

文章编号: 1000 8055 (2009) 01-0001-06

流体网络法在发动机空气冷却系统设计中的应用

陶 智, 侯升平, 韩树军, 耿汀, 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: 将一维稳态流体网络方法应用到发动机空气冷却系统沿程压力、温度和流量预测中. 该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, 在压力修正、流热耦合方法基础上引入系数迭代修正求解. 程序应用到有经验关联式的模型中验证, 计算结果与经验关系式吻合得较好. 验证后的程序被应用到某发动机空气系统初步设计方案的校核和改进中, 在模拟结果指导下的参数调整很好地满足了设计要求.

关 键 词: 流体网络; 稳态; 压力修正; 元件; 节点

中图分类号: V228.3

文献标识码: A

Study on application of fluid network into the design of air system in engine

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

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

Abstract: A new program was developed to predict the pressure, temperature and mass flow rate of the flow in engine. The air system was simplified into a fluid network comprised of nodes and elements. One-dimensional conservation equations were solved by a method of combination of pressure correction method, fluid-thermal coupled method and coefficient correction method. The program was validated through a model with an empirical formula, and the results showed good agreement with the empirical formula. Then the program was used to verify and improve the preliminary design scheme of a jet engine. Results show that the adjusted design parameters obtained with the help of simulation results are satisfactory.

Key words: fluid network; steady; pressure correction; branch; 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.

Majumdar^[1-2] 对流体网络法进行了系统研究, 采用 Newton Raphson 方法求解非线性守恒

收稿日期: 2007 12 17; 修订日期: 2008 03 14

基金项目: “凡舟”青年科研基金(Grant No. 20070401)

作者简介: 陶智(1963-), 男, 辽宁大连人, 教授、博士生导师, 主要从事热端旋转部件内的流动和换热的研究.

方程组, 计算量较大且数值稳定性有赖于初始值。Schallhorn^[3] 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。郭文^[4] 采用对分法和分层次调整松弛因子法来求解方程, 将应用压力修正方法求解动量方程, 并与能量方程耦合计算, 从而将非线性守恒方程组转化为线性方程组, 节省了计算时间, 提高了计算稳定性, 但是在迭代计算过程中没有对阻力系数、换热系数等进行修正。刘剑^[5] 将网络法应用到润滑系统, 联立求解动量和质量守恒方程, 但没考虑温度因素。王树刚^[6] 在求解流体网络方程时引入增量网络法, 侧重于分析扰动敏感性。综上所述, 要建立一种较全面的流体网络模型需要充分考虑各影响因素, 并在减少计算量的同时进一步提高计算准确度。

本文综合应用压力修正方法、流热耦合计算方法, 同时在迭代求解过程中考虑阻力系数、换热系数、物性参数等的修正。在此基础上开发了程序, 并应用到有经验关联式的模型中进行验证。最后将经过验证的程序应用到某发动机空气冷却系统初步设计方案的校核和改进中。

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, JL, 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。

1.1 基本控制方程组

质量守恒方程

$$\sum m_i = 0 \quad (1)$$

其中 m_i 为进出节点 i 的各流体元件质量流量。

压力流量关系

$$\begin{cases} p_{out}^* - p_{in}^* = \rho \omega^2 \frac{r_{out}^2 - r_{in}^2}{2} - \frac{\xi L}{2D} \left(\frac{m}{\rho A} \right)^2 \\ p^* = p + \frac{1}{2} \rho u^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 p_{in}^* 和 p_{out}^* 为元件进、出口节点总压, ρ 为元件内流体平均密度, ω 为元件旋转角速度, r_{in} 和 r_{out} 为元件进、出口旋转半径, ξ 为元件阻力系数, L 是元件的长度, D 是元件当量直径, A 为元件横截

面积, p 为静压。

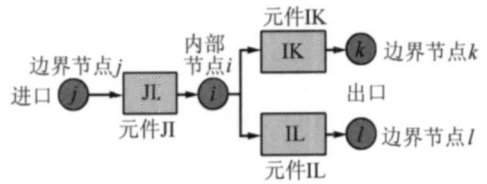


图1 流体网络模型

Fig. 1 Schematic drawing of fluid network

由公式(2)可以得到

$$m = m(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, K_1) \quad (3)$$

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。

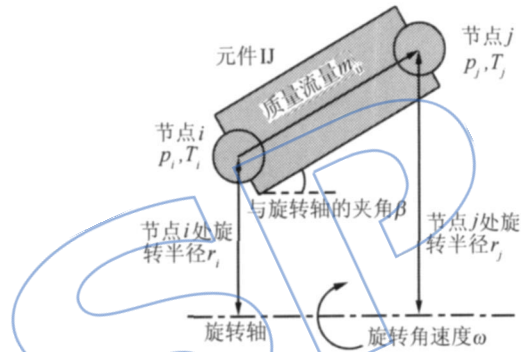


图2 流动单元模型

Fig. 2 Scheme drawing of basic fluid network unit

能量守恒方程

$$\begin{aligned} m h_{out}^* - m h_{in}^* = \\ \frac{m \omega^2 (r_{out}^2 - r_{in}^2)}{2} + \alpha [T_w - T] F \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} h^* = c_p T^* \\ T^* = T + \frac{u^2}{2c_p} \end{cases} \quad (5)$$

其中 c_p 为定压比热容, h_{in}^* 和 h_{out}^* 分别为元件进、出口节点总焓, 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

$$\begin{cases} T = 0.5 \times (T_{in} + T_{out}) \\ T^* = 0.5 \times (T_{in}^* + T_{out}^*) \end{cases} \quad (6)$$

将公式(5)和(6)代入公式(4)得到

$$T_{out} = T_{out}(T_{in}, m, r_1, r_2, K_2) \quad (7)$$

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。

若有 M 个元件汇流到同一节点 i , 节点总温可由下式得到

$$\left(\sum_{N=1}^M m^N c_{pN}\right) T_i^* = \sum_{N=1}^M (m^N c_{pN} T_N^*) \quad (8)$$

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

$$p = \rho RT \quad (9)$$

其中 R 为气体常数.

1.2 压力修正方程组

首先, 对于图 1 所示的流体网络, 对节点 i 由质量守恒可以得到

$$m_{ij} + m_{ik} + m_{il} = 0 \quad (10)$$

由于计算首先要假设各节点的压力作为迭代的初值, 而假定的压力值可能会使方程 (10) 产生流量残量, 残差值由下式得到

$$\Delta m_i = m_{ij} + m_{ik} + m_{il} \quad (11)$$

要满足流量守恒关系式 (10), 需对各元件进行流量补偿, 补偿后的流量应该满足

$$(m_{ij} + \Delta m_{ij}) + (m_{ik} + \Delta m_{ik}) + (m_{il} + \Delta m_{il}) = 0 \quad (12)$$

将方程式 (11) 代入方程式 (12) 得到

$$\Delta m_{ij} + \Delta m_{ik} + \Delta m_{il} = -\Delta m_i \quad (13)$$

另一方面, 由全微分知识有

$$\Delta m = \frac{\partial m}{\partial p_{in}} \Delta p_{in} + \frac{\partial m}{\partial p_{out}} \Delta p_{out} \quad (14)$$

将方程式 (14) 代入方程式 (13) 得到压力修正方程

$$\left(\frac{\partial m_{ij}}{\partial p_i} + \frac{\partial m_{ik}}{\partial p_i} + \frac{\partial m_{il}}{\partial p_i}\right) \Delta p_i + \frac{\partial m_{ij}}{\partial p_j} \Delta p_j + \frac{\partial m_{ij}}{\partial p_k} \Delta p_k + \frac{\partial m_{ij}}{\partial p_l} \Delta p_l = -\Delta m_i \quad (15)$$

其中方程左边的系数由方程式 (3) 得到.

对边界节点 b , 压力为已知条件, 故有

$$\Delta p_b = 0 \quad (16)$$

n 个内部节点压力修正方程组成如下方程组:

$$\left(\sum_{j \neq i}^n \frac{\partial m_{ij}}{\partial p_i}\right) \Delta p_i + \left(\sum_{j \neq i}^n \frac{\partial m_{ij}}{\partial p_j}\right) \Delta p_j = -\Delta m_i \quad (17)$$

求解方程组 (17) 得到各内部节点的压力修正值 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

$$error_1 = \frac{|\Delta m|}{m}, \quad error_2 = \frac{|\Delta p|}{p} \quad (19)$$

由公式 (3) 得到流量, 由能量方程得到温度, 然后在新的参数下进行迭代. 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

用于验证的模型是一有经验关联式 (Epstein 关联式) 的氦气压缩系统^[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.

表 1 程序与 Epstein 关联式质量预测结果比较

Table 2 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

3 计算模型

图 3 为某发动机冷却空气流路初步设计方案的网络图, 包括 20 个节点 (3 个边界节点, 17 个内部节点) 和 20 个元件, 旋转轴转速为 6 280 rad/s. 表 2 为进出口已知条件, 其中涡轮盘前腔出口 (节点 19) 的压力设计值待定, 初步设计方案假设压力值为 2.0×10^5 Pa. 表 3 为根据某些元件的限制要求确定的部分节点处压力设计参考值. 另外, 要求涡轮盘前、后腔 (分别为元件 10 和 18) 冷却空气流量比范围为 3/4~1, 涡轮盘前、后腔出口 (分别为节点 19 和 20) 冷却空气温差不小于 5 K.

表 2 进出口已知条件

Table 2 Known conditions of inlet and outlet

节点号码	压力/ 10^5 Pa	温度/K
1	2.6	480
19	2.0	待求
20	1.9	待求

2.09 K, 小于设计要求的最小值 5 K, 这是由于冷却空气在盘前腔分配过少而在后腔分配过多, 致使前后腔冷却效果失衡.

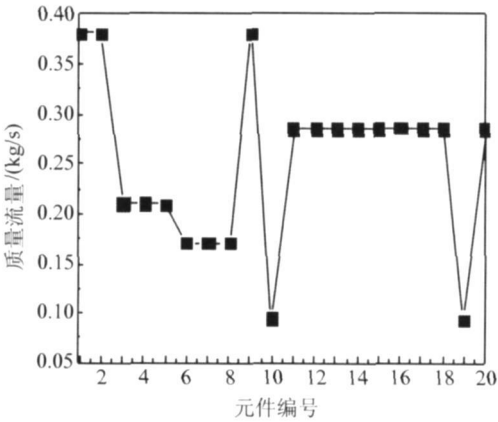


图 5 各元件流量计算结果

Fig. 5 Predicted mass flow rates of branches

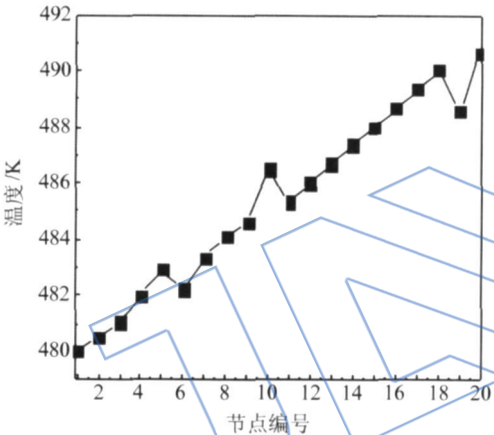


图 6 各节点温度计算结果

Fig. 6 Predicted temperatures of nodes

针对上述结果分析, 经过多次调整 and 计算分析, 最后将涡轮前腔出口 (节点 19) 设计压力调整为 195 000 Pa, 并对空气系统进行了校核计算.

图 7 是参数调整后节点压力计算结果与设计参考值的对比. 其中节点 17, 18 的计算结果与设计值基本吻合, 节点 2, 9, 10, 13 的计算结果与设计值值吻合得也很好, 分别差 0.07%, 0.23%, 0.16%, 0.21% .

图 8 是参数调整后与最初方案元件流量计算结果的对比. 参数调整后沿程的流动方向为正, 未发生倒流, 主流路总流量为 0.380 6 kg/s, 分配到涡轮盘前、后腔 (分别为元件 10 和元件 18) 的冷气流量分别为 0.169 8 kg/s 和 0.210 8 kg/s, 流量比约为 4/5, 满足了设计要求范围 3/4~ 1.

图 9 是参数调整后各节点温度计算结果与最初方案计算结果的对比. 涡轮盘前腔出口 (节点

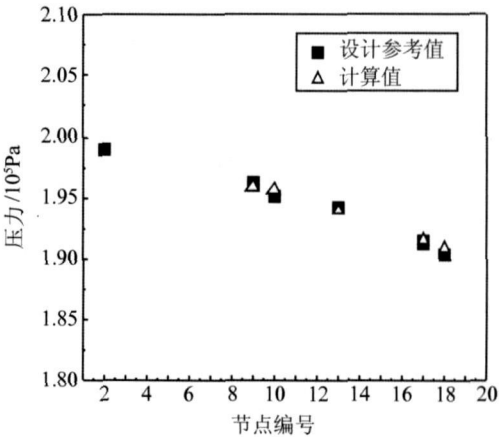


图 7 参数调整后压力计算结果与设计值的对比
Fig. 7 Comparisons of the newly calculated pressures and designed pressures

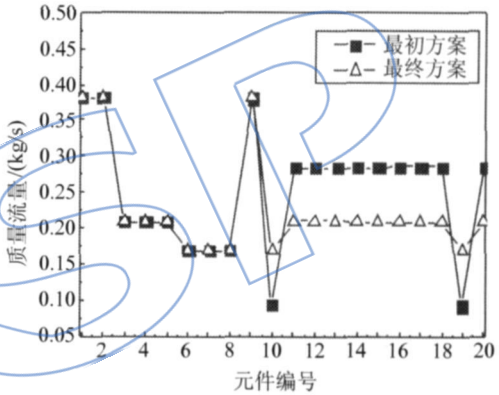


图 8 参数调整前后各元件流量对比
Fig. 8 Comparisons of the pressures calculated before and after parameter adjustment

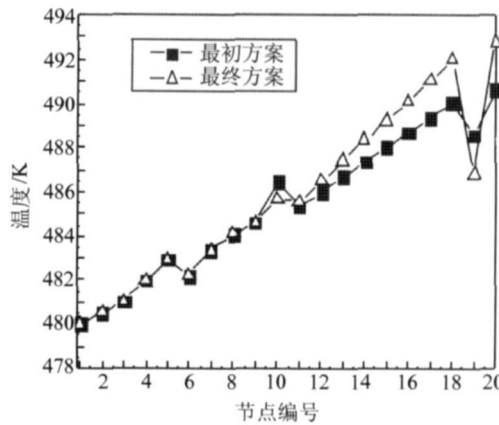


图 9 参数调整前后各节点温度对比
Fig. 9 Comparisons of the temperatures calculated before and after parameter adjustment

19) 冷却空气温度为 486.82 K, 盘后腔出口 (节点 20) 冷气温度为 492.80 K, 温差为 5.98 K, 满足了最小值 5 K 的温差要求. 与最初方案相比, 温差的

增加主要是由涡轮盘前腔冷却空气流量分配增多而涡轮盘后腔冷却空气流量分配减少造成的。

5 结 论

本文应用一维稳态流体网络计算方法开发了程序用于计算发动机空气冷却系统沿程的压力、温度和流量分布。程序在某具有经验关联式的模型中得到验证,后被应用到某发动机空气冷却系统初步设计方案的校核和改进中。综上所述得到如下结论:

1) 在流体网络方程组的求解中引入压力修正方法、流热耦合计算方法,并在迭代求解过程中考虑了阻力系数、换热系数的修正,在减少计算量的同时提高了数值模拟的准确度;

2) 该程序在某氦气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) 程序被应用到某发动机空气冷却系统初步设计方案的校核和改进,在程序模拟结果的指导下进行的参数调整最终满足了设计要求,从而减少了设计阶段实验验证的时间,提高了设计和改进的效率。

参考文献:

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

Reno, U SA: AIAA, 1999.

[2] Holt K, Majumdar A K. Numerical modeling and test data comparison of propulsion test article helium pressurization system [C]// 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. AIAA Paper 2000-3719, Huntsville, U SA: AIAA, 2000.

[3] Schallhorn P A. 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, U SA: AIAA, 2004.

[4] 郭文, 吉洪湖. 高压涡轮导叶内冷通道流动特性计算分析 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 831-835.

GUO Wen, JI Honghu. Computational analysis of the HP turbine nozzle guide vane internal flow characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 831-835. (in Chinese)

[5] 刘剑, 张卫正. 基于节点网络法的润滑系统图形化建模技术研究 [J]. 润滑与密封, 2006, 31(2): 59-62.

LIU Jian, ZHANG Weizheng. Study and application on graphic modeling techniques of engine lubrication system based on nodal network theory [J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(2): 59-62. (in Chinese)

[6] 王树刚, 孙金鹏. 用增量网络法计算稳态流体网络的微分灵敏度 [J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(2): 55-58

WANG Shugang, SUN Jinpeng. An incremental network approach for the differential sensitivity of steady fluid piping networks [J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(2): 55-58. (in Chinese)