

文章编号: 1000-8055(2002) 02-0173-05

双轴式涡喷发动机的转差线图 确定方法的研究

王华青, 陈矛章
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 转差是双轴式发动机交付验收参数之一, 交付发动机的转差是依据该型的标准转差线图调整和确定的, 标准转差线图确定得合适程度关系到发动机外场使用的性能、稳定性和可靠性。本文比较系统地论述了双轴式涡喷发动机的转差线图的制作和使用, 分析了转差线图上、下限界对发动机的影响, 提出了用工作点检查法和稳定工作裕度检查法解决转差线图上、下限界的确定问题。解决了某新机转差线图的确定依据。本方法可用于新机研制中标准的转差线图确定, 建议二种检查方法结合使用。

关键词: 双轴式发动机; 转差线图

中图分类号: V 231

文献标识码: A

Study on the Method Establishing the Revolution Difference Map for a Two-Spool-Turbojet Engine

WANG Hua-qing, CHEN Mao-zhang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The revolution difference is one of the delivery acceptance test parameters for a two-spool-turbojet engine. It is adjusted according to a standard revolution map which was established specially for this type of engine. The level of appropriateness of the established map will affect the operating performance, stability and reliability for the engine usage. This paper expounds the establishment of the standard revolution difference map and its usage for a two-spool-turbojet engine. The uppermost and lowermost limits of the revolution difference map will affect the engine operation. To define the uppermost and lowermost limits two methods were suggested: operation point checking method and stable working range checking method. These two methods are suggested to be jointly used. These methods have been proved successful in a new engine development.

Key words: two-spool-turbojet engine; revolution difference map

1 转差的意义

双轴式发动机转差率^[1]的物理概念是高压转子的转速与低压转子的转速之比值 $\frac{n_2}{n_1}$, 用这个比

值在发动机调整交付试车中还不能正确控制影响发动机稳定性的高、低压压气机工作点位置范围。因此在工程上引入了能控制发动机高低压压气机工作点位置的转差概念。

双轴式发动机转差定义是, 在发动机最大状

态 低 压 转 子 相 对 换 算 转 速 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$
 $\left[\bar{n}_{1hs} = \frac{n_{1hs}}{n_{1设计}} \right]$ 的条件下, 在以涡轮前燃气换算温
度 t_{3hs}^* 为横座标, 高压转子换算转速 n_{2hs} 为纵座标
的坐标系中作等 $\frac{A_2}{A_1}$ 的 $f(n_{2hs}, t_{3hs}^*)$ 线, 即为转差线,
由不同的等 $\frac{A_2}{A_1}$ 线和上下界限线组成转差线图。在
转差线图中找到一点 $S(n_{2hs}, t_{3hs}^*)$, 该点相应于在
低压转子换算转速 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 时获得的高压转子
换算转速 n_{2hs} 和 t_{3hs}^* , 经此点引出与下界限线平行
的线, 即是该发动机的转差线, 转差线与下限差值
即为转差 ΔS , 如图 1 所示。

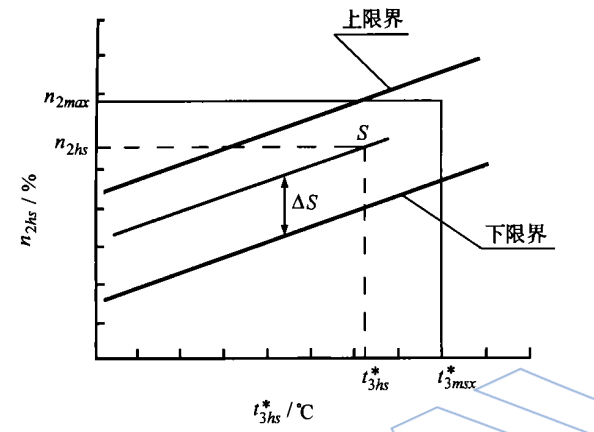


图 1 转差线示意图

因此转差定义包含了低压转子在 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$
转速下发动机的 n_{2hs} 和 t_{3hs}^* 、涡轮导向器面积比值,
在等 n_1 调节规律下, t_3^* 与尾喷口面积有关, 因此
也包含了喷口直径大小, 这就完全确定了压气机
的工作点。在发动机装配交付时控制了转差, 也就
保证了发动机工作点和工作线在规定范围内, 控
制了 n_2 不会超转, t_3^* 不会超温, 保证了发动机在
外场使用的稳定性和可靠性。

转差线上边界为 $\frac{A_2}{A_1}$ 比值大的线, 下边界为 $\frac{A_2}{A_1}$
比值小的线。当发动机实际转差线靠近上边界时,
则转差 ΔS 大, n_{2hs} 高, 并受 n_{2max} 限制, t_3^* 上不去,
发动机潜力不能很好发挥, 当飞大 Ma 数时会发
生 n_2 限转, 推力下降。当发动机实际转差线靠近
下边界时, 则转差 ΔS 小, n_{2hs} 低, t_{3hs}^* 高, 受到 t_{3max}^*
限制。

双转子涡喷发动机转差的作用和调整在文献
[2] 中有详细叙述。一般规律, 调整发动机实际转
差时, 当转差 ΔS 减小时, 低压压气机负荷加重、
 $\frac{\pi_{td}}{q(\lambda)}$ 提高, 整机的稳定裕度降低。当转差 ΔS 增大

时, 高压压气机的稳定裕度决定了整机的稳定裕
度, 低压压气机的工作点和工作线是离开喘振边
界的。

对于新研的双轴式涡喷发动机, 作为交付检
验用的转差线图应根据实际型号的发动机重新制
定。对于制定的转差线图是否合理, 主要检查转差
线图上、下边界限能否保证发动机稳定工作裕度
和满足性能指标及 t_3^* 和 n_2 指标, 在研制阶段发
动机性能及 t_3^* 和 n_2 可以根据结构可靠性适当调
整, 而发动机稳定工作裕度必须保证。现在用什么
方法检查转差线图上、下界限的合理性, 这是本文
研究的重点。本方法应用于某新型发动机研制过
程中对转差线图的确定, 有很好的效果。某新型发
动机配备了高通流高负荷跨音压气机, 低压压气
机负荷加重, 共同工作线走向趋平缓, 通过制定更
合理的转差线图, 保证了发动机使用稳定性和可
靠性。

2 转差线图的制作和使用

2.1 转差线图制作

发动机转差线图制作步骤如下:

- (1) 选 3~5 台发动机, 用作制作线图样本;
- (2) 选定若干组 $\frac{A_2}{A_1}$ 和 A_2 值;
- (3) 发动机上台架试验, 调整尾喷口面积, 选
定若干个不同尾喷口面积值。在每一个尾喷口面
积值下发动机开车到最大状态, 然后进行拉转, 录
取发动机参数, 作出 $f_1(n_{1hs}, n_{2hs}), f_2(n_{1hs}, t_{3hs}^*)$ 线
图, 如图 2 和图 3 所示。

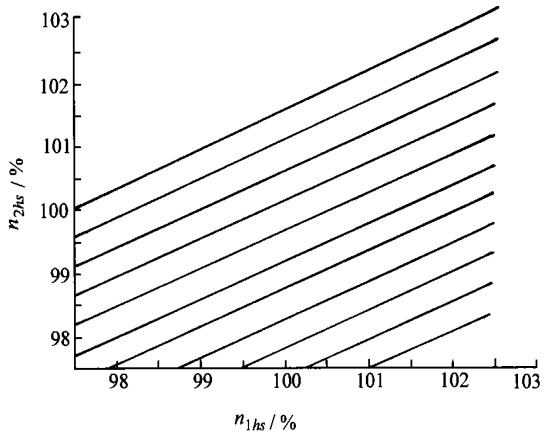


图 2 $n_{2hs} = f(n_{1hs})$ 示意图

- (4) 根据 $f_1(n_{1hs}, n_{2hs}), f_2(n_{1hs}, t_{3hs}^*)$ 线图求出
 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 时的 (n_{2hs}, t_{3hs}^*) 各组值;
- (5) 在 (n_{2hs}, t_{3hs}^*) 坐标系上绘出转差线;

(6) 确定转差线图下限和上限界线, 并规定 $n_{2\max}$ 和 $t_{3\max}^*$ 界限。如图 1 所示, 这就是转差线图。

2.2 转差线图使用

(1) 在 $n_{2hs} = f(n_{1hs})$ 图线(见图 2)上取一点, 使该点相当于低压转子和高压转子换算转速。经该点引出一条平行于方向线的直线, 求出在此直线和低压转子转速 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 的垂线交点上的高压转子转速 n_{2hs} 。

(2) 在 $t_{3hs}^* = f(n_{1hs})$ 图线(见图 3)上取一点, 使该点相当于低压转子换算转速和 t_{3hs}^* 值。经该点引出一条平行于方向线的直线, 求出此直线和 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 的垂线交点上的 t_{3hs} 。

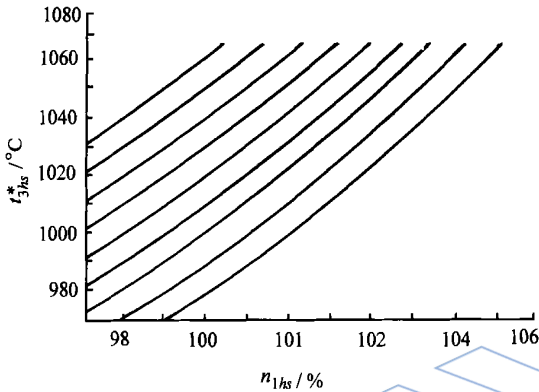


图 3 $t_{3hs}^* = f(n_{1hs})$ 示意图

(3) 在转差线图 $n_{2hs} = f(t_{3hs}^*)$ 上取一点, 使该点相当于 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 时求得的高压转子换算转速 n_{2hs} 和 t_{3hs}^* , 如果此点位于边界线之间时, 则转差合格。经此点引出与下界限线平行的线, 即是此发动机的转差线, 转差线与下界限线之间的纵座标格数即为转差 ΔS 。

3 转差线图上下界限确定

3.1 转差线上下界限对发动机影响

在论述转差图线下界限确定之前, 先研究下界限位置的高和低对发动机的稳定性、可靠性和性能的影响。

在转差图线上, 若下界限位置确定偏低, 在工程上转差的公差规定为一定值, 因此在规定涡轮导向器面积时, 导致 I 级涡轮导向器面积规定会偏大及 II 级涡轮导向器面积规定会偏小, 也即 $\frac{A_2}{A_1}$ 减小, 就能满足转差要求。由于 II 级涡轮导向器面积偏小使高压压气机工作点和工作线向喘振边界移动; 低压压气机受高压压气机 n_2 低引起节流作用, 其工作点和工作线也向稳定边界方向移动; 结

果, 整机稳定工作裕度减小, 进口空气流量偏小, 为保证发动机性能, 提高 t_{3hs}^* , 但又受 $t_{3\max}^*$ 限制。

若转差线下界限位置确定偏高, 从规定涡轮导向器面积看, I 级涡轮导向器面积规定会偏小, II 级涡轮导向器面积规定会偏大, $\frac{A_2}{A_1}$ 偏大, 才能保证转差。结果, 高压涡轮膨胀比比例变大, 低压涡轮膨胀比比例变小, 使高压转子转速增高, 在飞大 Ma 数时容易会碰到 n_2 限转问题, n_2 限转后会使用发动机性能急剧变差; 在此情况下, 整机稳定工作裕度由高压压气机决定, 若高压压气机在高转速时稳定工作裕度大、高压转子结构可靠性高, 则将转差下界限定得适当高些对发动机有利。

转差线上界限位置确定, 在工程上习惯做法是确定转差线下界限后上移 28 格作为上界限。因此转差线上、下限边界位置对发动机稳定工作裕度、性能, $n_{2\max}$, $t_{3\max}^*$ 影响都要检查, 以便制定出合理的转差线图。

3.2 转差线上、下界限确定的依据

上述分析了转差线上、下界限对发动机稳定性、性能、可靠性影响。对发动机的性能、 t_3^* , n_2 影响容易控制, 但对发动机稳定性影响, 由转差 ΔS 确定, 而转差值由 $S(n_{2hs}, t_{3hs}^*)$ 与转差线下界限差值得到, 转差线上、下界限决定了发动机稳定工作裕度, 从发动机稳定裕度角度考虑有必要对转差线上、下界限确定是否合理进行分析和判断, 本文分析了二种方法, 认为每种方法都可以用于检查。

3.2.1 工作点检查法

利用制作转差线图时录取的低压压气机和高压压气机工作点参数和高压压气机特性试验曲线图, 分析和计算在转差线上、下界限上低压压气机和高压压气机各工作点离其稳定边界距离, 算出 Δk_y 值, 以此来评定转差线上、下界限能否满足发动机稳定性要求。

3.2.2 稳定裕度检查法

此法是利用喷水逼喘测取的整机稳定工作裕度来检查转差线上、下界限是否满足发动机稳定性要求。在整机喷水逼喘试验中录取的参数整理成如图 4。

图 4 为 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 时用整机喷水逼喘测取的压气机喘振边界, 同样可测取 $\bar{n}_{1hs} = 0.93, 0.78, \dots$ 等转速下压气机喘振边界。

图 4 中喘振边界点数据按以下方法试验获得:

在保持 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 下, 由调整喷口面积改变

$\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$, 喷口面积大, 则 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 小; 喷口面积小, 则 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 大。

在某一喷口位置下, 用喷水法逼喘法测取 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 和 $\left(\frac{\pi_c^*}{q_{hs}}\right)_{\text{喘点}}$ 值, 依次测定如图 4 的喘振边界。图 4 的工作线是按转差线图下限界的 $\frac{A_2}{A_1}$ 值和调整喷口面积改变 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 测取的。同样可以按转差线图上限界的 $\frac{A_2}{A_1}$ 值和调整喷口面积改变 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 测取工作线。按同样方法作出 $\bar{n}_{1hs} = 0.93, 0.78, \dots$ 等转速下的压气机喘振边界和工作线(图略)。

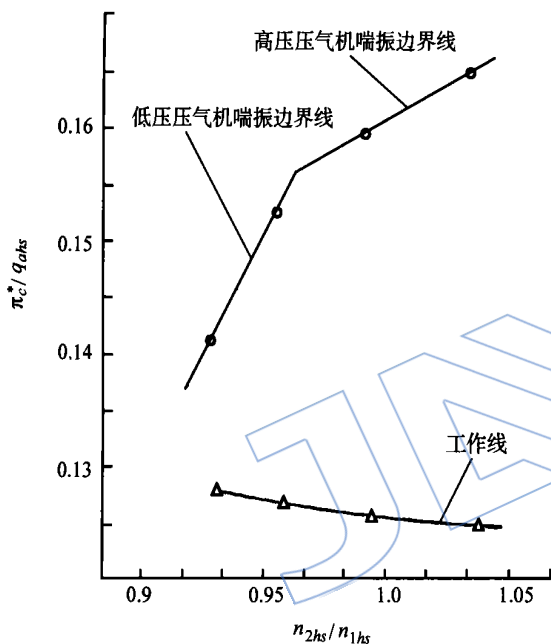


图 4 $\bar{n}_{1hs} = 1.0$ 喘振边界和工作线

稳定裕度检查, 在图 1 转差线图上, 下限界中选几点, 算出 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$, 再利用图 4 算出在每一个 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 值下的 $\left(\frac{\pi_c^*}{q_{hs}}\right)_{\text{喘点}}$ 和 $\left(\frac{\pi_c^*}{q_{hs}}\right)_{\text{工作点}}$, 并按下式求出稳定工作裕度。

$$\Delta k y = \left[\frac{\left(\frac{\pi_c^*}{q_{hs}}\right)_{\text{喘点}}}{\left(\frac{\pi_c^*}{q_{hs}}\right)_{\text{工作点}}} - 1 \right] \times 100\%$$

根据算出的稳定工作裕度来判断转差线图下限界确定是否合理。当 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 对应到图 4 的低压压气机喘振边界线时, 则喷口面积对稳定裕度产生影响, 需要控制喷口面积, 喷口面积不能继续放大。

图 4 中喘振边界除了用喷水逼试验获取外,

也可以用高低压压气机双转子试验获取。具体试验方法是在双转子压气机试验器上, 试验双转子压气机时固定住 n_{1hs} , 调整 n_{2hs} 转速, 在每一个 n_{2hs} 转速下调节节气门, 录取参数, 试到喘点。图 4 曲线中分为高压压气机喘振边界和低压压气机喘振边界, 也就是 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 大时高压压气机先进入喘振边界, $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 小时低压压气机先进入喘振边界。同样, 图 4 中喘振边界也可以利用低压压气机特性试验数据和高压压气机特性试验数据作出。

4 影响转差因素

对某一具体型号的双轴式喷气发动机, 交付试车验收用的转差线图确定后, 在交付试车中对转差值 ΔS 影响主要因素是第 II 级涡轮导向器面积 A_2 与第 I 级涡轮导向器面积 A_1 的比值 $\frac{A_2}{A_1}$, $\frac{A_2}{A_1}$ 比值变大时, 则转差值增大; $\frac{A_2}{A_1}$ 比值变小时, 则转差值变小。

在工程上, 转差 ΔS 习惯用座标图上以格为单位, 在 t_{3hs}^* 为定值情况下, ΔS 变化 1 格, 相应于 n_{2hs} 转速变化 5.68 r/min, 这与座标比例和 $n_{2hs} = 100\%$ 转速时相应的物理转数有关。在调整转差过程中, 当 II 级涡轮导向器面积 A_2 不变情况下, 调整 I 级涡轮导向器面积, A_1 每变化 1 cm^2 , ΔS 约变化 2.3 格左右; 当 I 级涡轮导向器面积 A_1 不变时, A_2 每变化 1 cm^2 , ΔS 约变化 1.3 格左右, 这与具体型号发动机有关, 可以经过多台发动机调整可统计出这些变化量, 有助于发动机导向器面积调整。

在 $n_1 =$ 常数调节规律的发动机中, 改变尾喷口面积, $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 是变化的, 但在转差线图中, 根据转差线制作方法, 每一个 $\frac{A_2}{A_1} =$ 常数值对应着一条转差线, 一条转差线上各点对应着尾喷口各面积值, 转差 ΔS 是某一转差线与下限界纵坐标差值, 在同一条转差线上 ΔS 是恒值, 因此说尾喷口面积改变对转差值无影响。

环境温度变化对发动机转差值也有影响, 对于我们目前生产的双轴涡轮喷气发动机, 转差值也随着环境大气温度变化而有变化, 变化趋势是环境大气温度增加, 转差值上升, 因此, 在夏天炎热天气试车转差偏高, 在冬天试车转差偏低, 见文献 [2]。

5 结 论

- (1) 在工程上引进转差概念,是为发动机交付时调整好高低压压气机工作点在规定范围内。
- (2) 不同型号的发动机应制定符合本型号发动机交付验收用的标准转差线图。
- (3) 转差线图上、下限界位置关系到发动机的稳定工作裕度,可用工作点检查法或稳定裕度检查法来检查和分析上、下限界线位置合理程度。
- (4) 影响转差值主要因素是 $\frac{A_2}{A_1}$ 比值大小。
- (5) 调整发动机转差时,要注意使 T_3^* 不超温, n_2 不限转, ΔS 转差小发动机容易出现 T_3^* 超温, ΔS 高发动机容易出现 n_2 限转。
- (6) 当 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 变化对应图 4 的高压压气机喘振边界线时,高压压气机稳定裕度决定发动机稳定

裕度,尾喷口面积变化对发动机稳定工作裕度不影响;当 $\frac{n_{2hs}}{n_{1hs}}$ 变化对应到图 4 的低压压气机喘振边界线时,则尾喷口面积变化对发动机稳定工作裕度有影响,主要是低压压气机稳定裕度决定了发动机稳定裕度,因此要控制喷口直径,不能再放大。也就是说,尾喷口直径下限值由 t_{3max}^* 决定,尾喷口直径上限值由稳定工作裕度决定。

参考文献:

[1] 聂恰耶夫 Ю И. 航空动力装置控制规律与特性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 111- 269.

[2] 郭子仲, 尚义. 双转子涡喷发动机的转差调整[J]. 航空动力学报, 1989, 4(1): 17- 20.

(责任编辑 吴一黄)

