

分流叶栅及串列叶栅的流场计算

石道中 王世民 (哈尔滨工业大学)

〔提要〕 本文用流函数有限差分松弛法求解了分流叶栅及串列叶栅的流场。所求出的轴流式叶栅叶型表面速度分布与文献〔1〕中试验数据十分相符；同时计算了多分流叶栅流场，计算值与〔2〕中试验值吻合很好；还对〔3〕中的串列叶栅流场进行了计算，计算与试验结果也吻合较好；按本方法计算数据优化设计的含分流叶栅的离心式风机的性能较好。

主题词 分流叶栅 串列叶栅 流场计算

一、前言

在叶轮机内部流场中，为了改善气流状况，降低流动损失或提高叶栅的气动负荷，常采用分流叶栅或串列叶栅。当设计这些复杂叶栅时，要求能较准确地计算其流场，其关键在于正确计算其分流比。

分流比 ψ 。定义为绕流分流叶片（或串列叶栅后排叶片）流线的流函数值。在相对稳定的情况下，在分流叶栅（或串列叶栅）的叶片形状、相对位置和运行工况一定的条件下，其分流比是唯一的。分流比的变化对流场的影响很大。

早期文献在计算这类流场时，都是在假定分流比的条件下进行的。近些年来，国内外学者提出了很多计算分流比的方法，如文献〔4〕、〔5〕、〔6〕等，但上述方法都有各自的局限性。对于多分流叶栅，由于变量多，边界条件更复杂，计算难度大，文献〔2〕在这方面做了些工作，它是采用有限元方法计算多分流喷嘴的流场，但用有限差分法对多分流叶栅的流场进行计算的工作还未见到。

串列叶栅虽已在航空发动机上得到广泛应用，但有关串列叶栅的研究资料大都是反映叶栅整体性能的，其流场的理论计算尚有待进一步完善。

本文是在文献〔7〕的基础上进行的。

二、计算方法

1. 基本方程

流函数方程

本文初稿曾在中国工程热物理学会第六届年会宣读

收稿日期：1989-01-05

$$\frac{\partial \psi}{\partial m} = -b\rho W_u / \rho_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta} = rb\rho W_m / q_m \tag{2}$$

式中 q_m 为回转流面的质量流量; ρ 为工质密度; b 为流片厚度。

运动方程

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial m^2} - \frac{1}{r^2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} + \left[\frac{\sin}{r} - \frac{1}{b\rho} \frac{\partial(b\rho)}{\partial m} \right] \frac{\partial \psi}{\partial m} = 2b\rho\omega \sin\alpha / q_m \tag{3}$$

能量方程

$$\rho = \rho' \left[1 - \frac{W^2 + 2\omega\lambda - (\omega r)^2}{2C_p T'} \right]^{1/(K-1)} \tag{4}$$

在计算域内采用适当网格, 对流函数进行离散, 采用第一类边界条件, 即可求解流函数场。再经过密度与速度联合求解, 可得密度场与速度场。

2. 分流比的确定方法

分流比采用迭代求解法。先作“尖前缘”处理, 用插值法求出“尖前缘点”的流函数值, 并以此为分流比的初始值迭代实际圆前缘叶片的流场。利用所得流函数, 从分流叶片表面前部节点(非最前缘)至下游无分离处节点, 对方程(2)积分, 求得叶型表面的流函数值。取其平均值, 得上、下表面的值分别为 ψ_u 和 ψ_l 。记修正前的分流比为 ψ_n , 修正后的分流比为 ψ_{n+1} ; Ω_1 、 Ω_2 为松弛因子。由线性迭代理论推出分流比的修正公式:

$$\psi_{n+1}^* = \psi_n + \Omega_1 [0.5(\psi_u + \psi_l) - \psi_n] \tag{5}$$

$$\psi_{n+1}^{**} = 0.5(\psi_n + \psi_u) + \Omega_2(\psi_u - \psi_l) \tag{6}$$

$$\psi_{n+1} = 0.5(\psi_{n+1}^* + \psi_{n+1}^{**}) \tag{7}$$

由(5)、(6)、(7)式可知:

当 $0.5(\psi_u + \psi_l) \rightarrow \psi_n$ 且 $\psi_l - \psi_u \rightarrow 0$ 时, 必有 $\psi_{n+1} \rightarrow \psi_n$ 。虽然在数学上还无法证实公式(7)最后收敛于真值, 但从物理模型上可以定性说明它最终收敛于真值。

计算具有多个分流叶片流场时, 对分流比的初赋值要求较高。虽然从数学角度上讲, 只要偏微分方程满足适定性, 最终必能收敛于真值, 但从物理模型来看, 当分流比的偏差过大时, 势必导致各分支流道流量分配失当, 导致气流发生分离或出现音速等情况, 而使计算无法进行。为此, 采用下述方法初赋分流比(以含两个分流叶片的流场为例), 当分流叶片在主叶栅中的几何位置确定后, 先假定该流场中只含一个分流叶片, 用确定单个分流叶片分流比的方法所求得的分流比作为分流比的初值, 给定各分流叶片分流比后, 每迭代一次, 需交替修正其中一个分流比。

在计算串列叶栅时, 分流比的迭代方法与上述类同。在初赋分流比时, 可采用“几何法”, 即按流道的周向距离的比例作为分流比的初赋值。此外, 尚应按“广义 K-J 条件”迭代气流出口气角。

三、算 例

算例1是对文献[1]中轴流式静叶栅进行了计算。图1为该叶栅各叶片的相对位置。图2为

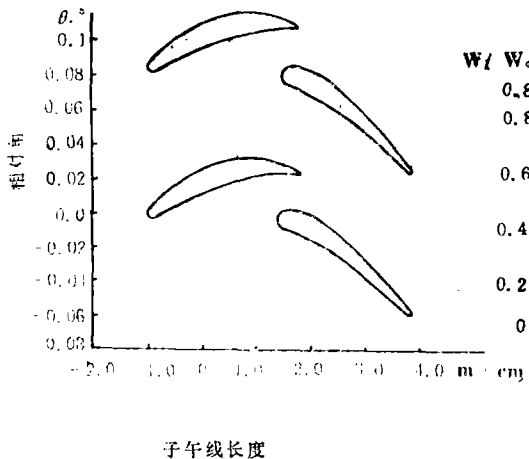


图1 轴流式静叶栅叶片相对位置

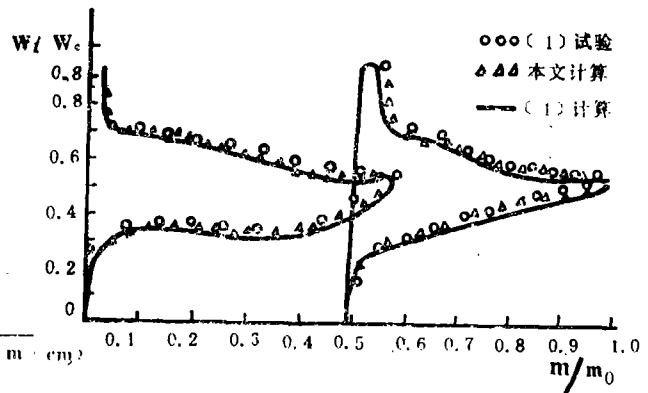


图2 计算与试验结果比较

计算结果与试验结果的比较。其中实线为文献[1]作者按给定分流比(0.64)计算的结果。本文计算结果的分流比为0.6506,且叶型表面速度分布更接近试验值。

算例2为对具有单分流叶片的离心式风机(图3)所进行的计算。第一组数据为分流叶片长度不变而周向位置不同时对流场的影响,见图4、5;第二组计算数据为分流叶片的周向位置不变,其长度变化时对流场的影响(见图6、7)。据此优化设计的风机,经综合性能测试表明:其效率较高(0.83)、噪声低(比A声级15dB)。

算例3为对汽轮机高压隔板多分流叶栅的流动计算。分流叶片相对于主叶栅的位置(见图8),图9为主叶栅的叶型。分流叶片采用高效45TC-A叶型,主叶栅由此叶型改进。图10、11为分流叶片和主叶栅的叶型表面速度分布图。

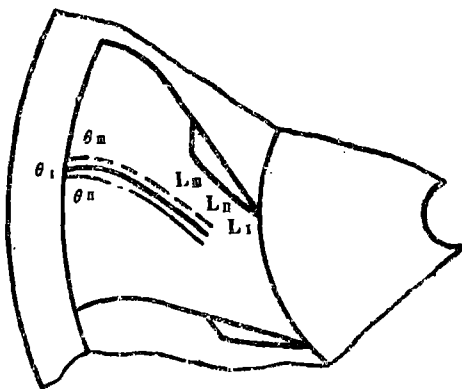


图3

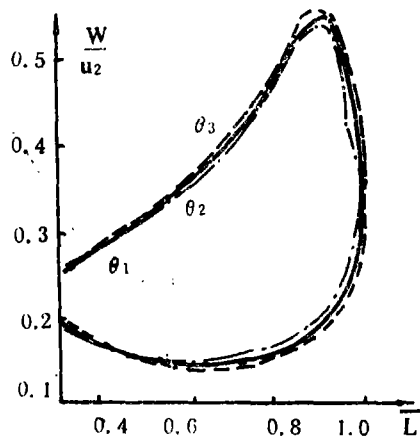


图4

算例 4 为对文献[3]中的串列叶栅 (图12) 的流场计算。压力系数定义为:

$$C_p = \frac{p - p_2}{0.5 \rho_2 v_2^2}$$

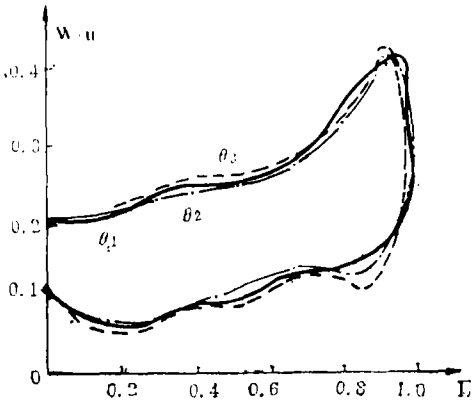


图 5

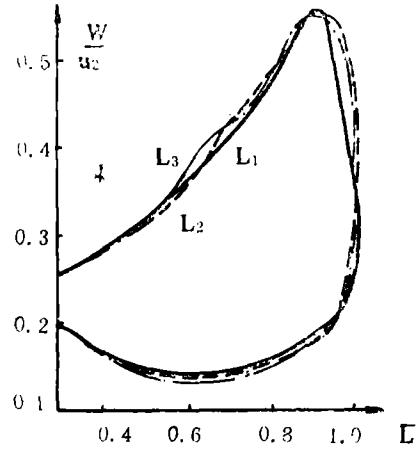


图 6

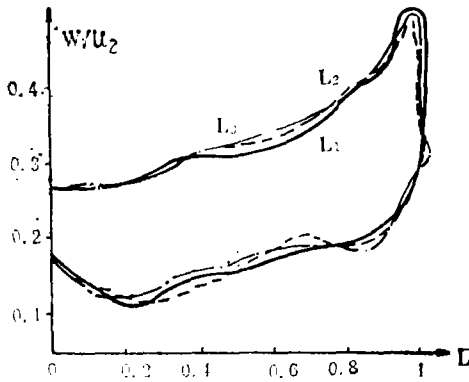


图 7

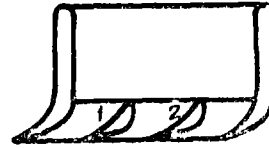


图 8

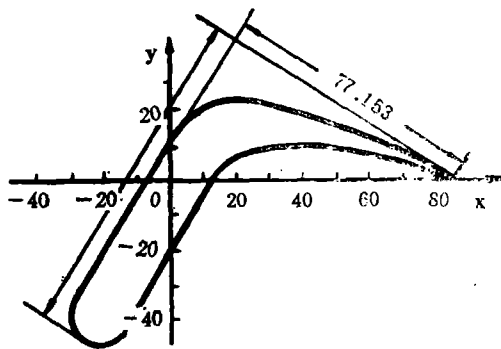
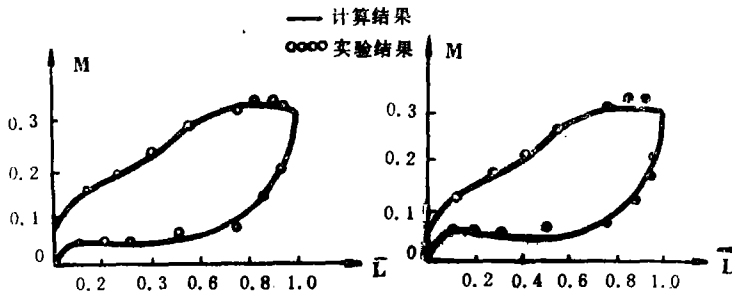


图 9



a) I号叶片速度分布图 b) II号叶片速度分布图

图10

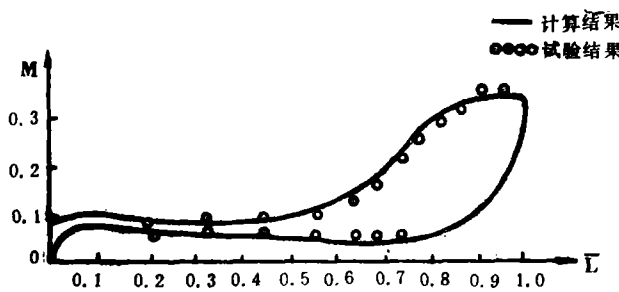


图11

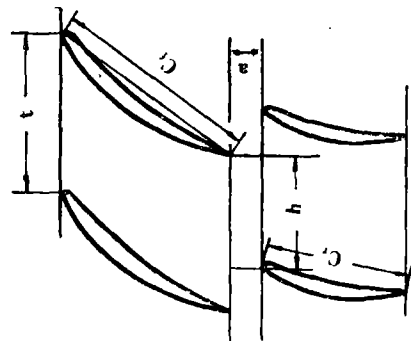


图12

式中下标 2 表示叶栅远下游, p_2 在数值上等于当地大气压; ρ_2 、 v_2 为叶栅远下游气体密度和速度; p 为叶型表面的静压。

本算例曾对多个不同攻角下的流场进行了计算, 图 13 是攻角为零时叶型表面的压力分布; 图14为前、后排叶栅折转角与攻角的关系曲线。计算表明: 前排叶栅的气流折转角受气流攻角的影响大, 而后排叶栅几乎不受气流攻角的影响, 即前排对后排起了导流作用。因此, 串列叶栅所完成的折转角大, 工作范围广, 损失也可较低。

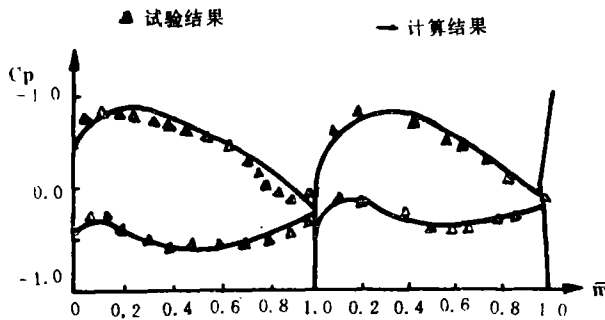


图13

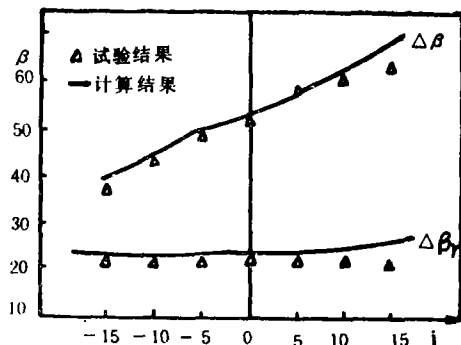


图14

四、结 论

本文提供的计算具有分流叶栅和串列叶栅流场的方法,能稳定收敛、计算速度较快、计算结果与试验数据吻合较好。典型算例显示了本方法的工程实用性。

参 考 文 献

- [1] Katsanis T & Menally W D. Fortran Program for Calculating Velocities and Streamlines on a Blade-to-Blade Steam Surface of a Tandem Blade Turbomachine. NASA N69-21811
- [2] 徐国群,沈炳正,张志刚.多分流叶栅 S_1 旋成面下的气动正命题有限元新解法及试验研究.中国工程热物理学会第三周年会,1985,论文编号:852010
- [3] 徐 雕,吴国钊.大攻角时串列叶栅内部流场的试验研究.中国工程热物理学会,872020,1987年
- [4] 中激敬之,妹尾泰利.日本机械学会论文集(昭和48),1973年
- [5] 刘殿魁 具有任意形状的分流叶片叶栅的完全三元流动解法 工程热物理学报,1984,5(1)
- [6] 王保国,吴仲华.含分流叶栅的 S_1 流面上可压流动矩阵解.工程热物理学报,1984,5(1)
- [7] 石道中,王建华.在计算具有分流叶片流场中确定分流比的方法.高等学校工程热物理学术会议论文集,1986
- [8] 惠兆森,吉桂明.串列叶栅流场计算.热能动力工程,1986,1(6)

Calculation of Flow Fields in Vanes with Splitter and Tandem Cascades

Shi Daozhong, Wang Shimin

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

A method for calculating flow fields in vanes with splitter and tandem cascades are described. The solutions are in good agreement with test results of papers (1,2,3). The typical calculation examples given in this paper demonstrate the practicality of our algorithms.

Key words: *vanes with splitter, tandem cascade, flow field calculation*