

热交换对喷气发动机过渡 过程影响分析*

朱之丽 廖 阔

(北京航空航天大学动力系, 北京, 100083)

摘 要: 给出一种用于估算气流与零部件间热交换对过渡过程影响的方法。利用该方法计算了某双轴涡扇发动机在加速过程中各主要零部件与气流间的热交换随加速时间的变化, 各部件热交换对推力响应的影响; 计算和分析了该发动机在相同供油规律下“冷”和“热”两种加速过程, 估算了典型部件换热面积和质量对加速性的影响。计算结果的分析表明: 高温部件与气流的热交换对喷气发动机的过渡过程有不容忽视的影响; 相同供油规律下由于热交换使“冷”和“热”加速过程的差异十分显著, “冷”加速过程允许采用补偿供油改善加速性; 零部件换热面积和质量的估算精度对加速性有一定的影响, 但不显著。

主题词: 涡轮喷气发动机, 过渡流, 加速性能, 传热

分类号: V235.11, V231.12

ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IMPACTING ON GAS TURBINE ENGINE TRANSIENTS

Zhu Zhili Liao Kuo

(Dept. Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: In order to simulate the engine real working processes during acceleration and deceleration, a model for estimating the heat transfer between gas and components is provided in this paper. By use of this model for simulating a two-spool mixed flow turbofan engine, some studies are carried out in this paper, which deal with:

- calculating the variety of heat transfer between gas and each component as accelerating time and the effects of heat transfer on thrust response;
- calculating and comparing two different accelerations named “cool” and “hot” of the engine under the same fuel schedule;
- estimating the effects of typical component wetted area and metal mass on the performance of acceleration.

The results indicate that: (1) It can not be ignored that the heat transfer between gas and high temperature components influence on the transients of gas turbine engine; (2) Because of heat transfer the difference between “cool” and “hot” accelerations is significant, and fuel compensation is allowed to improve the performance during the “cool” acceleration; (3) The estimation accuracy of the component wetted area and mass has little influence on the performance of acceleration.

* 本文1995年5月4日收到

Subject terms: Turbojet engine, Transition flow, Acceleration performance, Heat transfer

1 引言

燃气涡轮发动机过渡过程性能数值模型的研究已取得了不少成果^[1]。但模型中大多只考虑了发动机转子惯性和容腔效应对加、减速过程的影响,而忽略了在加、减速过程中气流与零部件之间的热交换。大量研究证明:发动机加、减速过程中气流与零部件之间的热交换占转子剩余功率的 30% 以上,这对加、减速性能必将产生不容忽视的影响^[2~4]。因此,为使发动机过渡过程性能模型更进一步真实反映实际的物理过程,本文给出了一种估算发动机在加、减速过程中气流与零部件之间热交换的方法,并估算了某双轴混合排气涡扇发动机各转子部件与气流间的热交换随加速时间的变化及其对推力响应的影响,将在相同供油规律下的“冷”、“热”两种加速过程做了对比估算;计算分析了典型部件的换热面积和质量估计对热交换的影响。

2 不稳定热交换模型

燃气涡轮发动机在加、减速过程中发生零部件与气流之间的热交换,使涡轮和压气机变为非绝热工作过程,影响了喷气发动机的热力循环及各部件的匹配,结果使加减速性能发生变化。根据传热学原理,温度为 T_g 的气流流过金属物体时气流与金属的换热量 Q 为:

$$Q = M_c C_m \frac{dT_m}{dt} = -\alpha A (T_m - T_g) \quad (1)$$

式中: M_c ——金属零部件质量; C_m ——金属零部件比热;
 T_m ——金属零部件的温度; α ——换热系数;
 A ——换热面积; T_g ——气流温度。

令 $\theta = T_m - T_g$, 则 (1) 式可写成:

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{\alpha A}{M_c C_m} dt \quad (2)$$

若初始条件 $\theta|_{t=t_0} = \theta_0$, $T_m|_{t=t_0} = T_{m_0}$ 且假定 α 、 C_m 为常量时,积分 (2) 式,并令 $\tau = M_c C_m / \alpha A$, 则金属部件温度为:

$$T_m = T_g - (T_g - T_{m_0}) e^{\frac{(t-t_0)}{\tau}} \quad (3)$$

在喷气发动机实际加、减速过程中, α 将随气流的流速、温度和压力等而不断变化,若在整个加、减速过程中按常量处理,必会引起较大误差。因此需将过渡过程离散成时间步长为 Δt 的小段,假定在每一小段内 α 为常量,金属零部件在 $t=t_1$ 时刻的瞬间温度为:

$$T_{m_1} = T_{g_1} - (T_{g_1} - T_{m_{1-1}}) e^{\frac{-\Delta t}{\tau_1}} \quad (4)$$

瞬时换热量为:

$$Q_i = -\alpha_i A (T_{m_i} - T_{g_i}) \quad (5)$$

修正部件出口截面气流的温度得实际出口温度:

$$T_{\text{out}_i} = T_{\text{out,cd}_i} - \frac{Q_i}{C_p m_{a_i}} \quad (6)$$

气流与外界交换的机械功:

$$W = C_p (T_{\text{out}} - T_{\text{ig}}) \quad (7)$$

换热系数 α 的大小不仅与气体的物性 (如 C_p , μ , ρ , T 等) 及换热表面的几何形状有关, 而且与气流的流动状态、对流换热方式等因素有关, 再加上喷气发动机的叶轮机械几何形状、气流在其中的流动情况均十分复杂, 这些都给准确估算 α 带来一定困难。根据工程上常应用的相似原理, 可将众多影响因素归并成为几个相似准则, 通过实验确定 α 的具体实验关联式。对于强迫对流换热, 如果气流沿平板的流动全为层流, 计算平均换热系数的准则方程^[5]为:

$$Nu_l = \frac{\alpha_l \lambda}{L} = 0.664 (Re)^{0.5} (Pr)^{0.333} \quad (8)$$

如果气流沿平板的流动全为紊流时, 计算平均换热系数的准则方程为:

$$Nu_t = \frac{\alpha_t \lambda}{L} = 0.037 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.333} \quad (9)$$

考虑到气流流过压气机或涡轮叶片的叶型时, 附面层起始于每个叶片前缘, 开始形成层流后过渡发展为紊流, 因此宜采用加权平均的方法估算 α_{av} ^[5]:

$$\alpha_{av} = 0.25\alpha_l + 0.75\alpha_t \quad (10)$$

考虑到气流紊流度对换热系数产生影响, 计算模型还对 (10) 式所得结果进行了修正。

压气机和涡轮转子零部件质量较大, 因而有较大的储热能力, 与气流热交换量相对较大。而燃烧室、尾喷管等薄壳结构的部件上述热交换影响可以忽略。在压气机和涡轮部件中沿气流通道各级的几何尺寸、气流的压力、温度及速度分布都有很大差别, 都会影响换热系数和换热量的计算结果。为简化起见, 采用了只考虑一组或两组有代表性的一级进行换热系数的估算, 并按整个部件的总换热面积和总的热容量计算热交换量。

3 热交换对发动机加速性影响分析

3.1 考虑热交换的加速过程比较

图 1 给出了两种加速过程各参数随时间的变化, 其中虚线表示在加速过程中忽略热交换, 实线则表示考虑换热影响。结果表明由于热交换使发动机推力、转速和增压比响应曲线明显滞后 1.5~2 s, 考虑热交换导致完成全过程的加速时间增加 30% 左右。

风扇与高压压气机两种加速过程按非绝热计算的加速过程线在高转速范围内将远离喘振边界, 其原因是由于零部件吸热使用于压缩气体的机械功减少, 故增压能力下降, 如此结果将允许发动机“冷”加速过程中以补偿供油方法改善加速性。

3.2 各部件的热交换影响

分别计算了只考虑某一部件与气流热交换而其它部件按绝热计算的加速过程, 结果见图 2。由图可看出, 高、低涡轮的热交换影响最大, 其次是高压压气机, 而低压压气机的热交换对加速过程几乎没有影响。图 3 给出的各部件的换热量与机械功之比随加速时间的变化曲线,

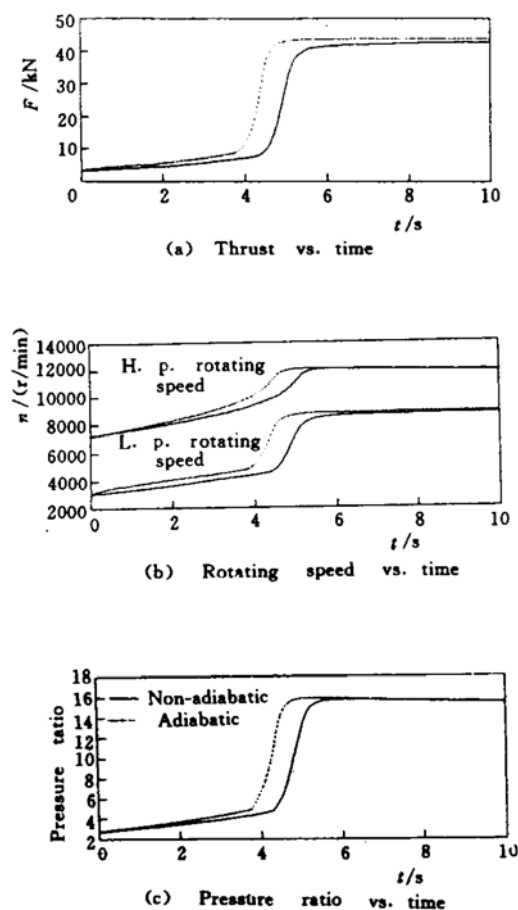


Fig. 1 Heat transfer effects
on accelerating process

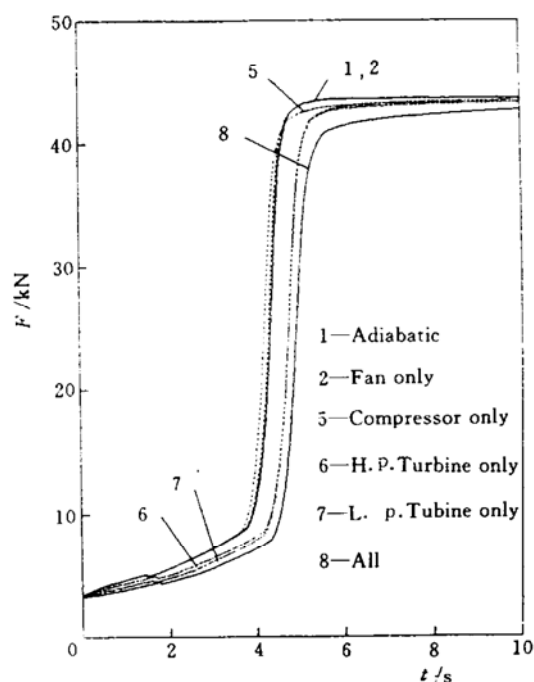


Fig. 2 Heat transfer between gas and different
component effect on thrust response

可进一步说明这个计算结果完全符合传热学原理：换热量正比于零件与气流之间的温差。

3.3 “冷”和“热”加速过程的比较

图 3 和图 4 给出了在相同供油规律下“冷”“热”两种加速过程的对比。所谓热加速是指紧

跟在减速过程之后的再加速，即遭遇加速。由图示结果可看出，由于各零部件储存的热量使“热”加速过程开始时高、低压气机不仅不吸热反而向气流中释放热能，涡轮的吸热量明显低于“冷”加速过程，因此造成了图 5 表示的转子转速响应曲线的区别。

3.4 零部件换热面积和质量估算对换热量的影响

喷气发动机中与气流相接触零部件的几何形状十分复杂，这给换热面积和质量准确估计造成较大困难。为分析这两个参数的准确度对换热量的影响，将它们分别在原有的估值基础上放大或缩小 50%，结果热交换量与之成正比变化，但相对变化量均不大于 10%，图 5 给出这一计算结果。这表明当换热面积和质量有较小误差时，不会对热交换量产生较大影响。

4 结 论

(1) 本文给出的热交换模型的估算结果与国外有关研究结果^[3,4]在量级上吻合，说明估算方法是可行的；

(2) 高温部件与气流的热交换量明显高于低压压气机，且对加、减速性能产生不容忽视的影响，低压压气机换热量可以忽略；

(3) “冷”“热”两个加速过程存在显著差异，为使“冷”加速过程与“热”加速具有相同的推力响应，在“冷”加速过程中应采用补偿供油；

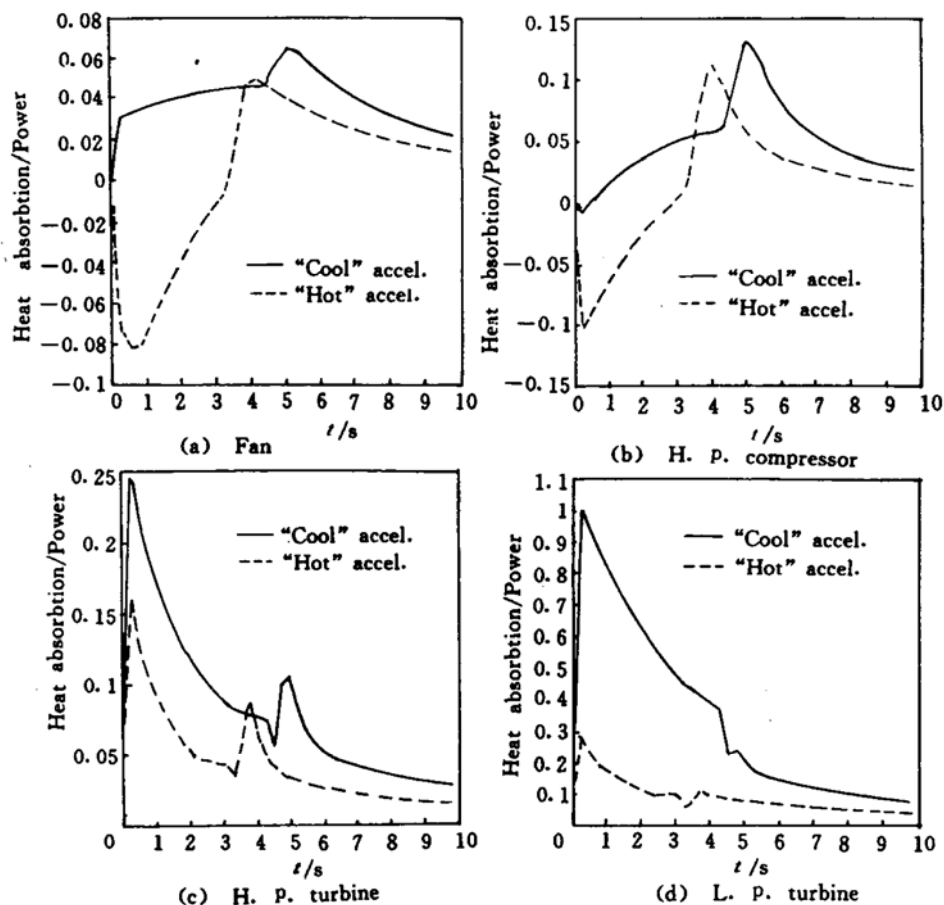


Fig. 3 Heat transfer between gas and each component vs time during "cool" and "hot" accelerations

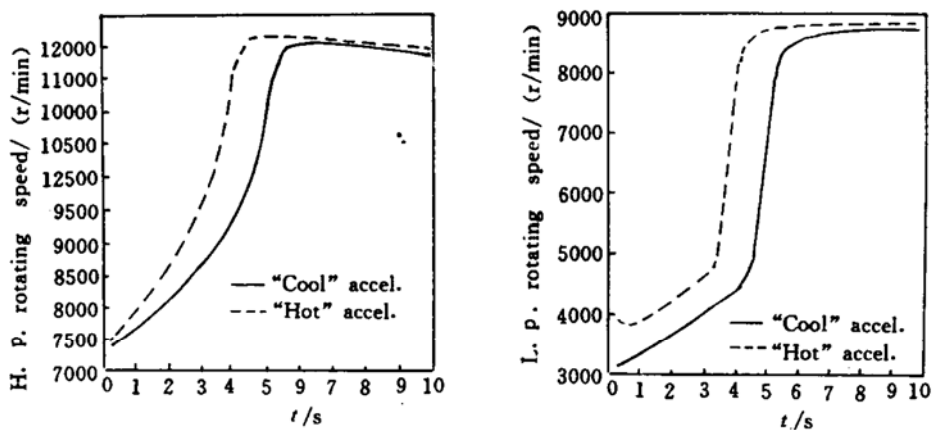


Fig. 4 Rotating speeds vs time during the "cool" and "hot" accelerations

(4) 零部件换热面积和质量的估算准确度对热交换量有一定影响,但不十分明显。

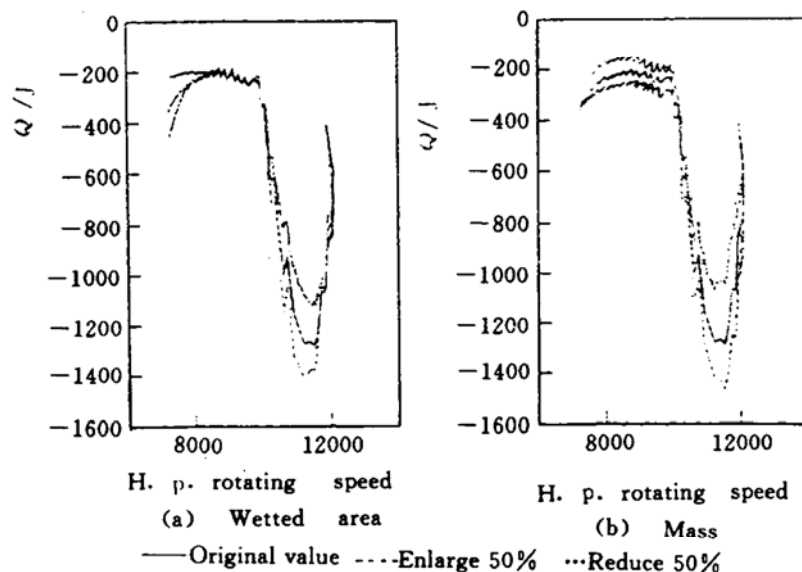


Fig. 5 The wetted area and mass of high pressure turbine blade effect on acceleration

参 考 文 献

- 1 Sellers J F, Daniele C J. DYNGEN-a program for calculating steady state and transient performance of turbojet and turbofan engine. NASA, TND-7901, 1975
- 2 Khalid S J, Hearne R E. Enhancing dynamic model fidelity for improved prediction of turbofan engine transient performance. AIAA 80-1083, 1980
- 3 陈大光, 潘永泉. 热效应对涡轮喷气发动机过渡过程的影响. 航空动力学报, 1987, 12(1)
- 4 Thomson B. Basic transient effects of aero gas turbines. AGARD Conference Proceedings 1975. 2:151
- 5 俞佐平. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1979
- 6 MacCallum N R L. Further studies of the influence of thermal effects on the predicted acceleration of gas turbines. ASME 81-GT-21, 1981

(上接第 5 页)

- 2 McClinton C R. Autoignition of hydrogen injected transverse to supersonic airstream. AIAA 79-1239
- 3 刘陵, 刘敬华, 张榛, 等. 超音速燃烧与超音速燃烧冲压发动机. 西安: 西北工业大学出版社, 1993
- 4 Char J M, Mu J S, Jang S D. Study on supersonic combustion in hypersonic flight. IAF92-0661
- 5 朱守梅, 刘陵, 刘敬华. 超音速气流中横向喷射氢气流场数值模拟. 推进技术, 1993 (2)
- 6 胡欲立, 刘陵, 刘敬华, 等. 超音速燃烧二元流场的数值模拟. 推进技术, 1995, 16 (4)
- 7 刘敬华, 刘兴洲, 刘陵, 等. 超音速气流中氢燃料强化混合的燃烧实验研究. 推进技术, 1996, 17 (1)
- 8 Northam G B, Anderson G Y. Supersonic combustion ramjet research at langley. AIAA 86-0159