

文章编号: 1000-8055(2009)06-1253-05

非稳态流体网络模拟新方法及其应用

侯升平, 陶 智, 韩树军, 丁水汀, 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: 推导了一种新的非稳态流体网络模拟方法应用到流体系统沿程温度、压力、流量的非稳态特性预测中. 本方法将流体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, 应用压力修正和微积分方法相结合的综合方法进行模拟. 程序应用到 NASA 的推进剂压缩模型中, 并与经验关联式和 NASA 的程序模拟结果进行了对照, 结果吻合地较好, 证明了程序的可行性, 验证后的程序被应用到航空发动机冷却流路模拟中.

关 键 词: 非稳态; 流体网络; 元件; 节点; 压力修正

中图分类号: V228.3

文献标识码: A

New simulation approach to the unsteady fluid network and the application

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 fluid system was simplified into fluid network comprised of nodes and branches. Conservation equations were solved by a newly introduced method combining pressure correctional method and differential method. The program was applied to propulsion test article (PTA) model, which was compared with the empirical correlation and numerically simulated result of general fluid system simulation program (GFSSP) of NASA. The computational results show good agreement with the benchmark. Then the program was applied to the simulation of the jet engine cooling system.

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

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、校核和改进中得到探索和应用.

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 General fluid system simulation program (GFSSP)

收稿日期: 2008-05-27; 修订日期: 2008-11-21

基金项目: “凡舟”青年科研基金(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.

求解非线性守恒方程组, 计算量较大且数值稳定性有赖于初始值. Schallhorn^[3] 将程序 GFSSP 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. Mercier^[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, 这种模拟方法更接近于 CFD 局部模拟, 对流体网络没有太大的针对性. 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 Unsteady fluid system simulation program(UFSSP), 并应用到推进剂压缩模型中进行了验证, 验证后的程序被应用到航空发动机冷却流路模拟中.

1 流体网络模型

本文中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, JI, 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, 包括的参数有元件 II 的质量流量 m_{II} , 元件进出口节点 i, j 的压力 p_i, p_j , 旋转轴的旋转角速度 ω 等.

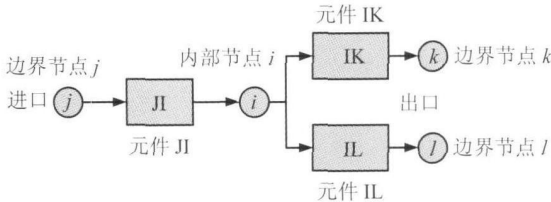


图 1 流体网络模型

Fig. 1 Schematic drawing of fluid network

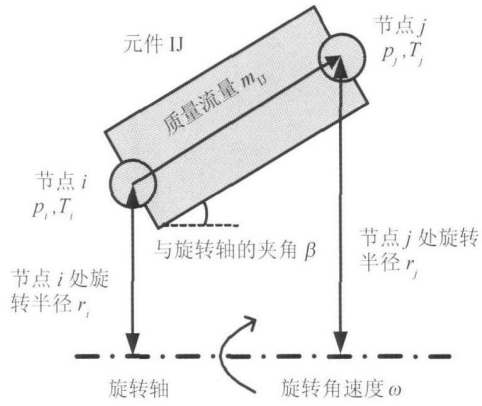


图 2 流动单元模型

Fig. 2 Scheme drawing of basic fluid network unit

1.1 基本控制方程组

质量守恒方程

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

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

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

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

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

将公式(1) 代入(3) 得到

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

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

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

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

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

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

将公式(6) 代入公式(9) 得到

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

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

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

若有 M 个元件汇流到同一节点 i , 节点总温可由下式得到

$$\left(\sum_{N=1}^M m^N c_{pN} \right) T_i^* = \sum_{N=1}^M (m^N c_{pN} T_N^*) \quad (12)$$

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

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

将公式(5) 代入(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

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

结合公式(15) 和(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壓力修正值 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

$$error_1 = |\Delta m|/m, \quad error_2 = |\Delta p|/p \quad (19)$$

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.

1.3 计算流程

图 3 是程序流程图, 每一次压力残差计算结果都要重新用于新压力的确定, 直到满足压力残差百分比要求, 每一次由温度计算结果对物性参数进行修正.

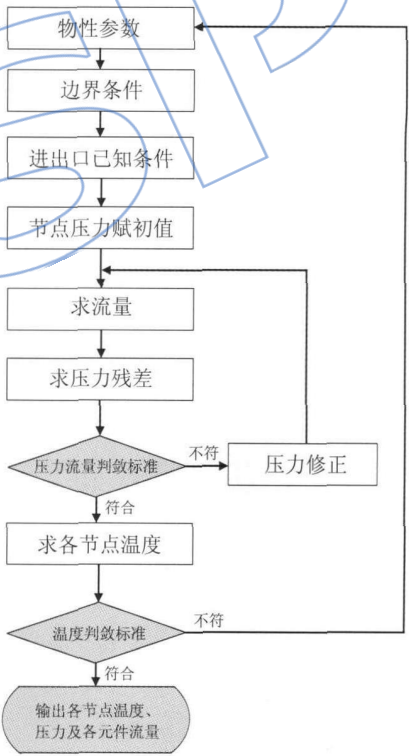


图 3 程序流程图

Fig. 3 Flow chart of the UFSSP program

2 验证模型及结果

该程序被应用到 NASA 的推进剂压缩模型中, 该模型相关公式可参考文献[7]. 马歇尔空间飞行中心也开发了程序 GFSSP 对其进行了模拟^[1]. 为了验证方法本身, 网络划分方法跟 GFSSP 相同, 包括 5 个节点 3 个元件.

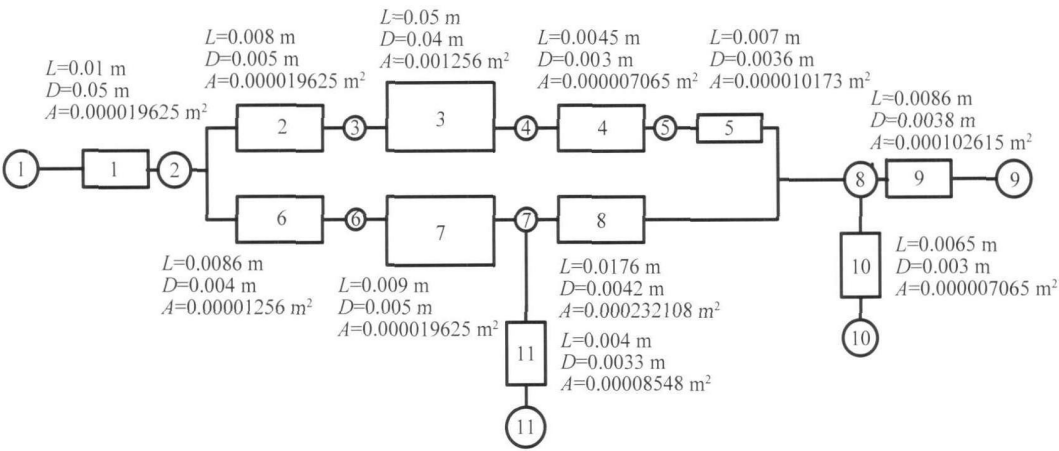


图 4 冷却通道流体网络图

Fig. 4 Simplified fluid network of coolant passages

表 1 是 UFSSP, GFSSP 对几种压缩气体流量的模拟结果与 Epstein 关联式计算结果的比较. 可以看出, 结果吻合的较好, 证明了程序的可应用性.

表 1 UFSSP, GFSSP 与 Epstein 关联式质量预测结果比较
Table 1 Comparison of the mass calculated from UFSSP program, GFSSP program and Epstein correlation

推进剂	Epstein 结果 质量/ kg	GFSSP 结果 质量/ kg	差别百分 比/ %
氧	17. 94	14. 68	18. 17
氢	16. 68	17. 72	6. 24
氮	8. 61	7. 44	13. 59

推进剂	Epstein 结果 质量/ kg	UFSSP 结果 质量/ 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

3 计算模型与结果

该方法被应用到一个航空发动机空气冷却系统轴部冷却通道的简化模型计算中, 简化后的流体网络图如图 4 所示, 该流路系统由 11 个元件和 11 个节点组成, 其中节点 1 为进口节点, 节点 9、节点 10、节点 11 为出口节点. 模拟进口节点 1 压力变化而出口节点压力保持不变的情况下流路系统流量的分配变化以及出口节点 11 压力变化而其它进出口节点压力保持不变的情况下流路系统流量的分配变化.

进口节点压力 p_1 的阶跃变化规律表达式为

$$p_1 = \begin{cases} 700000 \text{ Pa} & 0 < t < 0.5 \\ 800000 \text{ Pa} & t \geq 0.5 \end{cases}$$

此时进出口条件如表 2 所示.

图 5 是进口节点 1 压力变化前后各元件流量分配规律曲线, 各元件的流量曲线趋势基本保持一致, 随着节点 1 压力增加, 流路总流量由原来的 0.0144 kg/s 增加到 0.0162 kg/s, 除元件 8, 9, 10 外其它元件流量值均有增加, 元件 8 所在的分支流路流量减少, 这是由于元件 7 的流量增量没有元件 11 流量增量, 从而导致流入元件 8 的流量反而减少, 元件 9, 10 的流量变化不大, 说明由进口压力增加引起的流路总流量的增加量主要分配到了出口元件 11 这条支路.

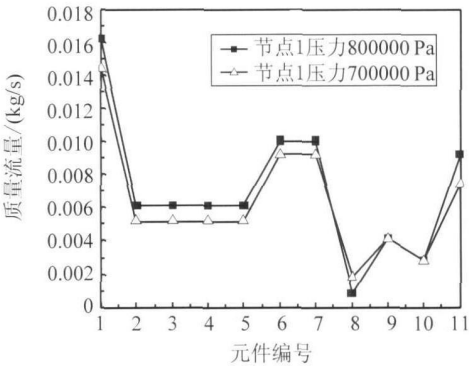


图 5 进口节点 1 压力变化前后各元件质量流量分配
Fig. 5 Mass flux of branches with different inlet pressures

出口节点压力 p_{11} 的阶跃变化规律表达式为

$$p_{11} = \begin{cases} 400000 \text{ Pa} & 0 < t < 0.5 \\ 350000 \text{ Pa} & t \geq 0.5 \end{cases}$$

此时进出口条件如表 3 所示.

表 2 进出口初始条件

Table 2 Known conditions of inlet and outlet

节点号码	压力/ 10^5 Pa	温度/ K
1	p_1	784
9	2 0	待求
10	2 0	待求
11	4 0	待求

表 3 进出口初始条件

Table 3 Known conditions of inlet and outlet

节点号码	压力/ 10^5 Pa	温度/ K
1	7 0	784
9	2 0	待求
10	2 0	待求
11	p_{11}	待求

图 6 是出口节点 11 压力变化前后各元件流量分配规律曲线, 各元件的流量曲线趋势基本保持一致, 随着节点 11 压力减小, 元件 2, 3, 4, 5 所在的支路流量增加, 元件 6, 7 所在的支路流量减少, 元件 2, 3, 4, 5 所在的支路流量增加量比元件 6, 7 所在的支路流量减少量要小, 所以流路总流量反而由原来的 0.0144 kg/s 减少到 0.0142 kg/s . 尽管元件 7 的流量减小, 但是元件 7 下游的元件 11 流量反而增加, 这是由于分配到元件 8 的流量减少量比元件 7 的流量减少量要小, 从而导致分配到元件 11 的流量增加.

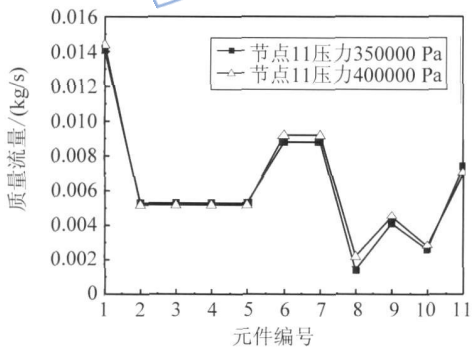


图 6 出口节点 11 压力变化前后各元件质量流量分配

Fig. 6 Mass flux of branches with different outlet pressures

4 结 论

本文采用流体网络法开发了程序用于模拟流

路系统的温度、压力、流量的非稳态特性. 程序应用到 NASA 的推进剂压缩模型中, 并与经验关联式和 NASA 模拟结果进行了验证, 验证后的程序被应用到航空发动机冷却流路模拟中. 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微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) 该程序在压缩系统模拟中与经验关联式吻合地较好, 证明了程序的可行性.
- 3) 验证后的程序被应用到一个航空发动机空气冷却系统轴部冷却通道的简化模型计算中, 可以很便捷地得到流路系统进出口参数变化引起的系统参数变化规律, 大大提高了工程设计和改进的效率.

参考文献:

[1] Majumdar A K, Steadman T. Numerical modeling of pressurization of a propellant tank[C] // The 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit. AIAA Paper 1999-0879, Reno, U. S. A. : AIAA, 1999.

[2] Majumdar A K. A second law based unstructured finite volume procedure for generalized flow simulation[C]// The 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit. AIAA Paper 1999-0934, Reno, U.S. A. : AIAA, 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]// The 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA Paper 2004-3667, Florida, U. S. A. : AIAA/ASME/SAE/ASEE, 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): 57-60. (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] Merci B. One dimensional analysis of the global chimney effect in the case of fire in an Inclined tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42: 1-14 DOI: 10. 1016/j. firesaf. 2007. 09. 003.

[7] Van Dresar N T. Prediction of pressurant mass requirements for axisymmetric liquid hydrogen tanks [J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(6): 796-799.