

超声速调制气流声源声压级增益特性的理论与实验*

田章福, 赵云, 龚昌超, 孙海洋

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:通常认为,当气室压力提高到一定程度,调制气流声源声压级输出将趋于饱和。为了从基本原理上探讨进一步提高声源输出的途径,设计了收缩-扩张喷口,将调制作用上游的声速流动提高至超声速。理论分析表明,来流气压较高时,超声速调制优于声速调制,可获得一定的声压级增益。增益量随喷口面积比减小而增加。旋笛实验在调制频率较低时得到了超声速调制的声压级增益;调制频率较高时,受瞬态作用的影响,参与调制的气流很可能未完全发展为超声速流动,超声速调制与声速调制的旋笛性能相同。

关键词:调制气流声源;超声速;声压级增益

中图分类号: O426.2; O343.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)04-0158-05

Research on the performance of a supersonic flow modulated speaker

TIAN Zhangfu, ZHAO Yun, GONG Changchao, SUN Haiyang

(College of Optical-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: It is generally acknowledged that the sound pressure level (SPL) of air-modulated speaker (AMS) will finally reach the level of saturation when the chamber pressure increases to a certain degree. As a new approach to obtain higher SPL output, supersonic flow modulation was discussed in which the flow speed of nozzle exit was increased from sonic to supersonic. Results from the quasi-steady theory proved that, when the chamber pressure is high, the SPL in the supersonic case is higher than that in the sonic case. Larger SPL increments generally appear at smaller nozzle area ratio. The improvement of the source intensity was validated by the comparison of sound measurements between the sonic and supersonic cases in low frequency modulation. But in high frequency modulation, due to the transient flow effect, the SPL in the supersonic case is the same as that in the sonic case while the air jet is considered to be not fully developed or sped up to be supersonic.

Key words: air-modulated speaker; supersonic; sound pressure level increment

调制气流声源是一种通过对高速射流调制将高压气流能量转化为声能的大功率声源^[1]。它的特点是输出功率可达到万至十万瓦量级,应用于航天强噪声环境测试、远距离广播、低频主动噪声控制^[2-3]和声凝聚^[4]等领域。为了进一步提高换能效率和总辐射声压级,一方面可以通过调制气流声源的相干合成^[5-6],实现多个声源同相组阵,实验更大的辐射声功率,另一方面通过研究声源内部气声转换过程^[7],改进声源结构,提高单个声源的换能效率和辐射声压级。

依据准稳态理论,通过改变工况参数提高声速调制所产生的声压级输出具有局限性,例如气室压力提高到一定程度,声压级就会接近饱和,因此需要从基本原理上探讨进一步提高声源输出的途径。

Meyer 在调制气流声源准稳态理论的导出^[1]中首次提到了超声速调制的概念:通过改变喷口设计和工况参数,将受限调制射流的流速由声速提高至超声速。依据理论结果, Meyer 认为超声速调制能够获得较声速调制更高的声压级输出。然而,他并未对超声速调制的性能和相对复杂的气声转换过程做进一步的研究,目前也少见公开文献探讨这方面内容。

已公开的气流声源设计一般采用收缩喷口,无论上游气流参数如何变化,参与调制的射流所能达到最高流速为声速,因而一般称为声速调制。将喷口曲线由收缩型改为收缩-扩张型,配合适当的气室压力,可使射流在参与调制之前加速至超声速流动状态。在气室压力和喉部面积相同的条件下,这两种射流调制所需气流流量与输入气

* 收稿日期:2014-03-20

基金项目:上海航天科技创新基金项目(SAST201314)

作者简介:田章福(1975—),男,黑龙江牡丹江人,助理研究员,博士,E-mail:13975117031@163.com

流功率一致。然而,随着参与调制射流马赫数的增加,超声速喷口与声速喷口出口宽度的差值将越来越大。由于前者的喷口面积比较大,进而有可能产生更高的声压级输出。

准稳态假设下,超声速调制实际上是一系列多喉道管流流动^[8]的集合。由多喉道管流的气动力学理论可知,超声速调制的物理过程相当复杂,同一位置的流动速度在亚声速到超声速范围内变化,并可能伴随有冲击波的形成和传播。考虑到气声转换方式可能并不单一,对应的声场特性也可能有一定程度的改变。

本文首先分析了超声速调制时流动过程的演变过程。之后,基于准稳态理论^[9]研究了不同马赫数和喷口面积比条件下,超声速调制相对于一般声速调制的声压级增益特性。最后,对超声速调制的输出增益进行了实验验证。

1 超声速调制流动过程分析

如图1(a)所示,在超声速调制过程中,调制面积 A 与喷口喉部面积 A_s 之间的比例随时间变化,喷管中存在两个喉部。依据准稳态假设,调制面积变化对应的系列稳态流动类似于超声速风洞设计中的多喉道管流问题(图1(b))。

在来流压力较高时,超声速调制过程中气流经历的各种状态如下:

(1) 超声速喷口关闭,调制面积为0时,喷管内速度为0,压力为气室压力;喉道入口压力为环境压力。

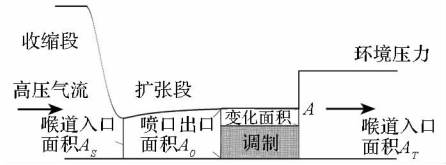
(2) 随着调制面积的增加,喷口内流速增加,压力下降,当调制面积增加到一定值时,喷口喉部气流速度达到声速,在此过程中,喷口扩张段及调制位置处气流速度均为亚声速。

(3) 调制面积继续增加时,喷口扩张段局部达到超声速,喷口扩张段中产生激波,激波后仍是亚声速。随着调制面积增加,激波在喷口扩张段顺气流移动。

(4) 调制面积继续增加,激波运动到调制位置附近时,气流总压损失最大,这个状态的激波是不稳定的,只要调制面积稍微增加一点,激波就会通过调制位置进入喉道,喷口扩张段及调制位置处均为超声速流动。此后,直至调制面积增加到最大,激波均处于喉道内。

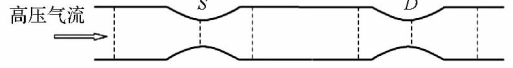
调制面积由全开逐渐减小至关闭过程,喷管内流动状态的变化与上述过程刚好相反。

应当指出,实际流动过程中,超声速流场的建立需要一定的时间,如果调制速度很快,有可能导



(a) 超声速调制

(a) Supersonic flow modulation



(b) 超声速风洞设计中的多喉道管流

(b) Multi-throat channel flow of a supersonic wind tunnel

图1 超声速调制与多喉道管流的比较示意

Fig.1 Demonstration of supersonic flow modulation and double throat channel flow

致激波还在喷口扩张段向下游移动过程中,调制位置已经关闭的情况。另外,超声速调制过程中,同一时刻不同位置流动状态存在显著差异,同一位置不同时刻流速可能在亚声速、声速和超声速之间反复变化,其中可能伴随有冲击波的形成。超声速调制的流场特性远比声速调制复杂。

2 相同气室压力和输入气流功率条件下声压级增益的理论结果

2.1 准稳态理论

尽管超声速调制过程中,喷管内部流动较为复杂,考察准稳态理论^[9]的假设和导出过程,可知在完全膨胀状态下,该理论依然适用。考虑高压气体在喷口出口完全膨胀的情况,令声速和超声速调制声源的喉部面积和气室压力相同,即

$$A_s^{sonic} = A_s^{super} = A_s, \quad P_1^{sonic} = P_1^{super} = P_1 \quad (1)$$

依据临界状态下的流量公式,两者的输入流量和气流功率相同,

$$Q^{sonic} = Q^{super}, \quad W_0^{sonic} = W_0^{super} \quad (2)$$

假定喉气压等于环境压力,调制均为正弦式全调制,工作介质为空气。在超声速喷口出口与喉道入口面积比值 A_0/A_T 一定的条件下,取不同的喷口射流马赫数 M_a ,则由等熵关系式,得到完全膨胀情况下喉气压与气室压力的比值 P/P_1 :

$$\frac{P}{P_1} = \left[\frac{1}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

其中 $\gamma = 1.4$ 为比热比,计算得到超声速喷口喉部面积与喉道入口面积的比值:

$$\frac{A_s^{super}}{A_T} = \frac{A_s^{super}}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A_T}$$

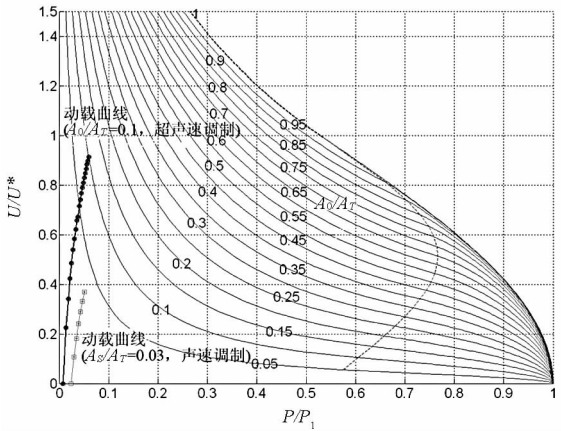
$$\begin{aligned}
 &= \frac{A_0}{A_T} M_a \left[\frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2}}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_a^2} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \\
 &= \frac{A_S^{sonic}}{A_T} \tag{4}
 \end{aligned}$$

令 $A_s = A_0$ 则上式可简化为声速调制的结果。

于是,已知比值 A_0/A_T 、 A_S/A_T 和 P/P_1 ,依据准稳态理论图解法,可得到声速和超声速调制对应的声压级输出 SPL_{sonic} 和 SPL_{super} 。

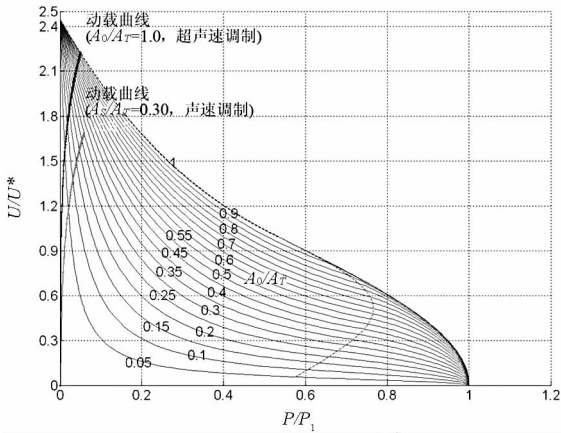
2.2 不同马赫数和喷口面积比条件下的结果

图 2 给出 M_a 为 2.75 时,不同 A_0/A_T 对应的气流压力特性曲线和动态工作线。其中静态工作点较低动态曲线为声速调制,较高的则为超声速调制,从中可见两者具有不同的压力比变化范围,即两者的声压级输出不同。



(a) 喷口面积比 0.1

(a) Modulation area ratio 0.1



(b) 喷口面积比 1.0

(b) Modulation area ratio 1.0

图 2 声源气流压力特性曲线和马赫数为 2.75 时的动态工作线

Fig. 2 Relationship and variation of pressure and velocity of the vocal tract inlet at Mach number 2.75

表 1 给出喷口面积比为 0.1 时,超声速调制和对应声速调制的声压级和五次谐波内的谐波比。两者的声压级输出和谐波比基本上均随马赫数或气室压力的增加而增加。马赫数较低时,超声速调制的声压级增益随马赫数的增加而增加。马赫数为 2.75 时,声压级增益达到最大,为 5.16dB。然而,当马赫数进一步增加后,声压级增益反而下降。

计算了马赫数 1 ~ 3、喷口面积比 0.2 ~ 1.0 范围内的声压级和谐波比,结果如图 3 和图 4 所示。

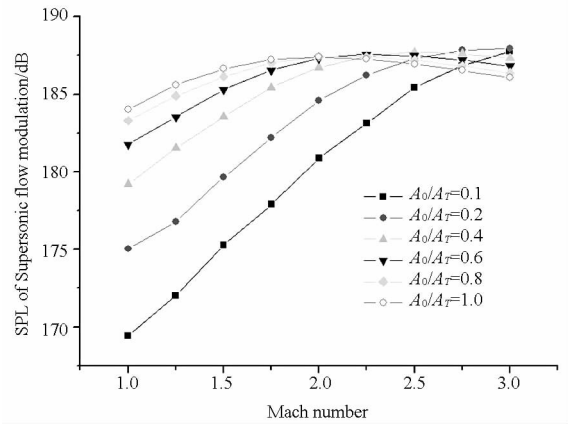


图 3 超声速调制声压级随马赫数和喷口面积比的变化
Fig. 3 The variation of SPL values with Mach number and area ratio

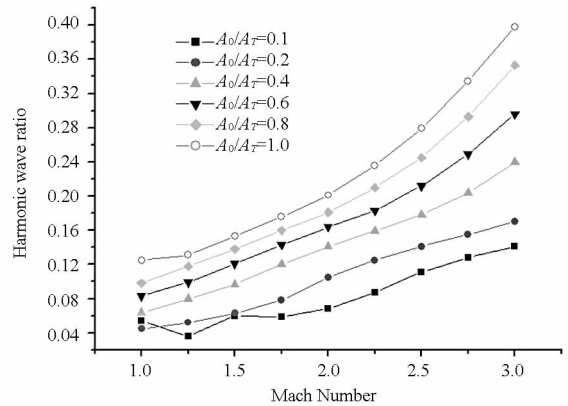


图 4 超声速调制谐波比随马赫数和喷口面积比的变化
Fig. 4 The variation of harmonic ratios with Mach number and area ratio

从图 3 中可看出,马赫数较高时,一般能得到较大的声压级输出。当喷口面积比偏小时,超声速调制的声压级随马赫数的增加而增加;当喷口面积比偏大时,存在一个最优的马赫数值,高于该马赫数,声压级反而随马赫数的增加而下降。对于相同的马赫数,声压级随喷口面积比的变化与已有声速调制的结论不完全相同。马赫数较小时,声压级随喷口面积比的增加而增加,然而马赫

数高于2时,较大的喷口面积比对应的声压级反而偏低。

图4中,可看出除个别数据点外(喷口面积比

偏小、马赫数低于1.25),超声速调制的谐波比随马赫数(或气室压力)的增加而增加,随喷口面积比的增加而增加。这与声速调制的结论是相同的。

表1 $A_0/A_T=0.1$ 时超声速与声速调制的输出声压级比较

Tab.1 Comparison of SPL output values for the supersonic and sonic flow modulation when $A_0/A_T=0.1$

Ma	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
A_s/A_T	0.1	0.0955	0.085	0.072	0.0595	0.0475	0.038	0.030	0.0235
P/P_1	1.893	2.590	3.671	5.324	7.824	11.563	17.086	25.140	36.733
SPL _{super}	169.44	172.04	175.26	177.89	180.87	183.13	185.44	186.84	187.78
超声速谐波比	0.054	0.036	0.060	0.059	0.068	0.087	0.111	0.128	0.141
SPL _{sonic}	169.44	171.68	173.73	175.15	177.57	178.59	180.54	181.68	182.91
声速谐波比	0.054	0.041	0.047	0.045	0.050	0.055	0.066	0.072	0.080
声压级增益(dB)	0	0.36	1.53	2.74	3.30	4.54	4.90	5.16	4.87

图5给出相同气室压力和流量条件下,超声速调制相对声速调制的声压级增益结果。当喷口面积比偏小、马赫数较大时,声压级增益较大。相同喷口面积比情况下,存在一个最优马赫数使得增益值最大。相同马赫数情况下,声压级增益则随喷口面积比的减小而迅速增加。然而,当喷口面积比偏大、绝对声压级较高时,超声速调制获得的声压级增益值相对较小,马赫数较大时甚至出现低于声速调制的现象。

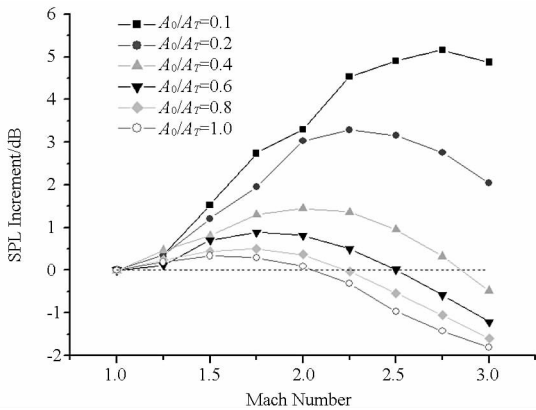


图5 不同马赫数和喷口面积比条件下,超声速调制相对声速调制的声压级增益

Fig.5 SPL increments of supersonic flow modulation at different Mach numbers and area ratios

值得注意的是,图3和图5的部分结果与现有准稳态理论结论不同。当气室压力和喷口面积比偏大时,声压级输出有可能随喷口面积比的增加而降低。这与类似工况下气流压力特性曲线的形状有关。如图2(b)所示,与喷口面积比0.3的动态工作线相比,面积比为1.0时,静态工作点附近曲线较密集且更加靠近Y轴,于是尽管后者的动态工作线在更大的面积比范围内变化,得到的

压力比变化范围反而较小。

3 超声速调制增益特性的实验结果

为验证超声速调制声压级增益效果,分别对采用声速和超声速喷口的旋笛开展了发声性能实验。超声速喷口设计马赫数2.0,声速喷口的直径与超声速喷口喉部直径相同。实验时旋笛安装在一个截止频率13Hz的指数形辐射器上,声压级测量位置在辐射器出口轴线上10m处,传感器的测量误差约为0.1dB。

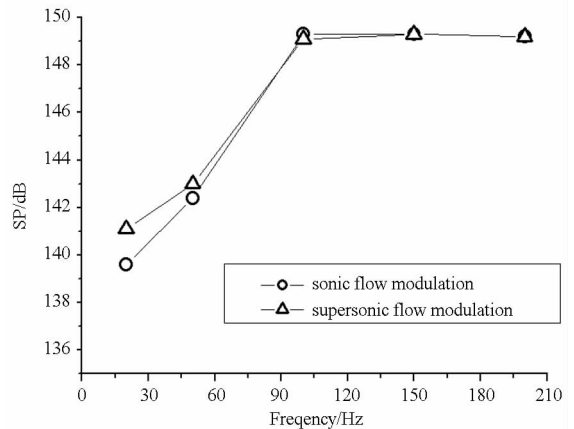


图6 集气腔压力为0.8MPa时,声速和超声速调制旋笛的频响曲线

Fig.6 Frequency response comparison of sonic and supersonic flow modulation at chamber pressure 0.8MPa

集气腔压力为0.8MPa时,声速和超声速调制旋笛的频响曲线如图6所示。旋笛发声频率较低时(低于100Hz),超声速调制明显优于声速调制,超声速调制50Hz获得声压级增益2dB,低于表1中马赫数2的理论值3.3dB,如果能提高气室压力,声压级增益还会进一步提高,如表1所

示;随着发声频率的增加,超声速调制获得声压级增益逐渐下降,发声频率高于 100Hz 时,超声速调制未获得声压级增益,超声速调制与声速调制的旋笛性能相同。

调制频率较低时,超声速调制获得声压级增益较为显著,调制频率较高时,超声速调制未获得声压级增益。由于准稳态理论的频率无关性,这一现象无法得到理论上的解释。本文认为,原因很可能与出口面积变化时喷口内超声速喷管内流动的演化过程有关。

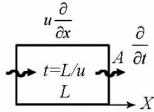


图 7 喷管出口附近流体体积内瞬态项 $\partial/\partial t$ 与对流项 $\partial/\partial x$ 的量级比较

Fig. 7 Comparison of temporal terms and convective terms in the flow volume near the nozzle exit

超声速调制情况下,如图 7 所示,对于喷管出口的流体体积(截面积 A , x 方向长度 L),与对流项相关的扰动通过该体积所需时间为 L/u ,当声源尺寸与气室压力确定后,该值是确定的;而与瞬态项相关的面积 A 从极小值变化到极大值所需时间为 $1/(2f)$ (f 为调制频率)。

于是,当 $2Lf/u \ll 1$ 不满足时,时间项不可忽略,准稳态假设不再成立。此时,超声速气流能否在收扩喷管中建立,不仅取决于上游气室压力,而且与调制频率有关。若调制频率较高,调制周期小于超声速流动中扰动在喷管内传播所需的时间,单个调制周期中,喷口内无法完全建立超声速流动,最终参与调制作用的射流流速将仍为声速。因此,高频调制时,声速调制与超声速调制的旋笛性能相同。

4 结论

调制气流声源声压级输出随气室压力的增加而趋近饱和,超声速调制有望成为进一步提高声压级输出的有效途径。本文基于准稳态理论研究了不同参数下超声速调制的增益特性。对超声速调制的性能开展了实验验证。

理论分析表明,超声速调制可获得一定的声压级增益。声压级增益与马赫数和喷口面积比的取值有关。喷口面积比较小、马赫数较大时增益

效果较为明显。相同面积比时,存在最优马赫数使增益值最大;相同马赫数时,增益值随面积比的增大而降低,甚至出现负增益的现象。

旋笛实验在调制频率较低时得到了超声速调制的声压级增益;调制频率较高时,受喷管内流动瞬态作用的影响,使得上游高压气体无法在参与调制前完全膨胀,参与调制的气流在超声速喷口内未完全发展为超声速流动,调制过程依然是声速调制,因此在调制频率较高时超声速调制与声速调制的旋笛性能相同。

参考文献 (References)

- [1] Meyer W A. Theoretical analysis of the performance of an air-modulated speaker[J]. JASA, 1969, 45(4):957-965.
- [2] Blondel L A, Elliott S J. Electropneumatic transducers as secondary actuators for active noise control[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 219(3):405-481.
- [3] Glendinning A G, Nelson P A, Willott S J. Experiments on a compressed air loudspeaker[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 138(3):479-491.
- [4] Frederic G P. An experimental and the retical study of high-intensity, high efficiency sirens[D]. Central County: The Pennsylvania State University, 1987.
- [5] 周泽民,曾新吾,龚昌超,等. 大功率调制气流声源阵列的相干合成实验研究[J]. 物理学报,2013,62(13):134305-1-9.
ZHOU Zemin, ZENG Xinwu, GONG Changchao, et al. Experimental investigations on coherent combining of high power and high intensity air-modulated speakers[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13):134305-1-9. (in Chinese)
- [6] 周泽民,曾新吾,龚昌超,等. 基于 NFxPEM 算法的调制气流声源非线性补偿[J]. 国防科技大学学报,2013,35(6):126-131
ZHOU Zemin, ZENG Xinwu, GONG Changchao, et al. Non-linearity compensation of air-modulated speaker based on the nonlinear filtered-x PEM algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(6):126-131. (in Chinese)
- [7] 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. Numerical simulation of a subsonic/sonic jet air-modulated speaker[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3):293-299. (in Chinese)
- [8] 潘锦珊,等. 气体动力学基础[M]. 北京:国防工业出版社,1989. 146-214.
PAN Jinshan et al. Gas dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1989. 146-214. (in Chinese)
- [9] 马大猷. 调制气流声源的原理[J]. 物理学报,1974,23(1):17-25.
MA Dayou. Theory of modulated air stream sound sources[J]. Acta Physica Sinica, 1974, 23(1):17-25. (in Chinese)