

## 船用汽轮机带冠叶片动力特性研究

李剑钊, 闻雪友, 林志鸿

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 利用大型有限元通用程序 MSC/NASTRAN 对蒸汽轮机带冠叶片进行了动力特性研究, 讨论了边界条件处理、冠间“紧度”和受力情况, 并对一实例进行分析。

**关 键 词:** 汽轮机; 带冠叶片; 振动; 有限元

中图分类号: TK263.3 文献标识码: A

## 1 引言

带冠叶片是利用叶片的弹性扭转特性, 依靠叶冠对叶片进行限幅、调频和提供阻尼减振的阻尼叶片, 同三元流设计一起被列为发展大型蒸汽轮机的新技术。良好的振动特性使带冠叶片在燃气轮机和汽轮机中得到广泛的应用。

研究表明, 将拉筋调频叶片改型为带冠叶片后, 叶片具有良好的宽带调频能力, 改善了叶片的振动特性, 并提高了级效率。可以确认, 在多变转速、多变工况的船用汽轮机设计中, 采用带冠叶片将提高机组的可靠性和经济性。本文讨论船用汽轮机带“Z”型冠叶片的振动特性。

## 2 叶片整体运动方程的建立

经过推导, 建立了有限单元体的运动微分方程:

$$[M]^e \{\ddot{\delta}\}^e + [M_G]^e \{\dot{\delta}\}^e + [C]^e \{\dot{\delta}\}^e - [K_C]^e \{\delta\}^e + [K_0]^e \{\delta\}^e = \{F\}^e + \{Q_C\}^e + \{Q_P\}^e \quad (1)$$

其中:

$$\text{单元的质量矩阵} \quad [M]^e = \int_{V^e} \rho [N]^T [N] dv^e$$

单元的哥氏力矩阵

$$[M_G]^e = 2\Omega \int_{V^e} \rho [N]^T [H] [N] dv^e$$

$$\text{单元的阻尼力矩阵} \quad [C]^e = \int_{V^e} \rho [N]^T [N] dv^e$$

单元离心力刚度矩阵

$$[K_C]^e = \Omega^2 \int_{V^e} \rho [N]^T [H] [H] [N] dv^e$$

线性刚度矩阵

$$[K_0]^e = \int_{V^e} [B_0]^T [D] [B_0] dv^e$$

单元离心力向量

$$\{Q_C\}^e = \Omega^2 \int_{V^e} \rho [N]^T [H] [H] \begin{Bmatrix} x_0 \\ y^0 \\ z_0 \end{Bmatrix} dv^e$$

式中  $[N]$  — 单元形状函数矩阵;  $[B]$  — 几何矩阵;  $[H]$  — 为引入矩阵

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & -h_z & h_y \\ h_z & 0 & -h_x \\ -h_y & h_x & 0 \end{bmatrix}$$

$h$  为转轴方向的单位向量。

由于哥氏力矩阵量值上很小, 在实际计算中一般忽略哥氏项的作用, 对单元进行组装可以得到叶片振动时的总体运动方程:

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} - [K_C] \{\delta\} + [K_0] \{\delta\} = \Sigma \{F\}^e + \Sigma \{Q_C\}^e + \Sigma \{Q_P\}^e \quad (2)$$

## 3 特征值求解

动力系统的固有频率和固有振型分析实质上是求解大型矩阵特征值问题。大型结构的特征值求解方法有很多, 有经典的迭代法 (INV)、Householder 法和 Givens 法, MSC/NASTRAN 通用有限元分析程序不仅提供了经典求解特征值问题的方法, 而且发展了一种新的高效的 Lanczos 法。

Lanczos 法是迭代法和变换法的结合, 基本的过程是把特征值问题的系数矩阵对角化。MSC/NASTRAN 中分块求解又增加了对多根问题求解的通用性和稳定性, Lanczos 法继承了变换法和迭代法的优点, 克服了其它算法的一些限制, 其效率高而且不丢根, 可以计算出精确的特征值和特征向量。稀疏矩阵求解方法可以大大提高求解速度和减少磁盘容量要求, Lanczos 法能够支持稀疏矩阵求解方法, 对较

大规模的模型, 它是一个好的方法。

以某燃气轮机叶片—轮盘系统耦合振动分析为例, 整个模型共有单元 16 016 个, 节点 30 354 个, 计算系统前 20 阶固有频率时计算机耗时仅 40 余分钟, 从中不难看出其特征值求解的高效。

## 4 有限元模化及边界处理

### 4.1 叶片离散

有限元方法中对所计算实体的离散是前期工作的关键。由于受到计算条件的限制, 目前工程计算中多采用扭曲梁单元模化扭叶片工作部分, 用空间梁单元模化叶冠部分。三维实体单元精确性以及反映细节和局部的明显优势得到了学者们的公认, 当外界计算条件允许时, 三维实体单元无疑是更好的选择。

本文在对“Z”型带冠叶片进行模化时全部采用三维实体单元(见图 1)。利用程序良好的接口在 AutoCAD 中创建叶片实体模型, 然后传输到前处理程序中进行有限元离散。由于叶片顶部带有“Z”型叶冠(见图 2), 单元连接较难, 本文作者工作中充分使用 Patran 前处理器的强大功能, 利用分层功能成功地解决了突变结构的单元连接问题, 使复杂、耗时的前处理工作得到简化。

### 4.2 叶冠边界条件处理

叶冠边界采用罚单元法。罚单元法的思想是把以数学关系式表示的约束条件当做一种新型单元的数学模型, 通过一种假设的能量关系式, 利用能量原理获得该类型单元的刚度矩阵和载荷向量, 然后将其合入总刚度矩阵和总载荷向量中进行求解。

罚单元法是一种处理结构约束问题的方法, 适

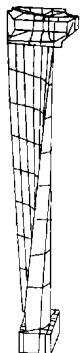


图 1 叶片有限元模型

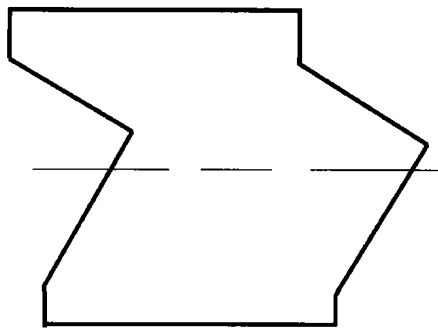


图 2 “Z”型叶冠图

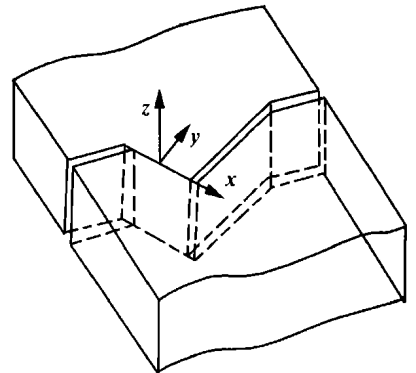


图 3 计算用坐标系

用于结构的动、静态分析中的一些比较复杂的约束关系, 可以使约束处理简明、统一。

## 5 计算结果及分析

### 5.1 单只叶片的静、动特性

单只叶片的动力特性是一系列计算分析的基础, 结果见表 1。其中动频设定转速为 5 467 r/min 的叶片固有频率。

表 1 单只叶片的静、动特性

阶次	1	2	3	4	5	6
静频/Hz	287.5	719.6	1 579.9	1 614.1	3 519.1	4 268.3
动频/Hz	350.2	746.3	1 590.2	1 676.1	3 551.0	4 321.6

### 5.2 叶冠受力分析

冠间受力分析可以帮助我们理解叶片工作时叶冠的受力情况及叶片冠间的“紧度”。“紧度”表征叶片工作时发生弹性扭转后叶冠接触面的“重叠量” $\Delta J$ 。实际上, 由于接触面的刚性和不可楔入, 当发生弹性扭转时, 因相邻叶片的相互制约, 叶片两接触点正压力产生的力偶与叶片扭转恢复的力矩相平衡。 $\Delta J$  实际上反映了冠间的接触力的大小。由于“紧度”的这种物理意义, 对“紧度”的研究可以为带冠叶片预扭设计提供数值依据。

取三只相邻的叶片进行叶冠间受力分析, 边界条件采用罚单元法, 叶冠间用 GAP 单元连接, 坐标系参见图 3, 工作转速为 5 467 r/min, 计算结果列于表 2。

表 2 叶片叶冠间受力情况

反向弹性 扭角 $\alpha / (^\circ)$	冠间节点 受力 / N	接触面压 强 / MPa	冠间滑动			紧度 / mm
			x / mm	y / mm	z / mm	
0.2	143	1.49	0.25	0.0	0.05	0.08

“紧度”的增加可提高叶片间接触面的正压力。为分析“紧度”对叶片应力的影响,取初始紧度  $\Delta H = 0.1 \text{ mm}$ 、 $\Delta H = 0.5 \text{ mm}$  和  $\Delta H = 1 \text{ mm}$  三种情况进行分析。初始紧度为  $0.1 \text{ mm}$  时的叶片内背弧最大应力值为  $206.5 \text{ MPa}$ ; 初始紧度为  $0.5 \text{ mm}$  时叶片的最大应力值为  $220.7 \text{ MPa}$ ; 初始紧度为  $1 \text{ mm}$  时叶片的最大应力值为  $301.2 \text{ MPa}$ 。对比三个初始紧度的结果发现,初始紧度增加了叶片的应力水平。另外,初始紧度引起叶冠接触面正压力的变化,造成接触面挤压压强的大幅增加,这也是不容忽视的。综合上面分析,在进行预扭带冠叶片设计时应将紧度、应力及阻尼面的磨损等结合进行考虑,以设计出最安全、可靠的带冠叶片。

### 5.3 叶片整圈动力特性分析

叶片整圈振动计算结果见表 3。

表 3 叶片整圈振动特性

	$M_0$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
静频/Hz	288.6	393.4	418.7	424.4	426.5	433.7	439.0
动频/Hz	351.3	440.4	463.4	468.7	470.5	477.5	481.8

另外,计算了叶片  $B_0$  振动。叶片振动坎贝尔图如图 4 所示,为分析方便,图中给出了  $A_0$  型振动的动频曲线。

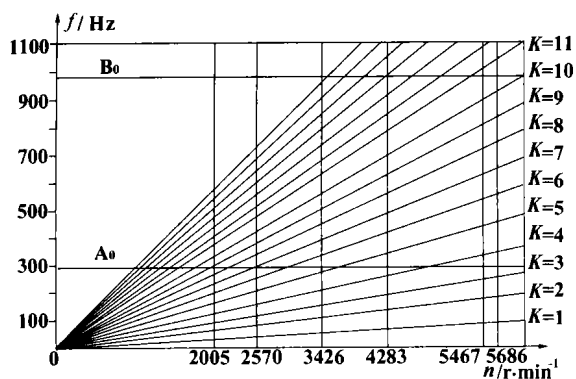


图 4 叶片振动坎贝尔图

带冠叶片工作时叶冠间有一定“紧度”,叶片呈整圈特性,此时叶片最低振动频率是  $B_0$  型振动。从坎贝尔图可以看出,虽然船用机组工况较多,但  $B_0$  振动频率较高,叶片已在  $K=8$  以上的区域工作,也不会发生低频三重点共振。在坎贝尔图上也示出了  $A_0$  型振动,这是考虑到万一叶冠因长期工作磨损而丧失了“紧度”时,叶片将发生  $A_0$  型振动,因此也要适当兼顾。综合以上的分析我们认为:本叶片有效地避开了主要共振转速,因而可以认为是合理和可靠的。

## 5 结论

(1) 船用汽轮机的安全性是首要的基本要求,采用带冠叶片可以提高船用汽轮机的运行安全和可靠性,带冠叶片是汽轮机很有发展前景的新技术之一。

(2) “紧度”是鉴别叶片阻尼结构设计合理性的物理量。弹性扭转引起的“紧度”值是“紧度”的主要来源,但当叶冠结构确定时,预扭是改变叶冠工作状态“紧度”的唯一办法。

(3) 罚单元法是处理非线性边界条件的一种简明有效的方法。通过对叶冠间受力及滑移的计算分析,再现了叶冠间的滑移特性,利用该方法计算了整圈叶片振动的模态。

### 参考文献:

- [1] 闻雪友. 叶片弹性扭角的试验研究[J]. 透平锅炉, 1982(5): 1-4.
- [2] 日利茨基. 汽轮机零件的结构与强度计算[M]. 李启恩, 应凌翔译. 北京: 机械工业出版社, 1959.
- [3] 曲圣年. 组织结构有限元分析的罚单元法[J]. 固体力学学报, 1982(4): 555-559.

(辉 编辑)

## 新技术

## 用于燃气轮机工业的激光焊

据《Turbomachinery International》2001年9-10月号报道,激光焊是一种由激光束产生能量用于熔化两个金属材料、形成焊接熔池并使两个零件之间产生粘接的过程。此焊接过程已在各种工业中得到广泛的应用。

激光束焊接的优点是最小的热影响区;可重复的CNC(计算机数控)过程;由于集中的热输入产生最小的变形;相对便宜的工具费用;适用于各种焊接接头设计(搭接接头、对接接头、点焊等);能够使焊透深度在合理的公差范围内;能够达到很高的焊接深度与焊接宽度之比。

此外,激光焊在要连接的两个部件之间产生一个真正的金属粘接。

激光焊用于燃气轮机的燃烧火焰筒、导流片、叶冠、密封和点火器等零部件的焊接。

激光束焊的缺点是焊接深度小,仅为  $6.35 \sim 12.7 \text{ mm}$ 。

(思 娟 供稿)

mid air turbine cycle, off-design operation, performance analysis

船用汽轮机带冠叶片动力特性研究 = **A Study of the Dynamic Characteristics of Marine Steam Turbine Shrouded Blades** [刊, 汉] / LI Jian-zhao, WEN Xue-you, LIN Zhi-hong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), YU Zeng-bo (Harbin Steam Turbine Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 126 ~ 128

With the help of a large-sized finite-element general program MSC/NASTRAN the dynamic characteristics of the shrouded blades of a steam turbine are studied and the treatment of boundary conditions, the "tenseness" between shrouds as well as the load-bearing conditions of the blades discussed. In addition, the analysis of a specific example is conducted to expound the above-cited points. **Key words:** steam turbine, shrouded blade, vibration, finite element

叉排圆柱阵列自由段及顶端对流传热研究 = **Research on the Convection Heat Transfer of the Free Section and Top of a Staggered Cylindrical Array** [刊, 汉] / DONG Hua (Environmental Engineering Department, Qingdao Institute of Architectural Engineering, Qingdao, China, Post Code: 266033), KARNI J (Department of Environmental Science & Energy Research, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel, Post Code: 76100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 129 ~ 131

A staggered cylindrical array represents a major structural form of heat exchangers for a solar energy-based thermal power station. Various zones inside a heat exchanger have different heat-exchange features. The authors have studied the free end flow and heat exchange characteristics of the staggered cylindrical array and derived the fitting formula of non-dimensional heat-exchange thermal parameters of the free section and top end. The results of simulation through the use of a multi-zone and continuous model are in good agreement with test data. **Key words:** free section, top end, staggered cylindrical array, convection heat exchange

固体废弃物热解半焦特性的研究 = **A Study of the Pyrolytic Semicoke Characteristics of Solid Waste** [刊, 汉] / LI Ai-min, WANG Zhi (Shenyang Aeronautical Industrial Institute), LI Shui-qing, YAN Jian-hua, CEN Ke-fa (Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 132 ~ 138

Studied is the chemical composition and reaction activity of pyrolytic semicoke of solid waste. The property of the material itself and the final temperature of the pyrolysis will have a direct influence on the productivity of semicoke, the residual quantity of such elements as C, H, N and S in the semicoke as well as the reaction activity of CO<sub>2</sub> of the semicoke. Moreover, under identical conditions and on the basis of component ratio the algebraic sum of mixed material and that of single material are approximately equal. **Key words:** solid waste, pyrolysis, semicoke, rotating kiln, reaction activity

H<sub>2</sub>O—O<sub>2</sub> 自由基簇射结合化学吸收脱除烟气中的 NO<sub>x</sub> = **Removal of NO<sub>x</sub> from Flue Gases by DC Corona H<sub>2</sub>O—O<sub>2</sub> Radical Shower in Conjunction with Chemical Absorption** [刊, 汉] / LIN He, GAO Xiang, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa (Thermal Energy Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 139 ~ 142

A study is performed of the removal of NO<sub>x</sub> from flue gases by DC corona H<sub>2</sub>O—O<sub>2</sub> radical shower in conjunction with alkali solution (26% by weight of NaOH in water) scrubbing. The results of the study show that a steady streamer corona can be obtained by adjusting the flow rate of oxygen fed into nozzle electrodes. The vapor in the oxygen exercises an influence on the V-1 characteristics of the corona discharge. Both HNO<sub>2</sub> and HNO<sub>3</sub> are simultaneously generated in a reactor