

文章编号: 1001-2486 (2002) 03-0032-04

## 合成射流影响因素\*

罗振兵, 夏智勋, 方丁酉, 王志吉, 胡建新  
(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 在综合国外大量实验和数值模拟数据的基础上, 对影响合成射流特性的驱动因素、结构因素进行了分析和总结, 并且通过数值模拟的方法对雷诺数以及斯托罗哈数对合成射流的影响进行了研究。获得了反映合成射流激励器特征的函数关系式, 为激励器的初步设计提供指导。

**关键词:** 合成射流; 激励器; 影响因素

**中图分类号:** O35      **文献标识码:** B

## The Factors Influencing the Synthetic Jet

LUO Zhen-bing, XIA Zhi-xun, FANG Ding-you, WANG Zhi-ji, HU Jian-xin

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on integrating a great deal of foreign experimental data and numerical simulation data, the driving factors and configuration factors influencing characters of the synthetic jet are analyzed and summarized. Then the influences of  $Re$  and  $St$  for synthetic jet are investigated with numerical simulation method. And a correlation function reflecting the characters of synthetic jet actuator is obtained. It provides references for the actuator preliminary design.

**Key words:** synthetic jet; actuator; influencing factors

合成射流激励器 (Synthetic jet actuator) 是国际上近几年提出的一种全新的流动控制技术, 其基本原理是在流动壁面内设置开缝 (或孔) 的密封腔, 利用压电材料的振动, 在缝隙处产生连续不断向外扩展的一系列非定常涡对 (或涡环), 它对主流的作用类似于一股射流, 从而达到主动流动控制的目的。用于流动方向控制典型的合成射流及其形成的射流流场如图 1 所示。合成射流技术虽然起步较晚, 但发展很快, 随着研究的深入, 合成射流技术可望用于高马赫数飞行体表面气体流动控制、火箭发动机推力矢量控制等。包括美国国家防御高级研究机构、空军科学研究所、波音公司、NASA 研究中心、乔治理工大学在内的一批科研机构 and 院校正在对它进行机理、实验和应用方面的研究<sup>[1~6]</sup>。国内相关研究才刚刚起步, 主要是机理性研究<sup>[2]</sup>。本文将在综合国外大量实验和数值模拟数据的基础上, 对影响合成射流的主要因素进行分析和总结, 试图获得表征合成射流特征的函数关系式, 同时采用数值模拟的方法研究雷诺数以及斯托罗哈数对合成射流的影响。

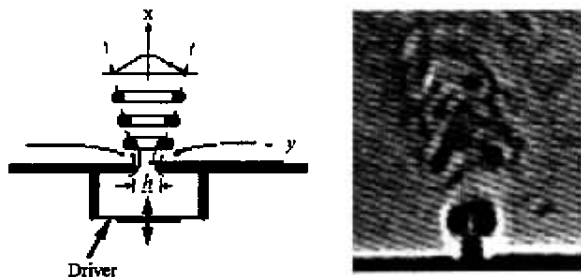


图 1 合成射流示意图及实验纹影图

Fig.1 Schematic of synthetic jet and schlieren of synthetic jet

## 1 合成射流影响因素

合成射流的能量水平 (旋涡对强度、速度) 不仅取决于金属薄膜振动所消耗的电能, 而且还与

\* 收稿日期: 2002-03-05  
基金项目: 国家自然科学基金资助 (50176055)  
作者简介: 罗振兵 (1979-), 男, 硕士生。

驱动信号的频率、振幅及激励器腔体的结构设计等有关，因此有可能消耗较少的电能而获得较强的合成射流，这就需要合理设计合成射流激励器。

影响合成射流的因素包括激励器结构因素、驱动因素和流场流动特性。结构因素主要指激励器腔体体积、出口孔缝的面积、振动膜的强度、厚度及固有频率。驱动因素包括驱动振动膜的电功率及振动频率和振幅。流动特性主要由雷诺数和斯托罗哈数反映。

## 2 合成射流影响因素研究及总结

表征合成射流特性的参数主要是旋涡对强度和速度，其中速度通常用最大速度  $U_0$  表示。旋涡对强度由涡量来表示。

### 2.1 驱动因素对合成射流的影响

合成射流激励器工作时只需要电能，所以易于实现电参数控制。因此研究驱动因素对合成射流的影响以及驱动因素与合成微射流的关系是实现电参数控制的前提。

Mallinson 等人对驱动频率及振动膜的振幅对合成射流的影响进行了初步的数值模拟<sup>[3]</sup> 结果显示：表征激励器性能的最大出口速度  $U_0$  随着驱动频率  $f$  和膜的振幅  $A$  增大而增大并成线性关系，即：

$$U_0 \propto f, U_0 \propto A \quad (1)$$

而  $U_0$  与  $fA$  不是完全的线性关系，这表明影响  $U_0$  还有其他因素需要加以考虑。这可能是由于激励器工作过程中流体物性变化所引起的，如密度  $\rho$ 、粘性系数  $\mu$  等发生变化。考虑到流动特性变化的影响，结合 (1) 式，得到下式：

$$U_0 = k(fA) + \Psi(\rho, \mu) \quad (2)$$

文献 4 对双膜激励器的特性进行了描述，当驱动频率在一定范围内时，最大出口速度  $U_0$  与驱动频率  $f$  成线性关系，而频率再增大， $U_0$  反而减小，继而又增大。式 (2) 只在固有频率  $f_1$  以下频率适用，即

$$U_0 = k_1(fA) + \Psi(\rho, \mu), \text{ 其中 } f \leq f_1 \quad (3)$$

其中  $f_1$  是振动膜的固有频率， $f_2$  是激励器腔体 Helmholtz (声学) 频率，一般  $f_1$  小于  $f_2$ 。

对于驱动频率的要求，根据实验，介质为气体的合成射流激励器的工作频率不能太高。分析其主要原因有：(1) 振动频率高时，膜难以承受；(2) 气体压力传递需要时间，涡的形成及移动也要时间，这使得频率高时合成射流激励器薄膜的振动失去意义，射流也就无法形成。压电驱动气体激励器设计频率一般为 kHz 量级，对其他驱动方式频率更低。

合成射流的能量水平（旋涡对强度、速度）与金属薄膜振动所消耗的电能（电压）直接相关，对于选定的激励器，驱动频率确定的情况下，一般地，输出的合成射流能量水平越高，所消耗的电能功率就越大。但是，驱动电压的合理选择可以满足较小能量消耗下获得较大的合成射流能量水平<sup>[4]</sup>。

### 2.2 结构因素对合成射流的影响

结构因素主要指激励器腔体体积、出口孔缝面积及振动膜的强度厚度。总结文献 [6~11] 中的实验和数值模拟结果，通过归纳得到合成射流激励器结构因素数据及计算数据。参照表 1 数据可以获得最大出口速度  $U_0$  与  $V_C$ 、 $S_0$  关系图，如图 2、3 所示。

表 1 合成射流激励器结构因素数据及计算数据

Tab.1 Configuration factors data and computational data for synthetic jet actuators

	$R_C$	$H_C$	$R_0$	$f$ (Hz)	$A$	$U_0$ (m/s)	$V_C$	$\lg V_C$	$S_0$	$\lg S_0$	$V_C/S_0$	$\lg(V_C/S_0)$
T1	25.4	5	2	10	0.075	0.09	2534	3.4	3.14	0.497	806	2.91
T2	25.4	5	2	100	0.025	0.08	2534	3.4	3.14	0.497	806	2.91
T3	3	2	0.2	1272	0.2	35	14.1	1.15	0.03	-1.5	450	2.65
T4	36.8	1.35	0.75	1450	0.0085	30	1436	3.16	0.44	-0.35	3250	3.51
T5	40	1.15	0.75	1450	0.01	10	1445	3.16	0.44	-0.35	3271	3.51
T6*	7.5×7.5	5	7.5×0.5	1000	0.41	22	281	2.45	3.75	0.574	75	1.88

(T6\* 是矩形腔体、出口为窄缝，其他为轴对称情形， $R_C$ 、 $R_0$  是腔底直径和出口直径， $H_C$  是腔体高度，单位 mm)

图 2 显示, 腔体体积  $V_C$  增大, 表征激励器性能的最大出口速度  $U_0$  是减小的, 当腔体体积  $V_C$  达到一定程度时,  $U_0$  会变得很小几乎可以忽略。这是因为: 对于介质为气体的激励器, 其驱动振幅一般较小, 而气体本身压缩性较大, 如果腔体体积太大, 合成射流则无法产生, 因而腔体体积必须较小, 合成射流才能形成。另外, 合成射流激励器是一种小型或微型流体控制器件, 这也要求激励器腔体体积不宜太大。对于液体介质, 流体可压缩性小, 腔体可有可无, 是否需要根据具体应用来决定, 但由于液体密度大, 因此它对膜振动强度的要求高得多。

图 3 大致反映, 最大出口速度  $U_0$  是随着出口孔缝面积  $S_0$  增大而减小的。但是  $S_0$  不宜过小, 这是由于流体粘性影响出口边界层的原因。

文献 [4] 表明: 振动膜的特性随压电片面积和金属膜厚度增加而提高, 随压电片厚度增加而降低。总结文献 [4], 得到下式:

$$U_0 \propto S_p / S_0 \cdot (t_m / t_p)^{0.5} \quad (4)$$

其中  $t_p$  是压电片厚度,  $t_m$  是金属膜厚度,  $S_p$  是压电片面积, (4) 式可为振动膜基本参数的设计提供指导, 如压电片的厚度、质量、强度。

联合 (3) (4) 式, 可得一个反映合成射流激励器特征更普遍的关系式:

$$U_0 = kfAS_C / S_0 \cdot (t_m / t_p)^{0.5} + \Psi(\rho, \mu), \text{ 其中 } f \leq f_1 \quad (5)$$

上式表明: 对于各种结构形式的合成射流激励器, 它的特性依赖于惯性力 (压电膜的驱动因素) 和粘性力 (出口边界层流动特性) 共同作用。此式虽然是一个近似式, 但对合成射流激励器的初步设计具有指导意义。

### 2.3 流动特性对合成射流的影响研究

雷诺数  $Re$  和斯托罗哈数  $St$  的定义式:

$$Re = \frac{\rho U_0 h}{\mu}, St = \frac{h \cdot f}{U_0} \quad (6)$$

其中  $h$  是激励器出口宽度,  $\mu$  为粘性系数。

在驱动频率  $f = 1000\text{Hz}$  条件下, 分别对合成射流流场进行了层流模拟 ( $Re = 630$ ) 和湍流模拟 ( $Re = 6.3 \times 10^4$ )。图 4 时刻  $0.0035\text{s}$  (即第 3.5 个周期) 层流和湍流模拟合成射流流场的涡量等值线图。从模拟的结果可以看到, 层流模拟的激励器出口沿射流方向有一系列涡对, 而湍流模拟在出口附近只有一对涡对。这表明大雷诺数条件下, 合成射流是湍流, 且涡对迅速扩散衰减; 在小雷诺数情况下, 射流是层流且有一连串的涡对。

对驱动频率  $f = 100\text{Hz}$ 、 $500\text{Hz}$ 、 $1000\text{Hz}$ 、 $5000\text{Hz}$  下的合成射流流场进行了湍流数值模

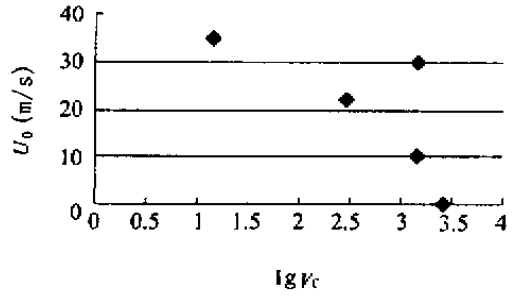


图 2 出口最大速度与腔体体积关系

Fig.2 Relation of maximum exit velocity with cavity volume

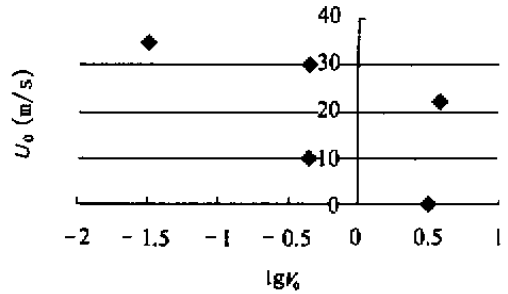


图 3 出口最大速度与出口面积关系

Fig.3 Relation of maximum exit velocity with exit area

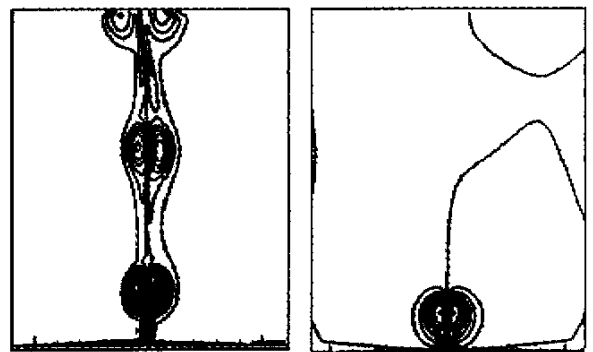


图 4 层流和湍流模拟的合成射流涡量图

Fig.4 Vorticity of synthetic jet for laminar and turbulent simulation

拟,由定义式(6)式计算,它们的斯托罗哈数  $St$  分别为:0.00785,0.0393、0.0785,0.393。图5是不同时刻涡核直径和斯托罗哈数对应图,从图5可以看到:随着斯托罗哈数增大,旋涡的涡核直径减小,  $\lg St$  为  $-0.406$  ( $St$  数为0.393,驱动频率为5000Hz)时,旋涡对的涡核直径变得很小,和激励器出口尺寸量级相同。模拟结果证明了合成射流中旋涡对的构成及其发展演变受斯托罗哈数影响,斯托罗哈数越大,旋涡的涡核直径越小。同时图5反映涡核直径与  $St$  数之间近似于一种负对数关系。

### 3 结论

#### (1) 合成射流的能量水平(旋涡对强度、速度)

不仅取决于金属薄膜振动所消耗的电能,而且还与驱动信号的频率和振幅、激励器腔体的结构设计以及流场的流动特性等有关。

(2) 综合考虑惯性力和粘性力因素对合成射流特性的影响,获得了反映合成射流激励器特征的一个普遍函数关系式:  $U_0 = kfAS_C \cdot / S_0 \cdot (t_m/t_p)^{0.5} + \Psi(\rho, \mu)$ , 其中  $f \leq f_1$ , 此式虽然是一个近似式,但对合成射流激励器的初步设计具有指导意义。

(3) 模拟结果表明:合成射流的发展形式对流体雷诺数的变化非常敏感,大雷诺数条件下,合成射流是湍流,在激励器出口只有极少量涡对;在小雷诺数情况下,射流是层流且有一连串的涡对;合成射流的旋涡结构受斯托罗哈数影响,斯托罗哈数越大,旋涡的涡核直径越小,而且发现涡核直径与斯托罗哈数之间近似于一种负对数关系。

### 参考文献:

- [1] Kral L D. Active Flow Control Technology [J]. ASME Fluids Engineering Division Technical Brief, 1998.
- [2] Guo D. Vectoring Control of a Primary Jet with Synthetic Jets [C]. AIAA 2001-0738.
- [3] Mallinson S G. The Operation and Application of Synthetic Jet Actuators [C]. AIAA 2000-2402.
- [4] Chen F J. Development of Synthetic Jet Actuators for Active Flow Control at NASA Langley [C]. AIAA 2000-2405.
- [5] Nae C. Unsteady Flow Control Using Synthetic Jet Actuators [C]. AIAA 2000-2403.
- [6] Smith B L. The Formation and Evolution of Synthetic Jets [J]. Phys. Fluids, 1998, 10 (9): 2281-2297.
- [7] Mallinson S G. Some Characteristics of Synthetic Jets [C]. AIAA 99-3651.
- [8] Mallinson S G. The Operation and Application of Synthetic Jet Actuators [C]. AIAA 2000-2402.
- [9] Gilarranz J L. PIV Measurements and Modeling of Synthetic Jet Actuators for Flow Control [C]. ASME Fluids Engineering Meeting, 1998.
- [10] Kral L D. Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators [C]. AIAA 97-1824.
- [11] Lee C Y. Two-Dimensional Synthetic Jet Simulation [C]. AIAA 2000-0406.
- [12] 罗小兵,李志信.合成喷形成的机理分析[J].清华大学学报(自然科学版),2000(12).

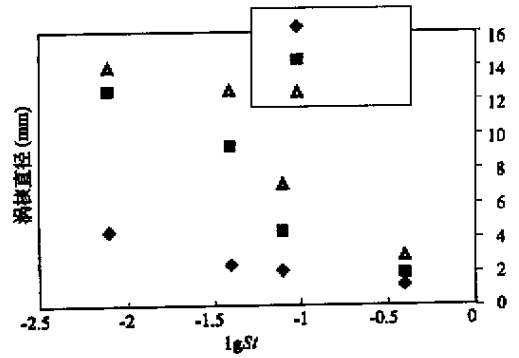


图5 涡核直径和  $\lg St$  对应图

Fig.5 The diameter of vortex core versus  $\lg St$



