

可控声阻抗声衬控制系统设计及实验研究^{*}

赵红武 孙晓峰

(北京航空航天大学 407 教研室 北京 100083)

1997 年 4 月 2 日收到

1997 年 6 月 17 日定稿

摘要 为了克服传统声衬在实际应用中的限制,介绍了一种可控声抗的声衬,并设计了一套控制系统实现了这种声衬声阻抗的有源控制,使这种声衬的吸声系数在任意声源频率范围内始终保持最优值或定值,从而满足一定的阻抗条件。这个工作对发动机吸声降噪有源控制及通过压气机机匣处理抑制颤振具有重要实际意义。

PACS 数 43.50

The design and experimental investigation of control system for acoustic liner with controllable impedance

ZHAO Hongwu SUN Xiaofeng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics 407 Beijing 100083)

Received Apr. 2, 1997

Revised Jun. 17, 1997

Abstract In this study, a kind of new acoustic liner with controllable impedance based on vortex sound theory has been introduced. The impedance of this kind of liner can be controlled according to external sound source condition so that the sound absorption coefficient of the liner can keep optimal or the liner can satisfy requested impedance condition under any sound source condition. A set of active control system has been designed for this kind of liner in this investigation. The quality of this kind of liner with control system has been improved greatly. Especially with the appearance of concept about active control of unsteady flow of the compressor, it will be found that this kind of liner with controllable impedance would be more valuable for active control of engine noise and advanced casing treatment of compressor.

引言

传统的声衬一般设计成具有微穿孔的蜂窝结构,这种声衬一般是针对某一特定噪声源设计的。这种声衬一旦设计加工好后,只对某一频率范围内的噪声源具有良好的吸声降噪效果,而一旦噪声源频率超出了此范围,则声衬的吸声效果明显变坏,因此这种声衬缺乏灵活性。特别是在

^{*} 国家自然科学基金和航空基金资助项目

航空发动机上, 由于发动机在飞机起飞、着陆及飞行状态下转速不一样, 因此噪声源的频率是变化的, 同时发动机流动环境的变化及发动机重量、尺寸和费用的严格限制使得声衬的优化变得极其困难。为了克服这些限制, 我们力图寻求一种能灵活调控其吸声效果的声衬, 这就是可控声阻抗的声衬。

另一方面, 随着对压气机性能要求的日益提高, 对其非定常流动稳定性主动控制越来越受到国内外专家学者的重视。Watanabe 和 Kaji^[4] 曾作过一个大胆的尝试, 就是试图在叶轮机机匣上安装蜂窝结构的多孔声衬来抑制叶片颤振。他们给出了众多的数值结果来讨论声衬声阻抗分布对叶片颤振的影响。然而, 这种声抗吸声结构对某一特定频率具有很好的声能吸收特性, 而稍微偏离“主频”, 则能量吸收效果急剧下降。而叶轮机叶片由于加工误差, 叶片固有频率不一致是必然的。因此, 怎样设计出与之相匹配的声衬就变成一个令人关心的问题。虽然这项工作发表于 1984 年在英国召开的第三届叶轮机气动弹性力学会议上, 然而, 由于问题的困难和复杂性, 人们不再沿此思路开展抑制压气机叶片颤振的工作。尽管如此, 由于叶片振动将产生声波或压力波, 通过声衬吸收压力波的能量从而破坏形成颤振的正激励机制的办法是一条相当新颖的思路。要克服传统声衬在这方面应用限制的唯一方法是采用可控声阻抗的声衬。进一步, 人们注意到采用可控声阻抗的壁面边界很可能在控制压气机非定常流动方面有更广泛的应用前景^[7,9]。

以上这些应用所面临的一个共同问题是: 怎样设计出一种可控声阻抗的声衬。事实上, 我们注意到, 1980 年 Bechert 的著名实验研究揭示, 可以通过旋涡来吸收声能量, 并为此展示了一种可控声阻抗分布声衬的雏形, 即通过在普通多孔声衬中引入“偏流”, 而从小孔中流出的气流为满足出口边界条件将产生涡环并吸收入射到界面上的声波能量从而大大地改善了普通声衬的吸声特性。九十年代以来, 剑桥大学 Dowling^[8] 教授的研究组做了更深入的工作, 对多个小孔或缝隙出流的涡动力学及与声波相互作用的问题进行了详细的理论和试验研究, 并由此可以发现通过调节小孔气流速度, 可以实现对声衬吸收频率以及吸收能量大小的控制。尽管这种以涡声能量转换为新型声衬还有许多复杂的与涡动力学和气动声学有关的机理有待进一步认识, 但现有的理论和实验工作所展现的应用前景正在引起极大的注意^[1,5]。景^[2] 和唐^[3] 对这种可控声阻抗声衬作了大量的实验研究, 从实验结果发现, 通过对声衬的腔深和通过穿孔板气流速度的调节可以调节声衬的声阻抗, 从而使其吸声系数不受声源频率的限制。但这种声衬要在实际中得到应用, 必须实现声阻抗的自动调节, 即跟随外界声源频率的变化而实时调节其声阻抗。本文的目的就是设计一套控制系统, 实现对这种声衬声阻抗的实时控制。

1 控制模型

图 1 为这种可控声阻抗声衬的试验模型, 文献 [8] 中对这种声衬的理论模型作了详尽的推导, 得出了声衬吸声系数与声源频率、声衬腔深及通过声衬穿孔板气流速度之间的数学关系如下:

$$R = \frac{Q_r/\chi - ik_0 \cos \theta - k_0 l \cos \theta / \tan(k_0 l \cos \theta)}{Q_r/\chi + ik_0 \cos \theta - k_0 l \cos \theta / \tan(k_0 l \cos \theta)} \quad (1)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2)$$

其中: R 为反射系数, α 为吸声系数, $Q_r = k_0 d \cos \theta l / 2a$ 为共振参数, $\chi = \gamma - \delta i$ 。式中 γ 和 δ 均为斯特劳哈数的函数:

$$\gamma = \frac{I_1^2(\kappa R)(1 + 1/\kappa R) + (4/\pi^2)e^{2\kappa R} \text{ch}(\kappa R) K_1^2(\kappa R) [\text{ch}(\kappa R) - \text{sh}(\kappa R)/\kappa R]}{I_1^2(\kappa R) + (4/\pi^2)e^{2\kappa R} \text{ch}(\kappa R) K_1^2(\kappa R)}$$

$$\delta = \frac{(2/\pi \kappa R) I_1(\kappa R) K_1(\kappa R) e^{2\kappa R}}{I_1^2(\kappa R) + (4/\pi^2)e^{2\kappa R} \text{ch}(\kappa R) K_1^2(\kappa R)}$$

其中: κR 为斯特劳哈数, $I_1(\kappa R)$ 、 $K_1(\kappa R)$ 为变形 Bessel 函数。

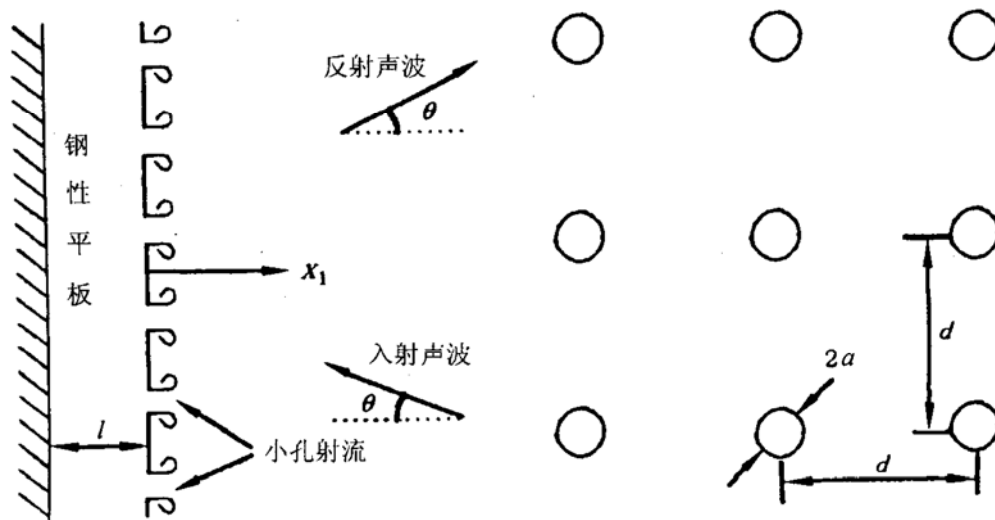


图1 可控声阻抗声衬模型

由以上关系式可见，声衬吸声系数是声源频率、声衬腔深及穿孔板气流速度的函数。而穿孔板气流速度又是与通过穿孔板气流流量成正比的，因此为方便起见，本文采用通过穿孔板的气流流量作为可控变量。因此声衬模型可表示成如下函数关系：

$$\alpha = f(f_r, l, Q) \quad (3)$$

其中： f_r 为声源频率， l 为声衬腔深， Q 为穿孔板流量。

这里我们没有考虑到声衬的动态特性，是由于我们假定声衬腔深和气流流量改变时，声衬的吸声系数瞬时达到稳定，声衬的动态特性对整个控制系统的动态响应影响不大，这在实际中是容许的。因此可以将以上关系式作为声衬的控制模型。

2 控制方案

本文所要实现的控制目标有两个。一是使声衬在变化的声源条件下始终保持最优的吸声系数；二是使声衬在变化的声源条件下始终保持一定的吸声系数，满足一定的阻抗条件，从而实现声阻抗的任意调控。本控制系统中被控变量是声衬的吸声系数，可控变量是声衬的腔深和通过声衬穿孔板的气流流量。声源频率的变化为干扰量。本文采用了如下形式的控制方案。

1. 对于第一种控制目标，从对这种声衬所作的实验结果(如图8)来看，只有当声衬腔深与声源频率满足共振关系，并且有一定的气流通过声衬穿孔板时，声衬能达到最优吸声系数。因此可采用开环最优控制方案，控制系统结构框图如图2所示。

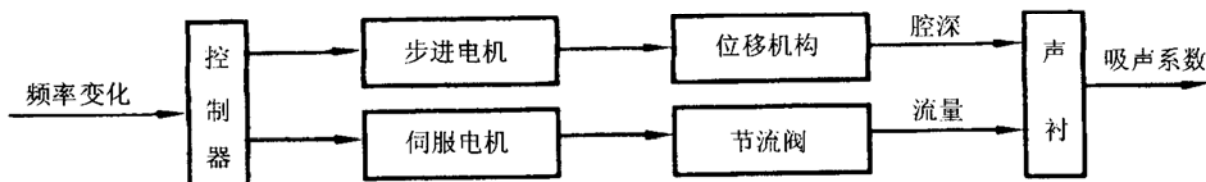


图2 声衬最优控制系统结构框图

2. 对于第二种控制目标，从实验结果(如图7)来看，当通过声衬穿孔板有一定气流时，随着腔深的改变，声衬的吸声系数是从0到1连续变化的，因此可以通过调节腔深使声衬的吸声系数控制在0~1之间某一点。可采用闭环反馈控制方案，控制系统结构框图如图3所示。

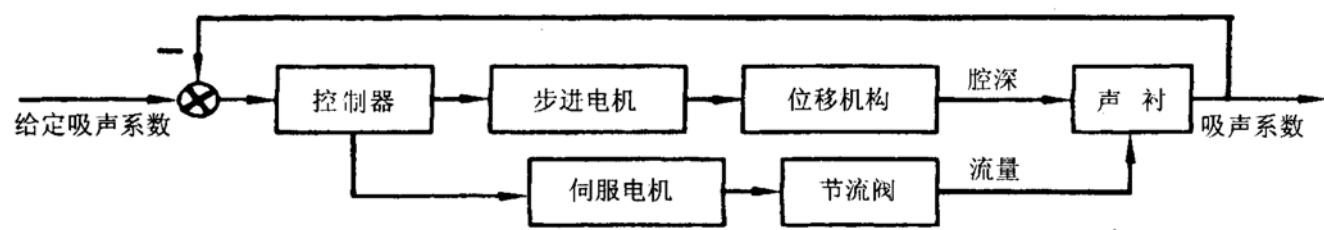


图 3 声衬反馈控制系统结构框图

3. 本控制系统采用计算机作为控制器，PC 机通过安装在声衬上的两个传声器采集信号进行处理、计算，再将控制量送入单片机，由单片机对步进电机及伺服电机进行控制，从而达到控制声衬腔深和流量的目的。整个控制系统结构示意图如图 4 所示。

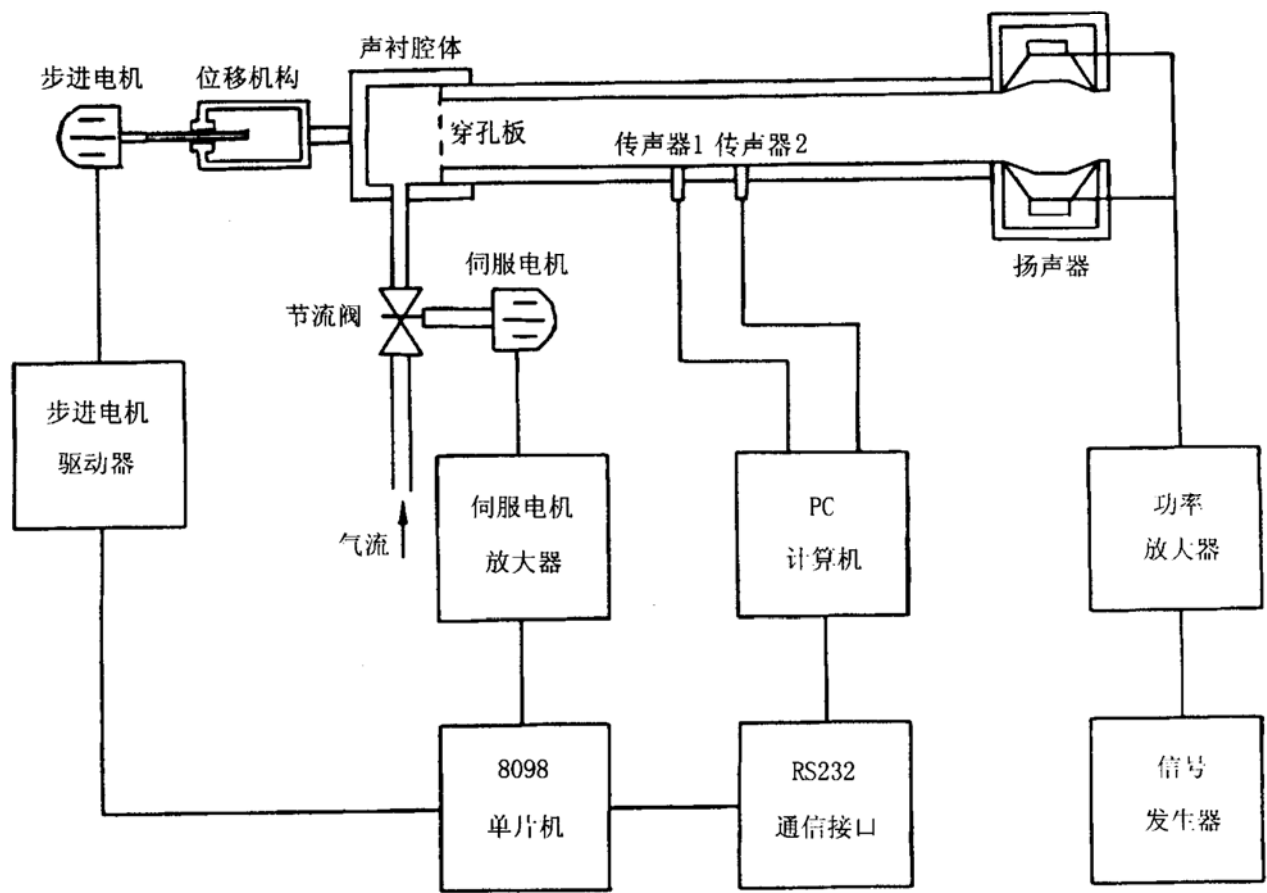


图 4 声衬控制系统结构示意图

在本控制系统中采用双传声器法对声衬声学参数进行测量^[6]，同时采用 FFT 方法进行声信号的频谱分析。频谱分析包括双通道信号的幅度谱和相位谱分析。通过频谱分析可以得到两个通道信号各自的幅值及它们之间的相位差。有了这些数据，根据文献 [6] 中双传声器法测量声衬声学参数计算关系式，便可以得到声衬的吸声系数和声阻抗。

3 控制算法

3.1 吸声系数最优控制算法

最优控制系统的状态结构框图如图 5 所示。

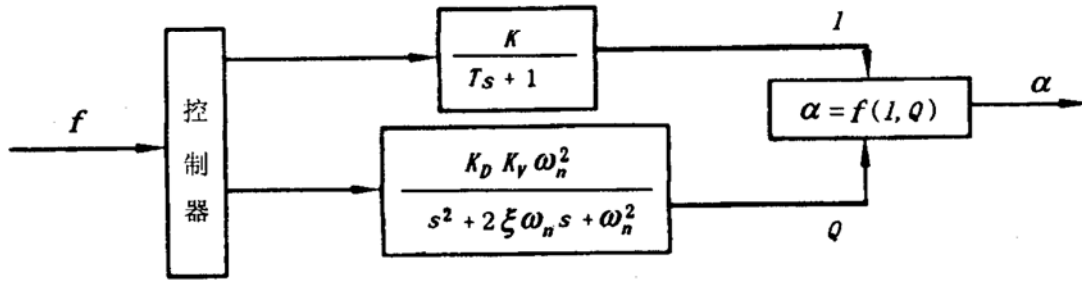


图 5 最优控制系统状态结构图

对于声衬腔深的最优调节量可以利用如下共振关系式进行计算：

$$l = \frac{2a}{(2\pi f_r d/c_0)^2} \tag{4}$$

对于流量的最优调节量，理论上可以利用式 (3) 对流量 Q 求导进行计算。但实际上，式 (3) 是一个相当复杂的数学关系式，要计算最优流量调节值是极其困难的，同时由于理论模型与实际还是有差异的，计算出的最优值不一定准确。因此本文采用实验的方法，用最小二乘拟合得到一条最优控制曲线 (如图 9 所示)，利用此曲线实现了流量的最优调节。同时本系统采用开环控制，系统的动态响应是稳定的。

3.2 吸声系数定值控制算法

吸声系数定值控制采用反馈控制方案来实现，反馈控制系统状态结构框图如图 6 所示：

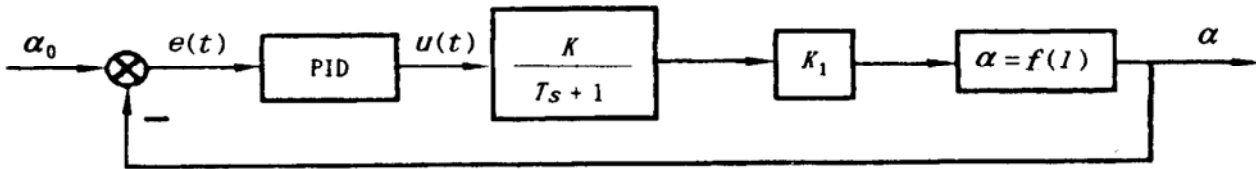
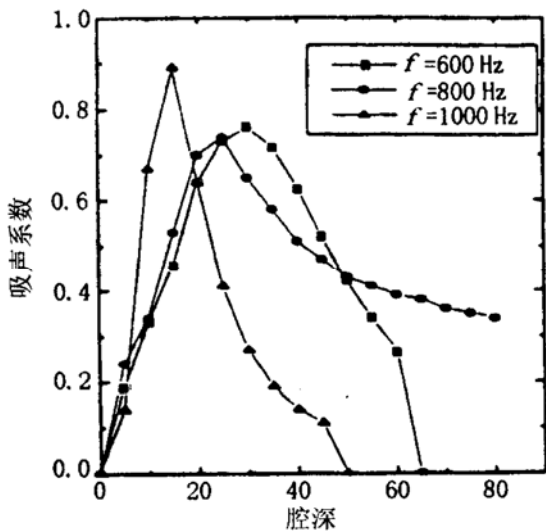
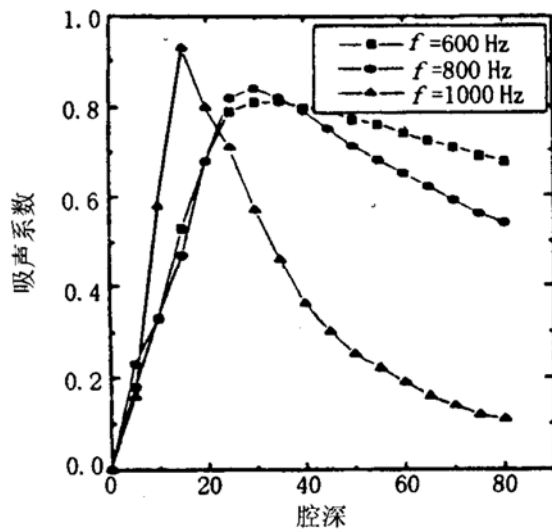


图 6 反馈控制系统状态结构图

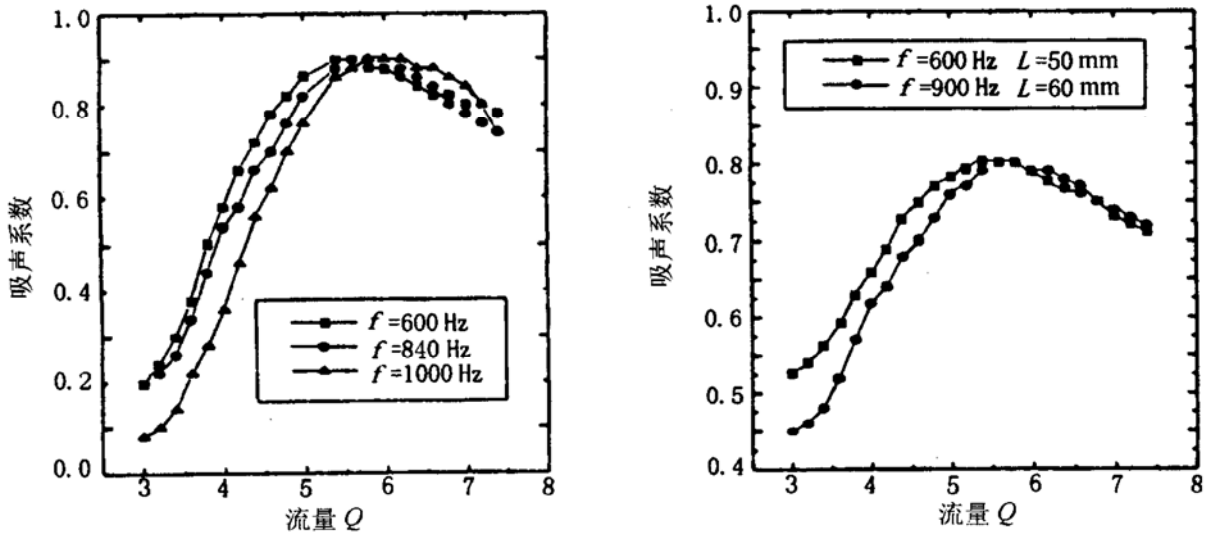


$Q = 0$ 腔深的变化对声衬吸声系数的影响

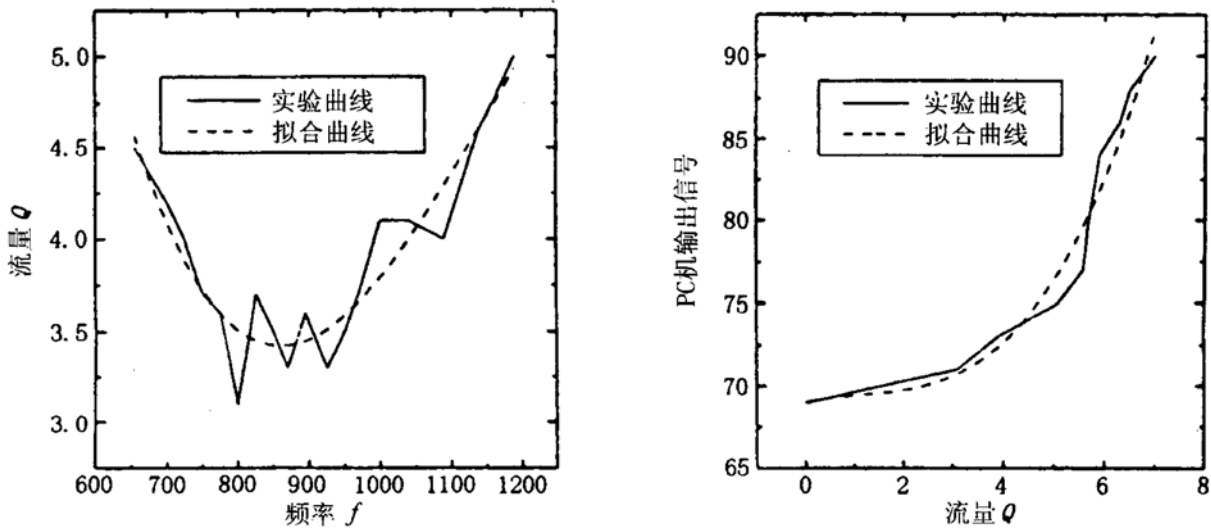


$Q = 0$ 腔深的变化对声衬吸声系数的影响

图 7 声衬腔深的变化对声衬吸声系数的影响



在共振状态声衬气流流量对声衬吸声系数的影响 在非共振状态声衬气流流量对声衬吸声系数的影响
图 8 声衬穿孔板气流流量变化对声衬吸声系数的影响



最优控制流量和频率的关系拟合曲线 PC 机输出信号和流量关系拟合曲线
图 9 声衬流量最优控制曲线

在反馈控制中, 本文采用了 PID 控制算法。PID 控制算法是在古典控制论中应用比较成熟的一种方法。通过对 PID 参数的整定可以得到满意的控制结果。本文中对 PID 参数的整定是通过系统动态仿真来实现的。通过动态仿真可以得到系统的动态响应曲线, 调整 PID 参数直到得到比较满意的动态响应为止。此时的 PHD 参数便可作为反馈系统控制参数。

4 控制实验结果

本文利用图 4 所示的系统进行了声衬吸声系数最优控制和定值控制的实验。图 10 为不加任何控制的实验结果。此时吸声系数受声源的影响比较大, 只能在某一特定声源频率范围内能保持较大值。图 11 和图 12 为只调节声衬两个可控变量中之一时的最优控制实验结果。此时声衬吸声系数能在较大的频率范围内保持较高值, 但还是受声源频率变化的影响。同时可以发现声衬的声阻和声抗可分别加以控制。图 13 为对声衬两个可控变量同时加以调节的最优控制结果, 此时声衬吸声系数基本不受声源频率变化的影响而始终保持最优值。图 14 和图 15 为给定吸声系数的反馈控制结果。从图中可以看出, 此时声衬吸声系数随声源频率的变化始终保持定值, 给定吸声系数较低时不需要通气流, 而给定吸声系数较高时必须通以一定的气流。

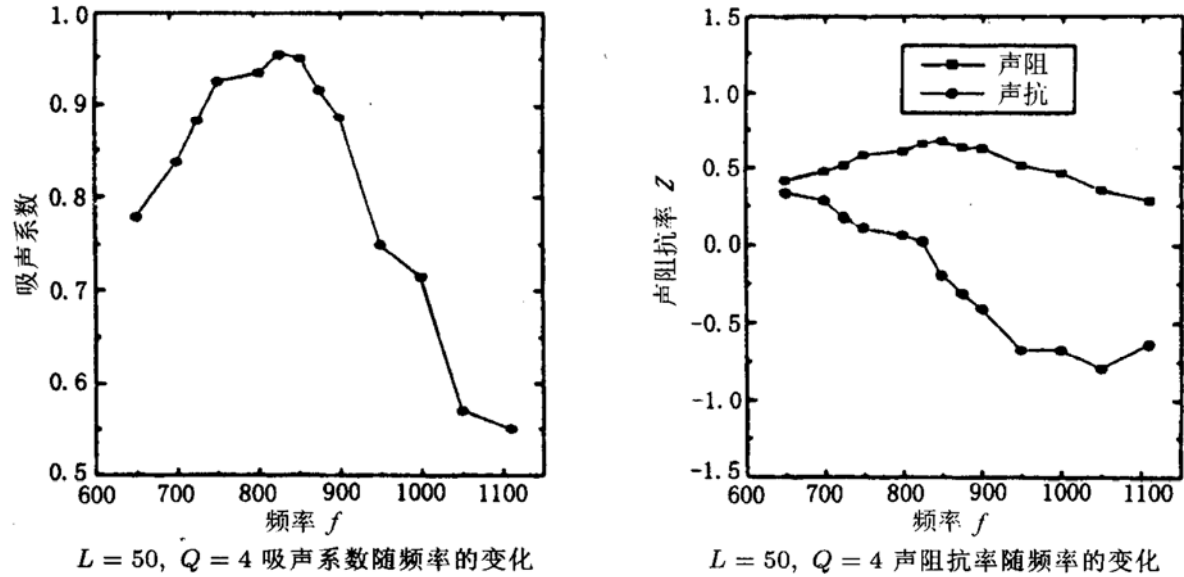


图 10 腔深和流量都固定时声衬吸声系数和声阻抗率随频率的变化关系

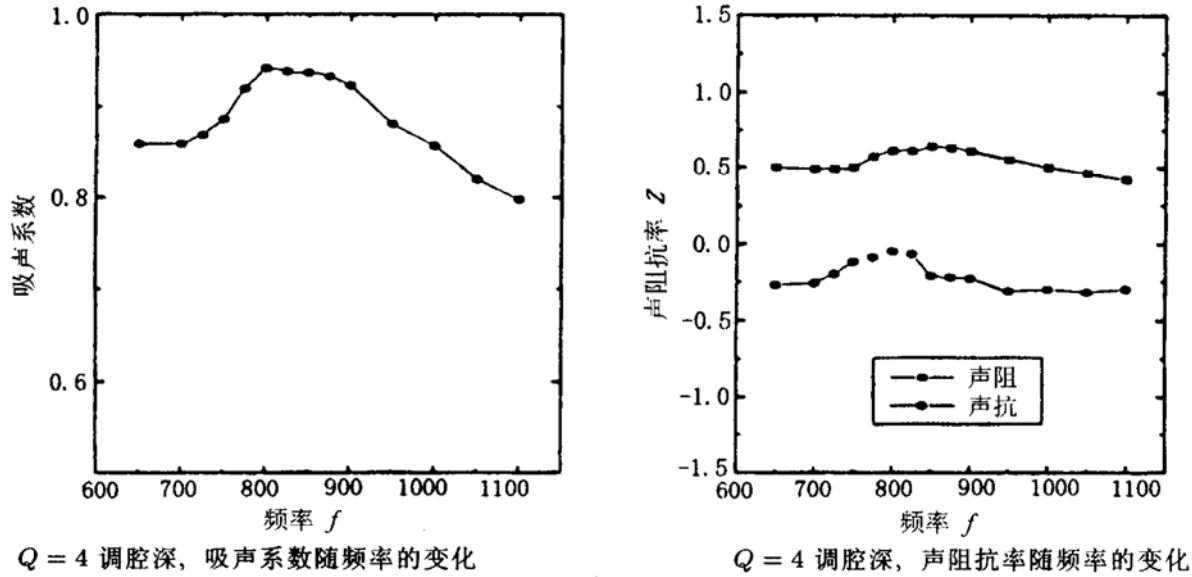


图 11 只控制腔深声衬吸声系数和声阻抗率随频率的变化关系

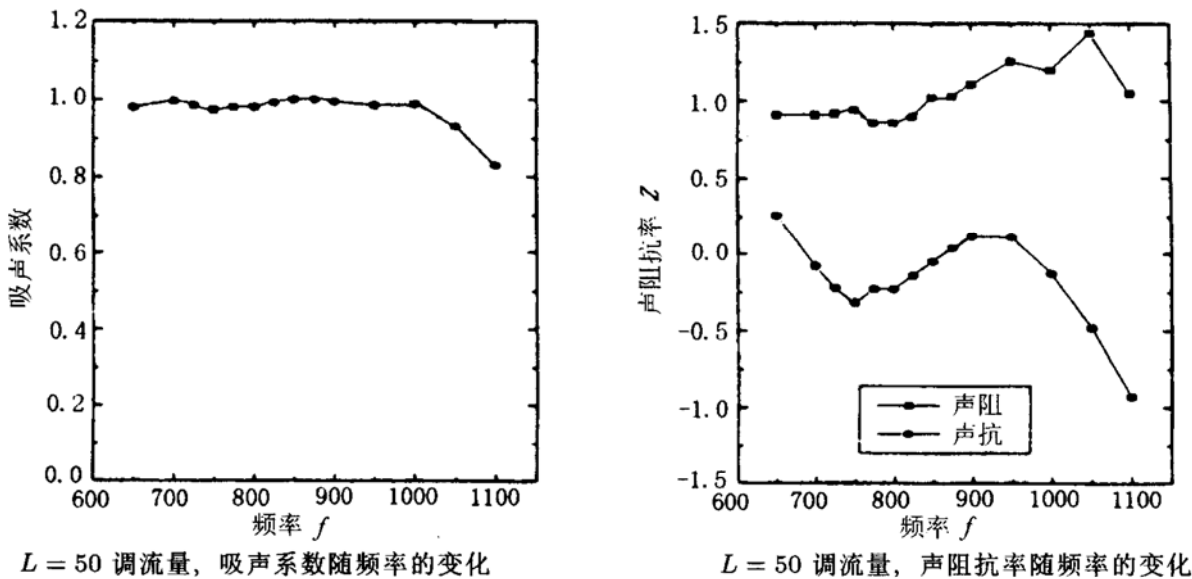
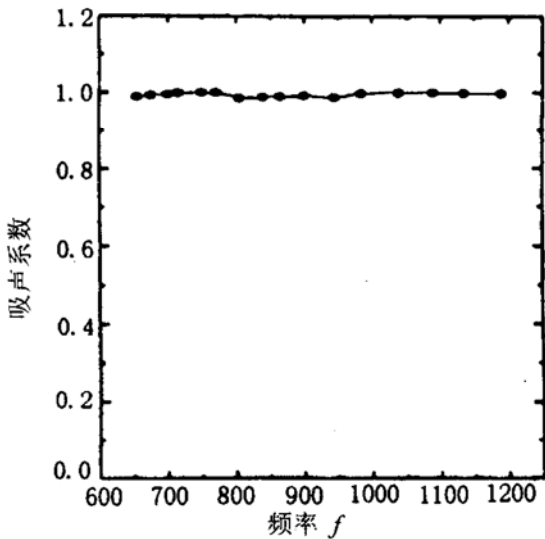
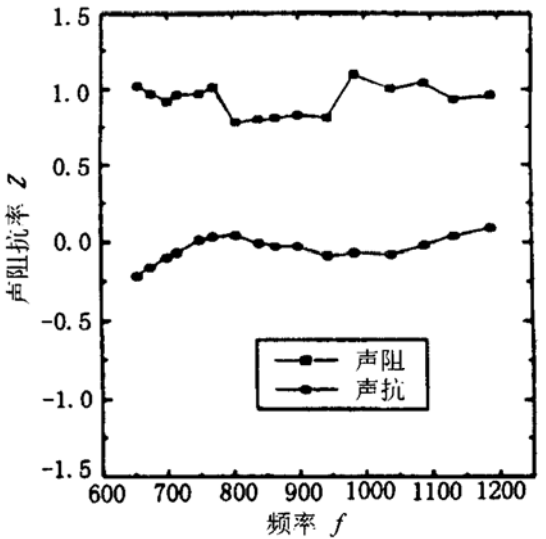


图 12 只控制流量声衬吸声系数和声阻抗率随频率的变化关系

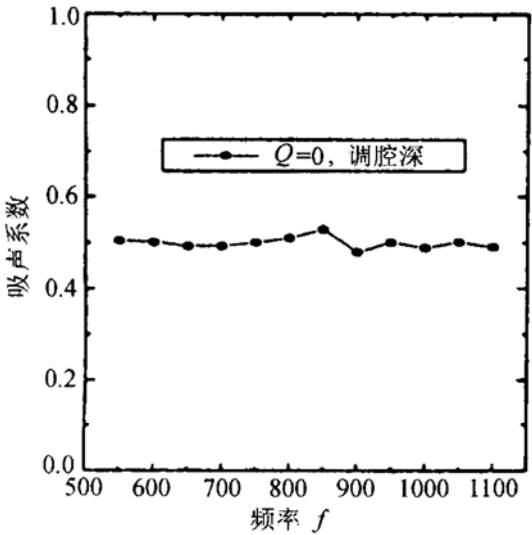


腔深和流量同时调节，吸声系数随频率的变化

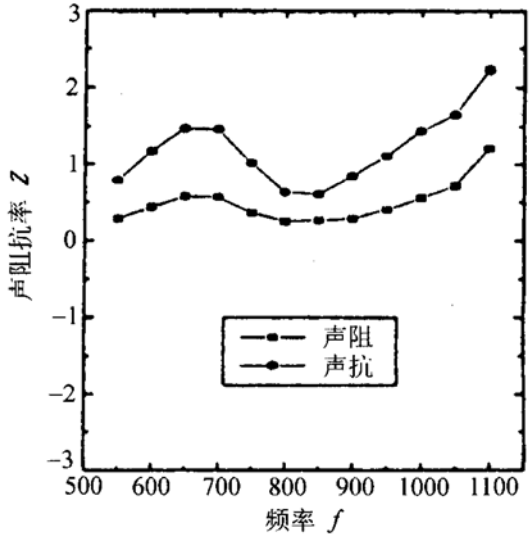


腔深和流量同时调节，声阻抗率随频率的变化

图 13 腔深和流量同时调节，声衬吸声系数和声阻抗率随频率的变化关系

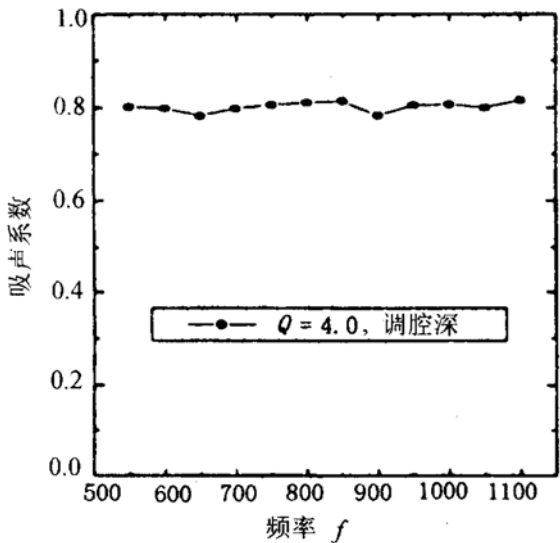


给定吸声系数为 0.5 的控制结果

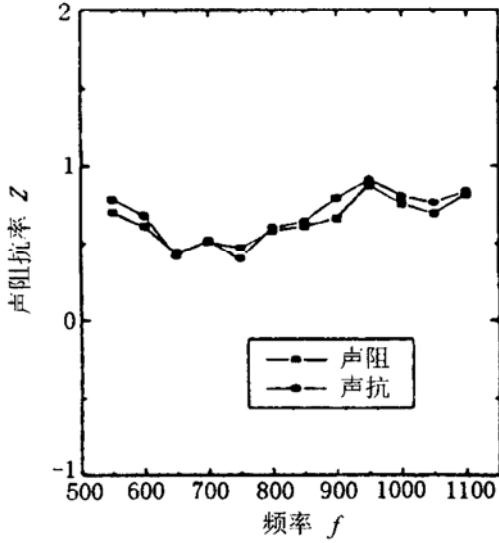


控制吸声系数为 0.5，声阻抗率随频率的变化

图 14 给定吸声系数的反馈控制结果



给定吸声系数为 0.8 的控制结果



控制吸声系数为 0.8，声阻抗率随频率的变化

图 15 给定吸声系数的反馈控制结果

5 结 论

通过以上实验结果本文得出如下结论:

1. 这种声衬的声阻抗具有极大的可控性, 加上控制系统后的声衬性能明显提高, 具有更大的适用性。

2. 通过对声衬腔深和通过穿孔板的流量的联合调节可以实现声衬吸声系数的最优控制, 只调节任何一个参数都不可能达到吸声系数最优。说明这种声衬对发动机吸声降噪有源控制有着重要的实际应用价值。

3. 通过对声衬腔深的调节可以实现声衬吸声系数在给定值的反馈控制。这说明通过有源控制可以使声衬达到一定的阻抗条件, 这对于将这种声衬用于压气机机匣处理来控制压气机非定常流动不稳定性具有探索性的意义。

参 考 文 献

- 1 孙晓峰, 周 盛. 气动声学. 北京: 国防工业出版社, 1994
- 2 景小东. 以涡声理论为基础的新型声衬的实验研究与分析. 声学学报, 1997, 22(2): 167—175
- 3 唐凌云. 多孔壁板波涡相互作用的机理及其在控制管道传播应用的实验及数值研究. 北京航空航天大学硕士论文, 1996
- 4 Watanabe, Kaji. Possibility of cascade flutter suppression by use of non-rigid duct walls. The symposium proceedings of unsteady aerodynamics of turbomachines and propellers, cambridge england, 1984: 261—276
- 5 Alan Powell. Theory of vortex sound. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1964, 36(1): 177—194
- 6 Johnston J P, Schmidt W E. Measurement of acoustic reflection from an obstruction in a pipe with flow. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1978, 63(5): 1455—1460
- 7 Sun X F. On the relation between the inception of rotating stall and casing treatment. AIAA 96-2579
- 8 Hughes I J, Dowling A P. The absorption for sound by perforated linings. *J. Fluid Mech. Vol.*, 1990, 218: 299—336
- 9 Sun Xiao-Feng. Three-dimensional compressible flow stability theory of rotating stall. BUAA Technical Report BH-B4765, Beijing University of Aeronautics and Astronautics(82pages, Written in English), May 1996