

变截面闭管中非线性驻波场的实验研究

彭 锋, 范瑜晔, 刘丹晓, 佟小鹏, 尹 铎, 刘 克

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

摘要: 当变截面闭管(CTVCS)的固有一阶反共振频率设计在接近共振基频的倍频处, 共振基频激励下的二次谐波将受到极大抑制, 以致在闭管末端可获得高声压、低谐波畸变的波形。相比等截面闭管, CTVCS 内的二次谐波特性较为复杂, 且在研究范围内, 谐波随基波声压级的增长未出现明显的饱和趋势。

关键词: 闭管; 变截面; 谐波; 饱和

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-02-0156-07

Experimental research on nonlinear standing waves field in a closed tube with varying cross-section

PENG Feng, FAN Yu-xian, LIU Dan-xiao, TONG Xiao-peng, YIN Yao, LIU Ke
(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: For a closed tube with varying cross-sections(CTVCS), when the frequency of the first natural anti-resonance is designed to be near twice of that of the fundamental resonance, the second harmonic driven under the fundamental resonance frequency will be largely suppressed. Thus a high sound pressure waveform with low harmonic distortion at the end of the tube can be obtained. Compared with the closed tube of a constant cross-section, the properties of the second harmonic in CTVCS are rather complicated. This research shows the trend of the acoustic pressure level of harmonics growing with the fundamental component, but no discernible saturation.

Key words: closed tube; varying cross-section; harmonic; saturation

1 引 言

1940 年, Oberst^[1]首次提出一种在闭管中获得大振幅纯净声波的方法, 即将两个半径不同的圆管连接到一起, 声源在大管端激励, 共振条件下, 在另一侧小管末端会产生高声压、低畸变的声波。Lucas 等人^[2,3]对不同结构空腔内的驻波场进行了研究, 指出可通过设计空腔的几何形状来抑制基波的饱和, 进而将极高的能量转移到管内的波动能量中去, 他们称这类空腔为共振强声合成器(Resonant Mac-

rosynthetic). 近年来, 热声发动机方面的一些研究^[4]发现, 利用变截面谐振管的共振强声特性, 可以有效的抑制其内部高次谐波脉动, 进而很大程度上提高了压比。目前, 如何优化设计谐振管的几何以最大限度的抑制热声系统中的高次谐波成分, 正逐渐引起研究者的关注。

另一方面, 理论上, 闭管中非线性驻波的研究已得到声学研究者们的广泛重视。一维等截面闭管中的大振幅驻波场已有较多研究, 其中马大猷院士提出的“非线性驻波理论”, 已由实验结果得到部分确认^[5]; 实验方面, 刘克^[6,7]对等截面闭管中大振幅驻波的二次谐波及谐波的饱和进行了详细的探讨, 得到了一些非线性驻波的基本规律。目前, 对于 CTVCS, 由于其几何形状的变化, 理论上较一维等截面闭管内的非线性驻波模式更为复杂, 其内部的谐波及饱和关系未见有正式文章论及。

收稿日期: 2007-04-30; 修回日期: 2007-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(No.10374099), 国家自然科学基金(No.10574135)资助。

作者简介: 彭锋(1979-), 男, 安徽铜陵人, 汉族, 博士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。

通讯作者: 彭锋, E-mail: arrfeng@163.com

本文在中国科学院声学研究所专门研制的 CT-VCS 实验系统上, 讨论了在末端如何抑制谐波进而获得高声级、低畸变的波形; 并在其基础上, 对大振幅驻波场的谐波和饱和特性进行相应的实验研究, 得到了一些基本规律。

2 CTVCS 抑制谐波的理论分析

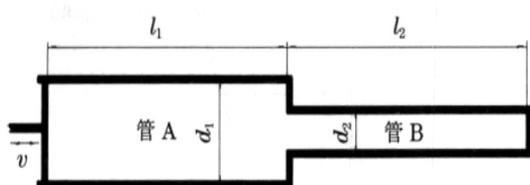


图 1 Oberst 管简图
Fig.1 Oberst tube diagram

突变截面 Oberst 管简图如图 1 所示, 当 A 管左端面由理想活塞源恒速驱动时, A 管左端面、B 管右端面处声压幅值分别为 p_A 、 p_B , 在线性条件下, 考虑管壁处边界层损耗引起的管内声波衰减, 存在如下关系^[1]:

$$|p_B|^2 = \frac{(mp_A)^2}{A^2 + B^2 + (m^2 - 1)C} \quad (1)$$

其中: $A = m \cos(kl_1) \cos(kl_2) - \sin(kl_1) \sin(kl_2)$

$$B = m \sinh(\beta_1 l_1) \cosh(\beta_2 l_2) + \cosh(\beta_1 l_1) \sinh(\beta_2 l_2)$$

$$C = \cos^2(kl_1) \sinh^2(\beta_2 l_2) - \sin^2(kl_2) \sinh^2(\beta_1 l_1)$$

k 为波数, l_1 、 l_2 分别为两段管长, $\beta_{1,2} = 3.18 \times 10^{-5} \sqrt{f} / r_{1,2}$

为两段管内的阻尼系数, $r_{1,2}$ 为两段管的半径, $m = S_1 / S_2$ 为两段管的截面积比, S_1 、 S_2 分别为 A、B 两管段截面积。

定义管两端的幅值传递关系 $|H| = |p_B / p_A|$, 由公式 (1) 可得:

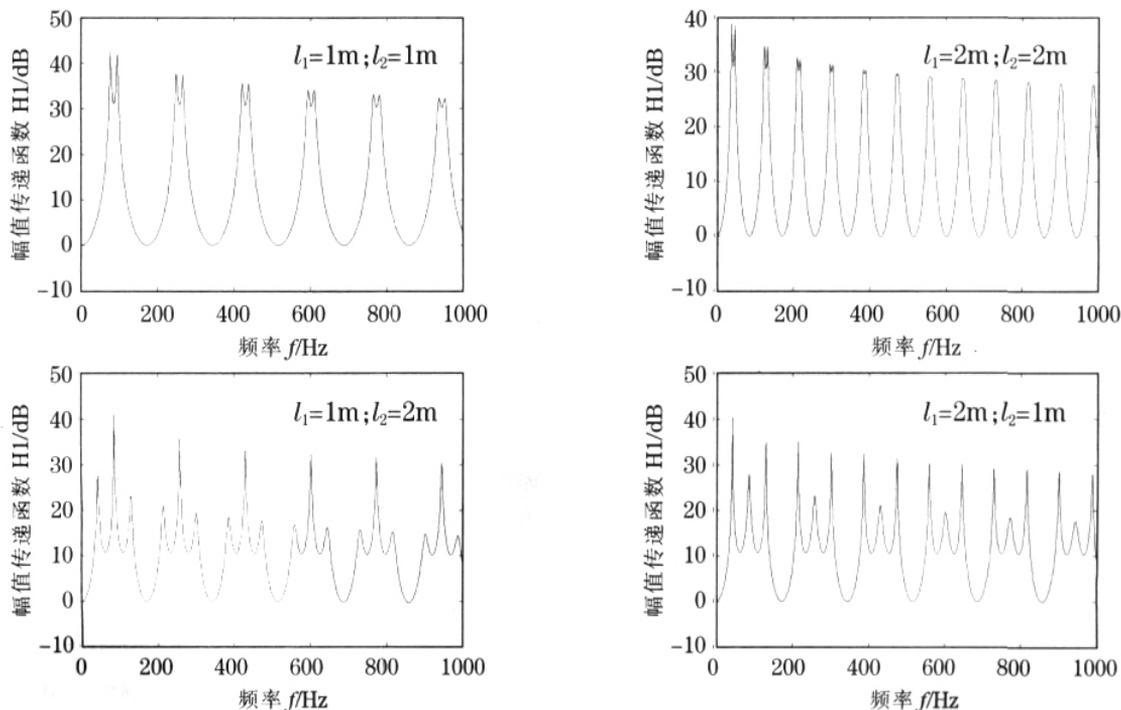
$$H_1 = 20 \lg |H| = 20 \lg \left| \frac{p_B}{p_A} \right| = 10 \lg \left| \frac{m^2}{A^2 + B^2 + (m^2 - 1)C} \right| = L_B - L_A \quad (2)$$

其中, L_A 、 L_B 分别为两端面处的声压级。式 (2) 决定闭管共振条件:

$$m \cos(kl_1) \cos(kl_2) - \sin(kl_1) \sin(kl_2) = 0 \quad (3)$$

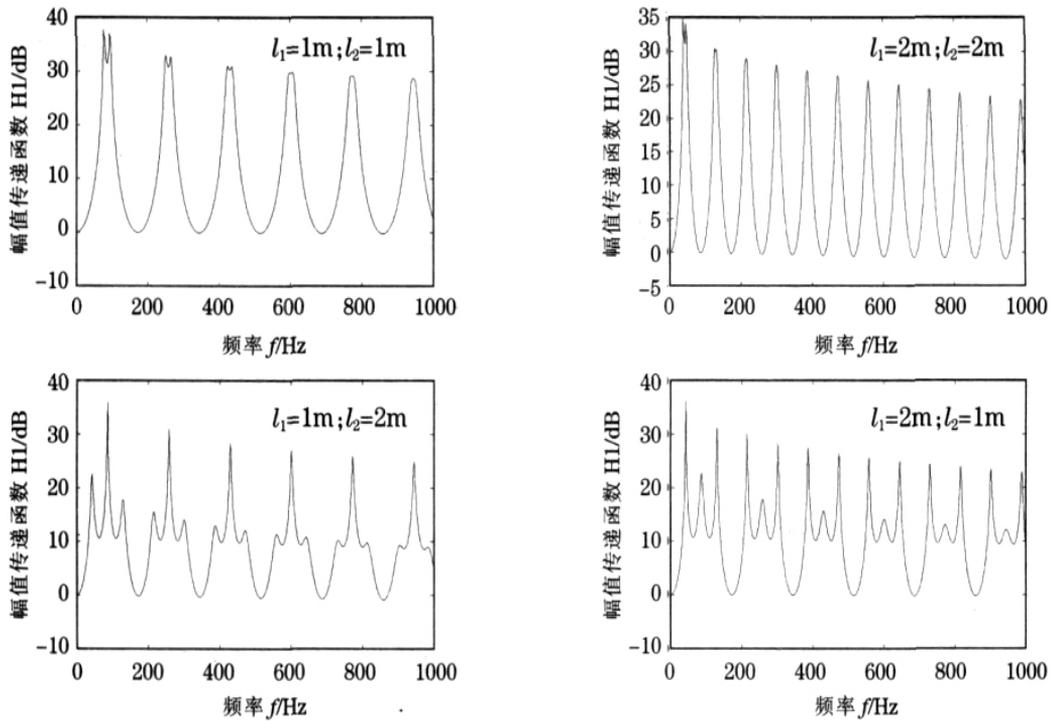
上式可见, 管路的基本参数 m 、 l_1 和 l_2 决定了共振频率, 对于固定的管段组合条件下, (3) 式决定其各共振频率并不谐相关, 即共振基频的谐频并不同时为共振频率, Oberst^[1] 用此失谐原理定性解释了在 CTVCS 中可获得高声级、低畸变声波的现象, 但并没有详细分析 CTVCS 如何抑制谐波成分, 也未讨论如何设计管路以实现最大程度的抑制谐波成分。

图 2 给出了 $d_1 = 90\text{mm}$ 、 $d_2 = 15\text{mm}$ 和 $d_1 = 90\text{mm}$ 、 $d_2 = 8\text{mm}$ 时, 不同长度管段组合下, 由式 (2) 计算得到的 CTVCS 两端幅值传递函数结果。预测结果显示, 共振频率不成倍数关系, 而主反共振频率近似成倍数关系; 幅值传递谱图 2(a)、2(b) 中出现双共振峰和三共振峰结构, 具体形式由管段的基本参数决



(a) A 管直径 90mm, B 管直径 15mm

(a) Diameter of tube A is 90mm and diameter of tube B is 15mm



(b) A管直径90mm, B管直径8mm

(b) Diameter of tube A is 90mm and diameter of tube B is 8mm

图2 两端面间声压的幅值传递函数预测结果

Fig.2 Predicted results of sound pressure transfer function between two ends of the tube

定, 而共振峰值随着频率的增大而整体逐渐减小, 由管内高频声波衰减较快而决定; 当两管段的长度相等时, 随着两段管径的差异增大, 双共振峰的频率差呈现减小的趋势, 图 2(b) 中的双共振峰几乎重合; 此外, 在预测采用的两段不同管径的算例中, 当两段管长相等时, 共振基频的倍频恰好位于主反共振频率附近, 因此, 为了充分抑制共振基频的二次谐波, 可采用此种组合方式。

圆管 A 的内径 d 及壁厚 t 为: $d=90\text{mm}$ 、 $t=10\text{mm}$; 小圆管 B 的内径 d 及壁厚 t 为: $d=15\text{mm}$ 、 $t=5\text{mm}$; $d=8\text{mm}$ 、 $t=7\text{mm}$; 具体的各段管长参见下文。管 A、B 采用不锈钢材质, 两段圆管通过不锈钢制作的刚性转接环相连, 两端面处采用不锈钢制的套筒分别与两段圆管通过螺纹连接并密封, 端面壁厚 15mm, 并钻有直径为 7mm 的圆孔以放置传声器, 闭管自身的重量足以避免其受声源激发而产生管壁振动的可能。

驱动声源采用专门设计和研制的 100W、400W 大功率低频电动扬声器, 其相比活塞式声源具有频率和幅度容易调节、安装方便等优点, 但辐射功率受振膜的线性振幅和自身功率的限制。扬声器经刚性转接头接于粗管末端侧壁。刘克^[8]曾对这种声源安装方式下的实验系统进行过详细的分析, 指出对于远离驱动端的另一端声场, 低频时侧接扬声器可模拟活塞式恒速声源。本文也采用此种声源安装形式, 以对其内部的非线性驻波场进行相关研究。

左右两端面处采用高声级压力场型传声器, 如图 3, Mic.A 为 1/4 BK4944 型驻极体式传声器, 灵敏度 1.0mV/Pa, 动态范围 30dBA~170dBA, Mic.B 为 1/4 BK4941 型电容式传声器和 BK2670 型前置放大器, 灵敏度 0.09mV/Pa, 动态范围 59dB~184dB。测

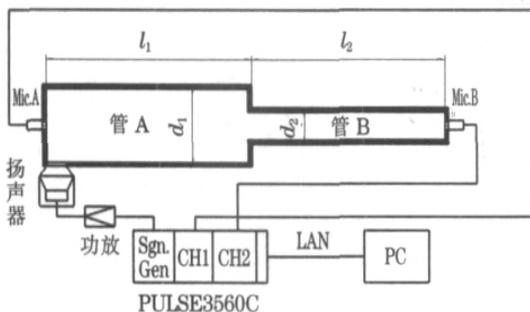


图3 CTVCs 实验系统简图

Fig.3 Experimental set-up for CTVCs

3 实验系统组成

CTVCs实验系统简图示于图 3。实验中选用的大

试前, 采用 BK4228 型活塞式校准仪(基准声压级 124dB/250Hz) 进行校准。传声器与壁面齐平安装以减小其对声场的干扰。传声器安装孔处采用橡皮泥密封以减小漏声。

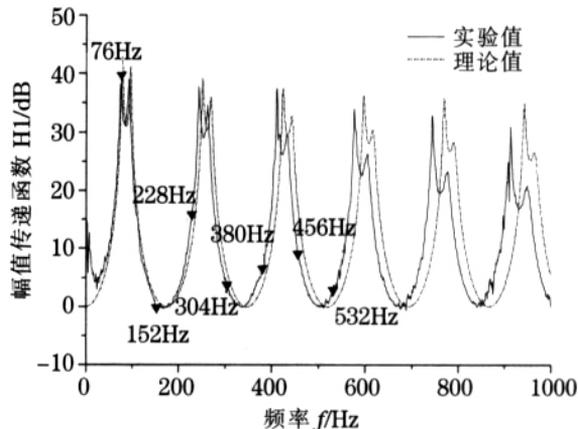
数据采集前端为 B&K Pulse3560C, 前端通过 7536 控制模块提供的 RJ-45 以太网接口与 PC 机进行数据通信, 其中信号发生器和输入输出模块采用 3109 模块, 可提供两路传声器的电源及信号的同步采集, 并可同时提供扬声器所需的激励信号; 软件为 Pulse Labshop, 可提供的信号源包括稳态白噪声和单频信号等, 信号经 3109 模块输出, 由功率放大器 CAC DSA1850B(700W) 放大以驱动扬声器发声, 同时 3109 模块拾取的两路声压信号由软件 7700 型平台进行分析处理, FFT 分析带宽为 1.6kHz, 取线性谱平均 50 次。

4 幅值传递函数实验结果

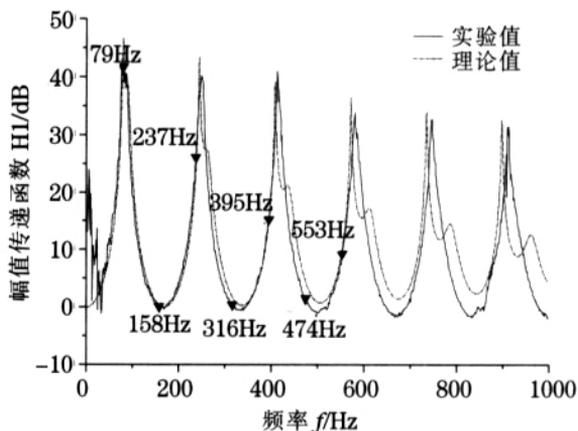
依据上文的预测结果, 为将共振基频的倍频设计在主反共振频率附近, 实验中分别采用 $d_1=90\text{mm}$ 、 $d_2=15\text{mm}$ 、 $l_1=1.0\text{m}$ 、 $l_2=0.983\text{m}$ 和 $d_1=90\text{mm}$ 、 $d_2=8\text{mm}$ 、 $l_1=1.052\text{m}$ 、 $l_2=0.981\text{m}$ 的两套管段系统, 具体形式如图 3 所示。实验中, 声源采用稳态白噪声信号激励, 测得了两端线性幅值传递函数。图 4 给出了实验结果与式(2)的预测结果的对比。可见, 幅值传递函数的预测值与实验值符合得很好, 这说明本文采用侧接扬声器模拟活塞式声源的实验条件在一定程度上是可以满足的; 高频处存在一些差异, 分析原因可能是由于模拟活塞源的近似程度在高频受限或是由于管段装配、尺寸测量误差及传声器本身阻抗对声场的影响而引起; 在 50Hz 以下的频率范围内存在一定差异, 其原因可能是由于在此低频段内扬声器所发信号不稳定或由噪声干扰而造成。表 1 给出了两套管段系统的前几阶共振频率值的理论与实验结果的对比, 显见, 共振频率间没有明显的倍数关系。

图 4(a) 中理论与实验曲线都出现明显的双共振峰形式, 其中共振频率的理论值较实验值稍高, 图 4(b) 中的理论预测结果中有较明显的双峰结构, 但实验结果中基本呈单峰结构, 分析以上这些差异产生的原因可能是由于测试系统存在系统误差引起, 如管段安装后的有效长度存在测量误差而引起、管两端的齐平安装的传声器表面非绝对硬壁、两段管连接处存在微缝等。实验结果的前几阶主反共振峰频率为: 169Hz、335Hz、501Hz、673Hz 和 836Hz, 近

似成倍数关系; 双共振峰间的反共振峰频率: 84Hz、252Hz、423Hz、591Hz、762Hz, 近似成奇数倍关系。



(a) $l_1=1.0\text{m}$, $l_2=0.983\text{m}$, $d_1=90\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$



(b) $l_1=1.052\text{m}$, $l_2=0.981\text{m}$, $d_1=90\text{mm}$, $d_2=8\text{mm}$

图 4 两端面间声压的幅值传递函数的理论与实验对比
Fig.4 Comparison of theoretical with experimental sound pressure transfer functions between two ends of the tube

表 1 共振频率的理论与实验比较

Table 1 Comparison between theoretical and experimental resonance frequencies

(a) $l_1=1.0\text{m}$, $l_2=0.983\text{m}$ $d_1=90\text{mm}$, $d_2=15\text{mm}$		(b) $l_1=1.052\text{m}$, $l_2=0.981\text{m}$ $d_1=90\text{mm}$, $d_2=8\text{mm}$	
实验值/Hz	理论值/Hz	实验值/Hz	理论值/Hz
76/92	78/96	79	79/90
243/262	251/270	244	244/264
411/432	424/444	408	408/439
578/604	597/618	579	572/614
743/773	769/792	746	735/789
910/948	942/966	913	899/964

图 4(a) 对应的管段组合条件下, 当声源激励频率为共振基频 76Hz 时, 管两端声压的时域波形与频谱的实验结果示于图 5。该图显示, 声源处基波声压级为 105dB 时, 波形有一定畸变, 此时, 闭管末端处基波声级波高达 148dB, 且波形较为纯净; 声源处二次谐波比基波低 20dB, 闭管末端处的二次谐波比

基波低 50dB, 即二次谐波能量仅为基波的 10^{-5} , 而在等截面管驻波场中, 相同基波声级情况下, 平均差别约为 25dB^[6]。对比图 5, 由图 4(a) 的幅值传递函数结果可见, 一方面, 基频分量由于共振特性得到了很大放大; 另一方面, 此管段组合条件下共振基频 (76Hz) 的倍频 (152Hz) 恰好位于一阶反共振频率 (169Hz) 附近, 故二次谐波受到显著抑制, 最终在末端得到了高声级、低畸变的纯净波形。

图 4 中用 符号标出了共振基频的前几次谐波频率, 可见, 前几次偶次谐波几乎都位于反共振频率附近, 因此得到了极大抑制; 奇次谐波并不位于共振频率处, 虽有一些放大, 但由于其较之基波的放大程度要小, 因此仍然得到一定抑制; 总体上, 谐波成分相对基波的放大都得到了抑制。

5 谐波特性及饱和规律的实验结果

等截面闭管的一维大振幅驻波实验研究^[6]表明, 大振幅驻波场的二次谐波相对于基波的量值不是常数, 而是随激发基频呈规律性变化。即, 固定基波声压级为某一参考值时, 在谐波出现饱和之前, 当谐波

的频率在驻波管共振频率处, 谐波曲线出现峰值, 当谐波频率接近驻波管反共振频率时, 曲线呈现谷值, 总体上, 二次谐波随基波基频的变化可用一初等函数来描述。针对 CTVCS 内非线性驻波的二次谐波特性, 本文采用上文所述的实验系统进行了相应的研究。图 6 给出了两套 CTVCS 在固定基频声压级为 151dB 和 145dB 的二次谐波特性曲线, 横坐标为激励基频的频率, 纵坐标为二次谐波的声压级, 其中图 6(a) 声源激励基频的间隔为 10Hz, 图 6(b) 激励基频的间隔为 2Hz。对比图 4, 两种条件下的二次谐波曲线并未在共振频率处出现峰值, 在反共振频率处也未出现谷值, 因此, 其谐波特性与等截面管有着很大的差异, 二次谐波特性曲线不规则, 不存在类似等截面闭管中存在的简单规律, 准确的描述尚需建立相应理论模型。

等截面闭管内非线性驻波场的谐波饱和实验^[7]显示, 在激波形成前, 谐波声压级随基波声压级的增长, 在基波达到约 153dB 以上将出现饱和趋势。对于 CTVCS, 图 7 给出了不同管段组合条件下, 激励频率分别为共振频率 416Hz、262Hz、411Hz 及 579Hz 时的二、三次谐波饱和关系实验曲线。其中,

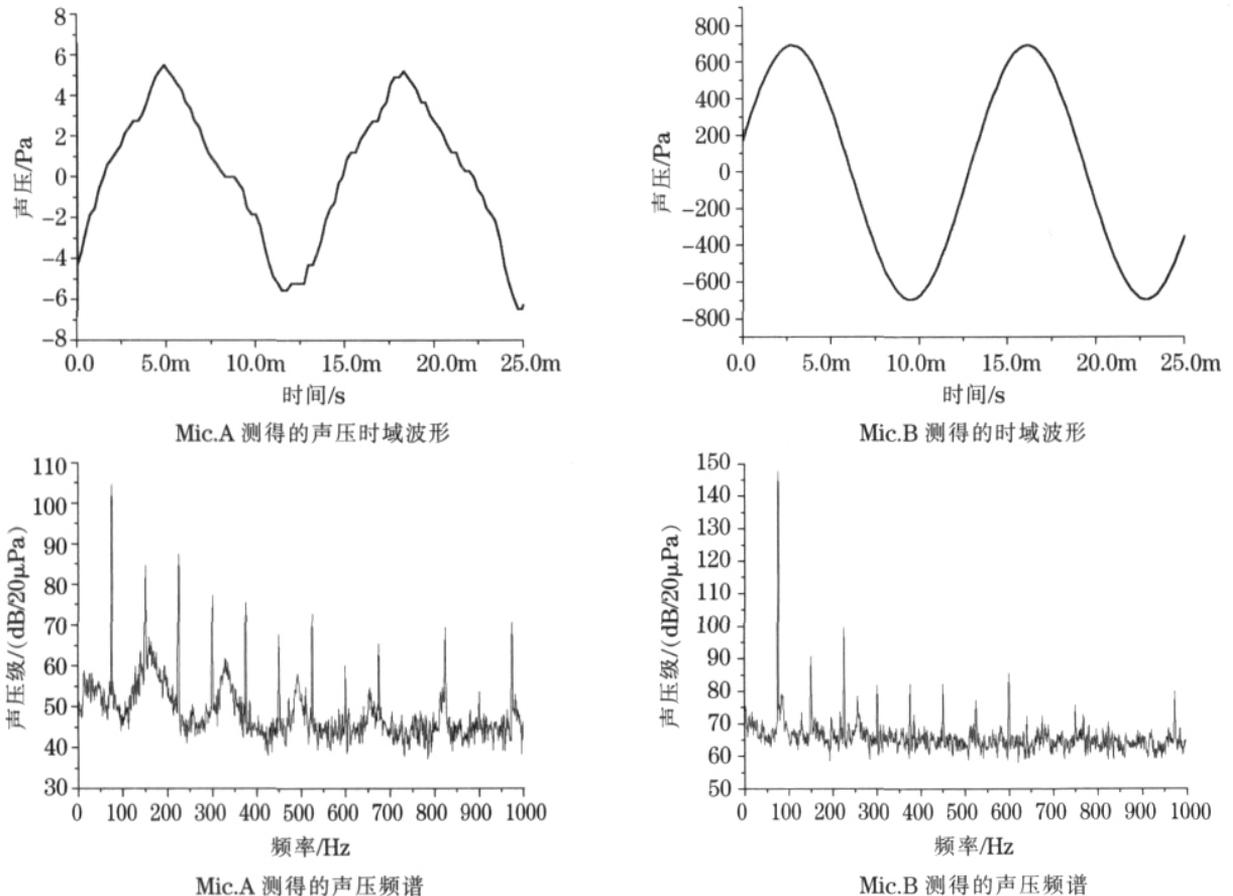


图 5 76Hz 声源激励两端面处时频域结果对比图

Fig.5 Comparison between sound pressures in time and frequency domain at two ends of the tube driven under 76Hz

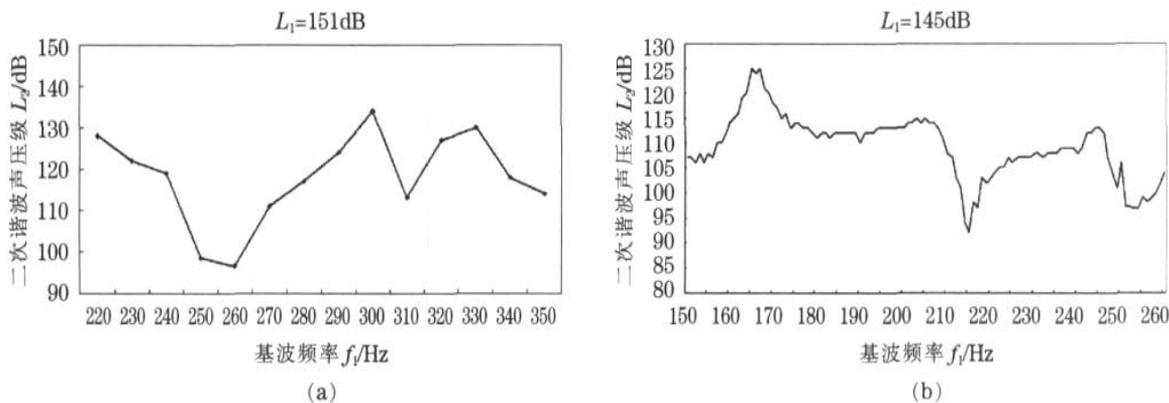


图 6 二次谐波特性曲线(图 a 对应的两段圆管 $l_1=1.0\text{m}$ $d_1=90\text{mm}$ $l_2=0.983\text{m}$ $d_2=15\text{mm}$;
图 b 对应的两段圆管 $l_1=1.052\text{m}$ $d_1=90\text{mm}$ $l_2=0.981\text{m}$ $d_2=8\text{mm}$)

Fig.6 The characteristic curves of the second harmonic

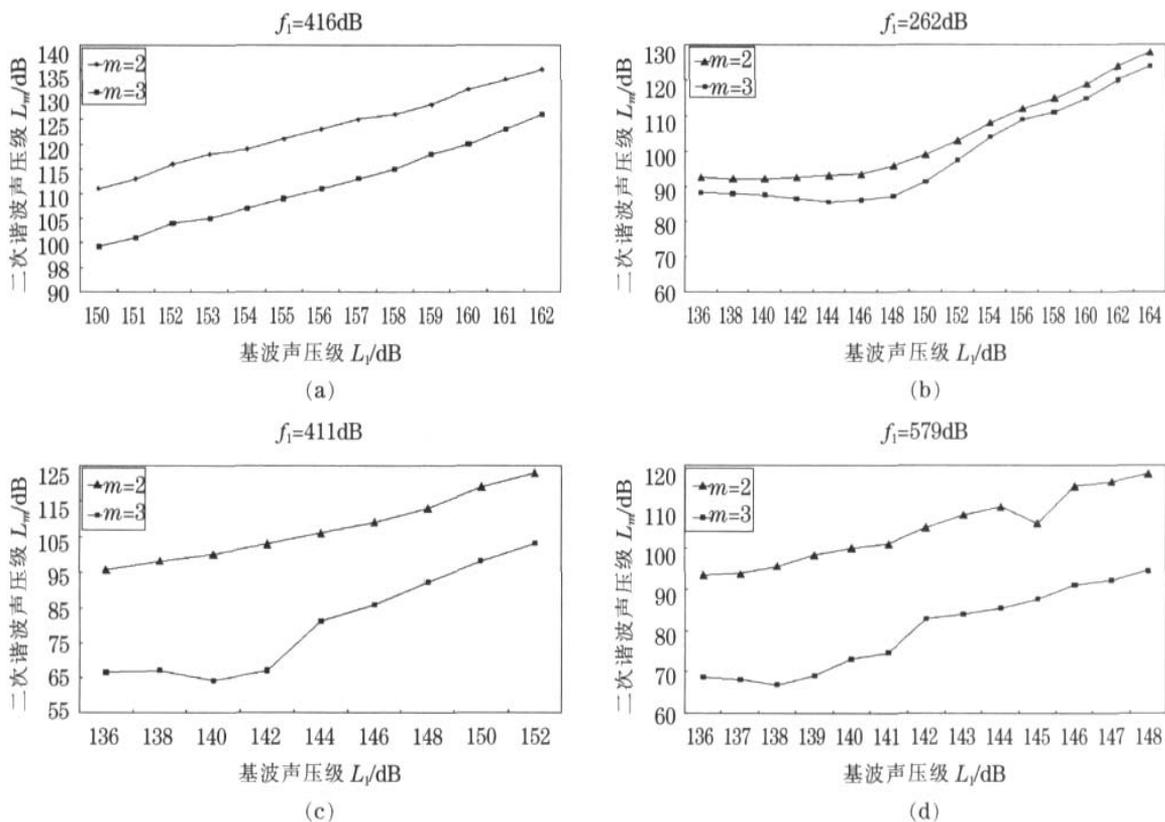


图 7 二、三次谐波饱和关系曲线(图 a 对应的两段圆管 $l_1=1.052\text{m}$ $d_1=90\text{mm}$ $l_2=0.981\text{m}$ $d_2=8\text{mm}$;
图 b、c、d 对应的两段圆管 $l_1=1.0\text{m}$ $d_1=90\text{mm}$ $l_2=0.983\text{m}$ $d_2=15\text{mm}$)

Fig.7 The saturation curves of the second and third harmonic

图 7(a) 的结果显示, 二、三次谐波声压级随着基波的声压级增大呈线性增大; 图 7(b) 显示, 激励频率在共振频率 262Hz 时, 二、三次谐波分量在基波分量 136dB~148dB 范围内增长较慢, 148dB~164dB 范围内增长趋势显著提高; 图 7(c) 显示, 411Hz 的二次谐波分量在基波分量 136dB~152dB 范围内增长趋势稳定, 三次谐波在基波分量 144dB 以下变化不大, 在 144dB~152dB 范围内呈线性增长; 图 7(d)

显示, 579Hz 的二次谐波在基波分量 136dB~148dB 范围内基本呈线性增长, 三次谐波在 142dB 一下增长缓慢, 在 142dB~148dB 范围内呈线性增长; 简言之, 在本文研究范围内, 共振频率的二、三次谐波均未出现明显的饱和现象。目前, 由于声源系统受到限制, 本文的末端声压级在共振频率处可获得的最大实测值为 164dB, 因此有待提高末端声压级进一步深入研究。

6 结论与讨论

变截面闭管(CTVCS)内的非线性驻波场实验研究发现,将管路系统的一阶反共振频率设计在共振基频的倍频附近,当激励频率为共振基频时,将对二次谐波产生极大的抑制,因此末端可得到高声压、低畸变的波形。此方法对于热声发动机的谐振管的优化设计具有一定指导作用,具体可针对不同几何形状的谐振管进行分析,通过合理选择和控制管路参数,将谐振管共振基频设计在热声发动机的工作频率,而将共振基频的谐频设计在固有反共振频率处,以最大限度的抑制谐波增长,进而有效提高压比。而谐波特性和谐波饱和规律的实验研究表明,二次谐波特性不存在类似等截面闭管中的规律,在研究范围内,谐波随基波的增长而增长,未出现类似等截面闭管中的饱和趋势。

参 考 文 献

- [1] Oberst H. A Method for the production of extremely powerful standing waves in air[J]. Akust. Zh(S0320-7919), 1940, 5: 27-38.
- [2] Lawrenson C C, Lipkens B, Lucas T S, Pekins D K, T W Van Doren. Measurements of macrosonic standing waves in oscillating closed cavities[J]. JASA(S0162-1459), 1998, 104(2): 623-636.
- [3] Ilinskii Y A, Lipkens B., Lucas T S, Van Doren T W, E A Zabolotskaya. Nonlinear standing waves in an acoustical resonator[J]. JASA(S0162-1459), 1998, 104(5): 2664-2674.
- [4] 罗二仑, 凌虹, 戴巍, 张泳. 采用锥形谐振管的高压比聚能型热声发动机[J]. 科学通报, 2005, 50(6): 605-607.
- [5] MA Dayou, LIU Ke. Nonlinear standing waves: theory and experiments[J]. JASA(S0162-1459), 1995, 98(3): 1-11.
- [6] 刘克. 大振幅驻波的实验研究 : 二次谐波的特性[J]. 声学学报, 1995, 20(4): 256-263.
- [7] 刘克. 大振幅驻波的实验研究 : 驻波场谐波的饱和[J]. 声学学报, 1995, 20(5): 393-398.
- [8] 刘克. 大振幅驻波的实验研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 1992.