

# 核电站主泵机组地震响应谱分析及 应力评定

周文霞, 张继革, 王德忠

(上海交通大学 核科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:**用三维实体建模软件 Inventor 建立某核电站主泵的三维实体模型。对模型进行简化,灵活运用 ANSYS 的单元属性和接触功能,建立有限元动力学模型。通过模态分析,得出前 13 阶固有频率。在此基础上,用 SRSS 振型组合法分析多地震谱、多角度下核主泵的地震谱响应,得到了相应的应力和位移响应。对主泵进行静力学分析,将地震动应力与静应力相叠加,分析不同工况下主泵机组的应力值。按 ASME 规范进行校核,结果表明:应力值满足标准要求。

**关键词:**核主泵;地震响应;有限元;结构分析

中图分类号:TL353

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2011)01-0054-06

## Analysis and Assessment on Seismic Response of Reactor Coolant Pump in Nuclear Power Plant

ZHOU Wen-xia, ZHANG Ji-ge, WANG De-zhong

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Three dimensional solid model of reactor coolant pump was established. After the structure of the pump was reasonably simplified, the modal analysis was used to get the natural frequencies and mode shapes. On this basis, the spectrum analysis was used to get the stress and displacement response under three different direction spectra with multi-angles. In addition, static analysis of pump was used to get stress and displacement under different conditions. Finally, the seismic response results and static results were added up under different conditions to compare with ASME standards. The comparing result shows that the values meet ASME standards.

**Key words:** nuclear pump; seismic response; finite element; structural analysis

核主泵是反应堆冷却剂系统的主要设备和压力边界的设备之一,也是压水堆核电厂核蒸汽供应系统中要求长期、连续运行的一回路系统中唯一的旋转设备。该设备用来输送规定流

量的反应堆冷却剂,使反应堆冷却剂在反应堆、核主泵、蒸汽发生器和反应堆冷却器管道所组成的封闭系统中循环,以便将反应堆产生的热量传递给二回路介质。核主泵与普通泵的最大

区别在于强调压力边界的完整性和在特殊工况下的可运行性,对泵的可靠性和安全性提出了更高的要求。它要求长期处于高温、高压、强辐射的环境下安全可靠地工作,按 ASME 的安全等级分类标准<sup>[1]</sup>,主泵属于核安全 I 级,质保 Q1 级,抗震 I 类。为验证核主泵的安全性,根据有关法规的要求,须对核主泵进行抗震分析。

目前,抗震分析的方法主要有 3 种:等效静力法、响应谱法和时间历程法<sup>[2]</sup>。其中,时间历程法的计算结果最为准确,但该方法较复杂,计算时间长,而等效静力法与响应谱法相对简单,但采用等效静力法需满足结构的第 1 阶自振频率达到 33 Hz,且较为保守地反映结构受力情况,相比之下,响应谱法不需满足此条件,且能更为准确地反映结构的响应特性,因此,本文选用此法进行分析。

主泵的结构复杂,一般采用质点系模型<sup>[3-4]</sup>,将各部件简化成等截面的梁单元或杆单元。本文采用三维实体模型,将各部件真实化,所得到的结果接近实际,计算结果更加真实可靠<sup>[5]</sup>。在三维实体模型中,建立非刚性连接部件的连接关系(如油膜、销连接等)很困难,本文运用 ANSYS 的单元属性及相关功能,建立起这些关系,以使分析结果更加真实可靠。

## 1 模型的建立

### 1.1 三维实体模型的建立

核主泵从总体上可分为轴封泵和屏蔽泵。本文研究对象为轴封式主泵,电机轴与泵轴采用套筒式鼓形齿联接,上下导轴承和双向推力轴承为泵轴和电机轴提供径向和轴向支撑。所需校核的内容及 ASME 准则级别列于表 1。

表 1 不同工况下载荷组合及准则级别

Table 1 Load combination and rule level under different conditions

工况	载荷组合	准则级别
异常工况	OBE(运行基准地震)+运行压力+接管载荷+自重	B
设计工况	OBE+设计内压+接管载荷+自重	设计工况准则
极限事故工况	SSE(安全停堆地震)+运行压力+接管载荷+自重	D

采用三维实体建模软件 Inventor 建立主泵/电机机组(下称泵机组)的实体模型。泵模型包括承压边界(泵壳、泵盖、主螺栓、主螺母)、

泵轴转子、热屏部件、密封组件、联轴器和电机支座等。电机模型包括机架、机座、电机轴和定子铁心等。300 °C 下主要部件的材料特性列于表 2。

表 2 主泵主要部件材料特性

Table 2 Material character of main pump

部件	材料名称	$10^{-5}$ 弹性模量 E/MPa	屈服极限/MPa	强度极限/MPa
泵壳	Sa-508M 3 级	1.75	392	552
下泵轴	X5CrNi134	1.73	540	635
上泵轴	42CrMo4	2.06	422	612
电机轴	25NCD8-05	2.06	500	700
电机机架	Q235	2.06	235	375
电机支座	Q235	2.06	235	375

### 1.2 模型的建立及边界条件的设置

对泵机组模型进行简化。主泵与电机支座、电机框架采用刚性连接,去除对结果影响不大的倒圆角。模型采用 solid45 单元划分网格,节点数为 88 965,网格数为 354 571。

泵和转子为实体单元,油膜刚度通过在转

子与泵的节点之间建立 combin14 的弹簧单元来模拟。上下导轴承的油膜刚度分别为  $47 \times 10^6$  和  $93 \times 10^6$  N/m,轴承所在的转子和泵圆周方向均匀分布 4 个弹簧单元,每个 combin14 单元的刚度为油膜刚度的 1/4。推力轴承的油膜刚度为  $1.4 \times 10^9$  N/m,轴承所在的转子中心与

泵分布 1 个弹簧单元, 弹簧单元的刚度为油膜刚度。在电机支架上部有 3 个水平分布的减震器, 采用 combin14 模拟减震器, 单根减震器的刚度为  $4.35 \times 10^8$  N/m。主泵的泵壳部位有 3 根纵向立柱和 3 根横向拉杆起支撑作用, 3 根立柱和泵壳之间的链接为销连接, 在销连接处建立局部坐标系, 销的外表面与孔的内表面建立接触对, 实现销连接, 电机轴与泵轴之间为滑移连接, 保证电机轴与主泵轴之间只传递扭矩和水平力, 不传递轴向力, 采用 MPC184 单元模拟这种约束形式。模型中的辅助平台、冷却器和辅助泵等设备以附加质量单元 mass21 的形式施加。主泵的有限元模型示于图 1。对泵壳部位的 3 根纵向立柱、横向拉杆及减震器与基础连接的部位设置全位移约束。

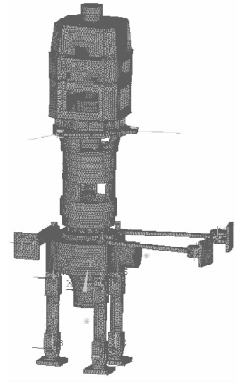


图 1 主泵机组有限元模型

Fig. 1 Element model of main pump

## 2 模态分析

采用 Block Lanczos 求解法提取前 13 阶模态<sup>[6]</sup>。模态结果及振型说明列于表 3。

表 3 前 13 阶模态及振型

Table 3 Natural frequency before 13th order

阶数	模态结果/Hz	振型
1	11.2	电机沿垂直流道方向摆动
2	11.6	电机沿平行于流道方向摆动
3	12.4	电机轴与泵轴沿纵向扭动
4	13.8	电机轴上下窜动
5	15.6	泵与电机整体沿 $z$ 方向摆动, 且沿 $y$ 方向扭转
6	23.4	泵与电机轴沿 $x$ 方向摆动, 最大位移发生在飞轮处
7	23.5	泵与电机轴沿 $z$ 方向摆动, 最大位移发生在飞轮处
8	31.4	泵与电机轴沿 $x$ 方向摆动, 且沿 $y$ 方向轻微扭转
9	33.9	泵与电机轴沿 $z$ 方向二次摆动, 最大位移发生在电机轴顶端
10	36.1	泵与电机轴沿 $x$ 方向二次摆动, 最大位移发生在电机轴顶端
11	37.3	泵与电机轴沿 $x$ 轴正向和 $z$ 轴正向 $45^\circ$ 方向二次摆动, 最大位移发生在电机轴顶端
12	37.9	泵与电机轴沿 $x$ 轴负向和 $z$ 轴正向 $45^\circ$ 方向二次摆动, 最大位移发生在电机轴顶端
13	49.5	泵与电机轴沿 $z$ 方向三次摆动, 最大位移发生在电机轴顶端

## 3 地震响应动态分析

### 3.1 SRSS 振型组合

SRSS 简称“平方和开平方”。该方法建立在随机独立事件的概率统计方法之上, 即要求参与数据处理的各事件之间完全相互独立, 不存在耦合关联关系。当结构的自振形态或自振频率相差较大时, 可近似认为每个振型的振动相互独立。本文采用该种振型组合方法。

### 3.2 地震谱输入

核主泵安装在反应堆厂房内部楼面。将所在楼层的 SSE 反应谱离散化, 得到 3 个正交方

向的加速度谱。保守计算, OBE 取 SSE 的 75%。采用单方向地震谱多角度输入进行地震响应分析, 总响应按三方向响应的平方和开方计算。

为考察地震谱在不同角度输入下的地震响应并找出最严重的情况作为应力评定, 在水平方向按每间隔  $45^\circ$  方向输入 1 组水平  $x$  或  $y$  方向地震谱, 总响应按 SRSS 计算。垂直方向加速度有上下两方向, 考虑自重为竖直向下, 故只计算较严重的垂直向下加速度输入时的情况, 从而得到最严重的地震响应值。加速度值列于表 4。

表 4 OBE 和 SSE 楼面加速度反应谱值

Table 4 Floor response spectrum value of OBE and SSE

频率/Hz	OBE			SSE		
	$a_x/(m \cdot s^{-2})$	$a_z/(m \cdot s^{-2})$	$a_y/(m \cdot s^{-2})$	$a_x/(m \cdot s^{-2})$	$a_z/(m \cdot s^{-2})$	$a_y/(m \cdot s^{-2})$
0.5	4.04	3.31	1.91	5.39	4.41	2.55
1	5.70	5.51	3.09	7.60	7.35	4.12
1.7	7.35	6.62	3.53	9.80	8.82	4.70
3	10.29	6.98	4.70	13.72	9.31	6.27
3.5	6.98	5.70	4.26	9.31	7.60	5.68
4	5.88	5.15	3.53	7.84	6.86	4.70
5	3.82	5.59	3.53	5.10	7.45	4.70
7	3.31	3.31	1.91	4.41	4.41	2.55
10	2.94	2.79	11.03	3.92	3.72	14.70
15	1.91	2.35	1.84	2.55	3.14	2.45
50	1.47	1.47	1.03	1.96	1.96	1.37

3.3 谱分析结果

电机、电机支座和转子组件是泵机组的关键部件,如果这些部件在地震中有损坏,核主泵将可能发生危险,甚至会发生更为严重的核泄漏等重大事故,因此,本文对这些部件在地震中的应力响应进行分析。图 2 为单方向 SSE 反应谱、不同输入角度下相应的位移和地震响应值。从图 2 可看出,不同角度对应的响应值不同。这是因为,不同的角度下激起的振型频率不同,即使不同角度下激起的振型频率相同,由于泵的结构并非对称结构,位移和应力响应也

会不同。从图 2a、c 可看出,无论以什么角度输入,应力的最大值总发生在电机部分,最大应力小于 100 MPa。在图 2a 中,电机最大应力发生在 45°时,在图 2c 中,最大应力发生在 90°时。从图 2b、d 可看出,当输入地震谱的角度为 90°时,转子的位移响应达到了峰值,图 2b 中位移峰值为 1.6 mm,图 2d 中位移峰值为 1.2 mm,最大位移均发生在电机轴的推力头,小于实际的运行间隙 4.7 mm,叶轮的的水平方向最大位移响应为 0.399 mm,小于叶轮与叶轮罩的运行间隙 1 mm。

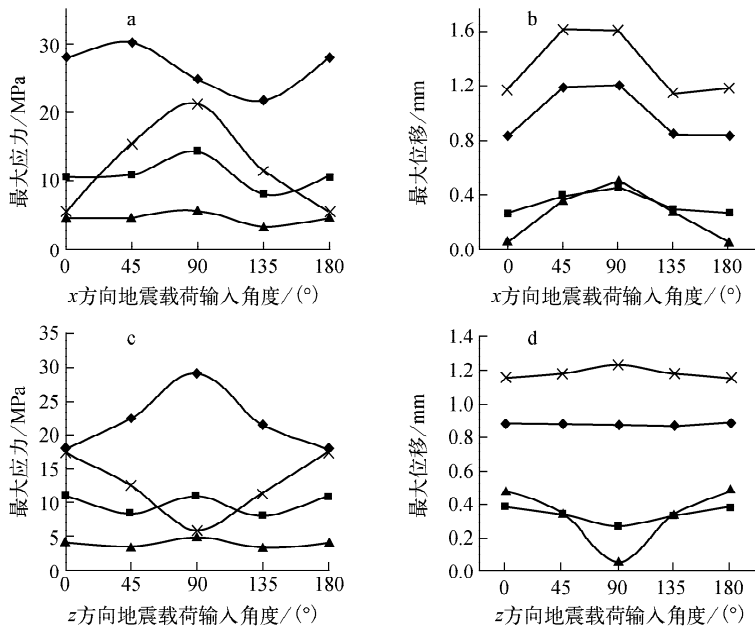


图 2 不同角度下的应力和位移响应

Fig. 2 Seismic displacement and stress responses under different angles

◆—电机; ■—电机支座; ▲—泵壳; ×—转子组件

## 4 静力学分析

根据表 1 所列的 3 种工况组合,对每种工况中静载荷组合下的主泵机组的应力值进行分析。其中,运行内压和设计内压施加在泵壳内部。由于泵壳的进出口是敞开的,且为非对称,从而造成了内部压力的不平衡。这个不平衡的力作用到主泵的支柱和拉杆上,这与实际情况不符。实际泵壳的进出口均有管道相连,不平衡被抵消。因此,在静力分析时,将泵壳的进出

口用虚构的实体堵上,保证泵壳的内部压力是平衡的。图 3 示出事故工况下总装应力分布。主泵应力分布最大的区域出现在泵壳内部,这是由泵壳内部存在很大的压力造成的。泵壳内部最大应力出现在泵内出口的拐角处,其值为 210 MPa,该应力主要由薄膜应力和弯曲应力组成。沿泵壳拐角处的法向方向选取路径,将应力线性化后得到的最大薄膜应力和弯曲应力分别为 91.6 和 80.48 MPa。

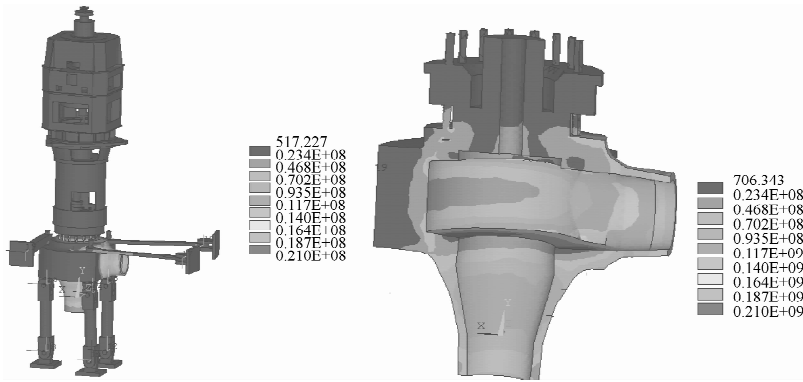


图 3 主泵应力分布图

Fig. 3 Stress distributions graph of main pump

## 5 应力评定

将第 3 部分计算的动应力和第 4 部分计算的静应力相叠加得到总的应力。按照 ASME

NB3200 规范的规定,对不同工况下的应力进行评定。不同准则级别对应的承压部件评定结果列于表 5。

表 5 承压部件的应力评定

Table 5 Stress results and evaluation of pressure parts

工况	评定内容	最大应力/MPa	许用应力/MPa
异常工况	$P_m < S_m$	80	184
	$P_L < 1.5S_m$	75	276
	$P_m + P_b < 1.5S_m$	122	276
设计工况	$P_m < 1.1S_m$	102	202.4
	$P_L + P_b + P_e + Q < 3S_m$	112.48	552
极限事故工况	$P_m < 0.7S_u$	91.6	386.4
	$P_m + P_b < 1.05S_u$	172	579.6
	$P_L < 1.05S_u$	65	579.6

注: $P_m$  为一次薄膜应力强度(横截面内的平均值); $P_b$  为一次弯曲应力强度(垂直于横截面的应力); $P_L$  为局部一次薄膜应力; $P_e$  为膨胀应力; $Q$  为二次应力; $S_m$  为基本许用应力值; $S_u$  为工作温服下由工程应力-应变曲线得到的极限应力

表 6 列出异常工况和极限事故工况下电机支座、机架及转子的应力评定结果和基本许用

应力。根据上述分析结果可知,在该部件的应力主要是受地震载荷的影响,在 SSE 地震载荷

下,电机支座的最大应力为 62.4 MPa,电机机架的最大应力为 34 MPa,转子组件的最大应力为 194 MPa,发生在泵轴与电机轴的连接处。应力值均小于表 6 所列的许用应力。

表 6 电机支座、机架和转子的应力评定

Table 6 Stress results and evaluation of motor and rotor

工况	部件名称	评定内容	许用应力/MPa
异常工况	电机支座	$P_m < 0.65S_y$	152.75
		$P_m + P_b < 1.0S_y$	235
	电机机架		152.75
			235
	转子		325
			500
极限事故工况	电机支座	$P_m < 1.20S_y$	152.75
		$P_m + P_b < 1.8S_y$	235
	电机机架		282
			423
	转子		600
			900

注:  $S_y$  为工作温度下的屈服应力

## 6 结论

根据主泵的二维图纸以及准确的工程信息,建立了比质点系模型更为接近实际的主泵三维有限元动力学模型,分析得到了核主泵机组的各阶模态及振型。在地震响应分析中,分析地震谱按不同输入角度时泵壳、转子等关键部件的位移和应力响应,其中,在输入角度为  $90^\circ$  方向上时转子部件的最大位移为 1.6 mm,发生在电机轴的推力头部位,叶轮处的最大位移响应为 0.399 mm,位移响应均小于运行间隙,因此,不会影响电机的正常运行。

将地震响应分析的动载荷与静力分析得到的静应力相叠加,应力按照 ASME 核一级部件

的标准进行评定。评定结果表明,计算最大应力均小于许用应力。该核主泵的材料和结构设计满足标准要求。

## 参考文献:

- [1] 美国机械工程师学会. ASME 锅炉及压力容器规范国际性规范, NB 分卷[S]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [2] 李增光, 王炯, 吴天行. 核电站环形吊车抗震计算分析[J]. 核动力工程, 2008, 29(1): 46-49. LI Zengguang, WANG Jiong, WU Tianxing. Analysis of seismic response of a polar crane in nuclear power[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(1): 46-49(in Chinese).
- [3] 马辉, 周文建, 闻邦椿. 核电站反应堆冷却剂泵的模式分析[J]. 机械制造, 2006, 44(6): 14-17. MA Hui, ZHOU Wenjian, WEN Bangchun. Mode analysis of reactor coolant pump in nuclear power plant [J]. Machinery, 2006, 44(6): 14-17(in Chinese).
- [4] 周文建, 陈宏, 闻邦椿. 核反应堆冷却剂泵的地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1): 32-35. ZHOU Wenjian, CHEN Hong, WEN Bangchun. Seismic response analysis of reactor coolant pump in nuclear power plant[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1): 32-35(in Chinese).
- [5] 盛选禹, 雒晓卫, 傅激扬. 反应堆主泵抗震强度的三维实体模型计算[J]. 核动力工程, 2005, 26(5): 471-474. SHENG Xuanyu, LUO Xiaowei, FU Jiyang. Seismic strength analysis of main nuclear reactor pump based on real three dimension model[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(5): 471-474(in Chinese).
- [6] 周长城, 胡仁喜, 熊文波. Ansys11.0 基础与典型范例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.