

# 某三元流长叶片振动特性的计算与分析

(哈尔滨七〇三研究所) 高春山 李桂英 刘玉洁 邹积国  
(大庆石油管理局钻井二公司) 孟翔

**[摘要]** 运用有限元方法对三元流长叶片的振动特性进行了分析计算,特别对三元流长叶片的根部约束形式进行了深入探讨,并得出叶片振频与根部约束形式之间的关系,为进一步分析三元流长叶片的断裂原因确定了依据。

**关键词** 三元流 叶片 有限元 振动

**中图分类号** TH443: O321

## 1 引言

本文是理论计算与工程实际相结合的典型例子,某电厂锅炉轴流送风机在投产后不到两年的时间里,共发生动叶片断裂事故六台次,叶片的断裂程度比较严重,影响了电厂生产的正常运行,增加了电厂的运行费用。受电厂委托,对风机三元流叶片的振动特性进行了细致的分析,并得出了结论,为风机的维护和运行提供了技术依据。

## 2 计算原始资料与力学模型的建立

### 2.1 三元流长叶片材料及物理性能:

动叶片材料	ZL402
密度 ( $N/mm^3$ )	$2.85 \times 10^5$
泊松比	0.34
弹性模量 ( $N/mm^2$ )	$7 \times 10^4$
抗拉强度 (MPa)	222

### 2.2 三元流长叶片力学模型的建立

首先采用德国最先进的三维坐标测量型线仪器对实际三元流叶片进行测绘,得到了叶片 8 个截面的型线坐标点,每个截面的坐标点  $495 \times 3$  个,共 11 880 个数据,然后将这些数据输送到计算机中进行数据处理,绘制出叶片的各个截面的型线图,最后模拟出整个叶片的立体图形,建立起计算的力学模型。所建立力学模型的重量与实际叶片的重量相等,证明所建立的力学模型与实际叶片相符。

本次计算叶片的有限元模型共分为 1 404 个节

点,908 个单元。

### 2.3 三元流长叶片的根部约束形式

对叶片根部的约束,一般是将长叶片的根部截面进行完全约束,来进行计算的。本文为得出长叶片根部约束形式与叶片振频之间的关系,共采用了六种不同的叶片根部约束形式,它们分别为:

a 叶片底座四个螺栓位置为约束点,进行完全约束;

b 叶片底座四个螺栓位置为约束点,其  $x y z$  三方向为  $10^6$  刚度的弹簧元;



图 1 叶片一阶振型图



图 2 叶片二阶振型图

c  
叶片底座四个  
螺栓位置为约  
束点, 其  $x y z$   
三方向为  $10^7$   
刚度的弹  
簧元;

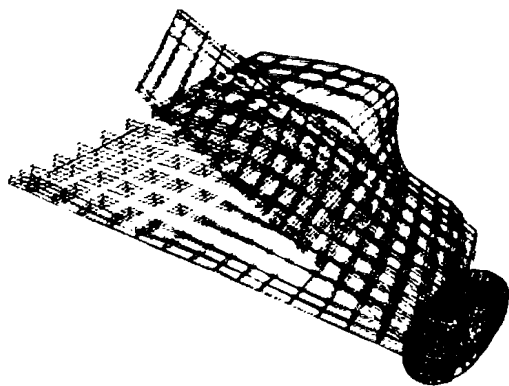


图 3 叶片三阶振型图

d 叶片底座四个螺栓位置为约束点, 其  $x y z$  三方向为  $10^0$  刚度的弹簧元;

e 对叶片根部截面进行完全约束;

f 对叶片底座的底面进行完全约束;

### 3 叶片的振动特性计算与分析

#### 3.1 三元流叶片的振型图

以叶片底座四个螺栓位置为约束点, 进行完全约束的振型为例, 见图 1~ 图 3

#### 3.2 叶片根部约束形式与振动频率的关系

通常而言, 振动物体的边界条件处理形式不同, 对振动体的振动频率都会产生很大影响, 所以边界约束条件处理的真实与否, 就关系到计算结果的准确性. 因此, 就应特别关注三元流叶片根部约束形式, 使之与实际情况基本相符. 本文共采用六种不同的叶片根部约束形式对三元流叶片振动频率分别进行计算, 从而得以确定三元流叶片根部约束形式对三元流叶片振频的影响情况, 为进一步的分析打下了基础.

叶片根部约束形式与叶片振频的关系

约束形式	一阶振频	二阶振频	三阶振频
a	64.89	230.21	359.25
b	58.9	205.7	346.1
c	60.96	222	352.9
d	63.2	229.2	356.6
e	65.9	241.6	362.3
f	64.9	238.1	359.8
与 a 相比的最大相对百分比	9.2	10.6	3.6

由上表可见, 通过改变叶片根部的约束条件, 三元流叶片的振频也相应发生变化, 各种约束条件下三个振频与第一种约束形式下振频 (a) 的最大相对

百分比为 10.6%, 也就是说, 根部约束形式是不容忽视的, 但从相对百分比可见, 其变化也不算太大, 就不严格要求而言, 可基本反应叶片的振频趋势.

另外, 也可看到, 随着根部约束条件的减弱, 三元流叶片的三阶振频都有减小的势头, 实际上, 叶片是用螺栓固定在叶片底座上的, 其刚度应在  $10^6$  以上, 所以据此就可进行定性的分析.

#### 3.3 引起叶片振动的激振力类型

##### 3.3.1 机械激振力的影响

所谓机械激振力就是指转动或传动零件, 产生的交变力和力矩. 对风机而言, 主要是由于转子不平衡引起的. 其激振频率

$$f^B = K_m \cdot n$$

$K_m$ ——结构系数

$n$ ——发动机转速

因周期性的激振力都具有这样的特性, 它是由无数个简谐波所组成. 如果按傅里叶级数展开, 其公式为

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(k_1 t + H_1) + A_2 \sin(2k_1 t + H_2) + \dots + A_n \sin(nk_1 t + H_n)$$

式中  $A_0$  为一常数, 是不变的力, 其余各项为简谐波, 它们的频率之间成倍数关系,  $f(t)$  为力 (脉冲), 是多个简谐波叠加之和, 式中  $A_1 \sin(k_1 t + H_1)$  为主振力, 也称为第一阶谐波激振力, 其频率  $k_1$  称为基波频率, 简称基频.  $A_2 \sin(2k_1 t + H_2)$  称为二阶谐波振力, 其频率  $k_2 = 2k_1$  为基频的二倍, 力幅为  $A_2$ . 同理, 其余各项为高阶谐波激振力, 各激振力的频率为基频的  $n$  倍. 各激振力的力幅 (能量)  $A_i$  随谐波阶次的增高而减小. 但是由于这个级数本身的特性, 各高次项收敛较慢, 高次项力幅下降也较慢, 致使高次谐波振力往往也具有较大激振能. 正因如此, 当激振力的频率等于叶片自振频率的整倍数时, 也引起叶片“共振”, 这时的共振亦称之为谐共振.

因风机转速  $n = 1490/60 = 24.83$  Hz, 所以叶片的各阶振型的固有频率不能是发动机转速的整数倍. 通常当其倍数大于 6 时, 因力幅  $A_6$  已减小, 其激振力影响不大, 就不再给予考虑.

为安全起见, 需保证工作转速与各阶共振转速离开一定距离, 一般用百分比表示

$$\Delta n = (n_s - n_{gz}) / n_s \times 100\%$$

按规定  $\Delta n$  应满足下列要求

- $i = 1$ 时  $\Delta n_1 \geq 15\%$
- $i = 2$ 时  $\Delta n_2 \geq 15\%$
- $i = 3$ 时  $\Delta n_3 \geq 8\%$

### 3.3.2 尾流激振力的影响

尾流激振力主要是气体力所造成,尾流激振力的激振频率为

$$f_B = Kn_s$$

其中:  $K$  是导叶数,此例为 16个.

$$\text{则 } f_B = 16 \times n_s = 16 \times 1490/60 = 397.3\text{Hz}$$

一般而言,对于动叶片的共振频率,按规定一阶弯曲振动,二阶弯曲振动及一阶扭振不得与此干扰力频率重合,以避免发生共振事故

## 4 结论

(1) 叶片共振图

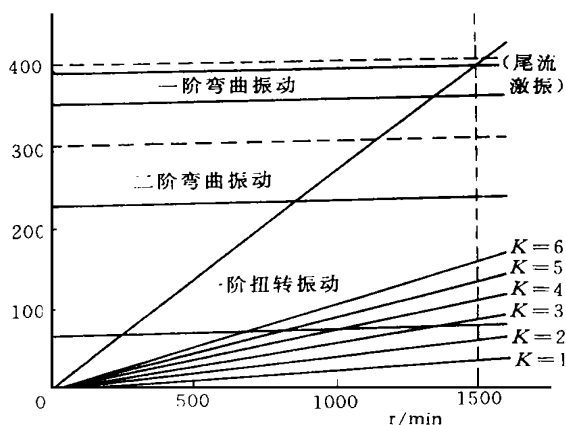


图 4 三元流叶片的共振图

-----  
一阶扭转振动频率带

### (2) 结果分析

根据计算出的叶片固有频率值和三元流叶片的共振图,对机械激振力而言,不存在产生共振的可能.

对尾流激振力而言,其第三阶振型频率

$$\alpha f_{d3} = 359.03\text{ Hz}$$

$$\Delta n_3 = (d_3 - f_B) / f_B \times 100\% = 9.63\%$$

$$d \Delta n_3 = 12.8\%$$

风机专业标准中规定,动叶的各阶固有频率应

避开激振频率的 15% 以上,由于  $\Delta n \leq 15\%$  可以确定,对第三阶振型而言,尾流激振可产生动叶片的共振.当风机运行时一些叶片处于共振引起较大的响应,局部就有足以引起破坏的动应力.

(3) 三元流长叶片断裂图片



图 5 现场叶片断口照片

通过以上的计算分析,我们认为风机动叶片断裂原因是由以下两方面原因综合促成的

- a. 叶片材料铸造有缺陷
- b. 叶片的三阶振动与尾流激振产生共振.

### 参考文献

- 1 周仁睦. 汽轮机叶片疲劳断面及事故分析. 中国机械工程学会第二届全国动力机械年会论文集, 中国工业出版社, 1964.
- 2 陆颂元. 汽轮发电机组大不平衡非线性振动与轴系事故. 汽轮机技术, 1994(6): 7-13.
- 3 安宁, 孟庆集. 汽轮机叶片激振因子和阻尼分析. 动力工程, 1994, 14(6).

某三元流长叶片振动特性的计算与分析 = **Calculation and Analysis of Three-dimensional Long Blade Vibration Characteristics** [刊, 中] / Gao Chunshan, Li Guiying, Liu Yujie, Zou Jiguo // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 348~ 350

By using a finite element method a calculation and analysis is conducted of three-dimensional long blade vibration characteristics, especially with an in-depth exploratory study of constraint form of the three-dimensional long blade root portion. The relationship between the blade vibration frequency and the root portion constraint form was obtained, thus providing a basis for further analyzing the causes leading to the rupture of three-dimensional flow long blades. **Key words** three-dimensional flow blade, finite element method, vibration

低肋横槽管单管外降膜吸收的传热传质模型及计算 = **Heat and Mass Transfer Model of a Single-tube Falling film Absorption Outside a Low Rib Horizontal Channel Tube and its Calculation** [刊, 中] / Liu Cunfang, (Shandong Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(5). - 351~ 353

Presented in this paper is a new mathematical model for calculating the single-tube falling film absorption outside a low rib tube. The liquid outside a horizontal channel tube with a rib assuming the shape of an equilateral triangle and having a height less than 0.5 mm is regarded as consisting of an inner and external layer. Through a theoretical analysis obtained is an analytical solution of the speed, temperature and concentration distribution inside the inner layer liquid film. The external layer is solved by the use of a numerical calculation method. A second order coupling method is adopted for the liquid between the inner and the external layer so that there will be a smooth transition between the inner and the external layer. The speed, temperature and concentration distribution inside the external tube liquid film of this kind of heat transfer tube has been studied by using the above-mentioned mathematical model. **Key words** low rib horizontal channel tube, falling film absorption, heat and mass transfer, mathematical model

电站锅炉通用热力计算程序的编制 = **The preparation of a General Thermodynamic Calculation Program for a Utility Boiler** [刊, 中] / Liu Yangfeng, Lu Yukun, Wang Jun (North China Electrical Power Engineering University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 354~ 356.

A general thermodynamic calculation program suitable for medium pressure up to super-high pressure coal-fired boilers has been developed by utilizing VB and Fortran language mixed programming. The present paper gives a brief description of the structure of this general program and the approach for solving some key technical problems. The thermodynamic calculation of three boilers of different capacities was also conducted by using the above-cited general program. **Key words** boiler, thermodynamic calculation, program

电厂热力系统工质流量分配计算方法 = **A Study of the Method for Calculating the Working Medium Flow Distribution of a Power Plant Thermodynamic System** [刊, 中] / Yan Shuibao (North China Institute of Water Resources and Hydropower) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 357~ 359