

# 蒸汽透平全三元粘性流场计算

(东南大学国家火电机组振动工程研究中心)  
(哈尔滨汽轮机有限责任公司)

黄典贵  
徐 静

**[摘要]** 介绍了用有限体积时间推进法进行以蒸汽为介质的蒸汽透平叶片排全三元粘性流场的计算方法。通过对某一实际蒸汽透平叶片排的计算,证明计算方法是成功的,计算程序是正确的。它可以用来详细分析蒸汽透平叶片的性能。

**关键词** 透平 三元流 粘性

**中图分类号** TK262

## 1 前言

由于通流部分的设计质量,直接影响汽轮发电机组的运行效率,因此,长期以来,这一问题一直倍受关注。早在五十年代,吴仲华教授就提出了 S1, S2 流面理论,这一理论提出后,很快在国内外得到应用,实现了叶轮机械的准三维流动设计。从这一理论提出到 80 年代初期,发达工业国家的设计制造商都在应用这一理论进行叶轮机械的设计,而我国的不少制造厂家一直到 80 年代后期还在应用这一理论进行蒸汽透平的设计。随着计算机技术的发展,人们不再满足于准三维设计了,70 年代后期,以英国剑桥大学的 DENTON 教授为代表的一些学者开始提出将完全三维流动理论用于叶片设计,80 年代初期起,清华大学的蒋滋康教授等人也提出并着手实践完全三维流动理论,到目前为止,这一理论仍在国内外广泛应用,虽然实际工质是粘性的流体,但由于粘性流体力学比理想流体力学要复杂得多,受计算机水平的限制,前述的完全三维流动问题都是针对理想流体的。随着计算机技术的进一步发展,人们不再满足于理想流体的全三维设计了,研究实际的粘性流体力学问题并应用于实际设计是目前国内外的热点课题,现在国内外已有一些全三维粘性计算程序用于实际的透平设计,这是以剑桥大学的 DAWES 教授为代表的<sup>[1,2]</sup>,不过,这类程序的工质用的都是气体而不是水蒸气。本文是在参考文献<sup>[1,2]</sup>的基础上,

应用文献<sup>[1,2]</sup>提出的方法,完成了全三维粘性流场计算程序,较文献<sup>[1,2]</sup>不同的是:本文以水蒸气为工作介质,适合于蒸汽透平的粘性流场计算。文献检索的结果表明,目前国内外还没有同类的计算程序。

## 2 计算方法

### 2.1 基本方程

为了使程序更实用,不管是动叶还是静叶,都认为叶排在转动,只是静叶的转动角速度为 0,动叶的转动角速度为  $\omega$ ,基本方程采用等转速旋转的相对运动积分型方程。

#### 2.1.1 连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}_s} dv = \iint_{\mathcal{C}_s} \vec{dW} \cdot \vec{dA} \quad (1)$$

#### 2.1.2 运动方程轴向分量

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}_s} dW_x dv = \iint_{\mathcal{C}_s} (\rho W_x \vec{W} + \vec{f}_{ix}) \cdot \vec{dA} \quad (2)$$

#### 2.1.3 动量矩方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}_s} r dW_\theta dv = \iint_{\mathcal{C}_s} (r dW_\theta \vec{W} + \vec{f}_{i\theta}) \cdot \vec{dA} - 2 \iint_{\mathcal{C}_s} dk_r W_r dv \quad (3)$$

#### 2.1.4 运动方程径向分量

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}_s} dW_r dv = \iint_{\mathcal{C}_s} (dW_r \vec{W} + \vec{f}_{ix}) \cdot \vec{dA} + \iint_{\mathcal{C}_s} d(W_\theta^2 / r + r k^2 + 2k W_\theta) dv \quad (4)$$

#### 2.1.5 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\mathcal{V}_s} dE dv = \iint_{\mathcal{C}_s} (dI \vec{W} + k r \vec{f}_{i\theta}) \cdot \vec{dA} \quad (5)$$

这里,相对速度  $\vec{W} = W_x \vec{i}_x + W_r \vec{i}_r + W_\theta \vec{i}_\theta$ ;  $k$  为旋转角速度;  $\vec{f}$  是应力张量(包含静态压力和粘性应力),

$$\text{相对滞止转焓 } I^* = i + W^2 / 2 - U^2 / 2$$

$$\text{相对滞止内能 } E = I^* - P / \rho$$

对于水蒸气, 利用蒸汽的热力性质计算程序, 可得到蒸汽的压力、焓、密度、内能之间的关系。直接将蒸汽的热力性质计算程序用于三维粘性流场计算, 将会使计算时间增加很多, 这是因为它牵涉到很多指数与对数运算, 很费计算机时, 因此, 只能将蒸汽的热力性质根据实际工作范围的需要及精度要求, 自动生成表格, 然后用插值的方法进行蒸汽的热力性质计算

### 2.2 数值计算方法

文献 [1, 2] 提出的数值计算方法在叶轮机全三元粘性流场计算方面已经被证明是一个比较好的方法, 本文开发的程序采用了文献 [1, 2] 提出的数值计算方法

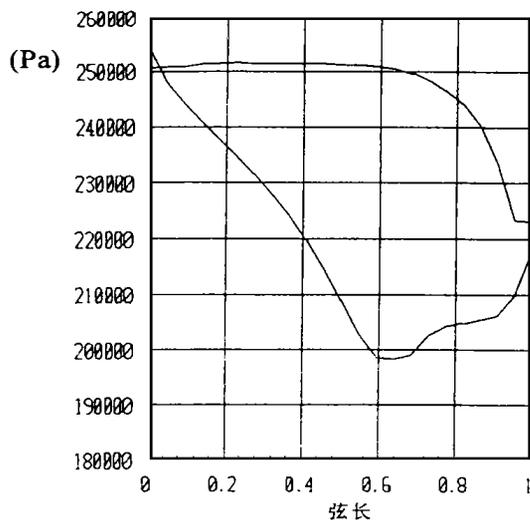


图 1 顶部叶片表面压力分布

### 2.3 紊流模型

采用 Baldwin 和 Lomax 提出的混合长度紊流模型 [3]。

### 2.4 边界条件和初始条件 (参见文献 [1])

### 2.5 程序系统流程

该程序系统由三部分组成, 第一部分是前处理程序, 以图形化的形式判别输入叶型是否正确, 网格划分是否合理等。第二部分是核心程序, 完成流场的主要计算。第三部分是后处理程序, 根据计算结果, 以图形化的形式输出各种图形, 如流场的速度矢量图, 流场的等压力线, 流场的等马赫数线, 叶排表面

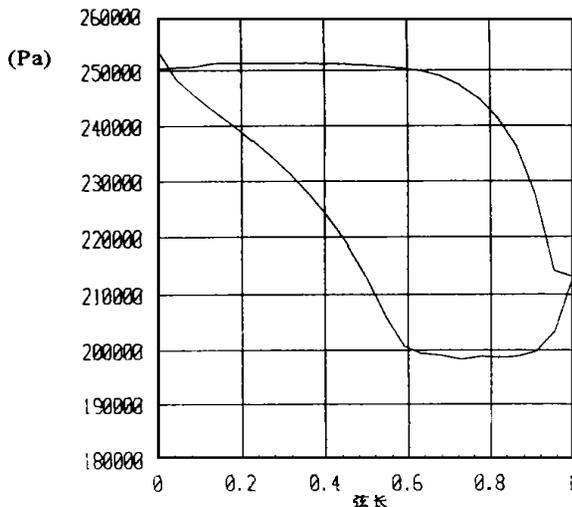


图 2 中部叶片表面压力分布

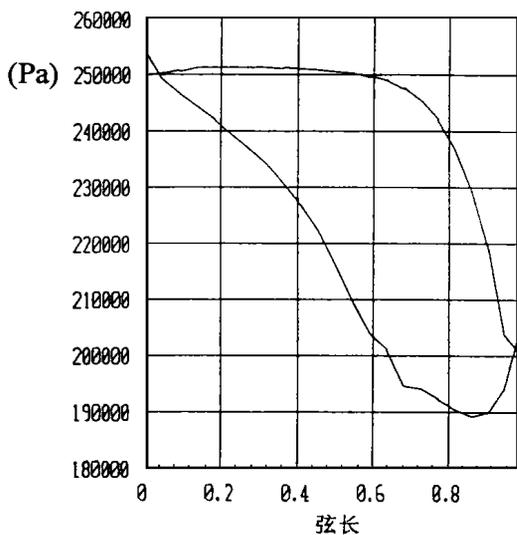


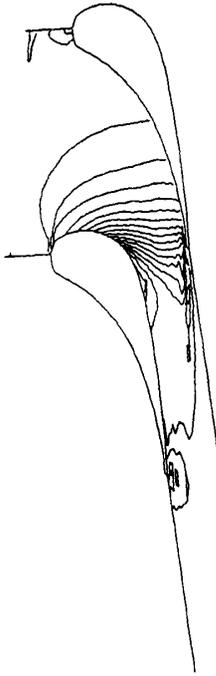
图 3 根部叶片表面压力分布  
压力分布以及一些实用的总结性数据等

## 3 算例

以某一汽轮机低压缸第一级静叶作为算例, 进行了其内部三维粘性流场计算, 轴向取 75 个站, 径向和周向都取 19 个站。图 1~ 图 3 分别为顶部、中部和根部的叶片表面压力分布, 可以看出, 这是一个后加载叶片, 总的说来, 叶片表面压力分布是相当好的, 但顶部吸力面中后部压力的不光滑过渡不能不说是这个叶片的一个不足, 也是这个叶片性能改进的潜力所在

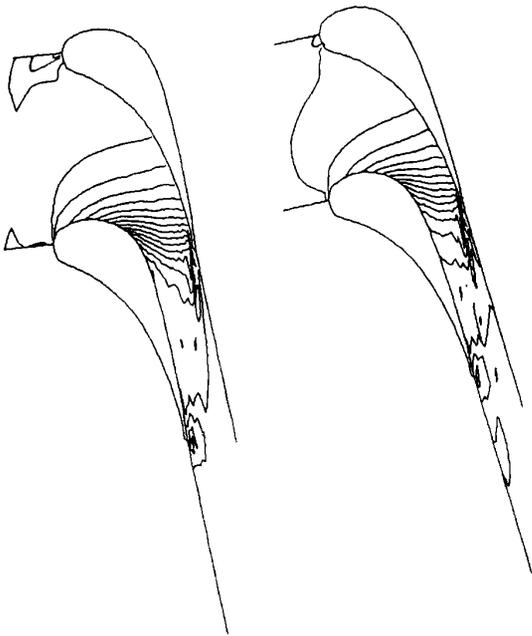
图 4~ 图 6 分别是叶片顶部、中部和根部的等

压线分布,可以看出,这只叶片从进口到出口压力下降基本是均匀的,但从图 4 看出,顶部吸力面中后部有一个低压区,这与图 1 中顶部吸力面中后部压力的不光滑过渡是一致的。在叶片出口的内弧面内,形成了压力梯度相对大的一条粗线,这可能就是激波。在叶片出口的背弧面上,形成了涡状的压力区。这是由于气流流出喉部后不受叶片流道约束,通流面积增大,速度降低,压力增大所致。



4 顶部流道等压力线

### 4 结论



5 中部流道等压力线 图 6 根部流道等压力线

本文尝试用时间推进法对蒸汽透平叶片槽道内的三维粘性流场进行计算,计算是成功的。本程序可

在 486 以上微机上运行。算例所考核的叶片性能相当好,不过,也有改进的潜力。

### 符号说明表

- d - 密度
- t - 时间
- $\vec{W}$  - 相对速度
- r - 旋转半径
- $\vec{f}$  - 是应力张量
- E - 相对滞止内能
- $I^*$  - 相对滞止转焓
- P - 压力
- i - 蒸汽的焓
- dv - 微元体积
- dA - 微元面积
- $C_v$  - 有限体积域
- $C_s$  - 有限体积的表面域
- U - 周向速度
- 下标 r - 径向分量
- 下标 x - 轴向分量
- 下标  $\theta$  - 切向分量

### 参考文献

- 1 Dawes W N. A numerical analysis of the three-dimensional viscous flow in a transonic compressor rotor and comparison with experiment. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1986.
- 2 Weinberg B C, and McDonald H. Solution of three-dimensional time-dependent viscous flows. Eighth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Aachen, 1982.
- 3 Baldwin B and Lomax H. Thin Layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows. AIAA Paper (78): 1987, 257. (渠源 编辑)

作者简介 黄典贵 男 1963年生 博士 副教授 主要从事叶轮机械气动热力学,转子动力学,流固耦合振动方面的研究工作,现在东南大学国家火电机组振动工程研究中心供职。联系地址: 210096南京 东南大学振动所

ence of an internal heat source, obtained by the use of a complex series method, and in tandem with the introduction of plate corner heat flux corner conditions, the anisotropic heat source-containing rectangular domain temperature field of four-side convection heat exchange was analyzed for the first time. Discussed is the effect of ply angle, anisotropic degree, boundary convection heat exchange factor and length-to-width ratio on the temperature field distribution. Key words anisotropic steady state heat conduction, convection, rectangular domain, analytic solution, corner condition, heat source

**有换热的流化床废液焚烧炉燃烧室热力计算 = Thermodynamic Calculation of the Furnace of a Fluidized Bed Waste Liquid Incinerator Containing Heating Surfaces [刊,中] /Bie Rushan, Liu Wentie, Yang Lidan, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 441~ 443**

A furnace thermodynamic calculation method has been established for a fluidized bed waste liquid incinerator equipped with heating surfaces. By solving for dense phase zone and rarified phase zone heat balance equation obtained are the dense phase zone and rarified phase zone outlet incineration temperature as well as the formula for calculating auxiliary fuel consumption and incinerator efficiency. All the above has provided a theoretical basis for the design of fluidized bed waste liquid incinerators. Key words fluidized bed, incinerator, thermodynamic calculation, heat transfer, auxiliary fuel consumption, thermal efficiency

**蒸汽透平全三元粘性流场计算 = The Calculation of A Steam Turbine Three-dimensional Viscous Flow Field [刊,中] /Huang Diangui (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 444~ 446**

This paper gives a brief description of the method for calculating three-dimensional viscous flow field of a steam turbine blade row with the use of a finite volume time marching method. The specific calculation of an existing steam turbine blade row has demonstrated the validity and correctness of the calculation method and procedures. The proposed method can be used for conducting a detailed analysis of steam turbine blade performance. Key words turbine, three-dimensional flow, viscosity

**热电厂热负荷预测的神经网络模型 = A Neural Network Model for Predicting Cogeneration Plant Thermal Loads [刊,中] /Li Yong, Sun Haibo (Beijing College of Electric Power Engineering), Zhou Qin (Jilin Dongguan Cogeneration Plant) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 447~ 448**

On the basis of an improved version of BP network the authors propose a synthesized BP network model for predicting cogeneration plant thermal loads. Discussed also are the network structure constructing method and fitting precision. The results of actual prediction show that this prediction model based on the synthesized BP network performs very well in the prediction of cogeneration plant thermal loads. Key words thermal load, neural network, prediction model

**IFC公式在热能动工程中的应用 = The Application of IFC Formula in Thermal Energy Power Engineering [刊,中] /Wang Shizhong, Li Zhongying, Wang Huaibin (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 449~ 451**