

# “华龙一号”核岛厂房整体隔震分析

史晨程 陈 健 孙晓颖 杨孝移

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘 要:** 结合核电厂房特点及相关规范要求,确定了“华龙一号”核岛厂房整体隔震方案的动力学优化目标为隔震支座应力控制目标、隔震层水平位移控制目标和楼层反应谱减震目标,并经过优化确定了一种合理的整体隔震方案。基于有限元分析软件 ANSYS,系统分析了“华龙一号”核岛厂房整体隔震结构的模态、加速度响应、楼层反应谱、隔震支座应力、隔震层最大水平位移等各方面的动力响应。此外,方案还综合考虑了隔震技术成熟度、支座更换、总图布置以及隔震层刚度与上部结构质心重合等多方面的要求。分析结果表明,采用的隔震方案在水平向  $PGA$  为  $0.5g$  的地震动输入下能够满足优化目标。

**关键词:** 华龙一号; 核岛厂房; 整体隔震; 方案优化; 有限元分析

## Analysis of Overall Isolated Nuclear Island Building of “HPR1000”

SHI Chencheng CHEN Jian SUN Xiaoying YANG Xiaoyi

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** Combined with the characteristics of the nuclear power plant and the requirements of relevant specifications, the dynamic optimization objectives of the overall isolation scheme of “HPR1000” nuclear island plant are determined as the stress control objectives of the isolation bearing, the horizontal displacement control objectives of the isolation layer and the shock absorption objectives of the floor response spectrum. After optimization, a reasonable overall isolation scheme is determined. Based on the finite element analysis software ANSYS, the dynamic responses of the overall isolation structure of “HPR1000” nuclear island plant, such as mode, acceleration response, floor response spectrum, isolation bearing stress, maximum horizontal displacement of isolation layer and so on, are systematically analyzed. In addition, the scheme also comprehensively considers the requirements of the maturity of the isolation technology, the replacement of the bearing, the general layout and the coincidence of the stiffness center of the isolation layer and the mass center of the superstructure. The analysis results show that the adopted isolation scheme can meet the optimization goal under the horizontal ground motion input with  $PGA$  of  $0.5g$ .

**Keywords:** HPR1000; nuclear island building; overall isolation; scheme optimization; finite element analysis

我国三代自主核电机组“华龙一号”标准化设计,设计地震峰值加速度为  $0.30g$ <sup>[1]</sup>。对于更高地震烈度区的潜在厂址,采用整体隔震技术可以使主要结构和设备的设计免受厂址地震动大小的影响而实行标准化设计,从而拓宽“华龙一号”标准化设计的厂址适用范围,加速核电站的设计和施工进度,降低设计和建造成本<sup>[2-5]</sup>。

### 1 整体隔震方案介绍及优化过程

“华龙一号”核岛厂房整体隔震结构具有如下特点:1) 厂房体量大、自重大,对隔震支座要求高;2) 非对称结构,隔震层布置较为复杂;3) 大底板上部各厂房相互独立,动力特性复杂。

结合“华龙一号”核岛厂房的结构特点,并根据

对国内外隔震技术现状的调研,确定采用铅芯橡胶支座基底隔震方案<sup>[6-7]</sup>。

结合核电项目特点及规范要求,确定了以下动力学优化目标:

1) 隔震支座应力控制目标:隔震支座验算地震作用下最大压应力和最小压应力时,应考虑三向地震作用产生的最不利轴力,且隔震层的橡胶隔震支座在极限安全地震动水平和竖向地震同时作用下,不宜出现拉应力,最大压应力不应超过  $20 \text{ MPa}$ 。当隔震支座不可避免处于受拉状态时,其拉应力不应

第一作者:史晨程,男,1992年出生,硕士,工程师。

电子信箱:shichencheng10@163.com

收稿日期:2022-03-18

大于 1.0 MPa<sup>[8-9]</sup>。

2) 隔震层水平位移控制目标: 橡胶隔震支座在极限安全地震作用下的最大水平位移应小于支座橡胶层总厚度的 1.3 倍, 且小于 300 mm<sup>[8-9]</sup>。

3) 楼层反应谱减震目标: 主要频率段水平向反应谱可被“华龙一号”标准化设计谱包络。

本文采用 ANSYS 软件进行有限元模拟分析。根据优化目标, 对支座的选型及布置方式进行了多次优化, 最终确定了一种合理的整体隔震方案。

最终方案采用 567 个直径为 1.5 m 的铅芯橡胶隔震支座, 其中包括 173 个一型支座和 394 个二型支座, 一型支座橡胶层总厚度为 276 mm, 二型支座橡胶层总厚度为 238 mm。隔震布置方案平面图见图 1。两种支座具有不同的水平刚度, 通过调整, 该方案可以保证隔震层刚心与上部结构质心的重合, 从而避免隔震层扭转<sup>[9]</sup>。

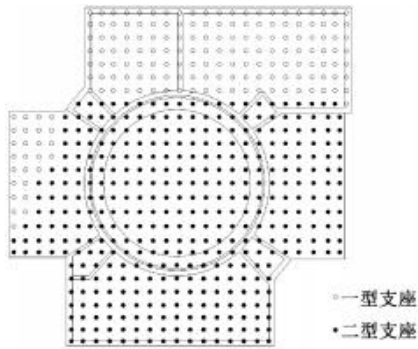


图 1 隔震方案布置平面图

2 “华龙一号”核岛厂房隔震结构模型

上部结构采用等效集中质量杆单元模型, 隔震层采用等效线性模型, 计算模型见图 2。此外, 场地按照硬岩地基考虑, 计算时不考虑土-结构相互作用。

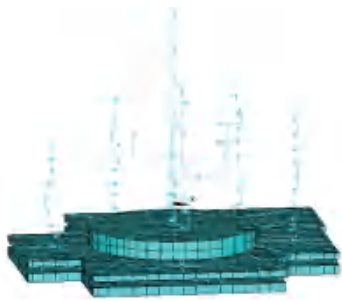


图 2 计算模型

集中质量杆单元模型中上部集中质量和杆结构分别采用质量单元 (MASS21) 和梁单元 (BEAM4) 模拟, 各楼板标高处平面内梁单元采用刚性梁假设; 隔震层顶板和底板采用实体单元 (Solid45) 模拟; 每个隔震支座均由 X、Y、Z 方向三个 Combin14 线性弹簧单元模拟, 三方向单元不相交处约束所有自由度。<sup>[10-11]</sup>

输入地震动时程采用由 RG1.60 标准反应谱拟合得到的单组三条 (两个水平方向和一个竖直方向) 相互正交、统计独立的人工时程, 其满足对目标功率谱的包络要求。输入地震动加速度峰值水平向取为 0.5g, 竖向取为水平向的 2/3, 即 0.33g。

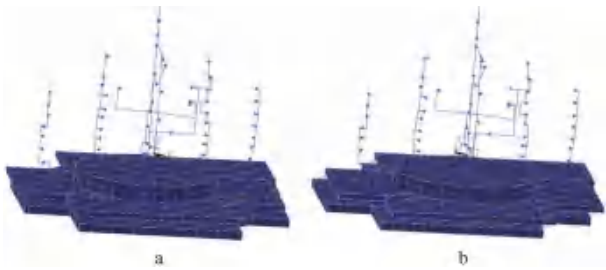
3 隔震方案计算结果

3.1 模态分析结果

“华龙一号”核岛厂房隔震结构和抗震结构模态分析结果见表 1。大底板以上厂房结构共有 8 个, 分别为 A~H 厂房。图 3 为隔震结构第一、二阶振型图。从表 1 中可看出: 增加隔震支座后, 结构前两阶振型的自振周期均明显增大, 放大为抗震结构的 9~17 倍, 达到了延长结构自振周期的目的。此外, 从隔震结构振型图亦可看出, 采用隔震支座后, 由于上部结构刚度大, 隔震层刚度很小, 上部结构振型基本为刚体平动。

表 1 隔震结构和抗震结构的自振频率

| 大底板<br>厂房结构 | 隔震结构自振频率/Hz |           | 抗震结构自振频率/Hz |      |
|-------------|-------------|-----------|-------------|------|
|             | X 向         | Y 向       | X 向         | Y 向  |
| A 厂房        |             |           | 6.50        | 6.75 |
| B 厂房        |             |           | 4.15        | 4.14 |
| C 厂房        |             |           | 3.71        | 3.65 |
| D 厂房        |             |           | 6.30        | 4.05 |
| E 厂房        | 0.397 693   | 0.397 459 | 4.42        | 4.26 |
| F 厂房        |             |           | 4.93        | 6.30 |
| G 厂房        |             |           | 4.23        | 5.57 |
| H 厂房        |             |           | 6.50        | 4.14 |



a—第一阶; b—第二阶。

图 3 隔震结构振型

3.2 加速度响应

选取厂房的三个位置作为响应输出位置: 0 m 标高位置、16.5 m 标高位置和 40 m 标高位置, 具体位置示意图见图 4。

将隔震与抗震结构在输出位置的加速度响应时程进行了对比, 图 5~7 为 16.5 m 标高位置的时程对比。可以看出, 在两个水平方向, 隔震后结构的加速度峰值减小, 振动周期明显拉长; 在竖向, 隔震结构的加速度时程曲线与抗震结构几乎完全重合。

表 2 汇总了隔震与抗震结构在不同位置的峰值加速度。可以看出, 隔震层以上各层的水平响应加

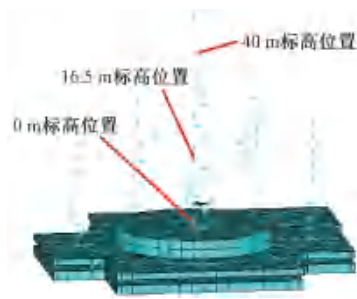


图4 隔震结构加速度响应输出位置示意

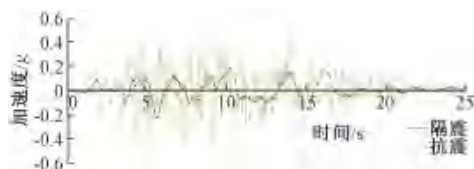


图5 16.5 m 标高位置 X 向响应时程



图6 16.5 m 标高位置 Y 向响应时程



图7 16.5 m 标高位置 Z 向响应时程

速度峰值相差不多,说明隔震体系上部结构为刚体运动;水平向最大减震系数位于底层,约为 0.46,随着标高的增加,减震系数减小趋势越明显,减震效果愈加明显,顶层减震系数则达到了 0.41;隔震结构在竖向的响应情况与抗震结构基本相同,略有放大。

表2 加速度时程峰值汇总

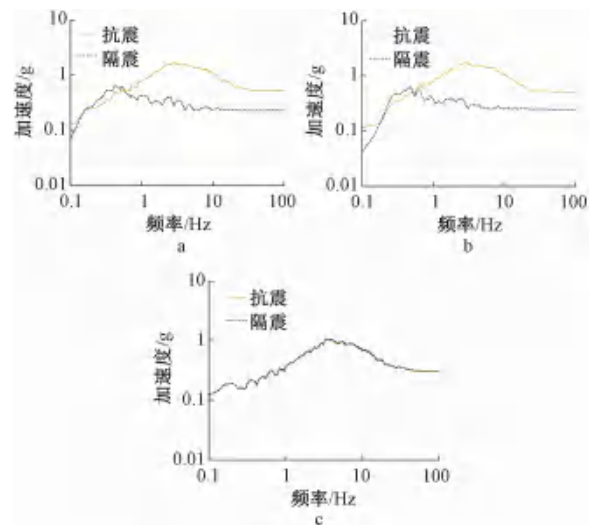
| 位置          | 水平向响应加速度峰值/g |      | 水平向减震系数 | 竖向响应加速度峰值/g |      | 竖向减震系数 |
|-------------|--------------|------|---------|-------------|------|--------|
|             | 隔震           | 抗震   |         | 隔震          | 抗震   |        |
| 0 m 标高位置    | 0.23         | 0.49 | 0.46    | 0.31        | 0.30 | 1.03   |
| 16.5 m 标高位置 | 0.23         | 0.53 | 0.44    | 0.31        | 0.31 | 1.02   |
| 40 m 标高位置   | 0.24         | 0.58 | 0.41    | 0.32        | 0.32 | 1.00   |

注:减震系数=隔震结构加速度峰值/抗震结构加速度峰值。

### 3.3 楼层反应谱

将隔震结构和抗震结构中 0 m 标高位置、16.5 m 标高位置和 40 m 标高位置三个位置的响应时程转为楼层反应谱,阻尼比为 5%,并进行对比分析,图 8 为 16.5 m 标高位置的楼层反应谱对比。可以看出,在水平 X、Y 方向,隔震谱的峰值加速度和零周期加速度明显低于抗震谱;在竖直 Z 向,隔震谱与抗震谱几乎重合。

表 3、4 汇总了隔震与抗震结构在不同位置的楼



a—X 向楼层反应谱(阻尼比 5%); b—Y 向楼层反应谱(阻尼比 5%); c—Z 向楼层反应谱(阻尼比 5%)。

图8 16.5 m 标高位置

层反应谱零周期加速度和峰值加速度。从表 3、4 可以看出,在水平方向,隔震层以上各位置的楼层反应谱零周期加速度和峰值加速度相差不多,隔震谱零周期加速度和峰值加速度远小于抗震谱,隔震效果明显;隔震结构在竖向的楼层反应谱零周期加速度和峰值加速度与抗震结构基本相同,略有放大。

表3 楼层反应谱(阻尼比 5%)零周期加速度汇总

| 位置          | X 向反应谱零周期加速度/g |      | Y 向反应谱零周期加速度/g |      | Z 向反应谱零周期加速度/g |      |
|-------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|             | 隔震             | 抗震   | 隔震             | 抗震   | 隔震             | 抗震   |
| 0 m 标高位置    | 0.23           | 0.49 | 0.24           | 0.49 | 0.31           | 0.30 |
| 16.5 m 标高位置 | 0.23           | 0.53 | 0.25           | 0.51 | 0.31           | 0.31 |
| 40 m 标高位置   | 0.24           | 0.58 | 0.24           | 0.55 | 0.32           | 0.32 |

表4 楼层反应谱(阻尼比 5%)峰值加速度汇总

| 位置          | X 向反应谱零周期加速度/g |      | Y 向反应谱零周期加速度/g |      | Z 向反应谱零周期加速度/g |      |
|-------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|             | 隔震             | 抗震   | 隔震             | 抗震   | 隔震             | 抗震   |
| 0 m 标高位置    | 0.66           | 1.62 | 0.61           | 1.63 | 1.08           | 1.06 |
| 16.5 m 标高位置 | 0.66           | 1.74 | 0.61           | 1.74 | 1.10           | 1.07 |
| 40 m 标高位置   | 0.66           | 2.04 | 0.61           | 2.04 | 1.12           | 1.10 |

图 9 为 0 m 标高位置的水平向隔震反应谱与“华龙一号”标准化设计反应谱的对比情况,阻尼比均为 5%。可以看出,主要频率段水平向反应谱可被“华龙一号”标准化设计谱包络,满足减震优化目标。

### 3.4 隔震支座应力

选取了底板七个阳角位置的隔震支座,输出其在极限安全地震动水平和竖向地震同时作用下的竖向应力峰值。根据规范要求,验算最大压应力时,自重按照 1.4 倍考虑;验算拉应力时,自重按照 1.0 倍考虑<sup>[10-11]</sup>。支座受力面积按照支座达到最大水平位移时支座顶面的投影与底面重合的面积计算。经

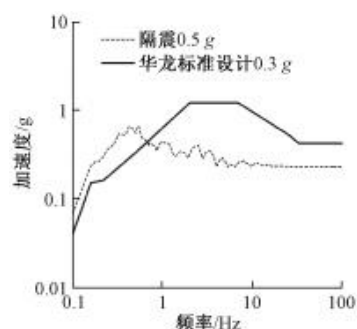


图9 0 m标高位置的水平向隔震反应谱与标准化设计反应谱的对比(阻尼比5%)

比较发现,支座中最大压应力为 16.33 MPa,未超过 20 MPa;最小压应力为 2.14 MPa,未出现拉应力,满足支座应力优化目标。

### 3.5 隔震支座水平位移

通过比较底板阳角位置隔震支座上下节点间的最大水平位移,得出隔震层最大水平位移为 290 mm,小于支座橡胶层总厚度的 1.3 倍,且小于 300 mm,满足水平位移优化目标<sup>[10-11]</sup>。

## 4 结束语

综合考虑了规范中对支座应力、水平位移的要求、标准化设计对减震目标的要求以及技术成熟度、支座更换、总图布置以及隔震层刚心与上部结构质心重合等多方面的要求,经过对“华龙一号”核岛厂房整体隔震方案各方面动力响应的系统分析后认为,本文确定的方案在水平向  $PGA$  为  $0.5g$  的地震

动输入下能够满足优化目标。

## 参考文献

- [1] 杨建华,马英,隋春光,等. “华龙一号”核岛厂房抗震分析[J]. 核科学与工程,2021,41(1):110-116.
- [2] PIERRE L. Pioneering actual use of seismic isolation for nuclear facilities [C]//1st Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations,2010.
- [3] 莊初立,张永山,汪大洋,等. 核电站结构隔震研究进展[J]. 华南地震,2014,34(2):25-33.
- [4] MASSIMO F,ALESSANDRO P,FOSCO B,et. Seismic isolation of the IRIS nuclear plant [C]//Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference,Prague;2009:1-8.
- [5] HUANG Y N, ANDREW S W, Michael C C, et al. Seismic demands on secondary systems in base-isolated nuclear power plants [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2007;1741-1761.
- [6] SANJEEV M, ANDREW W. Survey of past base isolation applications in nuclear power plants and challenges to industry/regulatory acceptance [C]//18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18),Beijing;2005:3404-3410.
- [7] 谢礼立,翟长海. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(1):1-10.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准:GB/T 51408—2021[S]. 北京:中国计划出版社. 2021.
- [9] 国家能源局. 核电厂结构隔震设计技术规程(报批稿).
- [10] 王新敏. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [11] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

(上接第 167 页)

- [2] 戴加东,潘华,汪大龙等. 钢筋混凝土支撑轴力监测数据的优化方法[P]. 上海:CN103575428A,2014-02-12.
- [3] 刘畅,张亚龙,郑刚,等. 季节性温度变化对某深大基坑工程的影响分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):627-635.
- [4] 屈铁军,徐荣桓,石云兴. 配筋率对钢筋混凝土构件弹性模量影响的试验研究[J]. 混凝土,2014(9):113-115.
- [5] 陈萌,毕苏萍,张兴昌. 商品混凝土早龄期受拉弹性模量的试验研究[J]. 建筑科学,2007(11):56-58,45.
- [6] 钟善桐,苗若愚. 钢管混凝土轴心受压构件承载力的研究建筑学报 1984.
- [7] 蔡绍怀,邸小坛. 钢管混凝土偏压柱的性能和强度计算的研究钢管混凝土结构的强度计算[J]. 中国建筑科学院结构所,

1984.

- [8] 李文峰. 对地铁基坑混凝土支撑轴力监测精确性的探讨[J]. 隧道建设,2009,29(4):424-427.
- [9] 郑文允. 深大基坑中混凝土支撑收缩徐变对围护结构内力及位移影响分析[D]. 上海:同济大学,2008.
- [10] 肖振烨,李素贞,崔晓强. 基于应变监测的基坑钢筋混凝土支撑轴力修正方法[J]. 重庆大学学报,2018,41(11):8-18.
- [11] 张光建,姚小波,胡瑾. 地铁换乘车站基坑支撑轴力监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报,2014,36(增刊2):455-459.
- [12] 金亚兵,沈翔,劳丽燕. 温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(8):1417-1425.