过程中，发生了日本福岛核电厂的严重核泄漏事故，吸取这次事故的教训也是本次修编考虑的重要问题。

美国、法国、日本等国作为核电技术领先的国家，开发了各自的核电技术并编制了相应的抗震设计技术标准，但这些技术标准对同一内容的规定并不完全相同。《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 中有关条款系有选择地参照国外技术标准编制，并在当时作为强制性国家标准颁布。然而，由于我国核电建设采用了自主开发的和由美国、法国、俄罗斯等国引进的核技术，也相应采用了国内外多种技术标准，显然不可能被强制的《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 所包容。本次规范修订中，考虑这一现实背景，在仍然主要引用美国机械工程师协会 ASME 系列和法国核岛设备设计、建造及在役检查规则协会 RCC 系列等技术标准的新规定的同时，特别注意规范条款可包容不同的设计方法。这一想法体现于修编后的规范仅设置了少量原则性的强制条款，且在条文和条文说明中注意强调可采用适用的、不同的先进设计方法。这一做法符合我国技术标准的制定可采用国际标准和国外先进标准的原则，适应我国当前核电建设的现状，有利于核电技术的进步和发展。

我国地震工程和核电事业历经几十年的发展，在实践中形成了若干适用的设计方法，也积累了自身的设计经验；这些方法和经验也体现于修编后的规范之中。例如，我国已编制了专门的国家标准规定了含核电厂在内的重大工程场址的地震安全性评价方法，故将相关内容在此次规范修编中删除；有关地基液化判别方法采用了我国经长期研究和实践应用的新成果；再者，由于核电厂核安全相关物项的结构类型和设计要求与常规设施有较大不同，《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 中规定的有关采用抗震构造措施的要求难以实现或并不完全适用，故在规范修编中修改了这部分内容，同时补充了若干新的基于实践经验的抗震构造措施要求。

长期以来，国内外甚多专家认为现行核电厂抗震设计是保守的，适当降低抗震设计的保守性、改善其设计和运行的经济性应予考虑。但是，日本福岛核电厂确因地震海啸波高超出设计基准等原因造成了灾难性事故。鉴于地震发生的不确定性和核安全的特殊重要性，保持核电厂抗震设计适当保守是稳妥的。因此，在本次规范修编中，倾向于保持适当的保守性，并增加了有关基于性能的核电厂抗震安全概率评估参考方法的附录，建议进行地震安全裕量或抗震概率安全分析，评估超设计基准工况的影响。

规范修编历时两年半，其间召开两次学术研讨会和三次工作会议。2012 年 5 月规范修编稿发送全国 19 个单位（核电相关单位 9 个，地震相关单位 4 个，高等院校 4 个、其他单位 2 个）征求意见，收到修改建议 99 条。针对修订意见进行修改后，于 2012 年 8 月形成规范修编送审稿，并于当年 11 月由中国地震局震害防御司主持、召开国家标准《核电厂抗

震设计规范》GB50267 修订送审稿审查会；住房和城乡建设部、国家核安全局的代表也参加了会议。规范审查委员会认为，修编单位提供的资料齐全、内容详实；规范修编遵守我国抗震防灾和核安全的法律法规，与其它相关规范标准基本协调，适应我国当前核电工程的发展需求；规范借鉴了国外相关技术标准的最新内容，吸取了我国十多年来核电工程经验，技术先进，安全合理，可操作性强。审查委员会专家也对送审稿提出了宝贵的修改意见，

规范修编组针对审查委员会专家的意见进行协商并对相关内容进行修改后，最终提交《核电厂抗震设计规范》GB50267 修编报批稿。

与《核电厂抗震设计规范》（GB 50267-97）相比较，尽管删除了部分内容，修订后的规范报批稿仍增加了条文和附录的数量，共含条文 10 章 38 节 190 条、以及附录 12 篇 25 节 92 条。强制性条文 9 条，占条文总数的 4.7%。

目 次

1 总则	78
2 术语和符号	80
2.1 主要术语	80
3 抗震设计的基本要求	81
3.1 抗震概念设计原则	81
3.2 计算模型	81
3.3 地震作用计算方法	82
3.4 楼层反应谱	83
3.5 结构和材料的力学参数	83
3.6 作用效应组合和抗震验算	84
3.7 抗震措施	85
4 设计地震动	86
4.2 设计基准地震动参数	86
4.3 设计地震动加速度时程	86
4.4 非基准点处的地震动	87
5 地基、基础和边坡	88
5.1 一般规定	88
5.2 地基和基础的抗震验算	88
5.3 边坡的抗震稳定性验算	89
5.4 地基液化判别	90
6 安全壳、建筑物和构筑物	91
6.1 一般规定	91
6.2 作用效应及其组合	91
6.3 抗震验算	92
7 地下结构和地下管道	93
7.1 一般规定	93
7.2 地下结构的地震作用	93
7.3 地下管道的地震作用	93
7.4 抗震验算	94
7.5 抗震措施	95
8 设备和部件	96
8.1 一般规定	96
8.2 地震作用和地震作用效应	96
8.3 作用效应组合和设计限值	97
9 工艺管道	99
9.1 一般规定	99
9.2 地震作用和地震作用效应	100
9.3 作用效应组合和设计限值	102
9.4 抗震措施	102
9.5 阻尼器	102
10 地震监测与报警	103
10.1 一般规定	103

10.2 系统设备的布设	103
10.3 设备功能与指标	104
附录 A 地基与结构的相互作用分析	105
附录 B 地震作用最大值的组合	106
附录 D 设计楼层反应谱的调整	107
附录 E 基于性能的抗震安全概率评估参考方法	108
附录 F 标准设计反应谱	109
附录 K 设备抗震鉴定试验	110
附录 L 设备、部件的容许应力和设计限值	117

1 总则

1.0.1 本条阐述编制本规范的指导思想，强调民用核设施安全第一、防震减灾以预防为主。

1.0.2 本条规定本规范的适用范围。我国拟建的核电厂绝大多数采用压水型反应堆，但也有少量其它堆型，如重水堆、气冷堆、快中子堆等。本规范有关具体设计要求的条款主要适用于压水堆核电厂，但基本原则和地震作用计算方法也适用于重水堆、气冷堆和快中子堆核电厂，可以适应我国民用核电发展的要求。

本规范适用于新建核电厂的设计与建造，通常不用于对已建核电厂抗震能力的重新评价。

本规范的抗震设计原则和计算方法适用于厂址极限安全地震动加速度峰值不大于 $0.5g$ 的核电厂；但是，考虑到核电厂安全的重要性及经济技术可行性，宜尽量避免在强烈地震区选址建设核电厂。我国极限安全地震动加速度不超过 $0.3g$ 的县级行政区数量超过县级行政区总数的 $3/4$ ，余者绝大部分位于西部；辽阔的国土为核电厂选择地震活动性较低的厂址提供了可能；目前，我国已建和在建核电厂厂址的极限安全地震动加速度峰值均未超过 $0.2g$ 。

1.0.3 核电厂厂址的设计基准地震动用于核电厂抗震 I、II 类物项的抗震设计，必须依据核安全法规以及国家标准《工程场地地震安全性评价》和《核电厂工程地震调查与评价规范》经地震安全性评价确定；作为地震安全性评价结果的文件和图件，应经国家有关主管部门审批后方可使用。

非核抗震类物项的设计地震动可采用按国家规定权限审批、颁发的最新地震动参数区划图提供的结果，亦可采用经地震安全性评价得出的结果。

核电厂抗震 I、II 类物项的设计基准地震动和非核抗震类物项的设计地震动参数虽然均可经地震安全性评价得出，但两者具有不同的发生概率。

1.0.4 依据《核电厂设计安全规定》(HAF102-1991)，本条基本沿袭了《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)中有关核电厂抗震设防目标的表述，同时考虑国外核电厂的设计和运行实践，强调极限安全地震动作用下的安全保障是核电厂抗震设防的关键所在，在遭遇运行安全地震动影响时，核电厂应能正常运行并需进行停堆检查。

1.0.5 抗震设计仅是核电厂各物项设计的专项内容之一，抗震设计安全指标应与核电厂总安全指标相协调，抗震设计必须满足核电厂核安全评价的相关要求。

规定抗震物项分类是进行核电厂抗震设计的基础环节之一，有关核安全重要性的差异是区别核电厂物项抗震分类的基本因素。

1.0.6 国际上核电厂物项的抗震分类有 2~4 类不等。《核电厂的抗震设计与鉴定》(HAD 102/02-1991)、《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)和国家标准《压水堆核电厂物项分级》GB/T17569 均规定核电厂物项的抗震分类采用三类。尽管各具体物项的抗震分类规定有所不同，但整体划分为三类有利于规定相关设计要求和方便设计人员的使用，故本次规范修订中的物项抗震分类仍规定为三类。

各物项的具体抗震分类可参照相关技术标准确定。例如，在适用时，可采用《压水堆核电厂物项分级》GB/T17569 的规定。

在确定物项抗震分类时，除考虑其完整性和设计功能要求外，应识别出以下建筑物、构筑物 and 部件：它们在地震中不执行安全功能，但其空间效应（坍塌、跌落、移位）或其

他效应（烟、气）可能危害抗震Ⅰ类（或Ⅱ类）物项的功能或对控制室人员造成伤害等。针对这样的建筑物、构筑物 and 部件,设计中应采取适当的措施,保证其在地震中不发生危害抗震Ⅰ类（或Ⅱ类）物项功能或影响控制室人员能力的效应；或者重新确定其抗震类别,比如提高至与受影响物项相同的抗震类别。

1.0.7 抗震设计和抗震性能验证可采用直接方法或间接方法进行,既可单独采用某一种方法,也可综合采用多种方法。直接方法包括分析方法、实验方法、经验（或类比）方法；间接方法是基于已知的参照物项的抗震性能评价待验证物项的抗震性能。本规范对抗震Ⅰ、Ⅱ类物项具体规定了采用分析方法和试验方法的具体要求。

非核抗震类物项可依其结构类型及重要性,采用相关非核设施抗震技术标准（如《建筑抗震设计规范》（GB 50011）等）规定的抗震设防标准和抗震设计要求；考虑到核电厂中这类物项一旦发生不涉及核安全的损伤,也会造成广泛的社会影响,故可采用适当提高的设计要求；对于为缓解严重事故需要长时间起作用的非安全级构筑物和部件,应采取适当的设计措施,保证其在需要时的可用性。

2 术语和符号

2.1 主要术语

2.1.3 极限安全地震动和运行安全地震动分别为国外常用的安全停堆地震 SSE 和运行基准地震 OBE，亦即我国核安全导则中的 SL-2 和 SL-1。

2.1.4 极限安全地震动是对应核电厂极限安全要求的设计基准地震动，须经场址的地震安全性评价得出，其强度不低于核电厂场址历史上曾遭遇的有依据的最大地震动。

极限安全要求意指：发生极限安全地震动时及震后，与安全停堆及维持安全停堆状态有关的所有建筑物、构筑物、系统和部件都应维持正常功能。这些建筑物、构筑物、系统和部件应能保证：(1)反应堆冷却剂压力边界的完整性；(2)在安全停堆条件下停堆，并有维持安全停堆状态的能力；(3)防止可能造成放射性对环境的照射事故或具有减轻事故后果的能力。

2.1.5 运行安全地震动是关系核电厂正常运行的设计基准地震动，其年发生超越概率高于 10^{-4} （如 2×10^{-3} ）。这一地震动的确定除考虑地震安全性评价得出的结果外，尚可考虑厂址的抗震设防烈度、抗震设计准则、物项安全运行保障以及停堆检查等因素。

2.1.6 当场址特定地震反应谱是基于地震安全性概率评价、借助地震反应谱衰减关系得出时，其各频率分量具有与设计基准地震动加速度相同的年发生超越概率，通称概率一致地震反应谱，亦称同一置信水平反应谱；该地震反应谱与直接由实测地震加速度时程得出的反应谱以及标准地震反应谱是有差别的。

2.1.7 标准地震反应谱通常是由若干实测地震加速度时程得出的反应谱的上包络谱、或是统计意义上幅值为均值加数倍标准差的反应谱。这些实测地震动加速度时程可能具有相近的地震和场地背景，但也可能并没有明确的地震和场地背景。此类反应谱的各频率分量不具有相同的发生概率；其零周期加速度值常取为固定值，使用时应调整其与设计基准地震动加速度相一致。

2.1.8 一般非核工程设施的抗震设防烈度曾采用由烈度区划图规定的基本烈度。地震烈度并非物理量，故抗震技术标准均规定了对应不同烈度的地震动加速度峰值。在我国地震动参数区划图编制完成并颁布使用后，结构抗震设计可直接依据地震动参数（加速度峰值和地震反应谱）进行，但囿于习惯仍根据设防烈度采用抗震措施，同时规定了更较细化的设防烈度与地震动加速度峰值的对应关系。

2.1.9 根据设备类型及所在位置的不同，设备抗震鉴定试验中规定采用的要求反应谱为地震反应谱或楼层反应谱。

2.1.10 设备抗震鉴定试验中的输入扰动是依据试验反应谱生成的；原则上试验反应谱应不低于要求反应谱。

3 抗震设计的基本要求

3.1 抗震概念设计原则

3.1.1~3.1.2 抗震概念设计原则是结构抗震基础理论与工程实践经验的结合，在抗震设计中应予遵循。违抗抗震概念原则的设计是不合理的设计，将造成建设资源的浪费或难以达到预期的抗震要求，由此造成的后果不能借助抗震计算分析予以弥补。

3.2 计算模型

3.2.1

1 有限元模型和平面杆系模型等均可反映结构质量和刚度的不均匀分布。最简单的平动和扭转耦联作用计算模型是非共轴的集中质量悬臂梁模型；各层悬臂梁轴线分别穿越楼层质心，各层刚性楼板有两个正交的水平平动自由度和一个绕竖轴的扭转自由度。

2 用集中质量模型模拟质量连续分布的结构时，过少的集中质量个数将引起较大的计算误差，不能适当反映结构振动的基本性状；对于高柔、长大、复杂的结构体系，须考虑多个振型的贡献，集中质量的个数必须满足最低限度要求。

3 结构坐落在地基上，结构与地基间存在能量传递和动力相互作用。从工程应用角度着眼，动力相互作用对上部结构影响的大小，与上部结构刚度与地基刚度的比值有关；在上部结构刚度与地基刚度接近、甚至高于地基刚度的情况下，动力相互作用对上部结构地震反应的影响最大。地基介质为岩石或刚度相对较高时，一般可不考虑相互作用影响；这时，因忽略辐射阻尼，结构加速度反应的计算结果将是保守的，但位移反应的计算结果可能偏低。

基础埋置效应主要体现于两个方面，首先，考虑埋置效应后作用于基础的地基等效弹簧刚度的数值将发生变化，与无埋置基础时相比，刚度将增加；其次，考虑埋置效应后基础底面的地震动也将与地表地震动不同。

地基、基础与结构的相互作用分析可采用集中质量法、整体有限元法和子结构法等。附录 A 给出了相互作用体系中地基的集中质量分析模型和有限元分析模型的若干规定，以及相互作用体系子结构算法的原则表达式，但并不排斥使用其它适用的动力相互作用分析方法。

6 储液结构中液体的运动将对结构器壁产生附加的动液压效应，在结构分析中应予考虑。当储液结构器壁刚度较大时，可采用近似的刚性器壁假定，简单方便地计算水平对流压力、脉冲压力和竖向动液压力，并可估计液体振荡波高；对于不能采用刚性器壁假定的储液结构，可采用适当的弹性器壁模型计算液压效应。

3.2.2 主结构与子结构间相互作用的概念与地基和结构间相互作用的概念是相似的。是否建立耦联分析模型取决于子结构与主结构的频率比和质量比。主结构的主导频率是对主结构地震作用起主要控制作用的前若干阶自振频率，亦称卓越频率，

当子结构单点支承于主结构时，除可按照本规范 3.2.2 条 2 款的规定判断是否采用耦联模型进行分析之外，亦可依图 1 进行更较详细的分析，决定采用解耦模型或耦联模型进行

计算。图中模型 A 为解耦模型，即先进行主结构的动力分析，而后将主结构的动力反应作为输入、计算子结构的动力反应。模型 B 也是解耦模型的一种，但在计算主结构动力反应时，计入子结构的质量。模型 C 为耦联模型，同时计算主结构和子结构的动力反应。图中， M_p 为主结构的质量， K_p 为主结构的刚度， M_s 为子结构的质量， K_s 为子结构的刚度。

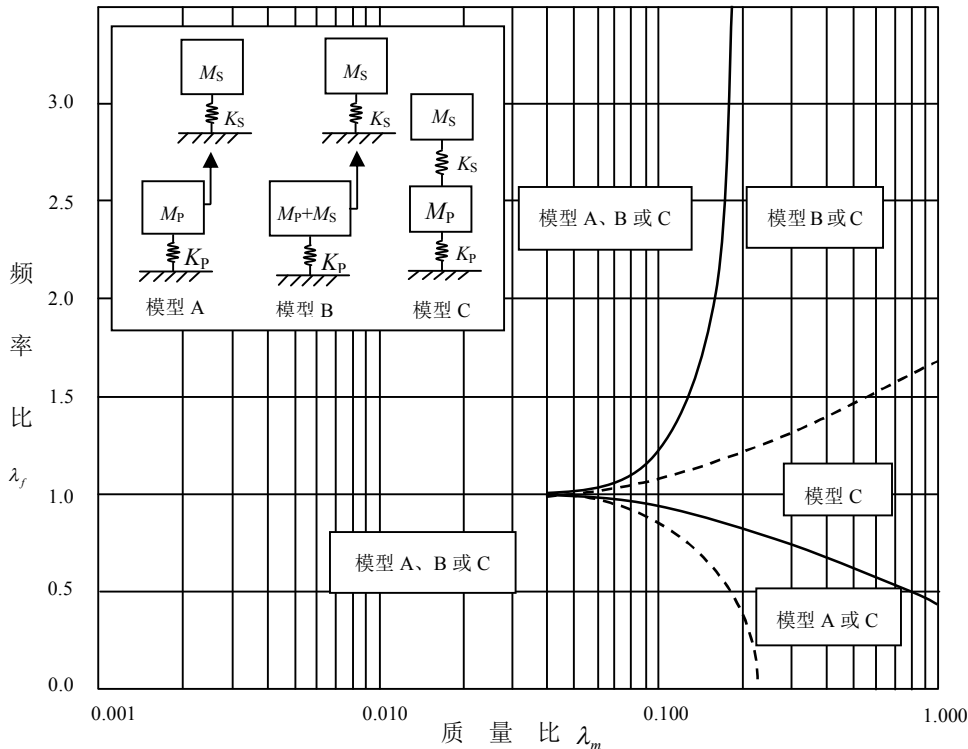


图 1 含主结构与子结构的结构体系计算模型

3.3 地震作用计算方法

3.3.2 核电厂核安全相关物项在设计基准地震动作用下应保证其完整性，故可采用弹性方法计算；具有几何非线性的结构亦可采用反应谱方法计算。土体和某些其它可发生弹塑性变形的结构，可采用工程上常用的、较为成熟的等效线性化方法计算。弹塑性动力时程分析需采用结构的非线性本构关系，其骨架曲线和滞回规则常有很大不确定性，不但计算复杂、耗时，且计算结果的合理性也往往难以判断；因此，在工程设计中，结构弹塑性地震反应的估计多基于对弹性反应分析结果的简单修正。近年来发展的静力弹塑性分析方法（如结合 PUSHOVER 分析的能力谱方法）适用于简单、规则、第一振型起主要控制作用的结构，可用于弹塑性地震反应估计。

3.3.3 可用于结构地震作用计算的方法有很多种，含时域方法和频域方法、弹性方法和弹塑性方法、动力方法和拟静力方法、反应谱方法和时程方法等。就弹性动力分析而言，时域的振型叠加方法与频域的富立叶变换方法是等价的，但后者可以采用与频率相关的阻尼。振型叠加反应谱方法可以逼近时域振型叠加方法的计算结果，更为简单易行，故这一方法和弹性时程分析方法广泛用于结构地震反应计算。

考虑到地震动极大的不确定性以及结构建模中采用的种种假定和简化，无论计算方法

如何复杂，得出的结果都只能是一种近似估计，工程应用中过分追求计算方法的精确性是不必要的。经验证明，即使采用最简单的拟静力方法，只要结果适当保守，亦可保证结构具有预期的抗震能力。

3.3.4 反应谱方法直接得出的是各振型地震作用的最大值，由于各振型地震作用最大值并不发生在同一时刻，故总地震作用只能借助随机振动理论在理想化假定条件下进行近似估计；就算法而言，时程分析结果的叠加更较准确。结构地震反应分析一般采用两个正交水平方向和竖向的地震动输入，且假定两个水平方向的地震动幅值相同；考虑到未来实际发生的地震动方向和强度不可准确预测，故需将三个确定方向的结构地震作用计算结果进行组合，得出空间地震作用最大值的估计。

3.3.5 跨度达几百米以上的结构、坐落在特性有明显差异的地基上的结构，以及多个支承点的振动有明显差异的子结构，均应考虑多点输入（即非一致输入）问题。目前已发展了多点输入结构动力分析的时程分析法、反应谱分析法和基于随机理论的分析方法。

3.3.6 视结构所在位置的不同，结构地震作用计算采用的输入也不同，如输入地震动时程或相应地震反应谱，以及输入结构反应时程或相应楼层反应谱。计算模型包含地基时，输入的地震动可选择在地下不同深度处；应当注意的是，不同深度处的地震动应是相互协调的，即满足本规范第4章的相关要求。

3.4 楼层反应谱

3.4.1 楼层反应谱原则上应由相应楼层的地震加速度反应时程生成，在工程上也有依据主结构和子结构的不同物理力学性质、调整地震反应谱得出楼层反应谱的方法，但后者尚无广泛应用的经验，故未列入本规范。

计算楼层反应谱时采用足够小的频率间隔旨在得到较为准确的结果，反映主结构自振频率处较强的振动分量。频率计算点除依本规范表 3.4.1 确定外，亦可取某个较低频率的 5%~10%作为频率增量确定相邻较高频率计算点，且同时采用主结构的各阶自振频率。

3.4.2 有关设计楼层反应谱的确定和使用要求，可见本规范附录 D 及其说明。

3.5 结构和材料的力学参数

3.5.2 振动分析中阻尼是模拟能量耗散的参数，关于阻尼机制的研究有不同结果。工程中最常用的是等效粘滞阻尼，可视为实际起作用的各种耗能机制的等价模拟。等效粘滞阻尼比是根据实验或实测结果得出的，不能由计算确定。

在利用本规范表 3.5.2 时，对于易受应力腐蚀的管道，应采用美国核管会《核安全导则》RG1.61 规定的阻尼值。

具有粘滞阻尼形式的经典比例阻尼一般不适用于材料的弹塑性耗能和地基辐射阻尼，但在工程应用中，处于弱非弹性性态的结构常用等效粘滞阻尼模拟耗能。抗震设计中，往往将阻尼比用作调整计算结果的参数，较大的阻尼比一般导致较小的地震作用。

3.5.3 本条有关混凝土和钢材的力学参数分别采用国家标准《混凝土结构设计规范》（GB50010）和《钢结构设计规范》（GB50017）的规定。

3.5.4 地基弹簧刚度对地下结构计算结果的可靠性影响很大。在采用平面有限元方法（见图

2) 计算弹簧刚度时, 可在地下孔洞周边沿弹簧作用方向施加均布荷载 q 、并计算各点相应的位移 δ , 得到各点地基基床系数 $K_s=q/\delta$ 后, 再换算为集中弹簧刚度。计算中采用的地基介质弹性模量应与地震作用下的地基应变相适应。

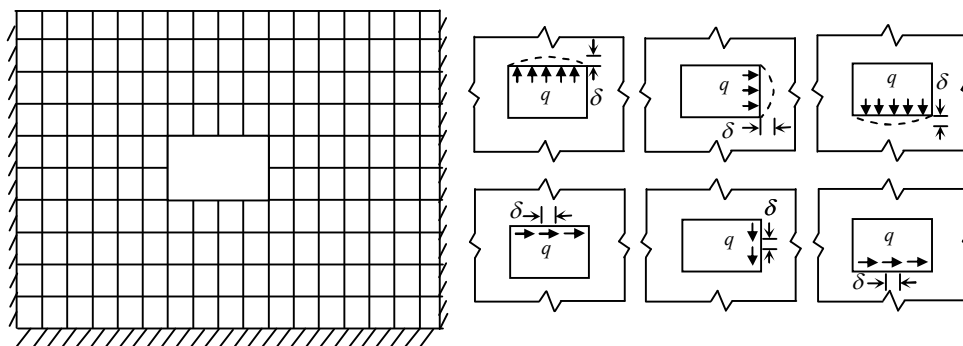


图2 地基等效弹簧刚度的计算

3.6 作用效应组合和抗震验算

3.6.2 国际上核电厂抗震设计发展的新动态之一是不再将运行安全地震动作为抗震 I、II 类物项的设计基准地震动, 但是, 相关技术标准中并未能全部排除该等级地震动在抗震设计中的使用。

为不降低核电厂抗震 I、II 类物项抗震设计的安全裕度及方便设计人员使用, 本次规范修订中, 在地震作用计算和抗震验算中仍然保留了有关运行安全地震动的规定, 以便在适用时采用。本条规定并不是强制性内容, 在满足相关物项有关完整性和可运行性的不同要求的前提下, 设计人员可以针对具体情况决定采用或不采用运行安全地震动。

本条要求将核电厂核安全相关物项基于对完整性和可运行性的不同要求予以区分。考虑核电厂的整体安全要求, 抗震 II 类物项满足在极限安全地震动作用下的结构完整性要求是有益乃至必要的; 但一般情况下, 其完整性要求与抗震 I 类物项的完整性要求有程度上的差异, 即允许结构达到有限的永久变形状态; 并不意味着抗震 II 类物项必须进行极限安全地震动作用下的弹性分析并采用与抗震 I 类物项相同的验收准则。在抗震 II 类物项的具体设计中可基于性能分析对弹性计算结果进行折减, 也可采用适当的运行安全地震动或折减的极限安全地震动进行地震作用计算和抗震验算。

建筑结构、岩土工程和机械、电气结构的抗震设计各有其特点和传统习惯方法, 难以作统一的具体表述, 故核电厂各具体物项在抗震设计中采用的荷载组合和分项系数等分别由本规范相关各章规定。

3.6.4 核设施的概率安全性评估 (PSA) 近年发展很快, 美国、法国、日本、芬兰、英国、西班牙、韩国等都有广泛的研究和应用。美国核管会 (NRC)、美国能源部 (DOE)、美国电力研究院 (EPRI) 以及美国土木工程师学会 (ASCE) 已经发布了核设施和核电站基于性能的概率抗震设计评估方法的导则、规范和相关的技术文件。此外, 我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) 已对性能抗震设计作了相关规定, 其他某些构筑物的抗震设计也有采用这一方法的趋势。在日本东部海域大地震海啸引发日本福岛核事故之后, 我国国家核电技术公司和美国西屋公司对 AP1000 核电站进行了概率安全性评价。

这一背景下, 此次《核电厂抗震设计规范》修编中提供了有关进行抗震性能概率评估的参考方法, 旨在推动我国技术人员开展相关的研究和应用。但是, 由于我国目前尚缺乏有关概率安全性评估的深入研究和应用经验, 故同时仍规定采用确定性方法进行抗震设计; 虽然提倡进行抗震相关的概率安全性评价, 但尚不能根据概率分析修改确定性抗震设计的结果、降低核电厂核安全相关物项的抗震安全裕度。

3.7 抗震措施

3.7.5 一般建筑物和构筑物的基底水平隔震技术已较为成熟,但实用的竖向隔震技术尚待开发。隔震技术在可大幅度降低结构水平加速度反应的同时,也将放大隔震层的位移。目前,核电厂建筑物和构筑物主要采用传统的抗震结构,尚无核电厂隔震建筑经受实际地震考验的实例;核安全相关建筑物和构筑物采用隔震技术后将对相关管道系统的设计产生重大影响,故应进行充分的技术和经济可行性论证。

3.7.7 《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)规定抗震 I、II 物项应采用我国《建筑抗震设计规范》(GB50011)中对应设防烈度 9 度的抗震构造措施要求,实践表明执行这一要求存在困难。核电厂核安全相关物项基于弹性分析进行抗震设计、并具备适当的安全裕度,且核电厂安全壳等结构与一般建筑存在差异,不宜直接套用一般建筑的构造措施。故本次规范修订中规定抗震 I、II 物项除采用本规范具体规定的抗震构造措施之外,宜采用不低于相关非核设施抗震技术标准中相对设防烈度提高一度的抗震构造措施要求,这一要求与非核抗震类物项中重要者采用的抗震构造措施要求相当。

4 设计地震动

4.2 设计基准地震动参数

4.2.1 当采用竖向地震动衰减关系确定竖向极限安全地震动加速度时，应特别论证衰减关系的合理性与保守性。当依水平向与竖向地震动加速度的比例关系确定竖向极限安全地震动加速度时，应考虑厂址周边的地震地质构造环境和场地条件；竖向地震动加速度与水平向地震动加速度的比值范围为 $2/3 \sim 1$ ；一般情况下该比值可取 $2/3$ ，当厂址地震动参数受近场发震构造控制时，可取更大的比值。

4.2.3 早期核电厂抗震设计技术标准，如我国《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)、法国 RCC-G86 标准和美国 ACI-349-1 标准，均采用两级地震动作为抗震设计基准地震动。当前，国外核电厂抗震设计发展的趋向之一是仅将极限安全地震动作为抗震设计基准，运行安全地震动则作为停堆检查的指标，如 AP1000 和 EPR 核电站。然而，AP1000 的抗震设计又规定，仅当运行安全地震动小于 $1/3$ 极限安全地震动时方可不予考虑，当其大于 $1/3$ 极限安全地震动时，仍需证明在其作用下的物项抗震安全性；在设备和部件的抗震设计中规定，在设计载荷效应与运行安全地震作用效应叠加时，地震作用效应取极限安全地震作用效应的 $1/10$ ；在 A 级或 B 级使用载荷效应与运行安全地震作用效应叠加时，地震作用效应取极限安全地震作用效应的 $1/3$ 。这表明，运行安全地震动作为设计基准地震动的较低一级，在抗震设计中仍有使用。

考虑以上因素和我国核电厂抗震设计方法的延续性，本规范规定极限安全地震动是核电厂抗震设计的最重要的、具有决定作用的设计基准，其加速度峰值不得低于 $0.15g$ ；运行安全地震动作为次一级的地震动基准，则应综合考虑核电厂安全运行和抗震设计的需要确定，其影响因素包括抗震设计要求、地震后采取的规定措施要求和核电厂检查要求等，并不仅仅取决于地震危险性分析的结果；规范修订中，删除了《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 中关于运行安全地震动加速度峰值不得小于极限安全地震动加速度峰值的 $1/2$ 的规定。一般情况下，水平运行安全地震动加速度峰值不应低于对应厂址设防烈度的基本地震动加速度；取 $1/3 \sim 1/2$ 的极限安全地震动加速度峰值作为运行安全地震动加速度峰值进行弹性分析抗震设计，可以满足抗震 II 类物项在极限安全地震动作用下的完整性，在上述范围内的运行安全地震动作为停堆检查的依据也是适宜的。

4.2.4 标准地震反应谱可选择拟建核电机组的标准设计谱（如 RG1.60 谱、AP1000 标准谱等）或其它国内外常用的标准反应谱；采用标准地震反应谱作为设计基准反应谱时，应考虑其适用性并满足本条规定的对厂址特定地震反应谱的包容性要求。

4.3 设计地震动加速度时程

4.3.1 目前常用的生成设计地震动加速度时程的方法有两种：第一种方法是采用三角级数或其他数学变换的方法拟合地震动频谱特性生成，第二种方法是以相似地震环境和场地条件下的实测强震加速度时程作为初始时程进行调整得出。国外技术标准有优先采用第二种方法的趋势，NUREG-0800 SRP 2007 Rev.3 规定必须基于实测强震记录生成地震加速度时程。

4.3.3 本条主要内容延袭了《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97) 的相关规定。地震动加速度时程的傅立叶相位谱在 $0 \sim 2\pi$ 相角范围内均匀分布，这是实测地震动加速度记录的基本谱特征之一。加速度时程的反应谱与目标反应谱相协调，可使抗震设计的时程分析和反应

谱分析采用的输入地震动基本一致、得出的结果具有可比性。加速度时程的反应谱应有足够的控制点数才能达到时间过程与反应谱的协调一致。

本条对强震持续时间做出了统一的规定。强震持续时间作为总持续时间的一部分，有多种不同的定义，不同定义的强震持续时间可能有很大差异。影响加速度持续时间的因素十分复杂，统计结果离散性极大，难以给出确定的结果，工程上一般采用适当的、较长的持续时间。

4.3.4 本条规定是依据国外相关技术标准的最新内容编制的。生成单组设计地震动加速度时程时，除可基于反应谱进行调整外，为避免地震动在某些频带内能量不足，亦可基于功率谱进行调整；附录 G 给出了计算功率谱密度的参考方法。强震加速度时程具有很大的不确定性，两条地震动加速度时程近似为统计相关难以反映地震动时程的随机性，因此生成的人造地震动时程的互相关系数不应大于 0.16。

4.4 非基准点处的地震动

4.4.1 核电厂各物项抗震分析的输入地震动位于地面不同点和地下不同深度，并不等同于给定的基准点（自由场地表）地震动。物项抗震分析甚至可能涉及多点非一致地震动输入的问题。非基准点处的地震动特性取决于核电厂厂址的地形、地质构造和地基特性，这些输入地震动须经相关场地的地震反应分析得出，使其与基准点处的设计基准地震动相协调。

4.4.2 反演确定非基准点处的地震动时，涉及场地地基建模和分析方法等问题，本条规定的内容与本规范其他章节涉及地基、地基与结构相互作用及地下结构分析的有关要求基本一致，含地基计算域的范围、地基边界处理、有限单元划分和时程分析的时间步长等。

4.4.3 反应堆厂房基础底面标高处由计算得出的地震动与基准点地震动可能存在差异，考虑地震动预测的不确定性以及反应堆厂房的抗震裕度，规定其最小水平向极限安全地震动加速度峰值不应小于 0.15g。

5 地基、基础和边坡

5.1 一般规定

5.1.1 地基、基础和边坡的抗震分析是核电厂抗震设计的重要环节。虽然工程经验表明，满足承载力要求的均匀坚实的岩土地基一般均可满足稳定性要求，但基于对核电厂安全的严格考虑，抗震 I、II 类物项的地基、基础以及与抗震 I、II 类物项安全有关的边坡必须进行抗震稳定性验算。地基、基础和边坡的抗震验算包括基础的承载力、裂缝宽度和抗倾覆验算，基础底面的抗滑移验算，地基的承载力验算和抗滑移验算，边坡的抗滑移验算，以及地基的液化判别。

5.1.2 地基对上部结构的抗震安全性具有举足轻重的作用，核电厂抗震 I、II 类物项的地基必须是具有足够承载力的稳定地基。震害经验表明，软弱土、液化土等构成的地基在地震作用下失稳并导致上部结构破坏的现象屡见不鲜；此类地基的分析方法复杂，采用改善稳定性的抗震措施也很困难，故不应用作抗震 I、II 类物项的地基。

水平方向力学性质差异大的地基，一旦发生不均匀沉降或局部失稳将危及上部结构，抗震 I、II 类物项宜尽可能避开此类地基；当不能避开时，应采用可靠的措施避免地基发生不均匀沉降或失稳，或能避免不均匀沉陷和失稳对上部结构造成危害。

同一结构单元的地基不应一部分为人工地基而另一部分为天然地基。当抗震 I、II 类建筑物和构筑物的结构单元确实不能避开此类不同性质的地基时，应经充分论证、采用切实可行且有效的工程措施，避免发生不均匀沉陷、或能避免不均匀沉降对上部结构造成危害。

5.2 地基和基础的抗震验算

5.2.1 静承载力标准值小于 0.34MPa 或剪切波速小于 300m/s 的地基是相对软弱的地基，为保障核电厂抗震 I、II 类物项的安全性，此类地基的抗震稳定分析应做专门研究。

5.2.4 本条内容参考了美国核管会《标准审查大纲》SPR (NUREG-0800) 第 3.8.5 节的规定。

竖向地震作用方向的取向将影响承载力、抗倾覆、抗滑移、抗上浮验算的结果，荷载组合中应取不利的作用方向，例如，在计算基底摩擦力、抗倾覆力矩和抗上浮力等时，竖向地震作用应取与重力相反的方向。

地基、基础和边坡的抗震稳定性分析中，应考虑上部结构向下传递的地震作用，原则上这一问题可由土结相互作用体系分析解决。为避免在地基稳定性分析中采用土结相互作用模型引起的一系列困难，可对上部结构传递的地震作用（含竖向作用、水平作用和弯矩）进行粗略估计。日本《原子力发电所耐震设计指针》(JEAC4.601, 2008 版) 规定，震度法（即等效静力法）是地基抗震验算的方法之一；采用该方法时，反应堆厂房作用于地基的水平地震系数（以 g 为单位的加速度峰值）为 3×0.2 ，竖向地震系数为 0.24。参考上述规定，在不进行土结相互作用分析时或初步分析时，上部结构传递给基础（或地基）的水平

(或竖向)的地震作用可分别取上部结构质量与结构基底水平(或竖向)地震动加速度乘积的3倍,倾覆力矩可取上述水平地震作用与上部结构重心高度的乘积。

5.2.5 本条中天然地基抗震承载力设计值是对国家标准《建筑地基基础设计规范》中的地基静承载力设计值予以调整提高后确定的。国家标准《建筑抗震设计规范》规定地基抗震承载力为经深宽修正后的地基承载力特征值与地基抗震承载力调整系数(取值1.0~1.5)的乘积;对于岩石地基和硬土地基,调整系数分别为1.5和1.3。国外规范规定可将静承载力增加1/3后用于核电厂物项地基的抗震设计。总的说来,允许地基抗震承载力设计值高于静承载力设计值。考虑核电厂抗震I、II类物项应有比一般建筑更高的安全裕度,本条规定地基抗震承载力设计值可按《建筑抗震设计规范》规定的抗震承载力数值的85%采用,是相当保守的。

综合国外核电厂的设计实践和我国实际情况,规定了不同荷载组合下的基础底面接地率的容许值。此值相当于矩形基础底面的偏心距 $e(=M/N)$ 为基础宽度的1/4或1/3。

5.2.6 基础底面接地率 β 的计算公式是按日本《原子力发电所耐震设计指针》(JEAC. 4.601)中的规定采用的。

5.2.7 地基抗震稳定性分析方法有拟静力滑动面法、静力有限元法和动力有限元法等多种。滑动面法基于地基所在的地质、地形条件经试算确定最危险滑动面,并进行稳定性验算。对于各向异性和不均匀地基,还应验算沿软弱层滑动的稳定性。拟静力圆弧滑动法宜采用条分法,如瑞典条分法或简化的Bishop法。我国的一些工程设计经验表明,当采用相同的地震动输入时,拟静力滑动面法和静力有限元法计算得到的安全系数大体相当,后者仅比前者高约2%,故可不必同时采用上述两种方法进行地基稳定性分析。动力有限元法可以全面分析地基不同点的应力和变形的时间过程,但计算域、计算单元和地基岩土物理力学参数的确定与计算结果密切相关。在采用动力有限元法时,一般可用总应力法进行稳定性分析,若能对地基中的孔隙水压做出确切分析,也可采用有效应力法进行分析。

5.2.8

1 与《核电厂抗震设计规范》(GB50267-97)相比较,本条规定在采用拟静力法进行地基稳定性验算时,不再采用源自日本《原子力发电所耐震设计指针》(JEAC. 4.601)中规定的固定地震系数,而采用设计基准地震动。我国各地地震活动性及其强度差异甚大,与日本的地震背景有所不同。拟静力方法是简单易行的方法、应有适当的保守性,故地基各单元重心处的地震动加速度取地表面设计地震动加速度、不随深度变化。

2 当采用动力有限元方法进行较为精细的分析时,地基地面输入地震动加速度时程应由核电厂场址基准点处的设计基准地震动通过具体场地的地震反应分析得出。地基有限元模型计算域范围采用本规范统一的规定,与原规范中采用的日本《原子力发电所耐震设计指针》(JEAC. 4.601)的规定大体一致、更较严格。

5.2.9 地基稳定性验算的作用效应组合和最小安全系数参考了美国核管会《标准审查大纲》SRP(NUREG-0800)3.8.5节、日本《原子力发电所耐震设计指针》(JEAC4.601)和美国核安全指南1.00号《评价核电站场址土壤抗震稳定性的方法及准则》的规定,符合我国的设计经验。

地基抗震稳定性验算可采用多种方法,如先采用较为简单的拟静力滑动面法,后采用更为复杂的动力有限元方法;由于拟静力法通常更为保守,故一般情况下,当由拟静力法得出的安全系数满足规范要求时,可不再进行更复杂的分析;当拟静力法验算结果不满足稳定性要求时,可再采用动力有限元法进行验算、并据后者结果确定是否满足稳定性要求。对于抗震I类物项地基和较为复杂的地基,亦可综合多种计算方法的结果判断其稳定性。

5.3 边坡的抗震稳定性验算

5.3.2 本节所述边坡是指厂房等建筑物和构筑物周边的边坡,其它与抗震I、II类物项安全

有关的边坡可参考本节的有关规定或按相关行业标准进行抗震稳定性验算。

5.3.3 边坡抗震稳定性分析一般可采用拟静力法和动力有限元法。节理裂隙发育的岩质边坡属于不连续介质，可采用能模拟节理裂隙及岩块体不连续性的数值分析方法，如离散元法 (DEM)、块体理论 (DDA) 等。连续介质分析除采用有限单元法外，亦可使用有限差分等方法。

5.3.4 考虑边坡可能存在对地面地震动的放大效应，故在采用拟静力法进行边坡稳定性分析时，边坡各单元重心处的地震动加速度取地表设计地震动加速度的 1.5 倍、不随深度变化，有利于实现简单算法的保守性。当采用动力有限元方法进行较为精细的分析时，地基地面输入地震动加速度时程应由核电厂场址基准点处的设计基准地震动通过具体场地的地震反应分析得出。

5.3.5 边坡抗震稳定性验算可采用多种方法，如先采用较为简单的拟静力滑动面法，后采用更为复杂的方法；由于拟静力法通常更为保守，故一般情况下，当由拟静力法得出的安全系数满足规范要求时，可不再进行更复杂的分析；当拟静力法验算结果不满足稳定性要求时，可再采用其它方法进行验算、并据后者结果确定是否满足稳定性要求。对于抗震 I 类物项附近的边坡和较为复杂的边坡，亦可综合多种计算方法的结果判断其稳定性。

5.4 地基液化判别

5.4.1 饱和砂土和饱和粉土在地基中的存在较为普遍，其液化机理研究和液化判别方法的应用较为成熟。饱和黄土也可能液化，饱和砾砂也有液化现象，但目前相关研究尚不够充分，其液化判别方法缺乏充分震例的检验，故未列入本规范。

5.4.2 根据地基的标准贯入试验结果进行液化判别是国内外工程设计中普遍采用的方法。本条规定的标准贯入锤击数基准值与地震动加速度峰值的对应关系与《建筑抗震设计规范》的规定基本相同；但是，由于本规范中的加速度是极限安全地震动加速度，其发生概率低于《建筑抗震设计规范》中对应抗震设防烈度的设计基本地震加速度的发生概率，故核电厂抗震 I、II 类物项地基的液化判别相比常规建筑更为严格。

值得注意的是，当液化土层较薄时，采用上述方法可能低估液化危害；在液化土层埋深超过 10m 时，判别结果则偏于保守、且在地震烈度较高时更为显著。因此，对于埋深超过 15m 的液化土层的判别宜作专门研究。液化判别亦可采用其它成熟方法。

饱和土层的液化概率计算有助于了解液化判别的可靠度，且可支持核电厂抗震概率安全分析。饱和砂土和饱和粉土在确定的极限安全地震动作用下的条件液化概率 P_L 计算公式如下：

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-9.04 + 0.31N - 2.84 \ln a_{\max} - 2.84 \ln(0.65 - 0.005d_s) + 2.84 \ln(9 + 10 \frac{d_w}{d_s})]}$$

式中 P_L ——液化概率；

N ——实测标准贯入试验锤击数；

a_{\max} ——极限安全地震动加速度峰值（单位：g）；

d_s ——标准贯入试验点深度（m）；

d_w ——地下水埋深(m)。

5.4.3 鉴于核电厂抗震 I、II 类物项在安全上的重要性，本条规定的液化地基处理措施相比《建筑抗震设计规范》的规定更较严格。液化等级为中等或严重的场地，采取措施完全消除液化导致的沉陷并加强上部结构和基础不但在技术上存在困难，也将耗费大量资金，故抗震 I、II 类物项不应建于此类场地。液化等级为轻微的场地，可在采取消除液化危害的措施后用抗震 I、II 类物项的地基。

6 安全壳、建筑物和构筑物

6.1 一般规定

6.1.1 压水堆的安全壳一般采用预应力钢筋混凝土结构。AP1000核电厂采用非能动冷却系统设计,采用钢安全壳结构。本章对混凝土安全壳和钢安全壳两者及其他抗震I、II类建筑物和构筑物的抗震设计做出规定。

6.1.5 是否设置防震缝可考虑计算及施工等要求决定,设缝时应满足本条要求。

6.2 作用效应及其组合

6.2.1 本章有关安全壳及其它抗震I、II类建筑物和构筑物的抗震设计所应考虑的作用效应的规定,参考了下列技术标准的内容:美国机械工程师协会《锅炉和压力容器规范》第III卷第二篇《混凝土安全壳规范》(ASME-III-2-2007, ACI359-2007, CC-3000)、美国混凝土学会《核安全有关的混凝土结构设计规范》(ACI349-2006)、美国核管会(NRC)《标准审查大纲》(NUREG-0800-2007)、美国机械工程师协会《锅炉和压力容器规范》第III卷第一篇NE分卷《金属安全壳》(ASME-III-1-NE-2007, NE-3000)、美国核管会导则《核电厂安全有关的混凝土结构(反应堆容器和安全壳除外)》(RG1.142-2001)、以及美国核管会导则《金属主要反应堆安全壳系统部件的荷载组合和设计限值》(RG1.57-2007)。

6.2.2 与地震作用有关的作用效应组合共考虑了下列几种情况,即

- (1) 正常运行作用效应与严重环境作用效应的组合 $N+E_0$;
- (2) 正常运行作用效应与严重环境作用效应以及事故工况下作用效应的组合 $N+E_0+A$;
- (3) 正常运行作用效应与严重环境作用效应以及事故工况后的水淹作用效应的组合

$N+E_0+H_a$ 或 $N+E_0+H$;

- (4) 正常运行作用效应与极端环境作用效应的组合 $N+E_s$;
- (5) 正常运行作用效应与极端环境作用效应以及事故工况下作用效应的组合 $N+E_s+A$ 。

混凝土安全壳取以上五种组合。钢安全壳取(1)、(2)、(4)、(5)种组合,再考虑流体压力荷载的D级使用限制(Level D)工况和局部作用效应的D级使用限制(Level D)工况,构成六种组合。安全壳之外的抗震I类建筑物和构筑物取(4)、(5)或(1)、(2)、(4)、(5)种组合;抗震II类建筑物和构筑物取(1)、(2)或(4)、(5)种组合;具体作用效应组合的取舍应符合适用的技术规范的规定。

6.2.3

- 1 在需要考虑不均匀沉降、徐变和收缩作用的部位应考虑这些作用的影响。
- 2 当运行荷载造成冲击时,应考虑冲击荷载的作用。
- 4 作为管道破坏的结果, P_a 、 T_a 、 R_a 和 Y_y 不一定同时出现,故容许进行时程计算,并在计入这些荷载的滞后影响后适当降低作用效应。

6.2.4 本规范附录H中有关作用效应组合及其作用效应分项系数的各表是参考以下技术标准的规定制定的:美国机械工程师协会《锅炉和压力容器规范》第III卷第二篇《混凝土安全壳规范》(ACI359-2007, CC-3000),美国混凝土协会《核安全有关的混凝土结构设计规范》

(ACI349-2006), 美国核管会(NRC)导则《核电厂安全有关的混凝土结构(反应堆容器和安全壳除外)》(RG1.142-2001), 美国机械工程师协会(ASME)《锅炉和压力容器规范》第III卷第一篇NE分卷《金属安全壳》(AS ME-III-1-NE-2007, NE-3000), 美国核管会导则《金属主要反应堆安全壳系统部件的荷载组合和设计限值》(RG1.57-2007), 以及美国《核设施安全有关钢结构的设计、制作及安装规范》(A ISCN690 2006)和美国核管会《标准审查大纲》(NUREG-0800-2007)。

6.3 抗震验算

6.3.4 根据我国《混凝土结构规范》(GB50010-2010)的规定, 钢筋混凝土结构构件在露天或室内高湿度环境下, 按三级裂缝控制等级, 最大裂缝宽度容许值为0.2mm; 考虑到地震作用为瞬时作用, 作用效应可适当放宽, 故规定基础底板最大裂缝宽度容许值为0.3mm。

7 地下结构和地下管道

7.1 一般规定

7.1.1 核电厂抗震 I、II 类地下结构和地下管道包括非常用取水设备、冷却水取放设备的相关建筑物和构筑物,包括取水口(取水闸或进水塔)、放水口、输水配水系统(隧道或管道)、泵房等。上述物项关系到核电厂的安全运行和防止、减轻事故的能力,且地下工程结构在地震作用下的损伤不易发现、维修也相对困难,应采用较高的抗震设计要求。

7.1.2~7.1.3 地下结构和地下管道的安全与场地条件密切相关,不均匀、软弱、松散、可能失稳及发生地震液化的场地是地下结构和地下管道的安全隐患。不均匀的软弱地基的分析方法复杂而不成熟,采用改善地基的措施耗费财力且较困难,故地下结构和地下管道宜选择均匀、密实、稳定的岩土地基;地下结构应满足抗震稳定性验算要求并有适当裕度。

7.1.4 地下结构承受的地震作用受所在地基不同深度处地震动的影响,输入地震动一般可由场地地震反应分析得出。

7.2 地下结构的地震作用

7.2.2 观测表明,地下结构受周边岩土约束,其变形与周边介质十分接近,地震动力效应不明显,故一般可采用简化的等效静力分析方法。本节建议的几种计算方法的特点如下:

反应位移法是计算地下结构地震作用最常用的工程方法,忽略地下结构自身的动力效应,假定其变位与周边岩土相同,采用等效静力方法计算结构内力。反应加速度法是等效静力计算方法的一种,将地震惯性作用视为静力施加于岩土和地下结构,用结构力学方法计算地震作用效应。有限元方法是进行结构分析的通用算法,适用性广泛;该法可用于等效静力分析或动力分析,也可以考虑地基岩土的不均匀性以及非线性动力特性;此类方法计算工作量相对较大,适当的边界处理是应当考虑的特殊问题。

7.2.3 地下结构计算中,周边岩土弹簧常数的选择对计算结果的可靠性影响很大。弹簧常数多基于试验和工程经验确定。在弹簧常数的计算中,本规范 3.5.4 条所述平面有限元方法是一种可行的近似方法。

7.3 地下管道的地震作用

7.3.3 对于延伸较长的地下直管,地震波产生的轴向应变相对弯曲应变更为重要,是决定管道安全的控制因素。沿管长的轴向应变分布较为均匀,但弯曲应变变化较大。

假定均匀地基中管道所在岩土的地震动是一致的,且管道与周边介质的变形相同,可得估计管道应力的简单公式。

地震波由多种波型所组成,一般情况下,近震地震波中剪切波起控制作用,远震地震波中瑞利波起重要作用。当不能有根据地估计对地下结构起控制作用的地震波波型时, α_a

可取 2.0, α_b 可取 1.6。

地震波视波速与波型和地震波入射角有关, 很难具体估计。若场地基岩埋深大于地震波的一个波长, 则视波速 C 值宜取现场实测的瑞利波波速。其他情况下, 视波速取值不宜小于 1000m/s, 这是较为保守的数值。地震波视波长 λ 可由 $\lambda=CT_p$ 或 $\lambda=4H$ 近似估计; T_p 为地震波卓越周期, H 为场地覆盖土层厚度。

在某些情况下, 如管道浅埋或是管道外壁与地基土之间的摩擦系数较小时, 管道与周边的土可能发生相对滑移, 此时管道承受的最大轴向力较式 (7.3.3-1) 的计算值为小。

管道弯曲部分的最大弯曲应力与直管接近, 也可近似按式 (7.3.3-3) 计算。

本条计算公式得出的最大轴向应力和最大弯曲应力值都是偏于安全的估计。如果管道的强度满足验算要求, 则不必再作进一步的计算。如果管道的强度不能满足要求, 则可参照本章规定采用更为精细的方法核算管道的应力。

地震波在地下直管中也可能产生剪应变, 但其量值很小, 一般可略去不计。

7.3.4 地下管道穿过不同性质的土层时, 或是沿线地形、地质条件发生剧烈的变化时, 其地震反应比较复杂, 将产生较高的局部应力, 故宜进行专门分析。

地下结构地震反应的大小主要取决于结构所在位置地震动变形的幅值。本条建议的几种输入地震动的计算模型, 可以区别情况采用。分段一维模型计算简单, 可得出管道所在地基沿轴向 (或横向) 的地震动 (采用不同的弹簧常数), 但精度较低, 适用于管道沿线地形、地质条件变化比较平缓的地段。集中质量模型可分别计算管道所在地基沿轴向 (或横向) 的地震动, 也适于近似考虑地形、地质条件变化对地震动的影响, 计算相对简单、具有必要的精度, 同时还可推广应用于考虑三维复杂地形、地质条件的影响。计算模型示意图见图 3。平面有限元模型可以考虑更加复杂的地形、地质变化, 但计算工作量相对较大。

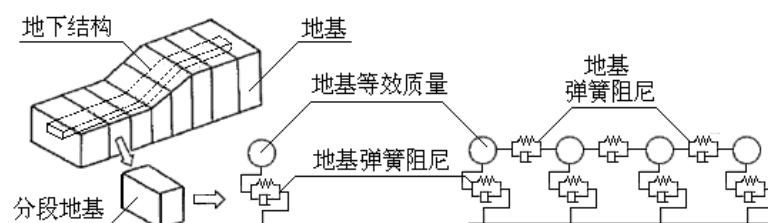


图 3 地震动计算模型

7.3.6 在地下管道与工程结构的连接处或管道的转折处, 管道与周围岩土之间或管道本身两端点间的相对运动在管道中产生的附加作用力, 可采用近似方法计算。例如, 考虑结构和地基的相互作用, 分别求出结构两端与地基间最大相对位移 (含轴向和横向分量), 再按弹性地基梁模型计算由位移差引起的管道应力。

7.3.7 由于管道接头的柔性, 在地下直管中的最大地震轴力将较式 (7.3.3-1) 和式 (7.3.3-2) 的计算值为小, 但应限制柔性接头的变形, 防止接头渗漏。

7.4 抗震验算

7.4.3 国家标准《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》规定, 地下矩形管廊变形缝 (采用橡胶或塑料止水带时) 最大允许位移为 30mm; 管道接头变形不宜超过表 1 中的最大变形限值。

表 1 管道接头变形限值

管道类型	接头变形限值 (mm)
采用橡胶圈密封的铸铁（含球墨铸铁）管和 PC 管	10.0
采用水泥砂浆密封的钢筋混凝土管	0.4
采用石棉水泥密封的铸铁管和石棉水泥管	0.2

7.5 抗震措施

7.5.1 本条给出了抗震不利地基的改善措施。如果这些措施无法实现，而地下结构又不可避免地通过可能产生滑坡、地裂和地质条件复杂变化的地区，则应通过计算估计地下结构的作用效应，并通过专门的设计改善地下结构的受力状态。由柔性材料制造的地下管线有较强的适应地震变形的能力。

7.5.2 地下廊道为地下线形结构物，因地基岩土约束和地基性质的变化，将产生较大的轴向应力，可能导致结构受损。现浇钢筋混凝土廊道沿长度方向设置防震缝，旨在减小廊道轴向应力。本条对防震缝设置间距的要求，参考了我国《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》（GB50032-2003）、《构筑物抗震设计规范》（GB 50191-93）和《给水排水工程埋地矩形管道结构设计规程》（CECS 145：2002）的相关规定；考虑到核电厂的特殊重要性，采用了略较严格的要求。实际工程中，现浇钢筋混凝土廊道沿长度方向设置的防震缝，兼有伸缩缝和沉降缝的功能。防震缝的设置原则包括：

（1）防震缝应设置在处于地基岩土性质突变、可能产生不均匀沉降的两种不同地基交界处的廊道截面；

（2）廊道穿越公路及其它重要交通干线和固定建筑物时，穿越段两端应设防震缝；

（3）廊道穿越可液化地基时，两道防震缝间的距离不宜大于 15m，液化场地尚需采用消除液化危害的措施；

（4）廊道转折处和变截面处、以及地下廊道与地上廊道或建筑物的连接处应设防震缝。

7.5.3 现浇钢筋混凝土廊道的纵向配筋一般按构造措施配置；计算配筋的主要控制因素是裂缝宽度。考虑到地震作用下地下廊道轴向应力的重要性和核电厂抗震 I、II 类物项的安全要求，参考《混凝土结构设计规范》（GB 50010-2002）和《火力发电厂水工设计规范》（DL/T 5339-2006），结合实际工程经验，提出了廊道中部增加配筋和适当提高廊道纵向最小配筋率等要求。

8 设备和部件

8.1 一般规定

8.1.1 我国核安全导则《用于沸水堆、压水堆和压力管式反应堆的安全功能和部件分级》(HAD102/03)规定了核电厂各物项的安全分级。

本章规定适用于除管道和电缆托架等系统以外的机械、电气设备和部件,包括核蒸汽供应系统部件、反应堆内构件、控制棒及其执行机构、贮液容器及其他容器、泵、阀门、电动机、风机、支承件和电缆支架等。

8.1.2 地震作用的往复变化可能引起设备的低周疲劳效应。美国核管会《标准审查大纲》SRP规定,在核电厂寿命期内至少应假定遭遇一次极限安全地震动和五次运行安全地震动。2007年版SRP3.7.3提出,每次地震引起的应力循环次数应由系统时程分析获得,或假设每次地震产生至少10次最大应力循环。法国规定幅值为极限安全地震动1/2的地震动将发生20次,每次地震动将引起20次应力循环;德国则认为不必考虑地震作用引起的疲劳效应。本规范采用了适应性较广的SRP的表述。

参照美国核管会的《标准审查大纲》和我国核安全导则《核电厂的地震分析及试验》(HAD102/02),规定了有关设备设计中避免共振、能动设备在地震中或地震后应保持其功能、以及支承节点的设计和加强设备锚固的要求。

本章所述能动部件系指依靠触发、机械运动或动力源等外部输入而动作的设备和部件,如泵、阀门、风机、继电器和晶体管等。

8.2 地震作用和地震作用效应

8.2.1 设备抗震设计的一般原则和地震反应计算方法见本规范第3章,本章内容为相关问题的补充规定。

8.2.2 等效静力法是一种近似的、使用方便的计算方法,适用于结构简单的或重要程度较低的设备,或用于初步设计。实际地震动是复杂的、包含不同频率成分;设备的固有频率也往往不止一个,故设备反应并不是单频振动。等效静力法计算公式基于单自由度体系,为近似考虑实际存在的多个振型的反应,应将加速度反应谱最大幅值再乘以大于1的系数。美国核管会NRC《标准审查大纲》SRP规定,这个系数一般取1.5,只在确认设备为单自由度体系时,系数才允许取1.0;法国的做法与美国相同。

应当指出,不同文献中的等效静力法有不同的表述方式和计算方法,本章规定的等效静力法有特定使用限制。另外,使用等效静力法得出的结果一般应比其它算法的结果更较保守。

8.2.3 反应谱法在第3章中已有规定。本条对具有不同输入运动的多支点设备和部件的反应分析作了补充规定,内容参考了美国机械工程师协会ASME III的附录和美国核管会《标准审查大纲》SRP的规定。

8.2.5 核电厂中的贮液容器含换料水箱、冷凝水箱、含硼的冷却剂贮槽以及乏燃料贮存水池

等。地震作用下贮液的动力效应问题已有广泛的研究，Housner 提出的基于刚性器壁的计算方法比较简单，应用广泛。Housner 假设液体是不可压缩的理想液体，并且只考虑水平振动的影响。当一平底的盛有液体的圆柱形（或矩形）贮器受水平加速度激励时，液体底部的部分重量 W_0 与贮器刚性接触，具有与器壁和贮器底部相同的加速度；这部分液体的水平惯性作用称作脉冲压力。振动输入还将引起上部液体的振荡，这一部分重量为 W_1 的液体的水平惯性作用产生的附加动压力称为对流压力（或振荡压力）；对流压力还将引起液面的竖向振动、产生晃动波高（见图 4）。

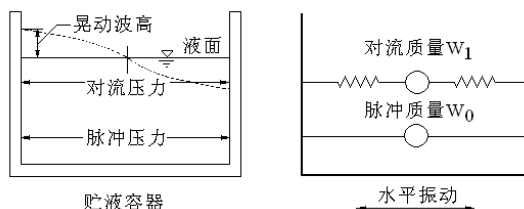


图 4 贮液容器中动液压效应示意图

若干学者有关弹性储液器器壁振动的研究表明，对于薄壁储液器，Housner 的方法对动液压作用估计偏低，是不安全的。故薄壁储液容器可用弹性器壁方法计算。另外，贮器中液体的晃动是一种长周期的运动，可用正弦波作为输入。

8.2.6 本条叙述如何用合理的方法得出设备的地震作用。在采用分析法、试验法或两者相结合的方法设计设备时，其输入运动可由反应谱、运动时程及其功率谱密度函数三者之一描述，本规范推荐采用前两种形式。

支承于地面的设备可使用地震反应谱或地震动时程作为输入，支承于主结构的设备则应区别计算模型（耦联模型或非耦联模型）采用不同的输入。

8.2.7 楼层反应谱是设备抗震计算的依据之一，它反应了设备所在支承结构的动力特性。典型的地面建筑的楼层反应谱是窄带反应谱，具有明显的共振峰和零周期加速度（ZPA），楼层反应谱的算法见第 3 章。本条仅补充规定了使用楼层反应谱的要求，即在设备主轴与计算楼层反应谱时所取振动方向不一致的情形下，可对楼层反应谱进行修正，修正方法只涉及坐标变换。这一方法同样适用于地震反应谱。

8.3 作用效应组合和设计限值

8.3.1 核安全相关设备的设计条件和功能要求，尤其是对包含流体的系统部件（即包含水或蒸汽的部件）的要求，应体现于这些部件承受的最不利作用效应组合及采用的适当设计限值。本章规定设备抗震设计中，应考虑设计基准地震作用效应与各类使用荷载相关瞬态过程和事件所引起的作用效应的组合。

8.3.2 核电厂的运行工况，包括正常工况、异常工况、紧急工况和事故工况四类，设备则以 A、B、C、D 四级使用荷载与其对应，这一方法用于美国机械工程师协会 ASME 规范；此外，还考虑了设计工况和试验工况。

8.3.3~8.3.5 各国技术标准对核电厂设计基准地震动的规定不尽相同，尽管经常发生运行安全地震动控制设计的现象，美国核管会仍坚持就两级地震动基准进行设计计算，法国的做法也基本相同。但是，三代非能动核电站 AP1000 已取消了针对运行安全地震动进行设计的要求，仅在设备疲劳分析时取 1/3 极限安全地震动考虑运行安全地震动作用下的疲劳效应。本规范仍延续两级设计基准地震动的相关规定，以适应国内现有的核电机组设计。对于有特定设计要求者如 AP1000 核电厂等，可执行其特定要求。

本章规定的地震作用效应组合包括运行安全地震动（如适用）和极限安全地震动的作用效应与上述使用荷载的作用效应组合，主要参考了美国机械工程师协会 ASME 规范第 III 篇及相关系列标准、规范，也参考了法国《压水堆核岛机械设备设计制造规则》RCC-M 以及法国 900MWe 压水堆核电站系统设计的要求。

除非设备设计规格书有规定，运行安全地震作用效应需要时可与 A 级或 B 级使用荷载作用效应进行组合，极限安全地震作用效应应与 D 级使用荷载作用效应进行组合。抗震 I 类设备除考虑极限安全地震作用效应外，疲劳分析时尚应考虑运行安全地震作用效应。考虑到地震引起失水事故荷载效应 LOCA 的概率极低，极限安全地震与失水事故同时发生的概率也极低，故采用平方和的平方根法（SRSS）对这两种荷载作用效应进行组合。

美国和法国两国技术标准关于设计工况荷载的规定是有差异的，美国要求设计工况荷载效应与地震作用效应进行组合，法国则不要求与地震作用效应进行组合。

设备抗震设计中，抗震 I 类安全一级、二级、三级设备以及抗震 II 类设备采用的地震作用效应组合是相同的，但满足这些要求的严格程度存在差别；对应不同安全分级的设备，设计限值是不同的。

8.3.7 附录 L 有关设计应力强度和容许应力的规定参考了美国机械工程师协会 ASME 规范第 III 篇。主要部件抗震设计应满足的设计限值基本采用了美国机械工程师协会 ASME 规范第 III 篇的规定，且符合 ASME 相关系列标准的要求。

9 工艺管道

9.1 一般规定

9.1.1 本章所述内容适用于架空工艺管道的抗震设计，含管道设计的一般规定、作用效应组合、设计限值、地震反应分析及管道相关部件的强度分析。有关抗震分类、地震反应分析的一般方法和抗震验算准则按本规范第 3 章执行。

核电厂管道抗震设计的基本步骤见图 5 和图 6。

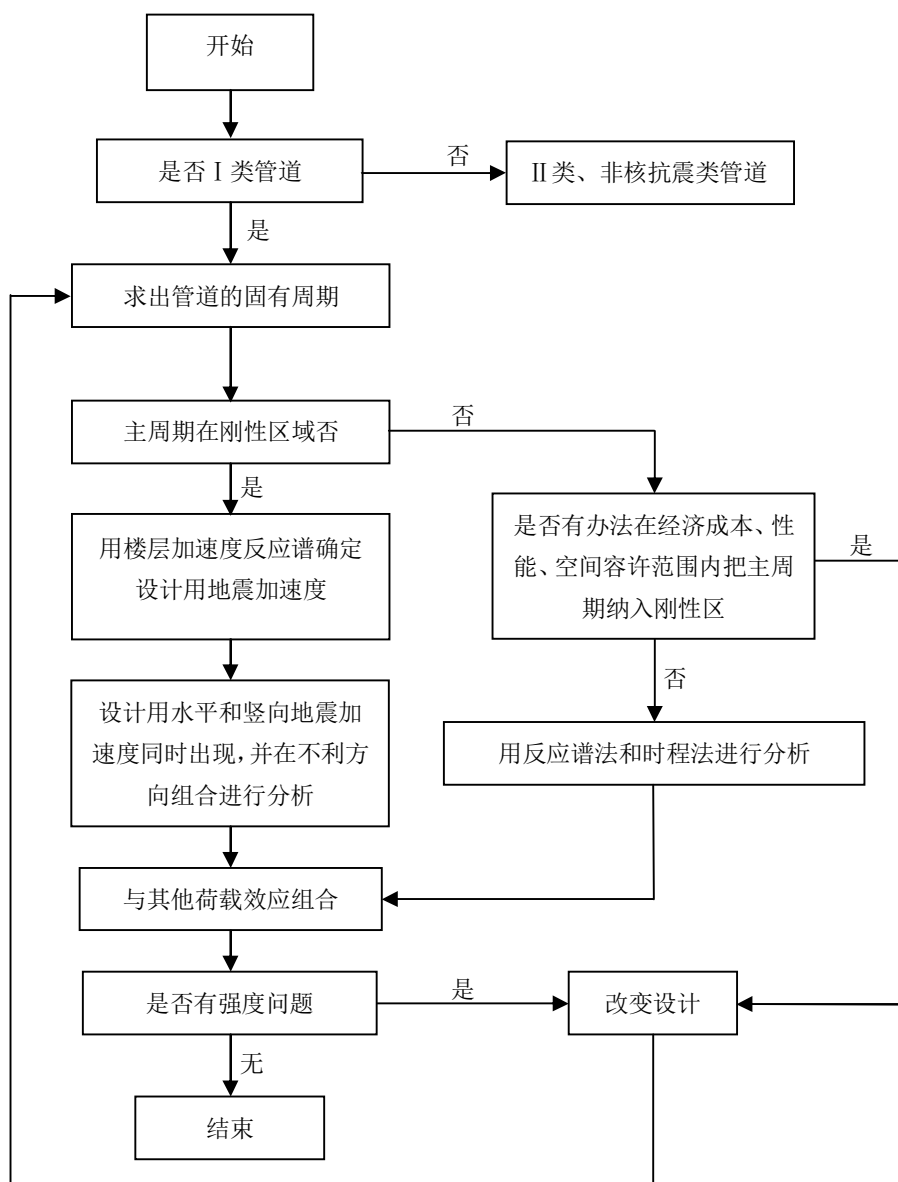


图5 I类管道抗震设计流程图

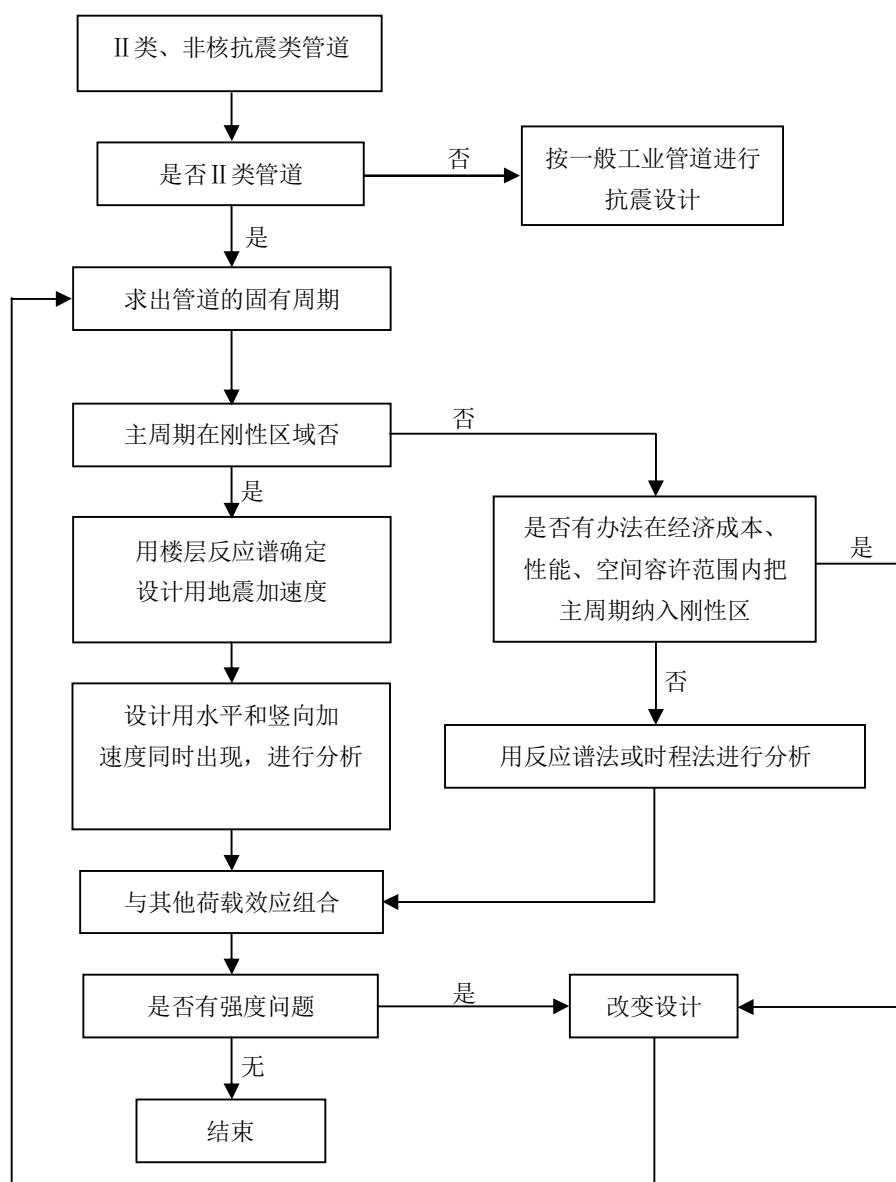


图6 非I类管道抗震设计流程图

9.1.2 核电厂抗震 I、II 类管道应能承受两个水准的地震动，即运行安全地震动和极限安全地震动。核电厂管道按其重要性进行适当的分类，除抗震分类以外，还应按其放射性的多少，执行安全功能的重要程度以及损坏后对经济和人身、环境的影响，分成核安全一级、二级、三级和非安全级。本规范中工艺管道安全等级的划分应符合国家核安全导则《用于沸水堆、压水堆和压力管式反应堆的安全功能和部件分级》（HAD102/03）确定的分级原则，消防管道应遵循《压水堆核电站防火设计规范》（GB/T 22158-2008），且与美国机械工程师协会 ASME 规范第 III 篇的规定相适应。

9.2 地震作用和地震作用效应

9.2.2 建立管道计算模型应以锚固点或其它已知边界条件的点为边界，在计算中应计入管道上的阀门、法兰以及其它附件的自重，并在需要考虑偏心时计入偏心质量的影响。

9.2.3 本条根据美国核管会 NRC《标准审查大纲》第 3.7.2 节的内容，给出了有关抗震分析方法的更较完整的表述以及等效静力方法适用的条件。典型算例、行业通用方法或文献发表

的有应用价值的成果等均可作为采用等效静力方法的依据。

9.2.4 本条根据 2007 版的美国 NRC 导则 RG1.61 和 ASME 规范案例 N-411-1 给出了管道系统的阻尼比（包括随频率变化的阻尼比）的取值，并且补充了 N-411-1 中改变阻尼比所应满足的条件。

9.2.5 本条根据美国核管会 2007 版《标准审查大纲》SRP 3.7.3 对疲劳循环次数进行了修改。

9.2.6 本条根据美国核管会 2007 版《标准审查大纲》SRP3.7.2 第 II 节的内容给出了判断管道系统分析模型自由度数量是否足够的方法。振型曲线不光滑表明计算自由度数量不够，振型曲线光滑也不意味计算自由度数量已足够，尚应通过计算作进一步判断。

9.2.7 本条给出了复杂管道系统建模时系统解耦的原则和方法，并参考 EPR 核电站给出了按支承管道和被支承管道的直径或截面模量的比值判断是否可以解耦的条件，判断方法简单易行；这里采用的 EPR 核电站的规定比 AP1000 核电站的规定更严格。

9.2.8 AP1000 核电站设计控制文件 Revision 18 第 3.7.3.8.2.1-2 节，对管道解耦后被支承管道的地震反应分析作了详细的规定。总体而言，应考虑在解耦点处支承管道或设备对楼层反应谱的放大效应，直接将楼板反应谱作为被支承管道系统的输入不是保守的算法。

9.2.9 管道系统初步设计计算时可将支架做刚性假定处理。若支架刚度大于表 2 中的参考值则可认为支架刚度无限大的假定成立。否则应在管道详细计算阶段，考虑支架刚度不满足无限大假定的影响。

为限制管道支架承受的荷载效应，可规定支架最小刚度或支架间的最大跨距。表 2 为 M310 核电站规定的支架最小刚度，可供使用参考（M310 与 AP1000 的规定有差别）。对于管道支承间的最大跨距要求可参见法国《压水堆核岛机械设施设计制造规则》RCC-M 规范 H 册或美国机械工程师协会 ASME 规范 NF 册。

表 2 支架最小刚度

名义直径 (inch)	名义直径 DN (mm)	ANSI schedule	名义厚度 t (mm)	支承刚度 (MN/m)
1/4	8	全部	全部	0.10
3/8	10	全部	全部	0.17
1/2	15	全部	全部	0.20
3/4	20	全部	全部	0.40
1	25	全部	全部	0.70
2	50	全部	全部	2.0
2 1/2	65	全部	全部	3.5
3	80	全部	全部	5.0
4	100	全部	全部	9.0
6	150	全部	全部	20
8	200	10S, 20, 40S, 40	3 ~ 8	25
		60, 80S, 80 ~ 160	10 ~ 23	50
10	250	10S, 20, 40S, 40	4 ~ 10	45
		80S, 60 ~ 160	12 ~ 29	90
12	300	10S	4 ~ 8	45
		40, 40S, 80S	9 ~ 13	75
		60 t~160	14 ~ 33	125
14	350	10, 10S	4 ~ 7	55
		20, 30, 40S, 40, 80S	8 ~ 13	90
		60 ~ 160	15 ~ 36	160
16	400	10, 10S	4 ~ 8	75
		30, 40S, 40, 80S	9 ~ 13	100
		80	14 ~ 26	190
		140, 160	30 ~ 41	220
20	500	10S	4 ~ 8	120
		40S, 80S	9 ~ 15	170
		100, 120	20 ~ 40	210
30	750	-	30 ~ 60	620

9.2.10 多支承管道系统应考虑支承点之间的位移差。AP1000 核电站设计控制文件 Revision 18 第 3.7.3.9 节就此作了详细规定，本条摘录了其中的要点。

9.2.11 是否考虑偏心质量的判断标准依具体情况而定。

9.2.12 本条内容是根据美国核管会《标准审查大纲》SRP Section 3.7.2, subsection II.8 增加的。

9.2.13 本条内容是根据国际原子能委员会 IAEA 导则 NS-G-1.6-2.32 增加的。

9.2.14 本条内容是根据国际原子能委员会 IAEA 导则 NS-G-1.6-2.34 增加的。

9.2.15 本条内容是根据国际原子能委员会 IAEA 导则 NS-G-1.6-2.37 增加的。当管道发生泄漏且泄漏量达到一定程度时,可通过专设监测装置予以测量,因此,在管道裂纹扩展到临界裂纹尺寸而突然断裂之前,可有充裕时间实现安全停堆,对泄漏管道进行修补或更换,避免管道双端断裂的发生;这一技术称为破前泄漏(leak before break, LBB)技术,是上世纪 80 年代发展的应用于核电厂管道设计和评价的新概念。应用 LBB 技术,可以不考虑核电站设计基准中管道双端断裂引起的动态效应,进而取消防甩限位器、防冲挡板和阻尼器等,提高电厂的安全性、经济性和可靠性。

9.3 作用效应组合和设计限值

9.3.2~9.3.5 条文规定与美国机械工程师协会 2004 版 ASME 规范第 III 篇的要求一致。参见本规范条文说明 8.3.2~8.3.5。

9.3.6 工艺管道容许应力的确定参考了美国机械工程师协会 2004 版 ASME 规范第 III 篇附录和 2002 版法国《压水堆核岛机械设备设计制造规则》RCC-M 规范附录。

9.3.7~9.3.8 条文规定参考了美国机械工程师协会 2004 版 ASME 规范第 III 篇。

9.3.9 抗震 II 类物项中管道的设计限值与 I 类物项中二、三级管道在 D 级使用载荷下的设计限值相同。

9.3.10 抗震 I 类物项中安全一级和安全二、三级管道的应力指数参考了美国机械工程师协会 2004 版 ASME 规范第 III 篇。

9.4 抗震措施

9.4.1 约束六个自由度运动的支承,其自身失效的可能性应达到最小,或支承部件的裂纹传播到被支承部件(如承压外壳或者主管道)的可能性达到最小。

9.4.3 考虑到阻尼器的运行维护成本等因素,应避免过度使用阻尼器;应采用阻尼器的实际阻尼值进行抗震设计;超裕度的抗震设计将因约束自由位移而降低热胀载荷的设计裕量。

9.5 阻尼器

9.5.1 本节规定依据美国核管会《标准审查大纲》SRP Section 3.9.3, subsection II.3.B 编制。

9.5.3

1 结构分析中真实的阻尼器机械性能(如弹簧刚度等)是一个重要参数。由于阻尼器的有效刚度可能大于阻尼装置组件(如阻尼器管夹、调节杆、根部支承结构等)的组合刚度,故阻尼器的动力特性将因相关组件的柔度而改变。

2 阻尼器刚度的确定应独立于其间隙/无效行程、启动值或锁紧后最大松弛率;必须核实阻尼器在电厂正常运行或预期瞬态工况中可能承受的高热胀变形率不会超过阻尼器设计的锁紧速率。

9.5.4

5 可按美国核管会《标准审查大纲》NUREG/CR-5416推荐的方法进行额定荷载超过 22 吨的大管径液压阻尼器的验证试验和外推。

8 阻尼器采购程序尚应包含要求制造商提交质量保证和控制程序给购买者、以供审查和验收。

10 地震监测与报警

10.1 一般规定

10.1.1 核电厂地震监测与报警系统示意图如下：

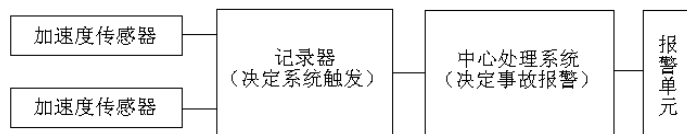


图 7 核电厂地震监测与报警系统示意图

核电厂设置地震监测与报警系统的主要目的为：

(1) 地震发生时记录核电厂自由场地震动、反应堆和其它抗震 I 类物项承受的地震动及地震反应，供震后对相关物项进行检查时使用；

(2) 分析核电厂物项的抗震性能，检验各类物项抗震设计和抗震计算方法是否适当、可靠，积累的数据和经验可供改善核电厂抗震设计使用；

(3) 根据地震监测数据及时发布地震报警和设备故障报警信号，前者旨在实现核电厂抗震设防目标，确保核电厂安全；后者可发现系统自身故障，及时进行维修，保障系统的有效运行。

10.1.2 地震监测与报警系统自身的可运行性和功能可靠性取决于系统内所有硬件设备和软件程序的合理设计和质量保障。

在地震活动性较强的地区，以较低的地震动水准作为地震报警的依据可能造成较频繁的停堆，对核电厂运营带来不利影响；可取适当的运行安全地震动作为地震报警的基准。

有关核电厂地震报警指标和相关软件的应用在我国尚缺乏经验，应经充分论证后采用；目前认为，加速度峰值并不是决定报警、实施停堆的最适当的参数，因为它不包含地震动持续时间信息，孤立突出的单个高频加速度尖峰一般对地震反应并无决定性影响；地震动累积绝对速度（CAV）用作报警和停堆指标可能更为适宜。

10.2 系统设备的布设

10.2.1 表 10.2.1 规定的加速度传感器的设置位置和数量宜作为最低要求。

《核电厂抗震设计规范》（GB50267-97）和美国核管会导则 RG1.12（1974 Rev 1）曾依极限安全地震动加速度的大小分两级规定监测系统设备的布置，这种规定并无充分依据。美国核管会导则 RG1.12（1977 Rev 2）已修改了这一规定，本规范亦不再区分极限安全地震动加速度峰值的大小进行系统设备的布设。

不依据核电厂物项上部结构布设的传感器监测数据决定触发系统或发布报警信号，原因在于上部结构的地震动反应虽与地震动输入相关，但两者关系的计算具有不确定性。

厂址各点地震动具有不确定性且可能存在差异，每个反应堆的监测系统是否触发及是否实施地震报警应由该反应堆的地震监测数据决定；考虑地震动的不确定性和降低误报警的可能，可由自由场和安全壳底板两处的监测信号决定是否触发系统和实施报警。

同一核电厂中设计不同的反应堆，其地震反应将有差异，故均宜依表10.2.1的规定设置

加速度传感器；设计相同的多个反应堆，其中一个可按表10.2.1的规定设置加速度传感器，其它反应堆除自由场和安全壳基础底板两处外，可视需要决定是否设置加速度传感器。多个反应堆若坐落于同一基岩地基上，可仅于一处设置自由场加速度传感器。

在满足表10.2.1 有关加速度传感器布设位置和数量的基础上，宜选择其他典型重要抗震物项增加设置加速度传感器，增设传感器有利于震后对相关物项进行检查和检验各类物项抗震设计和抗震计算方法。结构类型和地震反应基本相同的物项，可选择其中之一设置加速度传感器；采用基底隔震技术的建筑物和构筑物，应在基础、隔震层和上部结构设置加速度传感器。

10.2.2 一个三轴向加速度传感器只能监测一点的振动，结构的地震反应是处处不同且复杂变化的，监测点必须精心选择以获取结构抗震关键点的振动数据。监测结构地震反应的传感器应设置于主要结构构件而不应设置于非结构构件，传感器设置方向应与结构计算主轴一致、且宜接近构件重心，便于与计算数据进行比较。

10.2.5 当核电厂有多个反应堆时，记录器和中心处理系统可针对各反应堆独立设置或共用；在后者情况下，须有足够的信号通道，并具备区别各反应堆实施报警的功能。

10.2.6 报警信号传送至反应堆主控室，有助于控制人员及时接受报警信息并迅速做出应急响应。

10.3 设备功能与指标

10.3.1 三轴向加速度传感器可监测测点沿两个正交水平方向和竖向的平动加速度时程，进而给出三个运动分量的峰值、谱特性（反应谱或傅立叶谱）和持续时间等，是地震监测与报警系统中极重要的一次仪表，宜满足较严格的技术指标要求。

《核电厂抗震设计规范》GB50267-97 中规定设置的简单的峰值加速度计的记录数据不能及时传输给中心处理系统，且其读数复杂可能延误应急处置时间；随着技术的发展，以三轴向加速度传感器取代峰值加速度计可更好地实现其功能。在 API1000 及 EPR 核电厂中，均不再使用峰值加速度计。

本节仪器性能指标参照《中国数字强震动台网技术规程》确定，不低于国家强震动台网对仪器性能指标的要求，这些性能指标是基于力平衡式加速度传感器设定的。力平衡式加速度传感器的性能指标高于动圈式加速度传感器，更能保障信号处理的精度和数据应用的可靠性，此外，前者的检测比后者更为方便。

10.3.2 记录器即强震数据采集系统，可接收加速度传感器的信号并向中心处理系统传输，具有触发系统的功能。

3 记录器运转期间持续记录并及时删除测点非地震引起的环境振动信号和小于触发阈值的地震动信号，只有当振动超过预定幅值并判断是地震引起的振动时，经触发后方可记录存储完整的地震动或地震反应时程。

6 自供电能力意指由专门配置的蓄电池供电，蓄电池在外部电源断开后应能连续工作24小时。

10.3.3 中心处理系统由工业级计算机（含显示器和键盘）组成，以多串口卡与记录器相连，以输入输出接口卡与报警单元连接，配备地震监测与报警专用软件。

4 地震监测与报警系统宜有实施自身设备故障报警的能力，即针对本系统电源失效、设备或软件故障等实施报警，该报警信号的显示应与地震报警信号有明显区别，设备故障报警与实施停堆无关。

10.3.4 报警单元由干触点继电器、报警显示器和蓄电池组成，即《核电厂抗震设计规范》（GB50267-97）中的地震开关。

考虑到在地震动强度达到运行安全地震报警指标后，后续地震有可能迅即达到乃至超过极限安全地震，故发布报警信号后宜自动启动停堆操作程序；不采取自动停堆措施可能严重影响地震应急反应的效能。目前，我国台湾、日本、韩国等的核电厂已采用自动停堆技术。

附录 A 地基与结构的相互作用分析

A.1 地基的集中参数分析模型

A.1.1~A.1.2 在采用集中参数分析模型进行地基与结构相互作用体系分析时，本节规定的地基弹簧刚度和阻尼的计算方法有非频率相关方法和频率相关方法两种。前者与美国结构工程师协会标准 ASCE 4-98 一致，后者则引自法国《压水堆核岛机械设备设计制造规则》RCC-G (86)。

在采用频率相关方法时，若需考虑基础埋置效应，可就基础底面以上的地基介质经试算确定附加的弹簧、阻尼参数。

A.2 地基的有限元分析模型

A.2.1~A.2.2 本节有关相互作用体系中地基有限元计算域、边界条件和单元尺寸的规定，综合考虑了美国结构工程师协会标准 ASCE 4-98 的规定和我国地基和地下工程分析设计的经验。

A.3 相互作用体系的子结构分析方法

A.3.1 子结构法又称阻抗函数法，是结构与地基相互作用体系分析常用的方法之一，适用于频域分析和时域分析。应用中采用频域方法较多，原因有以下两点：其一，可以方便地考虑与频率相关的地基阻抗函数；其二，有限元分析或波动分析中的透射边界一般都是频率的函数。但当考虑相互作用体系的非线性特性时，原则上应采用时域方法。

附录 B 地震作用最大值的组合

B.1 振型叠加反应谱分析中的组合方法

B.1.1 结构某一方向的总地震作用是该方向各振型地震作用的叠加，结构各振型地震作用存在耦联，可采用完全二次方根法组合各振型地震作用最大值。

振型叠加反应谱分析中，一般建筑物可仅考虑对结构反应起控制作用的前若干阶振型，但是，核电厂设备往往存在大量密集的不可忽略的高频振型，必须予以适当考虑。低频模态振动分量是周期性的，高频模态振动既有周期性分量亦有刚性分量（分别对应自由振动和强迫振动），在地震作用组合中应分别考虑。

考虑上述复杂影响因素的地震作用组合方法有多种，本条提供的计算方法仅为其中较简单、且结算结果较为保守者。例如，振型相关系数的计算采用了 Der Kiureghian 的方法，可不涉及地震动持续时间的取值，计算结果与采用 Rosenblueth 方法、且持续时间很长时的结果一致。高频模态中周期性分量的计算采用了 Lindley-Yow 方法，与 Gupta 方法相比更较简单，且可与计算剩余刚性反应的静力 ZPA 方法相结合。

本规范并不排斥采用美国核管会 NRC 导则 RG1.92 中有关地震作用组合的其他计算方法；也不排斥采用美国土木工程师协会技术标准 ASCE 4-98 中的方法；CQC 方法中的计算参数可参考 NUREG/CR-6645 采用。

B.1.2

2 空间地震作用最大值的百分比组合方法应用广泛，采用本条提供的各分量组合系数（1.0，0.4，0.4）得出结果是保守的。

附录 D 设计楼层反应谱的调整

D.0.1~D.0.2 有关楼层反应谱的调整采用了美国核管会 NRC 导则 RG1.122 和美国土木工程师协会标准 ASCE 4 建议的方法。考虑楼层反应谱的生成涉及主结构地震反应的诸多不确定因素，故应拓宽确定性楼层反应谱的狭窄的尖峰；为避免设计的过分保守，可适当削减楼层反应谱的峰值。

D.0.4 考虑生成的楼层反应谱具有诸多不确定性和保守性，且支承结构的振动一般只能激起相应被支承结构的某一个自振频率的共振效应，故在应用分析时可采用本条方法对楼层反应谱再做修正。这种修正虽然具有任意性，但已广泛用于美国的核电厂抗震设计，并纳入美国机械工程师协会 ASME 技术标准的附录中。

附录 E 基于性能的抗震安全概率评估参考方法

E.0.1 本附录内容独立于本规范其他章节，并非进行核电厂抗震设计的规定，仅供评估核电厂物项抗震能力参考。

E.0.3 本条引用了美国土木工程师协会标准《核设施结构、系统和部件的抗震设计准则》ASCE/SEI 43-05 的规定，其中抗震分类 1 和 2 不建议用于核设施。应当注意的是，本附录中的物项抗震分类与本规范其他章节的物项抗震分类是有区别的，不应无分析地混用。

E.0.5 概率一致地震反应谱 $UHRS(\omega)$ 是每个频率分量都有相同的年超越概率的反应谱，显然，核电厂抗震设计中采用的标准地震反应谱并不符合概率一致地震反应谱的定义。

地基不同深度处的地震动时程和地震动参数的生成方法与本规范第四章的规定方法原则上是一致的，竖向地震动的确定应符合美国土木工程师协会标准 ASCE 4 的要求。

E.0.6 等效静力方法仅适用于质量均匀分布的单点支承的悬臂梁结构；反应谱法和线性时程分析法适用于任何结构，分析中应考虑显著的 $P-\Delta$ 效应；非线性分析方法用于某些单元具有明显非线性的结构和具有明显不规则性的结构。

E.0.7 地震反应分析中采用的临界阻尼比、强度衰减因子、材料强度、非弹性耗能因子等均应符合美国土木工程师协会标准《核设施结构、系统和部件的抗震设计准则》ASCE/SEI 43-05 的规定。

E.0.8 美国土木工程师协会标准《核设施结构、系统和部件的抗震设计准则》ASCE/SEI 43-05 采用了简化的基于性能的概率设计方法，对荷载组合、许用强度、许用变形、许用转角等都给出了确定性的规定。

E.0.9~E.0.12 条文给出了直接采用极限状态概率方法进行抗震能力评估时应满足的基本要求。

附录 F 标准设计反应谱

F.0.1~ F.0.2 本附录提供的标准设计反应谱系美国核管会导则RG1.60反应谱，其中，加速度、速度、位移三者的反应谱均以对数坐标标示于同一幅图中。该反应谱对应的地震动加速度峰值为1.0g，位移峰值为91.44cm；使用时应按具体厂址的设计基准地震动加速度峰值依比例调整。

本规范并不排斥使用其它适用的核电厂抗震设计标准反应谱。

附录 K 设备抗震鉴定试验

K.1 一般要求

K.1.1 抗震 I 类设备包括所有安全一、二、三级流体承压系统机械设备，安全级的非承压机械设备，IE 级电气设备以及少数虽设定为非安全级但在地震时需执行某些安全功能的设备。

K.1.3 一般来说，地震期间有能动性要求的机械设备（即抗震 1A 类设备）和 IE 级电气设备，在第一次抗震鉴定时宜采用试验方法。某些复杂的设备很难通过分析计算方法合理、可信地验证其抗震性能（可运行性），为验证这类设备的数学分析模型及抗震能力，也可采用试验方法。

K.1.5 设备抗震试验是设备质量鉴定的一部分。设备质量鉴定应按老化（热老化、辐照老化、运行老化）试验、振动（必要时）和抗震试验、LOCA 环境鉴定的先后次序在同一试件上进行。

K.1.7 在有些情况下，使全部频率点上的试验反应谱谱值均大于要求反应谱的谱值是难以实现的，此时应满足本附录说明 K.6.4 条 1 款（3）的要求。

K.2 激振装置及外围设备

K.2.2 如果条件不允许，抗震试验时可不加温加压，但应布置足够的测点，将地震作用下得到的试验结果提交业主作进一步评定。可采用计算方法将温度、压力等荷载按规定的组合方法叠加，评定计算结果是否在规定的应力限值或变形限值范围内。

K.3 试件和测点布置

K.3.1

1 模型在尽量不影响设备动态特性和试验目的的前提下，可对原件在结构上作适当简化或采用适当代用件，但应论证其合理性；当配置人工质量时，应使试件的质量与质量分布与原件相同或相近；当结构简化对试验结果有明显影响时，应对结果进行修正。

2 某些设备、特别是电气设备的器件（如继电器），其共振频率与组件的共振频率不同，各器件在地震中的共振现象（如继电器的高频颤振）不能在组件的单频拍波试验中得到反映。此时，可根据组件试验得到器件安装部位的振动反应，再以此振动反应作为输入，进行器件试验。注意器件安装条件必须与实际相符，试验频率上限可超过 33 Hz（可能达到 100 Hz）。

K.3.2

1~4 包括安装支承处的输入荷载和加载方式在内的试验安装、固定及加载条件应模拟真实情况，若不能模拟真实情况或当设备支承在多个支座上且各支承点运动有很大差别时，应经论证选取起主导作用的支承部件，使其支承安装条件和输入与实际相同；其它支承点宜尽可能模拟支承安装条件和输入的实际情况。如有可能，宜采用多点激振、输入对应各支承点的反应谱。

5 设备的单向试验方法适用于以下任何一种情况：

- 设备的三向运动中，每两向运动间无耦合、或耦合很小；
- 受试验条件或设备及安装条件限制、设备只能在一个方向运动；
- 设备某一方向的输入相对其它方向大很多。

单向加载试验可就设备运动的三个方向逐次进行，但要考虑不同方向运动间的耦合影响。单向输入可采用不同方式，包括正弦驻波（一般为正弦三波）、正弦拍波和正弦扫描波等，试件对不同输入波的反应不同。每拍 5 周的正弦拍波与正弦三波的试验结果比较接近，但正弦扫描波的反应要比正弦拍波大，故采用正弦扫描波时应乘以波形因子 λ 。

考虑设备各向空间运动间的耦合，单向试验的输入加速度峰值可依下式确定。

$$a_E = a_P \times G \times \lambda$$

式中 a_E ——单向输入的加速度峰值；
 a_P ——要求反应谱的 ZPA 值（接近零周期的加速度谱幅值）；
 G ——考虑不同方向运动耦合影响的几何因子，一般可取 1.2~1.3；
 λ ——波形因子，可按下表取值。

表 3 波形因子 λ

设备的 临界阻尼比	波形因子 λ	
	每拍 5 周的正弦拍波	连续正弦扫描波（1 倍频程/分）
$\xi < 2\%$	1	0.30
$2\% < \xi < 10\%$	1	0.55
$\xi > 10\%$	1	0.80

K.6 抗震性能试验

K.6.2 5 次运行安全地震动加 1 次极限安全地震动的试验方法适用于运行安全地震动加速度为 1/2 倍极限安全地震动加速度的情况。更小的运行安全地震动加速度可对应较多的地震动循环次数。地震动循环次数与加速度幅值间的关系可采用美国电气与电子工程师协会标准 IEEE-344 附录 D 中的方法确定（见图 8）。

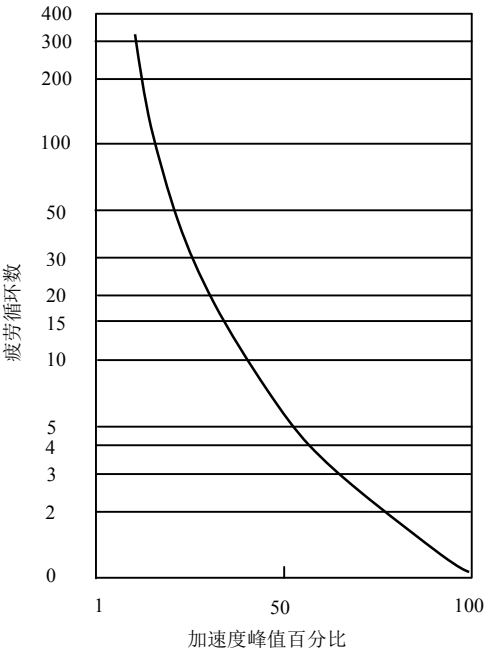


图 8 地震动循环次数的确定

K.6.4

1 对于安装在楼层墙体上的设备,一般采用多频反应谱方法进行试验。试验一般采用三向输入,但也可采用双向输入(即一个水平方向和竖向、及另一个水平方向和竖向)。试验时应根据设备的要求反应谱,生成包络该反应谱的人工模拟加速度时程,由该人工时程通过数学变换、计算得到的试验反应谱应包络相同阻尼比的要求反应谱,再以该人工时程作为振动台的台面输入。理论上讲,一个确定的反应谱可以生成无数条人工加速度时程,为满足抗震试验要求,输入的模拟人工加速度时程应满足以下 8 点要求。

(1) 人工模拟时程的加速度峰值应就确定的参考点确定,参考点为振动台台面或被试设备与激振设施的刚性连接处附近,参考点的加速度峰值应不小于要求反应谱的零周期加速度值(ZPA)。

(2) 由人工时程计算试验反应谱时,频率间隔应足够小,使得任意减少一个计算频率引起的要求反应谱幅值变化不超过 10%。建议采用的频率间隔见本规范表 3.4.1,计算一条反应谱曲线至少应取 75 个频率点,实际计算时可取上百个点。另一个可接受的方法是选择一组频率,使每个频率与它前一个频率对应的要求反应谱幅值相差在 10%以内。

(3) 人工加速度时程所得到的 TRS 谱值低于 RRS 谱值的点不得多于 5 个。如不满足这一要求,则每个谱值低于 RRS 谱值的频率点,在它邻近的 1/6 倍频程处的 TRS 谱值应至少等于 RRS 谱值,且与它邻近的 1/3 倍频程处的 TRS 谱值至少应大于 1.1 倍 RRS 谱值。或者,当计算频率点间隔为 1/6 倍频程时,TRS 谱值小于 RRS 谱值的点,最多不应超过 5 个,且其间隔至少为 1 个倍频程。

如果 RRS 在低频段具有相当高的加速度值,则往往超过振动台的能力。此时可不要求低频段(一般为 5Hz 以下)的 TRS 包络 RRS,并按下列规定处理。其一,若 5Hz 以下没有共振现象(这在动态特性探查试验时可以发现),则 TRS 应在 3.5Hz 以上包络 RRS,但在 1Hz~3.5Hz 范围内仍可维持激振;其二,若 5Hz 以下有共振现象,则要求 TRS 在最小的自振频率的 70%以上的频段包络 RRS;或采用等效激励(如正弦拍波)作试验,包络低频段的 RRS。

(4) 每条人工加速度时程的总持续时间不低于 30s,其中的强烈部分(幅值超过最大值的 25%)的持续时间应大于 15s。时程中至少有 6 个峰值(正的或负的)超过其最大值的 70%。

(5) 由每条人工加速度时程计算出的在频率 0.3~24Hz 范围内的功率谱密度(PSD)曲线必须包络由要求反应谱计算出的对应频率范围的目标功率谱密度曲线的 80%,使试验中施加给试件的能量足够大。

目标功率谱可由要求反应谱利用以下公式计算:

$$Psd(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} [S_a^T(\omega)]^2 \frac{1}{-\ln[(-\pi/(\omega T_d)) \ln(1-p)]}$$

式中 $Psd(\omega)$ ——目标功率谱;

$S_a^T(\omega)$ ——加速度反应谱;

T_d ——强震持续时间,取 15s。

P ——超越概率,取 $P=0.85$;

ξ ——阻尼比。

(6) 计算人工加速度时程的时间步长一般取 0.01s。如果高频部分比较丰富,可取 0.005 秒或更小的值。

(7) 人工加速度时程应包括直至 RRS 截断频率的全部振动成分。

(8) 各正交方向的加速度时程曲线应是相互独立的。相互独立的判别准则是强震时段的相关系数小于 0.3;或将持续时间至少划分为 12 段,要求各段在频域内的最大相干系数的平均值小于 0.5。若不满足上述要求,应在相隔 90°的 4 个水平方向中的每一方向上分别与竖直方向输入进行组合。每次试验持续时间为 30s。

2 单频包络谱法的相关要求如下:

(1) 对于安装在管道上的阀门，给定的单频包络反应谱应就不同厂址确定。若设备技术规格书没有具体规定，对于以 M310 为基础的二代核电站，当设计基准地震动加速度不超过 0.2g 时，阀门重心处的加速度可采用下图所示包络谱曲线（美国电气与电子工程师协会标准 IEEE-382 中 RIM 谱线），即采用 4g 的包络谱进行。

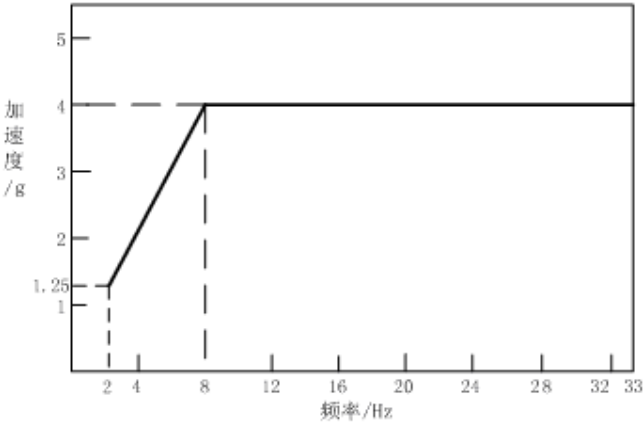


图9 阀门及其执行机构的抗震试验通用包络反应谱

阀门的抗震性能试验宜采用以下方法和步骤，沿三个正交方向分别进行：

① 运行安全地震模拟试验可以采用 2 次正弦扫描试验代替。每一正交轴上的扫描波应能在阀门重心处产生满足极限安全地震模拟试验要求的反应值（该反应值相当于阀门驱动器的输入值 RIM）的 2/3。扫描波频率变化应为 2~35~2Hz，扫描波速度不大于 1 倍频程/min。第一次扫描时阀门处于开启状态，第二次扫描时阀门处于闭合状态。

② 运行安全地震模拟试验后，再进行 1 次极限安全地震模拟试验，同时进行可运行性试验。试验输入采用正弦拍波；除有专门论证外，试验应在 2~33Hz 范围内的 1/3 倍频程处和自振频率处进行。正弦拍波的每个拍中应包含 12~15 个周波，阀门重心处的反应值应达到要求的反应值（该反应值相应于阀门驱动器的输入值 RIM），每次试验持续时间至少为 15s。可运行性试验在拍波试验中进行。若阀门驱动机构的开-关操作时间大于 15s，允许在开-关操作时，中断拍波振动试验；若驱动机构的开-关操作时间小于 5s，则应在每一频率试验中进行 2 次开-关操作。调节阀应在加载条件下、阀门开度为 20%行程时进行试验。

阀门试验时，单向的试验荷载应施加于驱动机构-支架的最小刚度方向。试验中应测量典型部位的应力、应变，检测阀门的完整性和可运行性。

(2) 安装标高不定的仪控电气设备或元器件的抗震性能试验一般也采用单频包络谱方法，可按以下方法和步骤进行。

① 要求的单频包络谱依照厂址确定。若设备技术规格书没有特殊规定，对于以 M310 为基础的二代核电站，仪控电设备和组件采用 RCC-E 谱（见表 4、表 5 和图 10、11）。对于 AP1000 设备，可根据地震作用适当加大。对于安装在机柜（台、盘、柜）中不同标高的仪控电元器件或阀门执行机构的元器件（如继电器、开关、接插件等），可采用适用于器件的通用包络反应谱（见图 12 和表 6，其中极限安全地震动 ZPA 加速度为 6g）。

② 采用正弦拍波方法进行 5 次运行安全地震和 1 次极限安全地震模拟试验。正弦拍波试验可就三个相互正交的轴线（OX、OY、OZ）分别进行。试验应在 2Hz~33Hz 范围的 1/2 倍频程处和自振频率处进行。正弦拍波的每个拍中应含 12~15 个周波。各拍之间的时间间隔至少取 2s。每次试验持续时间至少为 15s。试验中应对设备的功能和特征进行测量，以了解其可运行性。

表 4 仪控电设备和组件抗震试验通用水平包络反应谱的特征点

设计基准地震动	3Hz 以下	3Hz	10Hz	35Hz	35Hz 以上
极限安全地震动	0.14072m	50m/s ²	50m/s ²	10m/s ²	10m/s ²
运行安全地震动	0.07036m	25m/s ²	25m/s ²	5m/s ²	5m/s ²

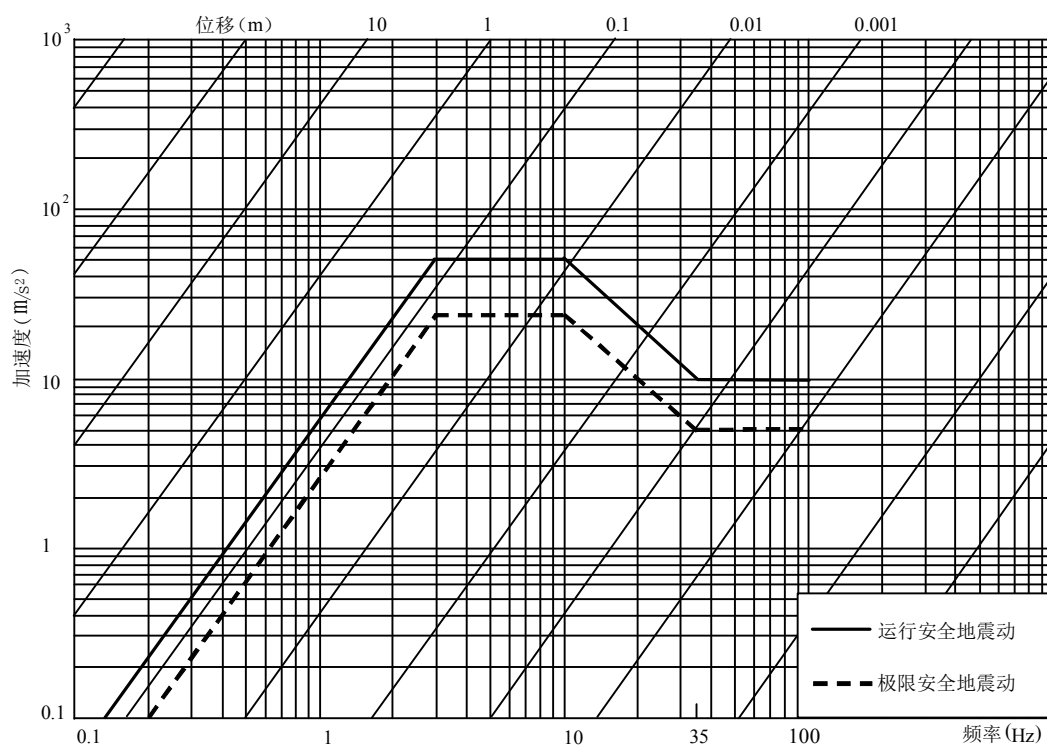


图 10 仪控电设备和组件抗震试验通用水平包络反应谱，阻尼比 5%

表 5 仪控电设备和组件抗震试验通用竖直包络反应谱的特征点

设计基准地震动	1Hz 以下	4Hz	15Hz	35Hz	35Hz 以上
极限安全地震动	0.114 m	40 m/s ²	40 m/s ²	8 m/s ²	8 m/s ²
运行安全地震动	0.057 m	20 m/s ²	20 m/s ²	4 m/s ²	4 m/s ²

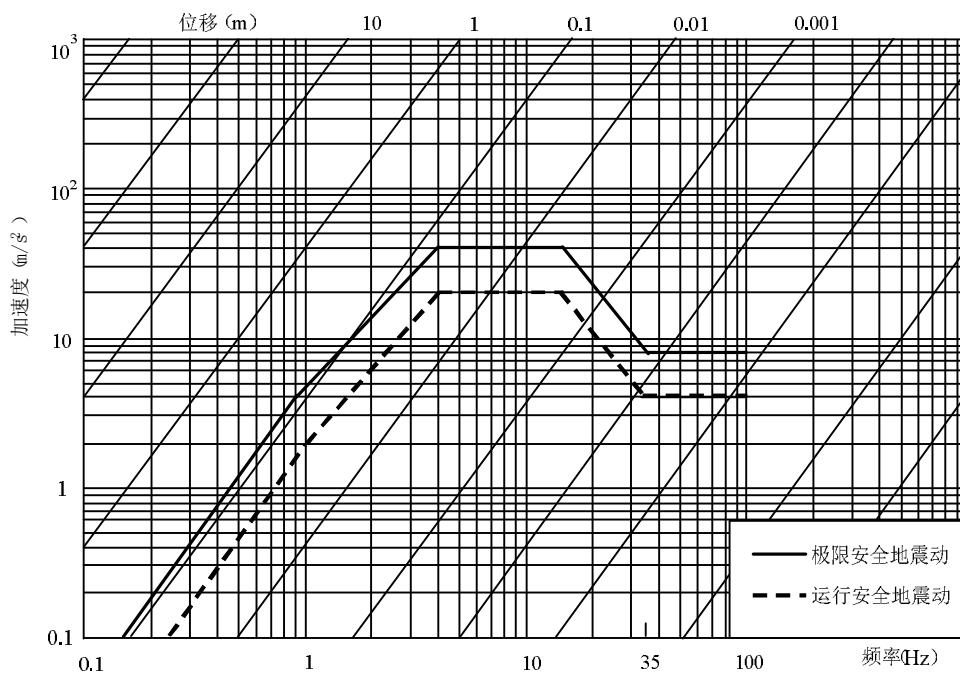


图 11 仪控电设备和组件抗震试验通用竖直方向反应谱，阻尼比 5%

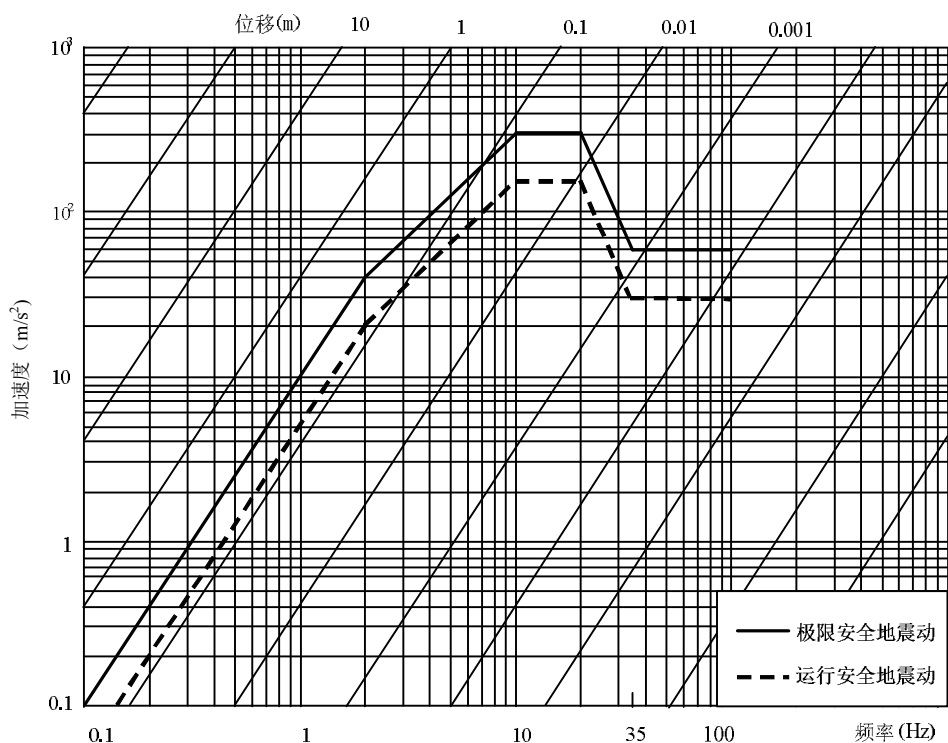


图 12 器件抗震试验的通用包络反应谱，阻尼比 5%

表 6 器件抗震试验的通用包络反应谱的特征点

设计基准地震动	2Hz 以下	2Hz	10Hz	20Hz	35Hz	35Hz 以上
极限安全地震动	0.2533m	40 m/s ²	300m/s ²	300 m/s ²	60m/s ²	60m/s ²
运行安全地震动	0.1266m	20 m/s ²	150 m/s ²	150 m/s ²	30m/s ²	30m/s ²

(4) 单频正弦拍波方法用逐个单向试验模拟多向试验，用逐个单频试验的组合模拟多频的反应，是一种近似方法。以电气设备为例，图 13 模拟了单个频率下的正弦拍波的响应以及多个正弦拍波（频率间隔为 1/2 倍频程）的组合，该组合形成的试验反应谱可以包络要求反应谱。

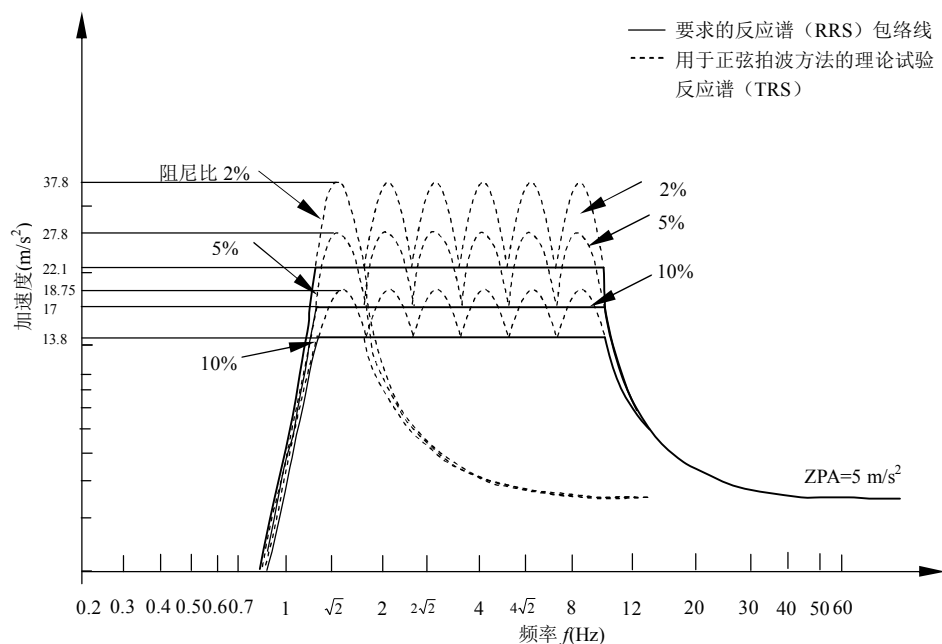


图 13 正弦拍波的组合包络要求反应谱的示例图

抗震性能试验中采用单频正弦拍波方法时，试验频率可根据实测的自振频率和规定的频率间隔（阀门为 1/3 倍频程，仪控电设备为 1/2 倍频程）在 1Hz~33Hz 的范围内选择，输入的幅值为要求反应谱的零周期加速度值（ZPA），拍波的振动次数 n 则根据要求反应谱在该频率下的幅值与 ZPA 的比值（即放大系数）和临界阻尼比值根据图 14 确定。每个频率处的试验持续时间至少为 15s。

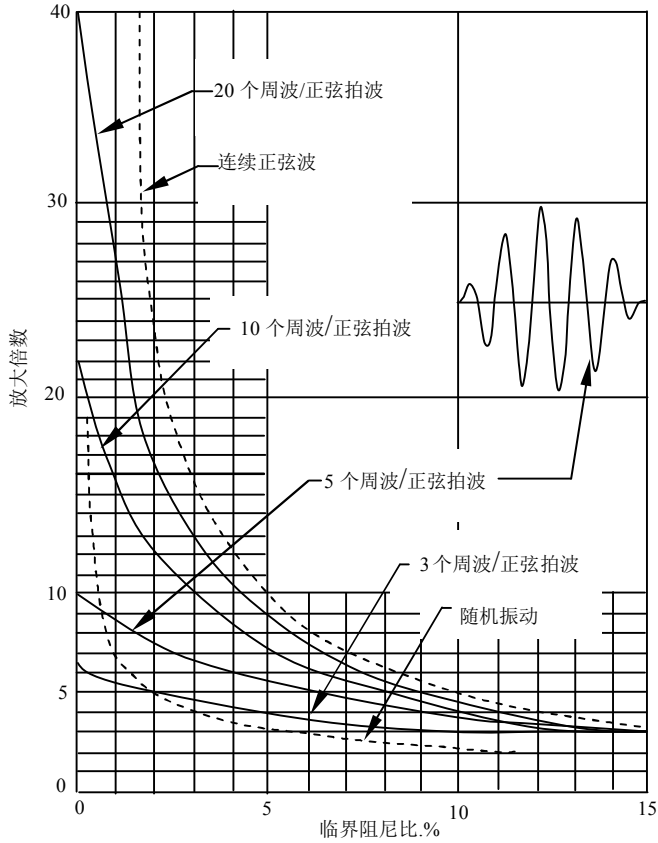


图 14 每拍振动周波次数与设备临界阻尼比和楼面谱放大倍数之间的关系

附录 L 设备、部件的容许应力和设计限值

L.1 容许应力

L.1.1~L.1.4 容许应力参照 2004 版 ASME 规范与 2007 版 RCC-M 规范给出。2004 版 ASME 规范将安全二、三级设备抗拉强度的安全系数由 4 改为 3.5, 而 2007 版 RCC-M 规范仍然采用 4, 本规范按照 2007 版 RCC-M 规范, 安全系数仍采用 4。

ASME II D 篇附录 1 表 1-100、附录 2 表 2-100 (a) 中对焊接管和管件的许用应力和应力强度规定乘以 0.85 系数, 在 RCC-M D3320 中也有同样的规定, RCC-M 中的规定只适用于三级设备。本规范按照 RCC-M 增加了对三级设备许用应力的规定。

注: (1) 我国目前尚未制定核动力装置的压力容器规范, 本规范有关部件分级 (规范级别, 如安全一级、二级和三级部件) 的规定, 与美国机械工程师协会 ASME 规范核电站部件的分级和法国 RCC-M 规范的分级相当。在机械设备和部件的设计中, 美国机械工程师协会 ASME 规范已在各国普遍使用, 亦被我国核电站设计采用。条文中使用的符号与美国机械工程师协会 ASME 规范相同, 无法与本规范其它章节统一。

(2) 对于采用分析法设计的安全一级部件采用基本许用应力强度进行评定, 基于最大剪应力理论, 此时应力强度定义为最大剪应力的两倍。换言之, 应力强度是在给定点上代数最大主应力与代数最小主应力之差, 并对应力进行分类; 相关概念和推导可参见美国机械工程师协会 ASME 规范 III 的 NB 和 RCC-M 规范的 B3000。对于采用分析法设计的安全二、三级部件, 采用基于最大主应力理论的基本许用应力进行评定, 相关概念和推导可参见美国机械工程师协会 ASME 规范 III 的 NC、ND 和 RCC-M 规范的 C3000 和 D3000。

L.2 设计限值

L.2.1~L.2.13 本节有关主要部件抗震设计应满足的设计限值基本上采用了美国机械工程师协会 2004 版 ASME 规范 III 和法国 2007 版 RCC-M 规范 B 篇、C 篇和 H 篇的规定。使用本节条文有关设计限值的具体规定时, 可参考美国机械工程师协会 ASME 规范 III 和法国 RCC-M 规范 B 篇、C 篇和 H 篇。

下述部件均给出了 0、A、B、C、D 级使用荷载下的应力限值。

对于安全一级部件, 本规范条文根据 2004 版 ASME 规范给出了应力限值, 并参考 ASME 规范增加了 D 级准则下承受纯剪切截面的平均一次剪应力限值。

对于堆内支承构件, 参考 RCC-M 规范增加了 A、B 级使用荷载下的剪应力限值。

能动部件除应保证其完整性之外, 还必须保证其可运行性。系统和部件的可运行性通常指地震时和地震后的可运行性, 因此, 对于能动的安全一级泵和阀门, 为了保证其可运行性必须对应力做严格的限制; 能动的安全一级泵在运行安全地震作用下应满足 B 级使用限制, 而在极限安全地震动作用 (即 D 级使用载荷) 下, 不能采用 D 级使用限制规定的应力限值; 因为 D 级使用限值可以容许部件产生显著的整体变形, 其结果会使部件丧失尺寸的稳定性, 并有需进行修理的损坏, 从而使该设备停止使用。因此, 在极限安全地震作用下也必须满足 B 级使用限制, 使其承压部分不致产生过大的变形。与安全一级泵类似, 能动的安全一级阀门在 A、B 及 D 级使用载荷下也均应满足设计载荷下的应力限制要求。但是, 对于非承压部分如轴、叶轮、阀瓣、外伸部分等应按照设计规格书验证其变形, 或经过抗震鉴定试验, 最终验证其可运行性。对于能动泵和阀门, 美国核管会导则 RG1.48 和 ASME、RCC-M 规范中的应力限值分歧较大。RG1.48 规定, 能动的泵和阀门无论在运行安全地震动或极限安全地震动作用下均采用 ASME 中的 A 级准则限制; 西屋公司针对运行安全地震动采用 A 级限制, 针对极限安全地震动采用 B 级限制; 法马通在两级地震动作用下均采用 B 级准则限制。本规范采用法马通的做法。

对于安全一级部件板壳型支承件, 根据 RCC-M 规范给出了 A 级、B 级和 C 级的一次应

力限值，根据 ASME 规范给出了不同级别使用载荷下的稳定性限制要求和剪切应力限制要求。

对于安全二、三级部件板壳型支承件，根据 RCC-M 规范给出了一次应力限值，参考 ASME 给出了稳定性限制要求和 D 级准则下的剪应力限制。

安全一、二、三级部件线型支承件的应力限值根据 ASME 规范给出。

对于受内压部件的连接螺栓紧固件的应力限值根据 ASME 规范给出，并增加了 D 级使用荷载下对剪切应力的规定。

对于非受内压部件的连接螺栓紧固件的应力限值按照 ASME 规范给出，并增加了 D 级使用荷载下对拉伸应力的限制。

表 7 列出了本规范和美国、法国规范关于安全一级部件的载荷组合和应力限值的比较。

表 7 安全一级部件的载荷组合和应力限值

工况	作用效应组合	ASME	RCC-M	本规范
设计	设计压力和温度、自重、接管荷载	设计使用限制	0 级准则	设计使用限制
正常	A 级使用瞬态、自重、接管荷载 运行安全地震动（适用时）	A 级使用限制	A 级准则	A 级使用限制
异常	B 级使用瞬态、自重、接管荷载、 运行安全地震动（适用时）	B 级使用限制	A 级准则	B 级使用限制
紧急	C 级使用瞬态、自重、接管荷载	C 级使用限制	C 级准则	C 级使用限制
事故	D 级使用瞬态、自重、接管荷载、 极限安全地震动、管道破裂荷载	D 级使用限制	D 级准则	D 级使用限制

注：（1）使用限制是容许应力的准则，如 A 级准则 $P_M \leq S_M$ ， $P_M + P_b \leq 1.5S_M$ ；B 级准则分别为 $1.1S_M$ 及 $1.65S_M$ 等；

（2）ASME 标准的设计工况包括运行安全地震动作用；

（3）RCC-M 将设计工况定为 1 类工况，包括 1/2 倍极限安全地震动作用效应。

表 8 列出了本规范和美国、法国规范关于安全二级和三级泵的载荷组合及应力限值的比较。

表 8 安全二级和三级泵的荷载组合和应力限值

荷载组合	应 力	美国机械 工程师协会 ASME III NC	美国核管会 安全导则		西屋公司		法马通公司		本规范	
			能动	非能动	能动	非能动	能动	非能动	能动	非能动
B 级 使用载荷	σ_M	1.10S	1.0S	1.1S	1.0S	1.1S	1.10S	1.10S	1.10S	1.10S
	$\sigma_M + \sigma_b$	1.65S	1.5S	1.65S	1.5S	1.65S	1.65S	1.65S	1.65S	1.65S
D 级 使用载荷	σ_M	2.0S	1.0S	1.2S	1.2S	2.0S	1.10S	2.0S	1.10S	2.0S
	$\sigma_M + \sigma_b$	2.4S	1.5S	1.80S	1.8S	2.4S	1.65S	2.4S	1.65S	2.4S

注：（1）美国机械工程师协会 ASME 第 III 篇 NC 章及 ND 章用于泵设计验收的这些要求不意味着保证泵的可运行性；

（2）美国核管会安全导则 RG1.48 已取消；

（3）西屋公司见 SHNPP 核电站的最终安全分析报告 FSAR；

（4）法马通采用的应力准则见广东核电站初步安全分析报告 PSAR。相对于各级准则的应力限值见压水堆核岛机械设备设计和建造规则 RCC-M。