

# 汽轮发电机转子扭振模型修改

郭 力 盛晓敏

(湖南大学)

Cheng H. S.

(美国西北大学)

**[摘要]** 为建立精确的汽轮发电机转子扭振模型,本文讨论了用试验所得不完全模态来修正由有限元法建立的集中参数模型,使其在所需的频率范围内与测试的动力特性一致,文中对国产 200 MW 机组进行了实机计算。

**关键词** 汽轮发电机 转子 扭振

**中图分类号** TH113

## 0 前言

随着单机和电网容量的增加及新输电技术采用,机电耦合诱发的轴系扭振问题已引起科学界的极大重视<sup>[1]</sup>。

计算汽轮发电机组轴系扭振特性,需要准确的扭振模型。本文以广泛采用的集中质量模型为对象,讨论模型修改问题。

用有限元法建立集中质量扭振模型,其模型参数由经验公式及近似计算获得,造成计算与实机测试结果有较大误差。其原因在于所建模型不够准确。为了提高其准确性,本文用试验所得的不完全模态来修正有限元法建立的集中参数模型,使其在所需频率范围内与测试动力特性更为一致。鉴于转动惯量有较为精确的解析计算,转子扭振阻尼很小,文中重点讨论扭转刚度参数修正。

## 1 不完全测试模态修正模型理论

求解扭振系统的固有频率和主振型可归结为求解下列特征方程

$$([K] - \omega^2[J])\{h\} = \{0\} \quad (1)$$

式中,  $[J]$   $[K]$  是系统惯量、刚度矩阵。

显而易见,对于  $n$  个自由度的扭振系统,有  $n$  个特征对  $\omega_i$  和  $h_i$  ( $\omega_i$  为系统  $i$  阶固有频率,  $h_i$  为对应振型,  $i = 1, 2, \dots, n$ ) 构成一个模态集,并有下列正交关系

$$\{h_i\}^T [J] \{h_j\} = [I], \{h_i\}^T [K] \{h_j\} = [\omega_i^2] \quad (2)$$

若系统全部模态都能测到,可由上式直接得到模型参数;但测量的  $m$  阶模态往往比自由度数  $n$  小,因而由上式难以求得  $[J]$ ,  $[K]$ 。下面讨论用实测的不完全模态对所建模型参数进行优化修正,以获得精确的模型参数。

由有限元法所建模型参数为  $[J_0]$ ,  $[K_0]$ , 它与实际模型参数  $[J]$ ,  $[K]$  的偏差为  $[\Delta J]$ ,  $[\Delta K]$ , 即

$$[J] = [J_0] + [\Delta J] \quad (3)$$

$$[K] = [K_0] + [\Delta K] \quad (4)$$

设给定一个范数  $X$ , 即

$$X = \| [N]^{-1} [\Delta J] [N]^{-1} \| \quad (5)$$

式中,  $[N] = [J_0]^{-1/2}$

又构造一个拉格朗日函数, 即

$$J = X + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} (\{h_i\}^T [\Delta J] \{h_j\} - [1] + [J_A]_{ij}) \quad (6)$$

式中,  $[J_A] = \{h\}^T [J_0] \{h\}$ ;  $\lambda_{ij}$  为拉氏乘子。

方程 (2-6) 对  $[\Delta J]$  的每个元素求导, 并令其为零, 就能得满足式 (2) 的前一部分, 又使式 (5) 中  $X$  最小的解

$$[\Delta J] = -\frac{1}{2} [J_0] \{h\} [\Delta]^T \{h\}^T [J_0] \quad (7)$$

式中,  $[\Delta]$  为拉氏乘子矩阵。

将式 (7) 代入式 (2), 得

$$[\Delta] = -2 [J_A]^{-1} ([1] - [J_A]) [J_A]^{-1} \quad (8)$$

把上式代回式 (7), 得

$$[J] = [J_0] + [J_0] \{h\} [J_A]^{-1} ([1] - [J_A]) [J_A]^{-1} \{h\}^T [J_0] \quad (9)$$

同理, 可得修正后刚度阵

$$[K] = [K_0] + [H] + [H]^T$$

其中,  $[H] = \frac{1}{2} [J_0] \{h\} (\{h\}^T [K_0] \{h\} + [W^2]) \{h\}^T [J_0] - [K_0] \{h\} \{h\}^T [1]$

以上推导修正模型参数时, 用了正交条件式 (3), 而在通常情况下, 由实测的  $\{h\}$  是非正交的, 因此, 必须对测量振型优化正交。

## 2 优化修正扭转刚度

### 2.1 测量振型优化正交式及其数值解法

设测量得不完全模态振型为  $[T]_{(n \times m)}$ , 又已知  $[J]$  由  $[1]$  导出优化正交振型矩阵  $[X]$ ,

$$[X] = [T] ([T]^T [J] [T])^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

优化后的测量振型满足  $[X]^T [J] [X] = [Im]$ , 而测量振型优化之前的  $[T]$  不满足这一条件。

为获得优化正交振型, 必须计算  $([T]^T [J] [T])^{-\frac{1}{2}}$ , 也即要求  $[T]^T [J] [T]$  的特征值, 然而, 其几乎是一个单位阵, 其特征值接近 1 这样就产生了困难。我们用下法求解。

迭代公式为:

$$\begin{cases} [X]_{k+1} = \frac{3}{2} [X]_k - \frac{1}{2} [X]_k [X]_k^T [J] [X]_k \\ [X]_0 = [T] \end{cases} \quad (11)$$

以上迭代法,  $[T]^T [J] [T]$  的特征值不得超过  $\frac{1}{3}$ , 否则迭代将不收敛, 且所有特征值必非零。

### 2.2 刚度优化修正式

设  $[K_0]_{(n \times m)}$  是初始模型刚度阵,  $[K]_{(n \times m)}$  是修正模型刚度阵, 为优化求取  $[K]$ , 使范数  $g$  取最小值

$$g = \frac{1}{2} \| [N]^{-1} ([K] - [K_0]) [N]^{-1} \| \quad (12)$$

式中:  $[N] = [J]^{\frac{1}{2}}$

且满足特征方程

$$[K] [X] = (K^2) [J] [X] \quad (13)$$

式中,  $[K^2]$  为测量频率矩阵,  $n \times m$  阶。

并且  $[K]$  满足对称性

$$[K] = [K]^T \quad (14)$$

为求修正刚度  $[K]$ , 先构造 Lagrange 函数

$$Z = g + 2 \|\Lambda_k\| ([K] [X] - [J] [X] [K^2]) \| + \|U_k\| ([K] - [K]^T) \| \quad (15)$$

这里  $[\Lambda_k]$   $[U_k]$  为 Lagrange 乘子。

对  $Z$  求偏导并令其为零, 且通过变换消去  $[\Lambda_k]$   $[U_k]$  得优化修正刚度表达式

$$[K] = [K_0] + [K_0] [X] [X]^T [J] - [J] [X] [X]^T [K_0] + [J] [X] [K^2] [X]^T [J] + [J] [X] [X]^T [K_0] [X] [X]^T [J] \quad (16)$$

## 3 应用实例

用文中刚度参数修正方法和所编程序对国产 200 MW 机组轴系扭振特性进行了计算。首先, 将实际机组轴系用有限元法分成六十段, 其中高压转子分成十段, 中压转子分成十一段, 低压转子分成十三段, 发电机分成十四段, 励磁机转子分成十二段, 以

建立一原始集中质量模型,再由试验识别的前两阶固有频率和振型,对刚度参数进行修正得修正后的模型。

表 1 固有频率修正

阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率实测值 (Hz)	11.50	24.00	35.50	49.75	73.25	101.75
原始模型计算值 (Hz)	10.234	23.207	35.996	48.537	67.463	99.442
修正模型计算值 (Hz)	11.413	23.727	36.325	49.338	69.731	99.764
与实测值比 原始模型计算误差	11.0%	3.3%	1.4%	2.4%	7.9%	2.3%
与实测值比 修正模型计算误差	0.8%	1.1%	2.3%	0.8%	4.8%	2.0%

原始模型和修正模型的扭振固有频率前六阶计算值与实测值对比于表 1

从表 1 可以看出,修正模型计算精度与原始模型相比大为提高,修正模型能更进一步满足动力特性计算与分析。

## 4 结论

通过对扭振模型修改(特别是对刚度参数修改)方法的讨论及对实例的验证和计

算,得出如下结论:

(1) 用试验识别来的不完全模态优化修改模型参数,可使修改后的模型比初始模型更加精确,可用修改后的模型进行进一步动力分析。

(2) 导出的刚度修正式,不须迭代求解,计算简便,易于编程序。实例表明刚度参数修正方法是有效的。

(3) 文中讨论的扭振模型修改方法适用于其它线性结构性动力模型修改。

## 参考文献

- 1 Baruch M. Optimization procedure to correct stiffness and flexibility matrices using vibration tests. AIAA Journal, Nov. 1988, 16: 8~10
- 2 郭力,堀幸夫.大型汽轮发电机组轴系位置调整.热能动力工程,1996,11(5): 315~321
- 3 Baruch M. Selective optimal orthogonalization of measured modes. AIAA Journal, Jan 1989, 17: 120~121

作者简介 郭力,32岁,博士,毕业于西安交通大学。主持多项国家自然科学基金和国家攻关课题研究,获国家教委科技进步一等奖等多项奖励,在国内外权威学术刊物上发表论文三十篇。现在长沙湖南大学机械系工作。通讯地址:长沙湖南大学机械系。

(渠源 编辑)

## 新设计 叶型中心流线形状可控的压气机叶栅

据“Теплоэнергетика”1997年4月号报导,俄罗斯鲍曼工学院对叶型中心流线形状可控的压气机叶栅进行了理论分析和试验研究。

利用考虑到叶型上附面层发展的数值方法求解涡轮机械叶栅的造型问题,表明了了在中心流线上的速度变化规律与叶型上气动载荷分布特征之间的关系。提出了决定叶栅出口截面工质核心无梯度极限状况的特殊条件。讨论了三种系列中心流线形状可控的特殊成型压气机叶栅的试验研究结果。列出了叶型损失、二次流损失及总损失系数随特殊成型叶栅内加载规律而变化的关系曲线。也给出了出口角和损失系数随冲角变化的关系曲线。

得到的结果表明,把轴流压气机叶栅设计成沿叶高具有不同形状的中心流线,即沿叶高在其各个截面内沿叶弦具有不同载荷分布,可降低其能量损失并明显降低通流部分内流体动力学过程的不稳定现象。

(思娟 供稿)

超临界直流锅炉启动过程汽水膨胀的研究 = **A Study of the Water Swell in Supercritical Once-through Boilers During Start-up** [刊, 中] / Yang Dong, Chen Tingkuan, Hou Shuhai, Bi Qingcheng (Xi'an Jiaotong University), Yang Zhongmin, Li Yongxing (Harbin Boiler Works) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -161~ 164

A mathematical model is set up for calculating the water swell in a supercritical pressure once-through boiler during its start-up. The model has been verified through tests and was used to calculate the water swell during a cold-state and hot-state start-up process in a 600 MW supercritical pressure once-through boiler designed and developed by Harbin Boiler Works. All the above has provided a basis for the design of boiler start-up systems and the drawing-up of start-up curves. **Key words** supercritical pressure, once-through boiler, water swell

三通型汽轮机电-压力转换器的研究 = **A Study of Three-way Electro-pressure Converter for a Steam Turbine Regulating System** [刊, 中] / Wei Jianhua (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -165~ 167

Described in this paper is the principle of an imported electro-pressure converter for use in a steam turbine regulating system. The electrical control principle and mechanical structure features of a home-made three-way electro-pressure converter are also discussed with its experimental curves presented. **Key words** steam turbine regulation, electro-hydraulic converter

汽轮发电机转子扭振模型修改 = **Modification of a Turbogenerator Rotor Torsional Vibration Model** [刊, 中] / Guo Li, Sheng Xiaomin (Hunan University), Cheng H S (American Northwestern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -168~ 170

In connection with the establishment of a precise turbogenerator rotor torsional vibration model this paper discusses the modification with the help of test-obtained incomplete modalities of a concentrated parametric model set up by a finite element method, making it within the required frequency range to coincide with the measured dynamic characteristics. Given in this paper are the results of calculation for a home-made 200 MW turbogenerator unit. **Key words** turbogenerator, rotor, torsional vibration

大港电厂 328 MW 汽轮机凝汽器数值模拟与特性分析 = **Numerical Simulation and Characteristics Analysis of 328 MW Turbine Condenser of Dagang Power Plant** [刊, 中] / Zhu Guangyu, Li Hongmei (Xi'an Jiaotong University), Tang Ming (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -170~ 174

By the use of a numerical method calculated was the flow and heat transfer process on the condenser shell side of a 328 MW steam turbine condenser imported from Italy. An analysis is given of the rationality of the condenser design. The results of the analysis show that the layout of the condenser tube bank features rationality in certain aspects but there is room for improvement. Hence, the operating pressure may be slightly higher than the design pressure. **Key words** condenser, numerical simulation, analysis

蓄冰空调变风量系统工程可行性分析 = **The Analysis of Engineering Feasibility of VAV in an Ice Storage-assisted Air Conditioning System** [刊, 中] / Liu Zhenyan, Yu Guangbao, Ding Yihong (China National University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(3). -175~ 177

Proposed in this paper is a new concept concerning the use of variable air flow rate air feeding system in the ice storage assisted air-conditioning system. An analytical study is performed of its engineering feasibility. The results of the study have shown that the setting-up of the variable air flow rate air feeding system in the above-cited air conditioning system will not only reduce the cold load but also lower operation cost. In addition, it can eliminate the major defect in the ice storage-assisted air conditioning system, namely the serious mismatching of loads. The authors have also through specific engineering cases analyzed engineering economics. **Key words** ice storage-assisted air conditioning, variable air flow, system feasibility

循环流化床中贴壁回探流的机理试验研究 = **An Experimental Study of Wall-adhered Return Flow Mechanism in a Circulating Fluidized Bed** [刊, 中] / Guang Xin, Niu Changshan, Gu Yaping, et al (Xi'an Jiaotong