

文章编号 : 0258-0926(2015)05-0015-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0015

# RG1.92 两种谱分析法在钢平台中的应用

徐胜红, 柳胜华, 彭晓平, 杨世峰

上海核工程研究设计院, 上海, 200233

**摘要:** RG1.92 (2006 版) 为了考虑反应谱分析高频部分的质量丢失问题, 将核电厂结构、系统和组件的地震响应分为 2 个部分: 周期性反应和刚性反应。核电厂安全壳内的钢平台地震响应包括刚性反应和周期性反应, 需要将刚性反应和周期性反应剥离开来分别计算。分别使用 Gupta 法+Missing Mass 法和 Lindley-Yow 法+静态零周期加速度 (ZPA) 法, 通过 GTStrudl 软件的程序语言编制满足这 2 种组合方法要求的计算程序, 以一个钢平台为实例, 对比研究 2 种谱分析方法在实际应用中的差异, 确定核电厂安全壳内的钢平台分析设计采用的反应谱分析方法。

**关键词:** RG1.92; 钢平台; 反应谱分析

**中图分类号:** TL93<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A

## Application of Two Response Spectrum Analysis Methods from RG1.92 for Steel Frame

Xu Shenghong, Liu Shenghua, Peng Xiaoping, Yang Shifeng

Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai, 200233, China

**Abstract:** In order to consider mass lose of frequency part of reaction response analysis, RG1.92(2006)separate nuclear power plant structure, systems, and components (SSCs) into two parts, which are referred to as the “periodic” response and the “rigid” response. Modes of steel frames in the containment vessel distribute in the periodic response region and rigid response region. A response spectrum analysis on a steel frame inside the containment is performed based on Gupta +Missing Mass and Lindley-Yow +ZPA to study the difference of the two methods. The software GTStrudl is used to perform the spectrum analysis based on the two methods above and to find a better way to complete the calculation of Steel frames in containment vessel.

**Key words:** RG1.92, Steel frame, Response spectrum analysis

## 0 引言

某大型核电厂安全壳厂房内需设置数量较多的钢结构平台。安全壳内的钢平台需要进行安全停堆抗震分析, 而反应谱分析是抗震分析的常用方法。根据美国核管会 (NRC) 发布的抗震设计的法规导则 RG1.92 (2006 版) 的分析方法借助 GTStrudl 软件对钢平台进行反应谱分析。分别使用 Gupta 法+Missing Mass 法和 Lindley-Yow 法+静态零周期加速度 (ZPA) 法, 以一个钢平台为实例对比研究这 2 种谱分析方法在实际应用中的

差异。

## 1 RG1.92 反应谱分析方法介绍

RG1.92 (1976 版)<sup>[1]</sup>的百分之十法和双倍和法没有考虑不同频率的谱反应的相位关系, 会造成不必要的保守性, 也没有精确计算质量丢失对结构的影响。RG1.92 (2006 版)<sup>[2]</sup>指出谱分析没有精确计算质量丢失会造成支座处的反力降低。RG1.92 (2006 版) 主要解决了 2 个问题: 出现密集振型的组合问题; 质量丢失的补足问题。

为了考虑反应谱分析高频部分的质量丢失问题, RG1.92 (2006 版) 将核电厂结构、系统和组件的地震响应分为: 周期性反应和刚性反应。由于地震反应谱是一系列不同频率单自由度振子的最大反应, 并没有考虑各个频率的谱反应之间的相位问题, 所以 RG1.92 (2006 版) 按频率从低到高将反应谱分为 3 段 (图 1)。图中 AD 段主要是周期性反应; EG 段主要是刚性反应; DE 段既有刚性反应, 也有周期性反应。

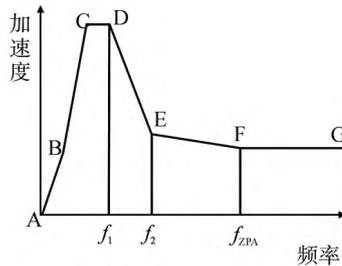


图 1 反应谱的频率分段

Fig. 1 Subsection of Response Spectrum

核电厂的钢平台模态分布较广, 从 A 到 G 整段都分布有重要模态, 部分重要模态的频率高于静态零周期加速度 (ZPA) 对应的频率  $f_{ZPA}$ , 位于图 1 中的 FG 段。刚性反应和周期性反应需要剥离开来分别计算, Gupta 法和 Lindley-Yow 法是 NRC 认可的分离刚性反应和周期性反应的方法; 周期性反应通过完全二次项组合法 (CQC) 组合。对于刚性反应部分的处理, RG1.92 (2006 版) 先给出了 Missing Mass 法和静态 ZPA 法, 而后给出了 Gupta 法+Missing Mass 法的和 Lindley-Yow 法+ ZPA 法 2 种完整的模态组合方法, 简称组合 A 法和组合 B 法<sup>[2]</sup>, 区别在于对于刚性反应部分的处理方法不同。以一个钢平台为实例对比研究这 2 种谱分析方法在实际应用中的差异。

Gupta 法+Missing Mass 法: Gupta 法通过一个刚性反应系数  $\alpha_i$  来分离出周期性反应和刚性反应, 这个  $\alpha_i$  通过图 1 中的 2 个分界频率  $f_1$  和  $f_2$  计算, 见式 (1)。刚性反应分量计算和周期性反应分量计算见式 (2) 和式 (3); 式 (4) 通过 CQC 法计算地震周期性反应组合; 式 (5) 地震的刚性反应计算包括用 Gupta 法剥离出的刚性反应和用 Missing Mass 法计算的刚性反应 2 个部分; 总

的地震反应计算见式 (6)。

$$\alpha_i = \frac{\ln(f_i / f_1)}{\ln(f_2 / f_1)} \quad (1)$$

$$R_{ri} = \alpha_i R_i \quad (2)$$

$$R_{pi} = \sqrt{1 - \alpha_i^2} R_i ; \quad (3)$$

$$R_{pl} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} R_{pi} R_{pj}} \quad (4)$$

$$R_{rl} = \sum_{i=1}^n R_{ri} + R_{MI} \quad (5)$$

$$R_l = \sqrt{R_{rl}^2 + R_{pl}^2} \quad (6)$$

式中,  $R_i$  为  $i$  阵型的地震响应;  $\alpha_i$  为刚性反应系数;  $R_{ri}$  为  $i$  阵型的刚性反应分量;  $R_{pi}$  为  $i$  阵型的周期性反应分量;  $R_{MI}$  为 Missing Mass 法计算的刚性反应;  $R_{pl}$  为结构的周期性反应组合;  $R_{rl}$  为结构的刚性反应组合;  $R_l$  为结构总的地震响应。

Lindley-Yow 法+静态 ZPA 法: Lindley-Yow 法分别计算结构的周期性反应和刚性反应。结构的周期性反应分量计算见式 (7) 式 (8)。结构的周期性反应组合通过 CQC 法计算见式 (9); 式 (10)。通过静态 ZPA 法计算结构的刚性反应; 总的地震响应计算见式 (11)。

$$R_{pi} = R_i (\overline{S_{a_i}} / S_{a_i}) \quad (7)$$

$$\overline{S_{a_i}} = \sqrt{S_{a_i} - a_{ZPA}^2}, \quad \overline{S_{a_i}} \geq 0 \quad (8)$$

$$R_{pl} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} R_{pi} R_{pj}} \quad (9)$$

$$R_{rl} = R_{staticZPAI} \quad (10)$$

$$R_l = \sqrt{R_{rl}^2 + R_{pl}^2} \quad (11)$$

式中,  $S_{a_i}$  为  $i$  阵型的加速度;  $a_{ZPA}$  为零周期加速度;  $R_{staticZPAI}$  为静态 ZPA 法计算的刚性反应。

## 2 有限元分析

### 2.1 计算模型

以某核电厂钢平台作为算例, 用 GTStrudl 软件进行分析和构件内力计算, 采用三维梁单元模型, 结构模型整体坐标系 X、Y、Z 轴分别表示结构的南北向、竖向和东西向。有限元模型见图 2。

### 2.2 输入荷载

设计输入的楼面反应谱取某大型核电厂钢平台支座标高的反应谱曲线, 按 RG1.61 的要求

的规定考虑钢平台的阻尼，本文仅研究竖向地震作用下钢平台的地震响应。在 GTStrudl 软件的计算过程中，Gupta 法通过计算刚性反应系数分离周期性反应和刚性反应；Lindley-Yow 法通过调整反应谱曲线的方法实现周期性反应的分离，采用的修正后反应谱曲线见图 3。

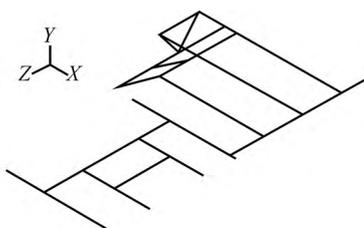


图 2 钢平台的有限元模型

Fig. 2 Finite Element of Steel Frame Module

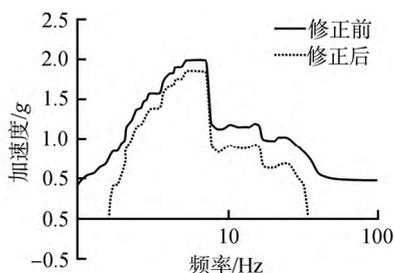


图 3 楼面 Y 向反应谱

Fig. 3 Floor Reaction Spectral of Y Direction

### 3 分析结果

#### 3.1 模态分析

经过计算发现，结构前 10 阶振型的自振频率小于 33 Hz，其余振型的自振频率均大于 33 Hz，从表 1 中可以看出，3 个方向高于 33 Hz 的参与质量也较大，部分重要模态频率高于  $f_{ZPA}$ 。

核电厂钢平台谱分析采用了 2 种不同的分析方法并输出相应的计算结果。第一种方法采用 Gupta 法剥离出前 10 阶振型的刚性反应和周期性反应；周期性反应采用通过 CQC 法计算；刚性反应部分与通过 Missing Mass 法计算的刚性反应分量进行求和，最后将周期性反应和刚性反应计算结果叠加得到结构总的地震反应。第二种分析方法是采用 Lindley-Yow 法修正设计输入的楼面反应谱；用 CQC 法计算周期性反应，通过静态

ZPA 法计算结构的刚性反应；最后将周期性反应和刚性反应计算结果叠加得到结构总的地震响应。

#### 3.2 单元内力对比

钢平台按照这 2 种分析方法得出的地震响应，研究 RG1.92 (2006 版) 提供的 2 种谱分析方法在实际应用中的差异。

在竖向地震工况作用下得到 2 种分析方法的构件的最大轴力、剪力、扭矩和弯矩，绝大部分单元的内力都很接近，差异在 10% 以下；竖向和弯矩和剪力差异更大一些；Gupta 法+Missing Mass 法计算结果相对要保守一些 (表 1)。

表 1 RG1.92 两种谱分析方法的结果差异

Table 1 Result Difference of Two Response Spectrum Analysis Methods

参数	$F_X$	$F_Y$	$F_Z$	$M_X$	$M_Y$	$M_Z$
最大值差异	1.44%	1.23%	8.76%	0.88%	9.21%	3.93%

注： $F_X$ 、 $F_Y$ 、 $F_Z$  为 X 向、Y 向、Z 向力； $M_X$ 、 $M_Y$ 、 $M_Z$  为 X 向、Y 向、Z 向力矩

### 4 结论

RG1.92 (2006 版) 主要解决了反应谱分析高频部分的质量丢失问题。根据质量丢失部分的计算不同方法形成组合方法 A 和组合方法 B，以一个钢平台为实例来对比研究 2 种谱分析方法在实际应用中的差异。发现：2 种谱分析计算结果差异不大，对于钢平台都是可行的谱分析方法；组合方法 B 要求谱加速度  $S_{wi}$  大于 ZPA 才能得到修正的谱加速度值，钢平台的基频相对较高，所以基频加速度一般大于  $a_{ZPA}$ ；组合方法 A 计算的构件内力相对较大，但是从计算过程来讲，组合方法 B 更容易操作。

#### 参考文献：

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis[S]. 1976 .
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis[S]. 2006 .

(责任编辑：王中强)