

文章编号: 1000 8055(2009)03-0494-05

非稳态流体网络方法在发动机空气冷却系统中的应用

侯升平, 陶 智, 韩树军, 丁汀, 徐国强, 吴宏伟
(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重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 将流体网络法与非稳态模拟方法相结合应用到发动机空气冷却系统沿程温度、压力、流量的非稳态特性预测中. 本方法将空气系统简化为节点和元件组成的网络, 节点和元件处建立守恒方程, 针对传统解法的计算稳定性问题引入了压力修正和积分方法相结合的求解方法. 程序应用到可参考对照的模型中得到验证. 验证后的程序被应用到发动机轴部冷却通道空气系统非稳态特性预测中.

关 键 词: 流体网络; 非稳态; 压力修正; 节点
中图分类号: V228.3 **文献标识码:** A

Application of unsteady fluid network to air cooling system in engine

HOU Sheng ping, TAO Zhi, HAN Shu jun, DING Shu ting,
XU Guo qiang, WU Hong wei

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new approach combining fluid network and unsteady simulation method was developed to predict the unsteady characteristic of pressure, temperature and mass flow rate of the flow in engine. The air cooling system was simplified into a fluid network comprised of nodes and branches. Conservation equations were solved by a newly introduced method to deal with the computational unstabilization problem. As a validation, the program was applied to a model which had provided a correlation, and the computational results show good agreement with the benchmark. Then the program was used to predict the unsteady characteristic of flow in the cavities along the axis in the engine.

Key words: fluid network; unsteady; pressure correction; node

流体网络法是将复杂流路简化为由节点和元件组成的网络系统, 通过分析典型元件特性列出基本方程, 结合系统网络拓扑关系, 形成典型非线性方程组, 求解方程组以确定沿程压力、温度、流量等参数的一种数值模拟方法. 本方法因能快速有效地模拟复杂流路系统而在航空发动机、石油

化工、暖通等机械设备的设计、校核和改进中得到广泛应用.

国内外对稳态流体网络的模拟已经相对成熟, 对非稳态模拟方法也有一些探索. Majumdar^[1-2]采用 Newton Raphson 方法开发了程序 GFSSP 求解非线性守恒方程组, 计算量较大且数

收稿日期: 2008 03 26; 修订日期: 2008 05 30

基金项目: "凡舟"青年科研基金(Grant No. 20070401)

作者简介: 侯升平(1982-), 男, 山东日照人, 博士生, 主要研究方向为航空发动机空气冷却系统数值模拟.

值稳定性有赖于初始值. Schallhorn^[3] 将程序 GF-SSP 应用到了多个算例发现不稳定, 最后引入了压力调整算法进行了修正, 数值稳定性得到一些提高, 但由于还是求解非线性方程组, 耗时仍然很长, 计算稳定性还需要改进. 刘笑驰^[4] 以供热系统枝状网为研究对象, 提出了相应的网络简化的方法, 在动态性能损失不大的情况下, 计算负荷大大降低, 计算稳定性得到一定程度的改善, 但是不能从根本上解决这个问题. Reddy^[5] 借助于控制理论, 对控制方程进行拉普拉斯变换, 模拟出压力温度等的瞬态变化规律, 但是这种模拟方法侧重于模拟扰动对系统的影响, 要想成功模拟流体网络系统的流量压力等的瞬态变化特性, 还需要进一步探索. Merci^[6] 采用时间差分方法依次模拟烟筒中气流温度和压力瞬态过程, 但是由于在每一时间仍然要整体求解非线性方程组, 求解稳定性问题仍然存在. 综上所述, 非稳态流体网络模拟的计算稳定性问题的解决还有待进一步探索.

本文将压力修正方法和积分方法相结合应用到非稳态流体网络求解中, 在此基础上开发了程序 UFSSP, 并应用到可参考对照的模型中进行验证. 最后将经过验证的程序应用到发动机轴部冷却通道空气系统非稳态特性预测中.

1 流体网络模型

流体网络模型将流路系统简化为由流体元件和节点组成的网络, 如图 1 所示, 其中 j, k, l 是边界节点, i 是内部节点, II, IK, IL 是元件. 流体网络模型需要在节点处建立质量、能量守恒方程, 在元件处建立动量守恒方程, 组成网络控制方程组, 通过求解方程组确定压力、温度和流量. 为了便于建立控制方程, 需要从网络模型中取基本流动单元进行分析, 如图 2 所示.

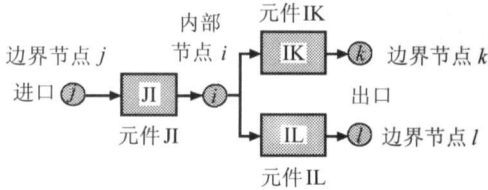


图 1 流体网络模型

Fig. 1 Schematic drawing of fluid network

1.1 基本控制方程组

质量守恒方程

$$\frac{dM}{d\tau} = \sum m_i \tag{1}$$

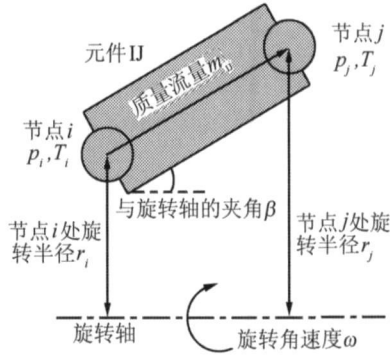


图 2 流动单元模型

Fig. 2 Scheme drawing of basic fluid network unit

其中 M 为流体质量, m_i 为进出节点 i 的各流体元件质量流量, τ 为时间.

动量守恒方程

$$\begin{cases} \frac{1}{A} \frac{dMu}{d\tau} = B - \frac{\xi}{2} u^2 \\ B = p_{in} - p_{out} + \frac{\rho \omega^2 (r_{out}^2 - r_{in}^2)}{2} \end{cases} \tag{2}$$

其中 A 为元件横截面积, u 为流体流速, ρ 为元件内流体平均密度, ξ 为元件阻力系数, p_{in}, p_{out} 为元件进、出口节点压力, ω 为元件旋转角速度, r_{in}, r_{out} 为元件进、出口旋转半径.

由全微分关系有

$$\frac{dMu}{d\tau} = M \frac{du}{d\tau} + u \frac{dM}{d\tau} \tag{3}$$

将式(1)代入式(3)得到

$$\frac{du}{d\tau} = f(u^2, p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) \tag{4}$$

其中 K_1 包括密度、阻力系数、旋转角速度、元件长度和直径等物性参数和几何参数.

对方程(4)积分得到

$$m\tau = m\tau(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) \tag{5}$$

能量守恒方程

$$\frac{dMh^*}{d\tau} = \frac{m\omega^2 (r_{out}^2 - r_{in}^2)}{2} + mc_p T_{in}^* - mc_p T_{out}^* + \alpha F [T_w - T] \tag{6}$$

$$\begin{cases} h^* = c_p T^* \\ T^* = T + \frac{u^2}{2c_p} \end{cases} \tag{7}$$

其中 c_p 为比定压热容, T_{in}^*, T_{out}^* 分别为元件进、出口节点总温, T^* 为总温, T 为静温, α 为元件与壁面的换热系数, T_w 为壁面温度, F 为元件与壁面的换热面积.

元件内流体平均温度取进出口节点温度的算术平均值

$$\begin{cases} T = 0.5 \times (T_{in} + T_{out}) \\ T^* = 0.5 \times (T_{in}^* + T_{out}^*) \end{cases} \quad (8)$$

由全微分关系有

$$\frac{dMh^*}{d\tau} = M \frac{dh^*}{d\tau} + h^* \frac{dM}{d\tau} \quad (9)$$

将式(6)代入式(9)得到

$$\frac{dT^*}{d\tau} = f(T_0^*, \tau, m, r_1, r_2, K_2, T^*) \quad (10)$$

其中 K_2 包括密度、换热系数、旋转角速度、换热面积、壁温等物性参数和几何参数。

对方程(10)积分得到

$$T\tau^* = T_0^* (\tau, m, r_1, r_2, K_2) \quad (11)$$

若有 M 个元件汇流到同一节点 i , 节点总温可由下式得到

$$(\sum_{N=1}^M mNC_{p_N})T_i^* = \sum_{N=1}^M (mNC_{p_N}T_N^*) \quad (12)$$

其中 M 为汇聚到节点 i 的元件总数, N 表示元件。

气体状态方程

对气体, 应用理想气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (13)$$

其中 R 为气体常数。

1.2 压力修正方程组

对每一元件由两时间步间流量变化关系有

$$\Delta m = m_{\tau+\Delta\tau} - m_{\tau} \quad (14)$$

将式(5)代入式(14)得到

$$m_{\tau+\Delta\tau}(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) - m_{\tau}(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) = \Delta m \quad (15)$$

另一方面, 由全微分关系可以得到

$$\Delta m = \sum \frac{\partial m}{\partial p_{in}} \Delta p_{in} + \sum \frac{\partial m}{\partial p_{out}} \Delta p_{out} \quad (16)$$

结合式(15)和式(16)得到

$$\begin{aligned} \sum \frac{\partial m}{\partial p_{in}} \Delta p_{in} + \sum \frac{\partial m}{\partial p_{out}} \Delta p_{out} = \\ f_{\tau+\Delta\tau}(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) - \\ f_{\tau}(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) \end{aligned} \quad (17)$$

对所有元件建立上述关系式, 得到线性压力修正方程组, 用 CROUT 方法求解方程组得到各节点的压力修正值 Δp_i , 各节点新的压力值为

$$p_i = p_i + \Delta p_i \quad (18)$$

方程组(17)中的系数用到压力, 所以要进行迭代求解, 直到满足如下的总压残差百分比和流量残差百分比计算精度要求

$$error1 = \frac{|\Delta m|}{m}, error2 = \frac{|\Delta p|}{p} \quad (19)$$

由于动量能量守恒方程的计算参数相互影响, 故在每一次迭代结束对阻力系数, 换热系数以及物

性参数在新参数下进行修正计算。

2 程序可行性验证

用于验证的是一有经验关联式(Epstein 关联式)的推进剂压缩模型^[1], 表 1 是由程序和 Epstein 经验关联式分别预测到的各推进剂质量。结果表明最大差别百分比不超过 12%, 最小误差小于 4%, 吻合得较好, 证明了程序的可行性。同时为了验证非稳态特性模拟的准确性, 将由程序模拟的压力和流量非稳态特性跟已经得到验证的 NASA 程序 GFSSP 模拟结果进行比较, 如图 3、

表 1 程序与 Epstein 关联式质量预测结果比较

Table 1 Comparison of the mass calculated from program and Epstein correlation

推进剂	Epstein 结果/kg	程序结果/kg	差别百分比 /%
氧	17.94	15.87	11.54
氢	16.68	17.31	3.78
氮	8.61	7.59	11.85

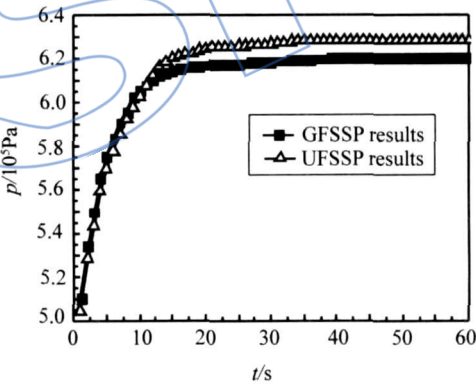


图 3 GFSSP 和 UFSSP 对空腔压力的预测比较

Fig. 3 Predicted ullage pressure history by GFSSP and UFSSP

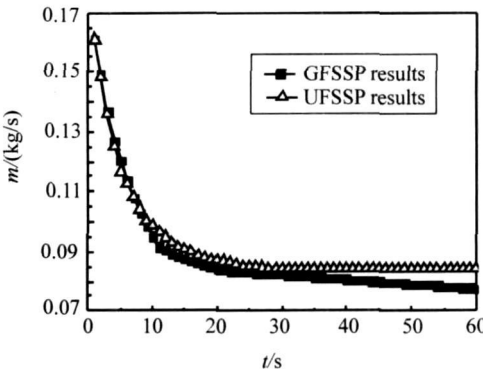


图 4 GFSSP 和 UFSSP 对氦气流量 m 的预测比较

Fig. 4 Predicted helium mass flow rate into the tank by GFSSP and UFSSP

图 4 所示, 由比较可以看出两程序的模拟结果吻合得较好。

3 计算模型

图 5 为某高压发动机轴部冷却通道冷却空气流路的简化网络图, 包括 14 个节点(4 个边界节点, 10 个内部节点) 和 14 个元件。表 2 为进出口已知条件, 表 3 为初始时刻部分节点的设计压力。需要指出的是由于模拟的主要目的是确定沿程压力的非稳态特性, 所以未列出太多温度条件, 但是能量方程是参与了迭代计算的。

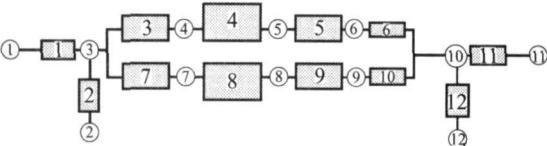


图 5 计算模型空气流路网络图
Fig. 5 Fluid network of the air system model

表 2 进出口初始条件

Table 2 Known conditions of inlet and outlet

节点号码	$p/10^5\text{ Pa}$	T/K
1	8.0	510
2	8.0	510
11	1.0	待求
12	1.0	待求

表 3 部分节点压力初始设计值

Table 3 Designed pressure values of some nodes

节点编号	$p/10^5\text{ Pa}$	节点编号	$p/10^5\text{ Pa}$
3	6.0	6	3.0
4	5.0	10	2.0
5	4.0		

4 结果及分析

图 6、图 7 分别是节点 3 和节点 4 的非稳态压力特性模拟结果。从图中可以看到这两个节点压力的变化趋势非常相似, 先是在开始的小段时间内保持稳定(后面节点都有这个现象), 这可能是由于非稳态模拟的初始参数还没进入正常的迭代造成的, 而后压力迅速增大, 大约在 0.002s 达到最大值, 而后开始变小, 变小的速度比之前上升期有所缓和。在变小的过程中有很短时间的稳定,

而后又继续变小, 直到 0.005s 左右开始趋于稳定, 在 0.0125s 左右又出现了小幅的降低, 在 0.0015s 左右进入稳定状态。

图 8 是节点 5 的非稳态压力特性模拟结果, 从图中可以看出, 节点 5 压力先急剧降低后快速升高, 大约在 0.002s 降到最低, 在升高的过程出现了三次短暂平稳期, 在大约 0.005s 时开始较为平缓的升高, 在 0.010s 左右趋于稳定值 $3.99 \times 10^5\text{ Pa}$ 。

图 9 是节点 6 的非稳态压力特性模拟结果, 从图中可以看出节点 6 的压力变化曲线比较平滑,

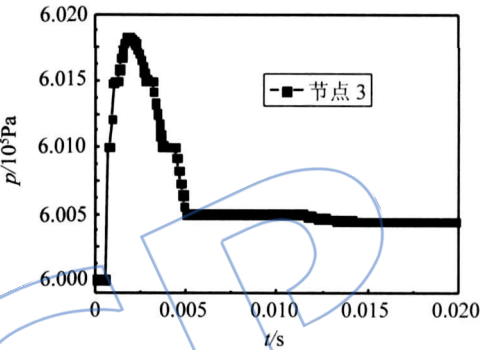


图 6 节点 3 的非稳态压力特性模拟结果
Fig. 6 Predicted pressure history of node 3

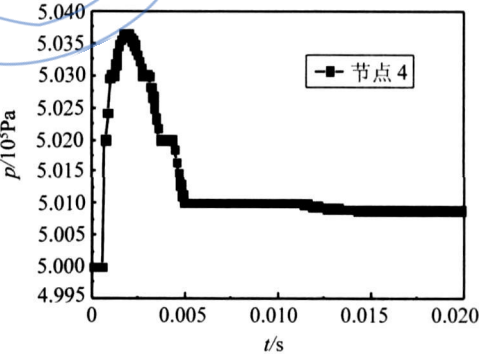


图 7 节点 4 的非稳态压力特性模拟结果
Fig. 7 Predicted pressure history of node 4

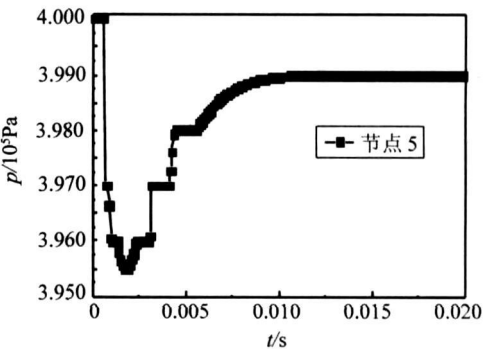


图 8 节点 5 的非稳态压力特性模拟结果
Fig. 8 Predicted pressure history of node 5

趋势是一直降低,并且降低的速度越来越小,在0.010 s左右趋于稳定。

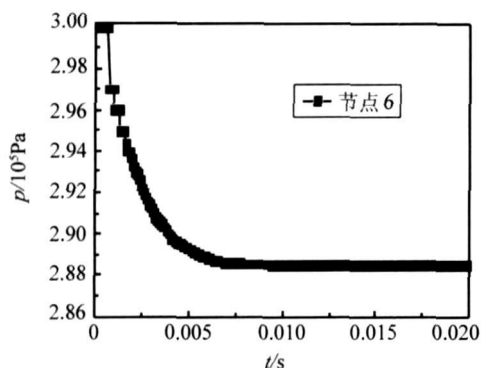


图9 节点6的非稳态压力特性模拟结果

Fig. 9 Predicted pressure history of node 6

图10是节点10的非稳态压力特性模拟结果,可以看出节点10的压力变化曲线也比较平滑,趋势是一直升高,并且升高的速度越来越大,在0.010 s左右趋于稳定。

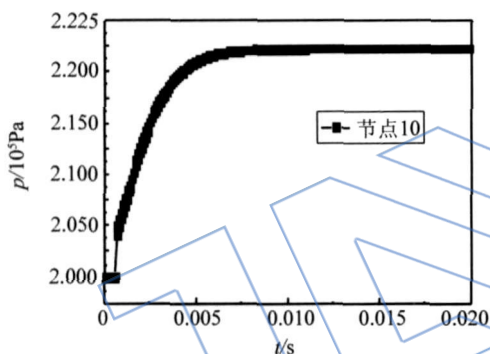


图10 节点10的非稳态压力特性模拟结果

Fig. 10 Predicted pressure history of node 10

比较上述节点的稳定时间,除节点3和节点4在0.0125 s左右又出现小幅的降低外,其它节点的稳定时间基本一致,都在0.010 s左右,这可能是由于节点3和节点4处于网络前段,而且元件4的体积较大,当这两个节点处压力发生小量波动时,由于大元件4的“吸收”能力,致使后面节点受到的影响较小,没有明显反映出来。

5 结论

本文采用流体网络法开发了程序UFSSP用于模拟发动机流路系统的温度、压力、流量的非稳

态特性。程序在可供参考的模型中得到验证,后应用到发动机轴部冷却通道空气系统非稳态特性预测中。综上所述得到如下结论:

1) 在非稳态流体网络求解中引入了压力修正方法和积分方法相结合的新算法,将非线性方程组转化为线性方程组进行求解,提高了计算稳定性。

2) 该程序在某压缩系统模拟中与经验关联式吻合地较好,并且预测的系统非稳态特性与已得到验证的程序GFSSP的结果吻合得较好,证明了程序的可行性。

3) 程序被应用到发动机轴部冷却通道空气系统非稳态特性预测中,得到了流路系统沿程压力的非稳态压力变化特性,为工程设计和改进等提供有用的参考。

参考文献:

- [1] Majumdar A K, Steadman T. Numerical modeling of pressurization of a propellant tank [C] // 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit. AIAA Paper 1999-0879, Reno, USA: 1999.
- [2] Majumdar A K. A second law based unstructured finite volume procedure for generalized flow simulation [C] // 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit. AIAA Paper 1999-0934, Reno, USA: 1999.
- [3] Schallhorn P A, Hass N E. Forward looking pressure regulator algorithm for improved modeling performance within the generalized fluid system simulation program [C] // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA Paper 2004-3667, Florida, USA: 2004.
- [4] 刘笑驰, 吕崇德. 供热系统输配网络模型简化方法研究 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(4): 57-63.
LIU Xiaochi, LÜ Chongde. Study of model simplification technology of district heating network [J]. Computer Simulation, 2005, 22(4): 57-63. (in Chinese)
- [5] Reddy H P. Simulation and state estimation of transient flow in gas pipeline networks using a transfer function model [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2006, 45(11): 3853-3863.
- [6] Mercier B. One dimensional analysis of the global chimney effect in the case of fire in an inclined tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2008, 43: 376-389.