

# 航空发动机燃烧室内部噪声测量分析研究

盛元生 沙云东 吴晓明  
(沈阳航空工业学院,沈阳 110034)

胡舜东 宋振宇 刘庆国  
(中国航空工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

**摘要:**叙述了用于燃烧室内部高温、高压条件下的噪声测量系统以及根据系统的动态特性对测量结果的修正。根据大量的测试结果分析了燃烧室噪声的规律和总声级的预测模型。

**关键词:**航空发动机 燃烧室 噪声 测量

$T_{M3}, \sqrt{2} A$

## Investigation of Measurement and Analysis of the Internal Noise of Aeroengine Combustion Chamber

Sheng Yuansheng Sha Yundong Wu Xiaoming  
(Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034)

Hu Shundong Song Zhenyu Liu Qingguo  
(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

**Abstract:** The noise measurement system in the combustion chamber at high temperature and pressure environment conditions is presented in the paper. Results of measurements are corrected up on the dynamic response behavior of the system itself. The regularities of the combustion chamber noises are analysed based on the numerous measurements obtained, and the predicted models of the total sound pressure level are also given.

**Key words:** aeroengine; combustion chamber; internal noise; measurement

### 符号表

$P_2^*$	燃烧室进口总压, MPa
$T_2^*$	燃烧室进口总温, K
$G_B$	燃烧室空气流量, kg/s
$\alpha$	燃烧余气系数
L01~L06	各冷吹测试工况
R01~R18	各热态测试工况
Ch1~Ch9	各测量通道
$L_1, L_2, L_3$	Ch1, Ch2, Ch3 分别测得的总声级
$y_{Ch1}$ 或 $Y_{Ch1}$	Ch1 测得信号的时域值或频域值
$y_{Ch3}$ 或 $Y_{Ch3}$	Ch3 测得信号的时域值或频域值
$L_{Y_{Ch1}}, L_{Y_{Ch3}}$	Ch1, Ch3 测得的声压级, dB

$H_1, H_3$  Ch1, Ch3 测量通道的频响函数  
 $H_{13} = H_1/H_3$  频响函数比(传函比)

### 1 引言

研究燃烧噪声具有两层意义。其一,飞机飞行时,由于排气相对于外界大气的速度降低传播至远场的飞行噪声中,发动机燃烧噪声便突出地显露出来;而涡轴发动机,其燃烧噪声本来就在发动机总噪声中占有主要成分。因此在研制低噪声发动机时,对燃烧噪声应予以注意。其二,它是进行燃烧室声疲劳研究以及对燃烧效率、燃烧过程稳定性进行研究和控制的前提。

收稿日期:2002-01-05

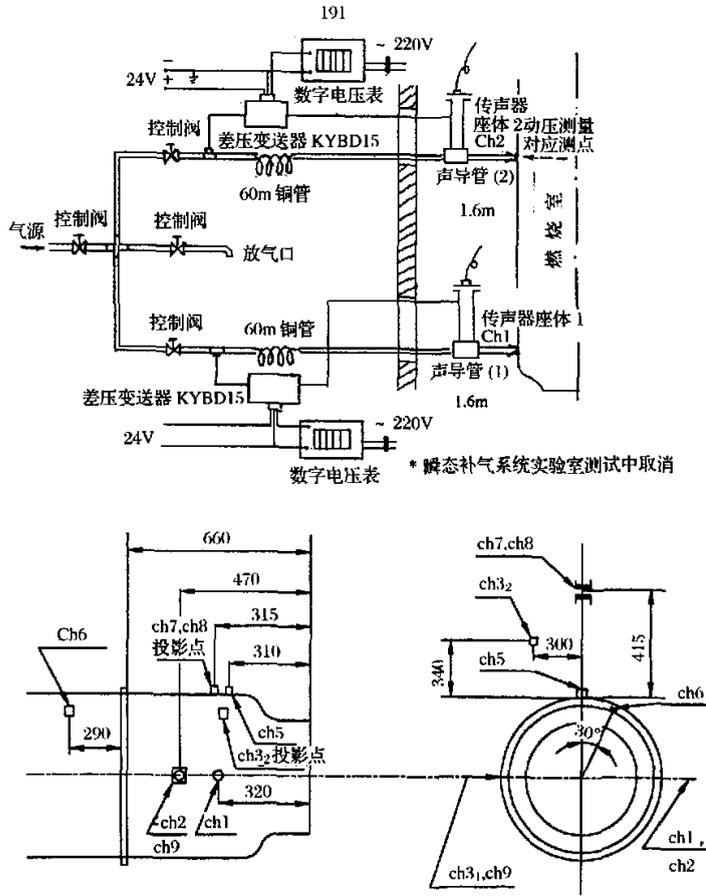
第一作者简介:盛元生,教授,1933年出生,1952年毕业于南京大学,长期从事发动机机械振动和噪声测量及控制等方面的教学和研究工作,曾获得省、部级科技进步二等奖三次。

燃烧室噪声包括燃烧噪声以及在燃烧室内传播的其他噪声成分,如流动噪声等。开展对燃烧室噪声的研究是在具体燃烧室试验的基础上进行的,因此有机型针对性。

## 2 测量系统及测试工况

受测发动机燃烧室内燃气温度高达 1000℃ 以上。燃气压力随发动机工作状态变化,由 0.1~0.2 MPa 或更高。普通的动压传感器无法直接安装在燃烧室内进行动压测量,需要用声导管将被测声压传播至传感器所在位置进行测量。为此设计一套采用声导管的动压测量系统。该系统共有两个测量

探头,其安装部位如图 1 所示。一个安装于燃烧室前部主燃烧区,一个安装于后部掺混区,相隔约 150mm,均在燃烧机匣内壁上齐平安装。探头座体内安装一枚 6.35mm 国产传声器。由于是掠入射,采用压力型传声器。座体一端通过直径 8mm、壁厚 1mm 不锈钢声导管伸入燃烧室内的测声点,另一端与长 60m 同规格柔性管(紫铜管)连接,构成半无限管,以实现阻抗匹配。柔性管的末端与高压冷气瓶连接,利用压缩空气吹洗声导管,对系统进行冷却。在稳态工作时,由稳态供气系统借差压进行管内流量控制,既保证有足够的空气进行吹洗冷却,又避免流速过高产生强烈的湍流噪声,影响测量结果。



Ch1—主燃区传感器; Ch2—掺混区传感器; Ch5, Ch6—加速度计; Ch3<sub>1</sub>—冷吹试验传声器; Ch3<sub>2</sub>—热态试验传声器; Ch7, Ch8—声强探头; Ch9—动压传感器

图 1 声导管测声系统及传感器在燃烧室上的安装(1999年测试)

测量系统如图 1 所示,共测量了 8 路信号。每次测试都包括冷吹、热态两种状况。第一次测试于 1998 年进行,包括 6 种冷吹工况和一种热态工况。第二次于 1999 年对测量系统作了改进后进行,包括 11 种冷吹工况和 18 种热态工况。气流参数见表 1 和表 2,其中包括空气流量( $G_B$ )、进气压力( $P_2^*$ )、进口温度( $T_2^*$ )、余气系数( $\alpha$ )。

### 3 测量结果分析

燃烧室主燃区(Ch1)及掺混区(Ch2)和机匣外部(Ch3)在各工况下测得的噪声总声压级列于表 1 及表 2。此外,机匣外部还设有振动测量 Ch5、Ch6,声强测量 Ch7、Ch8 和内部动压测量 Ch9。

表 1 冷吹各工况燃烧室气流参数及测得的总声压级 ——0~12.8kHz 基带分析(dB)

工况	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08	L09	L10	L11
$P_2^*$	0.179	0.18	0.182	0.18	0.179	0.178	0.179	0.18	0.18	0.18	0.18
$T_2^*$	347.1	363.6	365.6	365.6	357.2	368.0	367.8	355.0	378.7	378.7	312.1
$G_B$	10.04	10.99	12.13	12.0	10.03	11.0	12.0	10.3	11.89	11.89	11.3
Ch1/L1	139.4	140.8				140.8	142.8	140.7	142.6	142.4	139.6
Ch2/L2	138.7	140.6	142.9		143.4	144.4	146.9	141.9	143.2	144.5	143.4
Ch3/L3					97.4	103.8	102.5	102.6	104.3	108.9	

\* L01~L04 及 L11 工况 Ch3 传声器直接插入动压测量 Ch9 测孔中测量内部声压;L5~L10 工况在燃烧室外测量。

表 2 热态各工况燃烧室气流参数及测得的总声压级 ——0~12.8kHz 基带分析(dB)

	$P_2^*$	$T_2^*$	$G_B$	$\alpha$	Ch1/L1	Ch2/L2	Ch3/L3	Ch7/L7	Ch1/L <sub>p</sub>	$F_p$ Hz
R01	0.22	557.3	8.89	3.72	149.4	146.5	109.2	104.0	139.8	400
R02	0.24	559.0	10.02	3.53	149.9	146.4	111.8	105.0	138.7	400
R03	0.26	554.3	11.03	3.29	150.7	147.3	109.5	106.2	140.7	416
R04	0.28	553.3	12.40	3.16	151.4	147.8	110.1	107.3	139.6	416
R05	0.24	595.0	9.26	3.37	149.3	145.2	108.6	105.3	137.6	416
R06	0.22	594.1	10.10	3.07	149.3	145.4	108.0	104.1	137.8	416
R07	0.28	594.1	11.18	3.84	151.2	144.3	109.7	107.6	144.8	416
R08	0.26	596.8	11.90	3.51	150.7	147.5	109.7	106.5	143.2	416
R09	0.26	632.9	9.25	3.11	149.9	145.1	107.7	106.6	138.7	432
R10	0.28	635.9	10.16	3.35	150.7	145.0	108.4	108.0	138.9	432
R11	0.22	634.7	11.21	3.62	150.5	147.5	107.6	105.2	141.2	432
R12	0.24	634.6	12.00	3.80	151.0	147.0	106.3	104.9	137.5	432
R13	0.28	671.2	9.64	3.79	149.7	144.6	108.8	107.0	141.7	432
R14	0.26	675.5	10.12	3.84	150.2	145.0	107.7	106.0	141.9	432
R15	0.24	661.0	11.10	3.10	*	141.4	106.3	106.0	*	432
R16	0.22	665.0	12.36	3.39	*	142.2	103.8	104.1	*	448
R17		671.5	12.32	3.00	*	147.1	108.5	107.3	*	432
R18		364.1	13.10	6.29	147.1	143.9	105.8	103.1	128.4	336

\* R15~R17 工况、Ch1 测量故障,数据剔除。

3.1 声导管探头测声系统测量结果的修正

由于声导管系统本身的动态特性,使测量结果与源信号存在差异,假定声导管测量系统为线性系统,则可以根据系统的动态特性标定结果对测量数据进行修正。

当对测量波形的要求更为重要时,则必须用源信号恢复技术,通过反滤波器和/或倒频谱编辑手段进行波形恢复。如果测量波形并不重要,而关心的是信号频谱成份及总能量级的修正,则无需运用反滤波器等进行复杂运算,可以通过探头传声器测声系统的频响函数来修正。

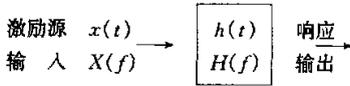


图2 测声系统的输入和输出

声导管测量系统的输入和响应如图2所示。燃烧室内声压源的信号  $x(t)$  经声导管传至座体内的传声器,测得的信号为  $y_{Ch1}(t)$ 。该系统的冲击响应函数为  $h_1(t)$ ,频响函数为  $H_1(f)$ 。用参考传声器直接测量,测得信号为  $y_{Cn3}(t)$ ,该传声器系统的冲击响应函数和频响函数为  $h_3(t)$ 和  $H_3(f)$ 。对于线性系统,有:

$$\begin{cases} y_{Cn3}(t) = x(t)h_3(t) \text{ 或 } Y_{Cn3}(f) = x(f)H_3(f) \\ y_{Ch1}(t) = x(t)h_1(t) \text{ 或 } Y_{Ch1}(f) = x(f)H_1(f) \end{cases}$$

则有  $Y_{Ch1}(f) = Y_{Cn3}(f)H_1(f)/H_3(f)$   
 $= Y_{Cn3}(f)H_{13}(f)$

式中  $H_{13} = H_1/H_3$  为两独立测量系统的传函比,它可视为  $y_{Ch1}$  及  $y_{Cn3}$  两信号之间的传函关系。实际上传感器的标定曲线(频响曲线)在其使用频率范围内是一条水平直线,且具有线性相位,因此可认为参考传声器的  $H_3 = 1$ ,则由  $y_{Ch1}$  和  $y_{Cn3}$  计算得到的频响函数  $H_{13} = H_1$ 。这样可以用参考传声器测得的结果代表激励源信号,源信号恢复和/或测量结果的修正便可以在  $y_{Ch1}$ (或  $Y_{Ch1}$ ) 与  $y_{Cn3}$ (或  $Y_{Cn3}$ ) 之间进行:

$$Y_{Cn3} = \frac{Y_{Ch1}}{H_{13}}$$

当谱值采用 dB 标尺时,上式写为

$$20\log \frac{Y_{Ch1}}{20\mu Pa} = 20\log \frac{Y_{Cn3}}{20\mu Pa} - 20\log H_{13}$$

$$L_{Y_{Cn3}} = L_{Y_{Ch1}} - 20\log H_{13} \quad (1)$$

用公式(1)对热态 R07 工况下 Ch2 测得的噪声频谱进行谱修正,计算后的总声压级及各主要峰的谱值变化见表3和图3。 $H_{13}$ 在测量系统的标定过程中获得。该频响函数是脉冲声和白噪声两种标定信号频响函数的组合函数。组合频率根据信噪比和相干函数来定,在 0~1600Hz 间采用脉冲声的标定结果,1600Hz 以上采用白噪声的标定结果。

表3 R07 工况,Ch2 测量结果修正前后谱值对照 (dB)

峰值号 (见图3)	总声 压级	1	2	3	4	5	6
频率 Hz		416	2328	9952	10368	10784	11504
谱修正前	144.3	140.0	107.2	91.1	110.4	90.0	93.8
谱修正后	146.6	142.3	118.4	111.8	120.8	112.7	109.2

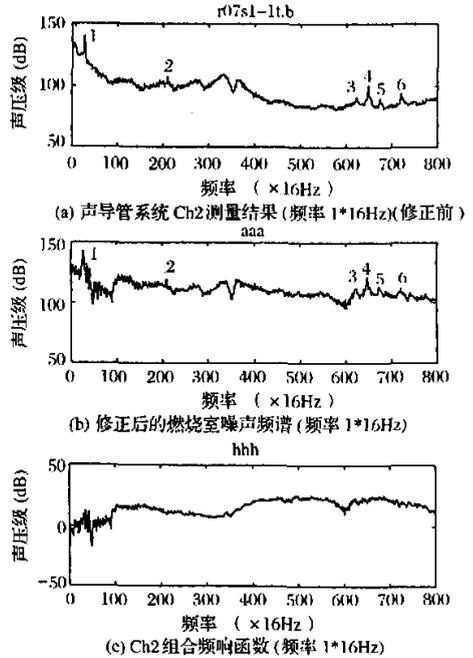


图3 R07 工况下 Ch2 测得噪声谱的修正(1999 年测试)

通过对比可见:

(1) 416Hz 频率峰值仅衰减 2.1dB, 11504Hz 峰值衰减 15.7dB。声导管测声系统在低频衰减少,高频衰减多。在 1000Hz 以下低频的实际衰减量比声导管设计中预估的要低。

(2) 总声压级经过修正由 144.3dB 改变为

146.6dB,变化仅2.3dB,这是因为燃烧室噪声的高声能区位于1000Hz以下的频段,而在低频率范围声导管的衰减很小。

表4列出了热态各工况下掺混区测得信号经修

正前后的总声压级。从表中看出,除R14、R17、R18外,大多数工况的总声压级修正量均在2.5dB以下。个别工况稍高,都未超出3.0dB。后面的总声压级讨论都将按Ch1、Ch2实际测得的结果进行。

表4 热态各工况下Ch2测得总声压级修正前后的值 ——0-12.8kHz基带分析(dB)

热态工况	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09
修正前总声压级	146.5	146.4	147.3	147.8	145.2	145.4	144.3	147.5	145.1
修正后总声压级	148.1	*	149.0	149.8	146.6	147.8	146.6	149.9	147.4
修正前后的差	1.6	*	2.7	2.0	1.4	2.4	2.3	2.4	2.3
热态工况	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18
修正前总声压级	145.0	147.5	147.0	144.6	145.0	141.4	142.2	147.1	143.9
修正后总声压级	147.5	148.8	148.8	147.6	148.3	144.2	144.5	151.5	147.9
修正前后的差	2.5	1.3	1.8	3.0	3.3	2.8	2.3	4.4	4.0

\* 数据丢失

### 3.2 燃烧室噪声总声压级及燃烧噪声主峰

总声压级是衡量燃烧室噪声的一项首要指标。它代表被测噪声信号所具有的总声能(声功率)。

经综合分析,归纳出以下几点:

#### (1) Ch1、Ch2总声压级随工况变化的规律

冷吹时,燃烧室内噪声总声压级在主燃区测得为139.4~142.8dB,掺混区测得为138.7~146.9dB。掺混区总声压级略大于主燃区。随着燃烧室工况的改变,两区域的总声压级变化范围分别为3.4dB和6.5dB。

热态下,燃烧室内噪声总声压级在主燃区测得为147.1~151.4dB,掺混区测得为141.4~147.8dB。主燃区总声压级略大于掺混区。两区域的总声压级变化范围分别为4.3dB和6.4dB。

对比表明,燃烧加热过程使高声压级区由掺混区前移至主燃区。而且在主燃区燃烧时总声压级的

增加比冷吹时的增加要多,主燃区增量达到7.7~8.6dB,掺混区仅增加0.9~2.7dB。

根据表2中数据,Ch1、Ch2、Ch3、Ch7在热态各工况下测得的总声压级的变化情况如图4所示。图中Ch1及Ch2测得的总声压级其变化规律基本一致,表明了两声导管测量结果的相关性。Ch3和Ch7都是从燃烧室外部测量,总声级数据十分吻合。但是它们和Ch1、Ch2的变化趋势不完全一致,在R06、R09、R12等工况图线走向有明显差别。这和结构传声特性(声激励响应及幅射比)及受外部声场影响等有关。

#### (2) 燃烧室噪声总声压级内外测量结果的差别

内外总声压级的差别 $\Delta$ 列于表5和表6。热态各工况下Ch3测得总声压级由103.8dB~111.8dB。对应各工况下Ch3比Ch1低38.1~44.7dB,Ch3比Ch2低34.6~40.7dB。

表5 燃烧机匣热态的传声损失 (dB)

	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09
$\Delta_1 = \text{Ch1} \sim \text{Ch3}$	40.2	38.1	41.2	41.3	40.7	41.3	41.5	41.0	42.2
$\Delta_2 = \text{Ch2} \sim \text{Ch3}$	37.3	34.6	37.8	37.7	36.6	37.4	34.6	37.8	37.4
	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18
$\Delta_1 = \text{Ch1} \sim \text{Ch3}$	42.3	42.9	44.7	40.9	42.5				41.3
$\Delta_2 = \text{Ch2} \sim \text{Ch3}$	36.6	39.9	40.7	35.8	37.3	35.1	38.4	38.6	38.1

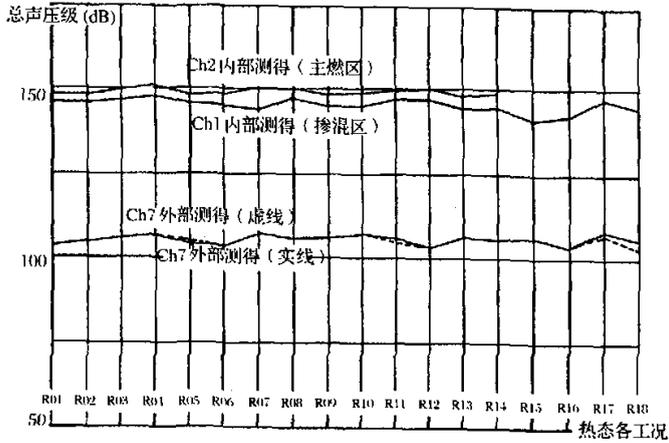


图4 热态各通道总声压级随工况变化图

表6 燃烧室机匣冷吹的传声损失 (dB)

	L05	L06	L07	L08	L09	L10
$\Delta_1 = \text{Ch1} \sim \text{Ch3}$	37.0	40.3	38.1	38.3	33.5	
$\Delta_2 = \text{Ch2} \sim \text{Ch3}$	40.6	44.4	39.3	38.9	35.6	

表中  $\Delta$  实际上是燃烧机匣的传声损失值 (TL)。传声损失应按内部高声级值计算,且 Ch3 传声器安装于机匣外接近主燃烧区位置,因此燃烧机匣的热态传声损失  $TL = \Delta_1 = 38.1 \sim 44.7 \text{ dB}$ 。可以看出 TL 值是随总声压级改变的,但是它们之间并非简单关系。这与机械结构的声激励响应和它的辐射比随声场特性而变化有关。根据测得的燃烧室内外噪声数据回归得到的估算公式,并通过燃烧室外部噪声总声压级概略地预估内部噪声总声压级。

冷吹下燃烧室机匣传声损失略微低于热态,具体见表6。

(3) 燃烧噪声主峰及峰值频率

燃烧室噪声频谱示例如图2所示。从全部热态工况的噪声频谱分析可见燃烧噪声主峰频率在 416Hz 附近,且随工况改变而略有变化。主峰谱值为 137.5~144.8dB。主峰附近区域的频段是燃烧室声激励的高能量区。

3.3 燃烧室噪声总声压级及噪声主峰预测模型

通过研究发动机燃烧室热态 R01~R18 各工况下 Ch1 及 Ch2 测得的燃烧室噪声总声压级  $L_1$ 、 $L_2$  和燃烧室工作参数,包括空气量、进气压力、进口温度及余气系数的离散点数据得知,可以利用多元回归模型研究响应和预报变量之间的关系。所得结果如下:

总声压级  $L_1$  的预测模型

$$L_1 = 133.789X_1^{0.130} X_2^{0.017} X_3^{-0.035} X_4^{-0.014}$$

式中  $X_1 = T_2^*$ 、 $X_2 = P_2^*$ 、 $X_3 = G_B$ 、 $X_4 = \alpha$

燃烧噪声主峰值模型

$$L_p = 81.120 - 3.272\log X_1 + 9.816\log X_3 + 21.601X_4 + 11.750X_2X_4 - 2.946X_4^2$$

燃烧噪声主峰值频率

$$F_p = 124.734X_1^{0.181} X_2^{-0.012} X_3^{-0.073} X_4^{-0.018}$$

通过外部测量结果估算燃烧室内部总声压级

TL:燃烧机匣的传声损失,定义为机匣内部测得噪声总声压级  $L_1$  与外部测得总声压级  $L_3$  之差,  $TL = L_1 - L_3$ 。

通过回归得到 TL 与  $L_3$  的线性回归方程

$$TL = 155.642 - 1.04783L_3$$

当测得机匣外部总声压级  $L_3$ ,则可以根据上式计算出相应的 TL 值,再由得到的 TL 来估算燃烧室内部噪声总声压级  $L_1$ 。

4 结论

(1) 为实现在燃烧室高温、高压环境下用普通传声器测量其内部噪声而设计的声导管测声系统,通过试用并不断改进,在 1999 年的实测应用中测得了有效的噪声数据。实践证明,该测量方法是可行的,测量系统是可靠的,测得数据具有规律性和重复性,测试前后对系统进行了反复标定,因此数据是准确有效的。

(2) 对于声导管测量系统的标定工作十分重要,其目的首先是通过标定测量检验(下转第 39 页)

寿命大于 30000 次,5 个轮盘的试验截尾的 LCF 循环寿命为 10000~22881 次,预测的使用寿命大于 1000h 目标寿命,外场发生的多起偏心孔部位裂纹故障的原因是孔边高应力叠加较大振动应力,加工质量亦有一定影响。

### 5.2.2 高压涡轮盘

销孔部位计算的 LCF 循环寿命为 4960 次、两个轮盘试验确定的 LCF 循环寿命为 4377~4725 次,预测的使用寿命为 908~984h;篦齿环部位计算的 LCF 循环寿命为 1152 次循环,预测的使用寿命约 380h。一、二次翻修时,大量裂纹故障是由高压涡轮篦齿环处燃气向盘腔“逆流”,或者冷却不足引起篦齿环温度过高和产生大的循环应力而引起。

### 5.2.3 低压涡轮盘

轮心部位计算的平均 LCF 循环寿命为 10332 次循环,两个轮盘进行了 8000 次 LCF 疲劳试验,无裂纹出现,预测的使用寿命大于 1000h,在外场使用中应加强榫槽部位的检查。

### 5.2.4 高压涡轮叶片

寿命考核的关键部位包括叶根、叶背、约 1/3 弦长叶身部位。根据高压涡轮叶片启动加速过渡态有负应力、高转速下较大的正应力、高温高转速下有较长时间保载而存在循环与持久共同作用的特点,确定了一种带峰值和稳态载荷保载时间的复合循环,作为叶片试验载荷谱。以约 1/3 弦长叶身部位为考核对象,其计算寿命为 1270~2500h,试验给出了高于 1000h 的结果。

### 5.2.5 低压涡轮叶片

寿命考核的关键部位为叶身箍带孔,寿命预测

(上接第 58 页)传感器和整个测量系统的准确度和有效性。同时也是为了获得测量系统对声场的动态响应特性,以便对测得的噪声数据作必要的修正。标定测量是在符合要求的声场条件下对整个测量系统进行动态标定。

(3) 测试结果表明,燃烧室冷吹时,内部噪声总声压级掺混区略大于主燃区;燃烧时,主燃区总声压级略大于掺混区。燃烧使主燃区噪声总声压级提高了 7.7~8.6dB,达到 147.1~151.4dB。燃烧噪声主峰谱值为 137.5~144.8dB。主峰频率随工况改变在 416Hz 附近变化,而且在这个频率上测得的振动响应级和外部噪声压级也都达到最大的峰值。在这样的声载荷下,即使声疲劳应力不是很大,但是如

的显著特点是:在计算和试验过程中,考虑了孔边存在的显著应力松弛效应;在低循环疲劳损伤和持久损伤分析中都计入了松弛效应,并给定了相应的带保载时间的低循环疲劳试验载荷谱。预测的使用寿命为 1100~1400h,试验给出了高于 1000h 的使用寿命。

### 5.2.6 燃烧室机匣

寿命考核的关键部位为加力点火器空气导管安装座,计算预测使用寿命约 2683~3208h,试验确定的使用寿命约 2986~3554h。

## 6 结论

(1) 给出了 8 种主要零部件的寿命试验载荷谱,为各部件定寿试验工作提供了主要依据。

(2) 给出了 8 种主要零部件的预测寿命,经各零部件寿命试验结果验证,全部吻合一致。

(3) 给出了 8 种主要零部件在三种机型上的各典型科目的寿命换算率和全部科目混频的平均换算率;结合寿命预测和试验结果,给出了零部件的使用小时寿命,为 WP7 系列发动机当前的使用控制、延长使用寿命来满足战备急需和今后寿命跟踪监管提供了重要依据。

(4) 根据分析与试验结果,为 WP7 系列发动机的第 4 级盘缘破裂故障偏心孔裂纹故障、高压涡轮盘篦齿环裂纹故障和高压涡轮叶片断裂故障等的进一步深入分析和彻底排除故障提供了重要依据。

参考文献(略)

果结构设计不当,局部热应力和声疲劳应力联合作用,有可能使结构的薄弱环节产生疲劳损坏。

(4) 根据测得的数据,对燃烧室噪声总声压级、燃烧噪声主峰值及主峰值的频率用回归方法得到了它们与燃烧参数的预报方程。检验结果表明,非线性模型优于线性模型。所得到的这些预报方程在设计中对于同类型燃烧室噪声的预报具有一定的指导意义和应用价值。

## 致谢

本项目的试验、测试得到沈阳发动机设计研究所的支持和参与,特此致谢。

参考文献(略)