

周伯昌, 李小军, 李亚琦, 2020. 高温气冷堆核电站建筑结构采用不同有限元模型的模态分析对比研究. 震灾防御技术, 15(3): 519—525. doi: 10.11899/zfy20200305

# 高温气冷堆核电站建筑结构采用不同有限元模型的模态分析对比研究<sup>1</sup>

周伯昌<sup>1,2)</sup> 李小军<sup>3,4)</sup> 李亚琦<sup>4)</sup>

1) 上海市地震局, 上海 200062

2) 上海佘山地球物理国家野外科学观测研究站, 上海 200062

3) 北京工业大学, 建筑工程学院, 北京 100124

4) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要** 建立有限元模型是核电站建筑结构模态分析的重要前提。本文以某高温气冷堆核电站建筑结构为原型, 在分析方法相同的前提下, 建立 2 种不同模型 (Solid 模型和 Shell 模型), 并对这 2 种模型进行模态分析。重点分析、对比 2 种模型的自振频率和振型图, 计算分析表明: Solid 模型与 Shell 模型相比, 计算得到的结构自振频率值较高, 但两者的差异很小, 前 30 阶自振频率相对误差小于 3.4%; 2 种模型的计算结构振型基本一致。研究结果可为核电站抗震性能分析和设计提供参考。

**关键词:** 高温气冷堆核电站 有限元模型 模态分析 振型 自振频率

## 1 引言

随着能源需求的持续快速增长, 中国核电建设已经由适度发展进入积极推进、由沿海规划到内陆规划的时期 (周伯昌等, 2008), 关于核电站的研究工作也正在大量开展。本研究结合目前工程实际, 以某高温气冷堆核电站建筑结构为原形, 探讨不同的建筑结构有限元计算模型在核电站建筑结构模态分析中的影响。

模态分析用于分析结构的自振特性, 即结构的自振频率和振型, 是承受动态载荷结构设计中的重要参数, 同时也可作为其他动力学分析问题的起点, 例如瞬态动力学分析、谐响应分析和谱分析, 模态分析也是进行谱分析、模态叠加法谱响应分析、瞬态动力学分析所必需的前期分析过程。

有限元模型是进行有限元分析的数学模型, 它为计算提供所有原始数据。模型的形式选取直接影响计算精度、计算时间、所需内外存大小及计算过程能否完成。本研究在考虑上述影响因子的基础上, 建立 2 种不同的结构模型, 即 Solid 模型和 Shell 模型, 进行模态分析, 并做对比研究, 探讨高温气冷堆核电站建筑结构的振动特性。

**1 基金项目** 上海市财政项目 (20130302); 国家自然科学基金 (51738001)

**[收稿日期]** 2020-04-24

**[作者简介]** 周伯昌, 女, 生于 1982 年。硕士研究生, 高级工程师。主要从事地震工程研究。E-mail: zhoubochang1022@126.com

## 2 高温气冷堆核电厂建筑结构有限元建模及模态分析

### 2.1 有限元计算模型

模态分析由 4 个主要步骤组成：(1) 建模；(2) 加载及求解；(3) 扩展模态；(4) 结果与处理。在这 4 个步骤中，最重要的是建模，建模完成后有限元分析软件将自动生成总体质量矩阵  $M$  和总体刚度矩阵  $K$ 。建模主要包括：(1) 选择单元类型；(2) 定义单元特性（材料特性和截面特性）；(3) 根据结构划分单元（傅志方等，2000）。

本文选取的高温气冷堆核电厂建筑结构原型座落在基岩上，采用刚性基底边界条件，即标高 $-0.1\text{m}$ 以下外墙全部固接。核电厂结构平面布局如图 1 所示，主要由厂房和安全壳组成，分地下和地上 2 部分，地下共 5 层，从下到上层高分别为  $9.00\text{m}$ 、 $7.50\text{m}$ 、 $2.30\text{m}$ 、 $2.55\text{m}$ 、 $5.95\text{m}$ ，地上共 6 层（包括牛腿顶），从下到上层高分别为  $5.00\text{m}$ 、 $5.40\text{m}$ 、 $5.70\text{m}$ 、 $7.30\text{m}$ 、 $12.40\text{m}$ 、 $9.40\text{m}$ （周伯昌，2007）。

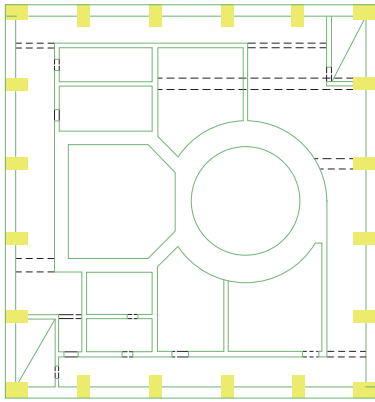


图 1 高温气冷堆核电厂结构平面示意图

Fig. 1 Structural plan of the high temperature gas-cooled reactor nuclear power plant

核电厂抗震 I 类构筑物的安全功能要求混凝土结构在使用过程中不得进入非线性，因此本文假定核电厂建筑结构为线弹性结构。本文采用相同的有限元分析软件和分析方法，在保证计算结果精度和控制模型规模的前提下，对上述核电厂建筑结构采用 2 种不同的计算模型进行模拟。

第 1 种模型采用可以承受单向拉伸、压缩、扭转和弯曲的单轴受力三维梁单元模拟柱，该单元在每个节点上有 6 个自由度（ $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的线位移和绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的角位移），材料密度为  $1.0\text{kg/m}^3$ ，弹性模量为  $3.0 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.2；采用可以灵活定义不同质量或转动惯量的质量点单元模拟搁置在安全壳中的 2 个压力舱室，点单元具有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的位移及旋转，共有 6 个自由度，不同质量或转动惯量可分别定义于每个坐标系方向；采用同时具有弯曲能力和膜力，可以承受平面内荷载和法向荷载的弹性壳单元模拟楼板、墙、钢网格板，该单元每个节点具有 6 个自由度（沿节点坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的平动和沿节点坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的转动），材料密度为  $2.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，弹性模量为  $3.15 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.2；采用可以进行塑性、蠕变、应力硬化、大变形及大应变分析的三维固体单元模拟安全壳，该单元由 8 个节点结合而成，每个节点有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的自由度。安全壳为 C40 混凝土（其它构件均为 C35 混凝土），材料密度为  $2.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，弹性模量为  $3.25 \times 10^{10}\text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.2。由这 4 种单元组成的模型称为实体结构模型，简称 Solid 模型，模型分网及剖面图如图 2 所示，共 29394 个节点，34622 个单元（王勘成等，1997；周伯昌，2007；贺秋梅等，2014，2015）。

另 1 种模型的描述如下：柱和搁置在安全壳中的 2 个压力舱室的模拟同 Solid 模型；楼板、墙、钢网格板采用具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变特性，且适合模拟线性、弯曲及适当厚度的壳体结构进行模拟，该单元为 4 节点塑性大应变单元，每个节点具有 6 个自由度（沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的平动以及绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的转动），材料密度为  $2.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，弹性

模量为  $3.15 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.2；采用具有塑性、应力刚化、大变形以及大应变能力，且适合于曲壳模型的结构壳单元模拟安全壳，该单元有 8 个节点，每个节点具有 6 个自由度（沿节点坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的平动和沿节点坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的转动）。安全壳为 C40 混凝土（其它构件均为 C35 混凝土），材料密度为  $2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，弹性模量为  $3.25 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，泊松比为 0.2。由这 4 种单元组成的结构模型称为壳单元结构模型，简称 Shell 模型，模型分网及剖面图如图 3 所示，共 7780 个节点，7940 个单元（王勘成等，1997；周伯昌，2007；贺秋梅等，2014，2015）。

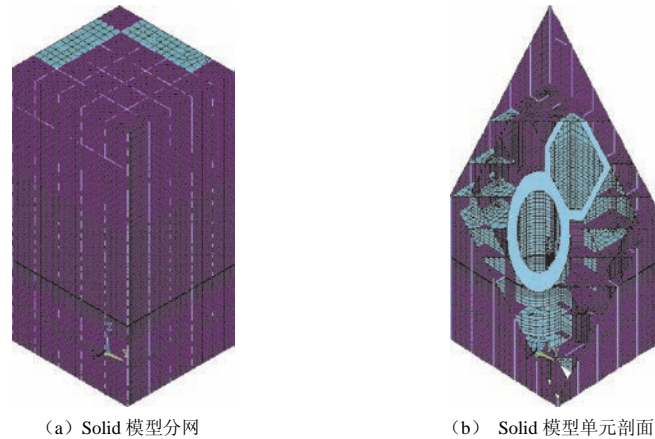


图 2 Solid 模型分网及剖面图

Fig. 2 Meshing and sketch section of the Solid model

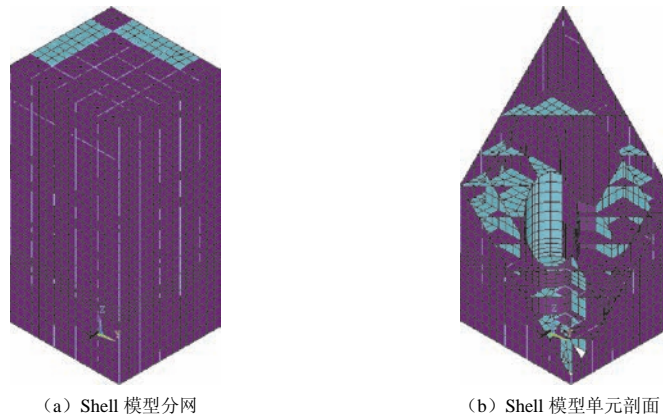


图 3 Shell 模型分网及剖面图

Fig. 3 Meshing and sketch section of the Shell model

## 2.2 模态分析方法

本文采用无阻尼模态分析方法。典型的无阻尼模态分析求解方程如下：

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\phi_i\} \quad (1)$$

式中， $[K]$ 为刚度矩阵， $\{\phi_i\}$ 为第  $i$  阶模态的振型向量（特征向量）， $\omega_i$ 为第  $i$  阶模态的自振频率（ $\omega_i^2$ 是特征值）， $[M]$ 为质量矩阵。

可通过多种数值方法求解式 (1), 得到结构的自振频率及对应振型。本文采用子空间迭代技术和广义的 Jacobi 迭代算法进行求解 (傅志方等, 2000)。

### 3 模态分析结果比较、分析

#### 3.1 2 种模型自振频率对比

在 2 种模型的模态分析中均计算、提取并扩展了 100 阶模态。本文对 2 种模型的分析、计算仅取前 30 阶结构自振频率。2 种模型的频率对比因子采用相对误差  $R$  表示。

$$R = (f_{\text{Solid}} - f_{\text{Shell}}) / f_{\text{Shell}} \quad (2)$$

式中,  $f_{\text{Solid}}$  为 Solid 模型频率,  $f_{\text{Shell}}$  为 Shell 模型频率。

2 种模型的自振频率见表 1。

表 1 2 种模型的自振频率对比

Table 1 Comparison of natural frequencies of the two models

阶数	频率/Hz			阶数	频率/Hz		
	Solid	Shell	$R$		Solid	Shell	$R$
1	3.9598	3.8975	1.60%	16	11.354	11.085	2.43%
2	5.0568	4.9366	2.43%	17	11.722	11.579	1.23%
3	5.2341	5.1234	2.16%	18	12.001	11.606	3.40%
4	6.7163	6.6561	0.90%	19	12.518	12.347	1.38%
5	7.3261	7.2158	1.53%	20	12.800	12.673	1.00%
6	7.3548	7.3548	1.27%	21	14.606	14.385	1.54%
7	7.6120	7.4814	1.75%	22	15.490	15.366	0.81%
8	7.7172	7.5667	1.99%	23	15.738	15.672	0.42%
9	8.3577	8.2456	1.36%	24	16.601	16.401	1.22%
10	8.6534	8.5334	1.41%	25	17.306	17.061	1.44%
11	8.7922	8.6758	1.34%	26	17.421	17.320	0.58%
12	9.8357	9.5777	2.69%	27	17.486	17.400	0.49%
13	10.224	10.093	1.30%	28	17.872	17.827	0.25%
14	10.849	10.682	1.56%	29	18.691	18.410	1.53%
15	11.242	10.991	2.28%	30	18.855	18.792	0.34%

由表 1 可知, Solid 模型的自振频率总是高于 Shell 模型的自振频率; 2 种模型的自振频率相对误差  $R$  最小值为 0.25%, 最大值为 3.40%; 相对误差  $R$  的分布与高低阶自振频率之间没有特定规律; 分布在 0.00%—0.99% 之间的相对误差  $R$  有 7 个, 分布在 1.00%—1.99% 之间的相对误差  $R$  有 17 个, 约占相对误差总个数的 57%, 分布在 2.00%—2.99% 之间的相对误差  $R$  有 5 个, 分布在 3.00%—3.99% 之间的相对误差  $R$  仅有 1 个。

#### 3.2 2 种模型振型图对比

在 2 种结构模型模态分析中均计算了前 100 阶振型。图 4 为 Solid 模型在  $x$ 、 $y$  方向上的 1、2、3 阶振型图, 图 5 为 Shell 模型在  $x$ 、 $y$  方向上的 1、2、3 阶振型图, 图 6 为 Solid 模型和 Shell 模型的扭转振型图。

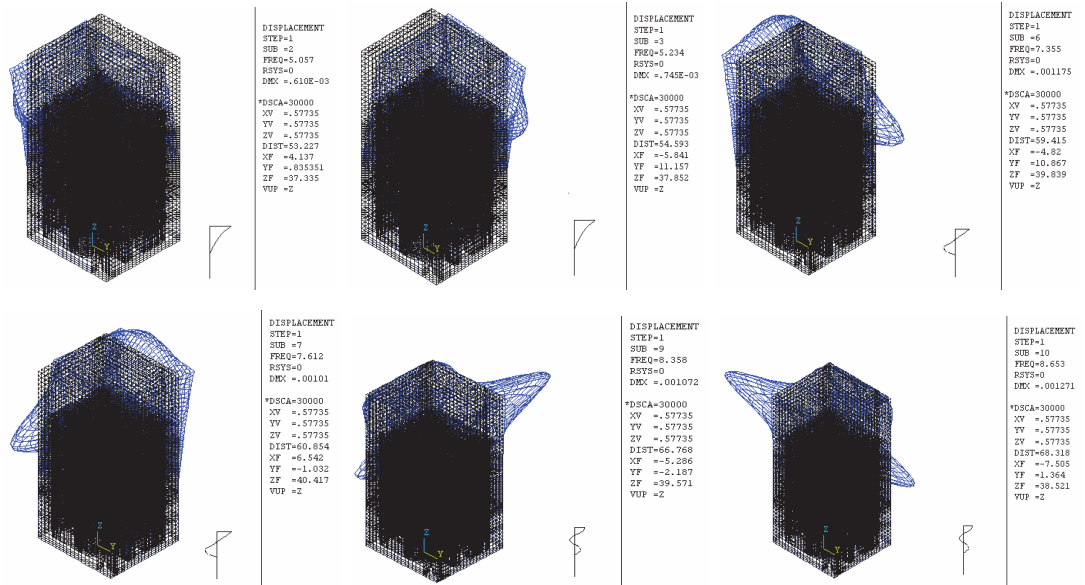


图4 Solid模型在x、y方向上的1、2、3阶振型图

Fig. 4 First, second and third order mode shapes of the Solid model in x and y directions

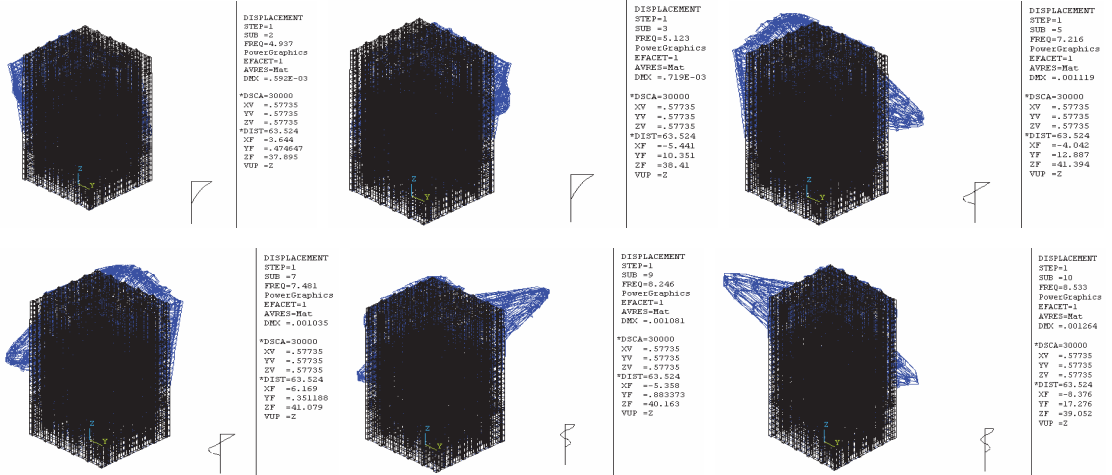


图5 Shell模型在x、y方向上的1、2、3阶振型图

Fig. 5 First, second and third order mode shapes of the Shell model in x and y directions

由图4、图5、图6可知，Solid模型和Shell模型的1、2、3阶振型及扭转振型都在前10阶振型中：2种模型竖向振型都在第1阶自振频率处，对应的自振频率分别为3.9598Hz、3.8975Hz；2种模型x轴方向的1阶振型都在第2阶自振频率处，对应的自振频率分别为5.057Hz、4.937Hz；2种模型y轴方向的1阶振型都在第3阶自振频率处，对应的自振频率分别为5.234Hz、5.123Hz；2种模型x轴方向的2阶振型都在第7阶自振频率处，对应的自振频率分别为7.612Hz、7.481Hz；2种模型y轴方向的2阶振型分别第6阶和第5阶自振频率处，对应的自振频率分别为7.355Hz、7.216Hz；2种模型x轴方向的3阶振型都在第9

阶自振频率处, 对应的自振频率分别为 8.358Hz、8.246Hz; 2 种模型 y 轴方向的 3 阶振型都在第 10 阶自振频率处, 对应的自振频率分别为 8.653Hz、8.533Hz; 2 种模型的扭转振型都在第 8 阶自振频率处, 对应的自振频率分别为 7.717Hz、7.567Hz。从振型可以看出, 2 种模型的振型基本一致。

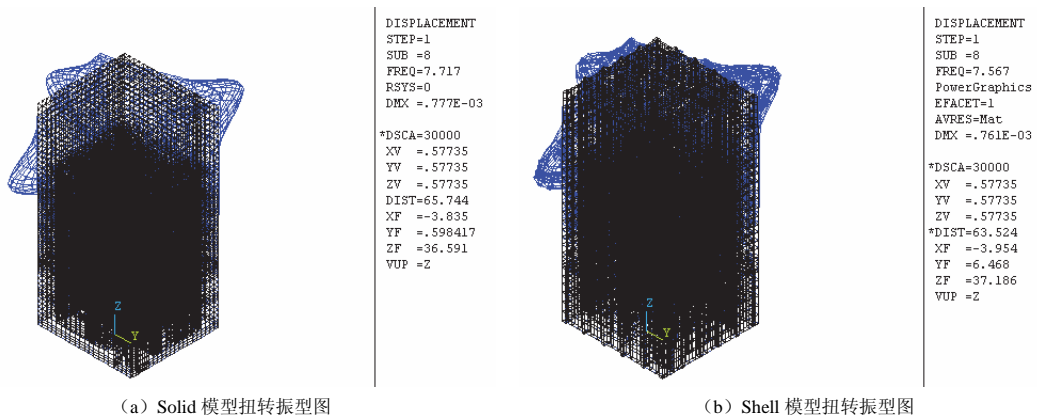


图 6 Solid 模型和 Shell 模型扭转振型图

Fig. 6 Torsional mode shapes of the Solid model and Shell model

## 4 结论

从 Solid 模型和 Shell 模型模态分析计算得到的自振频率和振型的计算, 对比可以看出 Solid 模型的自振频率总是比 Shell 模型的自振频率高, 但 2 种模型的自振频率相对误差较小; 2 种模型的振型结果基本相似。这说明在进行结构动力分析时 2 种模型都是基本正确可取的, 均可作为进一步力学分析的模型。上述计算数据、分析结论亦可为高温气冷堆核电站建筑结构实际工程设计和相关动力分析及破坏机理研究提供参考。

## 参考文献

- 傅志方, 华宏星, 2000. 模态分析理论与应用. 上海: 上海交通大学出版社.
- 贺秋梅, 李小军, 张江伟等, 2014. 某高温气冷堆核电站结构地震反应分析. 震灾防御技术, **9** (1): 454—461.
- 贺秋梅, 李小军, 李亚琦等, 2015. 地震动速度脉冲对高温气冷堆核电站地震反应的影响. 爆炸与冲击, **35** (6): 799—806.
- 王勰成, 邵敏, 1997. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社.
- 周伯昌, 2007. 不同地震环境下核电站建筑结构地震反应特性分析. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 周伯昌, 李小军, 李亚琦, 2008. 我国核电厂厂址特定地震动特征分析. 中国地震, **24** (1): 55—60.

# Comparative Study on Mode Analysis of Different Finite Element Mode of the High Temperature Gas-cooled Reactor Nuclear Power Plant Structure

Zhou Bochang<sup>1,2)</sup>, Li Xiaojun<sup>3,4)</sup> and Li Yaqi<sup>4)</sup>

1) Shanghai Earthquake Administration, Shanghai 200062, China

2) Shanghai Sheshan National Geophysical Observatory, Shanghai 200062, China

3) College of Architectural and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

4) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** The establishment of finite element model is the key premise and important step of nuclear power plant building structure modal analysis. In this paper, a high temperature gas cooled reactor nuclear power plant building structure is regarded as a prototype. Building two different models, solid model and shell model, under the same analysis method, modal analysis of these two models is carried out. The natural frequency and mode shapes of the two models are analyzed and compared. The calculation and analysis show that: compared with shell model, the calculated natural frequencies of solid model are higher, but the difference between them is very small, and the relative error of the first 30 natural frequencies is less than 3.4%; the calculated structural vibration modes of the two models are basically the same. Research results can provide reference for seismic performance analysis and design of nuclear power plant.

**Key words:** High temperature gas-cooled reactor nuclear power plant; Finite element model; Mode analysis; Mode; Natural frequency