

# 基于参数化建模的转子有限元剖分

王璋奇, 安利强, 彭震中

(华北电力大学 机械工程系, 河北保定 071003)

**摘要:** 分析汽轮机转子的结构特点, 将汽轮机转子结构参数化, 提出了汽轮机转子参数化建模的方法, 提高了转子原始几何模型的输入效率和准确性。利用有限元网格生成的 Delaunay 三角化方法, 得到了汽轮机转子二维有限元计算模型, 生成的有限元网格大小均匀, 疏密过渡平滑, 没有奇异单元, 从而保证了转子温度场和热应力有限元分析计算的精度。

**关键词:** 汽轮机转子; 参数化; 建模; 剖分

中图分类号: TK263.6<sup>+</sup>1 文献标识码: A

## 1 前言

汽轮机在启停或负荷变动时, 转子内部将产生较大的温度梯度并产生热应力, 汽轮机转子热应力是汽轮机设计及运行规程制定以及操作运行人员关心的重要问题之一。由于转子结构、传热边界的复杂性, 转子温度场、热应力场的详细分析一般采用有限单元法。有限元分析的前处理部分主要包括原始几何图形的输入、网格剖分、材料性质、边界条件等, 而这些工作已经成为有限元分析中最耗时的工作。在大型通用有限元分析系统中, 用普遍的有限几种绘图命令完成复杂几何图形的输入, 形式上虽然灵活多样, 但当实际工程问题的几何模型复杂时, 输入方法则显得烦琐, 而且准确性也降低, 有时由于原始几何模型的误差过大甚至导致无法进行自动剖分, 限制了有限元法在工程中的应用<sup>[1]</sup>。

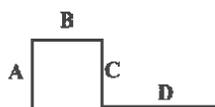
作者在前处理方面作了一些探索, 结合多年转子应力有限元分析经验, 针对转子的结构特点, 采用了参数化的有限元建模方法, 使原始几何模型的输入工作量减少到最小程度。在软件中, 建立了转子的主要结构图形库, 如轴封、弹性槽等, 原始几何图形的输入采用图形、对话框式输入, 用户只需选择要绘制

的结构图形, 输入主要特征参数, 由软件自动绘制主要结构原始图形。采用此方式输入时, 图形出错率低, 建模速度快。

Delaunay 三角化方法适应于事后的网格局部加密, 通过在原有网格的基础上插入新节点, 然后进行 Delaunay 算法处理, 便可获得满足最大—最小角判据的有限元网格<sup>[2]</sup>。基于此方法, 本文作者提出由边界加密因子控制边界权函数, 由此控制边界节点的密度, 实现边界节点的疏密过渡。由边界节点控制开端网格的密度, 在此基础上生成的内部单元的密度也由边界的加密因子控制, 可以获得保证计算精度的疏密过渡均匀的有限元网格。

## 2 参数化建模方法

汽轮机转子为轴对称零件, 为了防止漏汽, 在各级隔板部位有许多的轴封。转子的轴封部位多数开设弹性槽(防热槽), 其目的是当转子与汽封片偶然发生摩擦时, 用以补偿因转子表面局部过热而引起热膨胀, 以减轻转子的变形。由于这些结构的存在, 使汽轮机转子结构复杂, 在有限元建模时, 需要



(a) 参数图



(b) 高压转子前轴封

图 1 300 MW 汽轮机转子轴封

输入较多复杂形状的结构尺寸。本文研究了汽轮机转子的结构特点, 虽然其结构复杂, 但都有相似性, 如轴封, 同一根转子各处轴封的结构是相似的, 只是具体的结构尺寸不同。根据这一特点, 作者提出了转子参数化建模的方法。

### 2.1 轴封的参数化建模

轴封是汽轮机转子中重要的结构,其形状复杂,但结构相似。作者建立了常用转子的轴封结构图库,提取出轴封建模需要的特征参数,实现了轴封的参数化输入。用户在使用时,选择所分析转子的轴封结构图,输入其特征结构参数,即可完成转子有限元模型中最复杂结构的输入。而且输入过程采用‘图形—参数’对照的方式,输入简便、准确。

国产 300 MW 汽轮机转子轴封结构如图 1 所示。其主要的特征参数为起始坐标,及 A、B、C、D 长度。输入其特征参数及其重复的个数,软件自动计算生成整段轴封的边界线和几何参数,并显示完整的轴封图。

### 2.2 弹性槽的参数化建模

弹性槽一般是转子热应力集中最严重的部位之一,是转子热应力分析的重点部位,因而要求其原始几何模型的输入必须准确。300 MW 机组调节级叶根处弹性槽结构如图 2 所示。由于弹性槽一般由若干光滑连接的直线和圆弧组成,过渡圆弧的几何尺寸测量、计算比较复杂,如果按照传统的输入方法,将弹性槽看作是孤立的直线、圆弧组成,用直线、圆弧的输入方法输入,很难保证直线与圆弧的连接连续、光滑。因此弹性槽的输入是转子原始几何模型输入的难点之一。

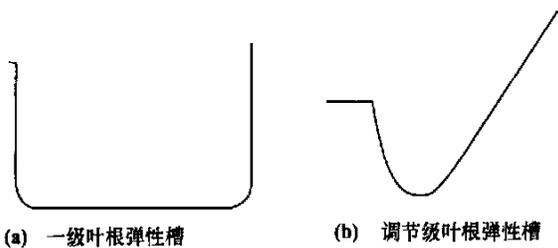


图 2 弹性槽结构图

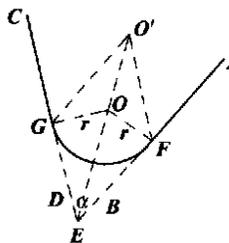


图 3 过渡圆弧

本文作者提出了由两根直线及过渡圆弧半径自动生成直线及相切弧的方法,如图 3 所示,用户只需输入弹性槽的起始点 A 坐标,直线上任意一点 B 坐标,终点 C 坐标,直线上任意一点 D 坐标,过渡圆弧半径 r,软件自动生成弹性槽结构尺寸,并以图形的方式显示,使弹性槽的输入快速、准确。其具体算法如下:

- (1) 由 A、B 和 C、D 的坐标建立 AB、CD 的直线方程,并求出 AB、CD 的交点  $E(x_E, y_E)$ 。
  - (2) 求出 AB、CD 的夹角  $\alpha$ 。
  - (3) 由几何关系知  $\triangle OGE, \triangle OFE$  为直角三角形,考虑到  $|OF| = |OG| = r$ ,可求得  $|OE| = r/\sin(\alpha/2), |EF| = |EG| = r/\text{tg}(\alpha/2)$ 。
  - (4) 由平面几何知识,点 F 分线段 EA 成 EF 和 FA,则可得 F 点坐标  $(x_F, y_F)$ 。同理可得 G 点的坐标  $(x_G, y_G)$ 。
  - (5) 过渡圆弧的圆心 O 必在直线  $OO'$  上,其中  $O'$  是 EF 和 EG 为邻边的平行四边形的另一顶点,据此可得到 O 点的坐标。
- 这样,就确定了图 3 所示的弹性槽的控制点 A、F、G、C 的参数,并可唯一的确定该弹性槽的形状。

### 3 剖分方法

任意形状单连域的剖分方法,国内外学者已提出了许多算法<sup>[2~4]</sup>。作者采用 Delaunay 三角化的算法,并提出了边界权函数控制边界节点生成的方法,此方法生成的边界节点过渡均匀,且由边界节点控制生成的内部节点的疏密过渡也是均匀的。

边界节点的生成算法:

- (1) 首先将所有原始几何参数排序生成封闭的区域(可为单连域或多连域)。
  - (2) 根据给定的单元最大边长及各边界的左右端点加密因子,计算各边界权函数。为保证网格的均匀过渡,各边界的权函数与其相连的边界的权函数相协调,即任意两相邻的边界,其公共端点的权函数应相等。
  - (3) 根据各边界端点权函数,中间边界节点的权函数按级数的规律计算,同时生成边界节点。
- 生成边界节点后,将边界节点连成三角形网格,生成开端网格。其主要步骤如下:
- (4) 取一边界边为起始边,搜索其余边界节点,找到形成的三角形外接圆半径为最小的节点,则形成一单元。
  - (5) 将新增边界为起始边,继续(4)直至剩余全部节点均组成三角形。在形成开端网格时,应保证引入的单元在剖分区域内,在域内的判断方法如式(1)所示。

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{N_k} \theta_i = \begin{cases} 2\pi & \text{点在域内} \\ 0 & \text{点在域外} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $m$  为连通域个数,  $N_k$  为第  $k$  各连通域边界上的边界点数。

在开端网格的基础上, 引入内部节点, 进行网格加密。

(6) 计算边界节点的权函数<sup>[3]</sup>, 按加权平分条件生成内部节点。

(7) 找出外接圆包含新生成节点的三角形, 删除它们, 形成一包含此节点的多边形。

(8) 由新生成的节点与(7)生成的多边形顶点相连, 形成新网格, 此网格满足 Delaunay 三角化准则。

(9) 重复步骤(6)~(8)直至所有节点都不满足加权平分条件, 则网格生成结束。

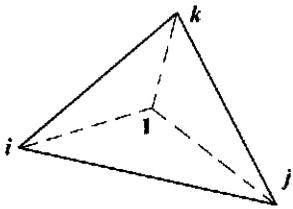


图 4 网格修正

采用本文作者提出的边界节点生成算法, 由边界节点控制内部节点的生成, 并应用 Delaunay 算法剖分可以得到理想的有限元网格, 经将节点移至相邻节点组成的多边形形心的方法, 网格更为理想。但有时在复杂曲线边界附近产生一些不理想的单元, 如图 4 所示就是在实际剖分过程中, 汽轮机转子轴封边缘因边界变化复杂而产生的一种不合理网格情况, 它也是一种 Delaunay 三角形, 但在有限元计算中应尽量避免‘大钝角’的狭长单元, 以提高结果的精度, 对此必须进行处理。此类网格的修正措施为将包含于三个节点内的节点及其组成的单元删除, 得到图 4 中实线单元  $ijk$ 。

## 4 实例

采用面向对象的编程方法, 编制汽轮机转子热应力有限元分析软件, 实现了基于参数化建模的转子有限元剖分。采用本文的参数化建模方法, 建立国产 300 MW 汽轮机转子局部原始几何模型如图 5 所示。采用参数化建模方法后, 转子原始几何模型的输入非常方便, 速度很快, 而且精度很高, 极大的提高了有限元分析前处理的效率。采用改进的 Delaunay 剖分方法, 改善了转子有限元网格, 典型网格模型如图 6 所示。由图可见, 有限元网格在轴封、弹性槽等部位密度大, 在应力变化不大的中心孔表面网格密度小, 网格由小到大过渡均匀, 没有‘狭长’单元, 单元形状均接近正三角形。

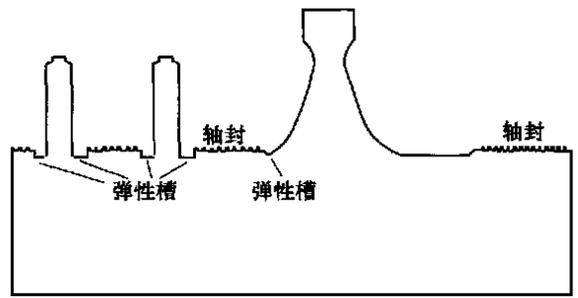


图 5 原始几何模型

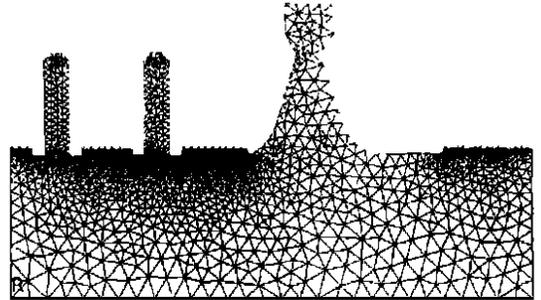


图 6 网格模型

## 5 结论

(1) 作者提出的转子原始模型的参数化建模方法, 极大地提高了模型输入的效率和准确性, 利用此方法可方便地建立转子的几何模型。

(2) 边界权函数控制边界节点生成的方法, 生成的边界节点过渡均匀, 因而由边界节点控制生成的内部节点疏密过渡均匀。

(3) 基于 Delaunay 三角化的网络生成方法, 可方便、迅速地完成转子求解区域的有限元网格生成和加密, 得到疏密过渡均匀的网格。

(4) 采用本文方法, 可得到满意的有限元网格模型, 以保证有限元结果的精度。

## 参考文献:

- [1] 王璋奇, 安利强. 基于 SuperSAP 的有限元前处理接口程序设计 [J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(1): 74-77.
- [2] XU X, PAIN C C, GODDARD A J H, et al. An automation adaptive meshing technique for delaunay triangulation [J]. *Computers Methods Applied Mechanics and Engineering* 1998 161(2): 297-303.
- [3] 袁建生. 一种高性能二维有限元网格剖分软件 [J]. 华北电力学院学报, 1988, 15(1): 38-55.
- [4] 成基华, 范玉青. 二维有限元网格全自动生成 [J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(3): 51-55.

(渠源 编辑)

under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Chun-yuan (Shandong Industrial University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 530 ~ 532

A calculation model of heat and mass balance along with relevant software has been developed, which is fit for both flue gas desulfurization in a circulating fluidized bed (CFB-FGD) and various other kinds of semi-dry type flue gas desulfurization systems. The accurate calculation results of the above-mentioned model and software were verified with the help of a 1 t/h boiler flue gas desulfurization test rig and the operating data of several typical semi-dry type flue gas desulfurization systems currently in operation in China. The calculation model and software under discussion may well be employed for the design, operation and industrial control of semi-dry type flue gas desulfurization systems. **Key words:** semi-dry type flue gas desulfurization, spray drying, calcium-based absorbent, model

旋流煤粉多相流动与燃烧—维数学模型及应用 = **A One-dimensional Mathematical Model for Pulverized Coal Multi-phase Swirl Flow and Combustion and Its Applications** [刊, 汉] / CHEN Chun-ming, ZHANG Jian, ZHOU Li-xing (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 533 ~ 536

With a view to developing an effective way of numerically simulating the multi-phase swirl flow of pulverized coal and its combustion set up was a one-dimensional mathematical model. Built on the framework of a multi-continuum model, the above-cited mathematical model comprehensively takes into account a gas-solid two-phase swirl flow as well as the pulverized coal combustion and heat transfer. It can be used to simulate in a speedy and effective way the pulverized coal multi-phase swirl flow and combustion process, as evidenced by the results of numerical calculation of pulverized coal and gas combustion in the annual duct of a vortex combustor. As a result, obtained were the following main parameters: in-furnace temperature, distribution of pulverized coal flow speed and concentration as well as combustion efficiency, etc. **Key words:** swirl multi-phase flow, pulverized coal combustion, one-dimensional mathematical model, vortex combustor

基于参数化建模的转子有限元剖分 = **Finite-element Meshing of a Turbine Rotor Based on Parametric Modeling** [刊, 汉] / WANG Zhang-qi, AN Li-qiang, PENG Zhen-zhong (Mechanical Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 537 ~ 539

The structural parametrization of a steam turbine rotor was attained through an analysis of its structural features. A method for the parametric modeling of the turbine rotor was put forward, resulting in an enhancement of the inputting efficiency and precision of the rotor initial geometric model. With the use of a Delaunay triangulation method generated by finite element grids a two-dimensional finite-element calculation model has been obtained. The finite-element grids feature a uniform size, a smooth transition in grid refinement and an absence of singular elements. As a result, fully ensured is the precision of finite element-based analytic calculation of the rotor temperature field and thermal stress. **Key words:** steam turbine rotor, parametrization, modeling, meshing

用时间相关法求解定常粘性流场的加速收敛法 = **Accelerating-convergence Approach for Solving a Steady Viscous Flow Field through the Use of a Time-marching Method** [刊, 汉] / ZHANG Yan-ying, WU Meng, SU Jie-xian (Energy Science and Engineering Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), CUI Ming-gen, Department of Mathematics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 540 ~ 542

After a detailed analysis of the CFL number of explicit and implicit scheme it is noted that the key factor influencing the magnitude of CFL lies in a discrete form. To enhance the speed of convergence in solving a steady flow field when a time-marching method is used, it is essential to enlarge the CFL number. Meanwhile, the most direct and effective approach