

文章编号: 1000-8055(2000) 02-0212-03

耦合对风扇、压气机畸变传递特性的影响

王占学 唐狄毅 王建峰

(西北工业大学 703 教研室, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文从下游部件对具有畸变流动的压气机性能的影响机理出发, 着重分析了由于高压压气机的存在对具有进口压力畸变的风扇出口畸变强度的影响。采用一种新的快速收敛方法, 结合某型号发动机对耦合的影响进行了定量计算。结果表明, 由于高压压气机的存在, 风扇出口的畸变传递特性明显不同于忽略高压压气机的畸变传递特性, 紧密的耦合容易引起下游高压压气机喘振。

关键词: 耦合; 压气机特性; 传递

中图分类号: V 231 文献标识码: A

1 引言

对涡扇发动机, 传统的稳定性评估方法, 先在风扇出口静压不变的条件下计算或用实验求出风扇的畸变敏感度和畸变传递特性, 然后, 根据风扇畸变传递特性, 计算高压压气机进口的总压畸变和总温畸变, 并计算由此引起的高压压气机稳定裕度的损失, 在计算中忽略了转子之间的耦合影响因素。实践表明, 这种忽略转子之间耦合影响的稳定性评估方法在发动机畸变容限的估计及辨认临界部件时都存在误差, 因为航空燃气轮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。因此, 不能假定低压出口静压为常数^[1]。以前, 对耦合影响的分析和计算仅限于转子下游接直管道、扩压器和喷管等简单形式^[2~4]。而本文对风扇、高压压气机耦合影响的机理进行了详细分析, 并在此基础上, 建立了数学模型, 进行了算例计算。

2 影响机理

在讨论风扇、高压压气机耦合之前, 先讨论一下风扇下游部件对具有畸变流动的压气机性能的影响。若风扇下游是一个直管道, 利用平行压气机模型计算, 可以得到高、低压区的工作点。如果风扇下游接一个扩压器, 由于扩压器和风扇是紧密

耦合的, 则静压平衡条件应移到扩压器出口。又因为在扩压器中低总压流静压升高, 为达到扩压器出口的静压平衡, 对于风扇下游是直管道的而言, 在风扇出口, 低总压流应有一个高的压升, 而高总压流应有一个低的压升。若下游是一个收敛形喷管, 则情况正相反。因此部件之间的耦合, 使下游部件的存在对于上游部件是有显著影响的。在以前计算畸变对风扇或压气机性能的影响时, 认为在风扇或压气机出口保持静压平衡的条件是不正确的。

下面分析风扇、高压压气机耦合的情况。

风扇、高压压气机耦合和上面分析的模型是一致的。假设是风扇后面接高压压气机, 进口总压畸变形状是一方波。如果风扇、高压压气机相距较远(几个半径), 尽管高压压气机在其进口会产生一位流场, 由于高压压气机和风扇相距较远, 此位流场不会影响到风扇出口静压, 所以, 风扇出口静压可认为是均匀的。若两转子距离进一步减小, 达到实际的双转子工作的距离, 则高压压气机进口的位流场将会对风扇出口参数产生影响。静压平衡条件应移到高压压气机出口。在风扇出口, 由于畸变区静压低于非畸变区静压, 因此在风扇特性图上畸变区工作点远离喘振边界, 畸变衰减程度降低。经过高压压气机才达到静压平衡, 结果在高压压气机特性图上畸变区有较高的压升, 畸变区

收稿日期: 1999-06-07; 修订日期: 1999-09-20

作者简介: 王占学(1969-), 男, 西北工业大学 703 教研室, 博士后

工作点向喘振边界靠近。

Ham 和 Williams 研究了转子间的干涉问题^[5], 提出了一个“耦合系数”的概念。定义为:

$$C_N = \frac{\Delta P_2^*(x) - \Delta P_2^*(\infty)}{\Delta P_2^*(0) - \Delta P_2^*(\infty)} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_2^*(x)$ 为转子间存在轴向距离 x 时风扇出口的总压畸变值; $\Delta P_2^*(\infty)$ 为静压平衡在风扇出口时风扇出口的总压畸变值; $\Delta P_2^*(0)$ 为静压平衡在高压压气机出口时风扇出口的总压畸变值。

$x = 1$ 对应于风扇和高压压气机处于实际工作距离, 而 $x = 0$ 和 $x = \infty$ 分别对应于零和相距很远的情况。“耦合”系数的变化范围是 $0 \sim 1$, $C_N = 0$ 表示风扇和高压压气机之间不存在位流场干涉 ($x = \infty$), $C_N = 1$ 表示风扇和高压压气机紧密耦合 ($x = 0$), 耦合系数越高, 说明畸变通过上游部件的衰减程度越低。按照平行压气机的观点, 上游部件的两个工作点(低压区和高压区工作点)就会越靠近, 这样, 由于畸变造成的上游部件的裕度损失就会减小。

若存在较高的耦合系数 C_N , 则风扇对进口畸变就不敏感, 高压压气机进口的畸变强度就会增大, 临界部件就可能从上游部件转到下游部件。

3 数学模型及算例分析

采用在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。

实际耦合情况, 风扇出口压力畸变值为:

$$\Delta P_2^*(l) = C_N [\Delta P_2^*(0) - \Delta P_2^*(\infty)] + \Delta P_2^*(\infty) \quad (2)$$

式中, C_N 耦合系数, 在算例中取 0.75。

为了得到 $\Delta P_2^*(l)$, 应计算出风扇和高压压气机完全耦合时, 风扇出口的压力畸变值 $\Delta P_2^*(0)$, 以及二者完全不耦合时, 风扇出口的压力畸变值 $\Delta P_2^*(\infty)$ 。

为了对风扇畸变传递系数、畸变灵敏度以及风扇喘振压比修正, 我们提出了畸变传递修正系数的概念, 定义如下:

$$C_{dis} = \Delta P_2^*(\infty) / \Delta P_2^*(l) \quad (3)$$

计算过程中, 在风扇进口输入一压力畸变谱, 各子压气机进口总温一致, 物理转速相等。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

微小调整导致压比较大的变化, 使程序不易收敛。尤其风扇和高压压气机紧密耦合时, 这个问题尤为突出。为了克服这个缺点, 本文采用一种新的方法, 即通过调整压比来满足各子压气机出口静压相等的条件。

对风扇采用如下的公式:

低压区

$$\pi_{L,F} = \pi_F + \frac{P_{H,F}^* - P_{L,F}^*}{P_{H,F}^* + P_{L,F}^*} \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \pm \delta \pi_F$$

高压区

$$\pi_{H,F} = \pi_F - \frac{P_{H,F}^* - P_{L,F}^*}{P_{H,F}^* + P_{L,F}^*} \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \mp \delta \pi_F$$

式中: $\pi_{L,F}$ 为风扇低压区工作点压比, $\pi_{H,F}$ 为风扇高压区工作点压比, π_F 为风扇平均工作点压比, $P_{H,F}^*$ 为风扇进口高压区总压, $P_{L,F}^*$ 为风扇进口低压区总压, K 为畸变衰减率, 一般取 $3 \sim 4$, $\delta \pi_F$ 为风扇压比调整量, 计算时可按平均工作点压比的百分比选取。

由于在高压压气机进口存在压力和温度畸变, 所以对高压压气机采用如下的公式:

低压区

$$\pi_{L,C} = \frac{\pi_C}{1 + \frac{P_{H,C}^* - P_{L,C}^*}{P_{H,C}^* + P_{L,C}^*}} \cdot \frac{T_{L,C}^*}{T_{L,C}^* + T_{H,C}^*} \pm \delta \pi_C$$

高压区

$$\pi_{H,C} = 2 \cdot \pi_C - \frac{\pi_C}{1 + \frac{P_{H,C}^* - P_{L,C}^*}{P_{H,C}^* + P_{L,C}^*}} \cdot \frac{T_{L,C}^*}{(T_{L,C}^* + T_{H,C}^*)/2} \mp \delta \pi_C$$

式中: $\pi_{L,C}$ 为高压压气机低压区工作点压比, $\pi_{H,C}$ 为高压压气机高压区工作点压比, π_C 为高压压气机平均工作点压比, $P_{H,C}^*$ 为高压压气机进口高压区总压, $P_{L,C}^*$ 为高压压气机进口低压区总压, $T_{H,C}^*$ 为高压压气机进口高压区总温, $T_{L,C}^*$ 为高压压气机进口低压区总温, $\delta \pi_C$ 高压压气机压比调整量。

假定风扇出口静压平衡, 确定风扇出口总压波动值 $\Delta P_2^*(\infty)$ 。把风扇和高压压气机看成一体, 静压平衡条件在高压压气机出口, 得到风扇出口总压波动值 $\Delta P_2^*(0)$, 根据(2)式, 求出 $\Delta P_2^*(l)$ 的值, 根据(3)式, 求出畸变传递修正系数 C_{dis} 。

根据上述的分析, 本文以某型号发动机为例进行计算。计算的初始参数和结果见表 1~2。

为了更清楚地表示, 图 1 给出了各种耦合情况的图示, 如果耦合对风扇出口畸变强度无影响, 则 75% 和 100% 耦合的曲线应通过坐标原点, 且为斜率 45 的直线, 但是从图中可以看到, 75%

表 1 初始参数

FAN 压比比	FAN 转速	HPC 压比比	HPC 转速	涵道比	进口压力 (高压区)	进口压力 (低压区)	进口温度 (高压区)	进口温度 (低压区)
0. 9295	8894	0. 9103	13615	0. 48	101325. 0	90000. 0	288. 1	288. 1
0. 8973	9620	0. 9070	14279	0. 42	101325. 0	90000. 0	288. 1	288. 1
0. 8473	10298	0. 8885	14963	0. 37	101325. 0	90000. 0	288. 1	288. 1

注: 表中压力单位为 Pa; 温度单位为 K。

表 2 风扇工作点参数

		0% 耦合	100% 耦合	实际耦合	0% 耦合	100% 耦合	实际耦合	0% 耦合	100% 耦合	实际耦合
高压区	流量压比	69. 84 2. 7973	67. 48 2. 8618	68. 07 2. 8456	80. 99 3. 3094	79. 72 3. 3837	80. 04 3. 3651	92. 02 3. 8122	90. 21 3. 9105	90. 66 3. 8859
	流量压比	59. 18 2. 9817	64. 59 2. 9173	63. 23 2. 9334	72. 46 3. 5548	76. 18 3. 4805	75. 25 3. 4991	85. 61 4. 1173	88. 45 4. 0190	87. 74 4. 0435
出口畸变强度		0. 013665	0. 024807	0. 022022	0. 011746	0. 022558	0. 019855	0. 010382	0. 022777	0. 019679
畸变传递修正系数		0. 6198			0. 5909			0. 5269		

和 100% 耦合时的风扇出口畸变强度明显不同于 0% 耦合时的出口畸变强度。耦合程度越大, 风扇出口畸变强度越大。

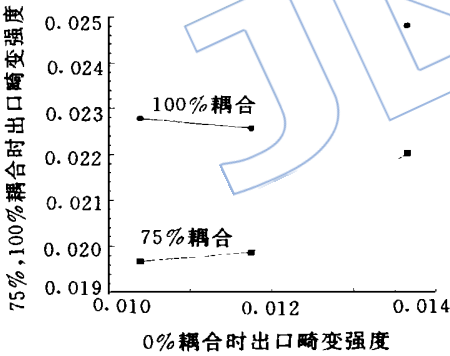


图 1 0%, 75%, 100% 耦合时对风扇出口畸变强度

从计算结果可以看到: (1) 不存在耦合时, 畸变通过风扇衰减较大, 风扇容易成为临界部件, 容易诱发喘振。(2) 完全耦合时, 畸变通过风扇衰减最小, 临界部件可能会从风扇转移到高压压气机, 引起高压压气机喘振。(3) 实际耦合时, 畸变通过风扇衰减程度介于不存在耦合和实际耦合之间, 临界部件可能会从风扇转移到高压压气机, 容易引起高压压气机喘振。

4 结 论

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, 考虑风扇和高压压气机耦合的影响, 并用畸变传递修正系数修正风扇和高压压气机耦合界面的参数, 消除了以前评估方法在辨认临界部件和畸变容限的估计中存在的误差, 为以后的稳定性评估提供了新的方法。

参 考 文 献

1 唐狄毅, 乔渭阳. 不稳定因子对稳定裕度影响的研究报告[R]. 航空工业总公司 624 所, 1993

2 Greitzer E M, Griswold H R. Compressor- Diffuser Interaction with Circumferential Flow Distortion[J]. Journal of Mechanical Engineering Sciences, 1976, 18: 25- 38

3 Greitzer E M. Coupled Compressor- Diffuser Flow Instability [R]. Cambridge University Engineering Department Report CUED/ A- Turbo/ TR75, 1975

4 Plourde G A, Stenning A H. Attenuation of Circumferential Inlet Distortion in Multistage Axial Compressors[J]. Journal of Aircraft, 1968, 5: 236- 242

5 Greiter E M. Flow Field Coupling Between Compression System Components in Asymmetric Flow[J]. ASME J. Engineering for Power 100: 66- 72

(责任编辑 杨再荣)

(英文摘要转第 218 页)

Numerical Simulation of 3-D Two-Phase Flowfield in Inlet Particle Separator for Helicopter

Hou Lingyun¹, Yan Chuanjun²

¹(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(7th Dept. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An inlet particle separator with vanes in helicopter is investigated. Turbulent bifurcated flowfield and particle motion are simulated in the three-dimensional non-orthogonal curvilinear coordinate system, boundary condition is treated specially and the effect of vanes on flowfield is considered by the use of zonal method. Predicted results and experimental data are in good agreement.

Key words: particles; separators; two-phase; flows; numerical simulation

(The Chinese text of the following abstract is printed in PP212-214)

The Effect of Coupling on Distortion Transfer in Fan and Compressor

Wang Zhanxue, Tang Diyi, Wang Jianfeng

(7th Dept. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The mechanism of spool coupling effect on distortion transfer in fan and compressor is analyzed. A quick convergent method is selected to calculate amplitude of the total pressure distortion at exit of low pressure spool in cases of no coupling, complete coupling, and real coupling respectively, then the correcting coefficient of the distortion transfer is obtained. The results show that the distortion transfer characteristics of no coupling differ from those of actual coupling.

Key words: coupling; compressor characteristics; transfer