

# 汽轮机转子二维温度场在线仿真模型建立

刘彦丰, 郝润田, 高建强

(华北电力大学 能源与动力工程学院, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 在一体化过程模型开发平台 (IMMS) 的仿真系统支撑下, 开发了汽轮机转子二维温度场有限元模型的通用仿真算法, 并采用工程模块化的建模方法建立了汽轮机转子二维温度场的在线仿真模型 (便于汽轮机转子和所划分网格几何尺寸的修改)。通过仿真试验与同条件下的二维解析结果作了对比, 结果表明: 所建立的仿真模型具有计算精度高、计算速度快和通用性强等优点。同时, 该模型还可用于其它具有类似边界条件轴对称体结构的热状态分析。

**关 键 词:** 一体化过程模型开发平台; 汽轮机转子; 二维温度场; 在线; 仿真模型

中图分类号: TK267 文献标识码: A

## 引 言

汽轮机转子是影响机组寿命的关键部件, 对转子瞬态温度场的计算又影响到热应力、轴向热膨胀及相对热胀差的计算结果<sup>[1]</sup>。

汽轮机转子属于高速旋转的部件, 目前尚无直接测量其温度的有效方法, 因此通过建立数学模型, 开发监测软件 (即软测量方法) 成为提高机组安全运行的主要手段<sup>[2~3]</sup>。采用的数学模型一般可分为一维模型和二维模型, 一维模型只考虑转子某横断面的径向温差而忽略轴向热流的影响, 这种模型毕竟不符合汽轮机转子这种几何形状和边界条件复杂的轴对称体; 而二维模型中的解析模型在转子温度进入准稳态之前的跟踪特性较差, 不宜在线应用, 通常作为标准来校验同条件下的数值解。二维差分模型对转子不规则几何形状及边界条件的适应性差, 网格剖分不灵活, 因此应用较少。而二维有限元模型网格剖分灵活多样, 尤其对复杂形状及边界条件的适应性强, 并且计算精度高, 因此应用广泛。但通常这些模型对输入、输出、转子特性等参数处理的不清晰<sup>[4]</sup>, 而不同机组转子结构及转子材料不尽相同, 因

此模型的通用性和扩展性较差, 并且给程序的编程带来很大的不便<sup>[5]</sup>。

本文借鉴了过程仿真和热力系统建模技术, 基于一体化过程模型开发平台 IMMS (Integrated Modular Modeling Software), 建立了一种基于有限元模型的汽轮机转子二维温度场在线仿真模型, 较好地实现了对电厂汽轮机转子温度场监测的通用化和工程化要求。

## 1 建模工具及建模方法

本文的仿真模型是基于自主研发的一体化过程模型开发平台 (IMMS), 并采用工程模块化方法建立。该平台提供了过程算法库维护、模型的建立与修改、模型的运行与冻结、结果的输出等功能, 是一个在线建模、调试的实时仿真系统, 其结构如图 1 所示。

基于该平台的工程模块化建模过程为<sup>[6~7]</sup>:

(1) 进行系统分析, 将复杂系统按功能合理分解为若干个子系统, 并抽象为一个个基本过程单元;

(2) 分析每个过程单元的基本特性, 建立数学模型, 并转换成相应的程序算法。每个算法都标准化为输入、系数和输出 3 部分。输入和输出代表过程参数 (如温度、压力等), 系数代表单元属性参数 (如结构参数和物性参数等);

(3) 将所有基本过程单元算法放入一个库中, 形成过程算法库;

(4) 调用过程算法库中的算法, 应用到具体的设备或过程时, 就生成为该设备或过程的仿真模块。模块间的连接靠一个模块的输出引入到下一个模块的输入来实现。建模过程就是以过程算法库为基础, 按照实际系统流程, 进行模块间的有机搭接;

(5) 仿真试验和模型验证。

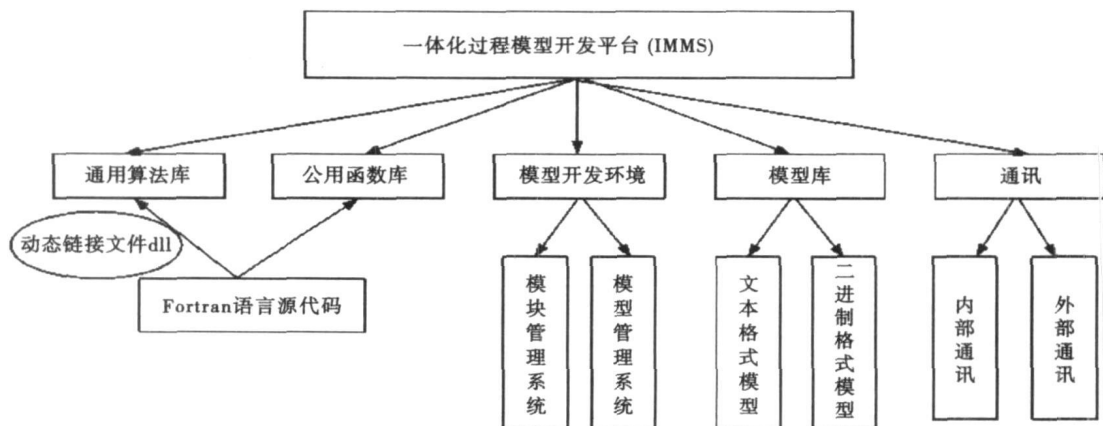


图1 平台总体结构

## 2 模型的建立

采用上述工程模块化的建模方法, 将汽轮机转子二维温度场有限元仿真模型划分为4个模块: (1) 第一类边界单元、绝热单元和内部单元; (2) 第三类边界单元; (3) 系数矩阵合成; (4) 温度节点求解。表1列出了每个模块的算法, 最终的模型由这4个基本过程仿真模块搭接而成。

表1 仿真模型算法表

基本过程单元	算法名称	功能描述
第一类边界单元、绝热单元和内部单元	SIEI (非对流单元信息)	计算单个该类型单元的 $[k]$ 、 $[n]$ 、 $[p]$
第三类边界单元	SEEI (对流单元信息)	计算单个该类型单元的 $[k]$ 、 $[n]$ 、 $[p]$
系数矩阵合成	PURSUM10 (10路纯加法)	合成总体 $[K]$ 、 $[N]$ 、 $P$
温度节点求解	CALT (消去法计算线性方程组)	求解各节点温度

## 3 模块及模型的实现

以第三类边界单元的计算为例, 采用三角形单元, 其数学模型为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T^e}{\partial t_i} \\ \frac{\partial T^e}{\partial t_j} \\ \frac{\partial T^e}{\partial t_m} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ k_{ji} & k_{jj} & k_{jm} \\ k_{mi} & k_{mj} & k_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_m \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ii} & n_{ij} & n_{im} \\ n_{ji} & n_{jj} & n_{jm} \\ n_{mi} & n_{mj} & n_{mm} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T^e}{\partial t_i} \\ \frac{\partial T^e}{\partial t_j} \\ \frac{\partial T^e}{\partial t_m} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_i \\ p_j \\ p_m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

写成矩阵形式即:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T^e}{\partial t_i} \\ \frac{\partial T^e}{\partial t_j} \\ \frac{\partial T^e}{\partial t_m} \end{Bmatrix} = [k]^e \{t\}^e + [N]^e \left\{ \frac{\partial T^e}{\partial t} \right\}^e - [p]^e \quad (2)$$

式中:  $[k]^e$ —单元刚度矩阵;  $[n]^e$ —单元变温矩阵;  $[p]^e$ —热载荷向量矩阵;  $\{t\}^e$ —单元节点温度矩阵。

建立模块算法时, 为实现算法的通用性, 将算法结构标准化为输入、系数和输出3部分, 结构如图2所示。

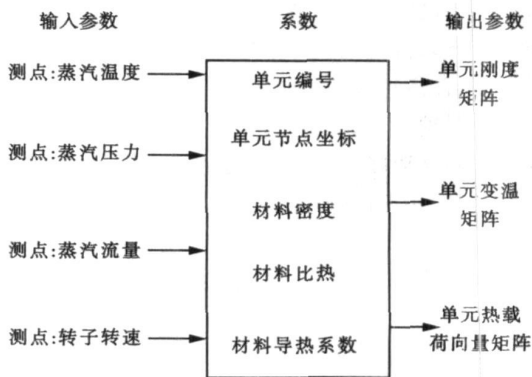


图2 算法结构示意图

其它的几个算法与第三类边界单元的算法类似, 其整个模型的计算流程如图 3 所示。

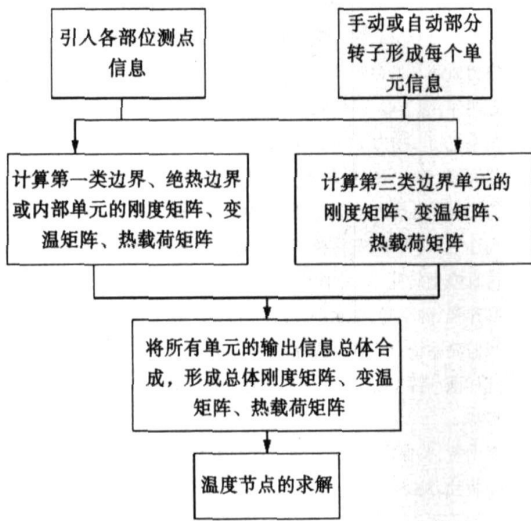


图 3 转子温度场仿真模型计算流程图

## 4 模型的验证

### 4.1 计算对象

选取汽轮机型号为: N300-16.7/538/538, 即亚临界压力、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、高中压合缸和反动凝汽式汽轮机。高中压转子是一根联合转子, 转子中心开有贯穿转子全长的中心孔。转子本体总长为 6 984 mm, 总重为 21.5 t, 转子材料为: 30Cr1Mo1V 耐热合金钢。

通常在汽轮机高、中压转子的前轴封段和前几级, 在启停及负荷变动的过程中, 汽温的变化最为剧烈, 导致该部位的温度梯度及热应力最大, 成为整个转子的最危险部位, 所以这里选取该机型下的高中压段作为监测对象, 该部分有关参数(常温下)如表 2 所示。将该段剖分为 1 178 个三角形单元, 共 689 个节点。

表 2 高中压轴段有关参数

参数	参数
光轴外径/m	0.406
光轴内径/m	0.152
调节级叶轮外径/m	0.81
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 820
比热/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	610
导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	37.5

### 4.2 仿真试验

就以上选取的计算对象, 取转子初温为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , 采用上述计算模型按照冷态启动工况进行转子热应力的仿真计算, 图 4 为冷态启动曲线, 表 3 给出了在启动过程中调节级叶轮根部不同阶段的汽温汽压变化。其余轴段则按照通流部分热力计算给出边界条件<sup>9</sup>, 图 5 为启动过程中高压调节级叶轮根部截面处有效温差(外表面温度与体积平均温度之差)变化曲线及与二维解析结果比较。计算平台每一步的瞬态计算时间为 0.5 s, 完全满足工程在线监测要求。

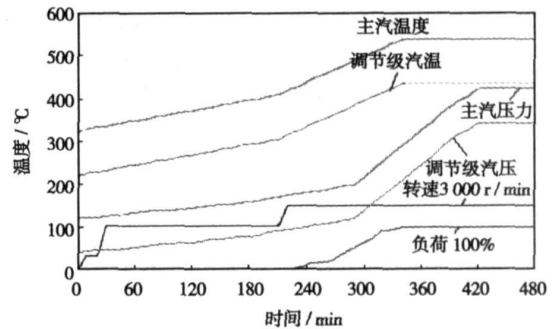


图 4 机组冷态启动曲线及调节级汽温汽压变化曲线

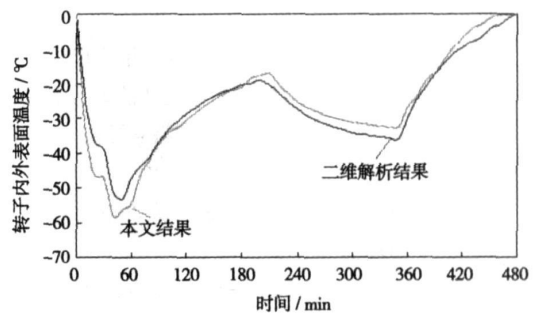


图 5 启动过程中转子调节级根部有效温差变化曲线

表 3 高压调节级叶轮根部汽温汽压变化

	第一阶段		第二阶段		第三阶段	
	汽温/ $^\circ\text{C}$	汽压/MPa	汽温/ $^\circ\text{C}$	汽压/MPa	汽温/ $^\circ\text{C}$	汽压/MPa
初值	220	1	292.44	2.12	435.97	11.94
终值	292.44	2.12	435.97	6.4	435.97	11.94
时刻/min	210	180	340	288	340	420
温升率/ $^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	0.345	6.22	1.104	39.63	0	0
压升率/ $\text{kPa}\cdot\text{min}^{-1}$	0.345	6.22	1.104	39.63	0	0

## 5 结 论

汽轮机转子的温度场是汽轮机的重要监测参数。本文基于一体化过程模型仿真系统,采用工程模块化的方法建立了汽轮机转子二维温度场的在线仿真模型。该模型计算精度高、计算速度快,并且这种模块化的结构设计,便于模型的修改和扩展,通用性好。该模型不仅可以用于汽轮机转子的在线温度场计算,还可用于其它具有类似边界条件的二维轴对称体的工程实际换热问题,如燃气轮机、发电机、加热器等。该种建模方法及一体化过程模型仿真系统可以大大提高建模效率,缩短建模时间,不仅适用于电力系统建模,而且还适用于更加复杂的系统建模,因此,具有较大的推广价值。

参考文献:

- [1] 张 光,张保衡.监测汽轮机转子热应力的二维离散模型[J].中国电机工程学报,1996,16(1):38-40.
- [2] 王璋奇,安利强,彭震中.基于参数化建模的转子有限元剖分[J].热能动力工程,2001,16(5):537-539.
- [3] 李爱军,谢诞梅,杨 俊,等.国产200 MW 汽轮机转子在线热应力监测与寿命管理[J].动力工程,2001,16(1):86-88.
- [4] 陈鸿伟,陈 聪,高建强,等.锅炉高温受热面金属壁温在线监测系统[J].动力工程,2006,26(1):97-100.
- [5] 赵海波,陈 胜,郑楚光,等.电厂远程专家分析平台的建立[J].华中科技大学学报,2003,31(11):76-78.
- [6] 高建强,马良玉,王兵树,等.450 t/h 循环流化床锅炉机组动态仿真模型研究[J].中国电机工程学报,2006,24(11):241-245.
- [7] 高建强,陈 聪,李永华,等.基于B/S模式的锅炉金属壁温在线监测系统[J].中国电力,2005,38(12):68-71.
- [8] 孔祥谦.有限元法在传热学中的应用[M].北京:科学出版社,1998.
- [9] 李维特,黄保海.汽轮机变工况热力计算[M].北京:中国电力出版社,2001.

(编辑 伟)

新技术、新产品

## 升级改进的 Fr 9FB 燃气轮机

《Gas Turbine World》2007年7~8月号报道了Fr 9FB燃气轮机以比9FA更高的燃气初温和压比运行,但是在更高的输出功率下保持相同或更长的大修寿命。

简单循环:燃气轮机发电机组箱装体在以天然气作为燃料时的净额定输出功率为287.4 MW,热效率为38%。

干式低 $\text{NO}_x$ :作为标准设备提供的预混式低 $\text{NO}_x$ 燃烧室在燃烧天然气并且不注水或蒸汽时产生低于25 mg/kg的 $\text{NO}_x$ 。

联合循环:在装有三压再热式余热锅炉和5.76 kPa 冷凝器真空情况下,单轴标准装置净额定输出功率为412.9 MW,热效率为58%。

在ISO基本负荷输出功率时,9FB具有超过1371 $^{\circ}\text{C}$ 涡轮转子进口温度。更高的燃气初温意味着涡轮第一级动叶采用单晶Inconel(镍铬铁)耐热合金并涂有热障涂层。第二级和第三级动叶是定向结晶GTD444耐热合金。第一级和第二级喷嘴是真空铸造镍基等轴晶粒的GTD111耐热合金。第三级喷嘴是GTD241耐热合金。

使用高压压气机抽气用于冷却,涡轮第一级和第二级动叶全部被空气冷却,使用冲击、对流和气膜冷却相结合的冷却方式。

第一级和第二级喷嘴用类似的系统进行冷却。

转子结构强度高,以便承受增加的扭矩和温度。涡轮轮盘是用Inconel基合金铸造的。

在涡轮部分应用了先进的三维气动力设计,以便优化燃气的流动,表明FB的涡轮具有比FA涡轮更高的效率。

9FB具有DLN2.6+管环式燃烧室,具有18个火焰筒,被设计成燃烧天然气、馏出油或双燃料混合物。

(吉桂明 供稿)

a RBF (Radical Based Function) neural network model. The results of comparison show that the calculation model based on the support vector regression is capable of not only accurately calculating the main steam flow rate at different operating conditions, but also adapting itself to the above calculation during a change of the turbine flow path. It also boasts a relatively good generalization ability and stability, and is suitable for on-line calculations, thus meeting the requirements for real-time diagnosis and calculation of the cost-effectiveness of a power plant. **Key words:** main steam flow rate, vector-supported machine, regression, steam turbine, soft-measurement

汽轮机转子二维温度场在线仿真模型建立 = **A Study of the On-line Simulation Model for Two-dimensional Temperature Fields of a Steam Turbine Rotor**[刊, 汉] / LIU Yan-feng, HAO Run-tian, GAO Jian-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 127 ~ 130

Under the support of an integrated modular modeling system (IMMS), developed was a general-purpose simulation algorithm based on a finite element model for two-dimensional temperature fields of steam turbine rotors. Furthermore, an on-line simulation model for such fields was also established by using an engineering modular modeling method, thus facilitating the modification of the steam turbine rotor and its meshing geometrical dimensions. A comparison of the simulation test with the two-dimensional analytic results under the same conditions shows that the simulation model thus established enjoys a variety of merits, such as high calculation accuracy and speed as well as great versatility, etc. Meanwhile, the model in question can also be applied for a thermal-state analysis of axially-symmetrical structures with similar boundary conditions. **Key words:** integrated modular modeling, development platform, steam turbine rotor, two-dimensional temperature field, on-line, simulation model

加装短叶片离心叶轮的参数优化及实验研究 = **Parameter Optimization and Experimental Study of a Centrifugal Impeller with Additionally Installed Splitter Blades**[刊, 汉] / LU Yu-kun, WANG Jian, ZHANG Jian, et al (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 131 ~ 134

Through a three-dimensional numerical simulation and flow analysis of the impeller inner flow fields of a Model G4-73No. 8D centrifugal fan by using software NUMECA, it has been found that there exists a conspicuous jet flow-wake flow configuration at the outlet of the impeller. To mitigate the adverse effect of the above configuration on fan performance, a numerical simulation has been performed of the fan impeller with additionally installed splitter blades. The optimized parameters of the splitter blades have been determined, depending on the flow field improvement inside the impeller. On this basis, a contrast test of the fan performance has been conducted. The results show that the total pressure of the retrofitted fan rises conspicuously with the efficiency at a rated load operating condition being somewhat enhanced and the high-efficiency zone widened by a small margin. **Key words:** centrifugal fan, jet flow-wake flow, short splitter blade, numerical simulation, experimental study

一种离心压缩机叶片优化设计方法 = **A Method for the Optimized Design of Centrifugal Compressor Blades** [刊, 汉] / SHU Xin-wei, GU Chuan-gang, WANG Tong, et al (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 135 ~ 139