

K52

备案号：7795—2000

## 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 735—2000

大型汽轮发电机定子绕组端部  
动态特性的测量及评定Measurement and evaluation of the dynamic characteristic  
on stator end windings of the large turbo-generator

2000-11-03 发布

2001-01-01实施

中华人民共和国国家经济贸易委员会 发布

## 前 言

随着发电机单机容量的增加，定子绕组端部受到的两倍频电磁力随之增大。如果定子绕组端部的固有频率接近100Hz，在运行中绕组端部将会产生较大的谐振振幅，且以绕组端部整体模态频率接近100Hz、振型为椭圆时最为严重。近年来，国产和进口大型汽轮发电机由于定子绕组端部谐振或其他原因，绑绳、支架固定螺栓、槽内紧固件松动和线棒绝缘磨损的现象时有发生，因而开展发电机定子绕组端部动态特性的测量和评定工作十分必要。本标准对大型汽轮发电机定子绕组端部动态特性的测量方法和评定准则作了具体规定。

本标准从生效之日起，电力行业有关规定中所有涉及发电机定子绕组端部动态特性的测量及评定的部分，凡与本标准相抵触的，以本标准为准。

本标准的附录A是提示的附录。

本标准由电力行业电机标准化技术委员会提出并归口。

本标准负责起草单位：山东电力研究院；参加起草单位：华北电力科学研究院，东北电力科学研究院。

本标准主要起草人：孙树敏、王文琦、白亚民、马庆平、高波、孟瑜。

本标准由电力行业电机标准化技术委员会负责解释。

## 目 次

## 前言

- 1 范围
  - 2 引用标准
  - 3 定义
  - 4 测量项目和方法
  - 5 测量设备和模态分析软件要求
  - 6 测量条件
  - 7 评定准则
- 附录A(提示的附录)模态分析的一般方法

## 1 范围

本标准规定了大型汽轮发电机定子绕组端部动态特性的测量方法及评定准则。

本标准适用于额定功率为200MW及以上的国产汽轮发电机。在新机交接、大修、受到短路冲击、更换线棒、改变定子绕组端部固定结构或必要时,应对定子绕组端部进行动态特性测量。

进口汽轮发电机和额定功率在200MW以下的国产汽轮发电机可参考本标准执行。

## 2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 2298—1991机械振动与冲击术语

## 3 定义

本标准采用下列定义。

### 3.1 动态特性测定试验 dynamic characteristic test

为了解结构的动态特性和验证设计时采用的力学模型是否正确所作的试验,如模态试验 [ GB/T 2298—1991中5.29.c ]。

### 3.2 固有频率 natural frequency

由系统本身的质量和刚度所决定的频率, $n$ 自由度系统一般有 $n$ 个固有频率,按大小次序排列,最低的为第一固有频率等。

### 3.3 模态试验 modal test

为确定系统模态参数所做的振动试验。通常先由激励和响应关系得出频率响应矩阵,再由曲线拟合等方法识别出各阶模态参数 [ GB/T 2298—1991中5.32 ]。

### 3.4 模态参数 modal parameter

模态的特征参数,即振动系统的各阶固有频率、振型、模态质量、模态刚度与模态阻尼 [ GB/T 2298—1991中3.60 ]。

### 3.5 振型 modal shape

机械系统的某一给定振动模态的振型是指由中性面(或中性轴)上的点偏离其平衡位置的最大位移值所描述的图形 [ GB/T 2298—1991中3.63 ]。

### 3.6 定子绕组端部椭圆振型 elliptical modal shape on stator end windings

定子绕组端部和支撑结构整体振型为椭圆形状。

### 3.7 频率响应函数 frequency response function

- a)简谐激励时,稳态输出相量与输入相量之比。
- b)瞬态激励时,输出的傅里叶变换与输入的傅里叶变换之比。
- c)平稳随机激励时,输出和输入的互谱与自谱之比。

[ GB/T 2298—1991中2.40 ]

### 3.8 相干函数 coherence function

$x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的互谱的绝对值的平方与各自的自谱的乘积之比,可用式(1)表示:

$$\gamma_{12}^2(f) = \frac{|\overline{G}_{12}(f)|^2}{G_1(f)G_2(f)} \quad (1)$$

由互谱不等式可得式(2):

$$0 \leq \gamma_{12}^2 \leq 1 \quad (2)$$

式中:  $\overline{G}_{12}(f)$  ——经过集合平均后的互谱;

$\overline{G}_1(f)$ ,  $\overline{G}_2(f)$  ——经过集合平均后的自谱。

[ GB/T 2298—1991中6.3 ]

### 3.9 阻尼 damping

能量随时间或距离的耗散 [ GB/T 2298—1991中3.93 ]。

### 3.10 动态信号分析仪 dynamic signal analyzer

当代最常用的基于快速傅立叶变换原理和数字信号处理技术的信号分析仪。它对输入的模拟信号进行抗混滤波、采样保持和模数转换等初步处理后,按不同要求可对信号进行时域分析、时差域分析(相关分析)、频域分析(功率谱、频响函数等分析)和幅值域分析(直方图、概率密度等分析) [ GB/T 2298—1991中5.35 ]。

### DL/T 735—20003.11 采样频率 sampling frequency

1s内的采样次数 [ GB/T 2298—1991中6.13 ]。

### 3.12 窗函数 window function

为了用数字分析仪进行分析,对信号进行截断处理时所用的权函数 [ GB/T 2298—1991中6.24 ]。

## 4 测量项目和方法

### 4.1 测量项目和测点布置

#### 4.1.1 测量项目

- a)定子绕组端部整体模态试验;
- b)定子绕组鼻端接头固有频率测量;
- c)定子绕组引出线和过渡引线固有频率测量。

#### 4.1.2 定子绕组端部整体模态试验测点布置及数量要求

在汽侧和励侧绕组端部锥体内截面上,各取如图1所示的1、2、3三个圆周,每一圆周上的测点应沿圆周均匀布置且数量不少于定子槽数的一半。

#### 4.1.3 定子绕组鼻端接头固有频率测点布置及数量要求

测点沿图1中的圆周1布置,测量定子绕组所有鼻端接头的固有频率。

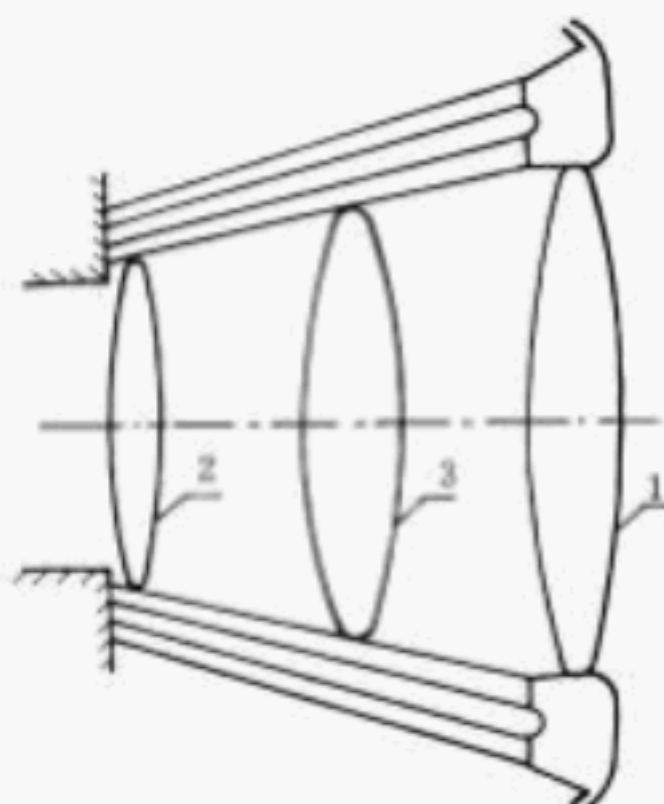
#### 4.1.4 定子绕组引出线和过渡引线固有频率测点布置在定子绕组引出线和过渡引线的固定薄弱处适当布置若干测点。

### 4.2 测量方法

#### 4.2.1 定子绕组端部整体模态试验

4.2.1.1 发电机定子绕组端部整体模态试验采用锤击法,一点激振多点响应或多点激振一点响应两种方法均可。推荐一点激振多点响应法,用力锤定点敲击定子绕组端部上的某点,向绕组端部提供一个瞬态的冲击力,动态信号分析仪拾取端部绕组上各测点的径向(可加测切向和轴向)的振动响应,再经模态分析软件分析处理,得到定子绕组端部整体的模态频率、振型和阻尼等模态参数。

4.2.1.2 推荐按圆周1至圆周3(见图1所示)的顺序测量。测得圆周1的数据后,可根据分析的需要,再加测圆周2和圆周3的数据。





- 1—定子绕组端部鼻端接头各测点组成的圆周；
- 2—定子绕组的槽口部位各测点组成的圆周；
- 3—定子绕组端部渐开线中部各测点组成的圆周

图1 定子绕组端部模态试验测点布置图

#### 4.2.2 定子绕组鼻端接头、引出线和过渡引线固有频率测量

用力锤分别敲击定子绕组鼻端接头、引出线和过渡引线，测量相应测点的振动响应，经动态信号分析仪分析，得到相应的瞬态激励频率响应函数(见附录A)，在瞬态激励频率响应函数的幅频特性曲线上，相干函数值在0.9以上的极大值点为各测点的固有频率值。

#### 4.2.3 测量次数

每一测点至少重复测量一次，并尽量保持锤击的方向和力度一致。

#### 4.2.4 测量时应记录环境、线棒和内冷却水温度

### 5 测量设备和模态分析软件要求

#### 5.1 测量设备

##### 5.1.1 力锤

力锤应带有力传感器，推荐使用压电式力传感器，其最大量程不小于50kN，锤帽为橡胶等软材料。力锤的频响范围为0Hz～200Hz。

##### 5.1.2 加速度传感器

推荐使用压电式加速度传感器测量定子绕组端部的振动响应。

##### 5.1.3 电荷放大器

根据选用的力传感器和加速度传感器选择相应的电荷放大器，电荷放大器应具有足够的放大倍数，使其输出信号幅值大于动态信号分析仪量程的一半。

##### 5.1.4 动态信号分析仪

5.1.4.1 至少应具有两个信号通道，推荐使用四通道动态信号分析仪。各通道间应为无相差采集，采样频率大于10kHz，采样点数不少于1024点，频谱分析分辨率不低于0.5Hz。

5.1.4.2 应具备以下分析功能：

- a) 频谱分析、功率谱分析、传递函数和相干函数分析；
- b) 信号的加窗(力信号加力窗、加速度信号加指数窗)处理和多次测量数据的平均处理；
- c) 应具备数据储存功能。

5.1.4.3 应具备抗外界电磁场和电源干扰的能力。

#### 5.2 模态分析软件

选用实模态分析软件，应满足发电机定子绕组端部动态特性测定的要求。

### 6 测量条件

定子绕组为水内冷的发电机，发电机定子绕组端部模态试验、定子绕组鼻端接头、引出线和过渡引线固有频率测量在停机冷态下进行，宜在定子绕组通水的情况下进行，新机交接时可先测量不通水情况下的数据。

### 7 评定准则

#### 7.1 绕组端部整体模态评定

7.1.1 新机交接时，绕组端部整体模态频率在94Hz～115Hz范围之内为不合格。

7.1.2 已运行的发电机，绕组端部整体模态频率在94Hz～115Hz范围内，且振型为椭圆，应采取措施对绕

组端部进行处理。

7.1.3 已运行的发电机，绕组端部整体模态频率在94Hz～115Hz范围内，振型不是椭圆，应结合发电机历史情况综合分析；若绕组端部磨损严重或松动，应及时处理并复测模态；若无明显磨损，应加强监视，在具备条件时对绕组端部进行处理。

7.2 线棒鼻端接头、引出线和过渡引线的固有频率评定

7.2.1 线棒鼻端接头、引出线和过渡引线的固有频率在94Hz～115Hz范围之内为不合格。

7.2.2 已运行的发电机，个别线棒鼻端接头、引出线和过渡引线的固有频率在94Hz～115Hz范围内，应结合发电机历史情况综合分析处理。

7.3 相邻两次试验的结果对比

模态振型和频率有明显差异时应对绕组端部固定结构进行检查处理。

在频率响应函数的幅频特性曲线上，94Hz～115Hz范围内的固有频率点，幅值有明显增大时，应进行加固处理。

## 附录A (提示的附录)

### 模态分析的一般方法

#### A1 模态分析的基本过程

模态是机械结构的固有振动特性。每个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。通过模态分析，掌握结构在某一感兴趣的频率范围内各阶主要模态的特性，就可预计结构在此频段内的实际振动响应。

模态分析大致可分为四个基本过程：

##### A1.1 动态数据的采集

###### A1.1.1 激励方法

对结构施加一定动态激励，然后采集激振力信号及各点的振动响应，用相应的识别方法获取模态参数。

激励方法按输入力的信号特征可分为：正弦扫描、正弦快扫描、瞬态激励等。本标准推荐采用瞬态激励法。

###### A1.1.2 数据采集

为了降低试验成本，推荐同时采集激励和响应的信号，用不断移动激励点位置或响应点位置的方法取得振型数据。

###### A1.1.3 时域或频域信号处理

对采集的振动信号进行滤波处理、频谱分析、传递函数估计、相干函数分析等。

##### A1.2 建立结构数学模型

根据已知条件建立一种描述结构特性的模型，作为计算及识别参数的依据。

##### A1.3 参数识别

按识别域的不同可分为频域法、时域法和混和法。

##### A1.4 振型动画

根据试验得到的结构的模态参数模型，即一组固有频率、模态阻尼以及相应各阶模态的振型，采用活动振动的方法，将放大的振型叠加到原始的几何形状上。

#### A2 机械导纳测量

结构物任意两点的传递函数也称为机械导纳。机械导纳的测量是模态分析的基础。系统传递函数的定义是：

$$H(f) = \frac{\overline{G}_{12}(f)}{\overline{G}_2(f)} \quad (\text{A1})$$

式中： $\overline{G}_{12}(f)$ 和 $\overline{G}_2(f)$ 的含义见3.8。

为了评价传递函数的估计精度，定义了相干函数(等于1或小于1的实数)，在非共振点(传递函数的零点)由于输出信号小，输出信噪比很低，相干函数也较小；在共振点(传递函数的极大值点)由于输出信号的信噪比高，相干函数也较大。当存在噪声时，相干函数也会随着平均次数的增加而有所改善，通常采用多次测量数据取平均，以提高测试准确性。