

文章编号: 1000-8055(2003) 01-0020-04

# 雷诺数对压气机特性 及发动机稳定性影响的计算和分析

王 进, 骆广琦, 陶增元  
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 运用 Wassell 法建立了某型涡扇发动机压气机特性的雷诺数修正数学模型, 同时考虑雷诺数对涡轮特性的修正, 计算分析了雷诺数对压气机特性、高低压转子共同工作点以及压气机喘振裕度的影响。结果表明, 采用这种雷诺数修正模型可以用于定量评估雷诺数对发动机稳定性的影响。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 雷诺数; 压气机; 稳定性

中图分类号: V 231. 3

文献标识码: A

## Effects of Reynolds Number on Compressor Performance and Engine Stability

WANG Jin, LUO Guang-qi, TAO Zeng-yuan  
(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** A mathematic model of Reynolds number correcting the performance of turbofan-engine compressor was established with Wassell method. Based on the model in which the correction of Reynolds number to the turbo performance was taken into consideration, the effects of Reynolds number on the performance of compressors, on the co-work point of engine, and on the surge margin were computed and analyzed. This correction model was proved to be valuable to evaluate the effects of Reynolds number quantificationally when assessing the engine stability.

**Key words:** aerospace propulsion; Reynolds number; compressor; stability

### 1 引言

国内外研究表明, 雷诺数对发动机的性能和稳定性是有影响的<sup>[1, 2]</sup>。在发动机稳定性评定过程中需定量评估雷诺数对发动机稳定性的影响<sup>[3]</sup>。喘振裕度损失是评定发动机稳定性的重要指标, 因此, 定量评估雷诺数对发动机稳定性的影响其实质就是基于雷诺数对部件特性的影响确定高低压转子共同工作点和喘振边界的影响, 从而确定喘振裕度损失。本文运用文献[4, 5]提出的 Was-

sell 法对压气机特性进行了修正, 运用文献[2]的数学模型和方法对涡轮特性进行了修正, 采用部件法编制了某型涡扇发动机变比热稳态性能计算程序, 计算了雷诺数对风扇、高压压气机特性和高低压转子共同工作的影响, 从而得出了雷诺数条件下风扇和高压压气机的喘振裕度损失。计算结果表明, 这种数值模拟方法可以用于评定雷诺数对发动机性能及稳定性的影响, 其计算结果可为该型涡扇发动机的稳定性评定提供数值参考基础。

收稿日期: 2001- 12- 28; 修订日期: 2002- 05- 31

作者简介: 王进(1974- ), 男, 湖南株洲人, 空军第八研究所发机研究室工程师, 空军工程大学工程学院飞机与发动机工程系博士生, 主要从事军用发动机论证、发动机性能及稳定性评定研究。

## 2 数学模型

本文采用文献[4, 5]提出的 Wassell 法对风扇和高压压气机效率 $\eta$ 、流量 $G_k$ 、增压比 $\pi$ 、喘点压比 $\pi_s$ 进行修正,采用文献[2]建立的九种型别的全尺寸涡轮发动机统一关系曲线:

$$\frac{\eta_r}{\eta_r^*} = f(Re) \quad , \quad \frac{G_r}{G_r^*} = f(Re)$$

式中: $\eta_r^*$  和  $G_r^*$  分别为雷诺数在自模区时涡轮的效率 and 流量。对高低压涡轮效率 $\eta_r$ 和流量 $G_r$ 进行修正。在此仅对雷诺数对压气机特性修正的 Wassell 法作一简要介绍。

雷诺数对压气机特性修正的 Wassell 法:

### 2.1 对效率的修正

定义影响压气机效率的雷诺数:

$$Re_1 = \frac{V_1 b \rho}{\mu}$$

式中: $V_1$  为压气机进口气流相对速度;  
 $b$  为第 1 级压气机转子叶片中径处弦长;  
 $\rho$  为压气机进口气流密度;  
 $\mu$  为进口气流动力粘性系数。

按压气机多变效率 $\eta_p$ 与雷诺数 $Re_1$ 的修正关系曲线:  $1 - \eta_p = k Re_1^{-pq}$  对效率进行修正。

式中:

指数 $p$  由关系曲线 $p = f(V/\overline{T})$ 确定;

指数 $q$  由关系曲线 $q = f(L/H)$ 确定;

$L$  = 压气机轴向长度  $\times$  压气机级数 /  
(压气机级数 - 0.5)

$H$  =  $1/2 \times$  (第 1 级转子进口环高 +  
末级转子进口环高)

系数 $k$  由某试验点测得的等熵效率 $\eta$ 及 $Re_1$ 确定,根据等熵效率与多变效率关系式求出多变效率 $\eta_p$ ,则系数 $k = (1 - \eta_p) / Re_1^{-pq}$ 。

### 2.2 对流量的修正

定义影响压气机效率的雷诺数:

$$Re_2 = \frac{V_{1x} \rho}{\mu}$$

式中: $x$  为第 1 级转子叶片中径处前缘到叶片喉部的距离。

按压气机流量 $G_k$ 与雷诺数 $Re_2$ 的修正关系曲线:

$$\frac{t}{x} \cdot \frac{G_k - G_k^*}{G_k^*} = f(Re_2)$$

对流量进行修正。

式中: $t$  为第 1 级转子叶片中径处喉道宽度;

$G_k^*$  为  $Re_2 = 10^5$  条件下压气机流量。

### 2.3 对喘点压比的修正

定义影响压气机喘点压比的雷诺数:

$$Re_3 = \frac{V_A h \rho}{\mu}$$

式中: $V_A$  为压气机进口气流的平均轴向速度;

$h$  为压气机第 1 级转子进口环形高度。

按压气机喘点压比 $\pi_s$ 与雷诺数 $Re_3$ 的修正

关系曲线:  $\frac{\pi_s - \pi_s^*}{\pi_s^*} = f(Re_3)$  修正。

式中: $\pi_s^*$  为  $Re_3 = 10^5$  条件下喘振点压比。

### 2.4 对增压比的修正

采用相似等功原理对压气机增压比进行修正。如图 1,在非自模区内,当雷诺数从 $Re_a$ 下降到 $Re_b$ 时,有一流量下降 $\Delta G_k$ ,共同工作点 $a$ 向左移动 $\Delta G_k$ 到点 $b$ ,在新的换算流量和管道阻力不变的条件下,认为相似点 $a$ 和 $b$ 的压气机功是相等的。即:

$$L_c = \left[ \frac{\pi_c^{(r-1)/r} - 1}{\eta_c} \right]_a = \left[ \frac{\pi_c^{(r-1)/r} - 1}{\eta_c} \right]_b$$

已知点 $a$ 的 $\eta_c$ 和 $\pi_c$ ,由压气机的效率修正得到 $b$ 点的 $\eta_c$ ,从而可以计算出 $b$ 点的 $\pi_c$ 。

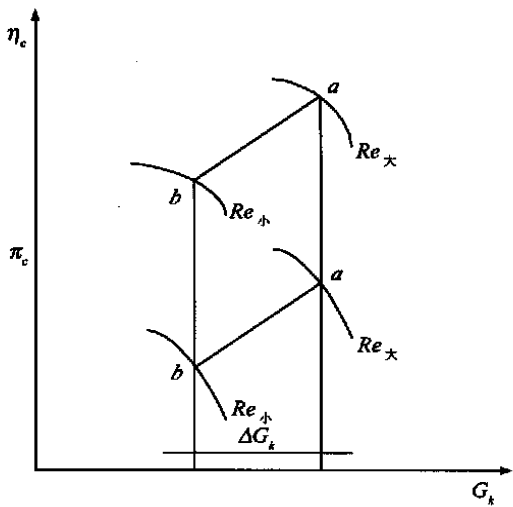


图 1 雷诺数对压气机增压比的修正概图

Fig. 1 Diagrammatic sketch showing correction of Reynolds number to compressor pressure ratio

## 3 算例分析

运用所建立的压气机、涡轮部件特性雷诺数修正模型,采用部件法编制了某型涡扇发动机变比热稳态性能计算程序,并在全包线范围内进行

了计算。在高空小速度区雷诺数对发动机性能及稳定性的影响最为明显,因此,本文以飞行高度  $H = 19\text{ km}$ ,  $Ma = 0.6$ (飞行包线左上边界点,雷诺数最小,是发动机稳定性评定的关键点之一)这种极限情况为算例,给出了雷诺数对风扇、高压压气机特性的影响图。进而对该点计算了发动机最大状态( $\bar{n}_{kor} = 1.07$ )时各部件共同工作点,得出了风扇、压气机的喘振裕度及雷诺数影响的喘振裕度损失。压气机喘振裕度按等换算转速定义,压气机喘振裕度:

$$\Delta K_Y = \left[ \frac{\pi_{\text{喘点}}^* / G_{kor\text{喘点}}}{\pi_{\text{工作点}}^* / G_{kor\text{工作点}}} - 1 \right] \times 100\%$$

其中:  $\pi_{\text{喘点}}^*$  为喘点增压比,  $\pi_{\text{工作点}}^*$  为工作点增压比,  $G_{kor\text{喘点}}$  为喘点换算流量,  $G_{kor\text{工作点}}$  为工作点换算流量。

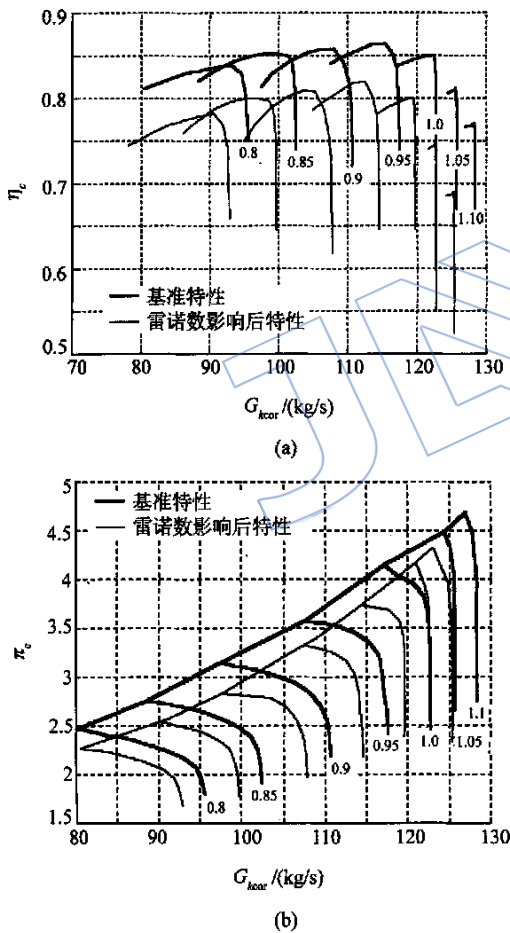


图2 雷诺数对风扇特性的影响  
Fig. 2 Effects of Reynolds number on fan performance

图2和图3分别显示了雷诺数对风扇和高压压气机特性的影响。可以看出,在同一高空飞行条件下,雷诺数的影响使风扇、压气机增压比、换算

流量、效率和喘点压比减小,因此特性线向左下方移动,喘振边界向下移动。雷诺数对风扇增压比、换算流量和效率的影响甚于对高压压气机的影响,对喘振边界的影响却是高压压气机甚于风扇。分析其原因是,如前所述,压气机效率、流量和喘点压比的影响分别取决于不同的雷诺数  $Re_1, Re_2$  和  $Re_3$ ,对于该型发动机影响风扇效率和流量的雷诺数小于影响高压压气机效率和流量的雷诺数,但影响风扇喘振边界的雷诺数大于影响高压压气机喘振边界的雷诺数。

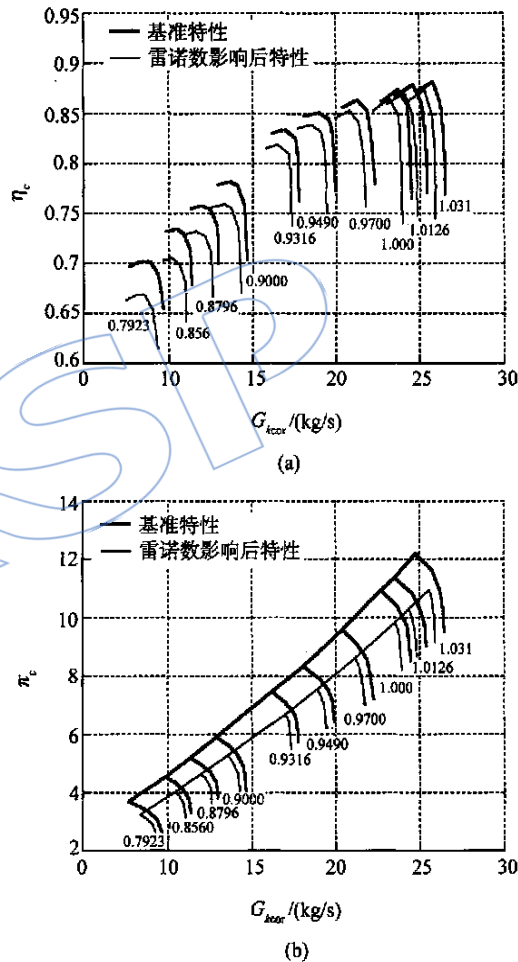


图3 雷诺数对高压压气机特性的影响  
Fig. 3 Effects of Reynolds number on high compressor performance

从表1和表2可以看出,由于一方面雷诺数对风扇、高压压气机喘振边界的影响,另一方面雷诺数对发动机共同工作点的影响,在高空小速度条件下,雷诺数对发动机喘振裕度的影响非常之大,因此雷诺数对发动机稳定性的危害不容忽视。高度  $19\text{ km}$ 、马赫数  $0.6$  条件下,发动机处于最大状态时,风扇的喘振裕度为  $21.363\%$ ,喘振裕度

表 1 雷诺数对风扇喘振裕度的影响

Table 1 Effects of Reynolds number on surge margin of fan

|          | 工作点<br>增压比 | 工作点换算<br>流量/ (kg/ s) | 喘点<br>增压比 | 喘点换算<br>流量/ (kg/ s) | 风扇喘振<br>裕度/ % |
|----------|------------|----------------------|-----------|---------------------|---------------|
| 雷诺数不修正   | 3. 543     | 126. 807             | 4. 560    | 125. 440            | 30. 096       |
| 雷诺数修正    | 3. 530     | 123. 700             | 4. 219    | 121. 801            | 21. 363       |
| 雷诺数影响绝对量 | - 0. 013   | - 3. 107             | - 0. 341  | - 3. 639            | - 8. 733      |
| 雷诺数影响相对量 | - 0. 367   | - 2. 450             | - 7. 478  | - 2. 901            | - 29. 017     |

表 2 雷诺数对高压压气机喘振裕度的影响

Table 2 Effects of Reynolds number on surge margin of high-pressure compressor

|          | 工作点<br>增压比 | 工作点换算<br>流量/ (kg/ s) | 喘点<br>增压比 | 喘点换算<br>流量/ (kg/ s) | 高压压气机<br>喘振裕度/ % |
|----------|------------|----------------------|-----------|---------------------|------------------|
| 雷诺数不修正   | 10. 286    | 25. 219              | 11. 493   | 23. 655             | 19. 124          |
| 雷诺数修正    | 10. 377    | 25. 194              | 10. 674   | 25. 027             | 6. 627           |
| 雷诺数影响绝对量 | + 0. 091   | - 0. 025             | - 0. 819  | + 1. 372            | - 12. 497        |
| 雷诺数影响相对量 | + 0. 885   | - 0. 381             | - 7. 126  | + 5. 800            | - 65. 347        |

损失为 8.733%，高压压气机的喘振裕度为 6.627%，喘振裕度损失为 12.497%。因此，本文认为，该型发动机在高空时由于雷诺数的影响，风扇和高压压气机喘振裕度损失严重，并且高压压气机与风扇相比更容易先喘振失速，从而导致发动机停车。

4 结 论

- (1) 高空小表速飞行条件下,雷诺数对压气机特性及稳定性的影响不容忽视。
- (2) 雷诺数的影响使风扇、压气机增压比、换算流量、效率和喘点压比减小,因此特性线向左下方移动,喘振边界向下移动。雷诺数对风扇增压比、换算流量和效率的影响甚于对高压压气机的影响,对喘振边界的影响却是高压压气机甚于风扇。
- (3) 对于所计算的发动机,  $H = 19\text{ km}$ ,  $Ma = 0.6$  马赫数飞行条件下,发动机最大状态时,由于雷诺数的影响,风扇的喘振裕度为 21.363%,喘振裕度损失为 8.733%,高压压气机的喘振裕度

为 6.627%,喘振裕度损失为 12.497%,高压压气机与风扇相比更容易先喘振失速。

(4) 本文所建立的雷诺数部件特性修正模型不仅可以用于发动机的性能评定,其计算结果也可以作为发动机稳定性评定中定量评估雷诺数影响的数值参考。

参考文献:

[1] 斯辽赫钦科 C M. 空气喷气发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.

[2] 尤·阿·李特维诺夫. 航空涡轮喷气发动机的特性和使用性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

[3] 刘大响. 航空发动机设计手册(第 7 册 进排气装置)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

[4] Wassell A B. Reynolds Number effects in Axial Compressors[J]. ASME Journal of Engineering for Power, April, 1968.

[5] 李建榕. 雷诺数对压气机及双轴涡喷发动机性能的影响[J]. 航空发动机, 1993, 5: 1- 16.

[6] 骆广琦, 陶增元. 雷诺数对某型涡扇发动机性能影响的研究[R]. 北京: 航空工业总公司第六二八研究所, 1997.