

# 中心棒哈特曼发声器声学特性研究

陈仁松<sup>1</sup>, 王国庆<sup>1</sup>, 高新军<sup>1</sup>, 陈修海<sup>1</sup>, 贾俊波<sup>1</sup>, 曹婷婷<sup>2</sup>

(1. 陕西省宝鸡市 150 信箱 11 分箱 28 号, 陕西宝鸡 721013; 2. 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

**摘要:** 采用 FW-H 声模拟法, 研究了中心棒的位置、长度和直径等因素对中心棒哈特曼发声器声学特性的影响, 得出如下结论: 无论中心棒置于谐振腔入口前端还是底部, 只要中心棒一端处于气流入口到谐振腔入口段, 哈特曼发声器就能产生较高的声压级; 中心棒置于气流入口, 且长度不超过喷流间距, 会产生比普通哈特曼发声器更高的声压级; 中心棒的半径有一个最佳值, 数值模拟结果显示, 不同半径中心棒哈特曼发声器声压级的大小顺序相应为:  $r=0.2\text{mm}$ 、 $r=0.3\text{mm}$ 、 $r=0.1\text{mm}$ 、 $r=0.5\text{mm}$ , 即半径  $r$  为  $0.2\text{mm}$  的中心棒哈特曼发声器产生的声压级较大, 而半径  $r$  为  $0.5\text{mm}$  的声压级最较小; 频谱分析发现, 加中心棒会使哈特曼发声器的最大峰值频率变小。上述结论对中心棒哈特曼发声器的应用具有重要的指导意义。

**关键词:** 中心棒; 哈特曼超声波发生器; FW-H 声模拟法; 声学特性

中图分类号: TJ7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-02-0159-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.02.017

## Research on acoustic characteristics of Hartmann acoustic generator with a central-stick

CHEN Ren-song<sup>1</sup>, WANG Guo-qing<sup>1</sup>, GAO Xin-jun<sup>1</sup>, CHEN Xiu-hai<sup>1</sup>, JIA Jun-bo<sup>1</sup>, CAO Ting-ting<sup>2</sup>

(1. The Shann'xi Province Baoji City 150 Mailbox 11 Subbox 28 number, Baoji 721013, China;

2. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the method of FW-H acoustic model, the influences of three parameters on the acoustic characteristics of the Hartmann acoustic generator with a central-stick are studied. The three parameters are the position, the length and the diameter of the central-stick. The conclusions are as follows: the Hartmann generator can produce a higher SPL only if one of the ends of the central stick is placed in the gap between inlet and resonator, regardless of the position of the central-stick; the Hartmann generator can produce a higher SPL than the regular ones, just as the central-stick is placed in the inlet and within the gap between inlet and resonator; the magnitudes of SPL for different radii of the central-stick are sequenced correspondingly as  $r=0.2\text{mm} > r=0.3\text{mm} > r=0.1\text{mm} > r=0.5\text{mm}$ , which means that the Hartmann generator with the central-stick of  $0.2\text{mm}$  in radius can generate the maximal SPL, while the minimum appears in the case where the radius of the central stick is  $0.5\text{mm}$ . By analyzing the spectrum, it is found that adding the central stick makes the maximal peak frequency decreases.

**Key words:** Hartmann acoustic generator with a central-stick; the FW-H acoustic model; acoustic characteristics

## 0 引言

流体哈特曼超声波发声器是由丹麦学者 Hartmann<sup>[1,2]</sup>在 1918 年提出的一种流体动力型声波发声器, 1954 年 Sprenger H<sup>[3]</sup>发现了谐振腔底部存在的热效应并用于发动机的点火装置后, 又称为 Hartmann-Sprenger tube。哈特曼发声器结构简单、体积小、耐冲击, 可以在恶劣的条件下工作。只要

材料强度条件允许, 就可以在较高的压强下产生大功率的声辐射。同时, 哈特曼发声器还具有造价低廉、处理量大、操作方便、经久耐用等特点, 广泛应用在如声波除灰、解堵、防垢、防蜡、降粘、加速化学反应、抑制飞机冲击噪声、空穴噪声等方面。

哈特曼发声器中加一中心棒会改变流场状态, 进而会影响哈特曼发声器的发声效率<sup>[4,5]</sup>。然而, 关于不同位置以及不同长度、直径的中心棒对声学特性的影响情况, 并未见相关的研究报道。本文拟利用 FW-H 声模拟法, 对中心棒哈特曼发声器的声学性能进行研究。具体研究不同位置、不同长度和不同直径中心棒哈特曼发声器的声学性能。研究结论对中心棒哈特曼发声器的应用有重要的指导意义。

收稿日期: 2012-04-30; 修回日期: 2012-07-07

基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2005AA000200)

作者简介: 陈仁松(1980—), 男, 山东潍坊人, 博士, 研究方向为超声波技术。

通讯作者: 陈仁松, E-mail: chenrensong@163.com

# 1 数值计算方法

## 1.1 声模拟法

声模拟法是基于 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H)方程的, 而 FW-H 方程是从连续性方程和 Navier-Stokes 方程推导得到的, FW-H 方程如下<sup>[6-8]</sup>:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{[P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f)\} + \frac{\partial}{\partial t} \{[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f)\} \quad (1)$$

式中:  $u_i$  为流体在  $x_i$  方向的速度分量;  $u_n$  为垂直表面的流体速度分量;  $v_i$  为  $x_i$  方向的表面速度分量;  $v_n$  为垂直表面的速度分量;  $\delta(f)$  为 Dirac Delta 函数;  $H(f)$  为赫维塞(Heaviside)函数;  $p'$  是远场的声压( $p' \equiv p - p_0$ )。

$f=0$  表示的无边界空间流动问题的一个数学定义面, 利用通用函数和自由空间的格林函数来进行求解。这个表面( $f=0$ )代表源面(声辐射面), 也就是不可渗透实体的体面, 或者是可渗透实体的等价面(与实体面远离一小段距离)。  $n_i$  是指向外部区域( $f > 0$ )的单元垂直向量,  $c$  是远场的声速,  $T_{ij}$  是 Lighthill 应力张量, 定义为

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - c^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (2)$$

式中,  $P_{ij}$  是可压缩的应力张量, 对于斯托克斯流体而言, 表达式为

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

式(1)是利用自由空间的格林函数( $\delta(g)/4\pi r$ )得到的, 完整的求解包含两次面积分和一次体积分。面积分后得到的是单极子、偶极子和部分四极子声源, 体积分得到的是表面之外区域的空间四极子(体)声源。

## 1.2 计算实例

中心棒哈特曼发声器的结构如图 1 所示。以谐振腔长度为 4 倍的谐振腔直径, 即  $L_c = 4D_j = 25.4$  mm, 中心棒在前端入口, 中心棒直径为 0.2 mm, 长度为 5.8mm 模型为例介绍计算过程, 其余模型计算过程与此相同, 故不赘述。

建立图 2 所示中心棒哈特曼发声模型, 模型参数如表 1 所示。图 1 中,  $D_j$  为气流入口的直径,  $X$  为气流入口到谐振腔口的距离,  $D_c$  为谐振腔的直径,  $L_c$  为谐振腔的长度,  $r_s$  为中心棒的半径,  $L_s$  为

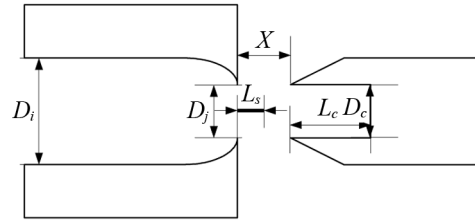


图 1 中心棒哈特曼发声器的结构示意图  
Fig.1 Sketch map of Hartmann ultrasonic generator with a central-stick

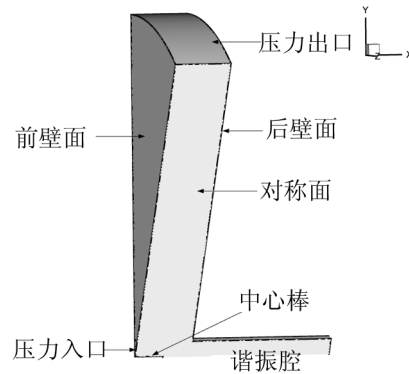


图 2 模型网格及边界条件示意图  
Fig.2 The sketch map of model mesh and boundary condition

表 1 模型参数  
Table 1 The model parameters

$D_j/mm$	$X/mm$	$D_c/mm$	$L_c/mm$	$r_s/mm$	$L_s/mm$
6.35	10.16	6.35	25.4	0.2	5.8

中心棒的长度。流体介质选择温度为 300 K 的理想气体, 入口压力为 4 atm, 粘度为  $1.7894 \times 10^{-5}$  kg/(m·s)。边界条件设置: 入口为压力入口, 出口为压力出口, 谐振腔的底部、上表面及前后壁面为墙, 前后为对称面。远距离监测点选择在出口外面离中心轴 1m 处, 三点的坐标分别为: rec1(2.54mm, 1000mm, 15.613mm), rec2(5.08mm, 1000mm, 15.613mm), rec3(7.62mm, 1000mm, 15.613mm)。

计算过程中, 首先利用大涡模拟法计算瞬态流场参数并捕捉声源数据, 然后求解 FW-H 方程, 得到监测点的声压力信号, 最后进行快速傅立叶变换进行频谱分析。对建立的模型进行大涡模拟计算, 利用计算的音源数据求解 FW-H 方程得到监测点 1 的声压力时程曲线如图 3 所示。对监测点 1 声压力信号进行 FFT 变换, 可得到频谱图如图 4、5 所示, 再对计算的数据进行频谱分析和声功率谱分析。

## 2 中心棒哈特曼发声器的声学特性

以下采用 FW-H 声模拟法研究哈特曼发声器中加入中心棒对哈特曼发声声学特性的影响情况, 具体研究中心棒的位置、长度、直径等因素对哈特

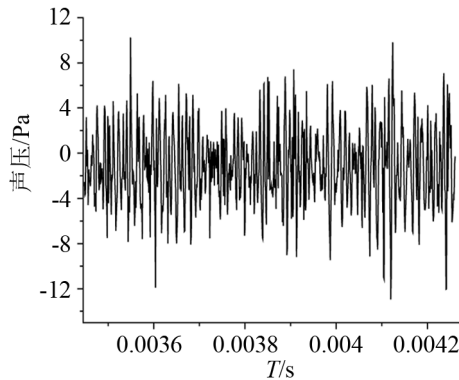


图 3 监测点 1 的声压波形图

Fig.3 The acoustic pressure waveform at the monitoring point 1

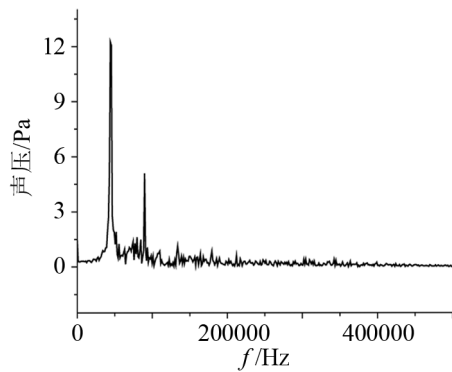


图 4 监测点 1 的声压频谱图

Fig.4 The graph of the acoustic pressure spectrum (in Pa/Hz) at the monitoring point 1

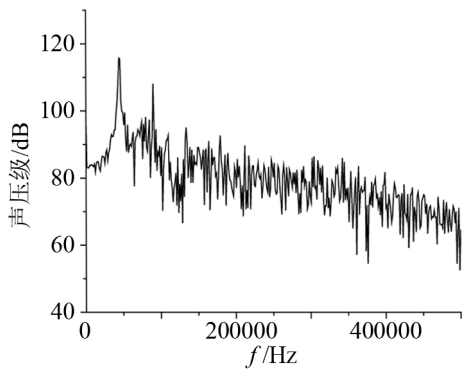


图 5 监测点 1 的声压级频谱图

Fig.5 The graph of the acoustic pressure level spectrum (in dB/Hz) at the monitoring point 1

曼发声器的影响情况。

### 2.1 中心棒在前端入口的模拟计算

建立中心棒直径  $r_s$  为 0.2 mm, 长度  $L_s$  为 5.8 mm(模型 1)、10.16 mm(模型 2)和 15.96 mm(模型 3)三个模型, 研究中心棒长度对哈特曼发声器声学特性的影响情况。建立中心棒长度  $L_s$  为 5.8 mm, 直径  $r_s$  分别为 0.1 mm(模型 4)和 0.3 mm(模型 5)两个模型研究中心棒直径对哈特曼发声器声学特性的影响情况, 建立模型如表 2 所示。具体分析过程省略。结果如表 3 所示。

表 2 十二个模型的参数表  
Table 2 Parameters of the 12 models

模型	中心棒		
	位置	长度/mm	半径/mm
Model 1	入口	5.8	0.2
Model 2	入口	10.16	0.2
Model 3	入口	15.96	0.2
Model 4	入口	5.8	0.1
Model 5	入口	5.8	0.3
Model 6	底部	5.8	0.5
Model 7	底部	10.5	0.5
Model 8	底部	21	0.5
Model 9	底部	31.5	0.5
Model 10	底部	21	0.1
Model 11	底部	21	0.2
Model 12	底部	21	0.3

### 2.2 中心棒在谐振腔底部的模拟计算

建立中心棒在底部直径  $r_s$  为 0.5 mm, 长度  $L_s$  分别为 5.8 mm(模型 6)、10.5 mm(模型 7)、21 mm(模型 8)和 31.5 mm(模型 9)四个模型, 研究中心棒长度对哈特曼发声器声学特性的影响情况。建立中心棒长度  $L_s$  为 21 mm, 直径  $r_s$  为 0.1 mm(模型 10)、0.2 mm(模型 11)、0.3 mm(模型 12)和 0.5 mm(模型 8)四个模型, 研究中心棒直径对哈特曼发声器声学特性的影响情况。所得结果列在表 3 中。

## 3 结果分析

### 3.1 中心棒位置对哈特曼总声压级的影响

表 3 中不同位置、不同长度棒的哈特曼发声器的总声压级(参考声压级  $20\mu\text{Pa}$ )如图 6 和图 7 所示。由棒在谐振腔底部的总声压级(图 6)发现, 中心棒的长度越长, 即棒的前端越接近入口, 则哈特曼发声器的产生的声压级越大。由棒在入口的总声压级(图 7)发现, 棒的长度较短(5.8 mm)时, 产生的声压级非常大, 可以达到 120.6 dB(此值高于相同条件下未置棒的声压级 117.3 dB), 而长度为 10.16 mm 的较长棒的声压级只有 109.2 dB, 说明中心棒在入口时, 较短的棒可以产生更大的声压级。

这是由于哈特曼发声器气流入口处、谐振腔入口处气流的不稳定性强, 产生的湍流涡量大, 所以声源的声功率级最大, 对声场的声强贡献大, 此点可以从模型的声源功率级等值线图得到验证。而处于此阶段的中心棒(尤其是端部)会增加流场的扰动, 使湍流涡量变大, 因而辐射声功率会增大。处于入口的较短中心棒的后端和处于谐振腔底部较长中心棒的前端, 正好处于这个范围内, 因而产生

声音的声压级会比较高。总之，中心棒置于气流入口，且长度不超过喷流间距时哈特曼发声器的辐射声功率会大大提高。

### 3.2 棒的半径对哈特曼发声器总声压级的影响

不同位置、不同半径中心棒哈特曼发声器的总

表 3 中心棒哈特曼发声器的频谱分析结果

Table 3 Spectrum analysis results for the Hartmann generator with a central-stick

模型	监测点	最大峰值频率分析		总声压级 /dB
		频率/Hz	声压级/dB	
Model1	Rec1	44191.9	115.7	120.6
	Rec 2	44191.6	115.8	120.6
	Rec 3	44191.6	115.8	120.6
Model2	Rec 1	152776.6	97.5	109.0
	Rec 2	152776.6	97.8	109.2
	Rec 3	152776.6	98.2	109.5
Model3	Rec 1	49357.2	87.1	104.3
	Rec 2	49357.2	88.5	105.2
	Rec 3	49357.2	87.5	105.0
Model4	Rec 1	29724.2	98.8	107.5
	Rec 2	29724.2	98.9	107.7
	Rec 3	29724.2	98.9	108.0
Model5	Rec 1	41556.2	111.7	118.2
	Rec 2	41560.2	111.8	118.2
	Rec 3	41560.2	111.9	118.3
Model6	Rec 1	43237.1	82.2	100.9
	Rec 2	43237.1	84.3	101.3
	Rec 3	43237.1	83.7	100.7
Model7	Rec 1	78495.0	84.8	104.1
	Rec 2	78495.0	85.0	105.2
	Rec 3	78495.0	85.4	106.2
Model8	Rec 1	49357.2	89.9	105.3
	Rec 2	49357.2	90.2	105.8
	Rec 3	49357.2	90.4	106.0
Model9	Rec 1	31173.0	106.8	114.4
	Rec 2	31161.3	106.9	114.7
	Rec 3	31173.0	107.0	114.8
Model10	Rec 1	8657.5	91.8	107.5
	Rec 2	8657.5	91.8	107.8
	Rec 3	8657.5	91.9	108.1
Model11	Rec 1	9234.7	96.8	108.3
	Rec 2	9234.7	96.8	108.6
	Rec 3	9234.7	96.84	108.9
Model12	Rec 1	12236.7	95.7	107.8
	Rec 2	12236.7	95.6	107.7
	Rec 3	12236.7	95.5	107.6

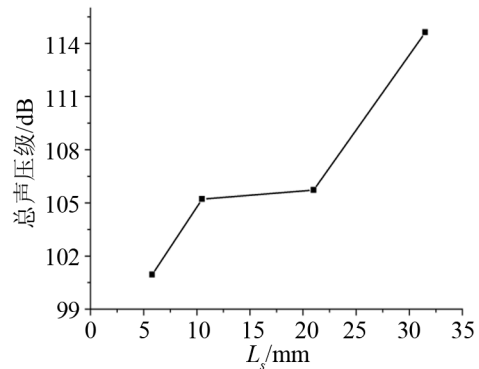


图 6 棒在谐振腔底部，哈特曼发声器的总声压级随棒长度的变化  
Fig.6 Total SPL versus  $L_s$ , the length of the central-stick which is at the bottom of the resonator of Hartmann generator

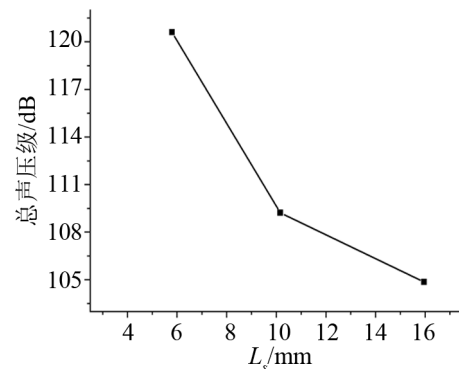


图 7 棒在入口前端处，哈特曼发声器的总声压级随棒长度的变化  
Fig.7 Total SPL versus  $L_s$ , the length of the central-stick which is at the front inlet of the resonator of Hartmann generator

声压级如图 8 和图 9 所示。由图 8、9 分析得知，中心棒的半径有一个最佳值，处于此值的中心棒对提高哈特曼发声器的声压级的效果最好。由表 3 分析可以得出，中心棒半径  $r$  在 0.2~0.5 mm 范围内有一个最佳值，不同半径中心棒哈特曼发声器的声压级的大小顺序为： $r=0.2\text{ mm}$ 、 $r=0.3\text{ mm}$ 、 $r=0.1\text{ mm}$ 、 $r=0.5\text{ mm}$ 。即半径  $r$  为 0.2 mm 的中心棒哈特曼发声器的声压级最大，而半径  $r$  为 0.5 mm 的中心棒哈特曼发声器的声压级最小。

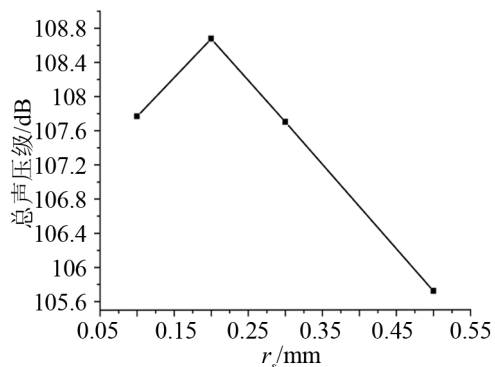


图 8 不同半径棒在谐振腔底部发声器的声压级  
Fig.8 Total SPL versus  $r_s$ , the radius of the central-stick which is at the bottom of the resonator of Hartmann generator

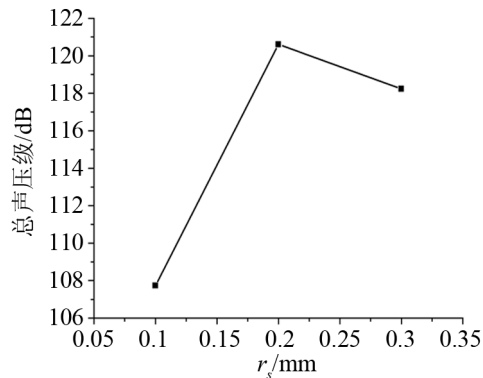


图 9 不同半径棒在气流入口处的发声器声压级

Fig.9 Total SPL versus  $r_s$ , the radius of the central-stick which is at the flow inlet of Hartmann generator

### 3.3 棒的半径对哈特曼发声器最大峰值频率的影响

表 2 频谱分析发现, 加中心棒使哈特曼发声器的最大峰值频率变小了。有四种模型符合这样的标准, 即中心棒在入口  $L_s=5.8\text{ mm}$ ,  $r_s=0.2\text{ mm}$  情况, 最大峰值频率约为 44 kHz; 中心棒在入口  $L_s=5.8\text{ mm}$ ,  $r_s=0.1\text{ mm}$ , 最大峰值频率约为 29kHz; 中心棒在入口  $L_s=5.8\text{ mm}$ ,  $r_s=0.3\text{ mm}$  情况, 最大峰值频率约为 42kHz; 中心棒在底部  $L_s=31.5\text{ mm}$ ,  $r_s=0.5\text{ mm}$ , 最大峰值频率约为 31 kHz。频率维持在 29~45 kHz 之间。而不加中心棒的相同结构设计的哈特曼发声器的最大峰值频率约为 106kHz。

## 4 结论

本文研究了加中心棒哈特曼发声器的声学特性。研究了位置不同、长度和半径不同的中心棒哈特曼发声器的声学性能。建立模型, 采用 FW-H 声模拟法进行研究。频谱分析发现, 加中心棒会使哈特曼发声器的最大峰值频率变小。同时研究发现,

无论中心棒置于入口前端还是谐振腔底部, 只要中心棒的一端处于气流入口到谐振腔入口段, 就能产生较高的声压级; 相比而言, 中心棒置于气流入口, 且长度不超过喷流间距, 哈特曼发声器会产生比普通哈特曼发声器更高的声压级; 中心棒的半径有一个最佳值, 处于此值的中心棒对提高哈特曼发声器的声压级的效果最好。数值模拟结果显示, 不同半径的中心棒哈特曼发声器的声压级的大小顺序:  $r=0.2\text{ mm}>r=0.3\text{ mm}>r=0.1\text{ mm}>r=0.5\text{ mm}$ 。即半径  $r$  为 0.2 mm 的中心棒哈特曼发声器的声压级最大, 而半径  $r$  为 0.5 mm 的中心棒哈特曼发声器的声压级最小。

### 参 考 文 献

- [1] Hartmann J, Trolle B. On a new method for the generation of sound wave[J]. Phys. Rev. 1922, **20**(6): 719-727.
- [2] Hartmann J, Trolle B. A new acoustic generator[J]. J Sci In Str, 1927, **4**(4): 101-111.
- [3] Sprenger H. Ueber thermische effekte in resoanzrohren[J]. Fed Inst Tech Zurich, 1954, **21**: 18-35.
- [4] XIA Guoping, LI Ding, Charles L. Merkle. Effects of a needle on shrouded Hartmann-sprenger tube flows[J]. AIAA, 2007, **45**(5): 1028-1035.
- [5] Jack Wilson. Vortex rings generated by a shrouded Hartmann-sprenger tube[J]. AIAA, 2006, **44**(11): 2707.
- [6] Brentner K S, Farassat F. An analytical comparison of the acoustic analogy and kirchhoff formulations for moving surfaces[J]. AIAA, 1998, **36**(8): 1379-1386.
- [7] Ffowcs-Williams J E, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[C]// Proc. Roy. Soc. London, 1969: 321-342.
- [8] 陈仁松. 哈特曼发声器的声学特性研究[J]. 声学技术, 2012, **31**(3): 335-339.  
CHEN Rensong. Research on acoustic characteristics of Hartmann acoustic generator[J]. Technical Acoustics, 2012, **31**(3): 335-339.