

# 哈特曼发声器的声学特性研究

陈仁松, 王国庆, 高新军, 贺升平, 王 冰

(陕西省宝鸡市 150 信箱 11 份箱 28 号, 陕西宝鸡 721013)

**摘要:** 采用 FW-H 声模拟法, 研究了谐振腔长度、喷流间距、谐振腔直径和入口气压等对哈特曼发声器的声学性能的影响。得出如下结论: 哈特曼发声器的发声基频大小与谐振腔长度成反比; 总声压级随谐振腔长度增大而增大; 总声压级随喷流间距变化作震荡变化, 且变化周期随着谐振腔直径的增大而增大; 谐振腔直径大, 产生的声压级也高; 入口气压增大, 总声压级增大, 但对基频的影响不大。该结论对哈特曼发声器的应用具有重要的指导意义。

**关键词:** 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(2012)-03-0335-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.03.021

## Research on acoustic characteristics of Hartmann acoustic generator

CHEN Ren-song, WANG Guo-qing, GAO Xin-jun, HE Sheng-ping, WANG Bing

(The Shanxi Province Baoji City 150 Mailbox 11 Subbox 28 Number, Baoji 721013, Shanxi, China)

**Abstract:** Based on the method of FW-H acoustic model, the influence of the model parameters on the acoustic characteristics of the Hartmann acoustic generator is studied, these parameters are resonator length, spacing between the jet and resonator tube, the diameter of resonator tube, and the inlet pressure. The conclusions are as follows: The total sound pressure level (SPL) increases with the increase of the length of resonator tube, while the magnitude of fundamental frequency is reverse; the total SPL oscillates with the increase of the spacing between jet and resonator, and the oscillating period increases with the increase of the diameter of resonator tube; the Hartmann generator with larger diameter of resonator tube can produce a higher SPL; the total SPL increases with the increase of the inlet pressure, while the fundamental frequency changes slightly. The results of the paper are significant for the application of the Hartmann acoustic generator.

**Key words:** Hartmann ultrasonic generator; the FW-H acoustic model; acoustic characteristics

## 0 引言

流体哈特曼超声波发生器是由丹麦学者 Hartmann<sup>[1,2]</sup>在 1918 年提出的一种流体动力型声波发生器, 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。哈特曼发生器结构简单、体积小、耐冲击, 可在恶劣的条件下工作。只要材料强度条件允许, 就可在较高的压强下产生大功率的声辐射。同时, 哈特曼发生器还具有造价低廉、处理量大、操作方便、经久耐用等特点, 被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。

本文采用 FW-H(Ffowcs Williams-Hawkings)方法系统研究了哈特曼发声器的声学特性, 研究了谐振腔的长度、喷流间距、谐振腔直径和入口气压等对哈特曼发生器声学性能的影响情况。论文结论对哈特曼发声器的应用具有重要的指导意义。

## 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 方程为<sup>[4,5]</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;

收稿日期: 2011-06-30; 修回日期: 2011-09-05

基金项目: 国家“863 计划”课题(2005AA000200)资助。

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

$u_n$  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

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

$P_{ij}$  是可压缩的应力张量, 对于斯托克斯流体而言, 表达式为

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

方程(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

哈特曼发声器的结构如图 1 所示。论文以谐振腔长度为四倍的谐振腔直径, 即  $L_c = 4D_j = 19.05 \text{ mm}$  模型为例介绍计算过程, 其余模型计算过程与此相同。因篇幅所限, 不赘述。

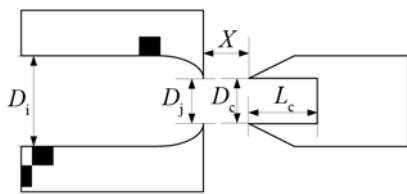


图 1 哈特曼发声器的结构示意图  
Fig.1 The sketch map of Hartmann ultrasonic generator

建立图 2 所示哈特曼发声模型, 模型参数如表 1 所示。 $D_j$  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,  $V_{\text{cell}}$  为划分网格的最小体积。流体介质选择温度为 300K 的理想气体, 入口压力为 4atm, 粘度为  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 。边界条件设置: 入口为 pressure inlet, 出口为 pressure outlet, 谐振腔的底部、上表面及前后壁面为 wall, 前后对称面为 symmetry。远距离监测点选择在出口外面离中心轴

1 m 的远距离, 三点的坐标分别为: receiver1 (2.54 mm, 1000 mm, 15.613 mm), receiver2(5.08 mm, 1000 mm, 15.613 mm), receiver3(7.62 mm, 1000 mm, 15.613 mm)。

表 1 模型参数  
Table 1 The model parameters

$D_j/\text{mm}$	$X/\text{mm}$	$D_c/\text{mm}$	$L_c/\text{mm}$	$V_{\text{cell}}/\text{mm}^3$
6.35	10.16	6.35	25.4	$4.9 \times 10^{-4}$

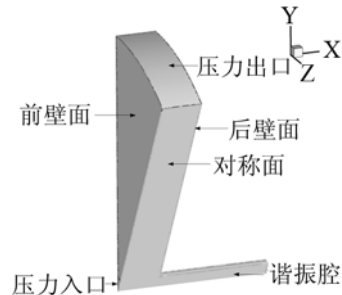


图 2 模型网格及边界条件示意图  
Fig.2 The sketch map of model mesh and boundary condition

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, 最后进行快速傅里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, 可以得到声学量频谱图 4、图 5 所示, 再对计算的数据进行频谱分析和声功率分析。

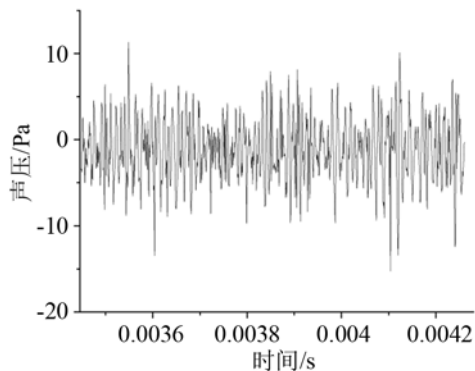


图 3 监测点 1 的声压力时间图  
Fig.3 The acoustic pressure-time map at monitoring point 1

## 2 结构参数对哈特曼发声器的声学特性的影响

以下采用 FW-H 声模拟法对影响哈特曼发声器的声学特性的诸多影响因素进行数值模拟。研究谐振

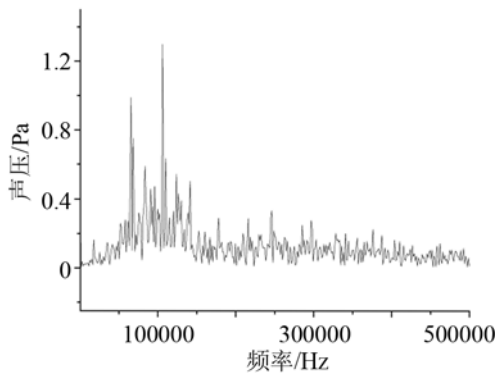


图 4 监测点 1 的声压大小频谱图  
Fig.4 The sound pressure magnitude spectrum (in Pa) at monitoring point 1

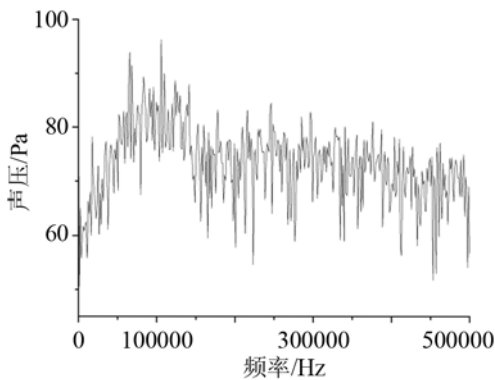


图 5 监测点 1 的声压级频谱图  
Fig.5 The sound pressure level spectrum (in dB) at monitoring point 1

腔的长度  $L_c$ 、喷流间距  $X$  和谐振腔直径  $D_c$  以及入口压力  $R$  对哈特曼发声器的频率、声场声压的影响情况。

### 2.1 谐振腔长度 $L_c$ 对发声器声学参数的影响

选取谐振腔长度与入口直径比  $L_c/D_j$  为 0.5、1、2、3、4、6、8 和 10 分别建立模型。采用 FW-H 声学类比法进行分析, 以获得谐振腔的长度对发声频率和功率的影响情况。

哈特曼发声器的基频可以近似由“1/4 波长谐振频率法”确定<sup>[6]</sup>:

$$f = \frac{(2n+1)c}{4L_c} \quad (n=0) \quad (4)$$

式中,  $c$  为当地声速, 这里取  $c=343 \text{ m/s}$ 。例如,  $L_c/D_j=4$  时, 1/4 波长谐振频率是  $f=3375.98 \text{ Hz}$ ;  $L_c/D_j=6$  时为  $f=2250.67 \text{ Hz}$ 。

图 6 为计算所得不同管长  $L_c$  的哈特曼发声器的基频与 1/4 波长谐振频率法所得结果对比图。由图 6 可见, 哈特曼发声器的基频随管长  $L_c$  的增大而减小。说明哈特曼发声器的发声频率与谐振器的长度成反比。比较发现, 利用 FW-H 声学类比法计算的哈特曼发声器的基频与 1/4 波长谐振频率非常接

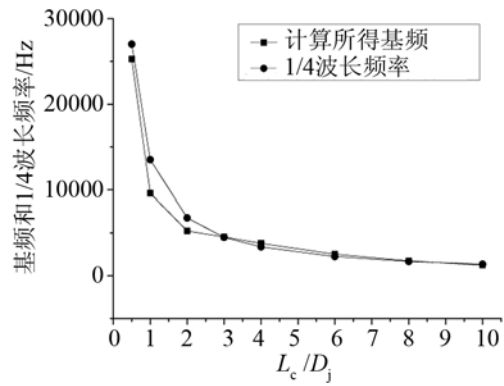


图 6 不同管长  $L_c$  哈特曼基频和 1/4 波长频率  
Fig.6 The fundamental frequency and the quarter-wave frequency for different pipe length  $L_c$

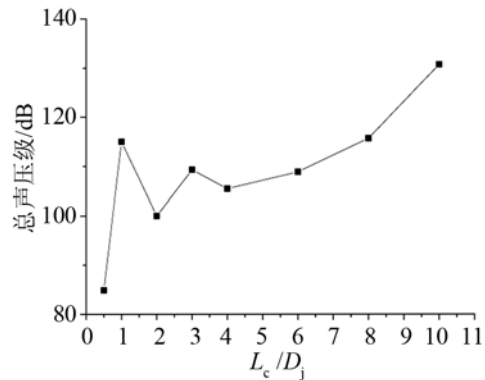


图 7 不同管长  $L_c$  哈特曼发声器的总声压级  
Fig.7 Total sound pressure level for different pipe length  $L_c$

近。管长越大, 接近程度越好。当  $L_c/D_j \geq 3$  时其基频已经十分接近四分之一波长谐振频率了。图 7 为不同管长  $L_c$  的哈特曼发声器的总声压级。发现总声压级随管长  $L_c$  的增大有增大的趋势。

### 2.2 喷流间距 $X$ 和谐振腔直径 $D_c$ 对发声器声学参数的影响

选取谐振腔直径与入口直径比  $D_c/D_j$  分别为 0.5、1 和 1.5, 喷流间距  $X/D_j$  分别为 0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 和 4.8 建立模型, 共 18 个模型。采用 FW-H 声学类比法进行分析, 以获得喷流间距  $X$  和谐振腔直径  $D_c$  对发声频率和功率的影响情况。下面就不同的情况进行分析。

#### 2.2.1 模型 $D_c=0.5D_j$

计算谐振腔直径与入口直径比  $D_c/D_j=0.5$ ,  $X$  为 0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 和 4.8 倍  $D_j$  共 6 个模型。将各种喷流间距下三个监测点的总声压级取平均, 作喷流间距和平均总声压级图, 如图 8 所示。总声压级随喷流间距的变化作震荡变化, 在  $X/D_j=1.6$ 、3.2 和 4.8 时最大, 而在  $X/D_j=0.8$ 、2.4 和 4.0 时最小。变化周期为  $1.6D_j$ 。说明喷流间距  $X$  是影响哈特曼发声器的声功率辐射的重要影响因素。

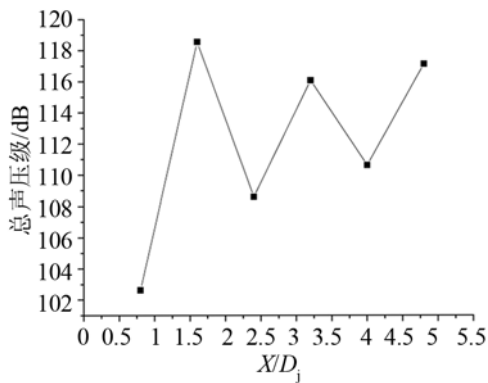


图 8  $D_c=0.5D_j$  时, 不同喷流间距  $X$  下的总声压级  
Fig.8 Total sound pressure level for different pacing  $X$  when  $D_c=0.5D_j$

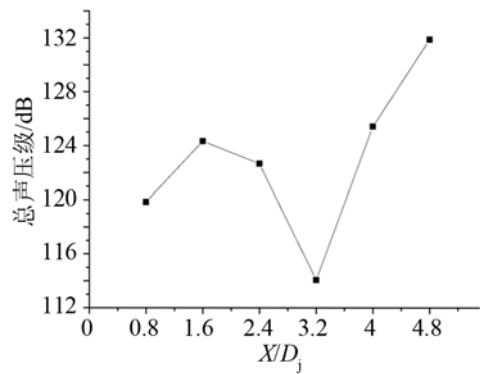


图 10  $D_c=1.5D_j$  时, 不同喷流间距  $X$  下的总声压级  
Fig.10 Total sound pressure level for different pacing  $X$  when  $D_c=1.5D_j$

### 2.2.2 模型 $D_c=1D_j$

计算了  $D_c/D_j=1$ ,  $L_c/D_j=4$ ,  $R=6.12 \text{ atm}$ ,  $L_c=25.4 \text{ mm}$ , 而  $X/D_j=0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0$  和  $4.8$  几种情况下哈特曼发声器的频谱和总声压级。将各种喷流间距下三个监测点的总声压级取平均, 作喷流间距和平均总声压级图, 如图 9 所示。总声压级明显高于  $D_c/D_j$  为  $0.5$  的情况, 且随喷流间距变化作震荡变化, 在  $X/D_j=1.6, 3.2$  和  $4.0$  时最大, 而在  $X/D_j=0.8, 2.4$  和  $4.8$  时最小。变化周期为  $1.6D_j \sim 2.4D_j$ , 比  $D_c/D_j$  为  $0.5$  情况增大了。说明较大谐振腔直径的哈特曼发声器的辐射功率较大, 且能使哈特曼发声器的有效位置区域加大。

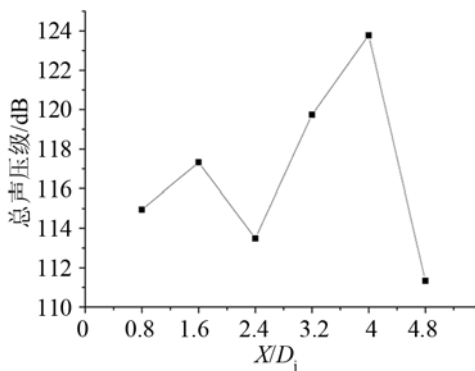


图 9  $D_c=D_j$  时, 不同喷流间距  $X$  下的总声压级  
Fig.9 Total sound pressure level for different pacing  $X$  when  $D_c=D_j$

### 2.2.3 模型 $D_c=1.5D_j$

计算了  $D_c/D_j=1.5$ ,  $L_c/D_j=4$ ,  $R=6.12 \text{ atm}$ ,  $L_c=25.4 \text{ mm}$ , 而  $X/D_j=0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0$  和  $4.8$  几种情况下哈特曼发声器的频谱和总声压级。将各种喷流间距下三个监测点的总声压级取平均, 作喷流间距和平均总声压级图, 如图 10 所示。总声压级明显高于  $D_c/D_j$  为  $0.5$  和  $1$  的情况, 与前两种情况类似, 总声压级随喷流间距的变化作震荡变化。相比

$D_c/D_j$  为  $0.5$  和  $1$  不同之处, 在  $X/D_j=1.6$  和  $4.8$  时声压级最大, 而在  $X/D_j=3.2$  时最小, 变化周期为  $3.2D_j$ 。说明较大的谐振腔直径的哈特曼发声器的辐射功率较大, 且能使哈特曼发声器的有效位置区域宽度加大。

### 2.3 入口气压 $R$ 对发声器的声学参数的影响

建立模型为  $L_c/D_j=4$ ,  $X=3.2D_j=20.32 \text{ mm}$ ,  $D_c=D_j=6.35 \text{ mm}$ ,  $L_c=25.4 \text{ mm}$ 。计算模拟在同入口气压  $R$  为  $2.12 \text{ atm}, 3.12 \text{ atm}, 4.12 \text{ atm}, 5.12 \text{ atm}$  和  $6.12 \text{ atm}$  几种情况下哈特曼发声器的声学参数。

图 11 为不同的入口压力  $R$  下监测点的基频。发现基频保持在  $3000 \text{ Hz}$  左右基本不变, 且接近  $L_c=4D_j$  的  $1/4$  波长频率  $3375.98 \text{ Hz}$ , 说明入口压力对哈特曼发声器的基频的影响不大。图 12 为不同入口压力  $R$  下监测点的平均总声压级。发现随入口压力增大, 总声压级增大。说明哈特曼发声器的辐射功率受入口气压的影响较大, 随入口气压的增大而增大。

## 3 结 论

通过以上模拟, 可以得出以下结论:

(1) 哈特曼发声器的基频随管长  $L_c$  的增大而减小。说明哈特曼发声器的发声频率与谐振器的长度成反比。比较发现, 利用 FW-H 声学类比法计算的哈特曼发声器的基频与  $1/4$  波长谐振频率非常接近。管长越大, 接近程度越好。发现总声压级随管长  $L_c$  的增大有增大的趋势。

(2) 总声压级随喷流间距的变化作震荡变化。 $D_c/D_j$  为  $0.5$  时变化周期为  $1.6D_j$ ,  $D_c/D_j$  为  $1$  时变化周期增大到  $1.6D_j \sim 2.4D_j$ ,  $D_c/D_j$  为  $1.5$  时变化周期增大到  $3.2D_j$ 。这种情况是由高马赫数气流所形成

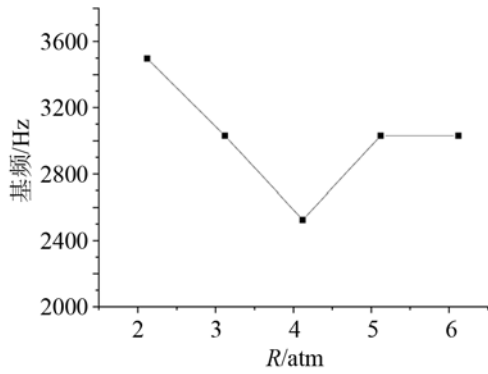


图 11 计算的不同入口压力  $R$  下的基频  
Fig.11 The fundamental frequency for different inlet pressure  $R$

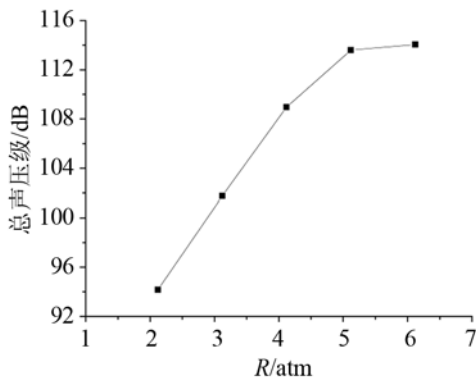


图 12 不同入口压力  $R$  下监测点的平均总声压级  
Fig.12 The average total sound pressure level for different inlet pressure  $R$

的周期性的菱形或桶形的流场激波结构决定的。谐振腔置于周期性结构的终端，即激波的压缩区，哈特曼发声器会产生更高的声压级。

(3) 比较总声压级图发现，在入口气压相同的情况下， $D_c/D_j$  为 1.5 的总声压级大于  $D_c/D_j$  为 1 的， $D_c/D_j$  为 1 的总声压级大于  $D_c/D_j$  为 0.5 的。说明具有较大谐振腔直径的哈特曼发声器会产生更高的声压级。

(4) 总声压级随入口压力的增大而增大。

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] Brentner K S, Farassat F. An analytical comparison of the acoustic analogy and kirchhoff formulations for moving surfaces[J]. AIAA Journal, 1998, 36(8): 1379-1386.
- [5] Ffowcs-Williams J E, Hawkings D L. Sound Generation by Turbulence and surfaces in arbitrary motion[C]// Proc. Roy. Soc. London, 1969: 321-342.
- [6] Kastner J, Samimy M. Development and characterization of Hartmann tube fluidic actuators for high-speed flow control [J]. AIAA, 2002, 40(10): 1926-1934.