

文章编号: 1000-8055(2006)06-1085-07

组合畸变对某型发动机稳定性的影响

黄顺洲, 胡 骏
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 压力和温度组合畸变对某涡轮风扇发动机稳定性影响的数值研究表明, 该发动机的进口临界压力畸变强度和临界温度畸变强度分别为 8.82% 和 8.60%, 风扇的压力畸变敏感系数为 2.608, 高压压气机的温度畸变敏感系数为 2.442。压力畸变和温度畸变的相对大小, 决定了组合畸变对风扇或压气机稳定性影响的严重程度。压力畸变的相对最大强度峰值出现在风扇截面时, 风扇首先失稳, 反之则高压压气机首先失稳。组合畸变对发动机稳定性的影响, 不是压力畸变和温度畸变单独影响的简单相加, 而是一种非常复杂的非线性关系。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 压力畸变; 温度畸变; 组合畸变; 发动机稳定性

中图分类号: V 231.3 **文献标识码:** A

Investigation of the effect of combined distortion on engine stability

HUANG Shunzhou, HU Jun
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Astronautics and Aeronautics, Nanjing 210016, P. R. China)

Abstract: The calculated effect of combined distortion on the engine stability shows that the critical values of pressure and temperature distortion are 8.82% and 8.60% respectively. The pressure distortion coefficient of the fan is 2.608 and the temperature distortion coefficient of the compressor is 2.442. The magnitude of pressure distortion and temperature distortion determines the severity of the combined distortion effect on the fan or compressor stability. When the relative peak intensity of distortion appears at the fan section, the fan falls into instability first, otherwise the compressor does. The effect of the combined distortion on engine stability can't be calculated by superposing the effect of the pressure distortion to the temperature distortion simply, but in a complex nonlinear manner.

Key words: aerospace propulsion system; pressure distortion; temperature distortion; combined distortion; engine stability

符号和缩略词说明		CTDI	临界温度畸变强度, 使发动机完全丧失
CPDI	临界压力畸变强度, 使发动机完全丧失		稳定工作的最小进口温度畸变值
	稳定工作的最小进口压力畸变值	PDE	压力畸变范围
DE	畸变范围	PDI	压力畸变强度
DI	畸变强度	PDIR	相对压力畸变强度, PDI/ CPDI

PVR	压力下降速率
PVRR	相对压降率, PVR/P_{10}
T	气体温度
TDE	温度畸变范围
TDI	温度畸变强度
TDIR	相对温度畸变强度, $TDI/CTDI$
TVR	温度上升速率
TVRR	相对温升率, TVR/T_{10}
α	敏感系数
Φ	组合相位, 低压区中心线和高温区中心线之间的夹角, 顺流方向
ΔSM	稳定裕度
下标:	
0	计算单元进口截面
C	组合畸变
HC	压气机
LC	风扇
np	换算转速
P	压力畸变
T	温度畸变
t	总温或总压

涡轮喷气、涡轮风扇和涡轮轴发动机的压力畸变、温度畸变以及压力和温度组合畸变的研究工作都已证明, 进口流场畸变对发动机的气动稳定性有很大的影响^[1-5]。通常, 进口压力畸变通过风扇后, 其畸变强度衰减很大, 因此, 压力畸变主要影响风扇的稳定性, 而对高压压气机的影响相对来说要小一些^[3]。进口温度畸变通过发动机风扇时, 其畸变强度几乎不变, 而在高压压气机后其畸变强度迅速降低, 因此, 温度畸变主要影响高压压气机的稳定性, 而对风扇的影响较小^[4]。进口压力和温度组合畸变对发动机稳定性的影响与单独的压力畸变和温度畸变的影响是不同的, 而且更复杂, 不同形式的组合畸变, 即不同强度和范围的压力和温度组合畸变以及二者间的相互位置不同, 对发动机系统的稳定性影响也不同^[5-7]。

本文就进口流场畸变对某新型涡轮风扇发动机的稳定性影响进行了深入的数值研究。在研究组合畸变对发动机稳定性影响的同时, 还简要介绍了压力畸变和温度畸变对发动机稳定性影响的研究结果; 讨论和分析了组合畸变在发动机系统中的传播情况以及该发动机临界级的分布情况。针对该发动机的特点, 建立的计算模型如图 1 所示。

发动机能否稳定工作, 主要取决于两个因素,

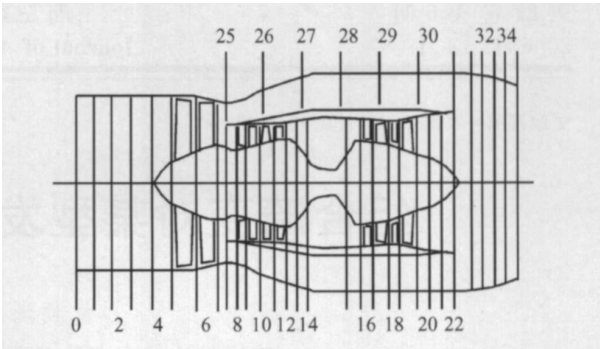


图 1 发动机计算模型及网格划分示意图
Fig. 1 Calculating model and elements of an engine

一是发动机的可用稳定裕度, 二是进口流场畸变的大小, 可以用发动机对进口流场畸变的敏感系数 α (发动机可用稳定裕度与进口临界畸变强度的比值) 来反映发动机的稳定工作能力。因此, 确定发动机的临界畸变强度是研究发动机稳定性的主要任务之一。

在研究压力和温度组合畸变对发动机稳定性影响之前, 有必要分析单独的压力畸变和温度畸变对发动机稳定性的影响。以便确定哪种组合畸变形式对发动机稳定性更为有害。

对临界或超临界的进口流场畸变来说, 畸变不仅使发动机完全丧失了稳定工作能力, 而且严重恶化发动机性能。确定在不同进口流场畸变条件下, 发动机首先失去稳定工作的薄弱部件, 是改善发动机抗畸变能力的首要条件。本文着重分析和讨论进口流场畸变为临界或超临界的情况。

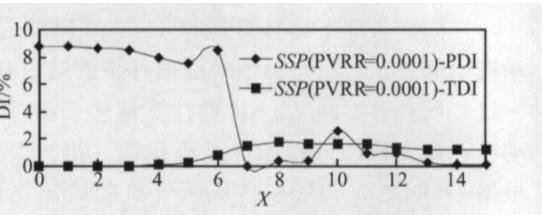
本文计算中采用的进口未扰动条件为飞行马赫数 $Ma = 0$ 、 $T_{10} = 288K$ 和 $P_{10} = 101\,325Pa$, 发动机工作状态为 $\bar{n}_{LCmp} = 90\%$ 。

1 计算结果与分析

1.1 压力畸变和临界压力畸变强度

1.1.1 稳态压力畸变及其临界值

为了精确确定发动机的临界压力畸变强度 CPDI, 采用 $PVRR = 0.0001/s$ 的准稳态压力畸变逐步逼近其临界值。图 2 表示在临界稳态压力畸变 ($PDE = 180^\circ$) 条件下, 压力畸变和伴随的温度畸变强度 DI 在发动机中的变化情况。可以看出, 该发动机失稳发生于风扇且 $CPDI = 8.82\%$ 。压力畸变强度 PDI 在 6 截面和 10 截面出现了两个峰值, 分别为 8.53% 和 2.63%, 并且前者比后者大许多。伴随的温度畸变在风扇和压气机中其强度都不超过 2%。

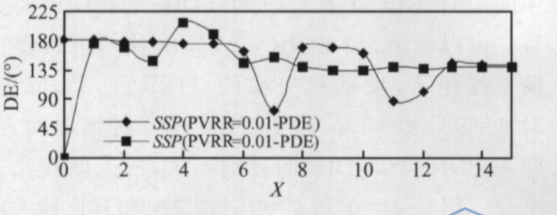


5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

图 2 稳态压力畸变作用下 DI 沿计算截面的变化

Fig.2 Change of the DI along the axis during the steady pressure distortion

描述畸变的另一个重要参数是畸变的周向范围 DE, 图 3 给出了与图 2 同样条件下的 DE 在发动机中的变化情况。可以看出, 压力畸变范围 PDE 在风扇中有所减小, 在压气机中又有所回升, 而伴随的温度畸变范围 TDE 呈现增加、衰减和相对保持不变的趋势。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

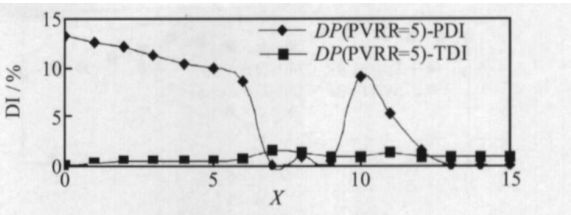
图 3 稳态压力畸变作用下 DE 沿计算截面的变化

Fig. 3 Change of the DE along the axis during the steady pressure distortion

1. 1. 2 动态压力畸变

这里讨论的动态压力畸变是指低压区的压力按某一个下降速率变化的压力畸变, 这种动态压力畸变不同于随机脉动和平面波式的动态压力畸变, 而非常类似于冲击波的负压段。计算和试验结果证明在发动机进口遭遇冲击波时, 冲击波的负压段对发动机稳定性的影响最大。图 4 表示动态压力畸变($PDE=180^\circ$ 、 $PVRR=5/s$)的压力畸变和伴随的温度畸变的 DI 在发动机中的变化情况。可以看出, 与稳态压力畸变的作用不同。此时发动机失稳的 PDI 为 13.32%, 大于稳态压力畸变的 $CPDI=8.82\%$ 。这是由于进口截面上的压力波传到风扇进口截面的时间延迟造成的。其次, 在 10 截面 PDI 也比稳态压力畸变时的值大, 达到了 9.05%。这表明动态压力畸变不仅影响风扇的稳定工作, 而且对高压压气机的影响也很大。伴随的温度畸变在风扇和压气机中其强度都不超过 2%, 这与稳态压力畸变时的情况一致。

图 5 表示同样条件下的 DE 在发动机中的变化情况。可以看出, PDE 在风扇中有所减小, 在



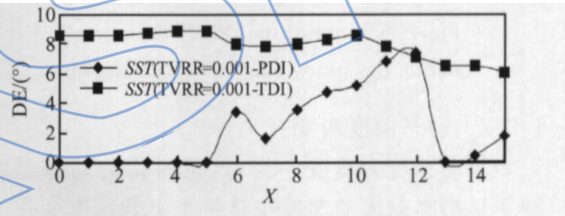
5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

图 4 动态压力畸变条件下 DI 沿计算截面的变化

Fig.4 Change of the DI along the axis during the dynamic pressure distortion

压气机中出现了微弱振荡现象。伴随的温度畸变在发动机中其 TDE 也呈现增加、衰减以及相对保持不变的趋势, 但在压气机中出现了 TDE 增大的现象, 这与 PDI 在压气机中的增大有关。

对不同 PVRR 的计算结果表明, 该发动机首先失稳的部件始终是风扇。因此, 根据 $CPDI=8.82\%$ 以及风扇的稳定裕度, 可以确定该发动机的压力畸变敏感系数为 $\alpha_{PLC}=2.608$ 。而且, 在压力畸变条件下该发动机的稳定工作能力主要取决于风扇抗压力畸变的能力大小。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

图 5 动态压力畸变条件下 DE 沿计算截面的变化

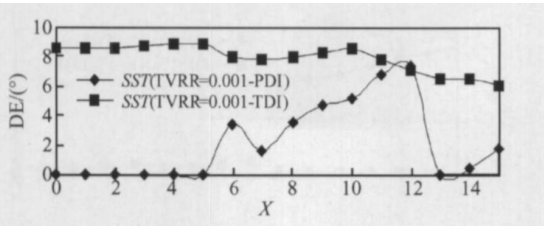
Fig. 5 Change of the DE along the axis during the dynamic pressure distortion

1. 2 温度畸变和临界温度畸变强度

1. 2. 1 稳态温度畸变及其临界值

类似于稳态压力畸变, 采用 $TVRR=0.0001/s$ 的准稳态温度畸变逐步逼近发动机的 CTDI。图 6 表示在临界温度畸变($TDE=180^\circ$)条件下, 温度畸变和伴随的压力畸变的 DI 在发动机中的变化情况。该发动机失稳发生于高压压气机且 $CTDI=8.60\%$ 。TDI 在风扇进、出口截面分别为 9.03% 和 7.97%, 在压气机进、出口截面分别为 8.63% 和 6.61%, 在风扇和压气机中温度畸变的 TDI 呈下降趋势。伴随的压力畸变在 6 截面和 12 截面出现两个峰值, 分别为 4.74% 和 7.44%, 并且后者比前者大。

图 7 表示同样条件下的 DE 在发动机中的变化情况。可以看出, TDE 在风扇和压气机中有所

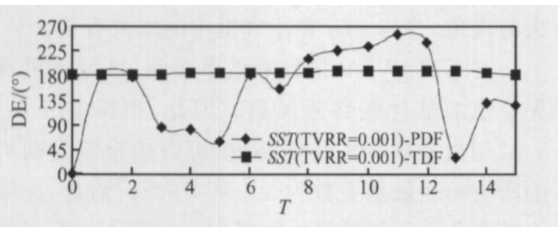


5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

图 6 稳态温度畸变条件下 DI 沿计算截面的变化

Fig. 6 Change of the DI along the axis during the steady temperature distortion

增加,这是由于温度扩散引起的。伴随的压力畸变 PDE 呈现增加、衰减以及进一步增加和衰减的趋势。



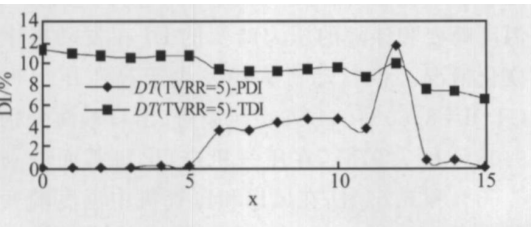
5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

图 7 稳态温度畸变条件下 DE 沿计算截面的变化

Fig. 7 Change of the DE along the axis during the steady temperature distortion

1. 2. 2 动态温度畸变

与动态压力畸变一样,这里讨论的动态温度畸变是指高温区的温度按某一个上升速率变化的温度畸变,这种动态温度畸变在实际飞行中会经常遇到。图 8 表示在动态温度畸变($PDE=180^\circ$ 、相对温升率 $TVRR=5/s$)条件下,温度畸变和伴随的压力畸变的 DI 在发动机中的变化情况。可以看出,与稳态温度畸变的作用不同,此时发动机失稳的 CTDI 为 11.29%,大于稳态的 $CTDI=8.60\%$,这是由于进口截面上的热波动传到压气机进口截面的时间延迟造成的。其次,在 12 截面伴随的压力畸变强度达到最大值 11.71%。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口

图 8 动态温度畸变条件下 DI 沿计算截面的变化

Fig. 8 Change of the DI along the axis during the dynamic temperature distortion

在同样条件下计算得到的 TDE 和 PDE 在发动机中的变化与稳态温度畸变条件下的结论基本一致。而且对不同 TVRR 的计算结果表明,该发动机首先失稳的部件始终是高压压气机。因此,根据 $CTDI=8.60\%$ 和高压压气机的稳定裕度,可以确定该发动机温度畸变敏感系数 $\alpha_{THC}=2.442$ 。由于高压压气机首先失稳,因此在温度畸变条件下该发动机的稳定工作能力主要取决于高压压气机抗温度畸变能力的大小。

1. 3 压力和温度组合畸变

为了深入研究压力和温度组合畸变对发动机稳定性的影响,本文针对三种 DE 的组合畸变进行了分析研究。

1. 3. 1 $DE=90^\circ$ 的组合畸变

图 9 表示了在 $DE=90^\circ$ 的组合畸变条件下,不同组合相位 Φ 所对应的 TDIR 与 PDIR 的关系。可以看出,当 $PDIR=0$,即单独的进口温度畸变作用下,发动机失稳的 $TDIR=105.56\%$ 。对 $\Phi=90^\circ$ 、 $\Phi=135^\circ$ 和 $\Phi=180^\circ$ 的三种情况而言,同一 PDIR 下,TDIR 的差别不大,三条曲线几乎重合。但是 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=45^\circ$ 的情况却有比较大的差别。当 $PDIR\leq 45\%$ 、 $\Phi=45^\circ$ 时,其 TDIR 比其它的 Φ 所对应的值大,并且大于进口畸变值。当 $PDIR\leq 65\%$ 、 $\Phi=0^\circ$ 时,其 TDIR 比其它的 Φ 所对应的值小。当 $PDIR\geq 65\%$ 、 $\Phi=45^\circ$ 时,其 TDIR 比其它的 Φ 所对应的值小。

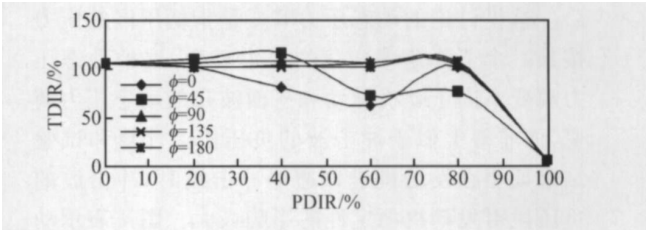
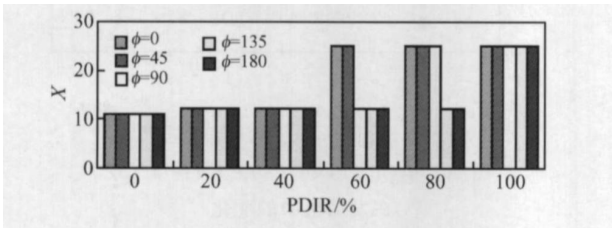


图 9 $DE=90^\circ$ 的组合畸变条件下 TDIR 与 PDIR 的关系

Fig. 9 TDIR vs PDIR during the combined distortion($DE=90^\circ$)

图 10 表示在相同组合畸变条件下,不同 Φ 所对应的速度为负值的截面位置 X 与 PDIR 的关系。可以看出,当 $PDIR\leq 40\%$,对所有的 Φ 来说,负速度出现在 11 或 12 截面,即压气机首先失稳。当 $PDIR=60\%$ 、 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=45^\circ$ 时,负速度出现在 25 截面,即风扇首先失稳。而对其他的 Φ 来说,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳。当 $PDIR=80\%$ 、 $\Phi=135^\circ$ 和 $\Phi=180^\circ$ 时,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳,对其他的 Φ 来

说,负速度出现在 25 截面,即风扇首先失稳。而当 $PDIR=100\%$, 对所有的 Φ 来说,负速度出现在 25 截面,即风扇首先失稳。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 10 $DE=90^\circ$ 的组合畸变条件下 $PDIR$ 与负速度截面位置 X 的关系

Fig. 10 $PDIR$ vs the axis station where the velocity is negative during the combined distortion($DE=90^\circ$)

1.3.2 $DE=180^\circ$ 的组合畸变

图 11 表示了在 $DE=180^\circ$ 的组合畸变条件下,不同 Φ 所对应的 $TDIR$ 与 $PDIR$ 的关系。可以看出,当 $PDIR=0$,即单独的温度畸变作用下,使发动机失稳的 $TDIR=100\%$ 。对 $\Phi=180^\circ$ 而言,在整个 $PDIR$ 范围内, $TDIR$ 比其他的组合相位所对应的值大,并且在 $PDIR\leq 62\%$ 时, $TDIR$ 大于进口畸变值。当 $PDIR\leq 60\%$ 、 $\Phi=0^\circ$ 的 $TDIR$ 比其他的组合相位所对应的值小。当 $PDIR\geq 60\%$ 、 $\Phi=45^\circ$ 的 $TDIR$ 比其他的组合相位所对应的值小。

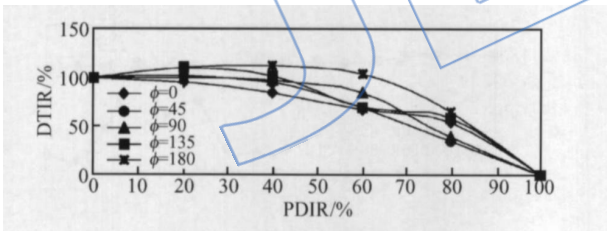
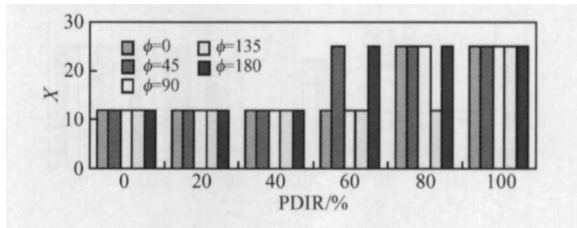


图 11 $DE=180^\circ$ 的组合畸变条件下 $TDIR$ 与 $PDIR$ 的关系

Fig. 11 $TDIR$ vs $PDIR$ during the combined distortion($DE=180^\circ$)

图 12 表示在相同组合畸变条件下,不同 Φ 所对应的速度为负值的截面位置 X 与 $PDIR$ 的关系。可以看出,当 $PDIR\leq 40\%$, 对所有的 Φ 来说,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳。当 $PDIR=60\%$ 、 $\Phi=45^\circ$ 和 $\Phi=180^\circ$ 时,负速度出现在 25 截面,即风扇首先失稳,而对其他的 Φ 而言,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳。当 $PDIR=80\%$ 、 $\Phi=135^\circ$ 时,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳,而对其他的 Φ 而言,负速

度出现在 25 截面,即风扇首先失稳。当 $PDIR=100\%$, 对所有的 Φ 来说,负速度出现在 25 截面,即风扇首先失稳。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 12 $DE=180^\circ$ 的组合畸变条件下 $PDIR$ 与负速度截面位置 X 的关系

Fig. 12 $PDIR$ vs the axis station where the velocity is negative during the combined distortion($DE=180^\circ$)

1.3.3 $DE=270^\circ$ 的组合畸变

图 13 表示了在 $DE=270^\circ$ 组合畸变条件下,不同 Φ 所对应的 $TDIR$ 与 $PDIR$ 的关系。可以看出,当 $PDIR=0$,即单独的温度畸变作用下,使发动机失稳的 $TDIR=104.37\%$ 。对所有的 Φ 来说,在整个 $PDIR$ 范围内, $TDIR$ 都小于进口温度畸变值。对同一 $PDIR$ 来说,不同 Φ 所对应的 $TDIR$ 之间的差异不大,只是 $\Phi=0^\circ$ 的情况较为特殊,当 $PDIR>40\%$,以 $PDIR=70\%$ 为分界点出现了 $TDIR$ 比其他的 Φ 所对应的值有较明显的小或大的现象。

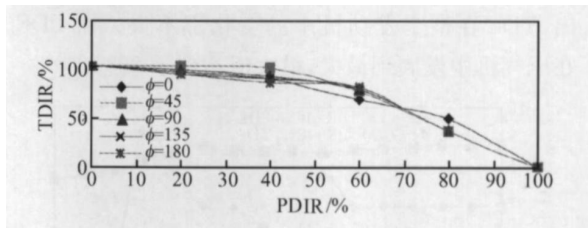
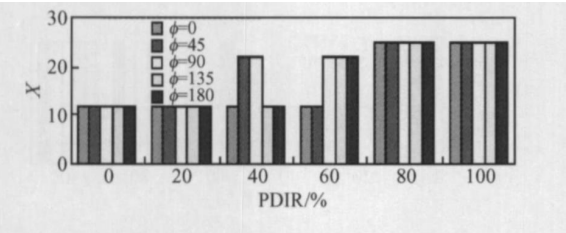


图 13 $DE=270^\circ$ 的组合畸变条件下 $TDIR$ 与 $PDIR$ 的关系

Fig. 13 $TDIR$ vs $PDIR$ during the combined distortion($DE=270^\circ$)

图 14 表示在相同组合畸变条件下,不同 Φ 所对应的速度为负值的截面位置 X 与 $PDIR$ 的关系。可以看出,当 $PDIR\leq 20\%$, 对所有的 Φ 来说,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳。当 $PDIR=40\%$ 、 $\Phi=40^\circ$ 和 $\Phi=135^\circ$ 时,负速度出现在 22 截面,即风扇首先失稳,而对其它的 Φ 来说,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳。当 $PDIR=60\%$ 、 $\Phi=0^\circ$ 和 $\Phi=45^\circ$ 时,负速度出现在 12 截面,即压气机首先失稳,而对其他的 Φ 来

说,负速度出现在 22 截面,即风扇首先失稳。当 $PDIR=80\%$ 和 $PDIR=100\%$ 时,对所有的 Φ 来说,负速度出现在 25 截面,即风扇首先失稳。



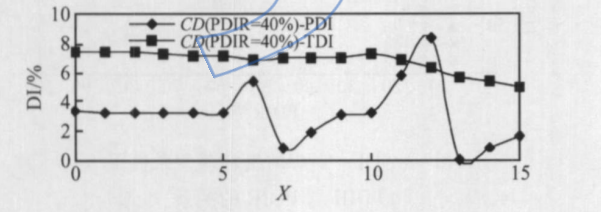
5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 14 $DE=270^\circ$ 的组合畸变条件下 $PDIR$ 与负速度截面位置 X 的关系

Fig. 14 $PDIR$ vs the axis station where the velocity is negative during the combined distortion($DE=270^\circ$)

1. 3. 4 畸变传递

为了分析组合畸变在发动机中的传递情况,本文给出了最典型的 $DE=180^\circ$ 、 $\Phi=0^\circ$ 的组合畸变的研究结果。

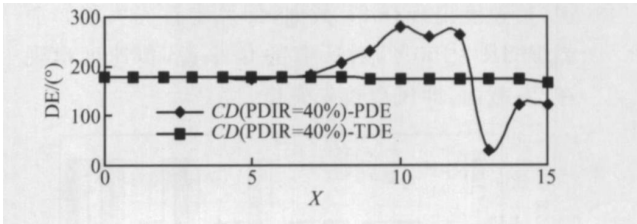
图 15 和图 16 表示在 $PDIR=40\%$ 的条件下,压力畸变和温度畸变在发动机中的发展情况。从图 15 中可以看出,TDI 在发动机中的变化趋势与单独的稳态温度畸变条件下的 TDI 变化趋势一致。而 PDI 在 6 截面和 12 截面出现了两个峰值,分别为 5.46% 和 8.43%,并且后者比前者大,这是压气机首先失稳的特征现象。从图 16 中还可以看出,TDE 在整个发动机中的变化都不大。而 PDE 在压气机中发展到最大,最大值达到了 263° 。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 15 $\Phi=0^\circ$ ($PDIR=40\%$) 条件下 DI 在发动机中的变化

Fig. 15 Change of DI along the axis ($\Phi=0^\circ$ $PDIR=40\%$)

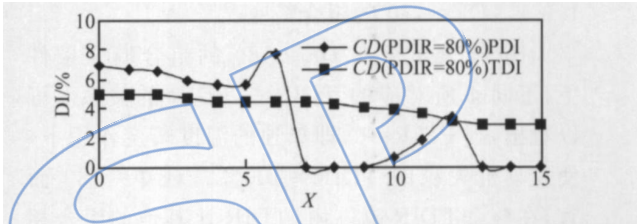
图 17 和图 18 表示在 $PDIR=80\%$ 的条件下,压力畸变和温度畸变在发动机中的发展情况。从图 17 中可以看出,TDI 在发动机中的变化趋势与单独的稳态温度畸变条件下的 TDI 变化趋势一致。而 PDI 在 6 截面和 12 截面出现了两个峰值,分别为 7.73% 和 3.47%,并且前者比后者大,这



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 16 $\Phi=0^\circ$ ($PDIR=40\%$) 条件下 DE 在发动机中的变化

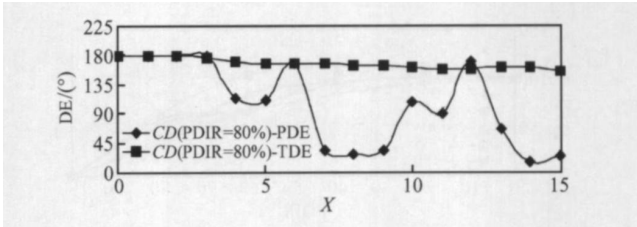
Fig. 16 Change of DE along the axis ($F=0^\circ$ $PDIR=40\%$)

是风扇首先失稳的特征现象。从图 18 中还可以看出,TDE 在整个发动机中的变化都不大。而 PDE 在发动机中的变化较大,同样在 DI 峰值的截面上出现了峰值。



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 17 $\Phi=0^\circ$ ($PDIR=80\%$) 条件下 DI 在发动机中的变化

Fig. 17 Change of DI along the axis ($\Phi=0^\circ$ $PDIR=80\%$)



5, 7 风扇进出口; 10, 13 压气机进出口
图 18 $\Phi=0^\circ$ ($PDIR=80\%$) 条件下 DE 在发动机中的变化

Fig. 18 Change of DE along the axis ($\Phi=0^\circ$ $PDIR=80\%$)

因此,可以根据风扇截面和压气机截面上 PDI 的相对大小,来确定发动机稳定工作的临界级,当 DI 相对最大值出现在风扇截面时,风扇首先失稳,反之则压气机失稳。

1. 3. 5 组合影响系数

组合畸变对发动机稳定性影响的组合敏感系数 α_c 定义为:

$$\alpha_c = \frac{\Delta SM - (\alpha_P \times PDI + \alpha_T \times TDI_{PDI})}{PDI + TDI_{PDI}}$$

式中 ΔSM 表示发动机的稳定裕度, α_P 和 α_T 分别表示压力和温度畸变单独作用时的敏感系数, TDI_{PDI} 表示在 PDI 作用下使发动机失稳的最小进口温度畸变强度。组合敏感系数 α_c 一方面表示组合畸变对发动机稳定性的影响程度, 另一方面也表示压力畸变和温度畸变之间的相互影响, 当 $\alpha_c > 0$ 时, 相互影响加强; 当 $\alpha_c < 0$ 时, 相互影响减弱。为了确定发动机的组合敏感系数, 本文给出了最典型的一种组合畸变 ($DE = 180^\circ$) 的研究结果。

图 19 表示风扇的组合敏感系数 α_{LCC} 与 PDIR 的关系。可以看出, 在整个 PDIR 变化范围内, 压力和温度的相互影响都是加强的, 对所有的 Φ 来说, 该影响之间的差异不大。当 $\Phi = 0^\circ$ 时, 相互影响最大, 其最大值为 1.840。

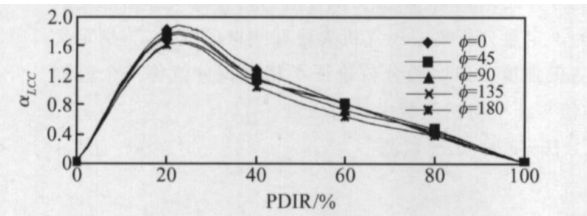


图 19 组合影响系数 α_{LCC} 随 PDIR 的变化

Fig. 19 Combined distortion effect coefficient α_{LCC} vs PDIR

图 20 表示压气机的组合敏感系数 α_{HCC} 与 PDIR 的关系。可以看出, 当 $\Phi = 180^\circ$ 时, $PDIR < 62\%$ 时的压力和温度的相互影响减弱, 而 $PDIR > 62\%$ 时的压力和温度的相互影响加强。其余的 Φ 与 $\Phi = 180^\circ$ 的情况类似, 在某些 PDIR 范围内, 相互影响减弱, 在另一些 PDIR 范围内, 相互影响加强。最特殊的情况是 $\Phi = 0^\circ$, 即低压区和高温区重合时, 在整个 PDIR 变化范围内, 相互影响都是加强的。

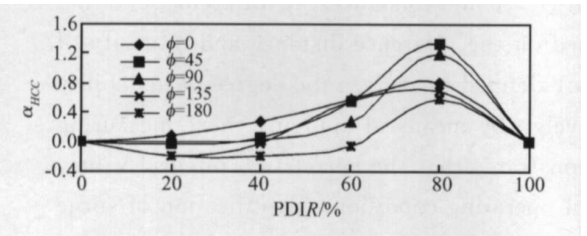


图 20 组合影响系数 α_{HCC} 随 PDIR 的变化

Fig. 20 Combined distortion effect coefficient α_{HCC} vs PDIR

2 结 论

在 $\bar{n}_{LCnp} = 90\%$ 状态下进行的压力畸变、温度畸变以及压力和温度组合畸变对某新型涡轮风扇

发动机稳定性影响的数值研究表明:

该发动机的 $CPDI = 8.82\%$, 压力畸变敏感系数为 $\alpha_{PLC} = 2.608$, 在单独的压力畸变条件下该发动机的稳定工作能力主要取决于风扇抗压力畸变能力的大小。

该发动机的 $CTDI = 8.60\%$, 温度畸变的敏感系数为 $\alpha_{HC} = 2.442$, 在单独的温度畸变条件下该发动机的稳定工作能力主要取决于压气机抗温度畸变能力的大小。

对 $DE = 90^\circ$ 、 $DE = 180^\circ$ 和 $DE = 270^\circ$ 的三种组合畸变的研究显示, PDI 较大的组合畸变, 对风扇的稳定性影响较大, 失稳主要发生在风扇中。而 TDI 较大的组合畸变, 对压气机的稳定性影响较大, 失稳主要发生在压气机中。随着 DE 的增大, 不同 Φ 的组合畸变对发动机稳定性影响的差异减小。

组合畸变在发动机中传递的分析结果表明, 可以根据风扇截面和压气机截面上 PDI 的相对大小来确定发动机系统的临界级, 当相对最大值出现在风扇截面时, 风扇首先失稳, 反之则压气机失稳。

对风扇来说各种组合畸变的相互影响都是加强的, 而对压气机来说组合畸变的相互影响或者加强, 或者减弱, 这与 Φ 和 PDI 的大小有关。但是对 $\Phi = 0^\circ$ 的组合畸变来说, 无论是对风扇还是对压气机这种相互影响都是加强的, 因此, 压力和温度组合畸变对发动机稳定性的影响, 不是二者单独影响的简单相加, 而是一种非常复杂的非线性关系。

参考文献:

[1] GJB/Z64 2003. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机进口总压畸变评定指南[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2003 年 12 月.

[2] 刘大响, 叶培梁, 胡骏, 等. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004 年 6 月.

[3] Graber E J, Braithwaite W M. Summary of recent investigations of inlet flow distortion effects on engine stability [R]. AIAA Paper74-236, 1974.

[4] Abdelwahab M. Effects of temperature transients at fan inlet of a turbofan engine[R]. NASA TP-1031, 1977.

[5] Brithwaite W M, Soeder R H, Combined pressure and temperature distortion effects on internal flow of a turbofan engine[R]. AIAA Paper79-1309, 1979.

[6] Soeder R H, Bobula G A. Effects of steady-state temperature and combined distortion on Inlet flow to a turbofan engine[R]. NASA TM-79237, 1979.

[7] Soeder R H, Mehlic C M. Effect of combined pressure and temperature distortion orientation on high bypass ratio turbofan engine stability[R]. NASA TM-83771, 1984.