

文章编号:1000-8055(2011)05-1048-04

航空发动机高温部件系统模拟技术

侯升平, 陶 智

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对航空发动机高温部件系统模拟技术进行研究,在涡轮等高温部件及其冷却系统组成的流固系统研究中采用整体域划分思路,并对两部分组成的整体域统一求解. 将该方法在某模型中进行分析验证,应用到某涡轮系统及周围冷却空气模拟中,并对强弱耦合两种耦合模拟方法的结果进行了比较分析.

关 键 词: 航空发动机; 空气系统; 模拟; 耦合; 涡轮; 改进

中图分类号: V233. 5

文献标志码: A

Simulation technique for the high temperature components in aero-engine

HOU Sheng-ping, TAO Zhi

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The method to simulate the air system of jet engine was studied, and new approach was applied into the combined fluid area and solid area to predict the characteristic of high temperature components and the cooling air system of jet engine. The conservation equations of solid components and the cooling air system were solved in a coupled manner. The method was validated and then was applied to predict the characteristics of turbine disk in engine, and meanwhile the comparison between the simulated results from the strongly coupled method and the weakly coupled method was worked out.

Key words: jet engine; air system; simulation; coupled; turbine; improvement

航空发动机空气系统是一个庞大的系统工程,对其准确的模拟目前是发动机研制的一个难点,由于发动机研制技术在各国是严格保密的,所以在研制过程中可以通过借鉴其他行业的相关模拟技术进行.

Schallhorn 等^[1]用牛顿-拉普森法求解流体域, Holt 等^[2]对这一方法进行了完善和模拟范围的扩展,在此基础上陶智、侯升平^[3-7]对该类系统模拟方法进行了探索和改进,使其更适用于工程,但是没有把固体区域考虑在内, Miltiadis^[8]采用热网络法模拟固体温度, Athavale 等^[9]对两个区域进行交互,计算过程中以对方结果为计算边界,计算不稳定. Tetlow 等^[10]结合蒙特-卡洛法、牛

顿-拉普森法,准确度提高,但计算较慢,工程应用中还需改进. Gamber 等^[11]采用顺序迭代方法来计算,只适用于计算量较小的模型. 综上所述,对于这两部分区域的综合研究,要结合工程改进形成新的更适用的方法.

本文在前期成果的基础上综合考虑流体固体两个区域,探索将两部分区域同时计算的方法,通过工程应用来验证,并应用到发动机涡轮盘设计中,比较强弱耦合两种模拟方法结果的差异,为工程设计提供参考.

1 计算模型

网络具体划分方法和系统参数设置可参考文

收稿日期:2010-05-20; 修订日期:2010-10-30

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和适航性技术.

献[7],下文公式中用到的所有参数在参考文献[7]中都有定义,代表的含义也一样,在这里不再赘述,为了便于参考,将网络模型图和网络单元模型图列出,如图1和图2所示。

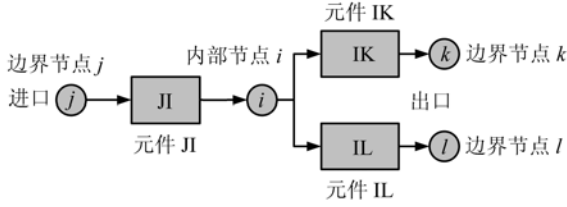


图1 网络模型

Fig. 1 Schematic drawing of network

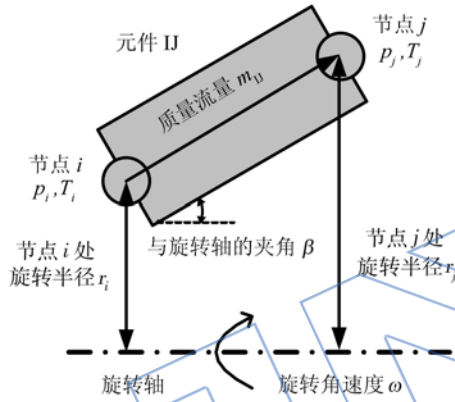


图2 网络单元模型

Fig. 2 Scheme drawing of basic network unit

1.1 计算方程

基本控制方程组包括流体域的质量守恒方程、流体域的动量守恒方程和两部分统一域的能量守恒方程。

流体域质量守恒方程

$$\frac{dM}{d\tau} = \sum m_i \quad (1)$$

流体域动量守恒方程

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

为了便于编程,对上述方程进行一定的推导,由基本数学推导

$$\frac{d(Mu)}{d\tau} = M \frac{du}{d\tau} + u \frac{dM}{d\tau} \quad (3)$$

由式(1)结合式(3)推导得

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

结合流量与流速关系,由式(4)得

$$m_\tau = m_\tau(p_{in}, p_{out}, r_{in}, r_{out}, \tau, K_1) \quad (5)$$

控制方程组中的流固统一域的能量守恒方程单独列出如下:

$$\begin{aligned} \frac{d(Mh^*)}{d\tau} &= \frac{m\omega^2(r_{out}^2 - r_{in}^2)}{2} + \\ m c_p T_{in}^* - m c_p T_{out}^* + \alpha F [T_w - T] \end{aligned} \quad (6)$$

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

需要注意的是,对固体域而言,流量为0。

元件平均温度用插值得到

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

为了便于编程,对上述方程进行一定的推导,由基本数学推导

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

式(6)结合式(9)得

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

式(10)推导可得

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

另外,还需要结合下面流体汇流分流温度关系

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

N是汇流或分流的流路编号。

流体为空气,可结合下式:

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

1.2 构建封闭求解集

由瞬态流量公式

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

式(5)结合式(14)有

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

由数学推导有

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

式(15)结合式(16)有

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

整个系统各部分推导这样的方程,组成系统方程组,得到 Δp_i ,并对原参数进行校正

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

最终计算得到满足式(19)模拟控制要求的结果.

$$e_1 = \frac{|\Delta m|}{m}, \quad e_2 = \frac{|\Delta p|}{p} \quad (19)$$

1.3 两部分区域的交接

两部分区域的交接是通过基于物理特征的网络连接方式进行的(见图3),具体方法及方法校核可参考文献[7],在此不赘述.

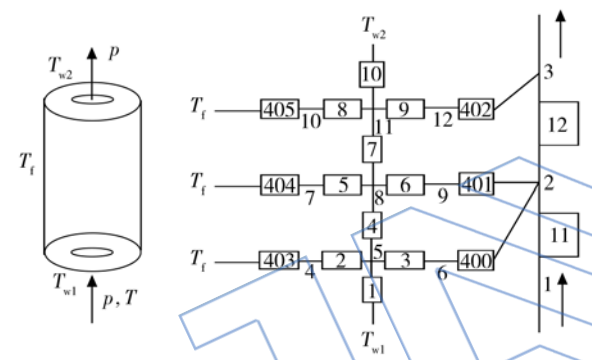


图3 流固区域交接

Fig. 3 Connection of solid and fluid areas

2 涡轮系统分析

2.1 两类耦合计算方法

强弱耦合两类方法的不同参考文献[12],在此不赘述,其中强耦合中涉及到的公式如式(20)所示.

$$St \cdot Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{2} Cf \quad (20)$$

2.2 计算模型及结果分析

计算模型和进出口条件可参考文献[7],在此不再赘述.下面重点讨论两种耦合方法预测结果的差别及对发动机设计的影响.为了便于表达,将弱耦合方法称为方法1,将强耦合方法称为方法2.

从图4可以看出,方法1得到的盘后冷气流量比方法2的大,说明按照方法1来设计的话可

能错误高估了实际能够到达盘后的冷气量,于是按照这个冷气量进行热设计,但是事实上冷气量却小得多,所以原先设计的结构可能会因冷却不够而损坏.

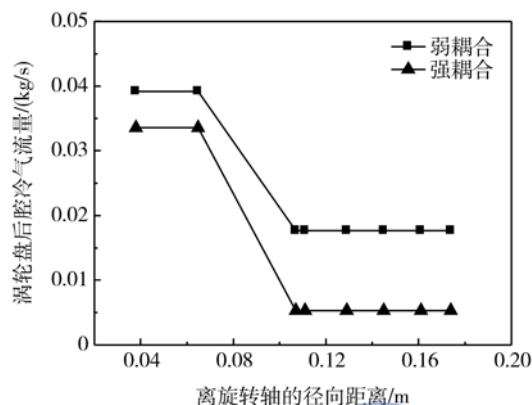


图4 盘后冷气流量分配

Fig. 4 Mass flow rate of cooling air behind the turbine disk

从图5可以看出,方法1的冷气温度升幅度比方法2得到的小,而且随着半径增大,这个差距变得越来越明显,也就是说用方法1预测得到的结果乐观地估计了冷气的冷却能力,而实际上可能冷气温度由于升高过多而失去了好的冷却效果,这也说明了同样的问题,盘可能会出现预料外的损坏.

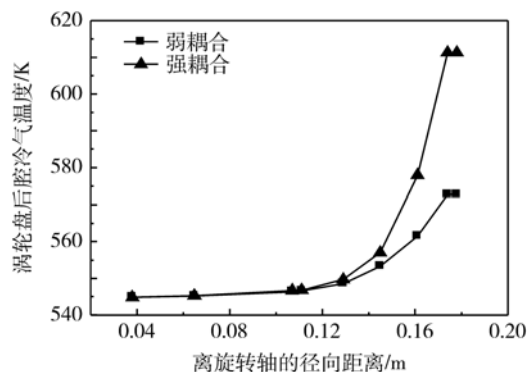


图5 盘后冷气温度变化

Fig. 5 Temperature of cooling air behind the turbine disk

所以,建议采用方法1设计的空气系统应该适当增加安全裕度,以保证涡轮盘系统的安全,而上述模拟结果可以为裕度的具体数值提供一定的参考.

3 结 论

综上所述得到如下结论及对未来发展的建议:

1) 应用新的方法将流体和固体区域形成统一网络,对两部分区域统一求解;

2) 对某涡轮盘系统的强弱耦合思路进行了研究,得出了可供工程参考的结果及对比分析;

3) 本方法在工程中的成熟应用还需要结合工程实际对模拟所需的各类典型元件参数数据库进行不断充实,这是一个长期积累的过程。

参考文献:

- [1] Schallhorn P A, Hass N E. Forward looking pressure regulator algorithm for improved modeling performance within the generalized fluid system simulation program[R]. Florida USA: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 2004-3667, 2004.
- [2] Holt K, Majumdar A. Numerical modeling and test data comparison of propulsion test article helium pressurization system[R]. Huntsville, USA: 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 2000-3719, 2000.
- [3] TAO Zhi, HOU Shengping. A new approach to simulate the fluid network of unsteady flow[C]//ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer. Marrakech, Morocco: ICHMT, 2008: 154-157.
- [4] 陶智, 侯升平. 流体网络法在发动机空气冷却系统设计中的应用[J]. 航空动力学报, 2009, 24(1): 1-6.
- [5] 侯升平, 陶智. 非稳态流体网络方法在发动机空气冷却系统中的应用[J]. 航空动力学报, 2009, 24(3): 494-498.
- [6] 侯升平, 陶智. 非稳态流体网络模拟新方法及其应用[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1253-1257.
- [7] 侯升平, 陶智. 流固网络一体化模拟方法探索应用[J]. 航空动力学报, 2010, 25(3): 509-514.
- [8] Miltiadis V P. Feedback control of thermal systems modeled via the network approach[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(3): 509-519.
- [9] Athavale M M, Ho Y H. Analysis of coupled seals, secondary and powerstream flow fields in aircraft and aerospace turbomachines[R]. NASA/CR Paper 2005-212716, 2005.
- [10] Tetlow M R, Evans M E. Monte Carlo analysis for a booster flyback guidance system[R]. Reno, USA: 43rd AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2005-819, 2005.
- [11] Gamble E J, Giel D. Systematic optimization approach for scramjet/ramjet heat exchanger analysis tool (SRHE-ATTM) [R]. Hartford, USA: 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 2008-5173, 2008.
- [12] 侯升平. 航空发动机空气系统适航性设计改进建议[J]. 航空标准化与质量, 2011, 241(1): 34-36.
- HOU Shengping. Design improvement proposal of air system of jet engine based on airworthiness requirement[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2011, 241(1): 34-36. (in Chinese)
- HOU Shengping, TAO Zhi. Study on application of unsteady fluid network to the air system in engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(3): 494-498. (in Chinese)