

# 某型汽轮机转子热应力的计算和分析

徐宜桂 胡德明

(武汉海军工程学院)

〔提要〕 本文运用有限元子结构法和有限元—边界元联合算法,在IBM微型机上计算和分析了某舰用主机全锻转子冷态紧急启动时的热应力变化情况,得到了一些有益的初步结论。

主题词 汽轮机 热应力 计算 有限元法 边界元素法

## 一、前言

对转子热应力的计算问题,自五十年代中期就已提出。然而,由于转子结构和求解边界条件相当复杂,用解析方法往往只能得到一些近似的计算结果,难以满足工程实际的需要。直到七十年代,随着电子计算机和有限元法等数值计算方法的发展,这一问题才在国外某些大型制造厂家和研究机构得到一定程度的解决。近几年来,国内有关单位采用有限元法,也进行了卓有成效的研究。但因计算手段所限,不得不对计算模型进行简化(如仅取调节级部分计算,在其两端截面上人为给定边界条件等)。这些无疑地影响了计算结果的精度。此外,用有限元法计算汽封等处的集中应力也不够方便和有效,而且,往往这些地区的集中应力又正是我们所关心的主要对象。

本文通过改进现有的计算方法,并运用一定的程序实施技巧,在IBM微型机上成功地计算了某舰用主机全锻转子的热应力。从而为不具备大型计算设备的中小型单位和工厂工作人员计算诸如涡轮机转子等大型轴对称工程构件的热应力提供了一条有效的途径,其计算结果也为校核现有主机启动条例的合理性和制定最佳紧急启动方式提供了初步的技术依据。

## 二、计算方法和计算程序

### (一) 计算方法

本文收到日期:1986年12月18日

1. 运用有限元子结构分析方法克服微型机内存容量的限制,以避免在计算结构模型上的简化。

子结构分析方法是六十年代后期, *Przemieniecki*, *Dar* 等人为实现用小机解大题而发展起来的,现已广泛地应用于固体力学的计算中。文献 [1] 将其推广到瞬态温度场的求解过程中,从而突破了计算转子热应力时,微型机内存不够的困难,避免了计算结构模型的简化。事实上,从全锻转子的结构型式上看,它也特别适宜采用子结构方法。把几何尺寸相同的各级叶轮视为同一子结构,并把叶轮的全部单元作为内部单元来计算子结构的刚度矩阵元素,则各级叶轮可反复调用同一子结构的刚度矩阵。至于各级叶轮物性及边界条件的差异对子结构刚度矩阵的影响,则采用附加修正计算的方法。由于转子中各子结构是串联的,可以采用依次组装、凝聚、回代的方法<sup>[1]</sup>,从而使对计算机内存容量的要求进一步降低到只要对其中最大子结构能执行凝聚和回代运算的水平。显然,这是一般微型机不难达到的。

运用子结构分析方法,在克服计算机内存容量限制的同时,亦大大减少了输入数据和计算时间。

2. 用有限元一边界元联合方法解决局部区域集中应力的计算问题。

边界元法是七十年代发展起来的新型数值计算方法,尤其适于求解应力集中等问题。但对应力变化平缓的区域有时还没有有限元法有效。本文根据转子大部分区域应力变化平缓,仅在少数地方出现应力集中的情况,运用有限元子结构法首先求出全部区域的热应力(包括应力集中处的名义应力),并提供指定局部地区(该处产生应力集中)的部分位移边界条件,然后应用求解精度较高的直接边界元法,计算局部模型,以保证该处的计算精度。此处没有采用目前常用的有限元一边界元耦合求解方式,是由于兼顾了计算机内存和计算精度所致<sup>[2]</sup>。

3. 合理组织计算过程,实施计算程序

整个计算程序共4000余条语句,显然一次装入内存完成计算是不可能的。为此,将其分为五个独立的程序置于外存,通过BAT文件组织它们按需要分别进入内存参加运算。程序之间的计算数据采用数据文件传递。同一程序中的计算数据亦基本放于外存,按需要自动分批进入内存运算或退出。此外,在内存中,按一维变带宽方式存放有关矩阵元素,且同一数组名作多种用途等等,以尽量节省计算内存,保证程序实施。

## (二) 计算程序

按上述计算方法编制了轴对称体瞬态、准非线性温度场、有限元应力场以及边界元局部应力的计算程序(由五个相关的程序,即PR0.1, PR0.2, PR0.3, PR0.4, PR0.5组成)。该程序先在IBM微型机上用有解析解的计算模型检验通过。计算流程如图1所示。

各子程序的功能参见文献 [2]。

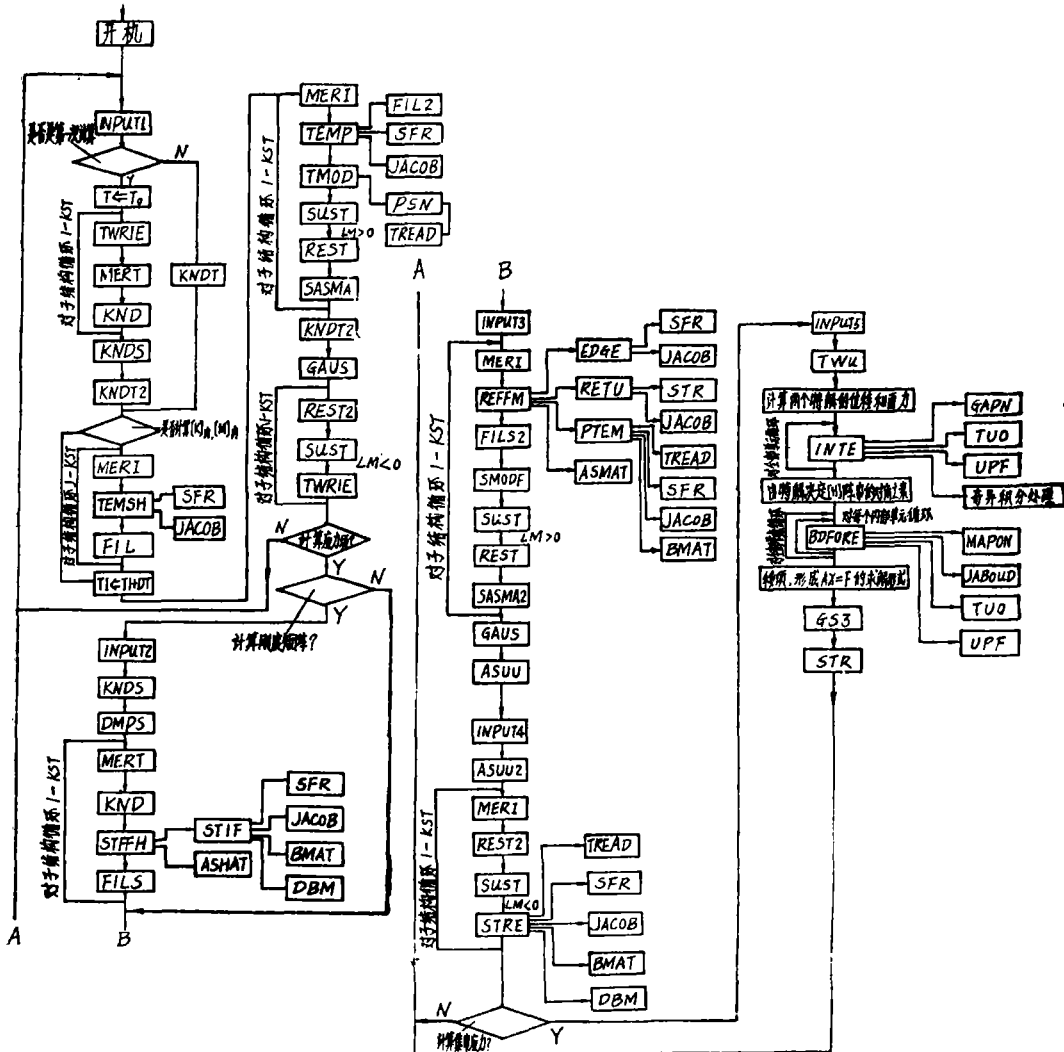


图1 计算程序框图

### 三、计算模型

#### (一) 计算网格的划分

对整根转子划分成11个子结构(图2), 其中第3、4、5、6、7五个子结构和第9、10两个子结构分别具有相同的几何形状和结构尺寸。

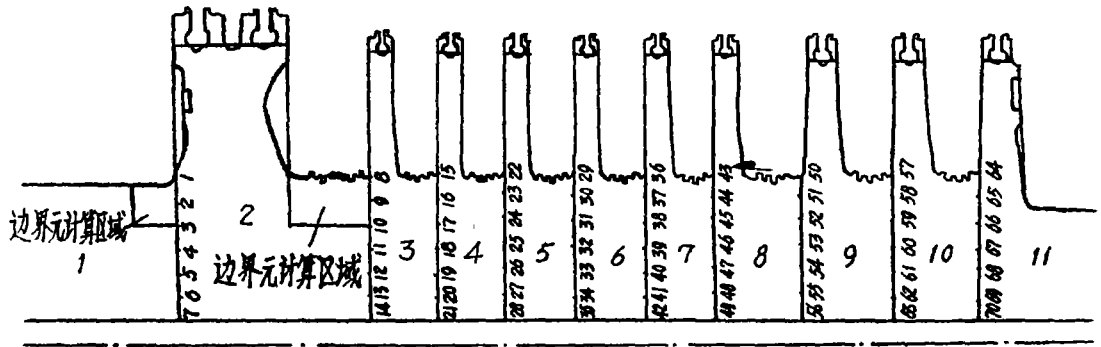


图2 整段转子的结构划分及整体节点编号

各子结构内计算单元的划分和整体节点的编号均类似于图3、图4。

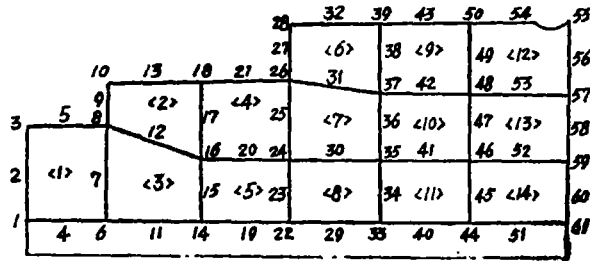


图3 第1个子结构及节点编号

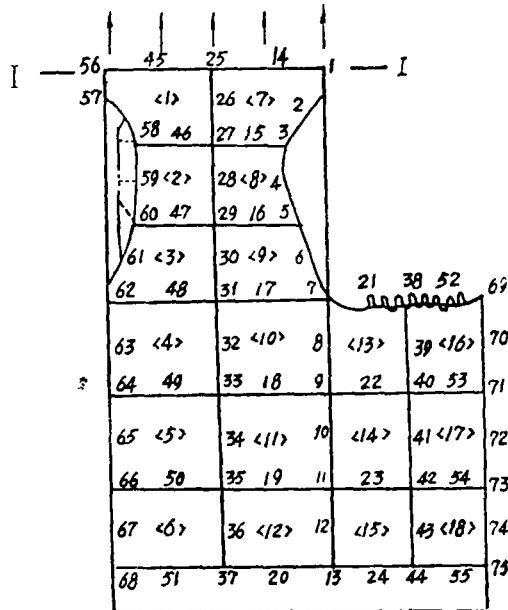


图4 第二个子结构及节点编号

局部计算模型取为第1个子结构的第12个单元(图5)和第2个子结构的第12、13两个单元(图6)。

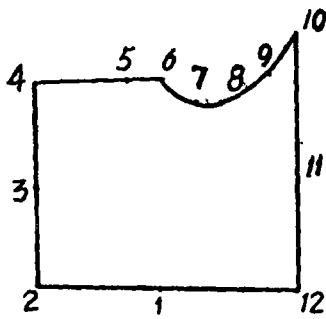


图5 边界元计算模型

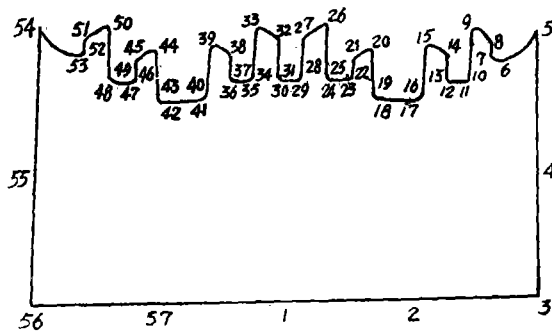


图6 边界元计算模型

对于前者,在调节级轮面与轴的过渡段处划分4个边界单元,而且节点1~5和10~12的位移值由有限元计算提供。对于后者,则在汽封部份划分49个边界单元,且节点1~5和54~57的位移值同样由有限元计算提供。

### (二) 计算的启动方式

不考虑汽封进汽及试车对转子加热的影响,而假定转子由初始温度20℃开始启动,为便于利用原热力计算<sup>[3]</sup>提供的热力过程,计算的启动方式如图7、B所示,可见,计算启动方式1、2均接近条例规定的启动方式,计算启动方式3则偏于冒进。

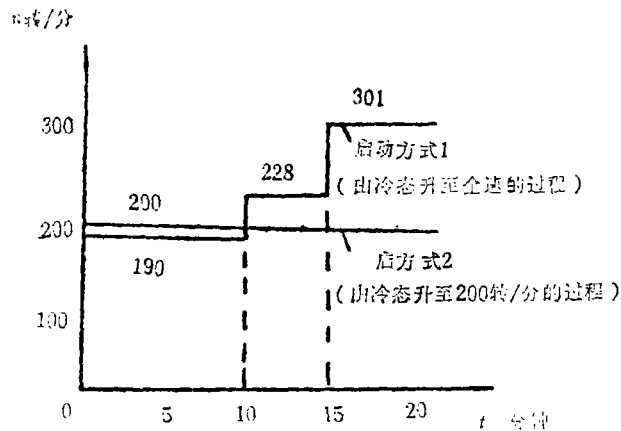


图7 A、条例规定的启动方式

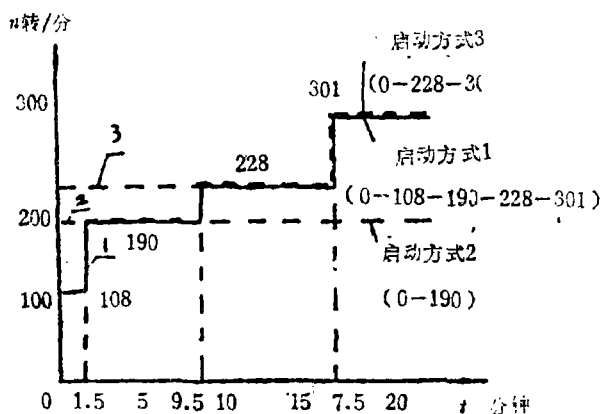


图7 B、计算的启动方式

### (三) 面力边界条件

在计算模型中, 轮缘部份仅取至 I—I 截面(图4), 为计入该截面以上部份的影响, 首先按(1)式计算出 I—I 截面上的径向应力, 然后作为外力施加到计算模型中去。

$$\sigma_R = \frac{Z\Sigma C + \frac{2}{3}C_{r,m}}{4\pi Rb} \quad (1)$$

其中:  $Z$ 为叶轮上的叶片数,  $b$ 为轮缘每侧宽度,  $R$ 为 I—I 截面处的半径,  $\Sigma C$ 为整个叶片的离心力,  $C_{r,m}$ 为 I—I 截面以上轮缘部份的离心力。

计算模型的其余边界处均认为外力为零。

### (四) 热传导边界条件

轴颈表面:

按第一类边界条件给出, 取其温度为 $50^\circ\text{C}$ ,

轴孔表面:

按绝热边界条件给出, 即取放热系数为零。

叶轮两侧:

其放热系数采用轮盘在外罩中旋转的经验公式:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{0.675\lambda R_{ef}^{0.5}}{R}, & R_{ef} \leq 2.4 \times 10^5 \\ \frac{0.0217\lambda R_{ef}^{0.8}}{R}, & R_{ef} > 2.4 \times 10^5 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $R_{ef}$ 为雷诺数, 即  $R_{ef} = \omega \frac{2R}{\nu}$ ;  $\nu$ 为运动粘度;  $\lambda$ 为导热系数;  $R$ 为叶轮

半径;  $\omega$ 为叶轮旋转角速度。

轮缘表面:

据文献 [ 5 ] 的推荐值, 放热系数取为  $300 KCal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ 。

隔板汽封:

放热系数采用 *KanuHoc* 教授利用静态模型试验给出的经验公式:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{0.49 \lambda R_{ef}^{0.6} \left(\frac{\delta}{h}\right)^{0.56}}{\delta}, & 60 < R_{ef} \leq 6 \times 10^3 \\ \frac{0.205 \lambda R_{ef}^{0.7} \left(\frac{\delta}{h}\right)^{0.6}}{\delta}, & 6 \times 10^3 < R_{ef} < 112 \times 10^5 \end{cases} \quad (3)$$

其中: 雷诺数  $R_{ef} = \frac{w \cdot 2\delta}{\nu}$ ;  $w$ 为汽封隙间中的蒸汽流速;  $\delta$ 为汽封间隙;  $\nu$ 为汽封

处的蒸汽比容;  $h$ 为汽封齿腔高度。

因第二巡航工况以上时, 低速级组的汽封处漏汽量很少, 故此时改为如下公式计算:

$$\alpha = \frac{0.1 \lambda R_{ef}^{0.68}}{R} \quad (4)$$

其中: 雷诺数  $R_{ef} = \frac{uR}{\nu}$ ;  $u$ 为转子汽封处的圆周速度;  $R$ 为转子汽封处的半

径。

轴端汽封:

放热系数按(3)式计算。

### (五) 输入数据

转子的结构尺寸及物性参数、热力参数均取自文献 [ 3—4 ] , 此处不再重新列出。

## 四、计算结果及其分析

对于三种计算的启动工况, 转子关键部位(调节级轮面与轴的圆角过渡处, 调节级汽封处, 调节级内孔表面)的应力变化如图8所示。

图8、A对应于第一种启动方式。可见,在第二巡航工况(228rpm)下的启动过程是足够安全的。但从此上升到全航速(301rpm)时,应力发生较大变化。此时内孔表面最大应力达 $5740\text{kg/cm}^2$ ,安全系数仅为1.31,经4分钟后,应力方才开始下降。

图8、B对应第二种启动方式。整个过程均是安全的,只是随着启动时间增加,内孔表面应力上升为最大,这是由于复合应力中机械应力成为主要因素所致。

图8、C对应第三种启动方式。整个启动过程中,内孔表面相对其余两处,应力都是最大,且在由第二巡航工况上升到全工况时,达到最大值 $5968\text{kg/cm}^2$ 。

转子其它各处应力不再给出,部份计算结果可参见文献[2]。

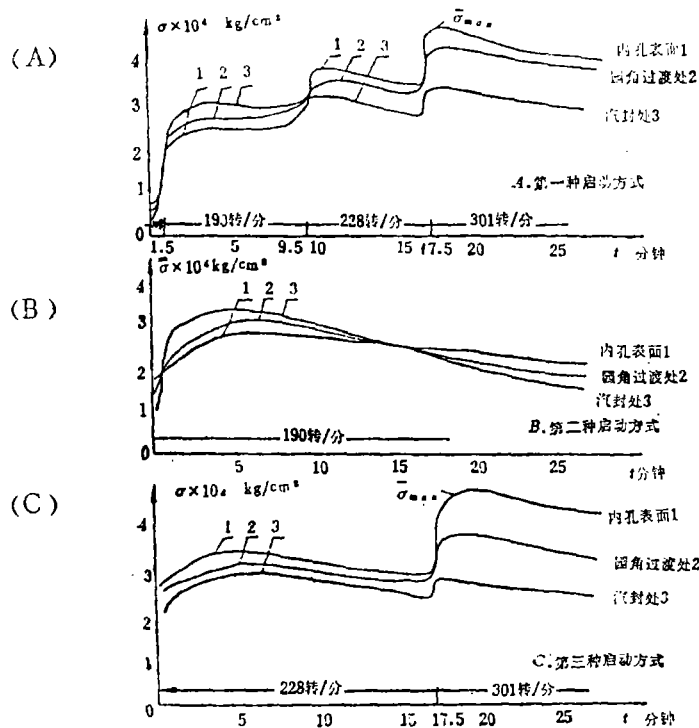


图8 转子关键部位的相当应力变化

通过上述计算和分析,可以得到如下几点初步结论:

1)、转子在启动过程中,最大应力出现在调节级内孔表面。因而,此处应力已视为监控启动过程的主要因素之一。

2)、就主机高压转子而言,由汽态直接启动到第二巡航工况,原则上不受时间限制。

3)、在由冷态升至全速的过程中,需在第二巡航工况附近稳定运行一段时间,以避免升至全速时调节级内孔表面出现过大的复合应力。

4)、原启动条例所规定的,在 $100-200\text{rpm}$ 间某转速下稳定运行10分钟的时间似嫌过长,而在 $200-250\text{rpm}$ 间某转速下,只稳定运行5分钟的时间似感不足。



参 考 文 献

- [1] 胡德明、徐宜桂. 求解瞬态温度场的有限元子结构方法, 海军工程学院, 1986. 6
- [2] 徐宜桂. 计算涡轮机转子瞬态温度场、应力场的有限元子结构法和边界元法, 海军工程学院硕士论文, 1986
- [3] 23号机组的热力计算. 1961
- [4] 23号机组的强度计算(一). 1961
- [5] 西安交通大学、浙江大学, 大型汽轮机启停及试验调整, 电力工业出版社, 1981

THE CALCULATION AND ANALYSIS OF THERMAL  
STRESSES IN A STEAM TURBINE ROTOR

Xu Yigui and Hu Deming  
(Wuhan Naval Engineering Institute)

Abstract

By employing the finite element substructure method and combined finite element-boundary element calculation method, the thermal stress variations of a naval steam turbine solid rotor during a crash cold start - up has been calculated and analysed by use of a IBM microcomputer with some instructive preliminary conclusions being obtained.

**Key words:** steam turbines, thermal stresses, calculations, finite element method, boundary element method.