



调制气流声源流场声场特性的实验研究

赵 云¹, 曾新吾²

1. 国防科技大学理学院, 长沙 410073

2. 国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073

摘要 已有大功率调制气流声源的实验集中于声场的测量, 但对与声场特性密切相关的声源内部流场的演化过程研究较少。本文设计了稳态流场粒子图像测速 (PIV) 实验系统和流动致声单点测试系统, 并分别用于内流场稳态和瞬态流动特性的研究。稳态流场实验结果中, 喉道内呈减速增压流动, 外壁面流动分离和近壁面高低压区域交替成为高气室压力下声源稳态流场的重要特征。流场扰动致声过程的测量数据表明, 调制频率对内流场分布的变化有显著影响, 强声波产生的频率相关性受气室压力、激励信号强度和声源几何参数等多种因素共同作用。气路系统的流动对调制部件的振动过程有一定影响, 所测声源频率响应峰值位于 0.5~1 kHz。激励电流低于 10 A 时, 声压级输出随着气室压力和激励信号强度的增加而增加。喷嘴出口和喉道入口宽度对于声源性能也有明显的影响。从提高声源输出声压级角度, 实际应用中应根据加载激励信号选择合适的喷嘴参数使声源工作于满调制状态, 同时适当减小喉道入口宽度。单频调制的声源产生过程伴有谐波分量, 非均匀流动中传递压力扰动的强度随管道截面积的增大而降低, 压力扰动量级和成分与所测量声信号间存在密切联系。

关键词 调制气流声源; 瞬态流场; 粒子图像测速; 流动分离

中图分类号 O424

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)18-0047-08

Experimental Study on the Internal Flow on Air-modulated Speaker

ZHAO Yun¹, ZENG Xinwu²

1. College of Science, National University of Defense

Technology, Changsha 410073, China

2. Institute of Opto-Electronic Science and Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha

410073, China

Abstract The Air-Modulated Speaker (AMS) is one of the most popular high-power acoustic sources. High intensity sound waves are generated by the modulation of high speed air stream. Although there should be a close relationship between unsteady flow and acoustic source formation from the aero-acoustic point of view, few studies available concerning the internal flow evolvement inside the source. The velocity fields of 2D AMS steady model were obtained utilizing Particle Image Velocimetry (PIV). Static pressure measurements of unsteady internal flow were recorded by the flow

induced sound monitoring system. Dominant steady flow characteristics were observed including pressure recovery, flow separation on the out wall and alternate appearance of low and high pressure area on the internal wall. Experimental results in the sound energy conversion process show that pressure distribution variation is related to the modulate frequency. The frequency response of the source is affected by many factors such as chamber pressure, input signal strength and some geometry sizes. Flow near the nozzle exit has certain influence on the voice coil vibration. Peak value of the frequency response is between 0.5 and 1 kHz. When the drive current is lower than 10 A, SPL output of AMS increases with the chamber pressure and amplitude of the drive signal. Width of nozzle exit and vocal tract inlet also have evident effects on the performance of AMS. In order to attain a higher SPL value, the acoustic source has to work in the full modulation condition by the proper adjustment of nozzle parameters, and small inlet width for vocal tract is also advantageous. Harmonic components in the distorted pressure are obvious in the source generation zone after the monochromatic modulation. The spectral composition of the distorted signal in the internal flow is coincident with the sound signal in the far field under the same working condition.

Keywords air-modulated speaker; unsteady flow; particle image velocimetry; flow separation

收稿日期: 2009-07-01

作者简介: 赵云, 博士研究生, 研究方向为气流声源优化设计与换能机制, 电子信箱: sangelboy@sohu.com; 曾新吾 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S330730378M), 教授, 研究方向为强声技术, 电子信箱: x.w.zeng@139.com



0 引言

调制气流声源 (Air-modulated Speaker, AMS) 是一种调制高速气流发声的高声强大功率气流声源, 在远距离广播、强噪声环境测试和声学清洗等众多工业领域和学术研究中得到成功应用。已有的实验研究多集中于强声场测试, 如文献 [1] 对该类声源的声辐射问题开展了实验测试, 结果表明 0.25~2 kHz 范围内声场指向性与无限大障板圆活塞相近。从气动声学的观点看, 声场特性应与流场演化的物理过程密切相关, 因此, 为了进一步明确气流声源主要换能机制和改进声源输出, 首先需要明确内流场特性, 将流动过程与声场特性相关联。

一个典型的例子是声场频响特性需要以流场演化的频率相关性为基础, 而目前用于预测声源输出的主要理论或已有实验研究均未给出。首先, 用于预测声源性能的一维准稳态理论, 忽略了部分流动区域中控制方程的瞬态项, 因而不能反映流场演化过程随调制频率的变化; 其次, 用于求解调制部件运动的等效电路分析方法尽管能够给出位移输出的频率响应, 但与工程中关心的声场频响特性有较大的差别。因此, 本文将气动力学的一些典型实验方法引入 AMS 流场演化过程的测量中, 初步明确内流场的特性及其随调制频率的变化。

事实上, 得益于流体力学实验技术的发展, 近年来国外学者已将单点测压测速和粒子图像测速 (Particle Image Velocimetry, PIV) 等流场测量方法应用于与 AMS 同属受限制射流问题的人发声机制的研究, 并获得了较大成功。早期研究非稳态脉动或开启流动的经典方法是静态声门模型实验, 近期相关研究中普遍使用动态声门模型模拟真实的瞬态流动过程。Mongeau 等^[3]和 Zhang 等^[4]测试了机械调制动态声门模型的流动, 验证准稳态假设的适用范围。Alipour 和 Scherer^[5]研究了生物喉部的脉动空气流, 发现脉动射流呈现高度非均匀性, 进而指出脉动受限射流偏离准稳态假设。Triep 等^[6]通过高速 PIV 测试方法, 在其驱动声门模型的开启阶段观察到了 Coanda 效果。Erath^[7]在 PIV 实验中发现, 非稳

态 Coanda 作用甚至在脉动射流通过静态扩张声门模型中仍会出现。Barney 等^[8]和 Shadle 等^[9]对一个模拟发声过程的动态机械模型中的气动场和声场进行了测量, 他们注意到旋涡串的存在, 推测旋涡串和喉道边界相互作用而产生的声波是显著的。Zhang 等^[10]针对受限稳态射流通过静态声门橡胶模型的宽带发射特性开展了实验研究。对于等截面和收缩孔洞, 四极子声源为主要贡献, 对于扩张孔洞, 低流量条件下出现了单频声。保持孔洞几何形状不变, 在高流量条件下, 偶极子声源占主导, 同时受限射流呈现出复杂的流动特性, 这可能与流场-声场相互作用和循环反馈机制有关。

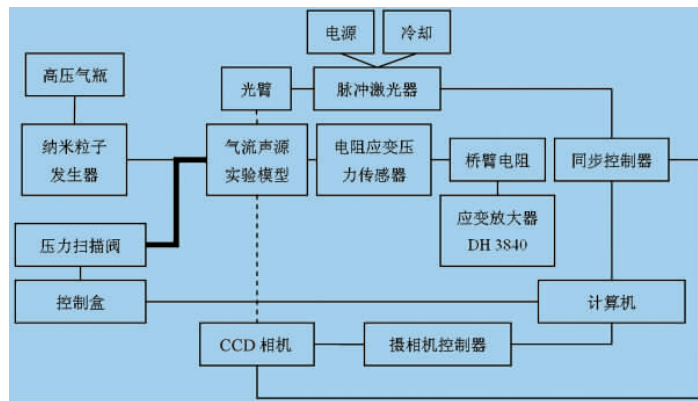
AMS 换能过程主要发生于喷口下游喉道内部。由于内部空间狭小且存在复杂的非定常流动, 对流场进行测试时需避免对主要流场结构产生干扰, 准确地获取喉道瞬态流场数据有一定困难。为此, 本文采用速度场和压力场相互结合的测量方法, 通过以非接触、高精度、快速测量和实时处理为特点的数字式粒子图像测速 (DPIV) 系统测量整个速度场分布, 在喉道壁面布置多个静压测点获取稳态和扰动压力。

本文首先介绍了稳态流场 PIV 与流动致声测试系统, 给出不同气室压力下的稳态速度场和测压结果, 分析了不同工况条件 (气室压力、激励信号、声源几何参数) 下瞬态流场和声压级输出的频响结果, 研究了瞬态流场演化的频率相关性。

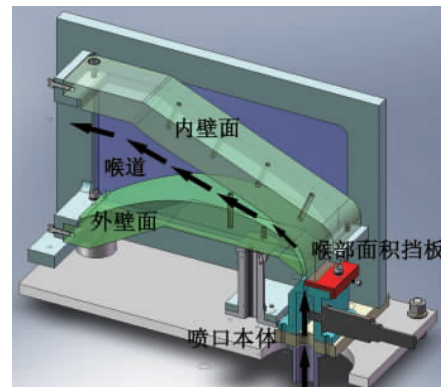
1 稳态流场 PIV 实验系统与流动致声单点测试系统

稳态流场由 PIV 实验系统测得, 图 1 (a) 为其框图, 系统可分为气流声源实验模型、静压单点测试和 PIV 速度场测试 3 部分。声源实验模型结构如图 1 (b) 所示, 该二维模型近似了实际的轴对称声源结构, 由于喉道湍流混合区及其邻近下游流道的宽度和径向距离的比值较小, 因此二维近似是合理的; 同时模型横向宽度取足够的尺寸以消除边界效应。

高压气体在实验模型喷口本体中加速, 喷口本体布置有总压测孔, 通过电阻应变压力传感器监控气室总压。喷口喉部安装有可调面积挡板, 借助螺纹机构可对其轴向位置进行准确调节; 喷口出口形成了射流, 可调挡板控制喷口出口宽



(a)



(b)

图 1 调制气流声源 PIV 实验系统 (a) 与声源实验模型示意 (b)

Fig. 1 Composition of PIV testing system (a) and demonstration of 2D AMS model (b)

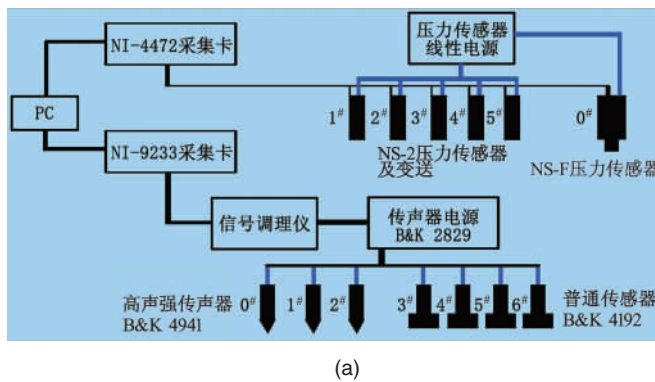
度以模拟调制部件的运动,上游总压一定时,挡板控制了通过实验模型的流量。喷口本体下游是由透光性较好的内外型线壁面和两个有机玻璃侧板构成的二维喉道,PIV 实验中 CCD 相机拍照方向与侧板垂直,脉冲片光照射穿透内外壁面并与侧板平行。内外壁面共布置有 11 个静压测试孔,覆盖了喉道上游至出口的空间范围,外壁面从上游至下游测点编号依次为 P1~P6,内壁面从下游至上游测点编号依次为 P7~P11,测孔轴线与当地表面的法线方向重合。

静压单点测试硬件由压力扫描阀及其控制盒组成,扫描阀接口与静压测试孔之间通过硬质塑料管连接,实验中采集的压力数据经数采设备输入至测控计算机,实时显示或保存。PIV 速度场测试硬件包括脉冲激光器及其传输和冷却设备、支持跨帧技术的高速 CCD 相机及控制器、同步控制器和纳米粒子发生器,实验采用的示踪粒子是比重与空气相近的纳米尺寸粒子,适于跟踪高速流动。测试中时序控制由同步器严格按照确定的时间次序实现,同时同步器也接受外部同步信号控制。同步器依次触发两台激光器在固定时间间隔 Δt 先后发出激光脉冲,脉冲光束经光臂传输到测量位置,由一组透镜展开成片光照射流场中分布的粒子。在激光照亮流场时,CCD 相机进入工作状态,使得被照亮流场中分布粒子成像,图像经接口板传输到计算机系统内存。最后在 Tecplot 软件中,通过后处理得到粒子的速度矢量图、流线分布图等系列图表。

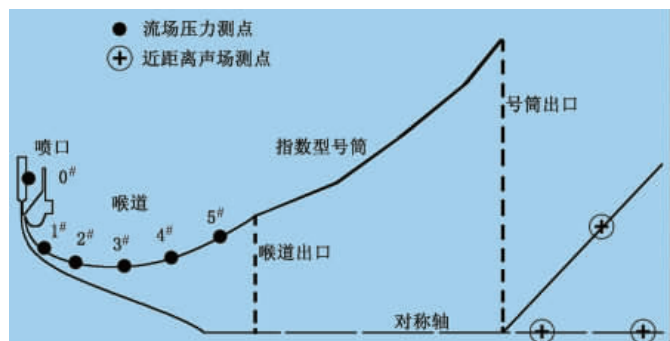
PIV 速度场和静压测试中可调参数包括喷口出口宽度和气室总压,实验中调节气室总压分别为 0.11、0.12、0.13、0.14、0.15 和 0.16 MPa,调节喷口出口宽度分别为 0.5、1.0 和 1.5

mm。受 CCD 相机像素限制,从喷口附近至喉道出口分别将测量窗口分区编号“中、上、外”以覆盖主要流动过程。静压测量过程中,高压气室压力有少许波动,每个工况下压力稳定后测量 3 s,取平均值。PIV 速度场测试实验中,由于喉道内流场速度大小差异很大,因此 Δt 间隔的确定和流场粒子的均匀布散存在一定困难,全速度场条件下整体和局部流动细节之间进行折衷,以保证 CCD 成像清晰和测试精度。作为首次测量,本文主要关注流动的整体结构。

瞬态流场数据由流动致声单点测试系统测得,系统组成如图 2(a)所示,由 6 通道的动态压力采集、3 通道 B&K 4941 高声强传声器和 4 通道 B&K 4192 传声器采集系统组成。其中动态压力的测量由 1 个采集喷口气室表压的 NS-F 传感器(0[#])和 5 个采集喉道静压扰动的 NS-2 传感器(1[#]~5[#])组成。各压力传感器的位置如图 2(b)所示,1[#]~5[#] 按从上游到下游的顺序依次安装,安装孔的轴向与当地喉道型面的切线方向垂直,安装孔的长度尽可能短,以减小其对高频压力扰动的过滤作用。3 个高声强传声器 0[#]、1[#] 和 2[#] 分别位于轴线上距离号筒出口 1.5 m 和 5 m 偏离轴线 20°位置;而 3[#]~6[#] 传声器分别位于轴线 10 m 及 10 m 偏离轴线 20°、40°和 60°。动态压力信号经压力变送器放大后通过直流耦合输入 NI-4472 采集卡,声压信号则由信号调理仪滤波放大后通过交流耦合输入 NI-9233 采集卡。本测试系统采用的测试软件为 NI 的声与振动软件包,可灵活完成测试结果的现场速报、数据留盘、数据回访及处理分析,实验中每次工况的采集时间不超过 10 s,采集结束后由相关的分析模块完成对留盘压力和声场测点数据的统计、频谱变换和时频分析。



(a)



(b)

图 2 流动致声单点测量系统组成 (a) 和流场声场测点分布示意 (b)

Fig. 2 Composition of flow induced sound monitoring system (a) and sensor locations (b)

2 稳态测压和速度场结果

2.1 典型工况下的流场特性

取喷口出口宽度为 1 mm,气室总压为 0.16 MPa,实验测量和求解时均雷诺方程(文献[2])得到内外壁面测点静压值结果如图 3 所示。所有测点静压值均为负值,同一喉道截面上静压值基本相同,上游测点静压值低于下游,喉道出口附近的测点静压值接近于环境压力,即稳态流场从上游至下游气流逐步减速,静压值逐渐恢复,类似于扩压器流动。气室总

压变化时,测点静压值满足同样的相对大小关系。气室总压的增加使得上游和下游静压差增加(图 4),较大的气室总压能够在喉道内外壁面产生较大的内流负压梯度,按照准稳态假设,喷口完全关闭时,喉道入口静压与环境压力相同,于是高的气室总压对应大的喉道静压扰动。静压数据结果中,模拟和实验的差异来自于环境大气压和气室总压的设定误差,以及单点测压系统本身的测量误差,包括测压管道在压差条件下的收缩变形、压力传感器的零点漂移和气室压力的波动等。

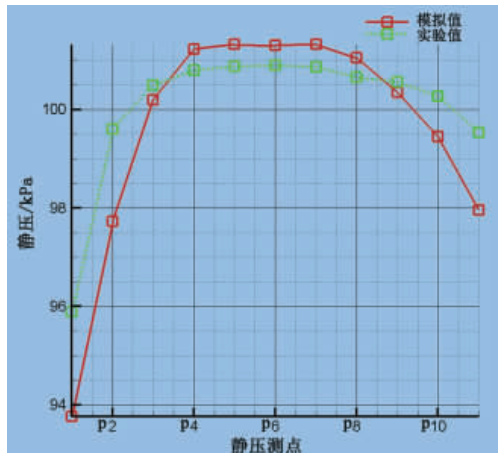


图3 气室总压为 0.16 MPa 实验与模拟结果
Fig. 3 Pressure comparison of experiment and simulation result at 0.16 MPa

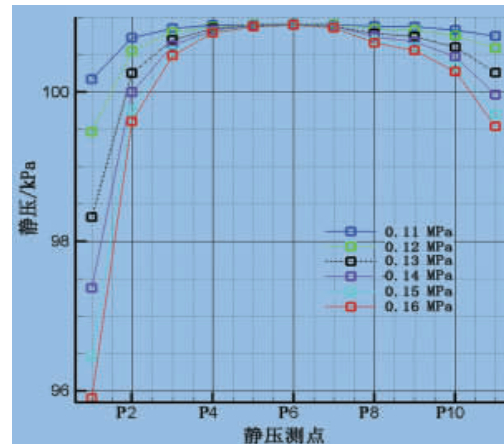


图4 喷口出口 1.5 mm 喉道壁面测点静压值
Fig. 4 Pressure comparison of different chamber pressure at 1.5 mm nozzle exit

同一喉道截面上速度量级存在较大差别,图5给出了喷口出口为 1.5 mm, 气室总压为 0.11 MPa 的速度场实验结果和模拟结果。流场结构方面,两者基本相似:主流沿内壁面流动,喉道出口贴近外壁面部分呈大范围的回流,整个外壁面

附近均存在流动分离现象,回流和主流之间是剪切层,部分工况条件下其中形成了大尺度的旋涡结构。从定量角度来看,喉道出口轴线上速度量级约为 9~11 m/s,实验和模拟结果均处于这一范围内。

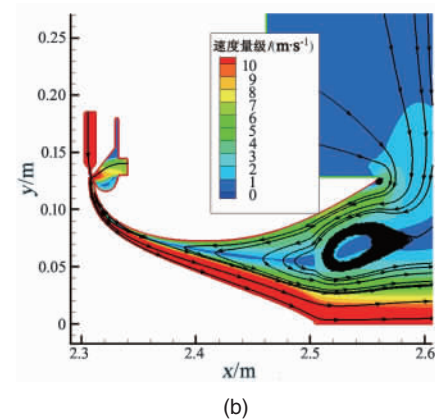
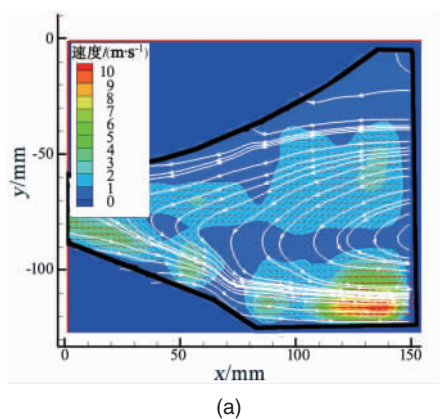


图5 PIV 速度场实验(a)与模拟(b)结果

Fig. 5 Velocity field and stream line comparison of experiment (a) and simulation (b) results

2.2 气室总压和喷口出口宽度对速度场分布的影响

实验涉及的变压力工况条件下,喉道内流动分离都在相当大的空间范围内存在,速度场测试数据表明,喉道内回流和主流之间形成剪切层,层中有明显的旋涡存在。理论上,上游到下游主流速度量级逐渐降低,但是由于近壁面高速流动的测量不够准确,同种工况速度值测量结果中,“外”测量窗口的最大速度量级最高,“中”测量窗口速度次之,“上”测量窗口最小,实际反映的是“外”窗口中的主流速度最大,“中”窗口中的回流速度次之,“上”窗口中的回流速度最小。

取喷口出口为 0.5 mm,对比气室总压值从 0.11 MPa 向 0.16 MPa 变化过程中“中、上、外”测量窗口速度场分布。结果

发现,随着气室总压的升高,同一测量窗口速度量级逐步提高,反映出入口压力的增加使得主流和回流的强度都在提高,气室总压的增加提高了通过喉道的流量。不同总压条件下,“外”测量窗口的流场结构略有差别,低总压条件的主流横向尺寸较宽,高总压条件下回流区和主流对周围气体的作用集中于较小的空间区域内,且“上”测量窗口中部的剪切层中出现了大尺度的旋涡。理论上,当气室总压足够高时,喉道内部将形成复杂的膨胀波系与压缩波系相互作用,在贴近内壁面形成高低压交替现象,对应于速度分布图中主流交替地减速和加速,然而实验测得速度场中未发现上述过程,这是由于气室总压较低所致。

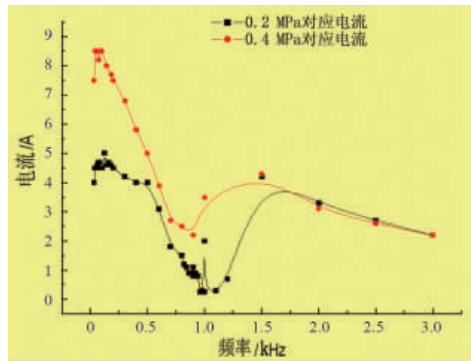


图8 电流频率特性

Fig. 8 Frequency response comparison of current

电流频率特性可看出,气室压力对调制部件的振动过程有明显影响,区别主要是在低频段(1.5 kHz 以下),0.2 MPa 与不加气条件下的相近,但 0.4 MPa 时低频段差别明显,电流值明显降低,即低频调制调制部件振动的流固耦合作用较明显,有可能是因为高频时位移输出较小,因而流固耦合作用较弱。

RMS 声压级频率特性与不加气相比,峰值频率都位于 0.5~1 kHz,即声源输出基本上取决于调制部件的位移量,但是峰值频率略有下降,如 0.2 MPa 时 1 m RMS 声压级共振频率在 400~500 Hz 之间,0.4 MPa 增加至 500~600 Hz 之间,而 10 m RMS 声压级在 0.5~1 kHz 频率范围内仅有 2 dB 的差别。加气后共振频率的前移表明流固耦合的作用力相当于使调制部件的质量增大或者弹性元件的弹性系数降低。对比不同压力条件下 RMS 声压级,增加总压使得 2 kHz 以下频率段声压级普遍获得了增益,但在中间的 100~200 Hz 频段,提高总压后声压级反而出现少于 5 dB 的下降。进一步分析该频段内的频谱图,对比调制频率为 180 Hz 气室表压为 0.2 和 0.4 MPa 轴线 5 m 处的频谱结果,尽管前者 RMS 声压级高于后者,180 Hz 对应的声压级则相反,低气室总压条件下宽频噪声较强,低频段的能量分布也较高。

3.4 声源参数对扰动压力和声场频率特性的影响

3.4.1 激励电流强度对频率响应的影响

调制部件输入激励电流的大小直接影响声源调制面积的大小,取气室表压为 0.6 MPa,声速喷嘴出口为 1.1 mm,对比激励电流为 5 和 7.5 A 的电压和声压级频响结果,实验使用的不同编号的调制部件的区别主要是绕线电阻,对频响规律定性方面没有影响。实测数据中各工况频响变化趋势是一致的:低频时电压值较低,声压级较低,高频在 700 Hz 附近电压值和声压级最高。激励电流提高后,不同频率电压和声压级都有提高,电压频响结果近似于沿纵坐标的平移。为了确认调制部件满调制对应的激励电流值,进一步提高激励电流值。取气室表压为 0.4 MPa,声速喷嘴出口为 1.1 mm,对比激励电流分别为 10 和 12.5 A 的电压和声压级频响结果。激励电流增加后,电压和声压级频率响应整体上移,激励电流增加 2.5 A,获得了 2~3 dB 以上的声压级增益。说明 7.5 A 的激

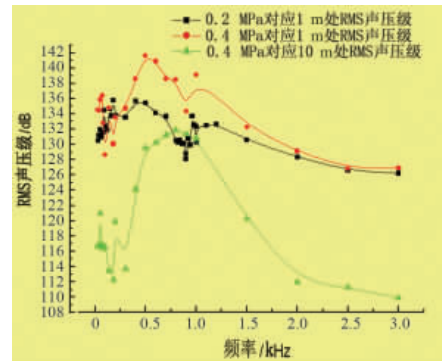


图9 1 m 和 10 m 处 RMS 声压级的频率特性

Fig. 9 Frequency response comparison of RMS at 1 and 10 m

励电流不能达到过调制。考虑前面的频响结果可以推测,0.4 MPa 工作压力调制部件共振频率应该在 0.5~1 kHz 之间。

增加参与调制的气流流量,取气室表压为 0.54 MPa,喷嘴宽度为 1.6 mm,激励电流分别为 5、7.5、10 和 12.5 A 的电压和声压级频响结果如图 10 和图 11 所示。各种激励电流电压和声压级的频响变化趋势与本节其他数据基本一致:电压和声压级的峰值出现在 0.5~1 kHz 之间,低频段电压值和声

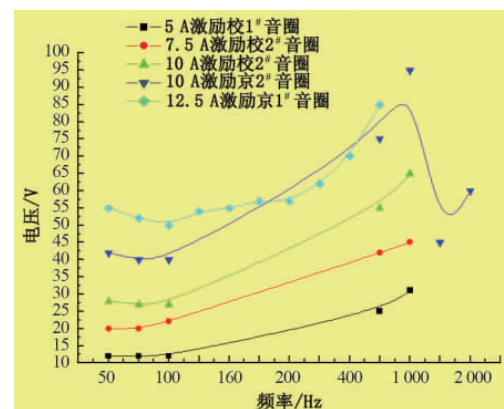


图10 电压结果比较

Fig. 10 Frequency response comparison of voltage

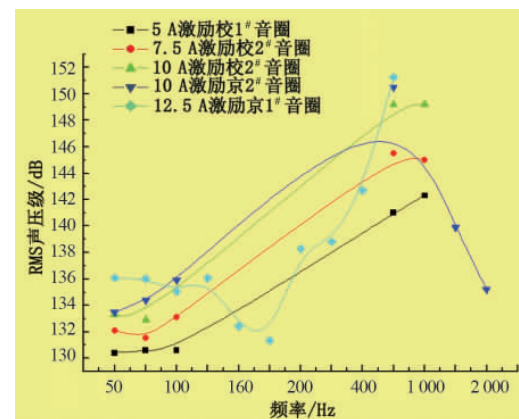


图11 RMS 声压级比较

Fig. 11 Frequency response comparison of RMS



声压级随频率的降低而降低,高频段随频率增加而下降。激励电流取 5、7.5 和 10 A 时,随着电流值的增加,电压值和声压级的频率响应沿纵坐标整体上移。从 5、7.5、10 A 对应声压级增加遵从良好的变化趋势来看,调制部件的调制度一直处于增加状态。对于同样激励电流(10 A),京 2[#] 调制部件与校 2[#] 部件声压级频响结果基本接近,但是两者电压值频响在纵坐标类似于平移变化,电阻更大的京 2[#] 所需的激励电压更高。本节工况中最大声压级输出是 12.5 A 激励京-1[#] 调制部件的情况(151.26 dB),然而其电压和声压级的频响数据与其余工况存在较大的差别,这可能是过调制效果的反映,也可能是由于调制部件装配方式的改变所致。

3.4.2 气室总压对抗动压力频率特性的影响

取调制频率为 100 Hz,喷口宽度为 1.1 mm,喉道宽度为 4.34 mm,测量得到 7.5 A 恒流激励条件下的电压值均为 22 V,得到气室表压分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 条件下扰动压力结果。同样,各压力传感器所测扰动量级,上游位置所测数据高于下游。各测点扰动压力的频谱结果中,能量集中于基频和二次谐波;值得注意的是各工况扰动压力频谱图中均存在 1.8 kHz 附近的能量集中频段,且其幅值随气室压力的增加而降低,在较低气室压力下,该频段幅值与基频和二次谐波的幅值相近。1[#] 传感器测得不同气室压力对应扰动量级峰峰值和基频分量如表 2 所示,随着气室总压的提高,总体上测点压力扰动量级增加。

表 2 7.5 A 激励电流不同气室表压条件下的频响测量结果
Table 2 Frequency response of internal static pressure and external sound pressure at 7.5 A drive current in different chamber pressures

参量	气室压力/MPa				
	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
1 [#] 压力扰动量级/kPa	1.88	1.94	3.25	4.28	5.62
1 [#] 压力基频分量/dB re 1 Pa	48	51	55	57	61
声压测点 RMS 声压级/dB	128.7	133.2	136.3	136.6	141.6
声压测点基频声压级/dB	104	97	108	117	123

声压参考测点测量得到不同气室压力对应 RMS 声压值和基频分量见表 2。随着气室压力的改变,喉道内静压值和近距离声场在量级和频谱特性方面基本保持一致。从频谱图中的分布看,基频和三次谐波以内比较明显,低于基频的 60~80 Hz 频段内也有能量集中分布,部分工况的幅值甚至高于基频。1.8 kHz 附近的能量集中区域在声压级频谱图中更加明显,0.05、0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 对应 1.8 kHz 声压级频谱分量分别为 127、116、117、117、123 dB,高于或接近基频声压级。

声源工作中,由于零件加工和装配周向对称性方面的误差,以及调制部件振动和瞬态气流的相互作用,实际流场和理想轴对称流场可能存在差别,测量中改变 NS-2 传感器位置分布于 0°(从上游至下游 1[#]、2[#]、3[#])和 90°位置(从上游至下游 4[#]、5[#])。对比气室表压分别为 0.3 和 0.4 MPa 条件下各测点峰-峰扰动值,0.3 MPa 瞬态压力规律性较好,即 1[#] 和 4[#] 测点

扰动量级最大,2[#] 和 5[#] 测点扰动量级次之,3[#] 测点最低。而 0.4 MPa 则完全不满足这一规律,说明流场的轴对称性与声源工作状态相关,由于装置本身的尺寸误差和调制部件的运动易于发生变化,实际流场远比理论上假设的复杂。

3.4.3 喷口参数对频率响应的影响

喷口出口宽度是气流声源关键几何参数之一,气路系统中它影响参与调制气流的流量,从调制部件的作用来说,它影响调制面积比。本文对相同流量,激励电流为 5 A,喷口宽度分别为 1.1 和 1.6 mm,对应气室表压分别为 0.6 和 0.54 MPa 的声场频响数据进行分析。两种喷口的电压和 RMS 声压级频响结果中,电压频响结果相近,说明调制部件的工作状态是接近的,而 1.1 mm 喷口各频率 RMS 声压级明显高于 1.6 mm 喷口,这是因为相同流量下后者气室总压下降。从前面的数据分析来看,5 A 的电流驱动,调制部件没有达到满调制,欠调制情况下,1.1 mm 声速喷口对应调制度高于 1.6 mm 声速喷口。

比较激励电流为 7.5 和 10 A 时两种喷口的频率特性,尽管调制面积比增加后,它们各自的声压级输出均有显著增加,但是 1.1 mm 喷口声压级输出始终高于 1.6 mm 喷口,说明在实际应用中,为了使声源的工作效率达到最大,需要根据所采用的调制部件的频率特性选择合适的喷口。

3.4.4 喉道入口宽度对抗动压力频率特性的影响

频响实验发现,降低喉道入口宽度能够提高声源的声压级输出,这在准稳态理论是无法解释的。调整声源喉道入口宽度为 2 mm,取气室表压为 0.4 MPa,喷口宽度为 1.1 mm,测量得到调制频率为 0.05~2 kHz 的扰动压力。结果显示,在 50、100、200 Hz 和 2 kHz 时上游位置测点扰动量级高于下游,压力扰动量级从 1[#] 传感器到 5[#] 传感器依次下降;500 Hz 基本满足扰动递减规律,只有 1[#] 传感器扰动量级低于 3[#] 传感器;1 kHz 不满足递减规律,原因可能是流场非对称性的存在。各测点扰动压力的频谱结果中,50 和 100 Hz 的谐波成分较多,低于基频分量 20 dB 内存在 5 次以上的谐波,其余高频调制结果中能量主要集中于基频和二次谐波,且后者比前者低 20 dB 左右。

表 3 给出了不同喉道入口宽度流场和声场频率响应的部分测点数据,压力扰动结果中,无论是喉道入口附近的 1[#] 传感器还是接近喉道出口的 5[#] 传感器,都测得与本节类似的频响变化规律,峰值位于 0.5~1 kHz 之间,且不同喉道入口宽度的结果都满足这一规律。2 mm 喉道入口宽度时,1[#] 和 5[#] 测点压力扰动量级和基频分量均高于 4.34 mm,说明降低喉道宽度能够提高内流场压力扰动,原因可能来自于宽度降低后喉道内流动分离程度有所减轻,降低了流动损失,提高了声源的换能效率。

对比表 3 中不同喉道宽度声压测点数据,无论是 RMS 声压级还是基频分量,2 mm 喉道入口宽度基本上均高于 4.34 mm。从频谱图中的分布来看,2 mm 喉道入口宽度对应声场结果中谐波能量的比重要高于 4.34 mm,无论是低频还是高频调制都有这一现象,说明喉道宽度较低时,声源的换能过程

表 3 0.4 MPa、1.1 mm 声速喷口时喉道入口宽度对频率特性的影响
 Table 3 Frequency response of different vocal tract inlet size at 0.4 MPa, 1.1 mm nozzle exit

喉道入口宽度/mm		频率/Hz					
		50	100	200	500	1 000	2 000
2	1 [#] 压力扰动量级/kPa	23.431	25.256	24.498	27.401	11.696	4.584
	1 [#] 压力基频分量/dB re 1 Pa	68	72	73	76	66	52
	5 [#] 压力扰动量级/kPa	11.420	13.577	11.275	17.368	8.721	3.246
	5 [#] 压力基频分量/dB re 1 Pa	58	61	62	66	65	40
	声压测点 RMS 声压级/dB	147.0	147.2	150.0	158.3	161.5	151.5
	声压测点基频声压级/dB	116	129	142	156	160	148
4.34	1 [#] 压力扰动量级/kPa	9.088	6.162	9.676	13.662	13.653	3.887
	1 [#] 压力基频分量/dB re 1 Pa	60	60	68	68	68	42
	5 [#] 压力扰动量级/kPa	7.270 0	2.587 8	5.539 6	10.251 0	7.395 0	1.542 0
	5 [#] 压力基频分量/dB re 1 Pa	49	50	60	66	60	38
	声压测点 RMS 声压级/dB	145.8	142.6	143.4	153.2	157.3	145.8
	声压测点基频声压级/dB	122	124	111	152	156	144

将更为复杂。表 3 表明,压力扰动与声压级结果随频率和喉道入口宽度的变化呈现较好一致性, 至少对于此种工况条件,压力扰动的强度可作为声源输出的度量。

4 结论

本文借助高速 PIV 实验系统,获取了低气室总压条件下调制气流声源的稳态速度场和单点静压值,分析了气室总压和喷口出口宽度对声源内流场的影响。实验测得的速度和压力分布与模拟结果基本一致,内流场的主要结构为喉道内主流和回流之间形成剪切层,层中有旋涡的存在。提高气室总压,流场整体结构没有变化,只是主流和回流强度改变,并导致内部负压梯度强度的变化。

通过流动致声单点测试系统对不同工况条件下调制气流声源的瞬态流场和近距离声场开展了实验测试,并给出了典型工况下声源频率响应结果,研究了气室总压、喉道入口宽度、激励强度等工况参数和喷口参数对声源频率特性的影响。实验结果表明:气路系统的流动对调制部件的振动过程有一定影响; 本文所测声源声压值频响峰值位于 0.5~1 kHz 范围内,调制部件频响峰值也在这一范围;25 V 恒压或 7.5 A 恒流激励条件下,调制部件的振动尚处于欠调制状态,实际应用中应选择合适的喷口参数使声源工作于满调制状态,以提高输出声压级, 提高能量利用率; 当采用 2 mm 的喉道入口宽度时, 不同调制频率对应的扰动压力、RMS 声压级及其基频分量都获得了明显提高,谐波成分也大为增加,这可能与流动分离减弱有关。本文所测试的大部分实验工况,调制部件均未能达到满调制,0.4 MPa 气室压力和 14.5 A 激励电流下的声压级输出高于 0.6 MPa 压力和 10 A 电流的输出,说明对于较高的声压级输出目标,提高调制度比提高入口压力更经济。

后续工作首先需要进一步完善实验系统:为了明确瞬态速度场的演化过程,需要试制二维模型的调制部件;为了从

单点瞬态流场数据中分离出调制部件运动状态及其安装方式对频率响应的影响,需要设计合适的位移输出测试方法。

参考文献 (References)

- [1] 沈壕. 强噪声学[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 137–138.
Shen Hao. High intensity acoustics [M]. Beijing: Science Press, 1996: 137–138.
- [2] 赵云, 曾新吾. 亚声/声速射流式调制气流声源气动模拟研究 [J]. 声学技术, 2008, 27(3): 293–299.
Zhao Yun, Zeng Xinwu. Technical Acoustics, 2008, 27(3): 293–299.
- [3] Mongeau L, Franchek N, Coker C H, et al. Characteristics of a pulsating jet through a small modulated orifice, with application to voice production [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1997, 102: 1121–1133.
- [4] Zhang Z, Mongeau L, Frankel S H. Experimental verification of the quasi-steady approximation for aerodynamics sound generation by pulsating jets in tubes[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2002, 112: 1652–1663.
- [5] Alipour F, Scherer R C. Pulsatile airflow during phonation: An excised larynx model [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1995, 97: 1241–1248.
- [6] Triep M, Brücker C, Schröder W. High-speed PIV measurements of the flow downstream of a dynamic mechanical model of the human vocal folds[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39: 232–245.
- [7] Erath B. An experimental investigation of velocity fields in diverging glottal models of the human vocal tract[D]. Indiana: School of Mechanical Engineering, Purdue University, 2005.
- [8] Barney A, Shadle C H, Davies P O A L. Fluid flow in a dynamic mechanical model of the vocal folds and tract. I. Measurements and theory[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1999, 105: 444–455.
- [9] Shadle C H, Barney A, Davies P O A L. Fluid flow in a dynamic mechanical model of the vocal folds and tract. II. Implications for speech production studies [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1999, 105: 456–466.
- [10] Zhang Z, Mongeau L, Frankel S H, et al. Sound generation by steady flow through glottis-shaped orifices [J]. Journal of Acoustical Society of America, 2004, 116: 1720–1728.

(责任编辑 代丽)