

文章编号: 10028055(2009)112403207

进口动态总压流场对燃机稳定性裕度影响

李孝堂^{1,2}, 王 勤², 薛秀生², 王 亮², 邢志国², 王洪祥²
(11 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;
21 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为了得到某燃机发生喘振的原因, 在燃机进口进行了动态流场测试, 对流场中存在的较大涡旋尺度、较大瞬间动态压力畸变以及与进口涡壳共振产生的转速基频脉动等动态流场特点进行了详细研究, 获得了进口动态总压流场特点. 试验数据和资料分析表明: 进口动态流场的特点使发动机稳定裕度损失加大, 从而造成发动机喘振.
关 键 词: 发动机试验; 进口流场; 动态压力; 稳定性裕度
中图分类号: V231.3 文献标识码: A

Influence of inlet dynamic total pressure flow field on
gas turbine engine stability margin

LI Xiaotang^{1,2}, WANG Qin², XUE Xiusheng², WANG Liang²,
XING Zhiguo², WANG Hongxiang²
(11 School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
21 Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Gas turbine inlet dynamic total pressure flow field was measured to analyze the reason of surges happened during previous engine tests. Inlet flow field characteristics were obtained such as larger eddy scale and higher instant pressure distortion and pressure fluctuation associated with rotor speed base frequency which caused by the resonance of the engine and the inlet scroll case etc. Experimental data and information show that inlet dynamic flow field characteristics of the above mentioned will make the engine increase the loss of stability margin and result in the engine surge.

Key words: engine test; inlet flow field; dynamic pressure; stability margin

符号表		S_m	稳定裕度损失(%)
N_g	燃机转速(r/ min)	W	综合畸变指数(%)
$S_{p_{irms}}$	动态总压测点均方根值(Pa)	A	进口测量截面面积(m ²)
p_i	动态压力测点总压(Pa)	W_c	发动机换算流量(kg/ s)
S_{R_0}	稳态畸变指数(%)	A_t	可调叶片转角(b)
E_{av}	动态畸变强度(%)	$R(S)$	自相关函数
E_i	各测量点总压脉动强度(%)	p_{3m}	压气机出口脉动压力(Pa)
S_e	涡旋尺度(ms)		

发动机进口流场品质对发动机的稳定裕度具有重要影响,不同的畸变和扰动对发动机稳定裕度的影响程度是发动机稳定性研究中的关键技术.在国内已大量地开展了压力、温度及压力温度组合畸变对发动机稳定裕度的影响研究,但进口动态畸变流场中的涡旋尺度和特定频率的周期脉动等对发动机稳定性裕度的影响开展的还较少.

某燃机在耐久性试车阶段,出现了在燃机转速 $N_g=12000\text{r/min}$ 附近上推过程中几次喘振的现象.由于侧向进气蜗壳系统设计完成后并未进行过吹风试验,怀疑进口流场可能有较大动态总压畸变,存在气流的较大分离产生的涡旋,减小了发动机的稳定性裕度.因此在发动机进口进行了动态流场测试,以揭示进口动态流场品质和特征,研究进口流场是否存在动态总压畸变、是否存在较大的涡旋及压力脉动频率特征,并掌握流场动态畸变强度、涡的大小和分布及脉动频率变化情况,以利于喘振原因分析和进气蜗壳改进.

1 进口动态流场测试系统

1.1 测点分布

燃机进口动态总压畸变测量为 6 支单点动态总压探针,均匀分布在进气机匣气动测量截面相对半径 $r=0.9$ 处的环面上,具体测量位置分布如图 1 所示.

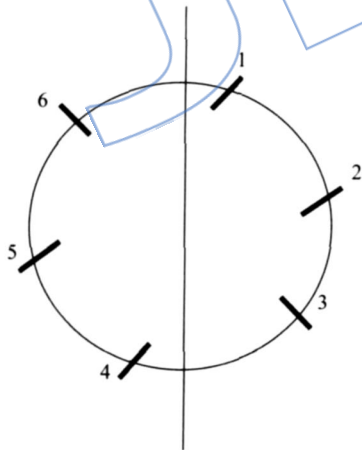


图 1 进口动态总压测点分布(逆航向观看)
Fig. 1 Distribution of inlet dynamic total pressure measuring points (aft)

1.2 测试系统

进口动态总压测试分析系统由动态压力受感部(含动态压力传感器)、直流信号调理器、高速数据采集及计算机组成,如图 2 所示.通过软件处

理得到 $T \setminus 5\text{s}$ 时间内,在各稳定状态下气动界面上的各测点的总压脉动强度、平均总压脉动强度及涡旋尺度.

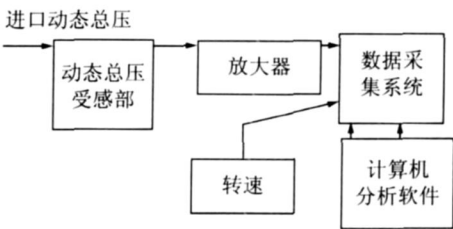


图 2 动态测试分析系统原理框图
Fig. 2 Schematic of dynamic measurement and analysis system

2 畸变流场测试数据处理方法

2.1 各测点均方根值 $\$p_{irms}$ 计算

各测点均方根值 $\$p_{irms}$ 的计算式如下:

$$\$p_{irms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_{ij} - p_{iav})^2} \tag{1}$$

式中 n 为采样时间 T 内的采样点数, p_{ij} 为第 i 测点动态总压, p_{iav} 为第 i 测点总压平均值.

2.2 各测点 E 的计算

各测点总压脉动强度 E 的计算

$$E = \$p_{irms} / p_{iav} \tag{2}$$

2.3 平均总压脉动强度的计算

平均总压脉动强度用 $\bar{r}=0.9$ 处环面各测点总压脉动强度的平均值 E_v 表示

$$E_v = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 E \tag{3}$$

2.4 流场涡旋尺度的计算

在紊流理论中,紊流是由无数个大小不同的涡旋组成的,涡旋尺度是对紊流场中涡旋大小的度量.本文用涡旋的时间相关尺度(以下简称涡旋尺度)对畸变流场中各测点涡旋的变化进行计算与分析,其计算公式如下:

$$S = \frac{\int_0^1 R(S) dS}{R(0)} = \frac{\int_0^1 Q(S) dS}{Q(0)} \tag{4}$$

2.5 流场综合畸变指数 W 的计算

流场综合畸变指数 W 按下式计算:

$$W = E_v + \$R \tag{5}$$

3 进口动态流场数据分析

以下通过对进口流场各测点总压脉动强度、平均总压脉动强度及流场数据的时、频域统计分析, 揭示了进口流场的主要品质. 为进一步分析其对发动机稳定裕度损失的影响奠定了基础.

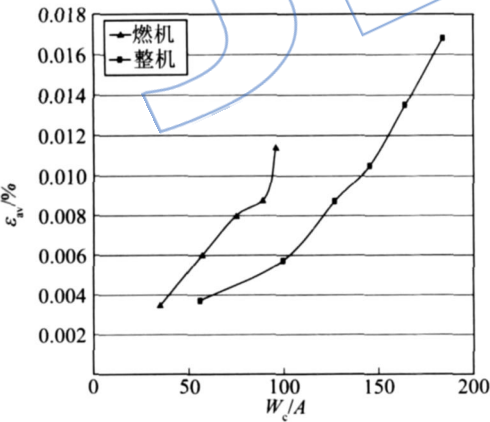
3.1 平均总压脉动强度分析

燃机在部分转速下进口流场的动态畸变强度(平均总压脉动强度) 如表 1 所示.

表 1 部分转速下进口流场动态畸变强度
Table 1 Dynamic total pressure distortion intensity at several rotational speeds

$N_g/(r/min)$	进口流场动态畸变强度 $E_{av}/\%$
9 700	0.3~0.4
11 720	0.6~0.7
12 000	0.8
12 470	0.9
12 740	1.0~1.3

通过对比分析其它发动机准均匀进口流场和该燃机进口流场动态压力测试数据, 获得了其它发动机准均匀进口流场和燃机进口流场动态畸变强度随流量系数的变化关系, 如图 3 所示. 从图中可以看出燃机进口流场动态畸变强度在相同流量系数下比其它发动机准均匀进口流场偏高.



12 740 r/min 左右不均匀性较大, 测量的 5, 6 点位置, 存在较大瞬态扰动, 测点瞬态总压脉动强度可达 3%~ 9%, 且其分布曲线较大偏离正态分布, 说明进口流场存在瞬间较大扰流. 该扰流在进口产生的波动对高压 2 级、4 级略有影响, 以 12 740 r/min 为例, 产生影响时的 2 级瞬态总压脉动强度在 1% 左右, 4 级瞬态总压脉动强度在 0.6% 左右, 波形如图 4 所示.

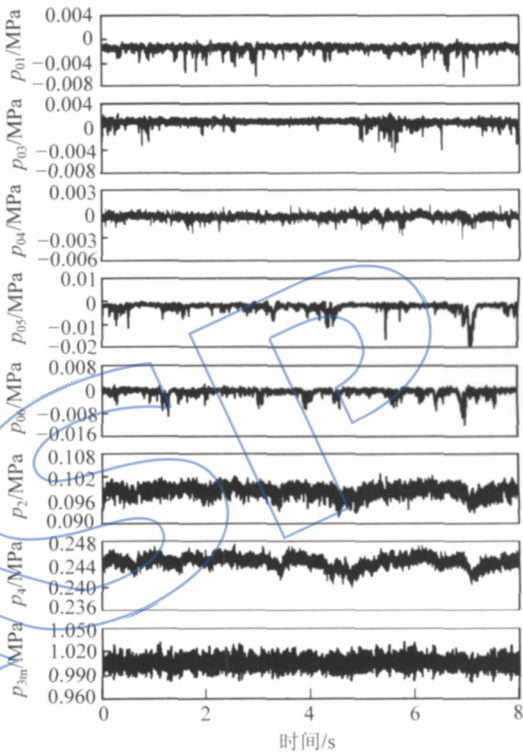


图 4 12 740 r/min 进口瞬间扰流时各测点动态压力时域波形

Fig. 4 Time-domain waveform of all inlet dynamic pressure points at 11700 r/min

3.1.3 涡旋尺度分析

针对燃机在 $N_g=12000r/min$ 附近上推过程发生过进喘的情况, 分析对比了流场涡旋尺度的大小, 如图 5 所示. 图 5 为 $N_g=11700, 12350, 12740r/min$ 进口流场涡旋尺度大小分布, 其中 $N_g=12350, 12740r/min$ 因第 2 测点坏, 第 2 测点为假数据点.

采用相同算法对某压气机试验数据进行分析, 进口为挡板产生的畸变流场时 S_e 为 0.3~2 ms 左右^[1]. 通过比较, 燃机进口流场涡旋尺度量级上比某压气机进口畸变流场涡旋尺度偏大且分布范围较大. 以 $N_g=11700r/min$ 为例, 涡旋尺度 S_e 出现在约 3~16ms, 说明流场内因分离而存在

图 3 两型进口动态畸变强度随流量系数的变化关系
Fig. 3 Relationship of dynamic total pressure distortion intensity and flow coefficient for two types of engines

3.1.2 各测点总压脉动强度分析

通过对燃机进口流场各测点总压脉动强度的计算分析, 发现流场总压脉动强度在 $N_g=11700\sim$

较大的涡旋,且流场中包含的涡旋尺度范围较宽,流场不均匀性较强.

以 $N_g=11\,700\text{ r/min}$ 为例,考察燃机进口流场中各测点动态压力幅值的分布函数情况,如图 6 所示,从分布函数可以看出,5、6 测点分布函数偏离正态分布较明显,与其涡旋尺度较大相关.

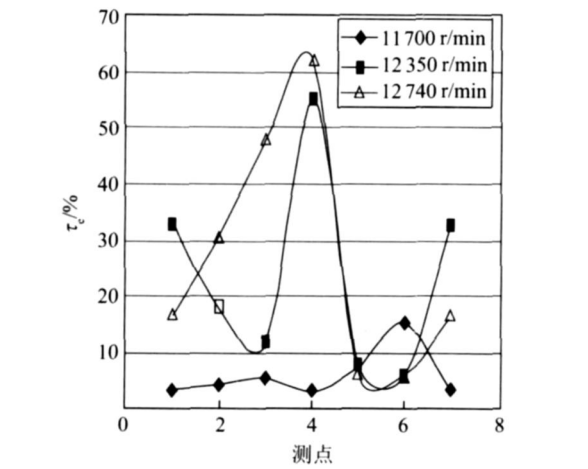


图 5 几个转速下进口流场涡旋尺度分布
Fig. 5 Distribution of inlet flow field eddy scale at several rotational-speeds

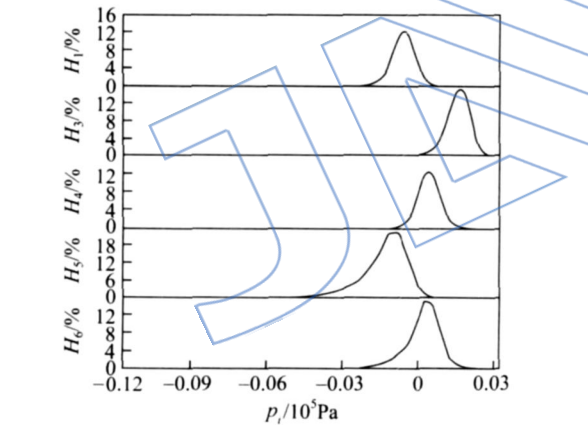


图 6 $N_g=11\,700\text{ r/min}$ 各测点分布函数曲线
Fig. 6 Distribution function curves of all measurement points at $11\,700\text{ r/min}$

31 4 频率特征分析

对进口流场动态总压进行频域分析,发现在 $N_g=12\,000\text{ r/min}$ 附近进口流场各测点压力信号中存在相对量级较大的转速基频分量,与在正常情况下压气机和整机试验的进口动态总压频谱特征不同,如图 7 所示.随着转速上推,转速基频成分经历了从小到大,又从大到小的过程,如图 8 所示.

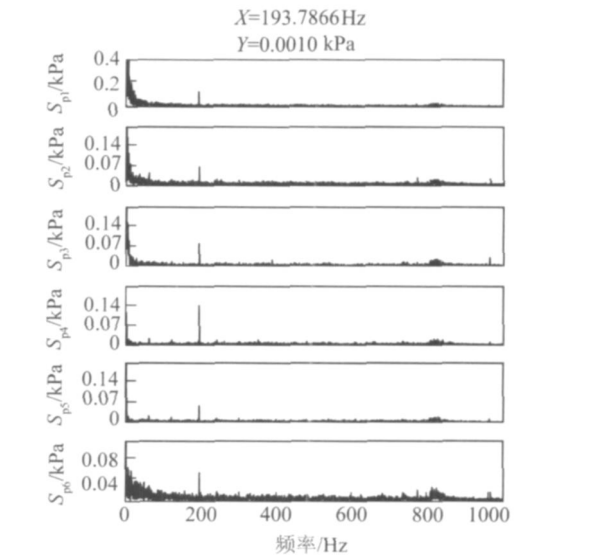


图 7 $N_g=11\,580\text{ r/min}$ 时进口动态总压频谱
Fig. 7 Frequency spectrum of inlet dynamic total pressure at $11\,580\text{ r/min}$

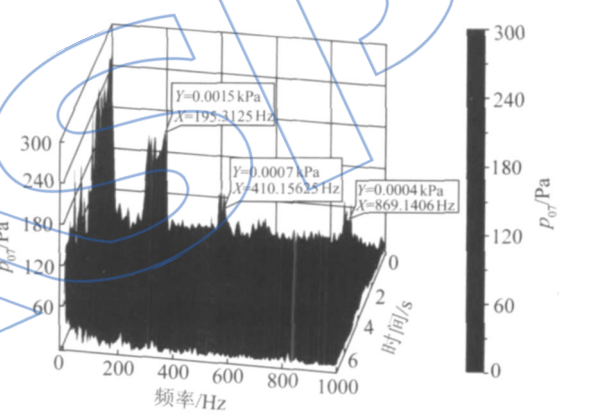


图 8 $N_g=11\,718\sim12\,060\text{ r/min}$ 上推过程进口动态测点频谱变化
Fig. 8 Frequency spectrum change of inlet dynamic total pressure from $11\,718\text{ r/min}$ to $12\,060\text{ r/min}$

而在 $N_g=12\,740\text{ r/min}$ 附近时进口动态总压频谱没有明显的特有频率,如图 9 所示与发动机试验正常进口流场频谱特征相同.

为分析进口流场转速基频原因,在进口蜗壳上进行了振动测试,发现存在一个 200 Hz 左右的振动频率,且在 $N_g=12\,000\text{ r/min}$ 附近出现较大的峰值,如图 10 所示.通过对测试数据的研究,基本确定为进气蜗壳与气流产生共振,造成进口流场各测点压力信号在共振转速附近产生明显转速基频分量的气流脉动.

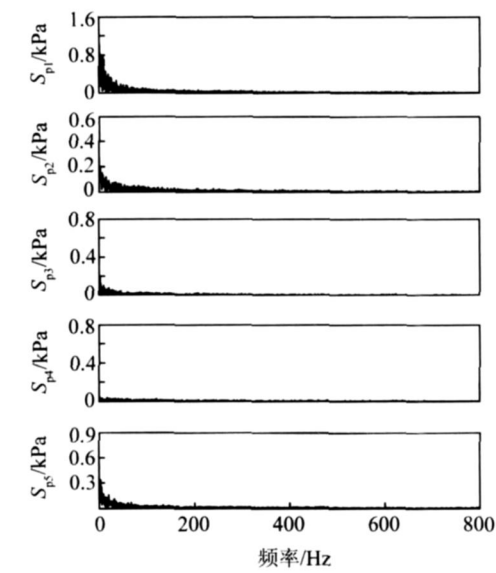


图 9 12740 r/min 进口动态总压频谱

Fig. 9 Frequency spectrum of inlet dynamic total pressure while $N_g=12740$ r/min

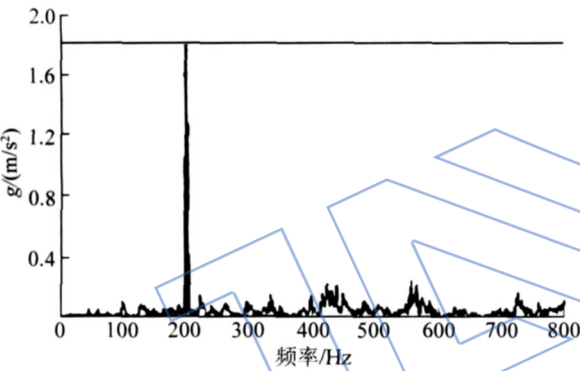


图 10 $N_g=11925$ r/min 时蜗壳振动频谱

Fig. 10 Vibration spectrum of volute while $N_g=11925$ r/min

4 进口流场特征对稳定裕度损失影响分析及试验验证

4.1 总压脉动强度瞬态变化对稳定裕度损失影响

根据对部件和整机试验进口流场的分析经验,虽然在相近进口流量系数下,该燃机进口的动态畸变强度略高于其它发动机机准均匀进口流场(如图 3),但在 $N_g=12000$ r/min 左右时,动态畸变强度 E_w 为 0.6%~0.7%, S_R 为 0.1%~0.2%,综合畸变指数 W 为 0.7%~0.8%,因此单纯从俄罗斯畸变评定方法的动态畸变强度和综合畸变指数考虑,可能不会对发动机稳定性带来影响。

从另一方面分析,英美在衡量动态畸变影响

时,考虑到了瞬态最大畸变指数及其持续时间^[23]。而燃机进口流场中存在的瞬态总压脉动强度较大(3%~9%)的现象,对发动机的稳定性裕度损失是有影响的^[4]。图 11、图 12 是发动机在

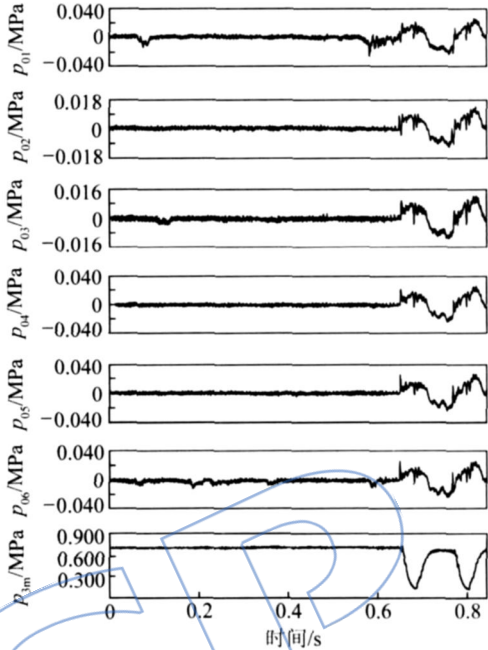


图 11 第一组喘前动态压力测试波形

Fig. 11 First set of dynamic pressure waveform before surge

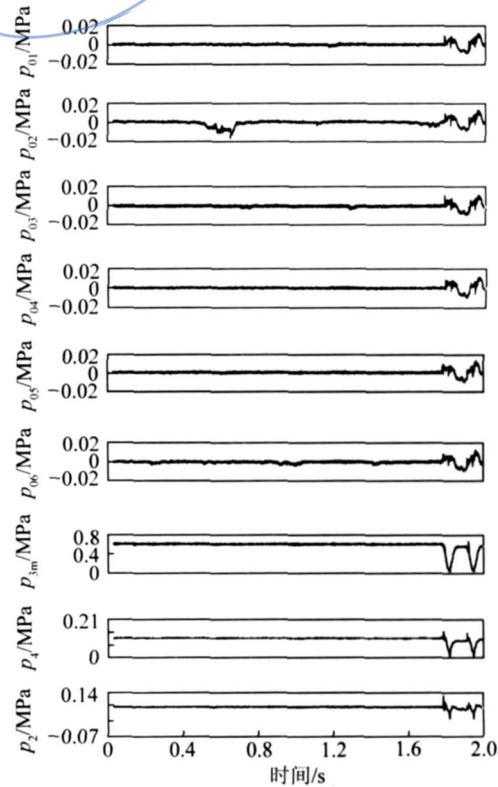


图 12 第二组喘前动态压力测试波形

Fig. 12 Second set of dynamic pressure waveform before surge

$N_g = 12000\text{r/min}$ 左右上推过程进喘时的两组进口总压和压气机动态压力测试波形. 从图中可以看出, 两次进喘前都遇到局部瞬态扰动情况出现. 在分析第一组数据时, 考虑到对燃机稳定性敏感的最大畸变峰值可能持续的时间, 在 $5\sim 10\text{ms}$ 左右时间对总压脉动强度进行了分别计算. 计算结果显示, 在距喘前失速 40ms 左右时, p_{01} 测点出现最大总压脉动强度达 91.2% 左右 (10ms 计算), 这是否说明喘前在进口产生了足够强度的对发动机敏感的涡旋, 有待进一步探讨.

4.2 涡旋尺度大小对稳定裕度损失影响

燃机进口流场涡旋尺度分布不均且经对比有偏大的涡旋存在, 经过对国内外有关试验和计算数据研究表明, 进口流场涡旋尺度范围不同, 对发动机稳定性裕度带来影响不同. 在国内压气机试验研究的对外合作中, 进行过进口加蜂窝网和不加蜂窝网结构的压气机稳定裕度试验对比, 结果前者比后者提高近 $10\%\sim 20\%$.

另外俄罗斯的有关计算文章^[5]表明, 相同涡旋尺度情况下, 不同总压脉动强度对稳定裕度损失产生不同影响, 如图 13. 在一定总压脉动强度下不同涡旋尺度范围对稳定裕度损失产生不同影响, 且呈较大非线性, 如图 14. 当 S 从 $0.5\sim 210\text{ms}$ 变化时, 稳定裕度损失 ΔS_m 在 $7\%\sim 37\%$ 范围内变化. 虽未经试验验证, 但从压气机试验到理论计算分析, 此数据基本表明了进口流场中较大涡旋尺度范围的变化带给稳定裕度损失变化的量级.

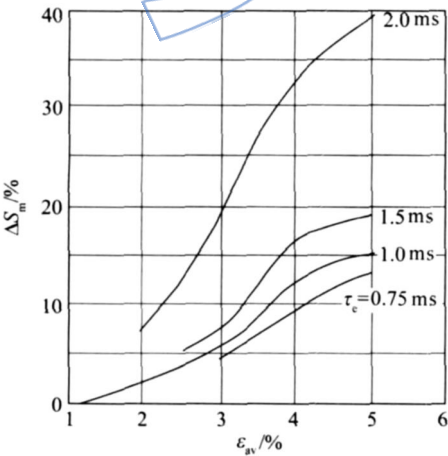


图 13 E_v 对发动机稳定裕度损失影响

Fig. 13 Influence of E_v on engine stability margin loss

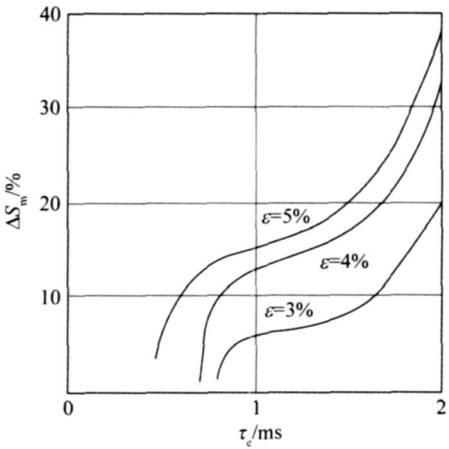


图 14 涡旋尺度范围对稳定裕度损失的影响

Fig. 14 Influence of S range on engine stability margin loss

4.3 进口转速基频脉动对稳定裕度损失的影响

在国内开展过进口旋流畸变试验研究, 研究证明当进口流场存在某一明显的特定频率的周期脉动时, 对于不同的发动机, 会最大造成 $10\%\sim 20\%$ 的稳定裕度损失. 进口总压脉动功率谱密度和稳定裕度损失与进口周期脉动频率的关系, 有如图 15 的关系曲线^[5], 即发动机稳定裕度损失与进口某一频率存在共振关系, 其中 f_0 为共振频率, 且是与发动机特性相关联的特有频率, $f_1\sim f_2$ 为此共振系统的通过频带, 在此通过频带中的进口频率脉动对稳定裕度损失产生的影响都接近最大.

国外的大量试验研究表明, 影响发动机稳定

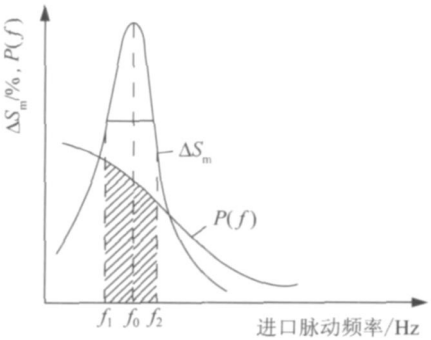


图 15 进口总压脉动功率谱密度与稳定裕度损失之间的关系

Fig. 15 Relationship of inlet dynamic total pressure power spectrum density and stability margin loss

性的频率刚好与压气机转子的工作转速相当^[6]. 分析燃机进口流场数据, 进口流场动态总压和进口蜗壳在 $N_g = 12\,000\text{ r/min}$ 附近都出现 200 Hz 左右的脉动和振动峰值, 根据上述分析, 作用在进口流场中的这一周期脉动势必带来发动机稳定裕度损失的加大.

4.4 部件试验验证

在该燃机的调试和耐久性试验中, 为了提高发动机的气动性能和改善其可靠性, 对其压气机的可调导叶角度进行了优化, 但在耐久性试验中, 于 $N_g = 12\,000\text{ r/min}$ 附近压气机曾几次发生了喘振, 因此为了验证优化后在物理转速 $12\,000\text{ r/min}$ 附近状态时的压气机稳定性裕度, 进行了不带侧向进气蜗壳的均匀流场下其压气机试验件的试验验证.

此次试验结果表明: 在保证压气机可调导叶角度与燃机最终状态一样的情况下, 各个转速的喘振裕度都基本达到甚至超过了 15% , 且在该燃机耐久性试验中, 曾发生过喘振的状态, 其稳定性裕度仍足够大为 161% .

研究燃机稳定裕度损失的原因, 上述两项试验最大的不同在于进气流场条件不同. 燃机耐久性试验中进口动态总压场存在的三个主要特征的产生都与进气流场条件直接相关.

进口流场中出现的 200 Hz 左右的周期脉动、较大的瞬态总压脉动强度、较大的涡旋尺度范围, 都可能会造成稳定裕度损失; 而在 $N_g = 12\,000\text{ r/min}$ 附近, 更大程度的稳定裕度损失与进口总压的上述三个特征同时出现有直接的关系, 使发动机工作在喘振边界附近.

5 结 论

通过以上对该燃机在耐久性试验中进口动态总压流场的测试和详细分析, 以及与发动机稳定裕度损失的关联, 主要得出以下几点结论:

1) 在进口流量系数相近情况下, 燃机进口的动态畸变强度虽略高于其它发动机进口准均匀流场, 但在 $12\,000\text{ r/min}$ 附近时, 动态畸变强度 E_w 小于 1% , 综合畸变指数 W 也小于 1% , 单纯从畸变指数分析, 可能不会对发动机稳定裕度带来较大损失.

2) 在 $11\,700 \sim 12\,740\text{ r/min}$ 左右进口总压脉动强度不均匀性较大, 存在较大瞬态畸变, 在敏感

持续时间内可达 $3\% \sim 9\%$, 将会引起发动机的稳定性裕度损失.

3) 与压气机畸变试验流场数据对比^[3], 该燃机进口流场涡旋尺度分布不均程度明显偏大, 且涡旋尺度范围较宽, 流场中存在对发动机稳定性敏感的涡旋尺度的可能性较大, 从而导致较大量级稳定性裕度损失.

4) 在物理转速 $12\,000\text{ r/min}$ 附近, 该燃机进口流场中存在明显的转速基频脉动, 与其它发动机试验正常进口动态总压频谱特征不同. 国外的大量试验研究表明, 进口流场中影响发动机稳定性的周期脉动频率与压气机转子的工作转速相当. 因此进口流场中的这一周期脉动频率特征, 势必带来发动机稳定裕度损失.

5) 根据该燃机使用的压气机部件试验数据结果, 在没有侧向进气蜗壳造成的不均匀流场条件下, 在曾发生喘振的状态, 稳定性裕度仍足够大为 161% .

6) 根据上述的理论计算、试验经验, 进口流场中出现的 200 Hz 左右的周期脉动、较大的涡旋尺度范围各自都可能会对发动机造成 $10\% \sim 20\%$ 的稳定裕度损失, 上述因素的共同作用使造成较大稳定裕度损失的可能性增加, 从而导致发动机发生喘振.

参考文献:

- [1] 王勤. 压气机进口档板动态畸变流场参数分析[J]. 航空发动机, 2006, (4): 132151
WANG Qin. Parametric analysis of compressor inlet flow dynamic distortion with shield[J]. Aeroengine, 2006, (4): 132151 (in Chinese)
- [2] Melick H C, Ybarra A H. Estimating maximum instantaneous distortion from inlet total pressure RMS measurement [R]. AIAA 782970
- [3] Ronald B. A synthesis method for estimating maximum instantaneous inlet distortion based on measured inlet steady and RMS pressure[R]. AGARD CP2301, 1981
- [4] Plourde G A, Brimelow B. Pressure fluctuations cause compressor instability[R]. AFAPL2TR262103, 1970
- [5] Sugiyama J, Hamed A, Tabakoff W. A study of the mechanism of compressor surge due to inlet pressure disturbance[R]. AIAA Paper No 782246
- [6] 叶培梁, 刘大响. 燃气涡轮发动机的进口总压畸变评定技术[C]// 国外飞机进气道/发动机相容性评审方法译文集. 成都: 中国燃气涡轮研究院, 1990: 782921