

# 适用于舰用汽轮机的准三维设计体系

(哈尔滨工业大学) 黄洪雁 冯国泰 王仲奇  
(哈尔滨七〇三研究所) 马云翔 林志鸿 闻雪友

[摘要] 建立了以多级  $S_2$  流面计算为主,  $S_1$  流面计算程序和单列叶栅全三元 Euler 方程求解程序为辅的舰用汽轮机设计体系。  $S_2$  流面计算中考虑了变比热并引入损失模型, 用来比较准确地估算机组的效率, 进行汽轮机级间和动静叶之间的匹配计算。  $S_1$  流面和三维有粘、无粘计算程序用来考核叶栅空间通流性能。该体系适用于舰用汽轮机的校核计算和变工况性能分析。

关键词 设计体系 舰用汽轮机  $S_2$  流面 3D 计算 损失

中图分类号 TK262

## 1 引言

随着计算机技术的高速发展, 建立在经典流体力学、数值计算方法基础之上的计算流体力学成为汽轮机机械设计中的一个重要组成部分, 是进行叶轮机械设计的有效手段。40 年代以前, 一元流设计方法为设计部门广泛采用, 取平均半径上的参数来表示机组的流动状况。1952 年由我国著名学者吴仲华教授提出的两类流面理论给叶轮机械设计带来了革命性的变革, 建立在该理论基础上的  $S_2$ 、 $S_1$  流面计算方法<sup>[1,2]</sup> 在叶轮机械设计中发挥了巨大作用。在涡轮整体性能的评估过程和机组性能匹配计算中, 现在采用的主要手段仍是  $S_2$  流面计算程序。

当今计算机技术的飞速发展, 使全三元 Euler 方程求解已完全成为可能<sup>[5]</sup>, 90 年代还出现了非定常三维粘性流计算程序在涡轮机内部流场设计中的应用。但在国内, 仍采用一元流设计方法, 这种方法很难设计出高性能的舰用汽轮机, 不能了解这类机组较细的流动状况。鉴于此, 本文建立了一套以  $S_2$  流面正问题计算为主,  $S_1$  流面对叶型进行考核和以全三元 Euler 方程求解来了解叶栅局部性能的涡轮设计体系。这一体系适用于舰用汽轮机的设计计算和变工况性能分析。

## 2 考虑损失的多级准三元设计体系

计算机技术的进步, 高精度差分格式的出现使比较准确地模拟叶栅内流流动成为可能。在国外已经出现比较完善的叶轮机械三元设计体系, 国内这方面的工作起步较晚, 主要受机器内存、计算速度和多级叶列间处理技术的限制, 对于象具有 5 级或更多级的汽轮机组, 全三维多级联算还存在一些有待解决的问题。  $S_2$  流面完整的理论和国内外同行多年的工作, 使  $S_2$  流面多级联算成为可能, 成了多级汽轮机性能估算中最重要的工具。伴随着汽轮机机

收稿日期 1998-12-08 本文联系人 黄洪雁 男 1968 年生 讲师、博士 150006 哈尔滨工业大学 458 信箱

$\alpha$ -空气过量系数

$v$ -工质流动速度, m/s

$\rho$ -密度, kg/m<sup>3</sup>

$\sigma$ -压力恢复系数, %

$\eta$ -燃烧效率, %

$\xi$ -阻力系数 +  $\Delta\tau$ -温度场最大不均匀度, %

+  $\alpha$ -径向温度不均匀度, %

上标:

\*-滞止参数

下标:

$a$ -空气

2-进口

3-出口

$f$ -试验燃料

$f_0$ -加温燃料

max-最高

Rmax-径向最高

## 参考文献

- 1 焦树建. 燃气轮机燃烧室. 机械工业出版社, 1990.
- 2 Lefebvre A H. Gas turbine combustion, 1983.
- 3 Zou Jizhong, et al. An experimental study on steam injection into a singletube Combustion of a MS5001 Gas Turbine. Proceedings of The Second APISCEU, 1993.

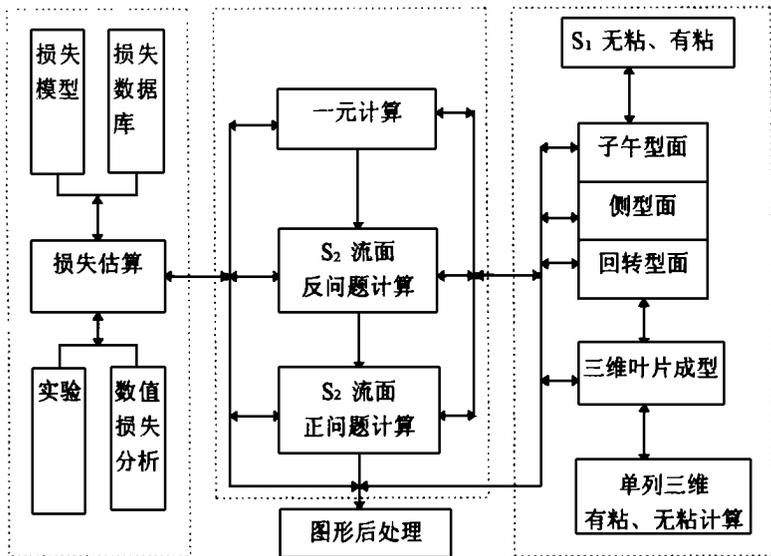


图1 多级准三维舰用汽轮机设计体系

械的发展,国内外学者对各式各样的叶栅进行了大量的吹风实验,得到许多我宝贵的数据、经验,这些经验以损失模型的形式被用于如图1所示的准三维设计体系中。

图1中的设计体系主要包括S<sub>2</sub>流面匹配计算体系、叶片成型及分析体系和损失估算体系等三部分。考虑损失和变比热的多级S<sub>2</sub>流面计算程序用来估算整个涡轮的性能,其作用主要是进行多级涡轮级之间的功率匹配,动、静叶之间的攻角匹配,计算出机组的总体性能(如流量、功率、效率等)参数。S<sub>1</sub>流面有粘、无粘计算用来确定基元级内叶型内、背弧的压力分布是否合理。单列有粘、无粘计算用来分析三维通道的详细流动状况。目前,三维粘性流计算可以模拟出叶栅流道内的一些流动状况,也能计算出叶栅流道内的损失分布,作为叶栅不同叶型之间的对比计算,粘性流计算结果在分析流场结构方面能提供极有用的参考价值,但粘性流计算的准确性目前还有点难以使人信服。因此,在损失分析上主要还是依赖于各种损失模型,确定了损失估算体系成了准三元设计体系中重要的一环。损失的估算来自大量的吹风实验、设计经验和数值模拟。由于损失模型是建立在大量的数据分析基础之上,通过损失模型计算得到的结果与实物叶栅的真实损失之间必有一定的差异,但有经验的设计者对损失的估算比单纯的三维粘性流模拟的结

果更可信。在进行涡轮多级联算时,涡轮进出口的工作温度的变化范围比较大,为使多级定常计算程序能更准确地模拟多级涡轮的流动情况,有必要考虑由于机组大范围的温度变化而引起的变比热问题。由于这一设计体系以求解S<sub>2</sub>流面平均的Euler方程为主,不象流函数法那样受超、跨音问题的限制,适用于超、跨音流场的求解,也适合舰用汽轮机的变工况运行特点。

### 3 气动计算控制方程

在气动参数的计算中,以一元流方案计算为基础,S<sub>2</sub>流面选择流型和匹配计算为主,求解三元Euler方程和NS方程计算程序辅助考察叶型局部流动状况。多级S<sub>2</sub>流面计算程序是准三元设计的主要计算手段。本文简单地介绍S<sub>2</sub>流面计算方法和三元Euler方程组求解方

计

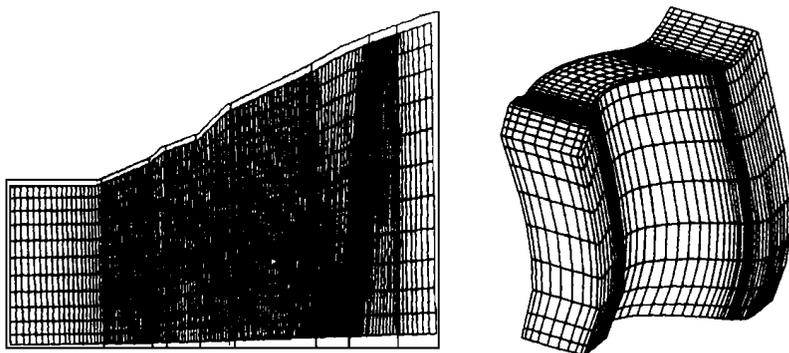
#### 3.1 平均S<sub>2</sub>流面的求解计算

平均S<sub>2</sub>流面的求解计算遵循的方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\tau U) + \frac{\partial}{\partial z}(r\tau F) + \frac{\partial}{\partial r}(r\tau G) = \bar{Q}$$

式中

$$\bar{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho w_z \\ \rho w_\tau \\ \rho w_\varphi \\ e \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho w_z \\ \rho w_z^2 + P \\ \rho w_z W_r \\ \rho W_z W_\varphi \\ \text{舰用} p) W_z \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} \rho w_r \\ \rho w_r w_z \\ \rho w_r^2 + P \\ \rho w_r w_\varphi \\ (e+p) W_r \end{pmatrix}$$



(a) S<sub>2</sub>流面计算网络 (b) 变叶栅三维计算网络

图2 计算网格

$$\overline{Q} = \begin{cases} \tau f_z + r p \frac{\partial \tau}{\partial z} \\ \tau f_r + \tau p + r p \frac{\partial \tau}{\partial z} + \tau p (w_\varphi + \omega r)^2 + r \tau \frac{\Delta p}{\Delta \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \\ \tau f_\varphi - \rho \tau w_r (w_\varphi + 2\omega r) - \frac{\Delta p}{\Delta \varphi} \\ \tau \rho \omega_r \omega^2 r^2 \end{cases} \quad \text{叶}$$

使用的周向平均公式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = \frac{1}{\tau} \frac{\partial (\tau \bar{q})}{\partial z} - \frac{\Delta q}{\Delta \varphi} \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} - \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial z} \bar{q} \\ \frac{\partial \bar{q}}{\partial r} = \frac{1}{\tau} \frac{\partial (\tau \bar{q})}{\partial r} - \frac{\Delta q}{\Delta \varphi} \frac{\partial \varphi_m}{\partial r} - \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial r} \bar{q} \end{cases}$$

流面方程为:  $W_z \frac{r}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + w_r \frac{\partial \varphi}{\partial r} - w_\varphi = 0$

粘性方程为:  $\vec{f} = - \frac{w \cdot w}{W^2} T \cdot \nabla S$

式中  $\nabla S$  可用损失模型求出。计算中采用了三阶精度的 Godunov 格式。利用这一方法求解时,除给出子午型面尺寸和叶栅几何参数外,设计者只须给定进口总压  $P_0^*$ ,进口总温  $T_0^*$ ,入口气流方向和出口静压  $p$ 。流量由方程组积分求出。

### 3.2 三维 Euler 方程的求解计算

描述无粘流动的任意曲线坐标系下的三维 Euler 方程为:

$$\frac{\partial \overline{U}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \overline{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \overline{G}}{\partial \zeta} = \overline{H}$$

其中:

$$\overline{U} = J \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{pmatrix}_{\text{的对}}, \quad \overline{E} = J \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho \xi_z + \rho u u \\ \rho \xi_r + \rho v u \\ \rho \xi_\theta / r + \rho w u \\ e \end{pmatrix}, \quad \overline{F} = J \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho \eta_z + \rho u v \\ \rho \eta_r + \rho v v \\ \rho \eta_\theta / r + \rho w v \\ (e+p)v \end{pmatrix}$$

$$\overline{G} = J \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho \zeta_z + \rho u w \\ \rho \zeta_r + \rho v w \\ \rho \zeta_\theta / r + \rho w w \\ (e+p)W \end{pmatrix}, \quad \overline{H} = \frac{J}{r} \begin{pmatrix} -\rho v \\ -\rho u v \\ \rho [(w + \omega r)^2 - v^2] \\ -2\rho v (w + \omega r) \\ \rho v \omega^2 r^2 - (e+p)v \end{pmatrix}$$

假定工质为定比热流体,即  $k = \text{const}$ , 采用理想气体态方程作为补充方程:

$$e = \frac{p}{k-1} - \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2 + w^2)$$

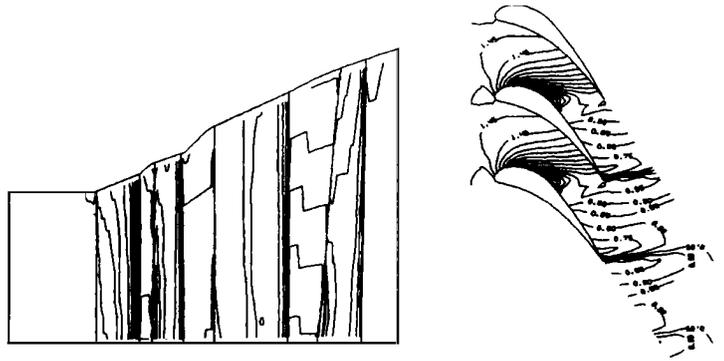
$e$  为单位体积的总能,  $J$  为雅可比变换矩阵,  $u, v, w$  分别为  $\xi, \eta, \zeta$  三个方向的速度逆变物理分量。

$\omega$  为转子转速,对于静叶流场  $\omega = 0$ 。

采用时间相关法的高精度差分格式求解上述方程组。利用这一方法编制的程序可以计算超、跨音流动,具有良好的激波捕捉性能。计算时给定进口来流的总温、总压、回转面和子午面上的气流角沿叶高的分布规律。在计算域出口给定平均半径处的相对静压  $\overline{P}$ 。流量由方程组积分求出。

### 3.3 二维、三维流场计算结果

气流在叶栅流道内的流动是极为复杂的,动、静叶片排的交替排列和气流流动时受到叶片激振作用,



(a)  $S_2$  流面静压等值线分布 (b) 三元计算所得的  $S_1$  流面压力等值线分布

图 3 数值计算结果

决定叶栅流道内气体的流动是三维效应很强的非定常流动。数值模拟过程中忽略了很多次要因素,从定常的角度尽可能地对机组的运行状况进行模拟。图 2 中的 (a) 和 (b) 分别为  $S_2$  流面计算网格和三维方程组计算网格。

图 3(a) 是叶片流道子午面上压力等值线分布。在静叶片前部顶端静压低于根部静压,是由于本算例在尾缘处积叠造成叶片前部有一定的周向倾斜所致。该图是静压等值线在子午面上的投影,因此从  $S_2$  流面上来看出口附近的等值线较密一些,但从三元计算结果来看(图 3(b)),在静叶流道内,由进口到出口,  $S_1$  流面上的压力等值线是较为均匀地降低的,整个叶片的负荷分布也比较均匀,这是早期设计的叶型的特点,不象 80 年代初提出的后部加载叶型那样,气流的降压、加速主要发生在流道的后部。图中还模拟出了喉部位置形成的最低压力点和出口尾缘波系等一系列流动特征。由于篇幅有限,关于利用该体系进行模拟得到的更详细的结果作者将在另一篇文章中进行介绍,在此不作详细论述。

# 卧式内燃燃油和燃气锅炉的结构和设计

(哈尔滨市劳动局锅检所) 高玉宽

(广东东莞彩色显像管有限公司) 陈炳荣 朱小云

(长春锅炉厂) 杨丽华 张学政

[摘要] 讨论了卧式内燃燃油和燃气锅炉的总体结构和设计。提出燃油和燃气锅炉炉膛、尾部受热面和燃烧器设计的要求。

关键词 燃油和燃气锅炉 总体结构 设计

中图分类号 TK229.6 TK229.7

## 1 前言

我国燃煤工业和生活锅炉的平均运行热效率仅有 65% 左右, 能源的浪费和环境污染问题相当严重。全国每年燃煤电厂排放的烟尘达 1680 万吨, 排入大气的  $\text{SO}_2$  达 1310 万吨, 对大气环境造成了严重的危害。因此必须从根本上改变我国能源利用消费结构。燃油和燃气不仅热能利用效率高, 环境污染小, 而且使用方便。随着我国经济的迅速发展, 环保意识的增强, 燃油、天然气和城市煤气的燃油和燃气锅炉将得到广泛应用。

## 2 燃油和燃气锅炉的总体要求

燃油和燃气锅炉总的来说是向减小体积和重量, 提高效率, 提高组装化程度和自动化程度的方向发展, 特别是近几年采用一些新型燃烧技术和强化传热技术, 燃油和燃气锅炉的体积比以前大为缩小, 热效率已高达 87% ~ 91%, 随着工业的发展, 人们

对燃油和燃气锅炉的总体要求将更加严格, 这种要求主要是解决经济性、安全性和可使用性的矛盾, 具体表现在以下几个方面:

### 2.1 自动化程度高并配有多级保护系统

燃油和燃气锅炉不仅要配有完善的全自动燃烧控制装置, 更要配有多级安全保护系统, 必须具有锅炉缺水、超压、超温、熄火保护、点火程序控制及声、光、电报警。

### 2.2 高的燃烧效率

一般来说, 中小型燃油和燃气锅炉的燃烧效率和大型锅炉相差不大, 其锅炉热效率的差异主要在排烟温度上。一台额定工作压力为 1.25 MPa 的燃油或燃气锅炉, 其对应的饱和温度为  $194^\circ\text{C}$ 。为不使受热面积过大和维持一定的传热温压, 烟气的最低温度至少应比饱和温度高  $50^\circ\text{C}$ , 亦即如果没有其它尾部受热面的话, 该炉的合理排烟温度应为  $250^\circ\text{C}$  左右, 要继续提高锅炉热效率则必须增加尾部受热面。

### 2.3 辅机配套

配置与锅炉相匹配的给水泵、鼓风机和其它一些辅机, 对燃油锅炉还需要配置油泵、重油加热器(电气—蒸汽两用)和锅炉本体构成一体, 保证运输的可靠性, 特别是快装锅炉, 应尽可能地避免采用引

收稿日期 1998-10-06 修改定稿 1998-10-26

本文联系人 高玉宽 男 1950 年出生 高级工程师、副所长, 150076 哈尔滨新阳路 463 号

## 4 结论

本文建立了一种适用于现代舰用汽轮机的多级准三元设计体系, 该体系以求解  $S_2$  流面平均的原参数 Euler 方程为主, 包含了  $S_1$  流面计算、全三元 Euler 方程求解、叶片成型。该体系不象流函数方法那样受流动“堵塞”问题的限制, 可计算超、跨音流动, 也适合舰用汽轮机变工况运行的特点。

## 参考文献

- 1 朱荣国. 使用非正交曲线坐标与速度分量  $S_2$  流面反问题流场线松弛解. 工程热物理学报, 1980, 1(1).
- 2 吴文权, 刘翠娥. 使用非正交曲线坐标与速度分量  $S_1$  流面正问题流场矩阵解. 工程热物理学报, 1980, (1).
- 3 顾发华等. 采用弯扭动叶的涡轮流场数值模拟与分析. 工程热物理学报, 1995, 16(4).

sistance under the conditions of in-tube intensified convection heat transfer. Thus obtained are functional relations between thermodynamic performance indexes  $Q/Q_s$ ,  $P/P_s$  and  $F/F_s$  on one side and in-tube convection heat transfer  $Nu$  and in-tube resistance factor  $l$  on the other side. On this basis an analysis was conducted of the thermodynamic performance of the intensified in-tube heat transfer inside spirally corrugated tubes. **Key words:** intensified in-tube heat transfer, convection heat transfer, thermodynamic performance, spirally corrugated tube

高效液力偶合器的设计方法分析 = **The Design Method and Analysis of a High-efficiency Fluid Coupling** [刊, 中] / Wang Liwen, Li Guohong, Li Rong (China National Civil Aviation Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 108~110

The problem of excessive heat generation in a high-capacity ( $> 300$  KW) fluid coupling was resolved by the use of a high-efficiency coupling with a no-slip feature at rated operating conditions. This paper analyses the design method of such a coupling with the method for determining the number of buckets and bucket wheels being proposed. Furthermore, through tests of a sample unit the features of the coupling are identified. **Key words:** high-efficiency fluid coupling, bucket, bucket wheel, design method, test of characteristics

盘管式蓄冰空调系统评价 = **Evaluation of an Coiled-tube Ice Storage Air-conditioning System** [刊, 中] / Zhou Wei, Yin Gang, Liao Mingyi, et al (Heilongjiang Provincial Commercial Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 111~112

Four schemes of coiled-tube ice storage air-conditioning systems are presented in this paper with an analysis and comparison being conducted by the use of specific examples. It is noted that all these four schemes are economically feasible. The one based on a direct evaporation of refrigerant and low-temperature air supply system enjoys the best economy. Compared with a conventional system its peak-clipping rate is 40% with investment cost and operating expenses being reduced respectively by 15% and 48%. **Key words:** cold storage rate, ice storage air-conditioning system, electric tariff structure

SAYVOL-EC2 燃油全能增效剂掺入重油在燃气轮机上的燃烧试验 = **Heavy Oil-fired Gas Turbine Combustion Test with the Heavy Oil being admixed with SAYVOL-EC2 All-purpose Fuel Oil Synergist** [刊, 中] / Liu Ming, Wen Xueyou, Chen Hongfa (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 113~118

SAYVOL-EC2 all-purpose fuel oil synergist is a product developed by British Sayvol Chemicals Ltd. Combustion tests were conducted on a gas turbine combustion test rig, firing heavy oil admixed respectively with conventional magnesium salt vanadium inhibitor and SAYVOL-EC2 additive. Test results indicate preliminarily that the SAYVOL-EC2 all-purpose fuel oil synergist is superior to the conventional magnesium salt vanadium inhibition agent in terms of combustion efficiency, vanadium inhibition effectiveness,  $NO_x$  reduction, etc. **Key words:** synergist, vanadium inhibition, heavy oil combustion, gas turbine

适用于舰用汽轮机的准三维设计体系 = **A Three-dimensional Design System Applicable to Naval Steam Turbines** [刊, 中] / Huang Hongyan, Feng Guotai, Wang Zhongqi (Harbin Institute of Technology), Ma Yunxiang, Lin Zhihong, Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14 (2). — 119~121

A naval steam turbine design system has been set up based mainly on a multi-stage  $S_2$  stream surface calculation and assisted by a  $S_1$  stream surface calculation program and single-row cascade full three-dimensional Euler equation solution program. In the  $S_2$  stream surface calculation a variable specific heat is taken into account with a loss model being introduced. This is done so that the machine efficiency can be evaluated in a relatively accurate way and a matching calculation of the steam turbine both in terms of interstage as well as between rotating blades and stator vanes may be performed. The  $S_1$  stream surface and three-dimensional viscous and non-viscous calculation programs can be employed to verify and check cascade space flow passage performance. The system under discussion is suited for the naval steam turbine verification calculation and performance analysis for off