

高低压转子间耦合影响的分析和计算^{*}

王占学, 唐狄毅, 王建峰

(西北工业大学 航空发动机系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 研究了转子耦合对高、低压转子稳定性的影响。采用一种新的快速收敛方法, 利用畸变传递修正系数, 通过调整压比来满足各子压气机出口静压相等的条件, 对耦合的影响进行了定量计算。结果表明, 在估算发动机喘振部件时, 高、低压转子间耦合的影响也是应该考虑的重要因素。

关键词: 航空发动机; 转子; 耦合; 畸变; 稳定性

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)03-0038-02

Effect of spool coupling on compressor stability

WANG Zhan-xue, TANG Di-yi, WANG Jian-feng

(Dept. of Aeroengines Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: The effect of spool coupling on compressor stability was analyzed. A quickly convergent method was selected to calculate amplitude of the total pressure distortion at exit of low pressure spool in case of no coupling, complete coupling, and real coupling respectively, then the correcting coefficient of distortion transfer is calculated. The results show that the spool coupling was important factor during evaluating engine surge component.

Key words: Aircraft engine; Rotor; Coupling; Distortion; Stability

1 引 言

传统的稳定性评估方法, 忽略了转子之间的耦合影响因素。但是航空发动机的核心部分是紧密耦合的, 下游部件的存在, 必然对上游部件出口参数产生影响, 忽略转子之间耦合影响会引起发动机畸变容限的估计及辨认临界部件的误差^[1,2]。为了说明转子耦合的重要影响, 本文利用平行压气机理论对高、低压转子间耦合的影响进行了分析和计算。

2 数学模型

耦合系数的变化范围是0~1, 耦合系数越高, 说明畸变通过上游部件的衰减越低, 畸变造成的上游部件的裕度损失就会减小, 临界部件就可能从上游部件转到下游部件。采用转子之间加上耦合条件的多转子平行压气机模型来评估压缩系统的稳定性。实际耦合时, 低压转子出口压力畸变值为:

$$p_{12,1} = C_N[p_{12,H} - p_{12,F}] + p_{12,F}$$

式中 $p_{12,1}$ 为转子间存在轴向距离 l 时, 风扇出口的总压畸变值; $p_{12,F}$ 为静压平衡在风扇出口时, 风扇出口的总压畸变值; $p_{12,H}$ 为静压平衡在高压压气机出口时, 风扇出口的总压畸变值。

计算中, 耦合系数 $C_N = 0.75$ 。为了对低压转子畸变传递系数、畸变灵敏度以及低压转子喘振压比修正, 本文提出了畸变传递修正系数的概念, 定义为 $C_{dis} = p_{12,F}/p_{12,1}$ 。

以前采用平行压气机理论计算畸变问题时, 是通过调整流量满足各子压气机出口静压相等的条件, 但是这种方法存在一个缺点, 就是在高转速时, 流量的微调导致压比较大的变化, 使程序不易收敛。尤其高、低压转子紧密耦合时, 这个问题尤为突出。为了克服这个缺点, 本文采用一种新方法, 即通过调整压比来满足各子压气机出口静压相等的条件。对低压转子采用如下的公式:

* 收稿日期: 1999-06-08; 修订日期: 2000-01-11。

作者简介: 王占学 (1969—), 男, 博士后, 研究领域为发动机一体化和计算流体力学。

$$\begin{aligned} \text{低压区 } r_{\text{FL}} &= r_{\text{F}} + \frac{p_{\text{TH}} - p_{\text{TL}}}{p_{\text{TH}} + p_{\text{TL}}} \left| 1 - \frac{1}{K} \right| \pm \delta r_{\text{F}} \\ \text{高压区 } r_{\text{FH}} &= r_{\text{F}} - \frac{p_{\text{TH}} - p_{\text{TL}}}{p_{\text{TH}} + p_{\text{TL}}} \left| 1 - \frac{1}{K} \right| \pm \delta r_{\text{F}} \end{aligned}$$

由于在高压转子进口存在压力和温度畸变, 所以对高压转子采用如下的公式:

$$\text{低压区 } r_{\text{CL}} = \left[1 + \frac{r_{\text{C}}}{1 + \frac{p_{\text{TH}} - p_{\text{TL}}}{p_{\text{TH}} + p_{\text{TL}}}} \right] \frac{T_{\text{TL}}}{(T_{\text{TL}} + T_{\text{TH}}) / 2} \pm \delta r_{\text{C}}$$

$$\text{高压区 } r_{\text{CH}} = 2 r_{\text{C}} - \left[1 + \frac{r_{\text{C}}}{1 + \frac{p_{\text{TH}} - p_{\text{TL}}}{p_{\text{TH}} + p_{\text{TL}}}} \right] \frac{T_{\text{TL}}}{(T_{\text{TL}} + T_{\text{TH}}) / 2} \pm \delta r_{\text{C}}$$

式中 r 为压比, p_{T} 为总压, T_{T} 为总温, δr 为压比调整量, K 为畸变衰减率, 一般取 3~4, 下标 C, F 表示高、低压转子, H, L 表示高、低压区。

首先假定低压转子出口静压平衡, 确定低压转子出口总压波动值 $\Delta p_{\text{i2,F}}$ 。然后把高、低压转子看成一体, 静压平衡条件在高压转子出口, 得到低压转子出

口总压波动值 $p_{\text{i2,H}}$, 求出 $p_{\text{i2,L}}$ 的值, 然后求出畸变传递修正系数 C_{dis} 。

3 算例分析

根据上述的分析, 本文以 CJ 2000 发动机为例进行计算。计算的结果见表 1。表中 1, 2, 3 表示 3 种计算工况, 对应的风扇进口高、低压区压力和温度相同, 高压区压力、温度分别是 101.3 kPa, 288.1 K; 低压区压力、温度分别是 90 kPa, 288.1 K。3 种工况的 C_{dis} 值分别从计算结果可以看到: 不存在耦合时, 畸变通过上游转子衰减较大, 上游转子容易成为临界部件, 容易诱发喘振。完全耦合时, 畸变通过上游转子衰减最小, 临界部件从上游转子转移到下游转子, 引起下游转子喘振。实际耦合时, 畸变通过上游转子衰减程度介于不存在耦合和实际耦合之间, 临界部件会从上游转子转移到下游转子, 容易引起下游转子喘振。

Table 1 Calculation results considering spool coupling

Coupling	Operating mode	High pressure segment		Low pressure segment		Exit distortion intensity
		Mass flow / (kg/s)	Pressure ratio	Mass flow / (kg/s)	Pressure ratio	
0% coupling	1	69.8	2.80	59.2	2.98	0.0137
	2	81.0	3.31	72.5	3.55	0.0117
	3	92.0	3.81	85.6	4.11	0.0104
100% coupling	1	67.5	2.86	64.6	2.92	0.0248
	2	79.7	3.38	76.2	3.48	0.0226
	3	90.2	3.91	88.5	4.01	0.0228
Actual coupling	1	68.1	2.85	63.2	2.93	0.0220
	2	80.0	3.37	75.3	3.50	0.0199
	3	90.7	3.89	87.7	4.04	0.0197

4 结 论

本文在对转子耦合影响机理分析的基础上, 根据平行压气机理论建立了考虑转子耦合影响的计算模型, 提出了畸变传递修正系数的概念。在对稳定性评估中, 考虑高、低压转子耦合的影响, 并用畸变传递修正系数修正低压转子和高压转子耦合界面的参数, 为以后的稳定性评估提供了新的方法。

参 考 文 献

- [1] Greitzer E M, Griswold H R. Compressor-diffuser interaction with circumferential flow distortion [J]. Journal of Mechanical Engineering Sciences, 1979, 18 (2): 25~38.
- [2] Greitzer E M. Coupled compressor-diffuser flow instability [R]. Cambridge University Engineering Department Report CUED/A-Turbo/TR75, 1975.

(责任编辑: 史亚红)