

用工程方法考虑流动损失的跨音速透平级全三元流场的计算

黄典贵 (东南大学)

蒋滋康 (清华大学)

〔摘要〕介绍了用时间推进法计算有流动损失的跨音速透平级全三元流场的计算方法,流动损失采用哈尔滨汽轮机厂提供的损失模型进行计算,对考虑流动损失与忽略流动损失的全三元流场计算结果进行了对比,发现考虑流动损失后反力度有一定的提高,速度三角形也有少量变化,说明考虑流动损失对于进一步改进透平级设计是必要的,本文提供的方法可供工程设计应用。

关键词 透平 全三元 跨音速

分类号 TK262

1 前言

叶轮机械向着高负荷、高性能方向发展,无论是压气机或是透平都已广泛采用跨音速。文献〔1〕讨论了直接求解整个跨音速三元流场的计算方法。文献〔2〕将工质由完全气体改为蒸汽,进行了探索,以便在大型汽轮机的设计中应用。本文在文献〔2〕的基础上,根据哈尔滨汽轮机厂推荐的损失模型〔3〕,在完全

三元流场的计算中加以考虑,使理论计算更接近实际,以便工程实用。

2 计算方法

2.1 基本方程

相对等速转动坐标下,三元非定常无粘运动的积分型基本方程为:

$$\iiint_{C_v} \frac{\partial q}{\partial t} dV + \oiint_{C_n} \vec{F} \vec{W} \cdot d\vec{A} + \oiint_{C_n} P dG - \iiint_{C_i} B dV = 0 \quad (1)$$

其中

$$q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho C_{\varphi} r \\ \rho C_r \\ \rho C_t \\ \rho E \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho C_{\varphi} r \\ \rho C_r \\ \rho C_t \\ \rho H^* \end{bmatrix}, \quad dG = \begin{bmatrix} r dA_{\varphi} \\ dA_r \\ dA_t \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\rho C_{\varphi}^2 + P}{r} \\ 0 \end{bmatrix}$$

收稿日期 1995 01 09 收修定稿 1995 02 23

式中 ρ 为密度, P 为压强, W 为相对流速, C 为绝对流速, A 为面积向量, $W_r, W_\sigma, W_z, C_r, C_\sigma, C_z, A_r, A_\sigma, A_z$ 分别为相对速度、绝对速度、面积向量的径向、切向和轴向的分量, H^* 为相对滞止焓, E 为相对总内能, V 表示体积。

2.2 考虑流动损失

一种最简便也是工程上最常用的方法

$$\zeta = \frac{0.02}{(\sin\beta_2)^{0.7}} \sqrt{\frac{\sin\beta_2}{\sin\beta_1} \cdot \frac{180 - 0.8(\beta_1 + \beta_2)}{125}} [1 + M_2(M_2 - 0.8)^2](1 + \tan\sigma) \frac{\tau_2}{\tau_1} + 0.08 \times 10^{(17-0.51-0.5)\frac{2b}{L}} + 0.03\left(\frac{L}{r_1}\right)^3(l - 0.5) + \Delta\zeta \quad (4)$$

式中, β_1, β_2 分别为叶栅的进出气角, M_2 为叶栅出口马赫数, τ_1 和 τ_2 分别为栅前和栅后的流片厚度, l 为相对叶高, b 为弦长, L 为叶片高度, $\tan\sigma = W_r/W_z$ 。

对于静叶取 $\Delta\zeta = 0.005 \sim 0.01$, 对于动叶取 $\Delta\zeta = 0.01 \sim 0.015$ 。

本计算考虑流动损失的方法就是引用工程的方法。换句话说, 全三元流计算仍应用无粘流动基本方程, 然后对速度进行修正, 具体作法如下:

首先, 考虑损失后, 要满足动叶和静叶的流量相等, 而要满足这个条件则在考虑损失前的理想计算时, 动叶和静叶的流量就有可能不等了, 因此要考虑损失后流量匹配。

在动静交接处, 轴向流通面积对于固定坐标与等速转动坐标是一样的。所以, 当保持 $C_{1r} = W_{1r}$ 时, 就能保持流量 $G_1 = G_{1w}$ 。

因为:

$$C_{1r} = \Phi C_{1wr} \quad (5)$$

$$W_{1r} = \Psi W_{1wr} \quad (6)$$

得

$$C_{1wr} = \frac{\Psi}{\Phi} W_{1wr} = kW_{1wr} \quad (7)$$

$$k = \Psi/\Phi \quad (8)$$

同理, 根据 $C_{1t} = W_{1t}$ 和 $C_{1\sigma} = W_{1\sigma} + \omega r$ 可得:

就是对速度用速度系数 Φ, Ψ 或损失系数 ζ 进行修正。速度系数与损失系数之间的关系为:

$$\Phi = \sqrt{1 - \zeta_1} \quad (2)$$

$$\Psi = \sqrt{1 - \zeta_2} \quad (3)$$

哈尔滨汽轮机厂给出了下列损失模型经验公式⁽³⁾:

$$C_{1wr} = kW_{1wr} \quad (9)$$

$$C_{1\sigma w} = kW_{1\sigma w} + \omega r/\Phi \quad (10)$$

此外, 在静、动交接处

$$P_1 = P_{1w} \quad (11)$$

$$i_1 = i_{1w} \quad (12)$$

将以上匹配条件代入理想流场求解, 得到一个满足实际流动时匹配的理想流场。

设无粘流计算出静叶出口速度为 C_{1s} , 动叶出口速度为 W_{2s} , 则考虑损失后静叶出口实际速度为:

$$C_1 = \Phi C_{1s} \quad (13)$$

动叶出口实际速度为:

$$W_2 = \Psi W_{2s} \quad (14)$$

这是叶栅出口截面的速度计算方法。根据损失模型, Φ 与 Ψ 沿叶高将取不同值。由于目前推荐的损失模型没有考虑到切向的变化, 本文中的 Φ 和 Ψ 在切向都取相同的值。

假定出口静压是不变的, 出口焓值可由出口速度和滞止焓值确定。这样出口状态是已知的, 熵 S 也可求出来。

假定槽道内熵的增加是线性的, 则可确定槽道内计算点的 S 值, 再由连续方程可知: 静叶部分

$$\rho_1 C_1 A_1 = \rho_1 C_{1s} A_1 \quad (15)$$

转动部分

$$\rho_1 C_1 A_1 = \rho_2 C_2 A_2 \quad (16)$$

式中, $\rho_1, C_1, A_1, \rho_2, W_2, A_2$ 为静叶出口截面处的密度, 相对流速, 相应面积和动叶出口截面处的密度, 相对流速, 相应面积。脚码 i 表示沿 z 轴向的站号。由于 $A_1, A_2, \rho_1, \rho_2, C_1, W_2, A_2$ 为已知, 外加 i 点的滞止焓为常数, i 点的熵 S 已知, 通过迭代, 不难求出 i 点的各种参数(如速度、密度和压力)。

3 计算结果

对北京重型电机厂的 850 叶片(叶高为 850 mm) 汽轮机级进行了计算, 计算结果如下:

图 1 为 850 叶片级反力度沿叶高的变化; 图 2 为 850 叶片级静叶出口、动静间隙和

动叶出口静压沿叶高的变化, 与无粘不考虑损失的计算相比, 动静间隙中的静压与反力度都有少量的增高。这可能是静叶中速度系数 ϕ 比动叶的速度系数 ψ 高所致。因为不考虑损失时相当于 $\phi = \psi = 1$, 这时出口、动静间隙中有一定的压力分布。在考虑有损失时, 若 $\phi \geq \psi$, 则若静压分布仍与不考虑损失时一样, 那么流过静叶的实际流量必将大于流过动叶的实际流量, 流量发生堵塞, 使动静间隙中的压力升高, 才能保证流量的平衡。

图 3~图 5 为 850 叶片级动叶流道中的音速线位置。其中根部与中部的情况类似, 考虑损失后音速线向出汽边移动, 这可能是由于动叶顶部截面出汽部分呈扩张形引起的。图 6 绘出了 850 叶片级中部的速度三角形, 考虑损失后速度略有减少, 但速度三角形变化不大。

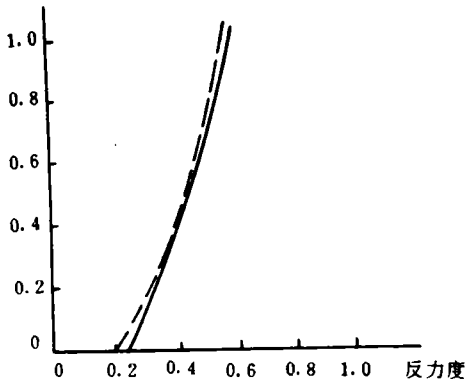


图 1 反力度沿叶高分布

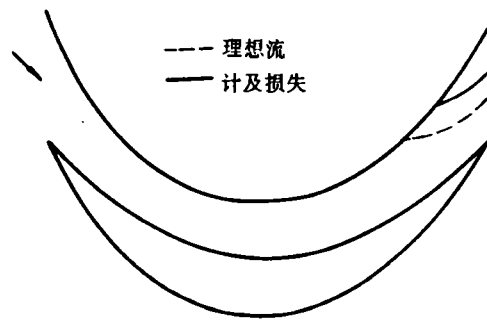


图 3 动叶根部音速线

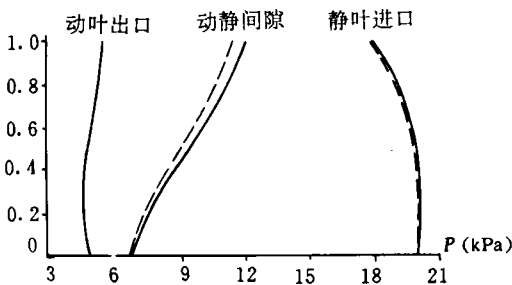


图 2 静压沿叶高分布

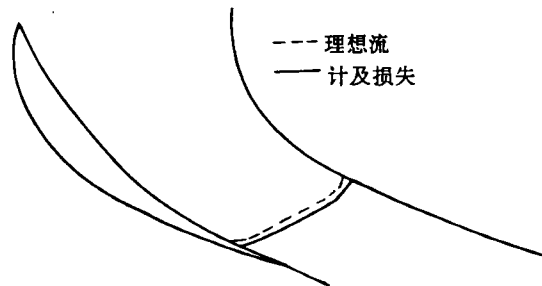


图 4 动叶中部音速线



图5 动叶顶部音速线

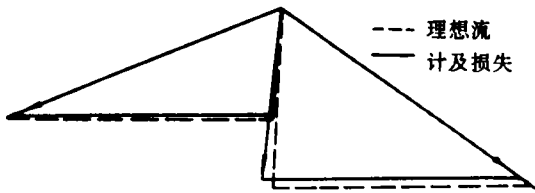


图6 中部截面速度三角形

4 结论

1 考虑工程损失模型后,反力度比不考虑损失略有上升。

2 动叶中的音速线位置,考虑损失后也有少量的变化。

3 考虑损失后由于实际速度的降低,速度三角形也有少量的变化。

4 据文献[4]中图 10 给出的 850 叶片根部静压实测值为 8 kPa、顶部静压实测值为 12.4 kPa,对照图 2 计算结果,显然,考虑损失后,更接近实测值。

参 考 文 献

- 1 Denton J D, Singh U K. Time marching method for turbomachinery flow calculation. VKI Lecture Series, 1979(7)
- 2 蒋滋康,朱钦.跨声速透平级完全三元流场的计算方法及其应用.工程热物理学报,1986,7(4)
- 3 石伟岗,范懋诚,徐大魁.流面的运动方程及其解.力学学报,1980(1)
- 4 朱钦.汽轮机长叶片的完全三元流设计.清华大学学报(自然科学版),1988,28,增刊(5)

(孙显辉 编辑)

作者简介:黄典贵,男,1963年生,1994年获清华大学工学博士学位,主要从事叶轮机械气动热力学,旋转机械故障诊断,转子动力学,轴系扭转振动问题和弯、扭耦合振动问题的研究。现在东南大学国家火电机组振动工程研究中心供职。(210096 南京市)

工程消息

我国向巴基斯坦提供第二个核电站

据“Modern Power Systems”1994年12月号报道,巴基斯坦决定向中国购买单台装机功率为300MW的第二个核电站。该类型的第一座核电站是在巴基斯坦的Chashma建造的,它的轻水堆将利用以巴基斯坦生产的浓缩铀为基础的核燃料。Chashma核电站预定在1998年启动。

巴基斯坦总统表示同意在国际原子能机构保证的框架内在非国营经济部门内建设一些新的核电站。与可能扩散核武器有关的担忧阻碍着在巴基斯坦建设装有西方国家生产核反应堆的核电站。

(学牛 供稿)

attaining the above-mentioned aim and has practical significance for engineering applications. Key words: turbine rotor, high-temperature fatigue, service life evaluation

用工程方法考虑流动损失的跨音速透平级全三元流场的计算—Computation of a Transonic Turbine Stage Full Three-dimensional Flow Field with Flow Loss Being Taken Account of by a Engineering Method [刊, 中] / Huang Diangui (Southeastern University), Jiaog Zikang (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). 393~396

Presented in the paper is a full three-dimensional flow field computational method for a transonic turbine stage with flow losses by the use of a time marching method. The flow losses are calculated by using the flow loss model proposed by Harbin Turbine Works. The full three-dimensional flow field computation results with flow losses being taken into account have been compared with those with the neglect of flow losses. It is found that in the case of flow losses being considered there emerged a certain enhancement in the degree of reaction with a slight change in speed triangle, indicating that the consideration of flow losses is essential to the further improvement of turbine stage design. The method recommended in the present paper is suitable for use in engineering designs. Key words: turbine, full three-dimensional, transonic.

汽液两相螺杆膨胀机的定熵膨胀功率特性—The Power Characteristics of a Two-phase Helical Screw Expander During Its Isentropic Expansion [刊, 中] / Wang Wei (Tianjin Urban Construction Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -397~400

The power characteristics of a helical screw expander during its isentropic expansion was studied in detail with the concept of expansion ratio of peak power being proposed. Also analysed was the effect of inlet working medium (steam-water mixture) parameters and the said medium pre-throttling on the power characteristics of the helical screw expander. Key words: total flow, helical screw expander, two-phase expansion, power characteristics.

水平管内气—液两相流流型及其转换特性研究—Gas liquid Two phase Flow Pattern in a Horizontal Pipe and the Study of its Conversion Characteristics [刊, 中] / Zhou Yunlong, Xia Guolong, Chen Xiaoshan, Jiang Anzhong, Li Hongyuan, Li Xuewu (Northeast Electrical Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -401~404

An experimental study was conducted of an air-water two phase flow pattern in a horizontal circular pipe. A flow pattern figure plotted on the basis of the test results was compared with that obtained through conventional test results, indicating the presence of analogous specific features. As a result, proposed was a flow pattern conversion relation with a greater forecast capability. Key words: horizontal pipe, gas-liquid two phase flow, flow pattern, conversion characteristics

Edited and Published by Harbin Marine
Boiler & Turbine Research
Institute and Editorial Staff
of this Journal

Printer: Printing House of Harbin Institute
of Technology

Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin China

Post Code Number 150036

ISSN 1001-2060
Periodical Registration:
CN23-1176/TK

Distributed by China International
Book Trading Corporation,

P. O. Box 399, Beijing, China