

## 双转子涡喷发动机的转差调整

南京航空学院 邬子仲 尚 义

### 摘 要

本文分析了双转子涡喷发动机转差的概念和作用,指出转差的大小将影响高低压压气机的稳定工作裕度和高压转子的转速 $n_2$ 与涡轮前燃气温度 $T_3$ 的匹配问题。本文提出如何正确调整转差,其结果与实际台架试车数据基本符合。此外,还提供转差对推力、单位燃油消耗率、 $n_2$ 和 $T_3$ 的影响关系,可供实际应用参考。

### 一、转 差 的 作 用

对于双转子涡喷发动机,控制高压压气机稳定工作裕度的关键参数是转差。即通过调整发动机的转差可改变高压转子共同工作线在高压压气机特性图上的位置。而低压压气机的稳定工作裕度,除转差的影响之外,还取决于喷管出口面积。因此,由于转差直接影响发动机在使用中的可靠性,因而成为双转子发动机验收的主要指标之一。

双转子涡喷发动机转差是,在最大状态低压相对换算转速 $n_{1hs} = 100\%$ 的条件下涡轮前燃气换算温度 $T_{3hs}$ 与高压换算转速 $n_{2hs}$ 之间的关系,发动机的转差 $\Delta S = f(n_{2hs}, T_{3hs})$ 。当转差一定时,又可表示为 $n_{2hs} = f(T_{3hs})$ 一定的关系。

众所周知,如果把低压压气机出口的气流参数看成是速度冲压的结果,把低压涡轮导向器出口截面看成是喷管喉道,那么高压转子的共同工作就可被看作与单转子发动机一样。因此,高压压气机与高压涡轮的共同工作线的计算方法与单转子涡喷发动机的情况相同。在一定的假设条件下,例如压气机各级的载荷系数不变,涡轮级的载荷系数和效率不变,且在1, 2级导向器出口为临界状态,则可得

$$n_{2hs}^2 = C_1 T_{3hs} \left[ 1 - C_2 (A_2/A_1) - \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g} \cdot \frac{2n}{n+1} \right] \quad (1)$$

式中  $n_{2hs}$ ——高压转子换算转速;

$T_{3hs}$ ——涡轮前换算燃气总温;

$A_1, A_2$ ——高低压涡轮导向器出口面积;

$\gamma_g, n$ ——燃气的比热比和多变指数;

$C_1, C_2$ ——常数。

当 $A_1, A_2$ 确定后,则反映在一定转差下 $n_{2hs} = f(T_{3hs})$ 的关系。由此可知发动机的等转差曲线一旦确定之后,高压转子的共同工作线也即确定。如转差在规定的范围内,高压压气机的稳定工作裕度即得以保证。

(1)式可作为定性的分析,而实际情况不能严格遵循假设条件。故在实际应用中转差

曲线应由试验确定, 预估时应按热力循环计算。由于调整转差时换算转速的区间较小, 因此一般将等转差曲线近似地取为直线, 计算和试验表明, 所差无几。用  $\Delta S$  表示与下边界线  $n_{2hs} = f(T_{3hs})$  之间的差值。并称  $\Delta S$  为发动机的转差, 如图 1a 所示。

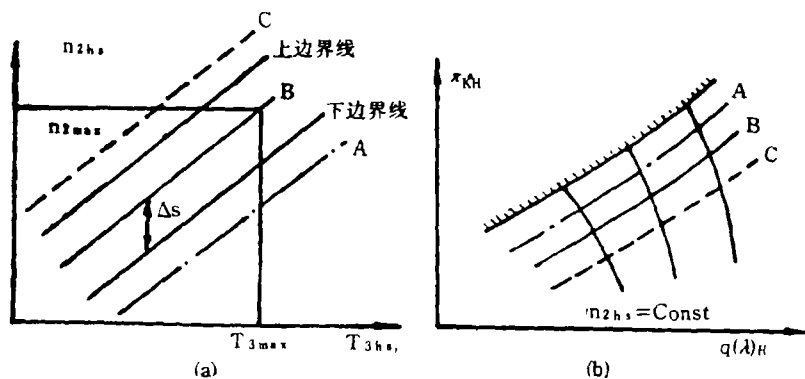


图 1 转差及其与高压转子共同工作线的对应关系

从 (1) 式和图 1a 得知, 要改变发动机的等转差线, 必须改变面积  $A_1$  或  $A_2$ , 而调整发动机喷管出口面积原则上对等转差线不应当有影响。

为保证高压压气机的稳定工作, 需要确定高压转子共同工作线在高压压气机特性图上的位置, 为此需要给出转差线的两个极限位置, 即上下平行的边界线, 如图 1a 所示, 如果发动机的等转差线在上下两边界之间, 即认为发动机的转差是合格的。实际上, 转差线的确定不仅保证了高压压气机的稳定工作, 同时也直接保证了发动机涡轮前温度  $T_3$  与高压转子转速  $n_2$  之间的良好匹配, 使发动机在可靠工作的前提下性能得以充分发挥。

如图 1b 所示, 三条高压转子共同工作线 A、B、C 对应三条不同的转差线, 并且  $\Delta S_A < \Delta S_B < \Delta S_C$ 。如高压转子沿共同工作线 A, 则工作线靠近喘振边界, 稳定工作裕度较小。此外, 在同一条等转速线上,  $T_{3A} > T_{3B}$ , 因此, 随着飞行 Ma 数增加, 例如  $T_3$  首先达到最大允许值, 而  $n_2$  没有达到限制值, 这时  $n_2$  转速限制器不工作, 容易引起  $T_3$  过高而烧坏涡轮部件。如高压转子沿共同工作线 C, 则工作线远离喘振边界, 稳定工作裕度较大。在同一条等转速线上,  $T_{3C} < T_{3B}$ , 随着飞行 Ma 数增加,  $n_2$  首先达到限制值, 从而使高压转子转速保持不变,  $T_3$  下降。这时  $T_3$  本来还未达到允许值,  $n_2$  限制后,  $T_3$  更低。因此发动机推力下降, 即不能充分发挥其潜在性能。所以, 最佳的选择是使高压转子沿共同工作线 B 工作。这时既可保持高压压气机的稳定工作裕度, 又可使  $T_3$  与  $n_2$  之间有良好的匹配关系。

## 二、转差的调整

根据发动机热力计算的模型, 在标准大气条件下, 计算了 1、2 级涡轮导向器出口面积对发动机转差的影响, 如图 2。在计算中取  $A_1 = 671.5 \text{ cm}^2$ ,  $A_2 = 1236.5 \text{ cm}^2$  时的  $\Delta S = 0$ 。 $\Delta S$  以坐标图上格数为单位, 变化 1 格, 在  $T_3$  不变的情况下, 相当于  $n_2$  转速变化  $5.71 \text{ r/min}$ 。

从图 2 中可见,  $A_2$  不变,  $A_1$  每增加  $1 \text{ cm}^2$ ,  $\Delta S$  约减小 2.21 格。为此, 我们录取了 120 台发动机 240 次试车数据, 分析统计的结果为 2.10 格, 两者基本相符。 $A_1$  不变,  $A_2$  每增加 1

$\text{cm}^2$ ,  $\Delta S$  约增加 1.21 格, 统计数据为 1.36 格。

进一步计算还表明, 对于不同的  $A_1$  和  $A_2$  值, 只要保持  $A_2/A_1$  为常数, 则  $\Delta S$  基本不变。并随  $A_2/A_1$  的减小,  $\Delta S$  下降。按统计, 对于某型发动机,  $A_2/A_1 = 1.826 \pm 0.001$ , 转差为  $\Delta S = 17 \pm 1$  格。如果注意到这一点则调整的合格率较高。

对于不同的  $A_1$  值,  $\Delta S$  值随  $A_2$  的变化率基本相同, 即可近似地认为  $A_1$  和  $A_2$  不相关。这样, 在实际允许的导向器面积调整范围内, 设  $A_{10}$  和  $A_{20}$  为调整前面积,  $A_1$  和  $A_2$  为调整后面积, 转差的变化可按下式估算:

$$\delta \Delta S = 1.2097(A_2 - A_{20}) - 2.2069(A_1 - A_{10}) \quad (2)$$

上面曾提到, 喷管出口面积原则上对转差无影响。但实际情况由于各台发动机的性能不完全一样, 特别是部件性能(如效率等)的变化规律不同, 当喷管出口面积增加时, 转差也有所变化。实际数据表明, 虽影响较小, 但变化大小不一, 且方向也不同, 有增有减。

顺便指出, 按不同的季节统计, 随着大气温度的增加, 转差上升。统计数据表明, 温度上升  $5^\circ$ , 转差约上升 1 格。从热力循环计算表明, 大气含湿量对转差有明显影响。按统计规律大气含水量随大气温度的上升而上升是众所周知的。由此可知, 实践所反映的, 冬天试车转差偏低, 夏天试车转差偏高这一客观规律, 不可否认大气含湿量变化是主要的原因之一。

### 三、转差对发动机其它参数的影响

调节规律为  $n_1 = \text{常数}$  的双转子发动机, 低压压气机稳定工作裕度主要取决于喷管出口面积。而发动机转差的调整, 首先是为了保证高压压气机的稳定工作裕度。但是, 在转差调整的同时, 由于涡轮导向器面积的变化和高压压气机工作能力的变化, 低压转子的共同工作线也相应地发生变化。图 3 给出了  $A_1$  和  $A_2$  变化时高低压压气机工作点的变化情况。当  $A_1$  放大,

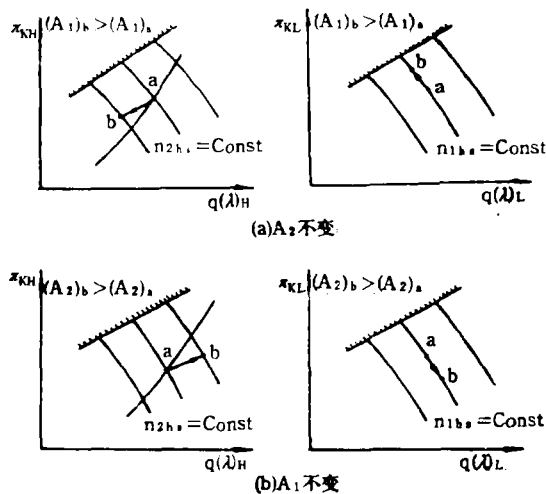


图 3 导向器出口面积变化对高低压压气机工作点的影响

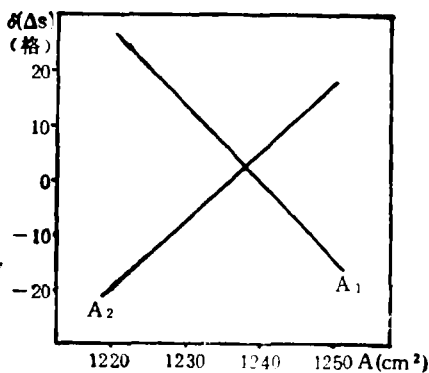


图 2 导向器出口面积对转差的影响

即转差减小, 则高压或低压的共同工作线都是靠向喘振边界。当  $A_2$  放大, 即转差增加, 则高压或低压的共同工作线都是远离喘振边界。在此, 可得到一个重要的结论:  $\Delta S$  小可改善发动机的台架性能, 但受到稳定工作裕度减小的限制, 所以  $\Delta S$  有下限限制, 即  $\Delta S$  不能为负。

为调整转差,  $A_1$  或  $A_2$  变化时, 高压转子转速  $n_2$  和  $T_3$  变化见图 4。随着  $A_1$  或  $A_2$  面积增加,  $T_3$  都略有上升, 这说明同样是转差变化, 如使  $\Delta S$  下降, 当采取  $A_1$  下降时则  $T_3$  下降, 当采取  $A_2$  增加时, 则  $T_3$  上升。而  $n_2$ , 则随转差的下降而下降, 不论是通过  $A_1$  或  $A_2$ 。

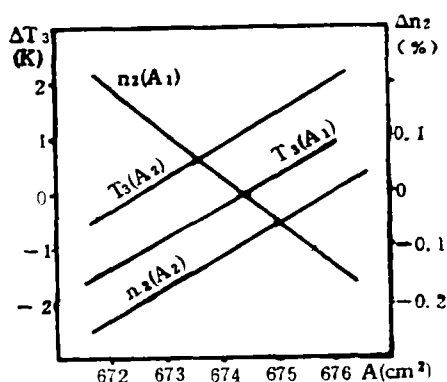


图 4 导向器出口面积对  $n_2$  和  $T_3$  的影响

喷管出口面积的调整, 但以上指出的关系作为涡轮导向器面积调整后对发动机性能参数变化的预计是有实际意义的。

## 四、结 论

1. 转差的概念是指: 在最大状态  $n_{1hs} = 100\%$  的条件下, 涡轮前燃气换算温度  $T_{3hs}$  与高压转子换算转速  $n_{2sh}$  之间的关系。转差可表为  $\Delta S = f(n_{2sh}, T_{3hs})$ 。

2. 转差的大小主要取决于 1、2 导出口面积。在调整的范围, 可认为决定于 1、2 导出口面积之比。与喷管出口面积基本无关, 但具体发动机的性能不完全一致, 当喷管面积变化时, 也略有影响。

3. 转差的大小将直接影响高、低压转子的稳定工作裕度, 尤其是高压转子。此外还影响  $T_3$  和  $n_2$  的匹配, 关系到发动机性能的发挥和可靠工作。所以必须合理调整。

4. 转差的大小还影响发动机其他方面的性能, 如推力、油耗、 $T_3$  和  $n_2$  等参数, 在调整转差时, 也必须考虑到, 以免造成顾此失彼。

由于调整转差, 发动机各截面气动力参数发生变化, 因而必然引起发动机性能参数的变化。

当  $A_1$  增加, 涡轮前温度  $T_3$  增加, 气流量下降, 两者影响的综合结果, 推力和油耗都略有增加, 如果保持推力不变, 则油耗有所下降。随着  $A_2$  增加,  $T_3$  和空气流量都增加, 推力和油耗明显增加, 如果保持推力不变, 则油耗有所上升。

1、2 级涡轮导向器出口面积的调整主要是为了调整转差, 对推力和油耗的影响是次要的, 因为推力和油耗的调整一般是通过

## ADJUSTMENT OF RATIO OF ROTATION SPEED DIFFERENCE IN A TWIN-SPOOL TURBOJET ENGINE

Wu Zizhong and Shang Yi (*Nanjing Aeronautical Institute*)

Analyzing the concept and the function of the ratio of rotation speed difference in a twin-spool turbojet engine indicates that the ratio has an effect on the surge margins of the high and low pressure compressors and the match between the speed of high pressure compressor and the inlet gas temperature. It is proposed how to adjust the ratio of rotation speed difference reasonably. The results of the adjustments made by us are shown in good agreement with the trial run data. In addition, the effects of the ratio on the thrust, specific fuel consumption, speed of high pressure compressor and turbine inlet gas temperature are also considered.

## NEW GASDYNAMICS FUNCTIONS WITH VARIABLE SPECIFIC HEAT TAKING MACH NUMBER AS INDEPENDENT VARIABLE

Peng Ying and Fan Zuomi (*Civil Aviation Institute of China*)

The new gasdynamics functions with variable specific heat proposed in this paper take Mach number as independent variable. The four existing methods, namely the thermodynamics method, two kinds of conventional gasdynamics functions with variable specific heat and another kind of new gasdynamics functions with variable specific heat are compared with the presented method in solving thermo dynamic processes with variable specific heat. It is shown that the proposed new method is the most convenient.

## A NEW ADJUSTING SCHEME OF MULTI-POINT EXCITING PURE MDDE

Yi Liyan and Zhang Yison (*Nanjing Aeronautical Institute*)

A new technique of multi-point exciting for modal testing is discussed. In consideration of the trouble of phase shift in some experimental instruments, a new scheme is proposed to assign multi-point exciting forces and a practical method is provided to discern the modal parameters in pure modes. Calculations and experiments demonstrate that the new technique is applicable to the multi-point exciting experiments for general structures.