

文章编号: 1000-8055(2005) 06-01032-05

航空发动机叶轮机部件低状态特性的指数预测方法

王 广, 李 军, 牟 牧

(空军工程大学 飞机推进系统实验室, 陕西 西安 710038)

摘要: 介绍了一种预测航空发动机叶轮机部件低状态特性的指数预测模型。该模型考虑到空气可压缩性的影响, 运用相似理论, 结合发动机的部件特性关系, 得到了两个指数值, 进而得到了发动机的低状态部件特性。数值模拟表明, 该方法的精度较高, 对研究发动机的起动特性特别是在高原使用时存在的起动问题具有重要的指导意义。

关键词: 航空、航天推进系统; 起动特性; 相似理论; 指数预测

中图分类号: V 233. 6

文献标识码: A

Exponent Extrapolation Method of Aero-Engine Turbomachinery Low State Characteristics

WANG Guang, LI Jun, MU Mu

(Aircraft Propulsion System Laboratory,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The exponential model that could extrapolate the Aero-engine turbomachinery low state characteristics was introduced. This model takes into account the influence of air compressibility. Applying the theory of similarity and considering the characteristics of aero-engine component performance, two exponent values can be obtained, and then the components low state characteristics can be deduced. The results show that the accuracy of this method is higher than that of numerical simulation. It is useful for the research of engine starting, especially for solving the start-up problem in plateau.

Key words: aerospace propulsion system; start-up characteristics; theory of similarity; exponent extrapolation

燃气涡轮发动机的起动过程通常只持续一两分钟, 然而在起动过程中, 发动机的机械部件和工作介质之间发生了复杂的气动热力作用。起动过程中一些重要参数如涡轮温度、压气机失速边界和所需的转矩, 有可能影响整台发动机的性能。对燃气涡轮发动机来说, 点火时的转速通常在设计

转速的40%~50%。在发动机的数值仿真过程中, 完整的部件特性图非常重要, 但是, 由于起动时低转速流场的不稳定, 很难建立起动过程的特性图。因此, 很多特性图缺少发动机点火以前的部分, 预测和建立低转速时的部件特性图显得尤为重要。

国内外众多研究人员在这方面做了很多有益

收稿日期: 2004- 11- 18; 修订日期: 2005- 03- 29

作者简介: 王广(1981-), 男, 湖南长沙人, 西安市空军工程大学工程学院一系飞机推进系统实验室硕士生, 主要从事航空发动机性能与稳定性研究。

的工作。Agrawal 和 Yunis 建立了一个数学模型来模拟发动机的起动过程, 他们通过利用基本的气动热力方程和其他经验方程建立了稳态部件特性^[1]。Kurzke 证实了 Agrawal 和 Yunis 建立的气动模型中预测方法的有效性^[2]。Walsh 和 Fletcher 用这种方法在传统的压气机特性图上得到了同样的结果^[3]。各发动机生产厂在预测部件低状态特性时也广泛使用类似的方法, 但是, 它在估计部件的效率时过分依赖经验, 如果缺少了这种经验, 研究人员应用这种方法时得到的结果就不可靠。文献[4]在总结前人成果的基础上加以发展, 利用不可压条件下的相似理论, 通过改变相似准则的指数考虑到空气可压性的影响, 提出了一种新的用于发动机部件低状态特性预测的指数模型。本文以国内某型涡喷发动机的高低压涡轮和某型涡扇发动机的风扇和高压压气机为研究对象, 利用指数预测模型分别建立了它们的低状态特性, 得到了低转速时的特性图, 对研究发动机的起动特性特别是在高原使用时存在的起动问题具有重要的指导意义。

1 指数预测模型

1.1 相似定律

指数预测模型参照 Munson 描述的基本相似定律, 但该相似关系没有考虑空气的可压缩性, 它把相似关系中的指数当成一个不变的常数。具体的相似关系由式(1)~(3)描述。

流量关系:

$$\frac{m_1}{m_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^1 \quad (1)$$

功的关系:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2)$$

功率关系:

$$\frac{P_{wr1}}{P_{wr2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (3)$$

这里相似工作点的特性作为转速之比的函数, 借鉴以上的相似关系, 也用了一个指数函数的相似关系来描述部件的换算扭矩 Tq/δ 和换算流量 $nV \sqrt{\theta}/\delta$, 把发动机的部件特性预测到低转速区域。不同的是这里的指数值 n 是一个不确定的数, 而不再是一个固定的常数。因为, 风扇、高压压气机和高低压涡轮中的主要工作介质空气是一种高可压缩性的流体, 这些部件在高压比和大速度的条件下工作, 空气的压缩性是不能忽略的。因此,

考虑到空气的可压缩性, 这个指数值 n 根据所描述的部件特性不同是变化的。

1.2 涡轮低状态特性预测模型

指数预测过程由两部分组成, 首先是考虑可压缩性的影响, 在两条已知特性的转速线上找到相似工作点, 得到相似工作关系中的指数值; 然后利用这种相似关系把已知特性预测到低转速区域。这里描述部件特性的自变量和函数定义如下: 涡轮落压比 Pr 为自变量, 换算流量 $nV \sqrt{\theta}/\delta$ 、换算扭矩 Tq/δ 和效率 η 为函数。选择一条合理又有效的参考转速线来预测低转速的特性是非常重要的, 由于转速较低的部件特性与要预测的低转速的特性最具有相似性。故选择转速较低的作为参考转速线, 如图1所示, 选择已知部件特性图上第2小的相对换算转速线 n_2 作为参考转速线, 用它来预测已知最小转速 n_1 的特性, 因为这两个转速线的特性最具有相似性。 n_1' 为预测出来的 n_1 转速的特性线, 经过比较, 继而得到指数值 n 。

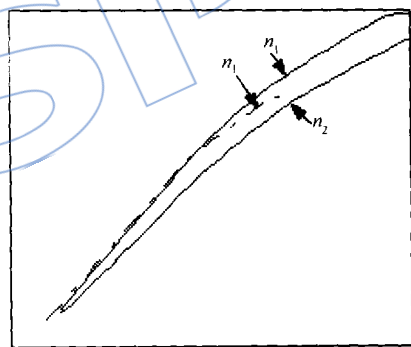


图1 指数预测的示意图

Fig. 1 Sketch map of exponent extrapolation

指数值的具体计算过程如下。参数说明: W_{ideal} 为理想功; W_{actual} 为实际功, P_{wr} 为功率; $\theta = \frac{T_a}{T_{amb}}$; $\delta = \frac{P_{oi}}{P_{amb}}$; T_{amb} 和 P_{amb} 为标准大气的温度和压强; T_{oi} 和 P_{oi} 为涡轮进口的总温和总压。 T_s 和 P_s 为静温和静压。下标 NEW 表示要预测的新转速下的值, REF 表示参考转速下的值, idea 表示理想值, actual 表示实际值。

从参考转速线的特性图上, 我们可以得到涡轮的流量、落压比和扭矩, 进而算出涡轮在该转速下的理想功和效率, 由理想功可以算出实际功, 其中效率由式(4)计算:

$$\eta_r = \frac{\pi \cdot \frac{T_q}{\delta} \cdot \frac{N}{\theta}}{30 \cdot \frac{nV}{\delta} \cdot \frac{\bar{\theta}}{\delta} \cdot C_p \cdot T_{amb} \cdot \left[1 - \frac{1}{Pr^{(\gamma-1)/\gamma}} \right]} \quad (4)$$

欧拉方程 $W = U \cdot \Delta\omega$ 表明涡轮功仅仅是叶片速度和空气速度的函数, 因此可以适用相似关系来描述发动机部件中的空气可压缩性。根据相似关系式(2)可以计算出新转速下的实际功, 由实际功可以得到该转速下的理想功。如式(5)、(6)所示。这里用参考转速的效率来计算新转速下的功。

$$W_{\text{actualNEW}} = W_{\text{actualREF}} \cdot \left(\frac{\%N_{\text{NEW}}}{\%N_{\text{REF}}} \right)^2 \quad (5)$$

$$W_{\text{idealNEW}} = \frac{W_{\text{actualREF}}}{\eta_{r, \text{REF}}} \quad (6)$$

于是我们便得到了新转速下涡轮的落压比 Pr_{NEW} :

$$Pr_{\text{NEW}} = \left[1 - \frac{W_{\text{idealNEW}}}{C_p \cdot T_{\alpha}} \right]^{\gamma/(1-\gamma)} \quad (7)$$

在新转速下涡轮的落压比确定之后, 换算扭矩 T_q/δ 和换算流量 $nV \cdot \bar{\theta}/\delta$ 就可以计算出来了, 但是, 直接利用相似关系式(1)和(3)计算后发现得到的参数值都过高, 这是因为这两个相似关系都没有考虑到空气的可压缩性。指数模型把这个指数值当成一个未知量, 它正是要求解这个指数值。

然后求出参考转速线上的静压 $P_{s, \text{REF}}$ 和静温 $T_{s, \text{REF}}$ (式(8)、(9)), 利用气体的状态方程得到相应的密度 $\rho_{s, \text{REF}}$, 继而由质量流量 nV_{REF} 求出体积流量 Q_{REF} 。

$$T_{s, \text{REF}} = T_{oi} - \frac{(2 \cdot U_{\text{REF}})^2}{2} \cdot C_p \quad (8)$$

其中:

$$U_{\text{REF}} = \frac{\pi \cdot N_{\text{REF}} \cdot d}{60}$$

d 是叶片直径。

$$P_{s, \text{REF}} = P_{\alpha} \cdot \left[\frac{T_{s, \text{REF}}}{T_{\alpha}} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (9)$$

利用体积流量的相似关系得到新转速下的体积流量 Q_{NEW} 和速度 U_{NEW} (式(10)、(11)), 然后由速度反推回去可以得到新转速下的静温 $T_{s, \text{NEW}}$ 和 (式(12))、静压 P_{NEW} 、密度 $\rho_{s, \text{NEW}}$, 继而得到质量流量 nV_{NEW} , 由此便可以计算出新转速下的涡轮功率 $P_{w, \text{NEW}}$ 和扭矩 $T_{q, \text{NEW}}$ (式(13)、(14))。

$$Q_{\text{NEW}} = Q_{\text{REF}} \cdot \left[\frac{\%N_{\text{NEW}}}{\%N_{\text{REF}}} \right] \quad (10)$$

$$U_{\text{NEW}} = U_{\text{REF}} \cdot \left[\frac{\%N_{\text{NEW}}}{\%N_{\text{REF}}} \right] \quad (11)$$

$$T_{s, \text{NEW}} = T_{oi} - \frac{(2 \cdot U_{\text{NEW}})^2}{2 \cdot C_p} \quad (12)$$

$$P_{w, \text{NEW}} = nV_{\text{NEW}} \cdot C_p \cdot \eta_{r, \text{REF}} \cdot T_{oi} \cdot \left[1 - \frac{1}{Pr_{\text{NEW}}} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (13)$$

$$T_{q, \text{NEW}} = \frac{30 \cdot P_{w, \text{NEW}}}{\pi \cdot N_{\text{NEW}}} \quad (14)$$

由下面两个公式就求出了指数 n_1, n_2 :

$$\frac{\frac{nV_{\text{NEW}} \cdot \bar{\theta}}{\delta}}{\frac{nV_{\text{REF}} \cdot \bar{\theta}}{\delta}} = \left(\frac{\%N_{\text{NEW}}}{\%N_{\text{REF}}} \right)^{n_1} \quad (15)$$

$$\frac{\frac{T_{q, \text{NEW}} \cdot \bar{\theta}}{\delta}}{\frac{T_{q, \text{REF}} \cdot \bar{\theta}}{\delta}} = \left(\frac{\%N_{\text{NEW}}}{\%N_{\text{REF}}} \right)^{n_2} \quad (16)$$

至此, 我们便得到了指数 n_1 和 n_2 的值, 也就是得到了该部件特性图的指数相似关系。将要预测的低状态的相对转速百分值依次代入该关系式(15)和(16), 就得到了低状态的特性线。

1.3 压气机低状态特性预测模型

风扇和高压压气机低转速特性的预测方法的原理与涡轮基本相同, 不同的是它们的气动热力计算过程和参考转速线的选择。经过计算表明, 风扇和压气机直接选取已知特性图上的最低转速的特性线作为参考转速线得到的结果较好。计算过程简要说明如下:

参考转速的理想功和实际功由式(17)、(18)计算。

$$W_{C, \text{idealREF}} = C_p \cdot T_{\alpha} \cdot (Pr_{\text{REF}}^{(\gamma-1)/\gamma} - 1) \quad (17)$$

$$W_{C, \text{actualREF}} = \frac{W_{C, \text{idealREF}}}{\eta_{C, \text{REF}}} \quad (18)$$

新转速下的实际功 $W_{C, \text{actualNEW}}$ 依据相似关系式(2)由式(5)计算。由式(19)可以求出新转速下的增压比 Pr_{NEW} 。

$$Pr_{\text{NEW}} = \left[1 + \frac{W_{C, \text{actualNEW}} \cdot \frac{\eta_{C, \text{REF}}}{C_p \cdot T_{\alpha}}}{W_{C, \text{actualREF}}} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (19)$$

然后可以计算出换算流量、换算扭矩, 进而得到低状态的特性。余下的过程与涡轮相同, 这里不再赘述。

2 算例及结果分析

2.1 算例1

我们以现役某型涡喷发动机的高低压涡轮为例进行涡轮起动特性的预测。经过计算, 高压涡轮

的指数值 $n_1=0.3705$, $n_2=1.3706$, 低压涡轮的指数值 $n_1=0.3108$, $n_2=1.3108$ 。图2、图3分别为高、低压涡轮的计算结果。

我们把相对换算转速为0.6的已知特性线作为该预测方法的验证, 由图中可知, 预测出来的特

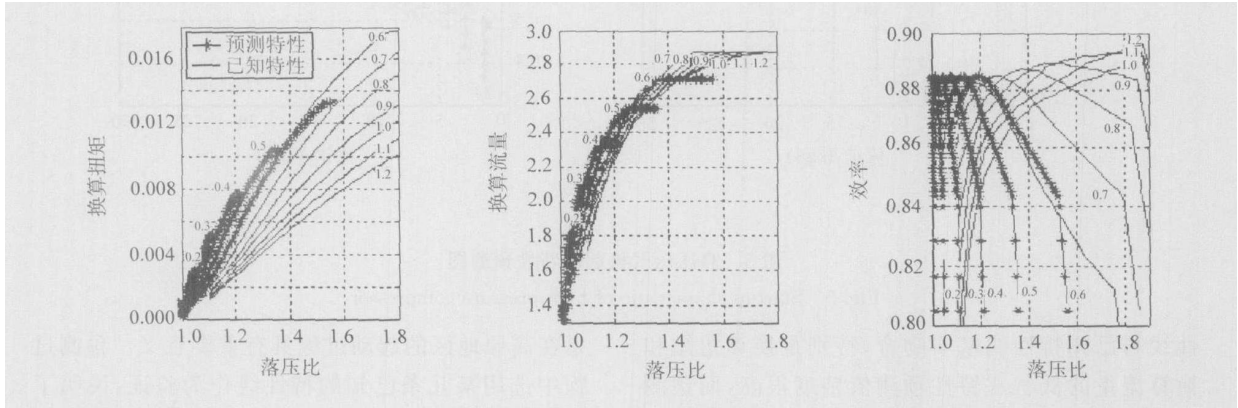


图2 高压涡轮起动特性预测图
Fig. 2 Startup characteristic of high pressure turbine

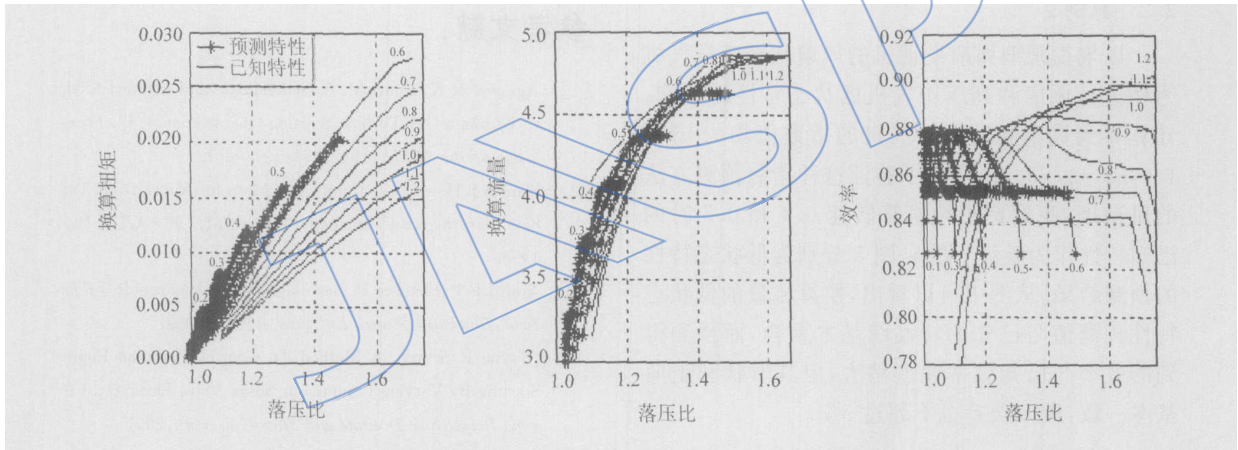


图3 低压涡轮起动特性预测图
Fig. 3 Startup characteristic of low pressure turbine

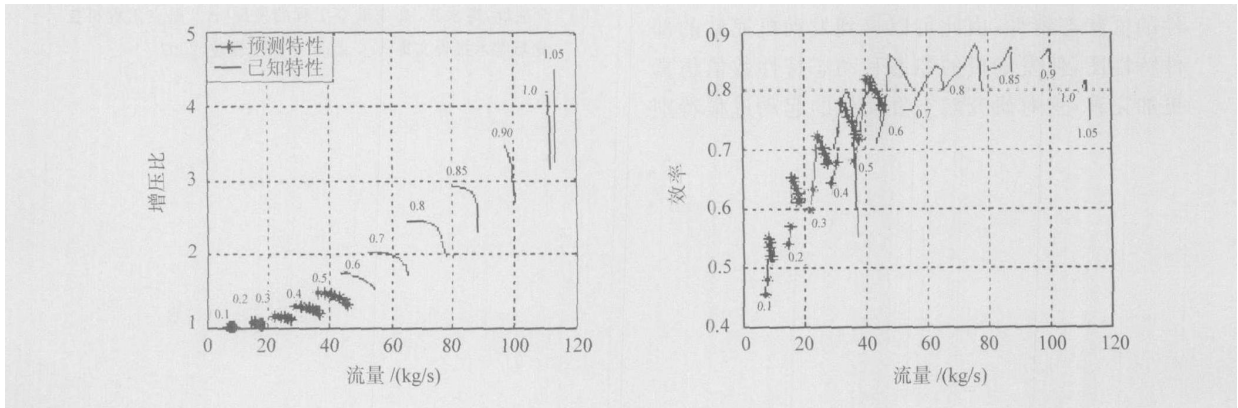


图4 风扇起动特性预测图
Fig. 4 Strtp characteristic of fan

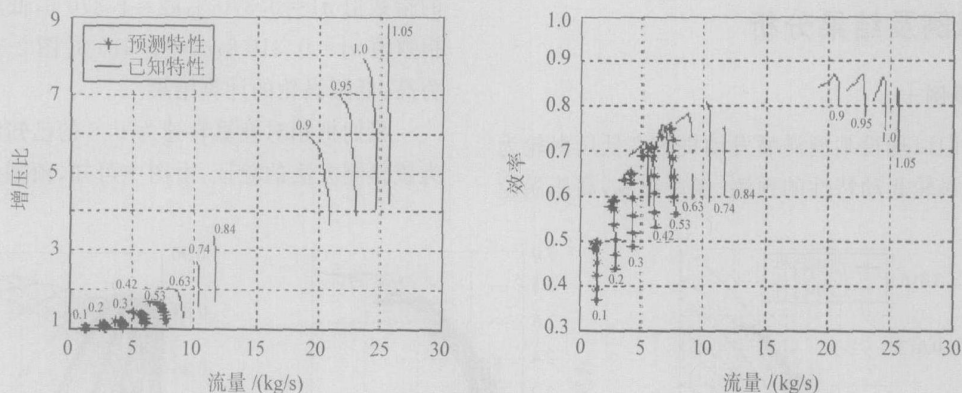


图5 高压压气机起动特性预测图

Fig. 5 Startup characteristic of high pressure compressor

性线与已知特性线基本吻合,特别是换算扭矩和换算流量的低状态特性预测值精度很高,而预测出来的效率在低落压比时精度很高,但在落压比大的时候误差较大。

2.2 算例2

以现役某型涡扇发动机的风扇和高压压气机为例进行风扇和高压压气机低状态特性的预测,计算得到风扇和高压压气机的指数值均为 $n_1 = 1.0$, $n_2 = 1.75$ 。同样为了验证这种指数预测方法的可信度,我们把相对换算转速0.4和0.5时的已知特性作为验证。图4、图5分别为低状态特性的预测结果。从图中可以看出,换算流量的低状态特性预测值与已知的特性线基本重合,而预测得到的效率与已知效率误差稍大,但其形状和走向基本一致,最大误差也不超过5%。

3 结 论

由发展的指数预测模型计算得到了发动机部件的低状态特性,由此可以得到发动机完整的部件特性图,使发动机的稳态和动态特性数值仿真更加完善,这对研究航空发动机的起动过程特别

是在高原地区的起动过程具有重要意义。预测过程中选用某几条已知的特性线作为验证,说明了该方法的有效性,不足之处在于预测结果需要实验的进一步验证,这也是我们下一步要做的工作。

参考文献:

- [1] Agrawal R K, Yunis M. A Generalized Mathematical Model to Estimate Gas Turbine Starting Characteristics[J]. *Transaction of the ASME*, 1982, 104: 194~201.
- [2] Kurzke J. How to Get Component Maps for Aircraft Gas Turbine Performance Calculations[R]. *ASME 96-GT-164*, 1996.
- [3] Walsh P P, Fletcher P. Gas Turbine Performance[R]. *Fairfield: Blackwell Science Ltd. And ASME*, 1998.
- [4] Wayne R Sexton. A Method To Control Turbofan Engine Starting By Varying Compressor Surge Valve Bleed[D]. *Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2001.
- [5] Munson B R, Young D F, Okiishi T H. Fundamentals of Fluid Mechanics³ ed. Update[M]. (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998).
- [6] 李应红,姬永兴. 高原航空工程的发展[A]. 航空工程科技论坛学术报告文集[C]. 北京: 中国工程院, 2002.