

二次空气系统一维非定常计算方法

李 澎, 吴 宏, 陶 智

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 研究了燃气轮机二次空气系统的非定常计算方法. 通过将整个二次空气系统划分为两部分, 特征“长”元件以及局部损失元件, 特征线法用于单个特征“长”元件的求解, 通过将连续方程、动量方程、能量方程构成的偏微分方程组转换为常微分方程组并联立求解, 可以充分考虑内部流动与换热的相互影响; 基于压力修正的流体网络法则用于由多个局部损失元件组成的局部流体网络, 首先对动量方程组进行求解, 进而对各自的能量方程进行求解. 如何在采用这两种方法进行求解的上述两类元件之间进行数据交互将被讨论. 此外, 所提出的时间步长定义方法以及改进的元件计算模型使得二次空气系统的非定常分析得以实现. 计算程序经与某系统定常实验数据及单个元件的非定常计算数据进行对比, 在 10 s 的计算时间内, 基于特征线法得到结果与 CFD 数据偏差达到 10.2%, 结果表明该计算程序可以满足二次空气系统非定常计算的要求.

关 键 词: 流体网络法; 特征线法; 一维非定常; 经验关联式; 二次空气系统

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

One-dimensional unsteady calculational method of secondary air system

LI Peng, WU Hong, TAO Zhi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The unsteady calculational method of secondary air system in gas turbines was studied. The whole system was divided into several length correlated parts and discrete loss parts. The method of characteristic line was adopted for single length correlated parts, while partial differential equations of continuity, momentum and energy were transformed to ordinary differential equations under specified conditions, so the interaction of flow and heat transfer inside the parts itself could be taken into account. When the method of flow network based on pressure correction was used for discrete losses parts, momentum equations were solved prior to the calculation of respective energy equation. The process of data transfer on the interfaces between the mentioned two types of parts was discussed. With the method of time step definition and improved analytical models for different parts adopted, unsteady analysis of secondary air system was achieved. The program was validated against steady experimental data of the whole system and unsteady calculational data of individual parts; in 10 s' calculational process, the result achieved by the program deviates 10.2% from that by CFD. The results indicate that the program can satisfy the need of unsteady calculation on secondary air system.

收稿日期: 2013-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51176004)

作者简介: 李澎(1984—), 男, 山西吕梁人, 博士, 主要从事航空发动机热端部件冷却研究.

Key words: method of flow network; method of characteristic line;
one-dimensional unsteady; empirical correlation;
secondary air system

符号表

A	流通面积(mm^2)	G	单位质量剪切力(m/s^2)
$\dot{m}$	流量(kg/s)	a	当地声速(m/s)
p	压力(Pa)	v	流速(m/s)
T	温度(K)	t	时间(s)
Re	雷诺数	ρ	密度(kg/m^3)
ω	旋转角速度(rad/s)	C	特征线
$\dot{q}$	单位质量换热量(W/kg)	h	比焓(kJ/kg)
x	沿流动方向的流程(m)	N_0	内部分段数
γ	比热比		

最早关于一维流体系统模拟的探索可以追溯到 1936 年, Cross^[1] 首先提到了应用系统求解方法来模拟流体网络的流动特性并探索定常流体网络的模拟方法. 在此后十几年中, 关于这方面的理论和方法开始完善并逐步跟实验等结合, 多个国家的政府部门和公司尝试将这一思想与工程结合形成一套可广泛应用或推广的工具应用到结构复杂的流体系统, 但直到 20 世纪 90 年代初, 流体网络的求解方法才真正趋于完善并应用到航空发动机二次空气系统的研究中, Kutz 和 Speer^[2] 通过开发计算程序的手段, 提出全新的非线性方程组的求解方法, 并讨论了一些典型的二次空气系统元件的流动特征, 通过将计算程序的计算结果与实验数据进行对比, 结果吻合度高. Muller^[3] 采用牛顿拉夫申法, 对包含进出口总压、总温、流量等未知参数在内的非线性控制方程组进行求解, 通过将方程组转化为雅可比矩阵与未知参数残量乘积的形式, 对残量进行控制. 此外, 通过将流体网络与有限元结构进行耦合计算, 考察了系统流动与外界换热之间的相互影响. 在过去的二次空气系统研究中^[4-6], 研究人员大多专注于定常特性的研究. 但是对于航空发动机, 工作往往处在非定常过程中, 这些非定常因素主要包括: ①发动机的启动; ②转速和输出功率的变化; ③发动机飞行高度的变化; ④压气机出口温度和压力波动; ⑤系统内部的质量以及能量的蓄存或耗散.

这些非定常因素可能引起主燃气向冷却腔室的倒灌, 同时由于涡轮叶片和涡轮盘等热元件的受热情况发生变化, 篦齿封严结构的封严间隙就会受到影响, 进而影响到封严效率. 这时空气系统能否提供足够的冷却流量和压力同时为这些热元

件提供可靠的冷却, 从而避免短时间的“扰动”造成二次空气系统的冷却性能降低甚至完全失效就变得尤为重要.

虽然二次空气系统的非定常特性已成为设计人员关注的重点领域, 但由于二次空气系统涉及高温、可压缩性、高马赫数甚至超声速等问题, 至今仍未有比较成熟的计算手段. 流体动力学中早已阐明了非定常流场中压力波传播的原理, 并推导了计算流场状态参数的偏微分基本方程组. 特征线法是针对流场中的特征线方程组, 沿着位置特征线, 把偏微分方程组转化为常微分方程组求解. 在其他工业领域, 如石油天然气、内燃机、脉冲爆震发动机等, 通过将“波”的概念引入到仿真计算中, 已成功开展过气锤、燃油喷射、动态进气、爆震波脉冲等非定常现象的模拟, 并且有过多种不同计算方法的尝试与对比, 如特征线法、有限差分法、有限体积法、有限元法等^[7-8]. 20 世纪 60 年代以来, 英国曼彻斯特大学的 Benson^[9] 及其工作组长期致力于内燃机进、排气及增压系统的非定常流研究和大量的特征线法模拟计算工作, 并于 20 世纪 70 年代中完成了 UMIST 程序. 1978 年 Benson 去世, 之后他的同事以他的名义整理出版了专著, 总结了此前以特征线法为基础的这一领域的研究和计算成果. 之后的很长一段时间里, 特征线法一直是内燃机领域非定常流研究的主流手段. 随着计算技术的不断发展, 有限差分法、有限体积法也逐渐被应用到可压缩非定常计算中来, 而对于航空发动机的空气系统的非定常分析, 正是由于二次空气系统本身运行机理的特殊性, 高速旋转、可压缩性、超声速流动、计算模型的复杂性均使得非定常的研究较为滞后, 尤其是盘腔、旋

件网络的边界条件,将流量结果作为特征“长”元件的边界条件,即可进行第2个时间步的计算.为了保证计算的收敛性,在进行数据交互时,先对相关参数进行松弛处理,如式(8)所示.

$$X^{2,0} = X^{1,1} + (X^{1,0} - X^{1,1}) \cdot F_{rla} \quad (8)$$

式中 X 代表压力(对流体网络法)、流量(对特征线法)或温度(对下游计算),上标中的第1个数字代表时间步数,第2个数字代表在某一个时间步内的阶段,0代表初始值,1代表结果值. F_{rla} 为松弛因子,用来改善计算的收敛性.那么第2个时间步的计算便可以实现.以此类推,非定常过程中每个时间步的计算均可以实现.交互节点在第 n 个时间步的初始条件可由第 $n-1$ 个时间步的计算结果经第 $n-1$ 个时间步的初始条件松弛之后得到.

$$X^{n,0} = X^{n-1,1} + (X^{n-1,0} - X^{n-1,1}) \cdot F_{rla} \quad (9)$$

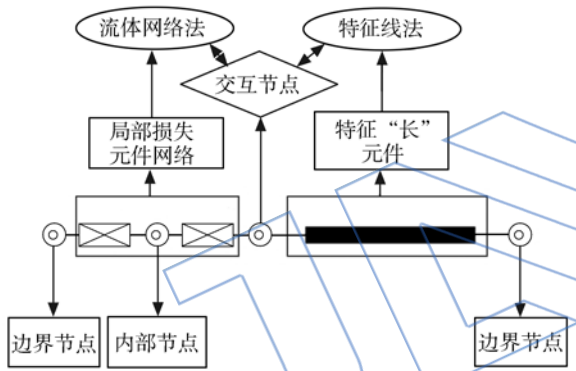


图2 二次空气系统非定常模拟中元件及节点的分类
Fig.2 Classification of parts and nodes for unsteady simulation of secondary air system

2 流体网络法

对于图3所示的由局部损失元件组成的网络系统,首先假设各节点 i, j, k, l 的总压 $p_i^*, p_j^*, p_k^*, p_l^*$, 由各支路中元件的控制方程求解出各元件 ij, ik, il 中的流量,对于节点 i ,各元件流入和流出的流量应符合如下的关系:

$$\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ik} + \dot{m}_{il} = 0 \quad (10)$$

式中 $\dot{m}_{ij}, \dot{m}_{ik}$ 以及 $\dot{m}_{il}$ 分别是元件 ij, ik, il 中冷却空气的流量,流入节点 i 为正,否则为负.

由于假设的各节点的总压与实际情况不一定符合,因而由各元件的控制方程式求得各元件的流量也就不一定符合实际情况.对于 i 节点,各元件(与 i 节点相连的元件)的流量之和也就不一定符合式(10),而是有一个流量残量 $\Delta \dot{m}_i$,根据全

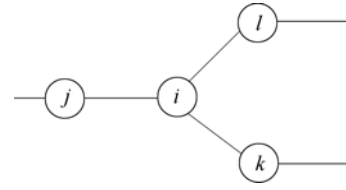


图3 流体网络法示意网络

Fig.3 Network scheme of fluid network method

微分的定义

$$d\dot{m} = \frac{\partial \dot{m}}{\partial p_{in}^*} dp_{in}^* + \frac{\partial \dot{m}}{\partial p_{out}^*} dp_{out}^* \quad (11)$$

则节点压力可利用流量残量 $\Delta \dot{m}_i$ 进行修正.

$$\left[\frac{\partial \dot{m}_{ij}}{\partial p_i^*} + \frac{\partial \dot{m}_{ik}}{\partial p_i^*} + \frac{\partial \dot{m}_{il}}{\partial p_i^*} \right] \Delta p_i^* + \frac{\partial \dot{m}_{ij}}{\partial p_j^*} \Delta p_j^* + \frac{\partial \dot{m}_{ik}}{\partial p_k^*} \Delta p_k^* + \frac{\partial \dot{m}_{il}}{\partial p_l^*} \Delta p_l^* = -\Delta \dot{m}_i \quad (12)$$

对于由若干局部损失元件及节点组成的流体网络,其流量及压力的分布则可通过在每个节点上求解方程式(12)来获取.如果网络中包含有 N 个节点,则需对式(13)所示的方程组进行求解.

$$\left[\sum_N \frac{\partial \dot{m}_{ij}}{\partial p_i^*} \right] \Delta p_i^* + \sum_N \left[\frac{\partial \dot{m}_{ij}}{\partial p_j^*} \Delta p_j^* \right] = -\Delta \dot{m}_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

附图A所示为流体网络法的非定常计算流程图,任何一个时间步的计算结果均被当做下一个时间步的计算初场.每个时间步计算所需的边界条件由边界节点及交互节点提供,其中边界节点参数需要给定,而交互节点参数则由式(9)计算得到.

3 特征线法

将 $a^2 = \gamma p / \rho$ 的关系式代入能量方程中,并将式(1)~式(3)所示的方程组进行如下整理:

[能量方程] + $a^2 \times$ [连续方程] + $a\rho \times$ [动量方程]

[能量方程] + $a^2 \times$ [连续方程] - $a\rho \times$ [动量方程]

与能量方程联立,可得

$$\left[\frac{\partial p}{\partial t} + (v+a) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + a\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v+a) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0 \quad (14)$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial t} + (v-a) \frac{\partial p}{\partial x} \right] - a\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v-a) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = 0 \quad (15)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x}\right) - a^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + \Delta_1 = 0 \quad (16)$$

方程组中

$$\Delta_1 = -(\gamma - 1)\rho(\dot{q} + v|G|) \quad (17)$$

反映的是流动过程中,总换热量(包括对外传热与摩擦或做功产生的热量)的影响.

$$\Delta_2 = \frac{a^2 \rho v}{a} \frac{dA}{dx} \quad (18)$$

反映缓慢变化的管截面的影响,对于旋转通道此项为0.

$$\Delta_3 = a\rho F \quad (19)$$

反映壁面黏性剪切力的影响.

根据二元函数全微分式 $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{dx}{dt}$, 如果满足以下条件:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dx}{dt}\right)_r &= v + a \\ \left(\frac{dx}{dt}\right)_l &= v - a \\ \left(\frac{dx}{dt}\right)_m &= v \end{aligned} \quad (20)$$

则偏微分方程组可转换为常微分方程组——特征线方程组

$$C_+: \left(\frac{dx}{dt}\right)_r = v + a$$

$$\frac{dp}{dt} + a\rho \frac{dv}{dt} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0 \quad (21)$$

$$(p_P - p_D) + \frac{(a_D + a_P)}{(A_D + A_P)} (\dot{m}_P - \dot{m}_D) - (\gamma - 1) \frac{\rho_D + \rho_P}{2} \left(\frac{\dot{q}_D + \dot{q}_P}{2} + \frac{v_D + v_P}{2} \frac{|G_D| + |G_P|}{2} \right) \cdot$$

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta x_r}{\left[\frac{v_D + v_P}{2} + \frac{a_D + a_P}{2} \right]} + \left[\frac{a_D + a_P}{A_D + A_P} \right]^2 \frac{\dot{m}_P + \dot{m}_D}{2} \cdot \frac{(A_P - A_D)}{\left[\frac{v_D + v_P}{2} + \frac{a_D + a_P}{2} \right]} + \\ & \frac{(a_D + a_P)(\rho_D + \rho_P)(G_D + G_P)}{8} \cdot \frac{\Delta x_r}{\left[\frac{v_D + v_P}{2} + \frac{a_D + a_P}{2} \right]} = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

对式(22)沿特征线 C_- 从 S 到 P 进行积分,显然,方程的第1项是完全的差分,而后4项则采用2阶估算,把 P 点的流动和 S 点的流动加以平均,可得

$$\begin{aligned} & (p_P - p_S) - \frac{(a_S + a_P)}{(A_S + A_P)} (\dot{m}_P - \dot{m}_S) + (\gamma - 1) \frac{\rho_S + \rho_P}{2} \left(\frac{\dot{q}_S + \dot{q}_P}{2} + \frac{v_S + v_P}{2} \frac{|G_S| + |G_P|}{2} \right) \cdot \\ & \frac{\Delta x_l}{\left[\frac{v_S + v_P}{2} - \frac{a_S + a_P}{2} \right]} + \left[\frac{a_S + a_P}{A_S + A_P} \right]^2 \frac{\dot{m}_P + \dot{m}_S}{2} \cdot \frac{(A_P - A_S)}{\left[\frac{v_S + v_P}{2} - \frac{a_S + a_P}{2} \right]} + \\ & \frac{(a_S + a_P)(\rho_S + \rho_P)(G_S + G_P)}{8} \cdot \frac{\Delta x_l}{\left[\frac{v_S + v_P}{2} - \frac{a_S + a_P}{2} \right]} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$C_-: \left(\frac{dx}{dt}\right)_l = v - a$$

$$\frac{dp}{dt} - a\rho \frac{dv}{dt} + \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = 0 \quad (22)$$

$$C_0: \left(\frac{dx}{dt}\right)_m = v$$

$$\frac{dp}{dt} - a^2 \frac{d\rho}{dt} + \Delta_1 = 0 \quad (23)$$

以一个时间步长为例,来说明本文中特征线方程组的处理方法,如图4所示.

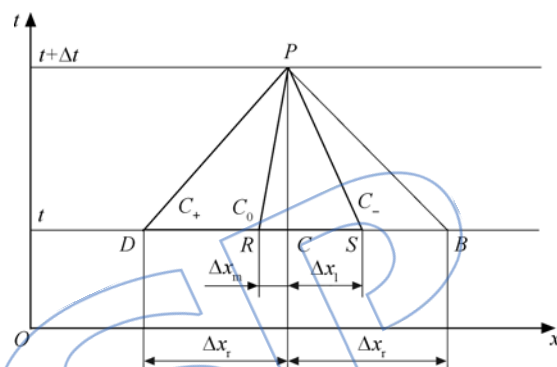


图4 单位时间步长内特征线的插值处理

Fig. 4 Disposal of interpolation by method of characteristic line within unit time step

对式(21)沿特征线 C_+ 从 D 到 P 进行积分,显然,方程的第1项是完全的差分,而后4项则采用2阶估算,把 P 点的流动和 D 点的流动加以平均,可得

对式(23)沿特征线 C_0 从 R 到 P 进行积分,显然,方程的第1项是完全的差分,而后2项则采用2阶估算,把 P 点的流动和 R 点的流动加以平均,可得

$$(p_P - p_R) - \left[\frac{a_R + a_P}{2} \right]^2 (\rho_P - \rho_R) - (\gamma - 1) \frac{\rho_R + \rho_P}{2} \left[\frac{\dot{q}_R + \dot{q}_P}{2} + \frac{v_R + v_P}{2} \frac{|G_R| + |G_P|}{2} \right] \Delta t = 0 \quad (26)$$

由于位置特征线代表的是不同的传播迹线,而在实际情况中, v 与 a 又是不断变化的,这就意味着无法确定3条位置特征线在时间-流向坐标系($t-x$)下交汇点出现的准确位置,为特征线方程组的求解及结果提取带来难度,在本文中,采取以下方法进行处理:

- 1) 计算开始之前,选定时间步长 Δt ;
- 2) 由 C_+ 特征线确定 $\Delta x_r = (v + a) \Delta t$;
- 3) 由特征长度 L 以及 Δx_r 来确定内部分段数 N_0 ;
- 4) 根据 N_0 确定沿流动方向各特征点的位置及相关参数;
- 5) 图4所示的 R 点及 S 点并不是由 N_0 所确定的特征点的位置,因此,其参数通过线性插值的方式,由与其位置最近的2个特征点的参数决定,如式(27)及式(28)所示

$$Y_R = Y_D + (Y_C - Y_D) \frac{\Delta x_r - \Delta x_m}{\Delta x_r} \quad (27)$$

$$Y_S = Y_C + (Y_B - Y_C) \frac{\Delta x_l}{\Delta x_r} \quad (28)$$

式中 Y 代指压力、温度、流量、流速、声速等系统参数。

基于特征线理论的一维假设,二次空气系统的流动过程被近似为一维的,对于其中的每一个元件,沿流动方向 x 的 $G, \dot{q}$ 是求解特征线方程组的必要条件。附图B所示为二次空气系统一维非定常模拟所采用的特征线法及计算处理的流程图,从图中可以看出,每个时间步的计算结果均被作为下一个时间步的计算初场,交互节点处的边界条件通过与由流体网络法迭代得到的数据相交互。采用式(9)对交互数据进行松弛,使得计算收敛性得以保证。

4 验证计算

图5所示为本文所验证的二次空气系统,压缩空气经由入口间隙进入到盘腔1,然后气流被分为两个支路:其中一个支路经过一组旋转孔口与盘腔2相连;另一个支路则通过篦齿封严与盘腔4相连。从盘腔2流出的气流经过环形通道与一组旋转孔口汇入盘腔3,并经由出口间隙汇入

主流燃气。从盘腔4流出的气流经过盘缘密封结构进入涡轮叶栅通道,图中节点后数值为该节点距主转轴的距离。整个系统包含旋转孔口、直通式篦齿封严、环形通道等具有通用的经验关联式的标准元件^[11-16],以及盘缘间隙、盘缘密封结构等非标准元件,在本文中,这类非标准元件采用通用的局部损失计算方程进行模拟,损失系数与流动雷诺数相关联。

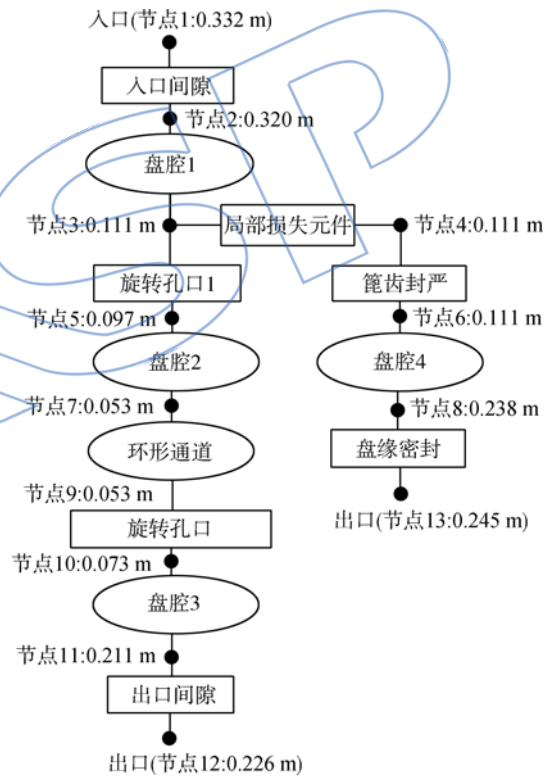


图5 二次空气系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of secondary air system

发动机的转速为 18 000 r/min,各元件的径向位置通过与其进出口相连接的节点位置来定义。对于具有非标准结构的各个盘腔的模拟,特征线方程组的求解对象为沿流动方向的每一个流体微团,并且方程组中的 Δ 项包含了流通面积变化的影响,因此将文献[17-18]所提出的力矩特性的经验关联式应用于特征线方程组的求解是可行的。

定常结果通过实验数据进行验证,非定常结果通过单个元件的 CFD 非定常数据进行验证。

5 结果分析

5.1 定常分析

在定常分析工况下,系统定常总压分布程序计算结果与实验数据对比如图 6 所示,关键位置的流量和温度计算结果对比如表 1 所示。

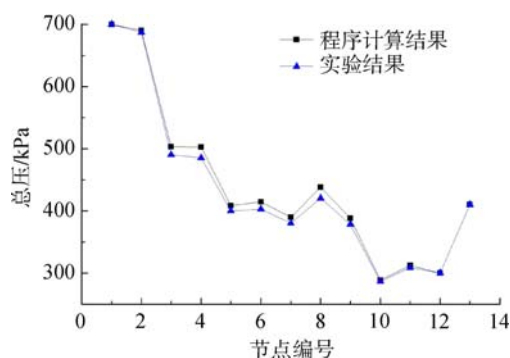


图 6 系统定常总压分布

Fig. 6 System total pressure distribution on steady state

表 1 流量及温度的程序计算结果与实验结果对比

Table 1 Comparison of mass flow rate and temperature results between program and test

位置	流量/(kg/s)			温度/K		
	程序 计算	实 验	误差/ %	程序 计算	实 验	误差/ %
盘腔 1 入口	0.352	0.339	3.69	818	821	0.55
盘腔 2 入口	0.125	0.120	4.00	839	843	0.71
盘腔 4 入口	0.227	0.219	3.52	845	848	0.52

从图 6 中可以看到,由程序计算得到的压力结果与实验值的最大误差出现在节点 8 的位置,大约为 3.11%,从表 1 中可以看到:由程序计算得到的流量、温度结果与实验值的最大误差分别为 4.00% 以及 0.71%。可见,程序计算与实验数据吻合度高,说明程序计算中针对各元件所采用的经验关联式能够准确地预测各元件的流动及换热特征。对于盘腔而言,实际的盘腔结构大都是不规则的,而由实验或 CFD 仿真得到的盘腔经验关联式往往是基于具有典型的几何结构的盘腔,因此,误差相对会比较一些,本文所采用的特征线法以沿流动方向切分的流体微团为研究对象,在考虑沿流动方向流通面积缓慢变化的前提下,将各流体微团简化为具有标准结构的流动单元,便能有效地减小计算误差。从定常计算结果来看,其

误差是可以接受的。

5.2 非定常分析

在 $\omega=18000 \text{ r/min}$ 的转速下,各元件的流量随着入口节点 1 的压力的升高而增大,同时,随着在计算过程中热量不断地在系统内蓄存,系统内的温度也会逐渐升高。在 10 s 的计算时间内,盘腔 4 以及环形通道出口处的流量以及温度计算结果与 CFD 仿真结果对比如图 7 和图 8 所示。

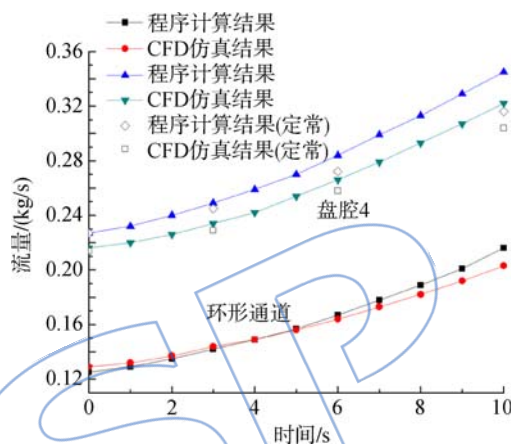


图 7 盘腔 4 与环形通道出口流量的计算结果与 CFD 仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of mass flow rate at the outlet of cavity 4 and ring slot passage between program and CFD simulation

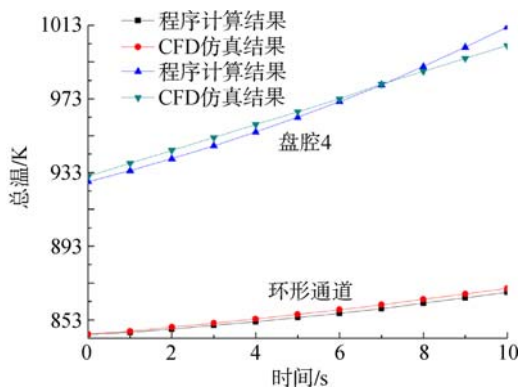


图 8 盘腔 4 与环形通道出口总温计算结果与 CFD 仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of temperature at the outlet of cavity 4 and ring slot passage between program and CFD simulation

由此可以看出,随着入口节点 1 与出口节点 12 和出口节点 13 的压差不断增大,各元件的流量都会不断增大。同时,由于热量蓄存效应,壁面温度会不断升高,进而使得气流的温度也不断升高。对于盘腔 4,在 10 s 的计算时间内,流量程序

计算结果与 CFD 仿真结果最大偏差约为 6.7%, 温度程序计算结果与 CFD 仿真结果最大偏差约为 1.3%, 而对于环形通道, 在 10 s 的计算时间内, 流量程序计算结果与 CFD 仿真结果最大偏差约为 3.2%, 而温度程序计算结果与 CFD 仿真结果最大偏差约为 0.5%。此外, 本文对比了在对应时刻具有相同边界条件的计算程序以及 CFD 的定常和非定常计算结果, 在图 7 中可以看到, 随着非定常效应的蓄积, 定常数值与非定常数值偏差逐渐增大, 在 10 s 时, 由程序计算得到的定常与非定常偏差达到 9.4%, 由 CFD 仿真得到的定常与非定常偏差达到 5.2%。

图 9 和图 10 所示为不同时刻下, 环形通道以及盘腔 4 内部沿流动方向的总压分布的程序计算结果。从图中可以看出, 随着入口节点 1 总压的升高, 沿流动方向上对外部扰动的响应呈现出压缩波的特征。不同时刻下, 内部总压分布也不断发生着变化。在 10 s 的计算时间内, 环形通道的内部分段数从 34 逐渐降低到 31, 而盘腔 4 的内部分段

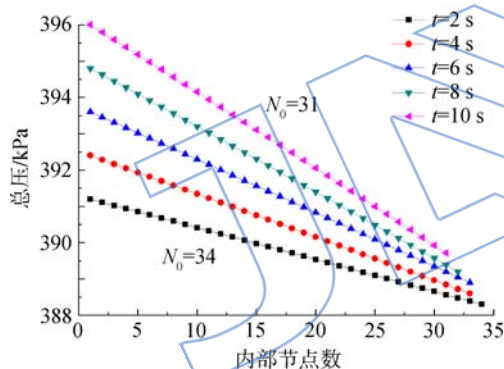


图 9 不同时刻下环形通道内沿流动方向的总压分布
Fig. 9 Total pressure distribution along flow direction in ring slot passage at different times

数从 28 降低到了 27, 在设定的时间步长下, 内部分段数的自动更新保证了特征线方程组均严格遵循位置特征线方程的限制条件, 因此计算结果也更加可靠。而随着内部分段数 N_0 的不断更新, 沿流动方向上的每一个流体微元的流动参数也应该按照线性插值的方式不断更新。

以环形通道为例, 在固定的内部分段数下、自动更新的内部分段数下的流量计算结果与 CFD 仿真结果对比如图 11 所示。如果内部分段数是固定值, 由此得到特征长度 Δx_i 也是固定值, 这意味着特征线方程组 C_+ , C_- 以及 C_0 是基于 $v+a$ 是定值的假设进行求解的。对于马赫数很小, 并且当地声速可以近似为定值的领域, 这样的假设是

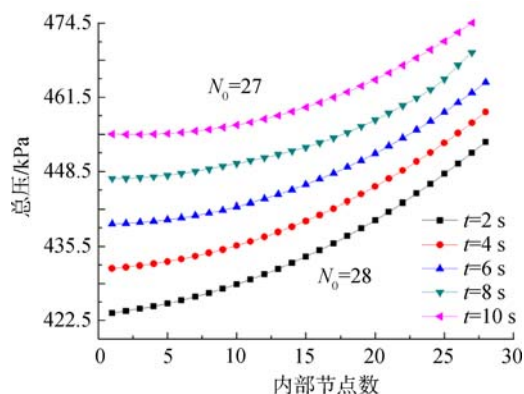


图 10 不同时刻下盘腔 4 内沿流动方向的总压分布
Fig. 10 Total pressure distribution along flow direction in cavity 4 at different times

可以接受的, 但是对于航空发动机二次空气系统, 这样的假设显然是不可接受的。从图 11 中也可以看到, 如果内部分段数被设置为固定值, 那么在 10 s 的计算时间内, 基于特征线法得到的流量与 CFD 仿真数据偏差达到 10.2%。考虑到用一维经验关联式描述复杂结构流动的难度与特殊性, 这样的误差是较为理想的。因此, 本文所采用的特征线方程组处理方法能够反映出二次空气系统流速高、当地声速变化快等特点。

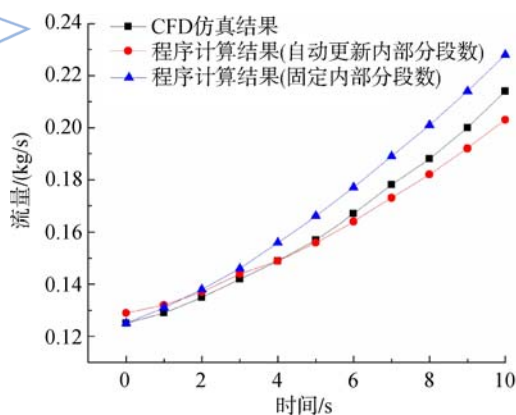


图 11 内部分段数定义对计算结果的影响
Fig. 11 Effect of inside segmentation number definition on calculation results

6 结 论

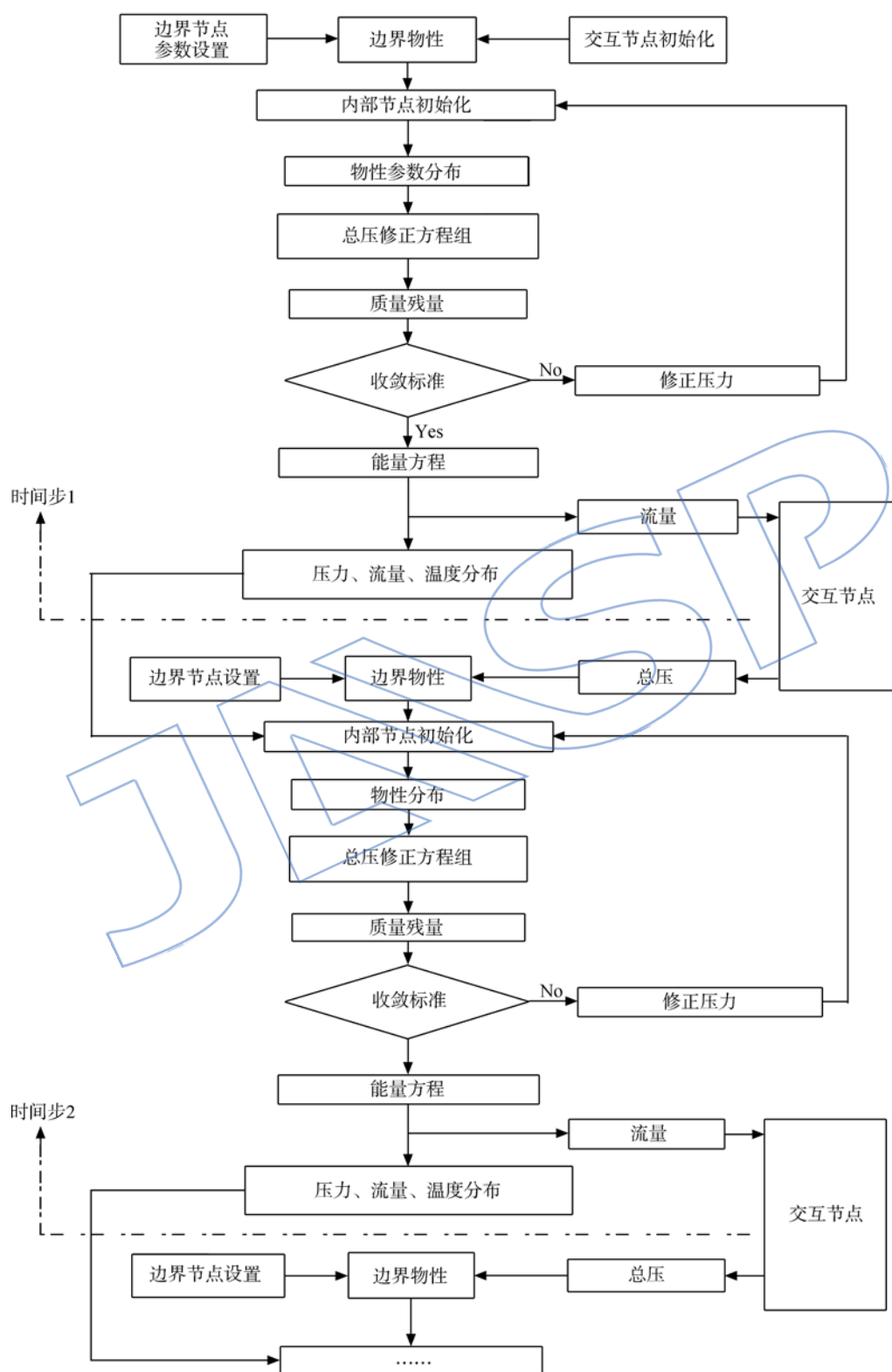
本文所采用的方法适用于二次空气系统一维非定常计算。根据系统内部各类元件对外部扰动响应的差异性, 将所有元件分为特征“长”元件以及局部损失元件。流体网络法用于局部损失元件及由局部损失元件连接而成的网络, 通过联立各元件的动量方程, 通过压力修正来控制质量残量,

直到该残量收敛至可接受的水平,然后再根据求得的压力和流量对各元件求解能量方程,进而得到系统中的压力、流量以及温度等参数的分布.特征线法用于特征“长”元件,将包含连续方程、动量方程以及能量方程的偏微分方程组沿位置特征线转化为常微分方程组,将其沿时间轴 t 以及 x 轴进行离散求解,进而得到不同时刻下沿流动方向 x 的各参数的分布情况.本文讨论了这两种不同的方法之间的数据交互,时间步长的定义方式,以及内部分段数 N_0 的自动更新,开发的程序具有良好的数值稳定性及收敛性.作为验证,将程序定常计算结果与实验数据进行对比,吻合度良好,证明了程序中所采用的各类元件经验关联式的合理性.将程序的非定常计算结果与 CFD 仿真数据进行对比,吻合度较高.作为一维流体系统计算工具,该程序求解速度快,数值稳定性好,结果可靠,可以用于二次空气系统的一维非定常研究.

参考文献:

- [1] Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors[M]. Illinois, USA: University of Illinois Bulletin, 1936.
- [2] Kutz K J, Speer T M. Simulation of the secondary air system of aero engines[J]. Journal of Turbomachinery, 1994, 116(2): 306-315.
- [3] Muller Y. Integrated fluid network-thermomechanical approach for the coupled analysis of a jet engine[R]. ASME Paper GT2009-59104, 2009.
- [4] Schallhorn P A, Hass N E. Forward looking pressure regulator algorithm for improved modeling performance within the generalized fluid system simulation program [R]. AIAA-2004-3667, 2004.
- [5] Salvo R D, Deaconu S, Majumdar A K. Development and implementation of non-Newtonian rheology into the generalized fluid system simulation program (GFSSP) [R]. AIAA-2006-4869, 2006.
- [6] McAmis R W, Miller J T, Burdette R R. Modeling fluid flow networks[R]. AIAA 96-3120, 1996.
- [7] Morel T, Flemming M F. Characterization of manifold dynamics in the Chrysler 2.2 S. I. engine by measurements and simulation[R]. Society of Automotive Engineers Technical Paper, SAF 900679, 1990.
- [8] 邓康耀. 内燃机中一维非定常流动计算的特征线法与有限体积法的比较[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(8): 1-11. DENG Kangyao. Comparison of characteristics method and finite volume method in computation of one dimensional unsteady flow in internal combustion engines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(8): 1-11. (in Chinese)
- [9] Benson R S. The thermodynamics and gas dynamics of internal combustion engines [M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1982.
- [10] 刘峥, 张扬军. 内燃机一维非定常流动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [11] Alexiou A, Mathioudakis K. Secondary air system component modeling for engine performance simulation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(5): 031202. 1-031202. 9.
- [12] 吴宏, 李澎, 陶智. 直齿直通式迷宫密封计算模型研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2180-2187. WU Hong, LI Peng, TAO Zhi. Research on rectangular tooth straight through labyrinth seal analytical model[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2180-2187. (in Chinese)
- [13] 吴宏, 李澎, 陶智. 入口带倒圆结构的旋转长孔计算模型研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2205-2213. WU Hong, LI Peng, TAO Zhi. Research on rotating long orifices with radiused inlets analytical model[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2205-2213. (in Chinese)
- [14] WU Hong, LI Peng, LIU Dong, et al. Improvement of one-dimensional analytical model of rotating long orifice with chamfered or radiused inlet [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 444/445: 320-331.
- [15] McGreehan W F, Schotsch M J. Flow characteristics of long orifices with rotation and corner radiusing[J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110(4): 213-217.
- [16] Yoo G J, So R M C, Hwang B C. Calculation of developing turbulent flows in a rotating pipe[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(1): 34-41.
- [17] Soghe R C, Facchini B. Analysis of gas turbine rotating cavities by a one-dimensional model: definition of new disk friction coefficient correlations set[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(2): 021020. 1-021020. 8.
- [18] TAN Qinxue, REN Jing, JIANG Hongde. Prediction of flow features in rotating cavities with axial through flow by RANS and LES[R]. ASME Paper GT2009-59428, 2009.

附图 A 流体网络法非定常计算流程图



附图 B 特征线法非定常计算流程图

