

文章编号: 1000-8055(2002) 01-075-05

涡扇发动机过渡过程模拟精化方法

陈红梅, 朱之丽

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 以某涡扇发动机的过渡态性能模拟为研究对象, 建立了过渡过程中零部件与气流之间的不稳定热交换、由于热交换引起的间隙变化以及引起的部件效率变化的数学模型, 并且将此模型引入面向对象的航空涡扇发动机过渡过程性能模拟程序的框架中。通过计算分析, 零部件与气流之间的热交换对发动机过渡过程性能有显著影响; 过渡过程叶尖间隙的变化引起的部件效率损失是不容忽视的。上述模型的建立将有效的提高涡扇发动机过渡过程性能模拟程序的精度。

关键词: 航空发动机; 性能; 过渡过程; 热交换; 数值模拟

中图分类号: V 231

文献标识码: A

The Investigation of the Simulating Model for Transient Performance of the Turbofan Engine

CHEN Hong-mei, ZHU Zhi-li

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A mathematical model is developed for simulating transient performance of the turbofan engine, in which the transient heat transfer between the components and airflow, tip clearance and components efficiency changes caused by heat transfer are analyzed. The calculated result shows that there are significant influences of heat transfer on the engine's transient performance, and the component efficiency loss caused by tip clearance changes can not be ignored. The simulation accuracy can be improved by above model for the turbofan engine transient performance.

Key words: aircraft engines; properties; transient process; heat exchange; Numerical Simulation

1 前言

由于现代军用飞机对发动机过渡过程要求的性能越来越高, 使建立一个可以模拟过渡过程气动热力过程的计算模型成为必然。国内外大量相关文献指出发动机在加减速过程中气流与零部件之间的不稳定换热将产生不容忽视的影响, 英 RR 公司^[1]认为这种不稳定换热的影响相当于燃烧室效率下降 50%。由此可见发动机过渡过程模

型若能真实地模拟过渡过程的实际物理过程, 考虑不稳定换热是关键问题之一。

本文研究的目的是建立不稳定热交换、叶尖径向间隙的模型, 并将该模型引入发动机过渡过程性能模型, 从而提高过渡过程模型计算的精度。

2 热交换模型

热交换模型^[2,3]中, 主要考虑了零部件吸收和释放热量: (1) 使气流在风扇、压气机和涡轮中的

气动热力过程为非绝热过程; (2) 对转子功平衡关系的影响。将过渡过程离散成时间步长为 Δt 的小段, 假设在每一时间小段内气流参数和换热系数为常量, 从而考虑了换热系数随过渡过程时间的变化。由传热学原理, 计算气流和金属之间的热交换量, 关键问题是如何准确的估算换热系数。

对于压气机, 根据:

平板层流的计算平均换热系数的准则公式

为:

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.333}$$

平板紊流的计算平均换热系数的准则公式为:

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.333}$$

由于气流绕流叶片从层流发展到紊流, 对整个叶片采用加权平均方法得到平均换热系数:

$$\alpha_m = C_1 \alpha + (1 - C_1) \alpha^r$$

式中: C_1 为加权系数。

涡轮中, 采用的实验关联式为:

$$Nu = \alpha L / \lambda = 0.235 Re^{0.64}$$

求得瞬时换热量后, 由公式 $T_{out} = T_{a1, a1} - Q / c_p m_a$ 可得部件非绝热出口的温度, 因此气流非绝热压缩功为 $W_i = c_p (T_{out} - T_{in})$, 从而求得热损失系数: $F = Q_i / W_i$

3 叶尖间隙估算模型

在涡扇发动机过渡过程性能计算模型中经常引用的叶轮机械特性图是部件试验数据中获取的, 没有考虑到零部件与气流之间的热交换引起的叶尖间隙以至于效率的变化。而实际的过渡过程中, 转子和机匣与气流间存在有不同程度的热交换而产生不同热膨胀, 使得叶尖间隙和部件试验数据不同, 所以要建立叶尖间隙估算模型, 并且这一模型要足够简化以适应过渡过程性能计算。

影响叶尖间隙变化的因素主要有两方面, 即热效应和机械效应。为了计算方便, 将叶轮机械中的每一级分为 3 个部分并简化成规则的几何形状, 这样, 叶尖间隙的瞬时变化可描述为:

$$\Delta C = \Delta R_c - \Delta R_b - \Delta R_d$$

上式中 ΔC 为叶尖间隙瞬间变化, ΔR 为各子部分瞬时径向尺寸变化, 下标 c, b, d 分别表示机匣、叶片、轮盘, 各变化量应为热伸长和机械弹性变形之和。

机械效应只考虑转子受离心力作用而产生的变形量, 包括轮盘和叶片的离心伸长^[2]。热伸长计算主要包括机匣、叶片和盘的热伸长量, 可用下式计算:

$$\Delta R_h = C_x \Delta T_m L$$

其中 C_x 为金属零件的热膨胀系数, ΔT_m 为金属

零件的瞬时温度变化, L 为金属零件的径向特征尺寸。为求得温差, 关键是求出瞬时的换热系数, 进而求出气流与零部件之间的换热量和温差。

对于叶片换热系数的算法采用与本文第 2 节相同的方法。

对于机匣, 由于内外机匣分别与不同温度、压力和速度的气流接触, 所以按机匣内、外表面分别计算其换热系数。将机匣内表面假设为一个圆柱面, 在其中有一个直径较小的旋转圆柱面来计算换热系数, 计算公式:

$$Nu_i = 0.015 \left[1 + 2.3 \frac{D_o + D_i}{\delta} \right] \cdot (D_o / D_i)^{0.45} Re^{0.8} Pr^{0.33}$$

将机匣外表面假设为平板上高度发展的紊流附面层, 换热系数计算公式为:

$$Nu_o = 0.01644 Re^{0.8} Pr^{0.333}$$

因此对于整个机匣来说, 传热热阻 $R = 1/\alpha + \delta/\lambda + 1/\alpha$, 所以传热系数 $K = 1/R$ 。

对于轮盘, 将其分为 3 个组成部分, 一个厚的轮毂, 一个薄的盘和一个轮缘。

由于在叶轮机械中旋转轮缘与静子表面相邻, 可用下式估计轮缘当地努塞尔数:

$$Nu = 0.0253 Re^{0.8}$$

薄盘和轮缘形成旋转空腔和旋转面, 空腔内气体因自身温度不均而流动, 其换热机理是在引力场中的自然对流换热, 对竖直平板的自然对流换热, 可用以下经验公式求得:

$$Nu = 0.12 (Gr \cdot Pr)^{0.333}$$

求得各部分的换热量及温度变化后, 按体积求整个轮盘的平均温度变化, 如此处理可保证轮盘各部分相邻面的连续性。

相对于零间隙的效率损失修正的经验公式^[4]:

$$\Delta \eta = \frac{0.7 \Delta C \varphi}{h_b \cos \beta_m} \left[1 + 10 \frac{\Delta C \varphi_A}{\varphi_{\cos \beta_m}} \right]$$

式中: h_b 为叶片高度, $\Delta C \varphi$ 为叶尖间隙变化, φ 为叶片载荷系数, β_m 为叶片进出口的平均气流角, Φ 为流量系数, A_R 为展弦比 (其中: $\Phi = V_a / V_i$, $\varphi = \frac{2c_p \Delta T_a}{V_i^2}$, V_a, V_i 分别为动叶平均直径处的轴向和切向速度, ΔT_a 为经该叶片排的气流温度变化)。

4 数值模拟结果

4.1 各部件热交换量的估算

图 1 给出了过渡过程中, 零部件和气流之间的热交换量。从图 1 可以看出无论是压气机还是

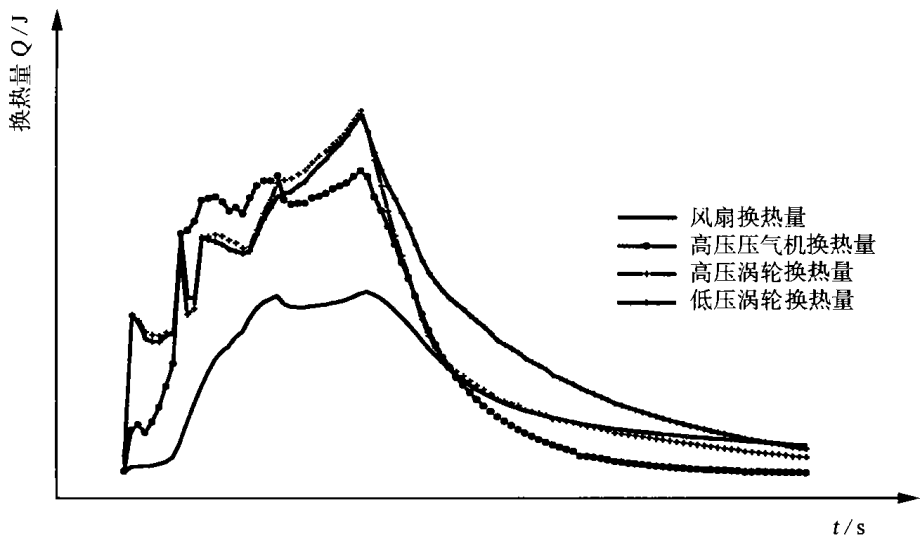


图1 各部件的热交换量

涡轮, 热交换量都是从开始为零, 逐渐增大, 然后又开始减小。这是因为零部件的初始温度是慢车状态气流的温度, 当发动机从慢车开始加速, 气流比零部件温度变化快, 两者之间存在较大温差, 零部件从气流中吸收的热量也较大。当转速上升到一定时, 气流与零部件之间温差逐渐减小, 换热量也随之减小。当加速到接近稳态转速时, 气流温度逐渐趋于稳定, 零部件温度也慢慢增长上来, 所以两者趋向于热平衡, 最后热交换量趋向于零。从图中还可以看出涡轮部件与气流之间的换热量比压缩部件与气流之间的换热量要大, 其中高压涡轮的换热量最大, 风扇的换热量最小。这完全符合发动机的实际工作情况。

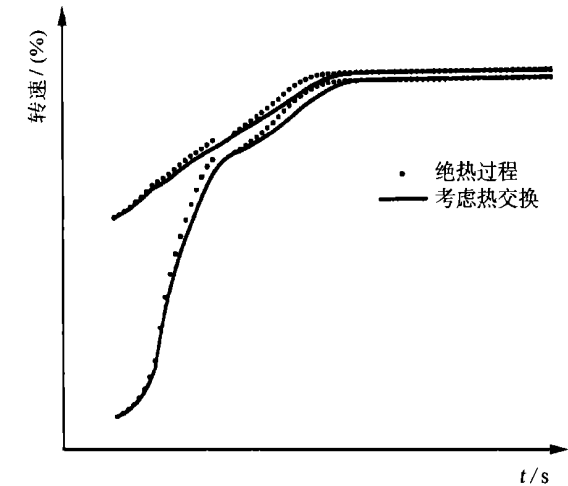


图2 考虑热交换对转速的影响

4.2 热交换对过渡过程响应曲线的影响

图2和图3给出了单独考虑热交换对过渡

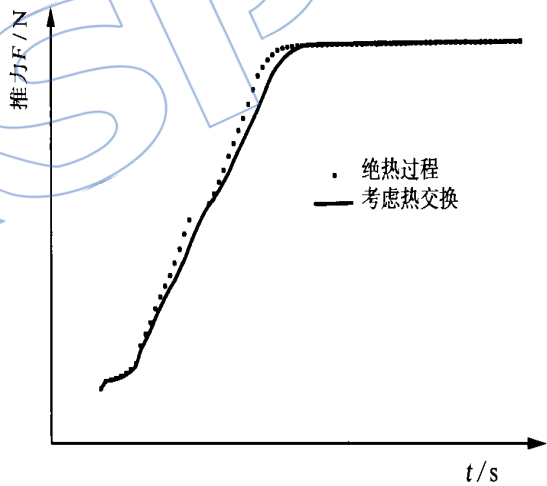


图3 热交换对发动机的推力的影响

过程响应曲线的影响。可以看出, 由于考虑了热交换, 使得转速和推力都需要更长的时间才可以达到稳定。这是因为考虑热交换以后, 通过热损失系数对各部件的热力过程进行了非绝热修正, 并且由于热交换作用, 涡轮输出功率不仅仅要平衡压气机消耗功率和转子加速所需功率, 还要补偿由于零部件吸热而损失的热量, 导致转速上升的慢, 推力也需要更长的时间才能达到稳定值。计算结果与文献[3]所提供的结果一致。

4.3 叶尖间隙及效率估算

图4和图5给出由于考虑加速过程中高压涡轮叶尖间隙变化及其引起的相对于零间隙的效率

损失。在加速过程中由于零部件和气流之间的热交换作用,加速开始的一段时间内,转子从气流中吸收了大量的热,导致叶片和轮盘膨胀,加之转速的增加,使转子部分产生了较大的离心弹性变形,而机匣较薄,且外部有温度较低的气流流过,机匣的热变形相对较小,所以叶尖间隙开始有减小的

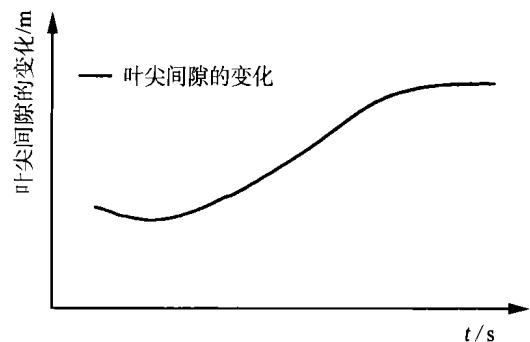


图 4 过渡过程叶尖间隙的变化

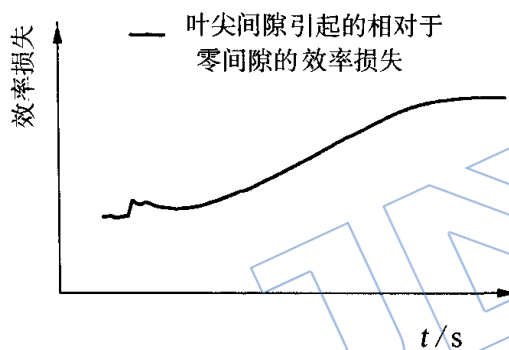


图 5 叶尖间隙变化引起的相对于零间隙的效率损失

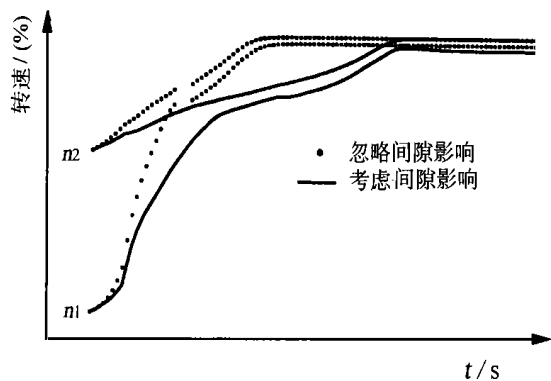


图 6 高压涡轮考虑间隙对转速的影响

趋势。但随着转速继续增大,转子部件吸收的热量趋向于变缓,导致热膨胀变缓,机匣却加速膨胀(此计算结果和文献[2]相符合),故叶尖间隙增大。最后叶片和机匣与气流之间达到热平衡,叶尖

间隙不再变化。从图 5 给出的叶尖间隙变化引起的相对零间隙的效率损失可以看出间隙越大,效率损失越大。

4.4 叶尖间隙对转速和推力的响应曲线

图 6 和图 7 给出了考虑叶尖间隙变化后的推力和转速的响应曲线。由于叶尖间隙和效率发生变化,从而影响了全台发动机的响应特性。高压和

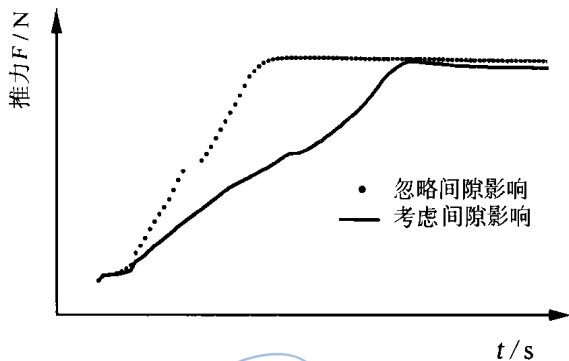


图 7 高压涡轮考虑间隙对推力的影响

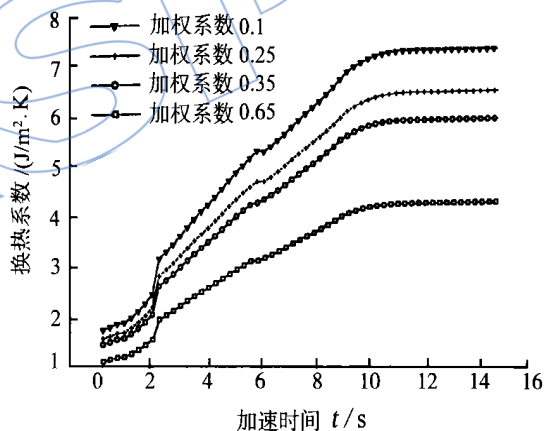


图 8 加权系数对换热系数的影响

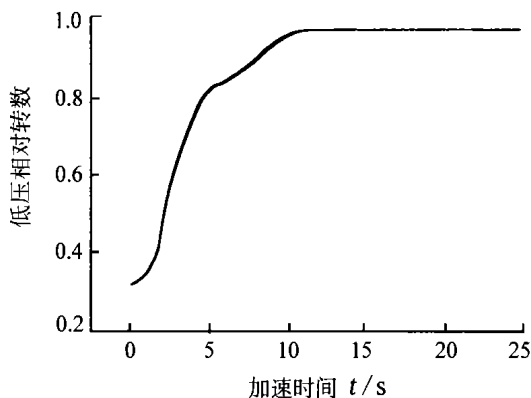


图 9 换热系数不同对低压转速的影响程度

低压的转速达到最大状态的时间都明显滞后。推力的响应曲线也有相同的变化趋势。

4.5 换热加权系数对发动机性能的影响

由于高压压气机的换热系数的求法是对平板层流和紊流换热系数的加权而得到的, 其中加权

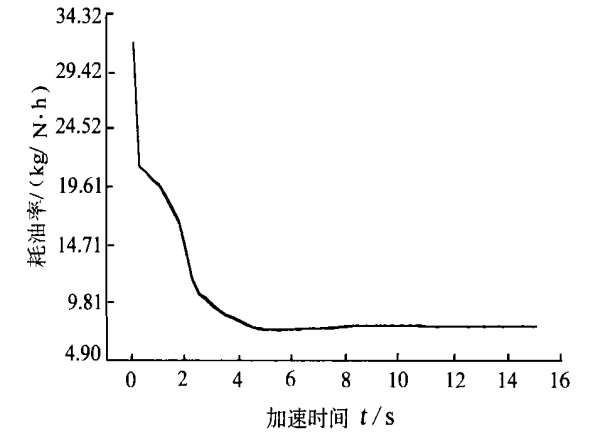


图 10 换热系数不同对耗油率的影响程度

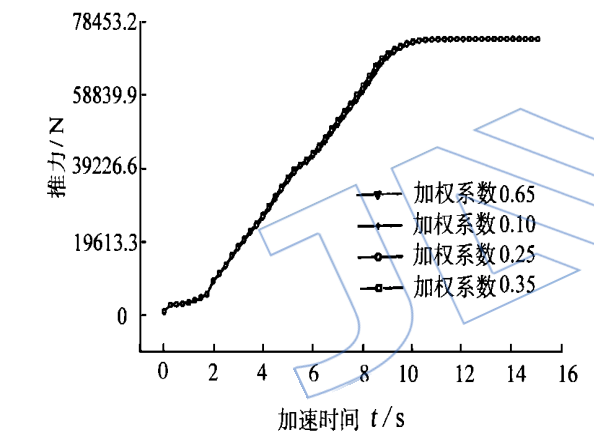


图 11 加权系数不同对推力影响的程度

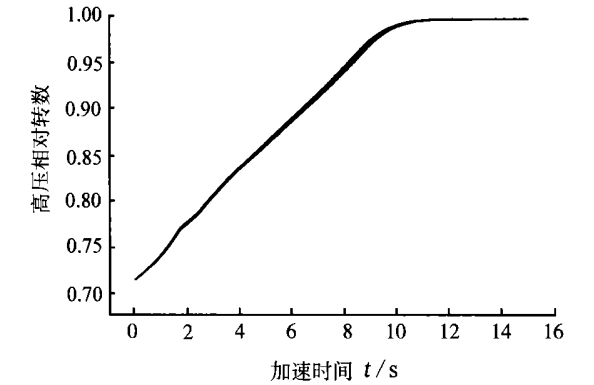


图 12 换热系数不同对高压转速的影响

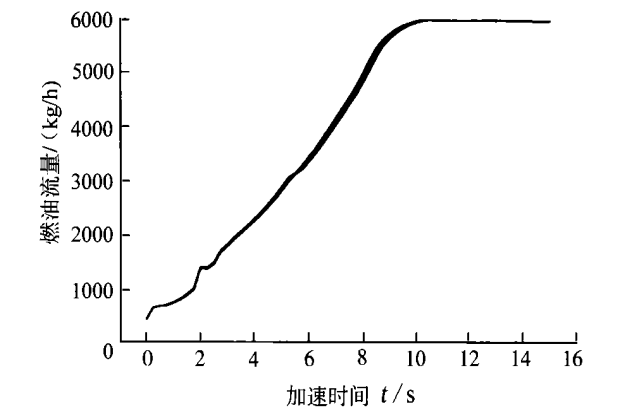


图 13 换热系数不同对燃油流量的影响程度

系数要由经验给出。图 8~图 12 给出了加权系数从 0.1 变化到 0.65 时对换热系数和发动机性能的影响。

5 结 论

本文建立了零部件与气流之间不稳定热交换模型和叶尖间隙的简化估算模型, 将模型用于航空涡扇发动机过渡过程性能计算。

计算分析表明:

- (1) 要提高发动机过渡过程性能模型的精度, 零部件与气流之间的热交换量的影响是不容忽视的, 尤其是涡轮部件的热交换的影响更显著, 换热加权系数对换热系数的影响较大, 但对性能影响不明显。
- (2) 过渡过程由于叶尖间隙的变化引起的部件效率的损失对发动机过渡过程的性能有显著影响。

参考文献:

[1] Roger A Crawford. Quantitative Evaluation Heat Transfer on Axial Flow Compressor Stability[R]. AIAA - 85-1352, 1985.

[2] 哈立德 S J. 动态模拟在战斗机发动机设计和研制中的作用 [A]. 第 25 届 AIAA / ASME / SAE / ASEE 联合推进会议 [C]. 1989.

[3] Pilidis P. A Study of Prediction of Tip and Seal Clearance and the Effects in Gas Turbine Transients[R]. ASME 84-GT- 245, 1984.

[4] Pilidis P. The Effect of Heat Transfer on Gas Turbine Transients[R]. ASME 86- GT - 275, 1986.

(责任编辑 杨再荣)