

文章编号:1000-8055(2011)12-2749-08

一种容腔效应标定技术及其在高频响动态 探针中的应用

李继超^{1,2}, 王偲臣^{1,2}, 林 峰¹, 聂超群¹, Shoen M P³

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190;

3. College of Engineering, Idaho State University, Pocatello, USA)

摘 要: 介绍一种容腔效应标定方法,以理论模型推导与实验验证相结合的方式,完成了对高频响动态探针的动态标定,并通过 ARMAX(自动回归滑动平均)模型辨识得到了容腔的传递函数.结果表明该方法简单可行,能够很好地通过探针的动态响应信号来确定探针容腔的传递函数,从而确定测量信号和真实信号之间的关系,对今后考虑容腔效应的动态标定提供了参考.

关 键 词: 高频响动态探针; 容腔效应; 阶跃响应; ARMAX (自动回归滑动平均); 模型辨识

中图分类号: V211.71

文献标志码: A

A technique to calibrate cavity effect in unsteady pressure probes with high frequency response

LI Ji-chao^{1,2}, WANG Si-chen^{1,2}, LIN Feng¹, NIE Chao-qun¹, Schoen M P³

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. College of Engineering, Idaho State University, Pocatello, USA)

Abstract: A technique to calibrate cavity effects was introduced. By combining a simplified theoretical model with experimental verification, the modeling of the transfer function for the pressure probe was established. An ARMAX (autoregressive-moving average with exogenous input) model was used as the base structure of the cavity system and its parameters were identified from experimental data. It is demonstrated that despite its simplicity, this method can well capture the transfer function for the cavity based on the input/output signals, from which the relationship of the true signal and measuring signal can be obtained. This calibration technique is simple and practical, and can be of great value in many applications.

Key words: dynamic probe with high response frequency; cavity effect; step response; ARMAX (autoregressive-moving average with exogenous input); model identification

近些年来,叶轮机械内部流动非定常性越来越受到关注,关注内部流动非定常特性的目的及

意义主要有如下几点:

1) 寻找能够比定常设计更进一步减少或者

收稿日期:2011-01-10; 修订日期:2011-03-07

基金项目:国家自然科学基金(50736007)

作者简介:李继超(1984—),男,湖北仙桃人,博士生,主要从事叶轮机械气动热力学研究.

降低流动损失的措施。

2) 在强约束条件下,进一步提升叶轮机械叶片通道全三维优化设计的能力和水平。

3) 澄清内部流动失稳机理,并在此基础上构造合理有效的故障诊断和主动控制方法。

4) 澄清系统与叶片谐振的原因,为回避系统的自激振荡寻找途径。

基于此,需要发展一种能够测量叶轮机械内部流场的测量技术。目前这类非定常压力测量局限在机匣表面平齐安装的压力传感器上,对流动内部的流场还无能为力。叶轮机械内部流场的非定常采样频率是叶片通过频率和每个叶片通道所需采样点数的乘积,因此所需要的测量仪器的响应频率,即时间分辨率非常高。高频响动态探针为探测叶轮机械内部流场提供新的解决办法。高频响动态探针和普通的气动探针具有相同的测量原理,所不同的是将频响高、尺寸小的动态传感器安装在探针头部附近,探针可以直接插入叶轮机械的流场内部,从而测得内部非定常流场的高频数据。

典型的动态传感器的固有频率在 150 kHz 到 400 kHz 之间,如果把响应频率放在首位,则传感器需要平齐安装在探针头部,因为任何容腔效率都会减小探针的响应频率。但是由于探针结构本身的原因,传感器必须装在探针内部才能稳定固定在流场中的给定点,同时为使传感器免受气流中杂质的机械伤害,在实际设计中也需要设计一个外壳来保护动态传感器,这就使得高频响动态探针必须具有一个引压容腔。容腔效应使传感器的动态特性受到影响,工作频带变窄^[1]。一般要尽可能缩短测压孔的长度和采用体积较小的压力传感器来改善高频压力探针的动态性能,即空间分辨率。容腔效应也是影响其时间分辨率的主要因素,而且容腔效应的作用相当复杂,容腔对动态压力的测量效果的影响无法从理论上定量确定。因此在高频响动态探针的传感器和管腔安装完毕之后,需要对其进行标定,以便对传感器的输出压力进行分析和校正。

对高频响动态探针进行标定的目的是为了检验系统在压力变化时参数测量的可再现性、线性度以及灵敏度。传感器的动态灵敏度和静态灵敏度存在一定的差异。目前对高频动态探针的标定一般分为静态标定^[2-3]和动态标定^[4-5],静态标定主要是为了标定探针的静态灵敏度和线性度,动态标定则是为了标定探针的动态特性参数或者动态数学模型^[6],其目的是准确检测信号的频率、相

位、幅值,图 1 就是动态失真的典型表现。而且动态标定时,高频响动态探针和采集系统的工作状态应和实际情况基本一致,即应进行现场标定。容腔效应对静态标定没有影响,基本上已经解决了所面临的问题。但动态标定由于与系统测试精度、传感器响应频率、放大器转换频率、气体的可压缩性、数据采集频响、和容腔效应等众多因素有关,而且呈现非线性特征,是高频响动态探针标定的难点问题。目前工程中压力传感器的动态标定主要有共振法^[2]、冲击响应法以及激波管法^[7-8]。比较完善的方法是采用激波管法,大多数都采用激波管来作为阶跃响应压力信号的发生装置。但是由于激波管的长度和传感器的响应时间成正比,而且实验条件与标定条件(工作温度等)相差较大,现场标定的可行性比较小。因此为了提高测试的准确性,必须寻找一种新的简单可行的方法进行

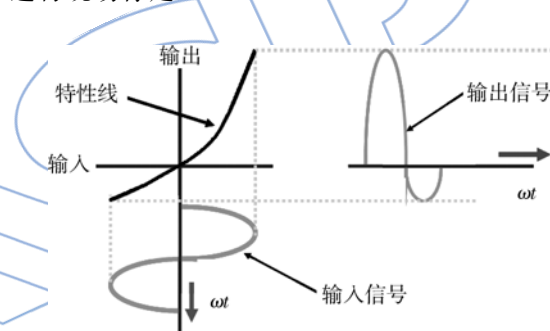


图 1 动态信号频率、相位、幅值失真示意图

Fig. 1 Distortion sketch map of dynamic signal frequency, phase and amplitude

因此本文介绍了一种用来测量容腔效应的方法^[9],来对高频动态探针进行动态标定。首先介绍了容腔效应的一种理论推导方法^[10],然后采用容腔效应的测量方法对高频响动态探针进行了动态测量,并采用 ARMAX^[11](自动回归滑动平均)模型辨识方法对探针容腔进行了模型辨识,得出了其传递函数。最后通过测量的结果对探针在实际压气机中的应用进行了讨论。

1 容腔效应的简化理论推导

如图 2 左图为探针容腔局部放大图,设初始时叶轮机械内部压力和容腔里面作用在传感器上的压力均为 p_0 , κ 为等熵指数, μ 为气体的动力黏度, d 为管道的内径, l 为管道的长度,容腔的体积为 V ,被测压力为 p_1 ,则压力变化之后,相对压力为 Δp_1 ,管道中气柱受到的压力为

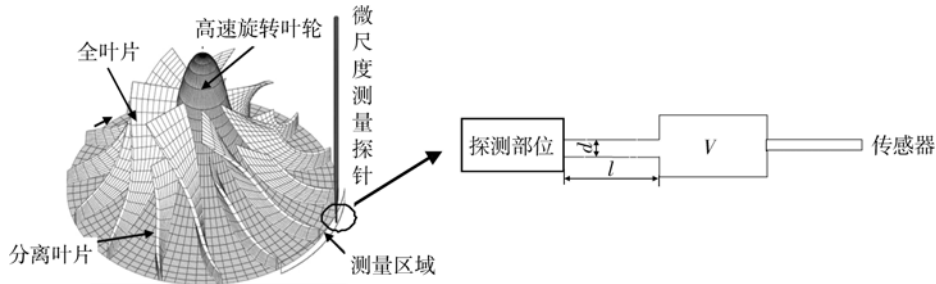


图 2 容腔系统结构图

Fig. 2 Structure chart of cavity system

$$F = \frac{1}{4} \pi d^2 \Delta p_1 \quad (1)$$

此时气柱在管道中流动受到的黏性力为

$$f = 8\pi\mu l \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

容腔内气体可以看成绝热压缩过程

$$\frac{dp}{p} = -\kappa \frac{dV}{V} \quad (3)$$

即容腔内的压力变化 Δp_2 满足

$$\frac{\Delta p_2}{p_0} = \kappa \frac{\pi d^2 x}{4V} \quad (4)$$

其中 x 为气柱在管道中的位移,即

$$x = \frac{4V\Delta p_2}{\kappa p_0 \pi d^2} \quad (5)$$

对管腔内部的流体,根据牛顿第二定律可得

$$F - f = \frac{\pi d^2}{4} \rho l \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6)$$

将式(1)和式(2)代入到式(6)即可得

$$\frac{\pi d^2}{4} (\Delta p_1 - \Delta p_2) - 8\pi\mu l \frac{dx}{dt} = \frac{\pi d^2}{4} \rho l \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (7)$$

将式(5)代入到式(7)并化简可得

$$\frac{d^2 p_2}{dt^2} + \frac{32\mu}{\rho \pi d^2} \frac{dp_2}{dt} + \frac{\kappa \pi d^2 p_0}{4lV\rho} p_2 = \frac{\kappa \pi d^2 p_0}{4lV\rho} p_1 \quad (8)$$

由上式可以看出理论上推导出的容腔系统是一个二阶阻尼系统,其中系统的固有频率 $\omega_n =$

$\sqrt{\frac{\kappa \pi d^2 p_0}{4lV\rho}}$, 阻尼比 $\xi = \frac{32\mu}{\pi d^3} \sqrt{\frac{Vl}{\pi \kappa p_0 \rho}}$, 根据探针 4 个孔的容腔尺寸可以计算得 P1, P2, P3 孔的频率为 75.9 kHz, 阻尼比为 0.08, 而 P4 的频率为 61.8 kHz, 阻尼比为 0.098.

而根据文献[12]中的公式

$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{lV}} \quad (9)$$

可得 P1, P2, P3 孔的频率为 13.4 kHz, P4 的频率为 10.9 kHz.

上述公式的结果不一致是因为理论上对气体的性质进行了不同的假设,实际的容腔模型和理论上推导的模型是否一样? 接下来将对高频响动态探针的容腔模型进行实验研究,并采用 ARMAX 模型辨识的方法来获得其输入、输出之间的传递函数.

2 基于 ARMAX 模型的高频响动态探针的模型辨识

2.1 ARMAX 模型辨识方法

ARMAX 时间序列模型的优点是它不但能反映系统输入、输出关系,而且还能反映量测噪声的动态特性,它是目前线性时序分析中最完备的模型,ARMAX 模型的结构如图 3 所示.

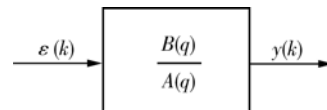


图 3 ARMAX 模型的结构

Fig. 3 Structure of ARMAX model

表达式为

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \cdots + a_{na} q^{-na}, \\ B(q) &= 1 + b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-nk-1} + \cdots + b_{nb} q^{-nb-nk+1}, \\ C(q) &= 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \cdots + c_{nc} q^{-nc} \end{aligned}$$

在辨识过程中首先将输入、输出信号对时间进行求导,得到输出信号随输入信号之间的冲击响应曲线,然后通过合理选择 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 的阶数 na, nb, nk, nc , 使得选择的模型和真实测量曲线之间的误差达到最小,然后通过所确定的 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 来得到 $y(t)$ 和 $u(t)$ 之间的关系

由 $A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k)$ 即

可得

$$\frac{A(q)}{B(q)}y(k) = u(k) + \frac{C(q)}{B(q)}e(k) \quad (11)$$

从而可得到

$$u(k) = \frac{A(q)}{B(q)}y(k) - \frac{C(q)}{B(q)}e(k) \quad (12)$$

2.2 实验方案及标定结果

实验所采用的高频动态探针如图4所示. 探针圆柱直径6 mm, 在圆柱表面共开了4个直径为0.5 mm的测压孔, 其中3个孔在同一水平面, 每个测压孔之间偏转45°, 由一段1 mm长的导压段连接到传感器, 用于总压、静压以及偏转角的测量, 第4个测压孔开在探针头部末端的圆柱斜切面上, 同样采用导压管连接到传感器上, 用于测量俯仰角. 探针所封装动态传感器型号为XCS-062, 直径为1.6 mm, 该传感器固有频率为150 kHz, 测压范围±34 kPa.



图4 高频动态探针结构图

Fig. 4 Structure chart of dynamic probe with high frequency

实验中采用简单的气膜爆炸来产生一个近似阶跃响应信号的装置, 由于气膜爆炸瞬间会受到气膜本身的弹性以及外界的干扰作用, 在气膜瞬间爆炸之前, 气膜表面因为受力不均, 对内部气体进行压缩, 使得内部气体振荡, 因此会使得阶跃响应曲线产生波动. 但是由于输入、输出信号同时产生波动, 对输入、输出之间模型辨识的影响不大. 如图5所示, 通过布置动态传感器来测量气膜爆炸瞬间的压力响应曲线, 该传感器因为不带容腔, 因此测量的响应曲线即可作为高频动态探针的输入压力信号. 而高频动态探针的输出压力信号则通过其自带管腔的动态传感器直接测量. 其中实验中采用的 Kulite 动态传感器测压范围是±5 psi

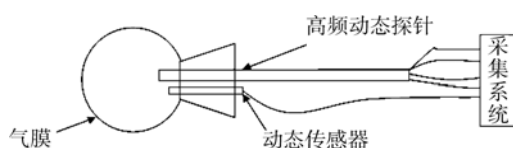


图5 实验装置图

Fig. 5 Experimental set-up diagram

(约34475 Pa), 频率响应为150 kHz, 根据理论上容腔系统固有频率的计算公式并结合该探针的容腔尺寸可得容腔的固有频率10.9~13.4 kHz, 对于实际的气体 and 容腔而言, 固有频率会小于13.4 kHz. 根据采样定理, 采集系统所选取的采样频率为20 kHz. 图6和图7分别为所测得输入、输出压力信号, 从图中可以看出, 输出信号的波动比输入信号的波动大, 而且输出信号和输入信号不相等, 使得探针使用之前需要进行动态标定从而确定探针所测得的信号与真实信号之间的关系. 因此本文接下来采用 ARMAX(自动回归滑动平均)模型进行模型辨识, 确定输入、输出之间的关系之后就可以进行模型辨识, 来获得高频动态探针各孔容腔的传递函数.

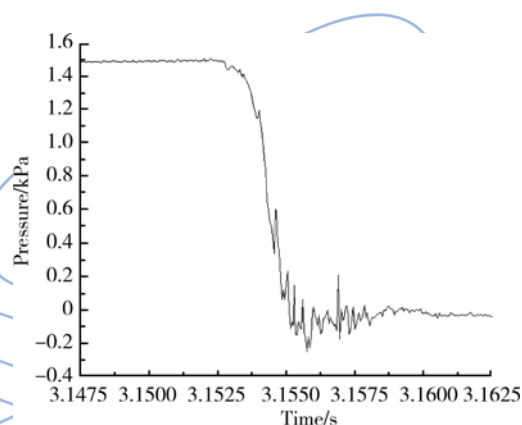


图6 实验测得的输入信号

Fig. 6 Measured input signal

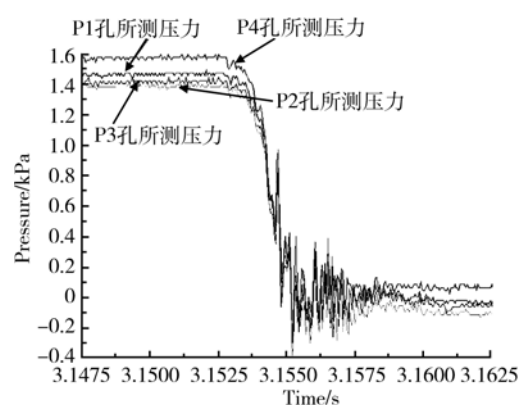


图7 实验测得的输出信号

Fig. 7 Measured output signal

由于如果直接采用 ARMAX 模型辨识图6、图7测量的结果, 则辨识的结果将是全局的辨识结果, 辨识的模型会忽略局部的振荡环节, 为此在进行模型辨识之前, 需要对局部的振荡环节进行放大. 因此本文接下来首先将输入、输出信号分别

对时间求导,得到输入、输出的冲击响应曲线,然后在采用 ARMAX 模型辨识进行模型辨识.在辨

识过程中,通过带有遗忘因子的递推最小二乘法来确定 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 的值.

P1 容腔模型 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 的值

$$\begin{aligned} A(q) = & 1 + 2.148q^{-1} + 3.808q^{-2} + 5.053q^{-3} + 7.902q^{-4} + 9.882q^{-5} + 12.42q^{-6} + 13.1q^{-7} + \\ & 15.08q^{-8} + 14.83q^{-9} + 15.06q^{-10} + 13.28q^{-11} + 12.63q^{-12} + 10.11q^{-13} + 7.996q^{-14} + 5.414q^{-15} + \\ & 3.602q^{-16} + 1.76q^{-17} - 0.09215q^{-18} - 0.751q^{-19} - 1.597q^{-20} - 1.109q^{-21} - \\ & 1.247q^{-22} + 0.2391q^{-23} + 0.8397q^{-24} + 2.611q^{-25} + 3.621q^{-26} + 5.229q^{-27} + 6.039q^{-28} + \\ & 6.685q^{-29} + 7.004q^{-30} + 6.395q^{-31} + 5.88q^{-32} + 4.331q^{-33} + 3.437q^{-34} + 1.199q^{-35} + \\ & 0.203q^{-36} - 1.551q^{-37} - 1.944q^{-38} - 3.204q^{-39} - 3.044q^{-40} - 3.306q^{-41} - 2.617q^{-42} - \\ & 2.47q^{-43} - 1.637q^{-44} - 1.204q^{-45} - 0.6499q^{-46} - 0.4509q^{-47} - 0.1135q^{-48} + \\ & 0.006226q^{-49} + 0.04556q^{-50} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(q) = & 0.00032q^{-20} - 0.03075q^{-21} - 0.1017q^{-22} - 0.2128q^{-23} - 0.3464q^{-24} - 0.5286q^{-25} - \\ & 0.7444q^{-26} - 1.009q^{-27} - 1.285q^{-28} - 1.586q^{-29} - 1.933q^{-30} - 2.384q^{-31} - 2.896q^{-32} - \\ & 3.437q^{-33} - 3.994q^{-34} - 4.607q^{-35} - 5.239q^{-36} - 5.689q^{-37} - 5.833q^{-38} - 5.847q^{-39} - \\ & 5.918q^{-40} - 5.896q^{-41} - 5.607q^{-42} - 5.259q^{-43} - 5.113q^{-44} - 5.021q^{-45} - 4.724q^{-46} - \\ & 4.494q^{-47} - 4.626q^{-48} - 4.814q^{-49} - 4.731q^{-50} - 4.725q^{-51} - 5.112q^{-52} - 5.441q^{-53} - \\ & 5.416q^{-54} - 5.295q^{-55} - 5.402q^{-56} - 5.321q^{-57} - 5.017q^{-58} - 4.688q^{-59} - 4.438q^{-60} - \\ & 3.971q^{-61} - 3.43q^{-62} - 3.014q^{-63} - 2.576q^{-64} - 1.95q^{-65} - 1.306q^{-66} - \\ & 0.9327q^{-67} - 0.6031q^{-68} - 0.2441q^{-69} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C(q) = & 1 + 1.81q^{-1} + 3.052q^{-2} + 3.969q^{-3} + 6.246q^{-4} + 7.677q^{-5} + 9.022q^{-6} + 10.05q^{-7} + \\ & 10.92q^{-8} + 11.18q^{-9} + 10.41q^{-10} + 10.32q^{-11} + 9.011q^{-12} + 7.683q^{-13} + 5.749q^{-14} + \\ & 4.828q^{-15} + 3.381q^{-16} + 2.033q^{-17} + 1.173q^{-18} + 0.7398q^{-19} + 0.3735q^{-20} \end{aligned}$$

P2 容腔模型 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 的值

$$\begin{aligned} A(q) = & 1 - 0.4555q^{-1} + 0.2409q^{-2} - 0.7461q^{-3} + 0.8024q^{-4} - 0.388q^{-5} + 0.7375q^{-6} - \\ & 0.7595q^{-7} + 0.7689q^{-8} - 0.6506q^{-9} + 0.8045q^{-10} - 0.4728q^{-11} + 0.3365q^{-12} - \\ & 0.4273q^{-13} + 0.4818q^{-14} - 0.009462q^{-15} + 0.3726q^{-16} - 0.3817q^{-17} + 0.1869q^{-18} - \\ & 0.1795q^{-19} + 0.2619q^{-20} - 0.1623q^{-21} + 0.4071q^{-22} - 0.2516q^{-23} + 0.1951q^{-24} - \\ & 0.284q^{-25} + 0.3652q^{-26} - 0.326q^{-27} + 0.2583q^{-28} - 0.3789q^{-29} + 0.4407q^{-30} - 0.2618q^{-31} + \\ & 0.2683q^{-32} - 0.141q^{-33} + 0.1499q^{-34} - 0.2375q^{-35} + 0.1997q^{-36} - 0.1622q^{-37} + 0.2425q^{-38} - \\ & 0.2024q^{-39} + 0.06238q^{-40} - 0.06021q^{-41} + 0.04669q^{-42} - 0.04887q^{-43} + 0.09488q^{-44} - \\ & 0.1124q^{-45} + 0.03219q^{-46} - 0.02213q^{-47} + 0.09069q^{-48} - 0.03716q^{-49} - 0.12q^{-50} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(q) = & -0.0189q^{-20} - 0.02801q^{-21} - 0.01183q^{-22} - 0.00796q^{-23} + 0.01369q^{-24} + 0.009433q^{-25} - \\ & 0.03583q^{-26} - 0.04866q^{-27} - 0.01998q^{-28} - 0.02778q^{-29} - 0.06951q^{-30} - 0.06918q^{-31} - \\ & 0.03587q^{-32} - 0.01031q^{-33} + 0.002007q^{-34} - 0.05439q^{-35} - 0.1097q^{-36} + 0.03685q^{-37} + \\ & 0.121q^{-38} - 0.1115q^{-39} - 0.2835q^{-40} - 0.1436q^{-41} + 0.1192q^{-42} + 0.1193q^{-43} - \\ & 0.06698q^{-44} - 0.1447q^{-45} - 0.03965q^{-46} - 0.0775q^{-47} - 0.153q^{-48} - 0.03371q^{-49} + \\ & 0.07764q^{-50} + 0.03769q^{-51} - 0.09168q^{-52} - 0.0805q^{-53} - 0.07392q^{-54} - 0.004896q^{-55} - \\ & 0.01237q^{-56} + 0.01799q^{-57} - 0.125q^{-58} - 0.05014q^{-59} + 0.1281q^{-60} + 0.003806q^{-61} - \\ & 0.1589q^{-62} - 0.1005q^{-63} + 0.08056q^{-64} + 0.1764q^{-65} - 0.06315q^{-66} - 0.2061q^{-67} - \\ & 0.03331q^{-68} + 0.1583q^{-69} \end{aligned}$$

$$C(q) = 1 - 0.07893q^{-1} - 0.8169q^{-2} - 0.1547q^{-3} + 0.6851q^{-4} - 0.1903q^{-5} + 0.514q^{-6} + 0.06058q^{-7} - 0.329q^{-8} - 0.3297q^{-9} + 0.8013q^{-10} + 0.1647q^{-11} - 0.753q^{-12} + 0.1325q^{-13} + 0.7013q^{-14} - 0.1378q^{-15} + 0.1145q^{-16} + 0.2831q^{-17} - 0.3652q^{-18} - 0.0006998q^{-19} + 0.2283q^{-20}$$

P3 容腔模型 $A(q), B(q), C(q)$ 的值

$$A(q) = 1 - 0.6104q^{-1} + 0.7583q^{-2} - 0.9948q^{-3} + 1.072q^{-4} - 0.8818q^{-5} + 1.347q^{-6} - 1.105q^{-7} + 0.9793q^{-8} - 1.255q^{-9} + 0.961q^{-10} - 1.269q^{-11} + 1.308q^{-12} - 1.425q^{-13} + 1.173q^{-14} - 1.421q^{-15} + 1.304q^{-16} - 1.366q^{-17} + 1.319q^{-18} - 1.289q^{-19} + 1.365q^{-20} - 1.329q^{-21} + 1.218q^{-22} - 1.093q^{-23} + 1.019q^{-24} - 0.9431q^{-25} + 0.8893q^{-26} - 0.844q^{-27} + 0.6662q^{-28} - 0.7241q^{-29} + 0.5779q^{-30} - 0.5717q^{-31} + 0.5295q^{-32} - 0.597q^{-33} + 0.3457q^{-34} - 0.3504q^{-35} + 0.3512q^{-36} - 0.3361q^{-37} + 0.2504q^{-38} - 0.2395q^{-39} + 0.1312q^{-40} - 0.08477q^{-41} + 0.1245q^{-42} - 0.01944q^{-43} - 0.004655q^{-44} - 0.02799q^{-45} - 0.06052q^{-46} + 0.1016q^{-47} + 0.02321q^{-48} + 0.0005818q^{-49} - 0.03105q^{-50}$$

$$B(q) = -0.02278q^{-20} - 0.02755q^{-21} - 0.02096q^{-22} - 0.003848q^{-23} + 0.001394q^{-24} + 0.008646q^{-25} - 0.02306q^{-26} - 0.03913q^{-27} - 0.02012q^{-28} - 0.03326q^{-29} - 0.0701q^{-30} - 0.01909q^{-31} - 0.02671q^{-32} + 0.004814q^{-33} - 0.03055q^{-34} - 0.0589q^{-35} - 0.05096q^{-36} + 0.1502q^{-37} + 0.07026q^{-38} - 0.07688q^{-39} - 0.1833q^{-40} - 0.0522q^{-41} + 0.1297q^{-42} + 0.179q^{-43} + 0.02682q^{-44} - 0.0474q^{-45} - 0.0896q^{-46} - 0.1253q^{-47} - 0.1275q^{-48} + 0.1675q^{-49} + 0.1856q^{-50} + 0.02921q^{-51} - 0.1444q^{-52} - 0.09709q^{-53} - 0.01323q^{-54} + 0.1404q^{-55} + 0.1059q^{-56} + 0.09496q^{-57} - 0.06854q^{-58} - 0.0359q^{-59} + 0.001272q^{-60} + 0.04181q^{-61} + 0.1107q^{-62} + 0.06178q^{-63} + 0.05705q^{-64} + 0.04764q^{-65} - 0.07541q^{-66} - 0.07517q^{-67} - 0.01094q^{-68} + 0.2171q^{-69}$$

$$C(q) = 1 - 0.4519q^{-1} - 0.1915q^{-2} - 0.1947q^{-3} + 0.2202q^{-4} - 0.0418q^{-5} + 0.9202q^{-6} - 0.2957q^{-7} - 0.03051q^{-8} - 0.4138q^{-9} - 0.08111q^{-10} - 0.4565q^{-11} + 0.8107q^{-12} - 0.1958q^{-13} + 0.1702q^{-14} + 0.05449q^{-15} + 0.1207q^{-16} - 0.6331q^{-17} + 0.4058q^{-18} - 0.01409q^{-19} + 0.4215q^{-20}$$

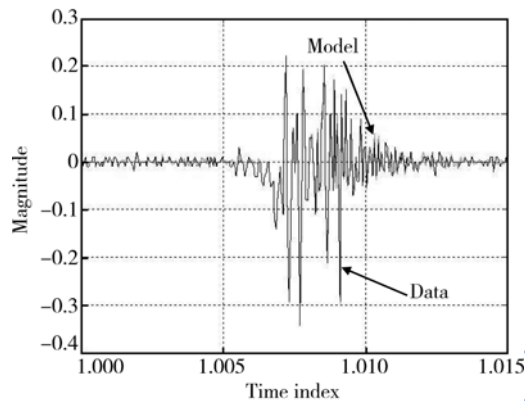
P4 容腔模型 $A(q), B(q), C(q)$ 的值

$$A(q) = 1 - 0.1182q^{-1} + 1.056q^{-2} - 0.275q^{-3} + 0.7189q^{-4} - 0.458q^{-5} + 0.6984q^{-6} - 0.786q^{-7} + 0.5492q^{-8} - 1.082q^{-9} + 0.3069q^{-10} - 0.97q^{-11} + 0.002829q^{-12} - 0.8123q^{-13} - 0.03141q^{-14} - 0.6171q^{-15} + 0.08821q^{-16} - 0.2563q^{-17} - 0.02806q^{-18} + 0.1132q^{-19} - 0.2155q^{-20} + 0.2706q^{-21} + 0.09925q^{-22} + 0.3462q^{-23} + 0.1644q^{-24} + 0.2515q^{-25} + 0.2244q^{-26} + 0.1374q^{-27} + 0.1973q^{-28} - 0.04838q^{-29} + 0.00644q^{-30} - 0.1911q^{-31} - 0.08477q^{-32} - 0.1976q^{-33} - 0.04303q^{-34} - 0.2832q^{-35} + 0.06815q^{-36} - 0.3267q^{-37} + 0.2898q^{-38} - 0.2343q^{-39} + 0.2526q^{-40} - 0.08239q^{-41} + 0.1547q^{-42} - 0.1179q^{-43} + 0.2158q^{-44} - 0.1951q^{-45} + 0.03557q^{-46} - 0.1226q^{-47} + 0.07743q^{-48} - 0.08413q^{-49} + 0.09285q^{-50}$$

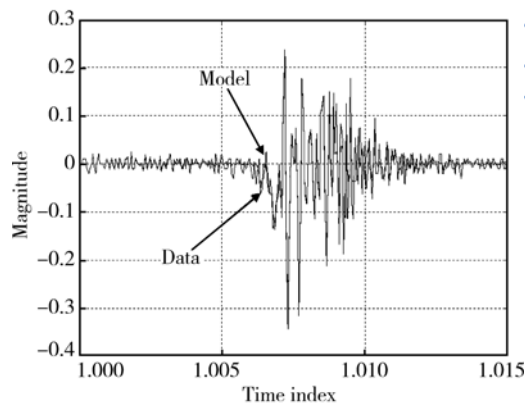
$$B(q) = -0.02361q^{-20} - 0.04573q^{-21} - 0.05619q^{-22} - 0.05015q^{-23} - 0.01849q^{-24} + 0.005523q^{-25} + 0.001389q^{-26} - 0.02264q^{-27} - 0.001343q^{-28} - 0.04072q^{-29} - 0.08103q^{-30} - 0.08119q^{-31} - 0.08824q^{-32} - 0.03418q^{-33} - 0.03713q^{-34} - 0.03571q^{-35} + 0.02181q^{-36} + 0.1628q^{-37} + 0.2323q^{-38} + 0.1032q^{-39} - 0.08155q^{-40} - 0.03843q^{-41} + 0.02491q^{-42} + 0.13q^{-43} + 0.1233q^{-44} + 0.1024q^{-45} + 0.07097q^{-46} - 0.00176q^{-47} - 0.1047q^{-48} - 0.06673q^{-49} + 0.03984q^{-50} + 0.1336q^{-51} + 0.09712q^{-52} - 0.03416q^{-53} - 0.01036q^{-54} + 0.03424q^{-55} + 0.08053q^{-56} + 0.05581q^{-57} - 0.01018q^{-58} - 0.0008229q^{-59} +$$

$$\begin{aligned}
& 0.0902q^{-60} + 0.08629q^{-61} + 0.00635q^{-62} - 0.000943q^{-63} + 0.08151q^{-64} + \\
& 0.1578q^{-65} + 0.05995q^{-66} - 0.02908q^{-67} - 0.05516q^{-68} - 0.03496q^{-69} \\
C(q) = & 1 + 0.3244q^{-1} + 0.1542q^{-2} + 0.2557q^{-3} + 0.06438q^{-4} - 0.03286q^{-5} + \\
& 0.03359q^{-6} - 0.01836q^{-7} - 0.09299q^{-8} - 0.3338q^{-9} - 0.2532q^{-10} - 0.03386q^{-11} + \\
& 0.094q^{-12} - 0.2114q^{-13} - 0.1968q^{-14} + 0.1427q^{-15} + 0.1629q^{-16} + 0.1097q^{-17} + \\
& 0.071q^{-18} + 0.1345q^{-19} + 0.09233q^{-20}
\end{aligned}$$

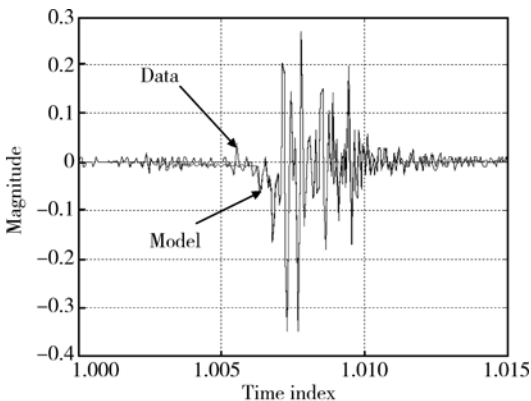
在确定了 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 值之后, 可通过测得的输出信号来确定输入信号的值. 辨识结果如图 8 所示. 从图 8 中可以看出辨识效果良好, 辨识误差均小于 2×10^{-4} , 而且从图 9 可以看出高



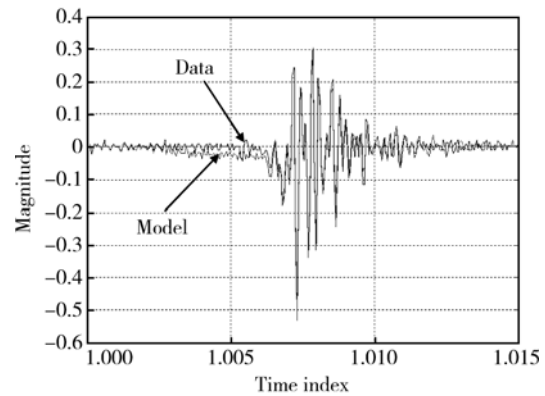
(a) Measured and simulated model output of sensor (P1)



(b) Measured and simulated model output of sensor (P2)



(c) Measured and simulated model output of sensor (P3)



(d) Measured and simulated model output of sensor (P4)

图 8 高频动态探针 4 个孔的模型辨识结果
Fig. 8 Models identification results of the four holes of the dynamic probe with high frequency

频动态探针 4 个孔的容腔系统是一个阻尼系统, 其中含有振荡环节. 当系统的幅频特性下降到频率为 0 时的分贝值以下 3 分贝即 10^{-3} 时, 对应的频率为系统的带宽频率, 从图 9 上可以看出该容腔系统的带宽频率即固有频率在 $10^{4.7}$ rad/s, 即 8 kHz, 可以根据辨识模型中 $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ 的值来确定探针容腔输入输出之间的关系.

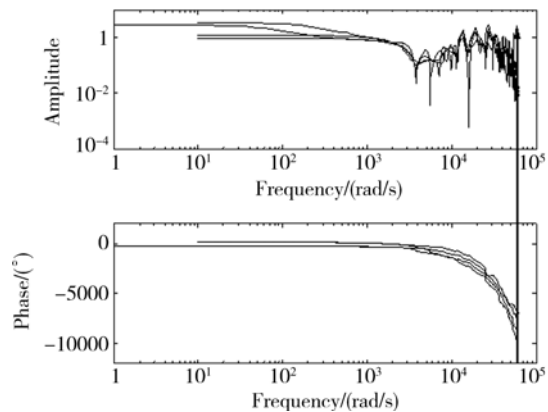


图 9 输入输出的频率特性曲线

Fig. 9 Frequency response curves of input/output

3 讨 论

根据对实验测得的结果进行模型辨识之后,得到该高频响动态探针的容器固有频率在 8 kHz. 对于设计转速为 3 000 r/min, 叶片数为 58 片的压气机实验台, 叶片的通过频率为 3 480 Hz. 如果在测量转子后内部流场时, 每个通道采集 10 个点, 即测试系统的响应频率为 34.8 kHz, 而本文所标定的探针的响应频率低于所需要的测试系统的响应频率. 根据理论推导的容腔的固有频率, 可知探针响应频率主要受容腔尺寸的影响, 因此需要对探针的结构, 容腔的尺寸进行改进, 尽可能的减小容腔的尺寸, 以满足所需要的测试响应频率.

根据辨识的结果可知该探针的容腔系统不是一个二阶系统, 实验所得的容腔固有频率和理论推导的二阶系统的固有频率不一样, 因为理论推导的模型假设气体在引压管里是刚体, 而实际的探针容腔很小, 需要考虑气体的可压缩性, 因此在该探针的容腔模型选择时不能采用二阶阻尼模型.

4 结 论

本文采用一种简单可行的容腔效应测量方法来对高频动态探针进行动态标定, 实验中给定近似阶跃的输入响应信号, 通过动态探针里面的传感器测得的输出信号, 结合给定的输入信号, 采用 ARMAX 模型辨识方法, 辨识出探针中容腔系统的模型, 结果表明, 模型辨识的效果良好, 而且所测得探针的容腔固有频率在 8 kHz. 通过所辨识的模型中输入输出之间的关系, 即可通过探针所测得的压力信号 $y(t)$ 来确定探针所测的真实压力信号 $u(t)$, 更加有利于高频动态探针的实际应用.

参考文献:

- [1] 劳力云, 陈珙, 张宏建, 等. 引压管路对动态差压检测影响的分析[J]. 计量学报, 1999, 20(4): 286-291.
LAO Liyun, CHEN Gong, ZHANG Hongjian, et al. The effect of pressure ducts on dynamic characteristics of pressure drop measuring system[J]. Acat Metrologica Sinica, 1999, 20(4): 286-291. (in Chinese)
- [2] Pfau A, Schlienger J, Kalfas A I, et al. Unsteady, 3-dimensional flow measurement using a miniature virtual 4 sensor fast response aerodynamic probe (FRAP)[R]. ASME Paper GT2003-38128, 2003.
- [3] Humm H J, Gossweiler C R, Gyarmathy G. On fast-response probes Part 2 aerodynamic design studies[J]. Reaserch Papers 1995, 117(4): 618-624.
- [4] 崔海涛, 刘庆明. 冲击波压力传感器测试系统的动态标定[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(1): 92-96.
CUI Haitao, LIU Qingming. Dynamic calibration of shock wave pressure measurement system[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(1): 92-96. (in Chinese)
- [5] 张东青, 王烨. 压力传感器动态测量方法的研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(6): 23-25.
ZHANG Dongqing, WANG Ye. Research on dynamic measurement method for pressure transducer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(6): 23-25. (in Chinese)
- [6] 王跃科. 现代动态测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 1-2.
- [7] 朱明武, 梁人杰, 柳光辽, 等. 动压测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 284-307.
- [8] 郭勇, 王效葵, 王洪伟. 高频压力探针动态性能的补偿方法[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 273-277.
GUO Yong, WANG Xiaokui, WANG Hongwei. Improvement on dynamic characteristics of high response pressure probe[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 273-277. (in Chinese)
- [9] 包家立. 带引压管和容腔的压力传感器现场动态标定的探讨[J]. 仪器仪表学报, 1990, 11(1): 65-71.
BAO Jiali. A discussion of the dynamic calibration on the spot for pressure transducer with impulse tube and chamber[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1990, 11(1): 65-71. (in Chinese)
- [10] 林其勋. 热工与气动参数测量[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995: 93-117.
- [11] 王秀峰, 卢桂章. 系统建模与辨识[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 152-173.
- [12] 柳兆荣, 陈金娥, 黄东群. 压力传感器频率响应的分析[J]. 力学学报, 1980, 16(4): 363-372.
LIU Zhaorong, CHEN Jin'e, HUANG Dongqun. An analysis of frequency response of pressure transducer[J]. Acta Mechanica Sinica, 1980, 16(4): 363-372. (in Chinese)