

文章编号: 1000-8055(2005) 02-0273-05

高频压力探针动态性能的补偿方法

郭 勇, 王效葵, 王洪伟

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 在压气机流场的动态测试中, 为了应用现有的高频压力探针测得更高频率的信号, 需要展宽高频压力探针的工作频带。在对高频压力探针进行动态校准的基础上, 利用动态补偿数字滤波器技术展宽高频压力探针的工作频带从而改善高频压力探针的动态特性, 提高了高频压力探针的响应速度。

关键词: 航空、航天推进系统; 压气机; 流场动态测试; 动态性能; 动态补偿数字滤波器

中图分类号: V211.7

文献标识码: A

Improvement on Dynamic Characteristics of High Response Pressure Probe

GUO Yong, WANG Xiao-kui, WANG Hong-wei

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: It is necessary to broaden the working frequency band of the existing high response pressure probe to make it can be used to measure the compressor dynamic flow field. On the basis of dynamic calibration, the application of the dynamic compensation digital filter technique will improve the dynamic characteristics, and thus its response time is shortened and the frequency band is broadened.

Key words: aerospace propulsion system; compressor; high response pressure probe; dynamic flow field; dynamic characteristics; dynamic compensation digital filter

高频压力探针在航空发动机型号研制过程中, 尤其是在压气机转子后流场的测试中, 起到了重要的作用。高频压力探针内置压力传感器的固有频率可在 100 kHz~200 kHz 之间。由于压力敏感元件不是直接置放在被测流场中, 高频压力探针的动态特性受到影响, 使得工作频带变窄, 一般为 20 kHz~30 kHz 左右。尽可能缩短测压孔的长度和采用较小体积的压力传感器可改善高频压力

探针的动态特性。本文根据文献[1]中介绍的改进传感器动态特性的原理和方法, 用动态补偿数字滤波器对高频压力探针进行动态特性补偿以拓宽它的工作频带。将补偿前后高频压力探针对于压气机流场的动态响应进行了比较, 补偿后的高频压力探针动态特性得到较好的改善, 实验响应曲线中高频脉动压力分量明显丰富于补偿前, 使探针能更真实的反映动态流场的高频压力变化情况。

收稿日期: 2004-03-09; 修订日期: 2004-06-17

作者简介: 郭勇(1975-), 男, 吉林桦甸人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院硕士生, 主要从事压气机内部流场测试技术的研究。

1 高频压力探针动态补偿数字滤波器的设计

1.1 基本原理和方法

为改善传感器动态性能指标、减小动态测试误差,首先要对传感器和测试系统进行动态校准实验,用系统辨识的方法建立其动态数学模型,然后根据测试需求设计动态补偿滤波器,实际应用时将二者相串联如图 1 所示^[1]。

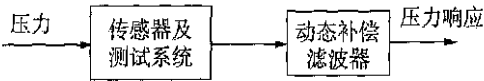


图 1 动态补偿滤波器

Fig. 1 The dynamic compensation filter

本文从实验入手,用激波管对高频压力探针进行了动态校准实验,选用特殊白化滤波器的广义最小二乘法^[1](GLS(SF))建立高频压力探针的动态数学模型:差分方程和离散传递函数,找出离散函数的主导极点,根据零极点相消的原理^[2]进行动态补偿滤波器设计。

1.2 建立动态数学模型

特殊白化滤波器的广义最小二乘法的原理如下:

设离散系统的差分方程为:

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(k) + e(k) \tag{1}$$

式中 $u(k)$, $y(k)$ 是系统输入、输出观测量, $e(k)$ 是零均值的白噪声。

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \cdots + b_nz^{-n} \tag{2}$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \cdots + a_nz^{-n} \tag{3}$$

$$e(k) = \epsilon(k)/A(z^{-1}) \tag{4}$$

式中: $\epsilon(k)$ 是自相关的随机噪声, $1/A(z^{-1})$ 为白化滤波器。

首先由 $u(k)$, $y(k)$ 用最小二乘法求出参数的最小二乘估计 a^{LS} , b^{LS} , 作为迭代运算的初值, 经过 l 次迭代运算求得:

$$\hat{a}^{(l)} = [\hat{a}_1^{(l)} \quad \hat{a}_2^{(l)} \quad \cdots \quad \hat{a}_n^{(l)}]^T$$

$$\hat{b}^{(l)} = [\hat{b}_0^{(l)} \quad \hat{b}_1^{(l)} \quad \cdots \quad \hat{b}_n^{(l)}]^T$$

当达到迭代收敛时得到:

$$y(k) = \frac{\hat{B}(d^{-1})}{\hat{A}(d^{-1})} \cdot u(k) + e(k)$$

它使 $J = \sum e^2(k)$ 达到最小。

以探针在激波管试验中的响应数据, 用 GLS(SF) 建立单孔高频压力探针的差分方程模型为:

$$\begin{aligned} Y(k) + A_1Y(k-1) + \cdots + \\ A_nY(k-n) = B_0X(k) + \\ B_1(k-1) + \cdots + B_nX(k-n) \end{aligned} \tag{5}$$

$$A = [A_n \quad \cdots \quad A_1]$$

$$B = [B_n \quad \cdots \quad B_1 \quad B_0]$$

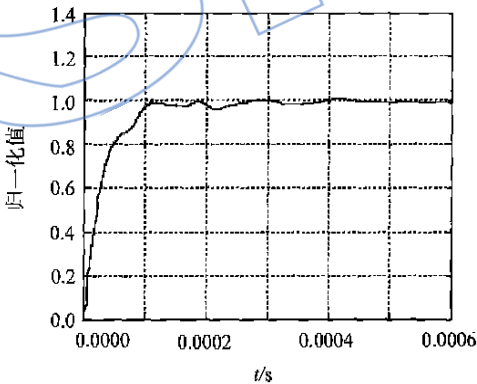
离散传递函数为:

$$G(z) = \frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{B_0 + B_1z^{-1} + B_2z^{-2}}{1 + A_1z^{-1} + A_2z^{-2}} \tag{6}$$

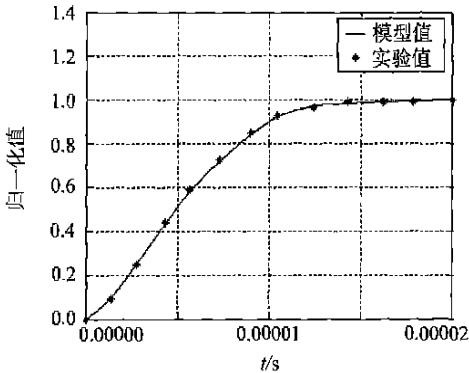
模型的阶次为 2 阶, 模型输出值相对实验值的残差平方和为:

$$J(2) = 2.468\ 46 \times 10^{-5}$$

其中: $A_1 = -1.448\ 5$



(a) 激波管实验中的阶跃响应曲线



(b) 实验响应值和模型输出值的对比

图 2 单孔高频压力探针的阶跃响应

Fig. 2 The step response curves of single hole fast response pressure probe

$$A_2 = 5.696\ 14 \times 10^{-1}$$
$$B_1 = 8.373\ 82 \times 10^{-2}$$

$$B_0 = 3.412\ 74 \times 10^{-3}$$
$$B_2 = 3.036\ 7 \times 10^{-2}$$

表 1 高频压力探针补偿前后的动态性能指标

Table 1 The dynamic performance data of fast response pressure probe before compensation and after

指标名称		补偿前	补偿后
时域指标	上升时间/ μs	14	3.42
	调节时间/ μs	36.7	9.49
	超调量/%	3.39	4.33
	峰值时间/ μs	28.7	7.08
频域指标	5% 的工作频带/kHz	12.754	57.165(展宽4.48倍)
	10% 的工作频带/kHz	16.242	69.267(展宽4.26倍)
	通频带频率/kHz	24.522	98.566(展宽4.02倍)

图 2 是单孔高频压力探针在激波管上的阶跃响应曲线, 图中计算值和实验值的响应数据符合较好。

1.3 设计动态数字补偿滤波器

由经典控制理论可知, 由图 3 所示的两个环节相串联时, 其等效系统传递函数为两个环节传递函数之积。

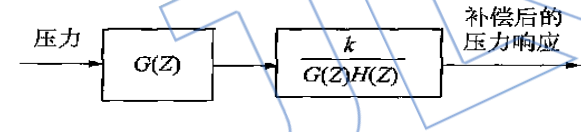


图3 两个环节串联时等效传递函数 $K/H(Z)$

偿后的高频压力探针其上升时间、调节时间和

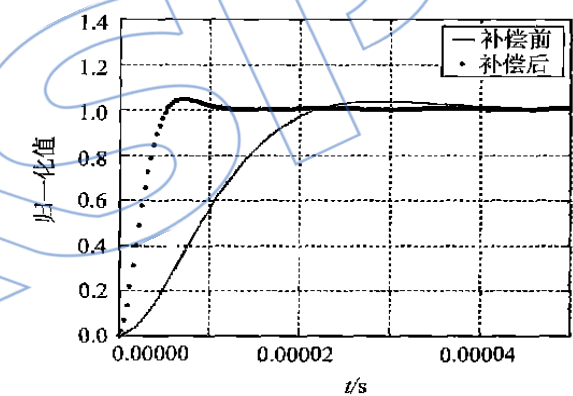


图4 高频压力探针单位阶跃响应

Fig.4 The unit-step response curves of fast response pressure probe

(6) 式中, 两个稳定的极点:

$$P_{1,2} = -0.656\ 0 \pm 0.238\ 2i$$

根据文献[2] 中的方法, 滤波器的零点取 $P_{1,2}$, 以抵消(6) 式的极点.等效系统的复数极点, 按照阻尼比 $\xi=0.707$ (最佳阻尼比), 固有频率 $f_n=100\text{ kHz}$ 来确定, 因此动态补偿数字滤波器的离散传递函数为:

$$G(z)_c = \frac{14.94z^2 - 29.52z + 14.59}{z^2 - 1.911z + 0.915} \quad (7)$$

用该数字滤波器补偿(6) 式, 补偿前后仿真计算的单位阶跃响应如图 4 所示, 频率响应如图 5 所示。高频压力探针补偿前、后的动态性能指标见表 1。

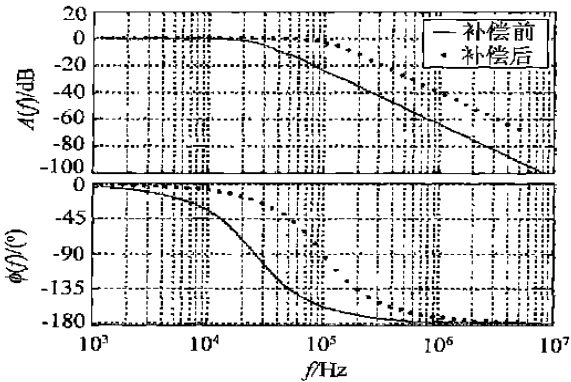


图5 高频压力探针频率特性

Fig.5 The frequency characteristic curves of fast response pressure probe

峰值时间都大大缩短, 工作频带和通频带提高 4 倍以上。

2 应用实例

图 6 是用某圆柱单孔高频压力探针某轴流压气机转子后流场进行动态测试时的系统方框图。

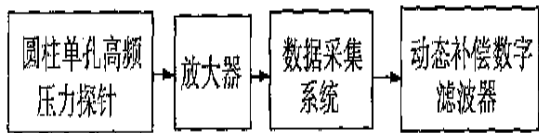


图 6 带动态补偿数字滤波器的测试系统
Fig. 6 The testing system with dynamic compensation digit filter

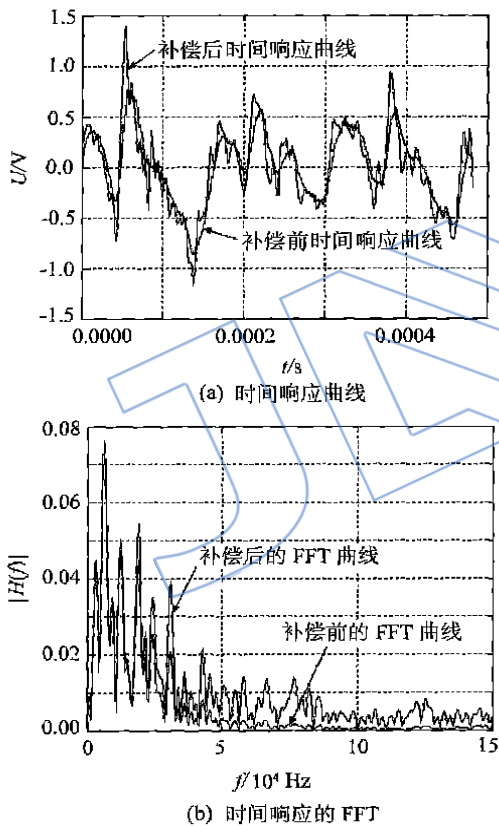


图 7 压气机转子后高频压力探针压力响应曲线
Fig. 7 The pressure response curves of fast response pressure probe behind the rotor of compressor

转子叶片通过频率为 12.4 kHz, 放大器通频带 200 kHz, 数据采集系统的采样频率为 500 kHz。将动态补偿数字滤波器串联在被补偿的测试系统之后, 用所设计的动态补偿滤波器差分方程, 对高频

压力探针的压力响应数据进行递推运算。在压气机转子后探针测压孔基本正对气流方向, 高频压力探针的压力响应信号补偿前后的比较结果如图 7(a) 所示。

将时间响应数据经过隔直处理后进行 FFT 变换, 从图 7(b) 中注意到, 经过动态补偿, 高频压力探针对 100 kHz 以内的信号通过能力增强, 补偿前高频压力探针 5% 的工作频带 12.754 kHz 附近的信号分量, 幅值提高了约 5.5%, 通频带 24.522 kHz 附近的信号分量幅值提高了约 45.9%; 而在补偿后高频压力探针 5% 的工作频带 57.165 kHz 和通频带 98.566 kHz 附近的信号分量幅值提高了约 2 倍以上。

补偿前后高频压力探针压力响应的锁相平均值对比情况如图 8, 经过平均处理后的时间响应和 FFT 中高频脉动压力的成份明显增加。

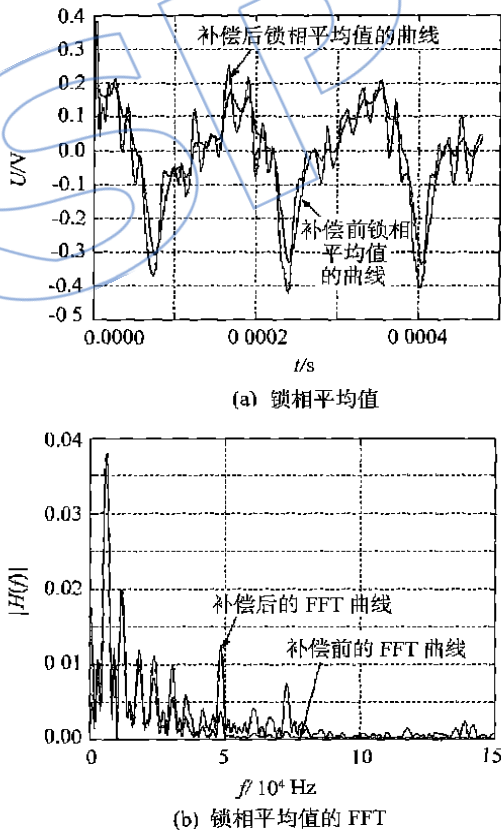


图 8 压气机转子后高频压力探针响应的锁相平均值
Fig. 8 The phase-locked average of fast response pressure probe response behind the rotor of compressor

采用图 6 所示测试系统, 对另一轴流压气机转子后流场进行动态测试。转子叶片通过频率为

334.3 Hz, 放大器通频带为 100 kHz, 数据采集系统的采样频率为 20 kHz。用相同参数的动态补偿滤波器差分方程, 对单孔高频压力探针的压力响应数据进行递推运算。在压气机转子后探针测压孔基本正对气流方向, 高频压力探针的压力响应信号补偿前后的比较结果如图 9(a) 所示, 将时间响应数据经过隔直处理后进行 FFT 变换如图 9(b)。补偿前后高频压力探针压力响应的锁相平均值对比情况如图 10。

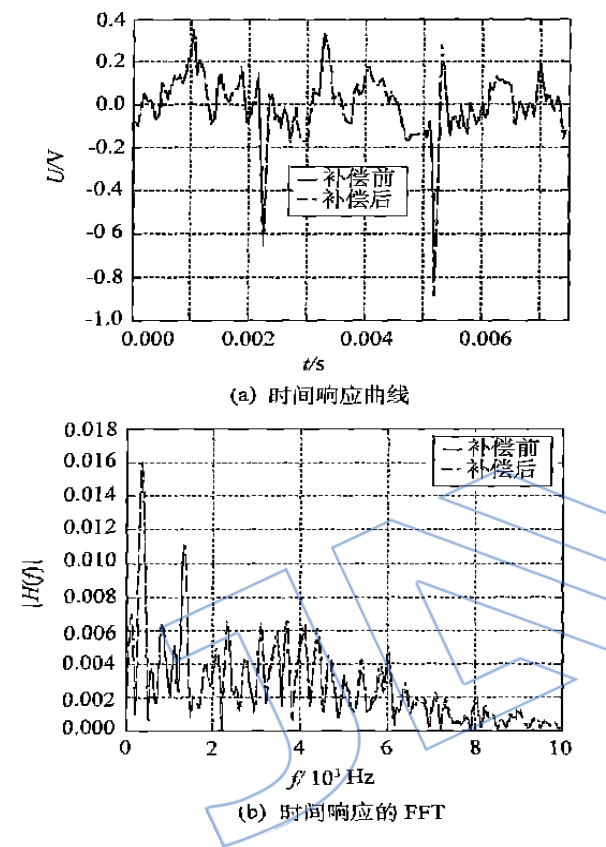


图9 压气机转子后高频压力探针响应曲线
Fig. 9 The response curves of fast response pressure probe behind the rotor of compressor

图 9(a) 中补偿前后的时间响应曲线十分接近。在信号的低频段, 动态补偿数字滤波器不损失系统的测试精度。图 10(b) 中分布在 1 kHz 以上的信号分量补偿效果较为明显, 而高频段信号幅值的增加, 使图 10(a) 时域曲线中压力脉动上升变陡, 补偿后压力的平均值最大可增加约 1 倍以上。

3 结 论

利用动态补偿数字滤波器的方法改善高频压力探针的动态性能指标, 可以提高探针的动态响

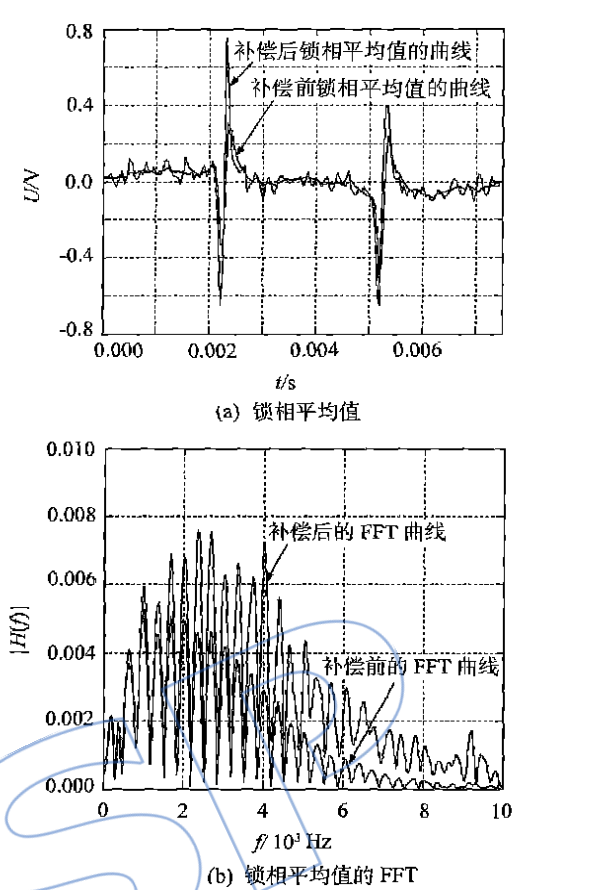


图 10 压气机转子后高频压力探针响应的锁相平均值
Fig. 10 The phase-locked average of fast response pressure probe response behind the rotor of compressor

应速度、减小动态误差, 且方法简单。对于以计算机为核心设备所构成的数据采集系统而言, 在不增加硬件开销的情况下, 通过求解差分方程的一段程序便可以实现, 使测试者在应用高频压力探针技术进行流场动态压力测试时, 所得的实验数据更接近于真值。

参考文献:

[1] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
[2] 孟晓风, 黄俊钦, 王效葵. 动态补偿滤波器的一种设计方法[J]. 计量学报, 1996, 17(1): 61~65.
MENG Xiao-feng, HUANG Jun-qin, WANG Xiao-kui. Study on Making Design for Dynamic Compensational Filters[J]. Acta Metrologica Sinica, 1996, 17(1): 61~65.
[3] Matthew Zeiger, Othon Rediniotis. Embedded-Sensor Air-Data Systems for UAVS[R]. Portsmouth, Virginia, AIAA 2002- 3496, 20- 23 May 2002.