

# 600MW 超临界汽轮发电机基础模型振动试验

夏宏君 张兰春 张爱中  
山东电力工程咨询院 250013

**摘要:**用模型试验来预测超临界汽轮发电机基础结构的实际振动,并对该基础结构的动力特性做出评价,以指导设计最佳方案的确定,保证超临界汽轮发电机基础设计的质量。

**关键词:**汽轮发电机组、模型试验、多点激振、振动线位移、幅频曲线

## 1. 机组和基础概况

广西防城港电厂 600MW 超临界汽轮发电机组采用中国东方电气集团有限公司设计制造的汽轮机和发电机。基础的结构型式与同类型机组的基础有较大的差别,基础梁柱截面尺寸变化较大,目前尚无同类型机组的参考工程,缺少此类型基础的设计经验。为验证基础计算分析的正确性,通过模型试验来预测超临界汽轮发电机基础结构的实际振动,并对该基础结构的动力特性做出评价。

汽轮发电机组的主要技术参数和设计概况如下:

(1) 机组额定功率:600MW; 机组额定转速:3000r/min。

(2) 汽轮机:型号 N600-24.2/566/566 型,超临界,一次中间再热,冲动式,单轴三缸四排汽凝汽式汽轮机。

(3) 发电机:型号 QFSN-600-2 型,600MW 水氢氢超临界汽轮发电机,自并静态励磁系统。

根据文献<sup>[2]</sup>和文献<sup>[3]</sup>,参照设备厂提供的资料,拟定基础尺寸,采用“汽轮发电机组基础空间结构计算程序”(TGFP 4.0)进行计算分析,初步确定基础最佳设计方案。

## 2. 模型制作和模型的相似律

钢筋混凝土基础模型的比例为 1/10,基础模型配筋按构造配筋。在基础顶板上粘结铸铁块以模拟机组质量,并按设备重量荷载图布置机组附加质量。

模型的几何尺寸是原型的十分之一,即模型以几何尺寸的相似比  $C_l=L_r/L_m=10$  (下标 r 为原型, m 为模型) 进行设计。

材料密度相似比:  $C_p=\rho_r/\rho_m$

材料弹性模量相似比:  $C_e=E_r/E_m$

由此可推导出下列与振动有关的物理量的相似关系:

刚度相似比:  $C_k=C_e C_l$

质量相似比:  $C_m=C_p C_l^3$

自振频率相似比:  $C_f=\sqrt{\frac{C_k}{C_m}}=\sqrt{\frac{C_k}{C_l^3 C_p}}$

在模型相似比中,在认为同种材料性质,以及同种结构形式的情况下阻尼的相似比  $C_\xi=1$ ,  $C$  的相似比接近 1。所以振动线位移相似比:

位移频率响应函数的相似比:

$$C_A = \frac{C_p}{C_k C_\beta}$$

$$C_H = \frac{C_A}{C_P} = \frac{1}{C_k} = \frac{1}{C_e C_1}$$

由模态振型 $\{\varphi\}$ 与频率响应函数  $H$  成正比，则可设 $\{\varphi\}=aH$ ， $a$  为常数，由此得出振型相似比：

$$C_\varphi = aH = \frac{a}{C_e C_1} = \text{consta}$$

模态振型是各点的振动线位移比值，所以 $\{\varphi\}$ 与相似比无关，也就是说模型与原型模态振型是相同的。原型基础采用的混凝土强度等级为 C30，混凝土材料的质量密度为  $2.5\text{t/m}^3$ ，弹性模量为  $3.00\text{N/mm}^2$ ，模型的相似关系为：

线尺寸相似比： $C_l=10.0$       材料质量密度相似比： $C_p=1.0$   
 材料弹性模量相似比： $C_e=1.0$       刚度相似比： $C_k=10.0$   
 质量相似比： $C_m=1000.0$       自振频率相似比： $C_f=1/10.0=0.01$   
 振动线位移相似比： $C_A=1000/10.0=100.0$

### 3. 测试方法及内容

#### 3.1 测试方法

在本项目的试验中采用激振器激振的方法，激振信号采用纯随机激振信号，即由信号源产生白噪声的随机电压信号，通过功率放大器驱动激振器对基础模型进行激振，激振力和基础的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测量，通过电荷放大器传送到数据采集器中，经过对信号的 FFT 分析，得到频率响应函数。白噪声信号的频谱在平均意义上讲是平滑连续的稳态频谱，在所关心的频率范围内所包含的能量近似于常数。在激振器与基础模型的结合处装有力传感器，并通过金属软杆与激振器相连，以减小激振器的刚度和附加质量的影响。激振信号在时间上是随机并连续的。

测试时采用两点同时激振，多点测量的方法，两点激振点作为参考点，加速度响应测点为移动测点。在模态识别方法上采用频域多参考点的 MIMO 模态识别方法，并采用国际上通用的模态分析方法识别基础模型的模态参数，在识别模态频率和模态阻尼时，采用多参考点最小二乘复指数法 (LSCE)，在识别模态振型时，采用多参考点最小二乘复频域法 (LSFD)，图 3.1 为测试系统流程图。

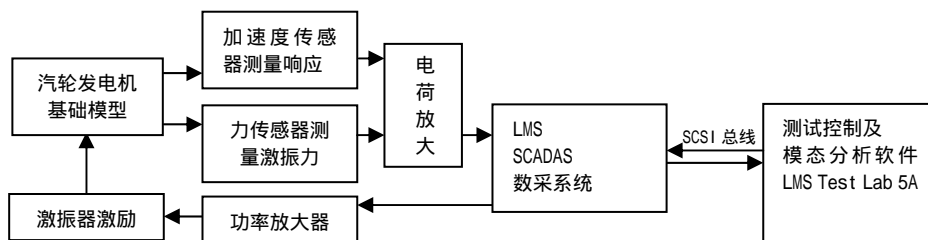


图 3.1 测试系统流程图

#### 3.2 试验内容

测点应尽可能多于计算模型中的节点，以便进一步了解基础的动力特性，各扰力点处应布置测点，以提供各扰力点的幅频曲线，柱上测点可了解基础动力特性的局部特征。测试点布置见图 3.2

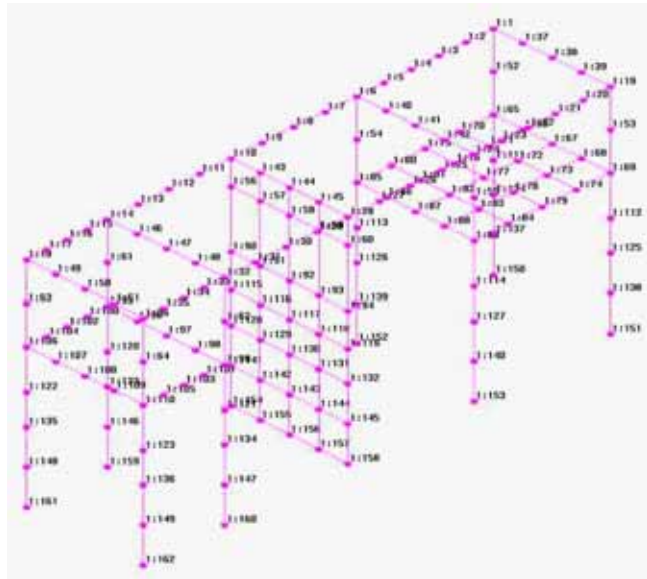


图 3.2

基础模型振动测试的试验工况见下表：  
表 3.2

| 测试工况    | 基础模型振动测试内容       | 测试方向 | 激振力作用点    | 测试标记   |
|---------|------------------|------|-----------|--------|
| 无机组附加质量 | 随机信号多点激振频率响应函数测量 | 空间   | 12z, 36x' | unload |
| 有机组附加质量 | 随机信号多点激振频率响应函数测量 | 空间   | 12z, 36x' | load   |

借助模态分析软件对频率响应函数进行模态分析可以得到基础模型的模态频率、模态振型和模态阻尼，可以预测出机组启动及运行时基础的振动情况。

#### 4 基础模型的模态参数

基础模型的试验模态分析分为装机前（无附加质量工况）和装机后（有附加质量工况）的两种试验工况。

无附加质量工况所测得的模态频率可以按相似关系直接换算到原型基础无附加质量的情形，而不能直接换算到有附加质量的情形，必须通过“动力修改”才能得到有附加质量时基础模型的模态频率，再按相似关系换算为原型基础的模态频率。

有附加质量工况时测得的基础模型的模态频率和模态阻尼列可以按相似关系直接换算到原型。

两种工况测试到的模态阶数有 57 阶之多，基础模型的模态频率分布很密集，体现了激振方法、测试仪器和模态分析软件的先进性。而模态阻尼的数值大部分很小，总的规律是低阶模态较大，高阶模态较小，特别是高阶阻尼比远低于 6.25%。

#### 5 基础的振动线位移和测试结果分析

##### 5.1 基础的振动线位移控制点及允许值

我国汽轮发电机基础的动力设计采用允许振动线位移法。文献<sup>[2]</sup>中规定：工作转速在 2250r/min 以下时基础扰力作用点的最大允许振动线位移为 30 $\mu$ m，在 2250r/min~3750r/min 范围内的扰力作用点最大允许振动线位移为 20 $\mu$ m，而对 3750r/min 以上没有做出限制。基础的振动线位移一般按下式进行预测：

$$A_i = \left( \sum_{k=1}^l A_{ik}^2 \right)^{1/2} \quad (k=1, \dots, l)$$

$$\{A_{ik}\} = \sum_{r=1}^m \frac{\{\varphi_r\} \{\varphi_r\}^T \{F_k\}}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega_k^2)^2 + v^2 \omega_r^4}} \quad (i=1, \dots, m)$$

式中： $A_{ik}$ 为第  $k$  个扰力作用时在节点  $i$  引起的响应， $m$  为模态阶数， $\omega_r$  为第  $r$  阶模态频率， $\omega_k$  为扰力频率， $\{\varphi_r\}$  为  $r$  阶模态质量归一化模态振型， $v$  为结构阻尼系数， $F_k$  为扰力值， $l$  为扰力个数。 $\omega_r$  和  $\{\varphi_r\}$  均采用试验值， $v$  取理论值，其值为 0.125。把分母  $v^2 \omega_r^4$  换成  $(2\xi_r \omega_r \omega_k)^2$  就变成了模态阻尼情形振动线位移的计算公式。

在试验中，由于采用频域多参考点的模态分析 (MIMO) 求得的模态参数，预测基础振动线位移为  $x$ 、 $y$  和  $z$  向扰力作用下的最大值，考虑了基础的空间振动。

### 5.2 振动线位移预测

在汽轮发电机基础振动的现场实测和模型试验中，通常利用动规阻尼预测基础的振动线位移。扰力频率在 2250r/min~3750r/min 范围内时，在  $x$  向扰力作用时，基础的最大振动线位移为 6.28 $\mu$ m；在  $y$  向扰力作用时，基础的最大振动线位移为 8.21 $\mu$ m；在  $z$  向扰力作用时，基础的最大振动线位移为 22.08 $\mu$ m，该点不是扰力作用点。

机组启动过程中的最大共振线位移是指扰力频率在 2250r/min 以下时，基础每一阶自振频率处的共振振动线位移。在机组启动过程中，在  $x$  向扰力作用时，基础的最大共振线位移为 5.87 $\mu$ m，在  $y$  向扰力作用时，基础的最大共振线位移为 4.81 $\mu$ m，在  $z$  向扰力作用时，基础的最大共振线位移为 12.93 $\mu$ m，最大振动线位移的测点在中低压缸下部的横梁上。所有测点的振动满足允许振动线位移 (30 $\mu$ m) 的要求。

### 5.3 机组启动过程中基础振动的幅频曲线

由于基础的振动试验是采用空间测量模式，在某一方向施加扰力时，另外两个方向也有振动线位移输出，由于有三个方向扰力分别作用基础上，每一个测点在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向均有个振动线位移值输出，在图 5.4 中我们可以直观地看到扰力作用点的振动线位移随转速而变化。 $x$  向扰力作用时，峰值集中在 1000r/min 以下， $y$  向扰力作用时，峰值集中在 2000~2500r/min， $z$  向扰力作用时，峰值集中在 3000r/min，扰力作用点的振动线位移没有超过允许值的情形，曲线的特征也表明基础的性能较为理想。

### 5.4 测试结果的归纳

扰力频率在 2250~3750r/min 范围时基础扰力作用点的最大振动线位移见下表

表

5.4.1

单位 ( $\mu$ m)

| x 向扰力 |      |           | y 向扰力 |           | z 向扰力 |           |
|-------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 方向    | 幅值   | 点号及位置     | 幅值    | 点号及位置     | 幅值    | 点号及位置     |
| x     | 3.21 | 44 低压缸间横梁 | 2.59  | 20 发电机纵梁  | 4.04  | 50 高压缸横梁  |
| y     | 1.87 | 50 高压缸间横梁 | 2.70  | 44 低压缸间横梁 | 2.99  | 50 高压缸横梁  |
| z     | 1.12 | 47 高低压缸横梁 | 3.63  | 50 高压缸横梁  | 13.48 | 47 高中压缸横梁 |

从上表可以看出，扰力作用点处基础的水平  $x$  向最大振动线位移 3.21 $\mu$ m；水平  $y$  向最大振动线位移 3.63 $\mu$ m；垂直  $z$  向最大振动线位移 13.48 $\mu$ m，基础的振动线位移满足《动力

机器基础设计规范》的要求。

基础的基频为 2.36Hz 左右，属于低频调基础。基础的基频远离工作转速，这对机组长期稳定运行是十分有利的。

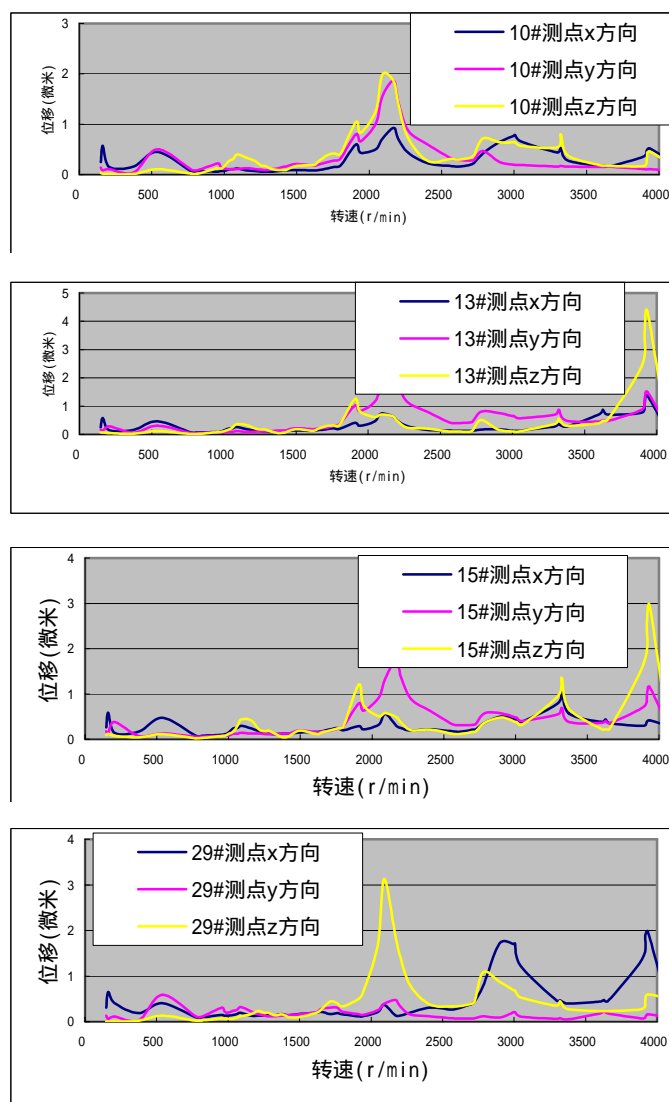


图 5.4

## 6 结论

试验结果表明，该基础为低频调基础，在机组启动过程中和工作转速下，基础的振动线位移均满足《动力机器基础设计规范》的要求，基础扰力作用点的幅频曲线图比较平缓，基础的动力特性满足规范要求，基础模型振动试验表明基础的动力特性较好，表明基础的设计质量较高。

本次试验中，进一步完善了多点激振技术和多参考点模态参数识别法 (MIMO) 在基础模型振动试验中应用，使得试验数据更加可靠，也使得试验手段更加完美。

注：本文发表在《山东土木工程学会》2006 年