

文章编号：0258-0926(2009)03-0013-04

# 基于功率谱密度函数法的核电厂房增加隔震措施后的楼层反应谱分析

曾 奔<sup>1,2</sup>, 周福霖<sup>2</sup>, 徐忠根<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学, 西安, 710055; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广州, 510405)

**摘要：**以压水堆核电站反应堆厂房结构为分析对象，利用功率谱密度函数法(PSDF)建立了楼层反应谱(FRS)，研究了在增加隔震装置情况下，土-结构相互作用(SSI)、主次结构耦合作用和次结构阻尼比等因素对FRS计算的影响，定量分析了厂房结构FRS对这几种因素的敏感性。研究结果表明，隔震后FRS峰值下降明显，并且主要出现在隔震频率附近；同时隔震作用、SSI和主次结构耦合作用交叉影响，厂房设计时必需综合考虑这几种作用。

**关键词：**核反应堆厂房；土-结构相互作用；隔震装置；功率谱密度函数；楼层反应谱

中图分类号：TU352.1<sup>+</sup> 文献标识码：A

## 1 引言

楼层反应谱是评估核电站设备抗震性能的重要指标，目前主要采用与设计相同的多组时程输入对反应堆厂房进行地震响应分析，得到按“平均”法和“包络”法计算的楼层反应谱(FRS)<sup>[1,2]</sup>。这种方法的缺点是需要对厂房结构进行大量的时程分析。本文从概率角度出发，通过选取目标反应谱来求得相一致的功率谱密度函数(PSDF)，进而通过随机振动理论求得FRS。这种方法的好处是：首先是避免了大量冗长的时程分析；其次，由于目标反应谱本身就反映了地面运动频谱与工程结构物固有频率的关系，因此，与它相一致的PSDF能很好地模拟地震地面运动的随机模型。针对某千兆瓦级压水堆核电站反应堆厂房，本文在考虑土-结构相互作用(SSI)效应的基础上，采用PSDF对此核电厂房进行分析，得到统计意义上的FRS<sup>[3-7]</sup>，并对厂房隔震前后的FRS进行了对比分析，同时还研究了核电厂房在增加隔震装置后各种因素[主次结构耦合作用、非结构构件(NSC)质量比和阻尼比]对FRS的影响。结果表明，增加隔震装置会不同程度的削弱SSI和主次结构耦合作用；隔震后FRS峰值下降明显，且其主要出现在隔震频率附近。

## 2 分析方法

SSI问题的实质是考虑在地面运动时混凝土反应堆厂房与地基土的相互作用，分析时将地基土纳入分析系统，形成地基土-结构系统<sup>[8]</sup>。本文基于子结构(阻抗)方法，用文献[9]推荐的锥体模型进行土-结构动力相互作用分析。同时，为了更准确地模拟实际地震动输入，引入有效地震动输入影响系数 $S_{HB}(\omega)$ 和 $S_{RB}(\omega)$ ，分别为频域内基础底部的平移和摆动分量与自由场的水平输入位移 $U_g(\omega)$ 的比值，即基础的散射函数。图1为核电厂房基础的有效地震动输入影响系数随无量纲频率 $a_0$ 的变化曲线。

计算时，假设控制点在筏板基础底部，基础下地基土为半无限空间弹性体；考虑3种不同剪切波速，即 $V_s=100\text{ m/s}$ 、 $300\text{ m/s}$ 、 $\infty$ 的地基土。其中， $\infty$ 代表地基土无限刚(即不考虑土-结构相互作用)。

## 3 传递函数

根据文献[3]中的方法可推导出核电厂房结构在增加隔震装置后NSC的传递函数：

收稿日期：2008-07-06；修回日期：2008-10-15

基金项目：国家自然科学基金项目(50608021)、科技部重大基础研究前期研究专项(2004CCA0330)

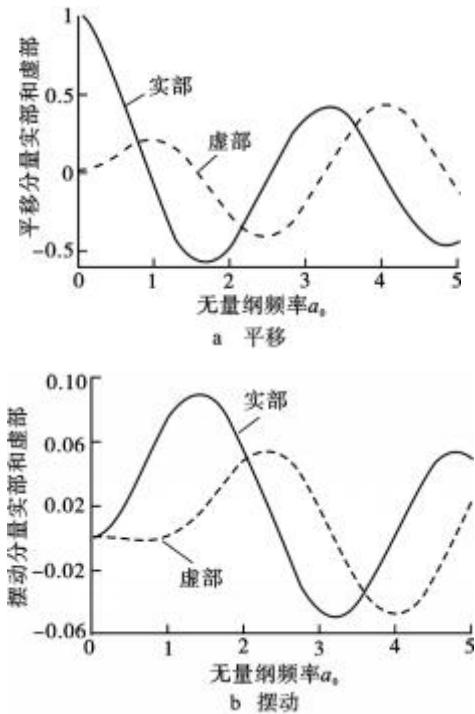


图1 有效地震输入影响系数随无量纲频率  $a_0$  的变化曲线

Fig. 1 Coefficient of Effective Foundation Input Motion Changing with Dimensionless Frequency  $a_0$

$$\begin{aligned} \Psi(\omega) = & \chi_0^{(1)}(\omega) + \chi_x^{(1)}(\omega) + h_p \chi_\theta^{(1)}(\omega) + \\ & [\chi_0^{(2)}(\omega) + \chi_x^{(2)}(\omega) + h_p \chi_\theta^{(2)}(\omega)] \\ & (i\omega C_s + K_s) h'(\omega) - \omega^2 [h'(\omega) + H'_p(\omega)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中， $\chi_x^{(1)}(\omega)$ 、 $\chi_\theta^{(1)}(\omega)$ 、 $\chi_x^{(2)}(\omega)$ 和 $\chi_\theta^{(2)}(\omega)$ 分别为基础相对于自由场运动的平移、摆动的传递函数和它们相对于主次结构相互作用力的传递函数； $h'(\omega)$ 和 $H'_p(\omega)$ 分别为NSC的相对基础底部激励加速度的传递函数和NSC所在层相对于基础底部激励加速度的传递函数； $K_s$ 和 $C_s$ 则分别为NSC的刚度和阻尼值。对比文献[3]中所得传递函数，式(1)多了 $\chi_0^{(1)}(\omega)$ 和 $\chi_0^{(2)}(\omega)$ 两项，它们分别是隔震层相对于自由场运动的传递函数和相对于主次结构相互作用力的传递函数；同时在 $H'_p(\omega)$ 相应的子项中也须计算 $\chi_0^{(1)}(\omega)$ 和 $\chi_0^{(2)}(\omega)$ 两项。

由式(1)可得到，NSC响应的PSDF为 $S_r(\omega)=|\Psi(\omega)|^2 S_a(\omega)$ 。式中， $S_a(\omega)$ 为与目标反应谱一致的功率谱密度函数。由随机振动理论<sup>[10]</sup>

可知，激励响应的PSDF包围下的面积为其均方值，再对其开方即可得到响应PSDF的均方根值。由文献[3, 5]可知，把均方根值乘以相应的峰值因子就可得到特定频率下NSC的响应峰值。峰值因子由下式计算：

$$\eta^{(i)} = \int_0^\infty P^{(i)}(u) du - \int_0^\infty d[u P^{(i)}(u)] \quad (2)$$

式中， $P^{(i)}(\omega)$ 为第*i*阶峰值因子的累积概率函数<sup>[5]</sup>。由于这里是位移响应，故取1阶即可；最后通过变化频率，即可得到特定阻尼下NSC的楼层反应谱。

#### 4 地震响应的计算与分析

计算采用的结构模型和参数与文献[2]保持一致。反应堆厂房结构采用集中质量模型(图2)，结构保持对称。结构的材料性能参数见表1。

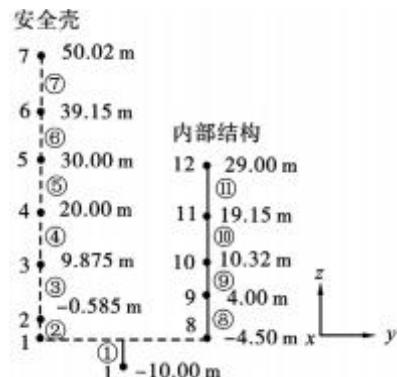


图2 反应堆厂房结构的集中质量模型

Fig. 2 Lumped Mass Model of Reactor Building

表1 结构材料性能参数

Table 1 Parameters of Structural Materials

材 料	弹性模量 $/10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	剪切模量 $/10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	泊 松 比	密度 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	阻尼比 /%
混 凝 土	4.0	1.6	0.2	2 500.0	7.0
钢	21	8.1	0.3	7 800.0	4.0

隔震层刚度<sup>[11]</sup>选取时不考虑土-结构相互作用(SSI)的影响，且假设隔震后上部结构以刚体形式运动。其刚度为 $k_0 = m_T (2\pi/T_0)^2$ ， $m_T$ 为隔震层与核电厂房结构的总质量。隔震后使 $T_0$ 远离场地的卓越周期，取 $T_0 = 2.5$  s。

根据反应谱与能量谱矩的简化关系，利用下式将目标反应谱转化成功率谱密度函数：

$$f(\omega) = \left( \frac{2\xi}{\pi\omega} \right) R^2(\omega) / \left\{ -2 \ln \left[ \frac{-\pi}{\omega T} (1-r) \right] \right\}$$

式中， $r$  为超越概率。这里选择的目标反应谱为我国抗震规范的设计反应谱，场地土类别为 II，设计地震分组为第二组，8 度多遇地震下地震影响系数曲线。

图 3 是选取的目标反应谱，表示地震影响系数与周期间的关系。图 4 为根据目标反应谱计算得到的与目标反应谱相一致的功率谱密度函数，反映整个频谱上地震动输入功率的分布情况。

采用 matlab 程序对上述反应堆厂房结构分别进行隔震前和隔震后的数值分析，得到节点 12 水平方向的楼层反应谱（表 2、表 3）。对比两表可看到，反应堆厂房在增加隔震装置后  $R_{max}$  明显减小；地基土剪切波速越大，这种效果就越明显。隔震后，SSI 和主次结构耦合作用都有不同程度的削弱。SSI 在地基土较软时仍起着相当大的作用， $R_{max}$  和反应谱零周期加速度 ( $a_{ZPA}$ ) 在隔震前后的效果并不是很明显，主要是 SSI 引起的。主次结构耦合作用则在不同剪切波速的情况下仍能

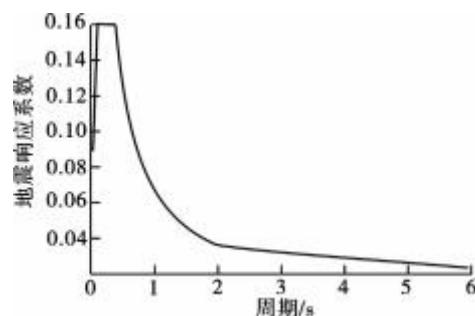


图3 目标反应谱

Fig. 3 Target Response Spectrum

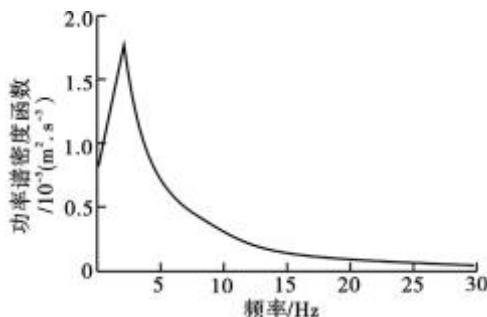


图4 与目标反应谱一致的功率谱密度函数

Fig. 4 Spectrum-Compatible PSDF

表2 隔震前节点 12 水平方向的 FRS 特征值

Table 2 Characteristic Value of Horizontal FRS in Node 12 (Non-isolated)

工况		V <sub>s</sub> =100 m/s			V <sub>s</sub> =300 m/s			V <sub>s</sub> =∞		
		a <sub>ZPA</sub> /g	R <sub>max</sub> /g	F <sub>Rmax</sub> /Hz	a <sub>ZPA</sub> /g	R <sub>max</sub> /g	F <sub>Rmax</sub> /Hz	a <sub>ZPA</sub> /g	R <sub>max</sub> /g	F <sub>Rmax</sub> /Hz
$\zeta=0.02$	r=0	0.113	1.128	0.430	0.262	2.883	1.226	0.471	5.559	4.475
	r=0.01	0.113	1.099	0.430	0.262	2.526	1.226	0.467	3.225	4.570
	r=0.05	0.114	0.945	0.398	0.263	1.907	1.258	0.452	1.810	4.952
$\zeta=0.05$	r=0	0.113	0.667	0.430	0.262	1.510	1.258	0.471	3.006	4.506
	r=0.01	0.113	0.647	0.430	0.262	1.449	1.258	0.467	2.261	4.602
	r=0.05	0.114	0.579	0.430	0.263	1.263	1.258	0.452	1.436	4.857
$\zeta=0.10$	r=0	0.113	0.406	0.430	0.262	0.906	1.258	0.471	1.814	4.602
	r=0.01	0.113	0.40	0.430	0.262	0.888	1.258	0.467	1.553	4.697
	r=0.05	0.114	0.380	0.430	0.263	0.831	1.290	0.452	1.103	4.889

注：  $a_{ZPA}$  为反应谱零周期加速度；  $R_{max}$  为反应谱峰值；  $F_{Rmax}$  为反应谱峰值对应频率

表3 隔震后节点 12 水平方向的 FRS 特征值

Table 3 Characteristic Value of Horizontal FRS in Node 12 (Isolated)

工况		V <sub>s</sub> =100 m/s			V <sub>s</sub> =300 m/s			V <sub>s</sub> =∞		
		a <sub>ZPA</sub> /g	R <sub>max</sub> /g	F <sub>Rmax</sub> /Hz	a <sub>ZPA</sub> /g	R <sub>max</sub> /g	F <sub>Rmax</sub> /Hz	a <sub>ZPA</sub> /g	R <sub>max</sub> /g	F <sub>Rmax</sub> /Hz
$\zeta=0.02$	r=0	0.095	0.990	0.334	0.067	0.524	0.430	0.045	0.495	0.494
	r=0.01	0.096	0.964	0.334	0.068	0.468	0.430	0.045	0.416	0.494
	r=0.05	0.097	0.784	0.334	0.077	0.403	0.398	0.045	0.312	0.398
$\zeta=0.05$	r=0	0.095	0.556	0.334	0.067	0.308	0.430	0.045	0.247	0.494
	r=0.01	0.097	0.546	0.334	0.068	0.289	0.430	0.045	0.233	0.494
	r=0.05	0.098	0.477	0.334	0.077	0.240	0.430	0.045	0.209	0.462
$\zeta=0.10$	r=0	0.095	0.332	0.334	0.067	0.190	0.462	0.045	0.155	0.462
	r=0.01	0.096	0.327	0.334	0.068	0.186	0.462	0.045	0.153	0.462
	r=0.05	0.097	0.308	0.334	0.077	0.174	0.462	0.045	0.145	0.462

起到降低  $R_{\max}$  的作用，并且随着质量比的增加，减小幅度越大。表 1、表 2 还表明，不管考虑 SSI 和主次结构耦合作用与否，设备阻尼比的增加都能有效地减小  $R_{\max}$ ，但对  $a_{ZPA}$  和  $F_{R\max}$  影响最大的仍是 SSI。

## 5 结 论

(1) 在增加隔震装置后，能显著减小楼层反应谱的  $R_{\max}$  值，同时其对应的  $F_{R\max}$  值出现的区域明显收窄，主要出现在设计隔震频率附近。

(2) 隔震后，对 SSI 和主次结构耦合作用都有一定削弱作用，同时它们也对隔震效果产生影响。结构设计时应综合考虑地基土、隔震装置、上部主结构和非结构构件的特性进行设计。

(3) 利用与场地目标反应谱相一致的功率谱密度函数，可以得到任何期望水平下反应堆厂房的楼层反应谱，同时它能很好地与现行抗震规范相结合，为设备隔震提供依据。

(4) 不管隔震与否，增大设备阻尼比仍然是减小楼层设备破坏和保持正常运作的有效方法。

### 参考文献：

[1] 李忠献，李忠诚. 考虑地基土参数不确定性和土-结构

- 相互作用效应的核电厂结构随机地震反应分析[J]. 核动力工程，2006, 27(2): 30~35.
- [2] 李忠诚，李忠献. 大亚湾核电站反应堆厂房楼层反应谱分析评估[J]. 核科学与工程，2006, (26)1:72~78.
- [3] Chaudhuri S R, Gupta V K. Mode Acceleration Approach for Generation of Floor Spectra Including Soil-Structure Interaction. Journal of Earthquake Technology, ISET[J]. Earthq Tech, 2003, 40 (2~4), 99~115.
- [4] Gupta V K. Acceleration Transfer Function of Secondary Systems[J]. Eng Mech(ASCE), 1997, 123(7): 678~685.
- [5] Gupta V K. Developments in Response Spectrum-Based Stochastic Response of Structural Systems, ISET[J]. Earthq Tech, 2002, 39 (4): 347~365.
- [6] Aleksandar P, Stefanie R. Deterministic and Probabilistic Floor Response Spectra[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23 (7): 605~618.
- [7] Robin K. New Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 203: 249~257.
- [8] WOLF J P. 土-结构动力相互作用[M]. 吴世明，唐有职译. 北京：地震工程出版社，1989.
- [9] Wolf J P. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [10] 方同著. 工程随机振动[M]. 北京：国防工业出版社，1995.
- [11] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京：地震出版社，1997.

## Floor Response Spectra Analysis of Nuclear Reactor Buildings with Additional Base-Isolation Measures Based on PSDF

ZENG Ben<sup>1,2</sup>, ZHOU Fu-lin<sup>2</sup>, XU Zhong-gen<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China;  
2. Earthquake Engineering Research and Test Center of Guangzhou University, Guangzhou, 510405, China)

**Abstract:** Based on the reactor building of a 1 000 MW Pressurized Water Reactor(PWR) nuclear power station, the floor response spectra in the use of power spectrum density functions has been generated, the main factors (such as soil-structure interaction, second-primary structure interaction and damping ration of secondary system) which have great effect on FRS is investigated with the base-isolation devices added in reactor building, and the sensitivity of the floor acceleration response spectra of the reactor building to the change of this main factors is quantitatively analyzed. The result show that the peak acceleration of FRS is effectively decreased with additional base-isolation devices, and it mainly appears near the base-isolation frequency; in the same time, the base-isolation effect, SSI and second-primary structure interaction are with cross effect, and it is necessary to consider all the effects in the design of nuclear reactor buildings.

**Key words:** Nuclear reactor building, Soil-structure interaction, Base-isolation devices, Power spectrum density functions, Floor response spectra

(下转第 21 页)

- sel Technology. 1981, 103: 233 ~ 239.
- [2] Epstein R J, Srinivasan R, Dowell E H. Flutter of an Infinitely Long Panel in a Duct[J]. AIAA Journal. 1995, 33: 109 ~ 115.
- [3] Karagiozisa K N, Paidoussis M P, Amabilib M, et al. Nonlinear Stability of Cylindrical Shells Subjected to Axial Flow: Theory and Experiments[J]. Journal of Sound and Vibration. 2008, 309: 637 ~ 676.
- [4] Nikolic M, Rajkovic M. Bifurcations in Nonlinear Models of Fluid-Conveying Pipes Supported at Both Ends[J]. Journal of Fluid and Structures. 2006, 22: 173 ~ 195.
- [5] Yang Z C, Zhao L C. Analysis of Limit Cycle Flutter of an Airfoil in Incompressible Flow[J]. Journal of Sound and Vibration. 1988, 123(1): 1 ~ 13.
- [6] LU Li, YANG Yi-ren. Vibration of a Parallel Plate-Type Structure in Two-Dimensional Axial Flow[C]. Proceeding of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics. Nanjing: Science Press USA Inc. 2005, vol 2: 1180 ~ 1185.
- [7] 鲁丽. 非线性板状结构流固耦合复杂响应研究[D]. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2006.

## Equivalent Linearization Method for Limit Cycle Flutter Analysis of Plate-Type Structure in Axial Flow

LU Li, YANG Yi-ren

( School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China )

**Abstract:** The responses and limit cycle flutter of a plate-type structure with cubic stiffness in viscous flow were studied. The continuous system was dispersed by utilizing Galerkin Method. The equivalent linearization concept was performed to predict the ranges of limit cycle flutter velocities. The coupled map of flutter amplitude-equivalent linear stiffness-critical velocity was used to analyze the stability of limit cycle flutter. The theoretical results agree well with the results of numerical integration, which indicates that the equivalent linearization concept is available to the analysis of limit cycle flutter of plate-type structure.

**Key words:** Plate-type structure, Axial viscous flow, Equivalent linearization, Limit cycle flutter

**作者简介：**

鲁丽 (1978—), 女, 讲师。2006年毕业于西南交通大学力学与工程学院(原应用力学与工程系)固体力学专业, 获博士学位。现从事流-固耦合振动方面的研究。

杨翊仁 (1959—), 男, 教授, 博士生导师。1991年毕业于西北工业大学飞机设计专业, 获博士学位。现从事流-固耦合振动方面的研究。

(责任编辑: 孙华平)

(上接第16页)

**作者简介：**

曾奔 (1979—), 男, 博士研究生。2006年毕业于西安建筑科技大学结构工程专业, 获工学硕士学位。主要从事结构抗震研究。

周福霖 (1939—), 男, 中国工程院院士。1984年毕业于加拿大不列颠哥伦比亚大学土木结构工程专业, 获硕士学位。现任广州大学工程抗震研究中心主任, 主要从事抗震研究。

徐忠根 (1965—), 男, 副教授。1994年毕业于同济大学结构工程专业, 获博士学位。现主要从事结构隔震减震研究和钢结构教学。

(责任编辑: 张明军)