

轴对称环形直壁扩压通道内 流动过程的流管法计算

西北工业大学 华光时

摘 要

本文根据流管法基本概念对轴对称环形直壁扩压通道内的气体流动过程提出了一套便于工程应用的计算方法和计算机程序。文中对进口下游任一截面静压(p_{i+1})值的确定,提出了能较准确地直接计算 λ_{i+1} 和 p_{i+1} 值的两个相关公式,更新和避免了文献(1)中对 p_{i+1} 及其以后一系列计算步骤所采用的全部过程反复迭代方法,减少了大量计算工作量和计算时间。

用本方法进行实例计算的结果与实验结果符合良好,表明本方法合理可行。

一、计 算 方 法

1. 基本假设

(1) 流动为轴对称定常流;(2) 对通过有效流通面积(壁面附面层位移厚度 δ^* 所占面积除外)的主流,作为理想流体处理,并考虑其压缩性;(3) 主流为 N 个流管组成,在每一流管中,流动是均匀和等熵的。各流管在进口截面上的面积相等;(4) 在垂直于扩压通道中心线的同一截面上,各点气流的静压相等;(5) 在本文所研究的对象中:粘性流在扩压通道壁面上产生的附面层与具有在扩压通道中相同压力梯度($\frac{\partial p}{\partial x} > 0$)的平板上所产生的附面层相同;(6) 当附面层形状因子 H 超过某一临界值 H_{sep} 时,认为附面层发生分离。本计算中取 $H_{sep} = 1.9$;(7) 在任一轴向位置上,流线的斜度从一壁到另一壁的变化是线性的。

2. 已知条件和参数

扩压通道几何参数:进口内、外壁半径 R_{L1} 、 R_{U1} ;内、外壁扩张角 α_L 、 α_U ;长度 L_d 。

进口截面气流参数:重量平均总压 p_{m1}^* ;均匀总温 T_1^* ;进口速度分布 $u = f(y)$;进口内、外壁面附面层位移厚度 δ_{L1}^* 、 δ_{U1}^* 。

此外,选定流管数目 N 和沿程计算截面数目 M 。

3. 计算思路和步骤

图1为轴对称环形直壁扩压通道应用流管法分析和计算用图。

本方法整个计算可分为五个步骤,概述如下:

(1) 计算扩压通道沿程各计算截面之几何尺寸。

(2) 确定进口截面上其他几何参数和气流参数。主要计算内容有:有效总流通面积

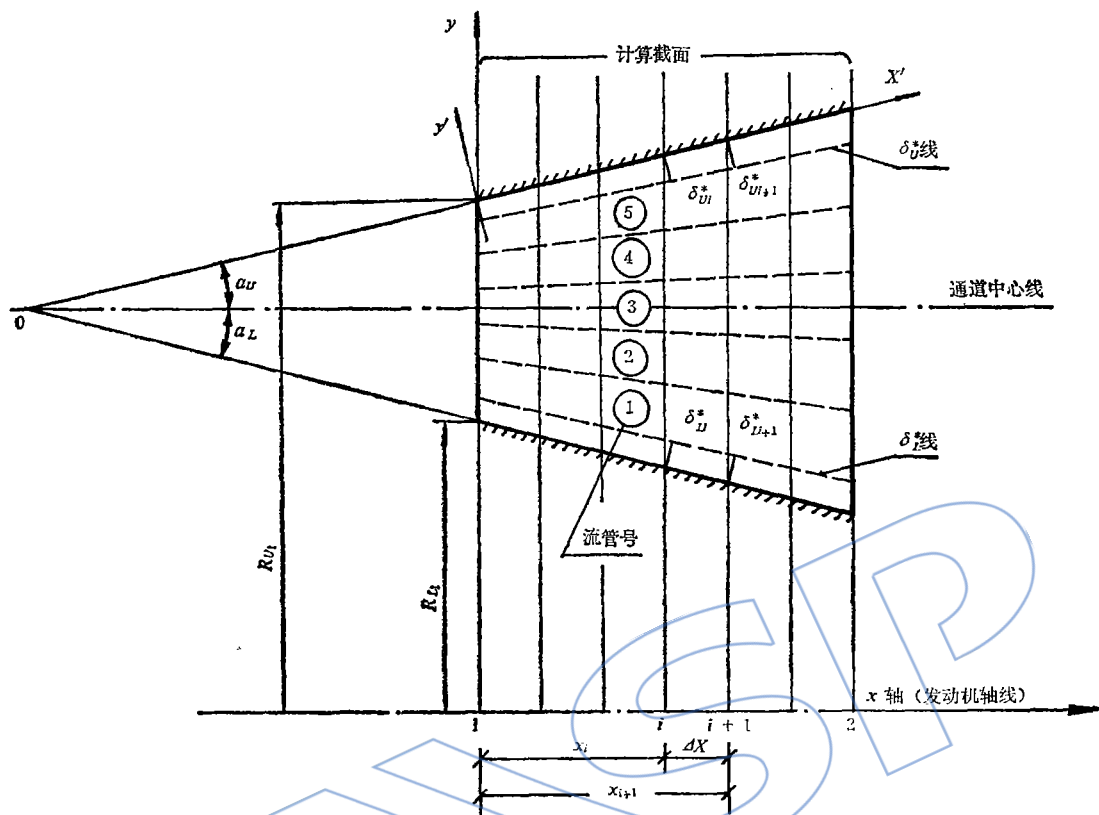


图1 分析和计算用图

$A_{eff,1}$; 各个流管面积及其上下边界流线和中间流管在进口截面上相应点的半径, 根据已知的进口速度分布, 采用拉格朗日二次三点插值法计算上述各点的速度, 并采用柯特斯公式来求各流管内的平均速度 $u_{j,1}$ (下标 j 表示任一流管); 各个流管的静温、总压、比重和流量; 对应 $A_{eff,1}$ 主流的速度、速度系数、静压、静温、比重和总流量; 内、外壁面附面层形状因子及动量损失厚度等。

(3) 确定下游各计算截面上各流管的参数和其他参数。主要计算内容有: 确定截面上的静压 p_{i+1} ; 各流管的状态参数和面积; 该截面处外、内壁面的附面层位移厚度 ($\delta_{U,i+1}^*$ 和 $\delta_{L,i+1}^*$); 诸流管合成的总流通面积, 以及各流管上下边界流线和中间流管在该截面上相应点的半径等。

按所划定的计算截面位置, 依次往下游计算各截面的上述参数, 直到扩压通道出口为止。

(4) 确定扩压器性能参数。主要有扩压器实际压力恢复系数 C_p 和总压恢复系数 σ_D 。

(5) 确定扩压通道出口截面的速度分布、(或密度分布、温度分布、质量流分布等); 流通比 $E_2 (= A_{eff,2}/A_2)$ 和堵塞比 $B_2 (= 1 - E_2)$ 。(A_2 为出口截面几何面积)。

下面着重介绍本方法中关于进口下游任一截面静压 (p_{i+1}) 的计算。

二、 p_{i+1} 值的确定

由前面步骤(3)可知,在计算进口下游任一截面上的各项参数时,首先要确定出该截面上的静压 p_{i+1} ,然后才能进行以后一系列的计算。本文为了能一开始就比较准确地计算 p_{i+1} 值,避免文献[1]中所采用的对 p_{i+1} 及其以后一系列计算步骤进行全部过程的反复迭代方法,提出了下列计算方法:

当气体在轴对称环形直壁扩张通道中作绝热、无外功交换而有摩擦和扩张损失的流动时,在忽略位能变化的情况下,由一维定常流的基本方程,经过推导可得出下列两个相关公式来直接计算 λ_{i+1} (速度系数)和 p_{i+1} 值:

$$\frac{r_{i+1}}{r_i} = \left[\frac{1 - \sqrt{C} \lambda_{i+1}}{1 + \sqrt{C} \lambda_{i+1}} \right]^Q \cdot \left[\frac{1 + \sqrt{C} \lambda_i}{1 - \sqrt{C} \lambda_i} \right]^Q \cdot \left[\frac{1 - C \lambda_i^2}{1 - C \lambda_{i+1}^2} \right]^S \cdot \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{p_{i+1}}{p_i} = \left[\frac{1 - E \lambda_{i+1}^2}{1 - E \lambda_i^2} \right] \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{r_{i+1}}{r_i} \right)} \right] \cdot \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} \right) \quad (2)$$

式中, r_{i+1} 、 r_i 分别为 $i+1$ 和 i 截面上 $1/2$ 通道高度;

λ_{i+1} 、 λ_i 分别为 $i+1$ 和 i 截面上的速度系数;

p_{i+1} 、 p_i 分别为 $i+1$ 和 i 截面上的静压;

$$Q = D \bar{\lambda}_{A_1} / 2 \sqrt{C}; \quad S = 1 - C + D/2C; \quad D = 2\psi k / k + 1;$$

$$C = K - 1 + 2B/k + 1; \quad B = K \cdot C_f / 2 \sin \alpha; \quad E = k - 1/k + 1$$

Q 、 S 、 D 、 C 、 B 、 E 均为指数或系数。 k 为绝热指数, α 为壁面扩张角, $\bar{\lambda}_{A_1}$ 为对应于进口截面几何面积 A_1 的平均速度系数, C_f 为当地摩擦系数, ψ 为软化系数。

已知前一截面诸参数 [λ_i 、 p_i 和 (r_{i+1}/r_i)]值,用(1)式先求得 λ_{i+1} ,再由(2)式求得 p_{i+1} 值。

1. C_f 的计算 可按下列步骤求 C_f :

(1) 求气体的运动粘度 ν :

对空气: $\nu = (0.1507 \times 10^{-5}) \cdot (T^{1.5}/T + 122) / \gamma$ (m^2/s), 式中, T 和 γ 分别为气体的静温和比重;

(2) 求环形通道的当量直径 D_e 及雷诺数 R_e :

$$D_e = \alpha(R_U - R_L) \text{ (cm)}, \quad R_e = (D_e/100) \cdot u/\nu;$$

(3) 求沿程损失系数 ξ 及 C_f :

内壁面经过抛光的扩压通道,可视为光滑管,这时, ξ 仅与 R_e 有关。当 $R_e < 3.4 \times 10^6$ 时,可按公式 $1/\xi = \alpha \lg(R_e \cdot \sqrt{\xi}) - 0.8$ 求 ξ ;按定义, $C_f = \xi/4$

在扩张通道中, ξ (或 C_f)值沿流程增量极其微小,且 $\xi = f(x)$ 曲线随 x 的增大逐渐变得平缓,因此,计算时可用 i 截面的 ξ_i 值,也可近似地用进口截面处的 ξ_1 值来计算,无显著误差。

2. Ψ 的计算

对内外壁面几何扩张角相等的直壁扩压通道,沿程任意两截面间的当量扩张角 Q_e 均相等,故 ψ 为一常数。 ψ 可按下列两式求得:

及

$$Q_e = \alpha \operatorname{tg}^{-1} \left[(D_{e_{i+1}} - D_{e_i}) / \alpha (x_{i+1} - x_i) \right]$$

$$\psi = 3.5 [\operatorname{tg}(Q_e/2)]^{1.22} \text{ (当 } 8^\circ < Q_e < 40^\circ \text{ 时)}$$

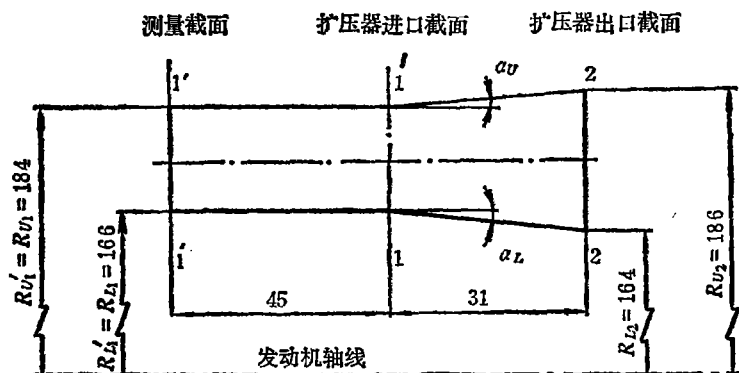


图2 扩压器几何尺寸简图

三、算 例

用本文方法对某一短环形直壁扩压器内的流动过程进行了计算。扩压器几何尺寸(图2)及实验数据取自文献〔8〕和燃气涡轮研究所四室。测量截面气流参数为: $p_{m1}'^* = 302344.2$ Pa; $T_{1'}^* = 331^\circ \text{K}$; $\delta_{U1}^* = \delta_{L1}^* = 0.001075 \text{m}$, 速度分布如图3所示。计算时取 $N = 5, M = 8$

计算从测量截面开始,并考虑了 $1'-1'$ 至 $1-1$ 截面等直段内的实际流动。计算结果如下:

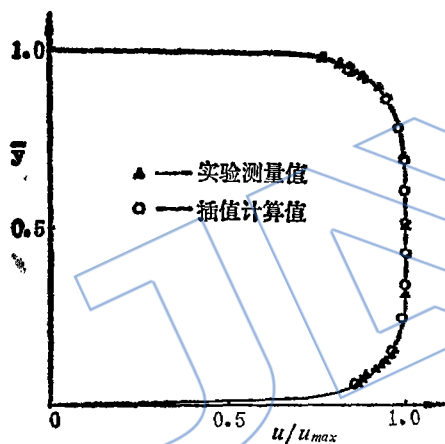


图3 测量截面速度分布

图4表示自 $1'-1'$ 至 $2-2$ 截面全长范围内的沿程流路图。由此图可直观地看到沿流程

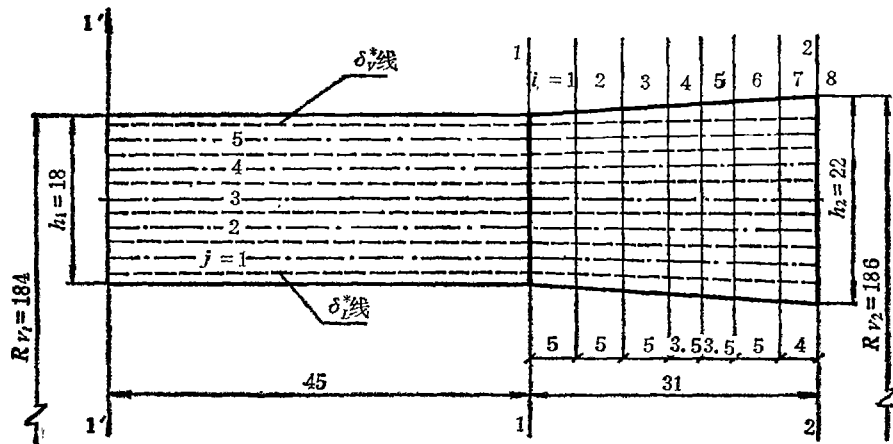


图4 沿程流路图

上、下壁面附面层位移厚度 (δ^*) 及各个流管形状和面积的变化情况,也可根据需要直接在此流路图上绘出多个主要截面处的速度分布、密度分布和温度分布,这样,也就可直接观察到沿流程各参数分布的变化。

由图 5 和图 6 (按公式 (1) 和 (2) 计算得到) 可见,计算曲线与相应的实验值均符合得很好。

所算得的扩压器性能参数与实验值基本符合,如 $C_p'_{1-2}$ 分别为 0.2311 和 0.2320^[8], $\sigma_{1'-2}$ 分为 0.9918 和 0.9930。

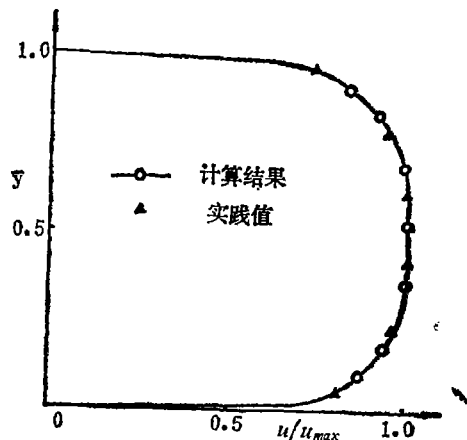


图 5 扩压器出口速度分布

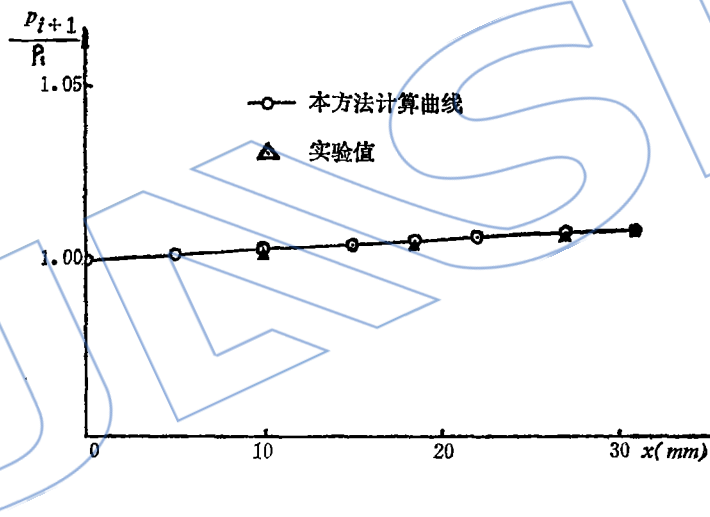


图 6 扩压器沿流程的静压分布

四、结 束 语

1. 计算分析和实验表明,本本提出的计算方法和程序可以用来计算轴对称环形直壁扩压通道(或二元直壁扩压通道)内的气体流动过程,计算结果相当准确。本方法也可用于短环形燃烧室突扩扩压器的前置扩压器内流动过程的计算。

2. 采用文中提供的两个相关公式 (1) 和 (2) 直接确定进口下游任一截面的静压 (p_{i+1}) 值,是合理可行的,且根据 p_{i+1} 值进行以后一系列步骤的计算,所得结果足够准确,能满足工程实用要求。与文献[1]相比较,本方法不需对进口下游任一截面上各项参数(包括对 p_{i+1} 值的初估在内)的全部计算过程进行反复迭代,因此,本方法不仅在应用上更为简便,且可以大大减少计算工作量和计算时间。

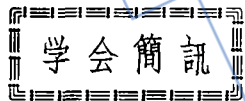
3. 用本方法进行的大量计算和分析表明: 对 $\alpha_U = \alpha_L = \alpha$ 的环形直壁扩压通道, 在考虑沿程损失及扩张损失情况下, α 角以不大于 8° 为宜, 否则会导致损失增大。扩张通道面积比以不大于1.46为宜, 否则会导致误差增大。

谨对燃气涡轮研究所四室同志为本文计算提供实验数据, 以及凌文中和杜声桐同志在编制计算机程序中给与的帮助深表谢意。

参 考 文 献

1. Computer Program for the Analysis of Annular Combustors Vol. I: Calculation Procedures, NASA CR-72374
2. Beer, J.M., and Chigier, N. A., "Combustion Aerodynamics", Applied Science Publishers LTD, 1972.
3. 宁晃“燃烧空气动力学基础”, 科学出版社, 1980
4. Fishenden, C.R., and Stevens, S.J., "The Performance of Annular Combustor-Dump Diffusers," AIAA Paper No.74-1097, October, 1974.
5. Klein, A., Katheder, K., and Rohlfes, M., "Experimental Investigation of the Performance of Short Annular Combustor-Dump Diffusers," Presented at the and International Symposium on Air Breathing Engines, University of Sheffield, England, March, 1974.
6. Wolf, S., and Johnston, J.P., "Effects of Nonuniform Inlet Velocity Profiles on Flow Regimes and Performance in Two-Dimensional Diffusers," Transaction of the ASME, Vol. 91, 1969, pp. 462-474.
7. Stevens, S. J., and Fry, P., "Measurements of the Boundary Layer Growth in Annular Diffusers," Journal of Aircraft, Vol. 10, 1973, pp. 73-80, or AIAA 72-86.

(责任编辑 刘导治)



第二届推进系统气动热力学学术讨论会 在 南 京 召 开

中国航空学会(动力)第二届推进系统气动热力学学术讨论会于1986年5月26日至30日在南京召开。有航空工业部、航天工业部、空军、民航以及科学院等系统的30个单位, 59名代表参加了会议。会议由张世英教授主持, 宣读和散发了45篇论文。在进气道、尾喷管、发动机匹配技术和总体性能等方面有较多的文章, 包括试验研究和计算、有关性能数据库的建立等。会上还宣读了一些反映贯彻军民结合、航技民用的论文。整个会议讨论认真, 学术气氛较浓。

(尚 义)

A METHOD FOR CALCULATION OF FLOW PROCESS IN AN AXISYMMETRIC STRAIGHT-WALL ANNULAR DIFFUSER

Hua Guangshi

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract

A complete method for calculation of the steady compressible flow in an axisymmetric straight-wall annular diffuser with boundary layer correction based on streamtube method has been developed. One of the main features is that, for determination of the static pressure (p_{i+1}) at any downstream section from the inlet, two correlated formulas for direct and accurate calculation of the values of λ_{i+1} and p_{i+1} respectively are derived. Therefore, the iterative process as used in reference (1) might be avoided and the CPU time is then greatly reduced if the new solution procedure of the present study is employed.

Calculations have been carried out for a short annular diffuser. The results are all in very good agreement with experimental data. The calculations show that, if $\alpha_U = \alpha_L = \alpha$ (half the diffuser wall angle) and both wall friction and divergence losses are taken into account, $\alpha < 8^\circ$ and diffuser area ratio less than 1.46 are recommendable. This method is also applicable to the calculation of flow fields in a pre-diffuser of a short annular combustor-dump diffuser or in a two-dimensional straight-wall diffuser.

VIBRATIONAL CHARACTERISTICS OF THE CANTILEVER ROTOR WITH A CRACKED SHAFT

Gu Jialiu and Wang Nengqan

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract

The vibrational characteristics of the high speed cantilever rotor with a cracked shaft are investigated to find an optimum vibration monitoring method for a turbine rotor. The model studied is established based on the structure of a real turbine rotor.

The transfer matrix-direct integration method proposed by the first author in reference (2) is applied to the theoretical analysis. In consequence it is possible