

传热对叶尖间隙的影响*

王宝官 李 玲

(南京航空航天大学动力工程系, 南京, 210016)

摘 要: 分析了影响叶尖间隙的诸因素, 提出了计算瞬变状态下叶尖间隙变化的方法, 并以某发动机为例, 计算出一级压气机在不同工况下的间隙量, 给出了间隙随时间变化的曲线图。

主题词: 压气机部件, 叶尖间隙, 热应力, 热膨胀分析

分类号: V232.4, V235.113

A STUDY IN EFFECT OF HEAT TRANSFER ON BLADE-TIP-CLEARANCE

Wang Baoguan Li Ling

(Dep. of Power Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

Abstract: Transient clearances at blade tips are discussed, which transient rotational speeds, thermal parameters, physical parameters, geometrical parameters, etc. Among of these, the main effects are thermal expansion and centrifugal extension. With a series of calculations, a variation map of the clearance along with time has been drawn.

Subject terms: Compressor part, Blade tip clearance, Thermal stress, Thermal expansion analysis

1 引 言

发动机叶尖间隙对压气机和涡轮的性能、发动机全台性能以及结构完整性都有很大的影响。影响叶尖间隙的各种因素有: 加工和装配精度, 工作时部件变形, 工作产生振动和工作时部件径向伸长的变化等。其中第四个因素是影响不同工况下叶尖间隙变化的主要因素。所以, 本文就热应力和离心应力对间隙变化来进行计算研究。

* 本文 1994 年 5 月 10 日收到

2 叶尖间隙的计算

本文提出的计算发动机叶尖间隙的方法, 包括转子伸长量和机匣膨胀量的计算。利用此方法计算了某压气机一级转子在不同的工况下发动机叶尖间隙变化量。

求解问题的已知条件^[1]除了盘、叶片和机匣表面热交换边界条件外, 还有材料的性能和几何形状, 以及飞行循环中状态条件的记时图, 尤其是转子旋转频率 $n(t)$ 和压气机压比 $\Pi_k(t)$ 或涡轮落压比 $\Pi_t(t)$ 的变化情况在各工况下的热力参数。采用的简化假定为:

(1) 变形沿零件的体积瞬时扩展, 而叶片无热惯性, 用一维模型确定其变形。

(2) 用二维轴对称模型确定盘的不稳定温度场, 在此基础上, 计算轮盘变形。

(3) 先用二维轴对称模型求解机匣内、外壁瞬时温度, 在计算时, 可假定机匣壁内温度场呈线性分布, 因为机匣厚度比起半径小得多。

2.1 转子伸长量的计算

转子的伸长大致可分为叶片伸长和轮盘伸长两部分。

2.1.1 叶片伸长量的计算

叶片几何参数为图 1 所示。叶片伸长包括离心应力引起和热应力引起的两部分。

首先, 由于离心力引起的伸长为:

$$\Delta L_c = \sum \Delta L_{ic} = \sum \Delta Z_i \frac{\sigma_{ic}}{E_{ic}}$$

$$\sigma_{ic} = \frac{\rho \omega^2}{A(i)} \int_{z_i}^{z_k} Z A(z) dz$$

式中

σ_{ic} ——表示 i 截面的离心拉伸应力;

ω ——转子的转速;

$A(Z)$ ——叶片的截面积;

E ——叶片材料的弹性模量;

ρ ——叶片材料的密度;

$\Delta Z_i = Z_i - Z_{i-1}$ 。

同时, 叶片工作时的热膨胀量 (假设叶片无热惯性, 并不考虑叶片向轮盘内的散热) 为:

$$\Delta L_t = L \alpha_t (T_{\text{叶}} - T_{\text{叶}0})$$

式中 L ——叶片长度;

α_t ——叶片在温度为 $T_{\text{叶}}$ 时的线膨胀系数;

$T_{\text{叶}0}$ ——叶片处于冷态时温度;

$T_{\text{叶}}$ ——叶片在某工况下的瞬时温度。

在某工况下瞬时叶片的伸长量:

$$\Delta L_{\text{叶}} = \Delta L_c + \Delta L_t$$

2.2.2 轮盘伸长量的计算

轮盘几何参数如图 2 所示。

据文献 [1] 轮盘伸长量的计算公式为:

$$\Delta L_{\text{外}} = R_{\text{外}} (\sigma_{t\text{外}} - \mu \sigma_{R\text{外}}) + \alpha_k (T_{\text{外}} - T_0) R_{\text{外}}$$

式中

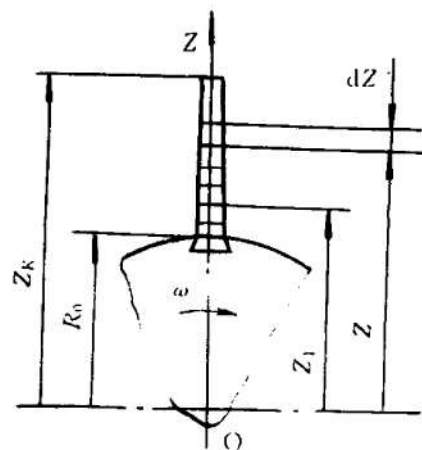


Fig. 1 Rotating centrifugal force of the blade

$\sigma_{t外}$ ——轮盘外缘周向应力； $T_{外}$ ——轮盘外缘温度；
 $\sigma_{R外}$ ——轮盘外缘径向应力； T_0 ——冷态时的温度；
 $\sigma_{外}$ ——轮盘外缘半径； μ ——泊松比；
 α_k ——膨胀系数。

轮盘应力计算的基本公式为：

$$d(h_r \sigma_r) - \sigma_r h dr + 2A h_r dr = 0$$

$$\frac{[(\sigma_r - \sigma_t)(1 + \mu)]}{r} = \frac{d\sigma_t}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r}{dr} + E \frac{dT}{dr}$$

式中 $A = \rho \omega^2$

根据一维不稳定温度场的计算方法，对于无内热源，导热系数为常数的一维非稳定问题的计算公式为：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

$$T \Big|_{r=R} = T_G$$

2.2 机匣伸长量的计算

机匣的伸长主要是由于温度变化引起的热膨胀，由于机匣厚度与机匣的直径相比小得多，而且机匣的导热系数较大，则可用集总热容法计算机匣不稳定温度场。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{Q}{\rho c V} = \frac{-h(T - T_G)F}{\rho c V} - \frac{\epsilon \sigma (T^4 - T_0^4)F}{\rho c V}$$

$$T \Big|_{\tau=0} = T_0$$

$$h = \frac{0.02 \lambda \left(\frac{m_g}{A \mu_g} \right)^{0.8}}{D^{0.2}}$$

h ——机匣内壁的对流换热系数； ϵ ——机匣的表面黑度；
 F ——机匣内壁的对流换热面积； D ——当量直径；
 A ——总的通道面积； σ ——气体辐射常数；
 m_g ——空气流量。

据文献〔1〕，机匣的内径伸长量为：

$$\Delta R_k = \frac{R_0(\sigma_t - \mu \sigma_r)}{E} + \alpha(T - T_0)R_0$$

式中 σ_t ——机匣内壁的周向应力； R_0 ——机匣的伸长量；
 σ_r ——机匣内壁的径向应力； T ——机匣内壁温。

至此，发动机转子和机匣在各工况下的伸长量都已求出，则该级的叶尖间隙量为：

$$\Delta = \Delta_{构} + \Delta R_k - \Delta L_{叶} - \Delta L_{轮}$$

式中 $\Delta_{构}$ ——该级设计时的构造间隙； ΔR_k ——机匣的内径；
 $\Delta L_{叶}$ ——叶片的伸长量； $\Delta L_{轮}$ ——轮盘的伸长量。

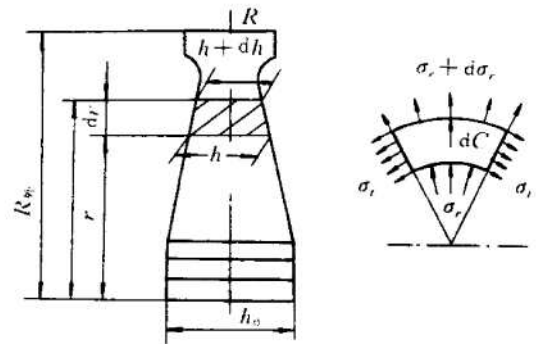


Fig. 2 Disk sketch

3 计算结果及分析

本算例中压气机的图纸构造间隙为 1.9mm。计算从 0s 开始开 95s 止, 整个发动机工作过程包括起动, 加速到最大状态, 然后由最大状态过渡到巡航状态。其间隙变化由图 3 可见。

(1) 起动过程间隙变化分析

假设这时间内温度和压气机转数呈线性递增, 到转数达到 40% 为止完成发动机的起动过程。从计算结果, 表明这段时间内压气机叶尖间隙变化并不显著, 稍低于图纸间隙, 如果叶尖间隙设计得不恰当, 这时间内就可能使叶片碰到机匣内壁, 间隙变化遵循由大到小, 再由小到大的变化规律。

(2) 加速过程间隙变化分析

这时间内气流温度达到最大值, 转子的转数也由 40% 上升到 100%。这时间较短, 但温度的变化幅度较大, 机匣内壁感受温度的变化而径向伸长增加, 转子内温度场变化缓慢, 纵然转子也有了热变形, 但与机匣内壁的热变形无法比拟, 这时转子的离心伸长为转子径向伸长的主要因素。综合起来, 间隙缓慢变大。

(3) 最大状态间隙变化分析

这时间内气流温度达到最大值而保持不变, 转子的转数也保持最大值 100% 不变。离心力引起转子的径向伸长已经保持不变, 唯一导致转子径向伸长的因素是热变形, 但转子的热变形比机匣内壁的热变形要小得多, 所以这时间内叶尖间隙随着时间的推移而逐渐变大, 变化的幅度逐渐减小, 这是由于转子热变形逐渐变大的缘故。

(4) 由最大状态向巡航状态过渡间隙变化分析

这段时间内温度由最大值下降到巡航温度, 转速也由最大值下降到巡航转速。假定这时间内温度和转数的变化呈线性递减。这时间最短, 相对来说温度变化较快, 但温差并不大, 轮盘感受温度的变化并不显著, 因此转子热变形径向收缩较慢, 离心力引起的径向收缩较明显, 同样机匣内壁径向伸长变小, 但时间较短, 而且温差不太大, 所以径向收缩也较缓慢, 致使叶尖间隙继续增加, 达到这一过程的最大值。

(5) 巡航状态的间隙变化

这段时间内气流温度保持巡航温度值不变化。转子的转速也保持不变, 转子内温度场变化慢, 所以转子径向变化量缓慢, 而机匣内壁感受温度较快, 内壁径向变化较快, 所以这时间隙逐渐变小, 变小的频率也越来越慢。

本计算结果与国外文献比较相接近, 是切实可行的。本方法同样可用于涡轮间隙瞬时变化, 只要边界条件、初始条件、性能参数等作相应的调整。

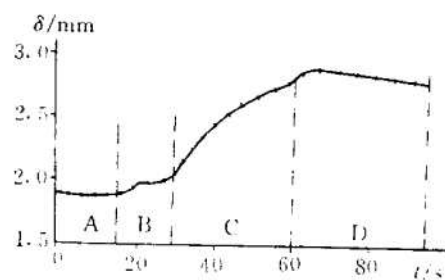


Fig. 3 Transient variation of the Clearance

- A——Starting process
- B——Accelerating process
- C——Maximum condition
- D——Cruise process

滴尺寸越小,其运动速度越接近于气流速度,可见小液滴更易受到气流阻力的影响;随 x 的增加,不同尺寸的液滴速度也减小,但尺寸越小,其速度值也越接近于气流速度;而大液滴由于较大的惯性在相当距离后仍未达到速度平衡。此外,随尺寸增加,运动参数变化趋于缓慢,说明粒子运动速度具有一定上限值。

在初始区中,液滴具有一定的运动角,且由于离心喷嘴的作用,大小粒子分别具有较大和较小的平均运动角。在一定轴向距离处,随尺寸 D 减小,运动角也减小,且趋近于零,说明小液滴更易于取气流运动方向;随 x 增加,不同直径液滴的角度也是减小的,说明液滴在不断地偏折,从而向喷雾中心线靠近。运动角先急后缓的变化特点,说明小液滴“随流而动”,更易受到气流运动的影响而发生偏折。

4 结 论

(1) 喷雾液滴尺寸及其分布随不同工况的变化反映了雾化过程的物理变化规律,其分布基本上符合R-R分布;值得注意的是,对同一喷嘴,尽管喷雾压力的增加使液滴平均直径减小,但同时却使其尺寸分布相对地变得不均匀。

(2) 液滴在初始区的运动速度及运动角度的分布具有一定的随机性,不同尺寸的液滴具有不同的分布范围。因此,液雾计算中应正确地处理运动初始条件。

(3) 液滴运动速度和运动角度均随距离的增加而减小,但粒子尺寸越小,其运动速度在一定距离后越接近于气流速度,而运动角度随尺寸呈现出小液滴上升快、大液滴上升趋于缓慢的特点,说明了在一定初始状态下,液滴尺寸对燃油的分布有很大的影响。

参 考 文 献

- [1] Trolinger J D. Laser Diagnostic Method. AIAA-83-1983
- [2] 西北工业大学七系. HTRC-5000 激光全息系统. 西北工业大学, 1990
- [3] 何万祥. 应用激光全息术对柴油机油雾场分布规律的测量研究. 内燃机学报, 1985 (1)

(上接第 39 页)

参 考 文 献

- [1] 孟憬非. 航空发动机压气机的径向间隙. 第四届航空发动机强度与振动会议论文集, 1989
- [2] 王宝官, 尘军. 主动间隙控制的机理研究. 南航科技报告, NHJB-91-6811
- [3] 杨世铭主编. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1985
- [4] 徐方有译. 航空燃气轮机压气机径向间隙记时图的计算方法. 苏联《航空技术》, 1987 (1)
- [5] 赵士杭. 燃气轮机结构. 北京: 清华大学出版社, 1987
- [6] Hennecke D K, Trappmann K. Turbine Tip Clearance Control in Gas Turbine Engine. AD A 129168