

山东潍坊发电厂 670MW 汽轮发电机组基础模型的模态试验研究

刘 菊 张欲晓 张 波 张兰春

山东电力工程咨询院 山东 济南 250013

摘 要：采用模型 1/10 模态试验分析方法，对山东潍坊发电厂二期工程 670MW 超临界汽轮发电机组基础进行振动特性试验研究。采用多点随机激振、空间测量的方法对汽轮发电机基础模型进行了振动测试及分析，获得模型动力特性参数。对汽轮发电机基础的动力特性进行了预测和评估。

关键词：汽轮发电机基础；随机激励；模态分析；频率响应函数

中图分类号：TK 268.1 **文献标志码：**A

山东潍坊发电厂二期工程 670MW 超临界汽轮发电机组是我国首台 670MW 超临界机组。该机组汽轮机由上海汽轮机有限公司制造，发电机由上海汽轮发电机有限公司制造。汽轮发电机基础的动力特性对机组能否正常运行起着十分重要的作用。为了确保机组正常运行，对基础设计方案进行了动力计算分析，同时对汽轮发电机组基础 1/10 模型进行模态试验，得到模型动力特性参数。利用模型与原型的相似关系，换算原型基础的动力特性。模型测试分析结果能预先对基础动力特性设计的合理性进行初步评估，有助于设计最佳方案的确定，以保证超临界汽轮发电机基础的设计质量。

1 汽轮发电机基础试验模型设计

汽轮发电机基础为框架结构，属于低频基础，主要由底板、柱子、中间隔墙、顶板和中间平台组成。基础原型采用混凝土强度等级为 C30，混凝土材料的质量密度 $2500\text{kg}/\text{m}^3$ ，弹性模量 3.0MPa 。在结构试验室制作一个汽轮发电机基础 1/10 模型（见图 1）。模型采用钢筋混凝土，按构造配筋。通过试验测得模型混凝土的弹性模量为 2.55MPa ，模型的质量密度与原型相同。模型与原型的相似关系见表 1。

表 1 汽轮发电机基础模型与原型相似关系

相似关系	模型	原型	相似关系	模型	原型
线尺寸相似比 C_l	1	10	刚度相似比 C_k	1	11.76
材料质量密度相似比 C_p	1	1	自振频率相似比 C_f	9.22	1
材料弹性模量相似 C_E	1	1.176	载荷作用力相似比 C_F	1	1000
质量相似比 C_m	1	1000	振动线位移相似比 C_u	1	85

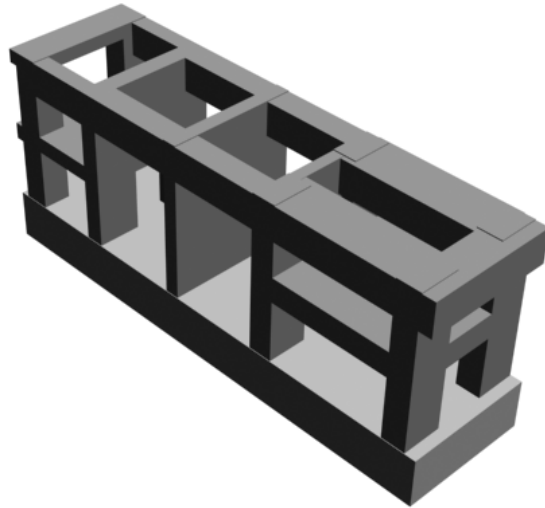


图 1 汽轮发电机基础 1/10 模型

2 模型试验过程及激振模型选择

2.1 测点布置

测点布置是依照能够较好地反映基础结构的型式，不失汽轮发电机扰力关键点，能够充分显示结构的较高阶模态振型的原则进行设置的。基础顶板纵横梁上布置 51 个测点，顶板下部的柱子布置 16 个测点，中间平台共布置 48 个测点，在低压缸间的横墙上布置 10 个测点，底板上 7 个测点，模型基础上共设有 132 个测点，见图 2。

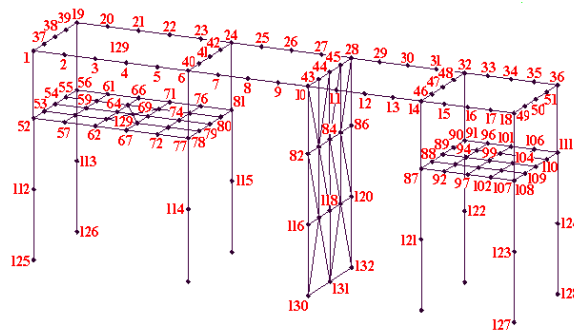


图 2 汽轮发电机基础模型测点布置图

2.2 测试系统

本试验采用两点随机激振、空间响应测量的方法，测试系统见图 3。激振力由数据采集系统内部信号源产生，通过功率放大器放大后到电磁激振器上，将激振力作用到基础模型上。激振力及基础模型各个测点加速度响应分别由压电式力传感器和压电式加速度传感器检测，通过电荷放大器放大后传到数据采集系统。模态试验选用比利时 LMS 公司的 SCADAS 数据采集系统及 Test Lab 5A 软件构成的测试分析系统，对信号完成滤波、加 Hanning 窗函数、FFT 分析、平均等一系列处理，得到各测点频率响应函数。通过频率响应函数识别模态参数。

模态试验的全过程主要由频率响应函数测量、模态参数识别及模态参数验证 3 个部分组成。本次试验中频率响应函数测量采用两点同时激振多点测量的估计法。模态参数的识别采用多参考点 MIMO 模态识别方法。

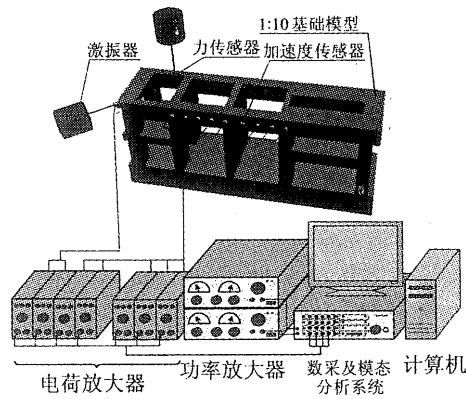


图3 汽轮发电机基础模型模态试验系统示意图

2.3 试验激振模式选择

以往汽轮发电机基础模型的模态试验大多采用单点激励多点响应，或者多点激励单点响应测量频率响应函数。对汽轮发电机基础模型这样复杂的结构可能会产生以下情况：可能遗漏模态。如激振点在某一阶振型的节点上，则该阶振型便不能被激出；若激振点接近某阶振型的节点，该阶振型的识别误差必然很大。单点激励无法识别重根。对于重根情况，其对应的模态一般是不相同的，这可能在不同列的频率响应函数的差别中反映出来。难以识别非常密集的模式。难以减少或避免结构的非线性因素。

为了避免上述不良情况的发生，基础模型试验采用多点随机激振方法进行频率响应函数的测量。在试验中，采用在1号测点与xy轴成45°方向、21号测点z向的两个点同时随机激振，空间三向测量的方法，分别测量基础模型上各个测点x、y和z三个方向上的频率响应函数。21号测点z向激励，21号测点x向响应的频率响应函数及相应的重相干函数见图4。

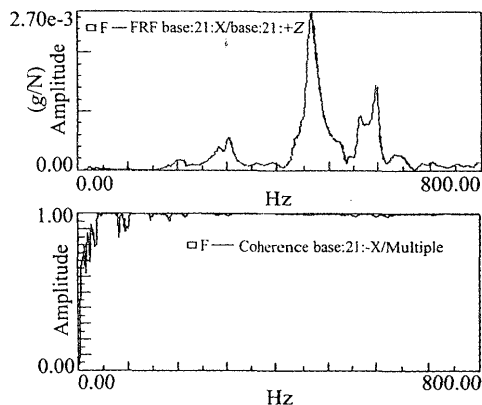


图4 频率响应函数及重相干函数曲线

2.4 模态参数的识别及验证

多参考点模态参数识别法(MIMO)同时利用多个激励点激励所得的若干列频响函数来进行参数识别，可以有效地克服上述单点激励的有关问题，提高识别精度，保证识别参数的可靠性。在本次试验中，选用最小二乘复指数方法，依据稳态图(见图5)进行模态频率和模态阻尼的识别。选用最小二乘复频域方法进行模态振型的计算。再利用模态置信因子(MAC)(见图6)和模态参预因子对识别出的模态参数进行检验。

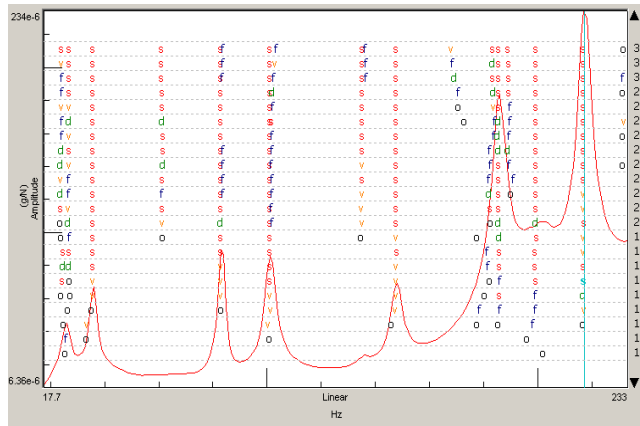


图 5 模态分析稳态图

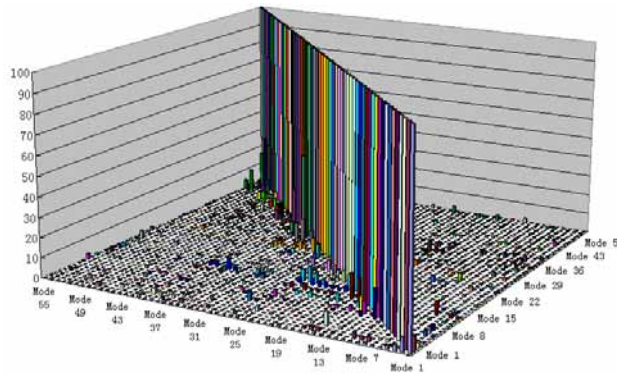


图 6 模态置信因子 MAC 图

对于线性多自由度振动系统，当模态质量归一时 $H(\omega)$ 还可表示为：

$$H_{ik}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{\{\varphi_{ir}\}\{\varphi_{kr}\}^T}{(\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega)} \quad (1)$$

其中， φ_{ir} ， φ_{kr} 别表示为 i ， k 两点的第 r 阶模态振型， ω_r 为第 r 阶圆频率， ξ_r 为第 r 阶模态阻尼， $j = \sqrt{-1}$ 。公式的含义为在 k 点作用单位力，在 i 点引起的响应。 $H_{ik}(\omega)$ 组成了 n 阶方阵 $[H_{ik}(\omega)]$ ，称为频率响应函数矩阵。利用公式(1)可以估算各测点的频率响应函数，进而进行振动响应预测。

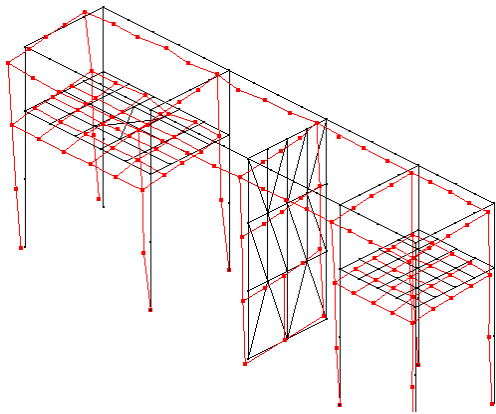
3 基础模型模态试验结果与分析

基础模型模态分析频率范围为 0 ~ 700Hz，在此范围共识别 67 阶模态，其中前 12 阶模态频率和模态阻尼见表 2，前 6 阶模态振型图见图 7。

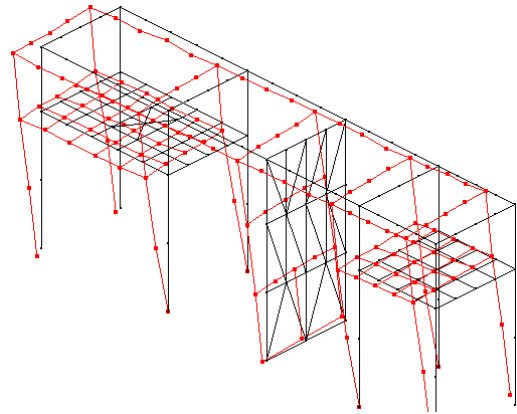
表 2

基础模型前 12 阶模态频率及模态阻尼表

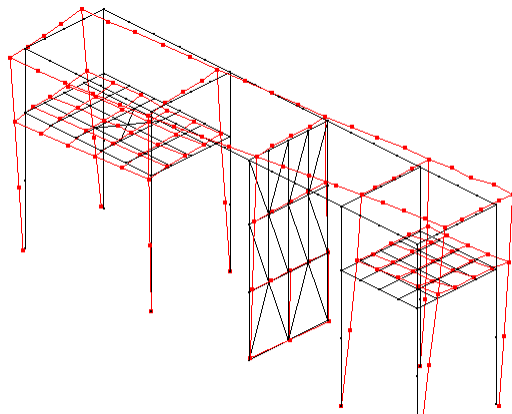
阶次	模态频率/Hz	模态阻尼/%	阶次	模态频率/Hz	模态阻尼/%
1	23.588	6.01	7	135.166	1.17
2	26.268	5.62	8	147.883	1.04
3	35.708	3.12	9	166.053	3.54
4	60.183	6.28	10	181.964	2.11
5	82.790	1.31	11	185.582	1.34
6	100.959	1.24	12	198.967	3.77



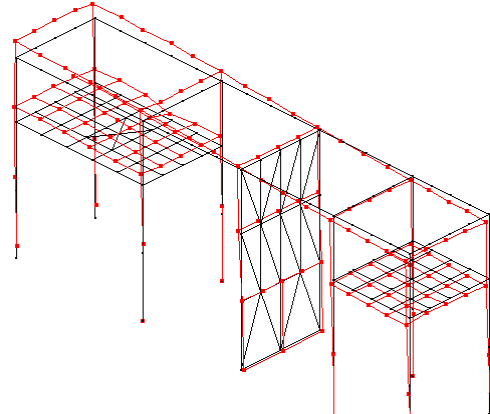
(a) 第 1 阶模态振型



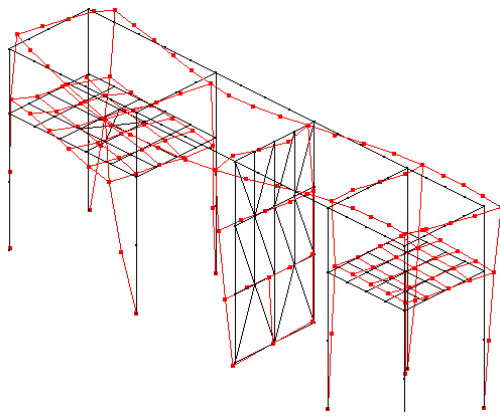
(b) 第 2 阶模态振型



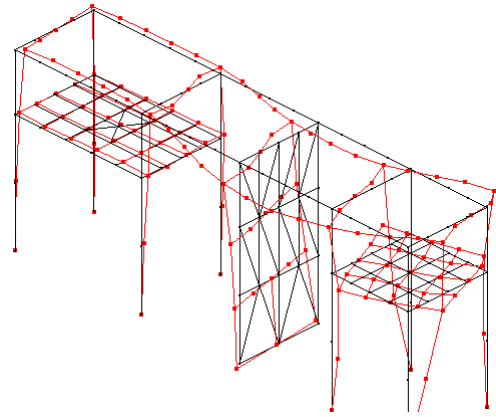
(c) 第 3 阶模态振型



(d) 第 4 阶模态振型



(e) 第 5 阶模态振型



(f) 第 6 阶模态振型

图 7 模态振型图

从表 2 中可以看到，基础模型的模态频率分布比较密集，而模态阻尼的数值大部分很小，总的规律是低阶阻尼值偏大，高阶阻尼值偏小，与以往模型试验结果规律性是相同的。

从图 7 可以看出，振型主要以空间振型为主。第 1 阶振型是以横向为主的顶板摆动振型；第 2 阶是以纵向为主的顶板摆动振型；第 3 阶为对垂直的扭转振型；第 4 阶为顶板的垂直振动振型，主要集中在发电机侧；第 5 阶为顶板的平面内二弯振型，第 6 阶为以平面内为主的顶板空间振动，振动量较大的位置在汽轮机侧。通过振型分析表明：前 3 阶为基础的整体振动振型，从第 4 阶开始，顶板产生弯扭振动。在前 6 阶振型中，没有出现以 Z 向振动为主的振型，该方向振动的振型主要出现在高频段。

前 4 阶模态振型主要是以柱子变形为主的，模型整体水平弯曲、扭转振型，此时顶板部分基本呈刚体。在第 5 阶后的振型中基础结构开始变形，但柱子的相对变形幅值大于模型其它部分的变形，这恰恰体现了这种低频框架式结构的特点。

4 结论

(1) 采用随机信号多点激振技术对 670MW 汽轮发电机基础 1/10 模型进行了动力特性试验，获得了基础结构的模态参数，在对汽轮发电机基础进行原型测试不便的情况下，可以采用模型试验对基础原型进行动力特性预测。

(2) 通过对基础模型的模态分析，可以更直观地了解基础结构的动力特性，在低频区域，基础结构以 XY 平面内的振动为主，以 Z 向为主的振动出现在第 8 阶振型。顶板的振动要比柱子上的大些。

(3) 本文通过对 1/10 汽轮发电机基础模型的模态分析，获得了基础结构的模态参数，利用模型的模态参数。根据相似关系，可以反演基础原型的模态参数，进而进行振动响应分析。

注：本文发表在《武汉大学学报》2006 年

