

单微射流作动器控制主流参数分析

高峰¹, 汪亮², 张志峰¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要:采用改进的 Beam - Warming 近似因式分解法求解二维、粘性、非定常、可压全 N - S 方程, 对单微射流作动器定向控制主流的合成流场进行数值模拟。分析了主流和微射流作动器之间距离、微射流的入射角度、微射流的最大出口速度及压电薄膜驱动频率对主流偏转程度的影响。其中入射角的影响最为显著, 在入射角为负值(即微射流流向主流方向)时, 主流被“推”向另一侧, 成功模拟了文献[2]中关于微射流对主流“推”的现象。微射流的参数在一定的范围内对主流偏转程度影响非常显著, 而超出此范围, 其影响将大为减小。

关键词:单微射流; 定向控制; 数值模拟; 参数分析

中图分类号:V211.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009 - 3516(2005)01 - 0033 - 05

微射流技术是一种新型的流场主动控制技术^[1]。国外的初步研究结果显示, 微射流的确能起到控制流场的作用^[2]。实验中, 主射流宽度为 12mm, 在主射流出口的旁边放置一个微射流作动器, 其微射流出口宽为 0.5mm, 两个射流出口相距为微射流出口宽度的 3.556 倍。实验中观察到在微射流的影响下主射流向微射流一侧偏转了约 30°。文献[5]对单微射流定向控制主流进行了数值模拟, 计算条件与文献[2]相同, 计算结果显示了主流在微射流的作用下会发生偏转。在数值模拟中我们发现, 微射流参数(微射流作动器与主流之间的距离 d_{pull} 、入射角 θ 、最大出口速度 v_{max} 及压电薄膜的驱动频率)的变化对主流的偏转程度有较大的影响。本文对此情况进行分析。

1 控制方程和数值方法

通过对微射流与主射流合成流场的初步分析, 拟采用全 N - S 方程。对无量纲化的二维全 N - S 进行 Beam - Warming 近似因式分解, 离散方程隐式一边的空间导数采用显式二阶中心差分近似, 以形成块 3 对角矩阵便于快速求解。而显式一边的空间导数则采用隐式高阶紧致差分格式^[6]以提高精度, 同时采用隐式高阶数值过滤方法。具体过程详见文献[5]。

2 初始条件及边界条件

流场计算的初始条件为, 除主射流来流边界及微射流边界以外速度均取为零, 压强、温度取常压、常温下、给定的初值。计算域边界条件涉及固体边界、自由边界、来流边界和微射流边界。这里, 固体边界采用无滑移边界条件, 壁面的压强梯度和壁面温度梯度为零。自由边界取为远场, 假设此处流动已充分发展, 所有参数均进行线性外推。对来流边界, 流动参数给定为自由来流值。微射流边界取作动器出口速度:

$$v = v_{\text{max}} g(x) \sin(2\pi ft) \quad u = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2004 - 04 - 29

基金项目: 西北工业大学博士创新基金资助项目(200010)

作者简介: 高峰(1965 -), 男, 安徽凤阳人, 副教授, 博士, 主要从事固体火箭发动机与计算流体力学研究;

汪亮(1940 -), 男, 安徽歙县人, 教授, 博士生导师, 主要从事火箭发动机研究;

张志峰(1961 -), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事火箭发动机与装备管理研究。

式中: v 为 y 方向(主流方向)速度; u 为 x 方向(即横向)速度; $g(x)$ 为 x 方向上的速度分布函数。本文取 $g(x)$ 为 1, 即取为矩形分布。

3 计算结果及分析

本文对单微射流与主流的合成流场全域进行计算。为了方便给定边界条件, 计算域取得充分大, 外域尺寸为: $180 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 使边界上的参数变化很小, 不会出现数值反常。射流作动器出口宽度为 $h = 0.5 \text{ mm}$, 作动器与主流间距离 $d_{\text{pull}} = 3h$ 。射流出口最大速度为 $v_{\text{max}} = 37.83 \text{ m/s}$, 薄膜驱动频率 $f = 1000 \text{ Hz}$ 。主流宽度 $H = 12 \text{ mm}$, 出口速度 $v_{\text{max}} = 5.16 \text{ m/s}$ 。计算网格在物面附近、主流及射流孔中心线附近加密。全场网格数为 100×150 。主射流孔内有 20 个网格, 微射流孔内有 7 个网格。为了验证数值模拟结果, 计算中的参数和文献[2]实验中的参数基本一致。

3.1 d_{pull} 对主射流偏转的影响

图 1 为不同 d_{pull} 下合成流场的主流方向速度沿横向分布图, 反映了不同的 d_{pull} 值对主射流偏转程度的影响。其中, 除 d_{pull} 外, 其它参数取基准参数。在数值模拟中发现, 微作动器与主射流出口之间的距离不同, 主射流的偏转程度是不一样的。为了确定作动器的较佳位置, 本文对 $d_{\text{pull}}/h = 1, 2, 3, 4$ 四种情形进行了数值模拟。其中, 横向速度分布取 $y/H = 4.0$ 及 $y/H = 8.0$ 两个位置。表 1 给出了不同 d_{pull} 下沿流向不同位置横向速度分布的速度峰值点与主射流中心线之间的水平距离, 量化地表示了不同 d_{pull} 下主射流的偏转程度。

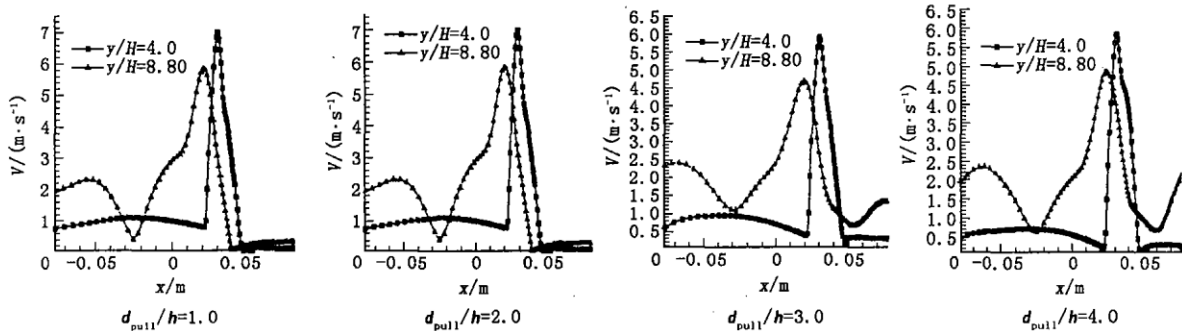


图 1 不同 d_{pull} 下的主流方向速度沿横向分布图

从图 1 及表 1 可以看出, 当 $d_{\text{pull}}/h = 3.0$ 时, 主射流的偏转程度最大, 在 $y/H = 8.0$ 处约为 16 mm 。当 $d_{\text{pull}}/h = 1.0$ 时偏转程度最小, 在 $y/H = 8.0$ 处约为 12 mm 。 $d_{\text{pull}}/h = 4.0$ 时的偏转程度比 $d_{\text{pull}}/h = 3.0$ 的小, 但仍稍大于 $d_{\text{pull}}/h = 2.0$ 的情况。数值模拟结果显示

当 $d_{\text{pull}}/h > 5.0$ 时, 主射流几乎不受作动器的影响。这是因为当作动器与主射流之间的距离过大, 微射流形成的低压回流区距主射流较远, 无法影响到主射流。类似地, 当作动器与主射流之间的距离过小时, 因空间太小不足以形成低压回流区, 同样不能有效地影响主射流。即微射流的旋涡对需要一个合适的空间才能发展到最强, 并和主射流相互作用最终形成低压回流区。此处需要说明的是, 本文为了计算简便起见所取的 d_{pull} 均为作动器出口宽度的整数倍。故只能确定作动器的最佳位置在 $d_{\text{pull}}/h = 3.0 \sim d_{\text{pull}}/h = 4.0$ 之间。文献[2]的实验装置中 $d_{\text{pull}} = 3.556 h$ 。

3.2 θ 对主射流偏转的影响

图 2 为不同入射角下合成流场主流方向速度沿横向分布图, 反映了不同 θ 值对主射流偏转程度的影响。其中, 除了 θ 值, 其它基准参数不变。在数值模拟中发现, 微射流入射角度变化对主射流偏转程度有较大的影响。本文对 $\theta = -60^\circ, -20^\circ, 20^\circ, 60^\circ$ 等几种情形进行了数值模拟。表 2 给出了不同 θ 下沿流向不同位置横向速度分布的速度峰值点与主射流中心线之间的水平距离, 量化地表示了不同 θ 下主射流的偏转程度。

表 1 不同 d_{pull} 下速度峰值点与主射流中心线之间的距离 mm

y/H	$d_{\text{pull}}/h = 1$	$d_{\text{pull}}/h = 2$	$d_{\text{pull}}/h = 3$	$d_{\text{pull}}/h = 4$
4.0	10	11	12	11
8.0	12	13	16	14

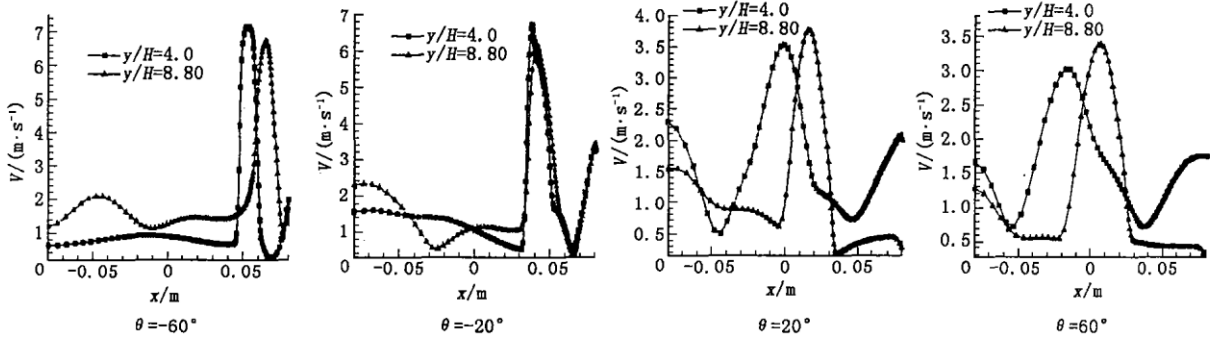


图 2 不同入射角下主流方向速度沿横向分布图

表 2 不同入射角下速度峰值点与主射流中心线之间的距离 mm

y/H	$\theta = -60^\circ$	$\theta = -20^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 60^\circ$
4.0	-12	-3	12	26	35
8.0	-24	-4	16	42	59

从图 2 及表 2 可以看出,当入射角 $\theta < 0^\circ$ 时,主射流发生偏转且背离微作动器,入射角 θ 的绝对值愈大,偏转的程度愈剧烈。这可以看作是“推”模型的一种情形;当入射角 $\theta > 0^\circ$ 时,主射流向有微作动器的一方偏转,入射角 θ 值愈大,偏转的程度愈剧烈。数值模拟中发现,入射角 θ 值增大,微射流与主射流之间的低压回流区增大,且回流区内的压强系数降低,导致主射流进一步发生偏转。数值模拟结果说明微射流入射角度的变化对主射流的偏转程度有较大的影响,在不改变其它参数的情况下,只调整微射流的入射角度即可有效地控制主射流的流动方向。

图 3 为微射流排出行程的动量成分示意图。 M 表示微射流的动量, M_y 为 M 在流向的分量, M_x 为 M 在横向的分量。从图中可以看出,动量 M_y 在排出行程中对主射流的偏转起抑制作用。当 $\theta = 0$ 时, $M_y = M$, 微射流的动量全部用来阻止主射流的偏转。微射流动量阻止及低压回流区吸引的共同作用导致主射流以一确定的角度偏转。这一点也解释了主射流的偏转角度不总是随着微射流速度幅值的增加而增加的现象。虽然高的速度幅值能够导致回流区内的压强更低而诱使主射流偏转更大的角度,但是,同时对主射流的偏转也产生了更大的抑制作用。

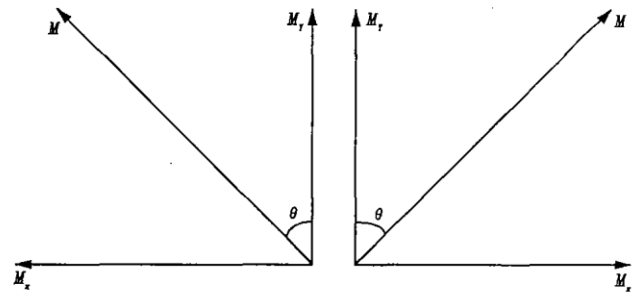


图 3 微射流排出行程的动量成分示意图

当 $\theta > 0^\circ$ 时,随着 θ 的增大, $M_x = M \sin \theta$ 增大,而 $M_y = M \cos \theta$ 减小,即不但阻止主射流偏转的动量分量 M_y 减小了,而且 M_x 对主射流有一个诱使偏转速度。因此,随着 θ 的增大,主射流的偏转角度亦迅速增大。若微射流有足够大的速度幅值及入射角度,主流即可以有较大的偏转角度,甚至于可以直抵底部壁面。

当 $\theta < 0$ 时,因为动量 M 的方向朝向主射流,故其流向分量 $M_y = M \cos \theta$ 和横向分量 $M_x = M \sin \theta$ 对主射流的偏转均起阻止作用。随着入射角 θ 绝对值增大,微射流和主射流之间的低压回流区逐渐变小直至消失,而排出行程的阻止作用逐渐增强,结果导致主射流偏向背离微作动器的一方。如当 $\theta = -60^\circ$ 时,主射流显著偏向右边。

3.3 f 对主射流偏转的影响

图 4 为不同频率 f 下流场的主流方向速度沿横向速度分布图。其中,除了 f 值和入射角 $\theta = 60^\circ$ 外,其它基准参数不变。本文对 $f = 500, 750, 900, 1\ 000, 1\ 100, 1\ 250, 1\ 500$ Hz 等几种情形进行了数值模拟。

表 3 给出了不同 f 值下沿流向不同位置横向速度分布的速度峰值点与主射流中心线之间的水平距离,量化地表示了不同 f 下主射流的偏转程度。从图 2、4 及表 3 可以看出,当频率 $500\text{ Hz} \leq f \leq 1\ 000\text{ Hz}$ 时,主射流的偏转程度逐渐增大(在 $y/H = 8.0$ 处,从 19 mm 增加到 59 mm);当频率 $1\ 000\text{ Hz} \leq f \leq 1\ 500\text{ Hz}$ 时,主射流的偏转程度逐渐减小(在 $y/H = 8.0$ 处,从 59 mm 减小至 14 mm)。当频率 $900\text{ Hz} \leq f \leq 1\ 100\text{ Hz}$ 时,位于微射流和主射流之间的低压回流区内压强较低,主射流偏转的程度较大;而当 f 的取值偏离最佳值范围时,回流区内的压强则相对较高,主射流的偏转程度较小且对频率的变化不再敏感。如 $f = 500, 750$ 或 $1\ 250, 1\ 500$

Hz 时,在 $y/H=8.0$ 处速度峰值点与主射流中心线之间的水平距离分别约为 19、20、21、14 mm。这说明存在一个介于 1 000 Hz 至 1 100 Hz 之间的最佳频率,使得主射流的偏转程度最大。

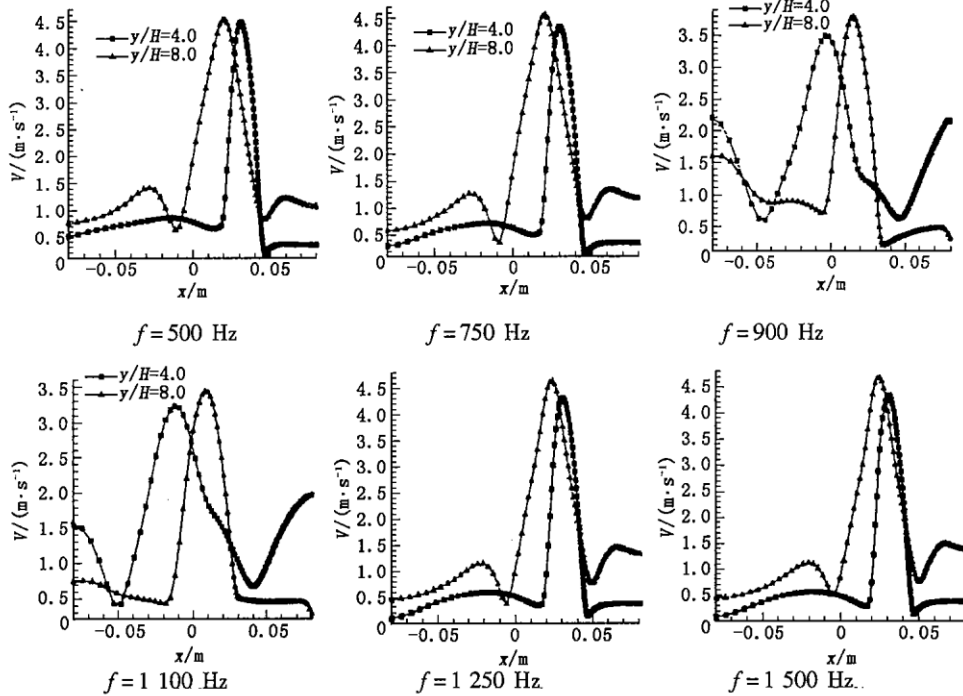


图 4 不同频率下主流方向速度沿横向分布图

表 3 不同频率下速度峰值点与主射流中心线之间的距离

y/H	$f=500$ Hz	$f=750$ Hz	$f=900$ Hz	$f=1\ 000$ Hz	$f=1\ 100$ Hz	$f=1\ 250$ Hz	$f=1\ 500$ Hz
4.0	9	11	26	35	31	11	8
8.0	19	20	43	59	51	21	14

3.4 v'_{max} 对主射流偏转的影响

图 5 为不同无量纲速度幅值 v'_{max} 下流场的主流方向速度沿横向速度分布图,反映了微射流不同的速度幅值对主射流偏转程度的影响。其中, v'_{max} 表示计算时微射流的速度幅值与实验中微射流速度幅值的比值,入射角 $\theta=60^\circ$,其它基准参数不变。本文对 $v'_{max}=0.50、0.80、1.50、2.00$ 等几种情形进行了数值模拟。

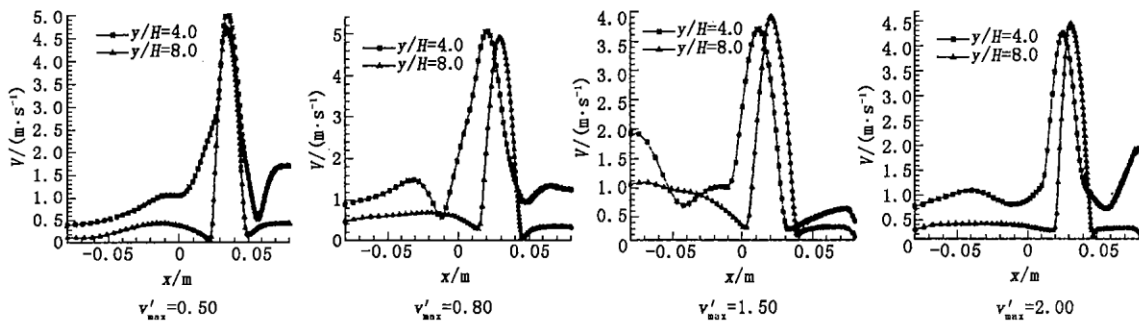


图 5 不同无量纲速度幅值下主流方向速度沿横向分布图

表 4 给出了不同 v'_{max} 值下沿流向不同位置横向速度分布的速度峰值点与主射流中心线之间的水平距离,量化地表示了不同 v'_{max} 下主射流的偏转程度。从图 5 表 4 可以看出,当 $0.50 \leq v'_{max} \leq 1.00$ 时,主射流的偏转程度逐渐增大(在 $y/H=8.0$ 处,从 6 mm 增加到 59 mm);当 $1.00 \leq v'_{max} \leq 2.00$ 时,主射流的偏转程度逐渐减小(在 $y/H=8.0$ 处,从 59 mm 减小至 16 mm)。数值模拟结果说明微射流速度幅值的变化对主射流的偏转程度有一定的影响。当速度幅值在实验值($v_{max}=38.73$ m/s)附近较小区域内取值时,主射流的偏转程度较大。数值模拟中还发现,微射流的速度幅值愈大,在微射流和主射流之间所形成低压回流区内的压强愈低,但在其排出行程中动量对主射流偏转的阻滞作用亦愈强。所以当微射流的速度幅值超过实验值并继续增加时,主射流的偏转程度非但没有增加反而减小。

表4 不同无因次速度幅值下的速度峰值点与主射流中心线之间的距离 mm

y/H	$v'_{max} = 0.50$	$v'_{max} = 0.80$	$v'_{max} = 1.00$	$v'_{max} = 1.50$	$v'_{max} = 2.00$
4.0	6	11	35	16	8
8.0	6	21	59	29	16

4 结论

本文对微射流的参数影响主流的偏转程度进行了数值模拟。计算结果显示了微射流参数的变化对主流的偏转有着不同程度的影响。其中,入射角的影响最为显著。在入射角为负值(即微射流流向主流方向),主流被“推”向另一侧,成功模拟了文献[2]中关于微射流对主流“推”的现象。微射流的参数在一定的范围内对主流偏转程度影响非常显著,而超出此范围,其影响将大为减小。

参考文献:

- [1] Mcmicawl J M. Progress and Prospects for Active Flow Control Using Microfabricated Electro - Mechanical System (MEMS) [R]. AIAA 96 - 0306, 1996.
- [2] Smith B L, Trautman M A, Glezer M. Controlled Interactions of Adjacent Synthetic Jets. [R]. AIAA 99 - 0699, 1999.
- [3] Rizzetta D P, Visbal M R, Stanek M J. Numerical investigation of Synthetic Jet Flowfields. [R]. AIAA 98 - 2910, 1998.
- [4] 高峰, 张志峰, 汪亮. 微射流作动器外流场紊流数值模拟 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 12 - 14.
- [5] 高峰, 汪亮. 单微射流作动器定向控制主流数值模拟 [J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(5): 528 - 531.
- [6] 高峰. 流动矢量主动控制的微射流技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

(编辑: 田新华)

Parameters Analysis of Vectoring the Primary Flows Using Single Micro - jet Actuator

GAO Feng¹, WANG Liang², ZHANG Zhi - Feng¹

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The full N - S equations are solved using Beam - Warming approximate factorization method for the synthetic flow field of Vectoring of a primary jet with micro - jet. The synthetic flow field is compressible, two dimensional, time - dependent, as well as viscous. The numerical simulation result shows the primary jet can be vectored and leaned to the micro - jet actuator as “pull” mode. The parameters of micro - jet effecting on the vectoring angle the primary, the distance from the micro - jet actuator to the primary, an angle of incidence, frequency, velocity and altitude are analyzed. The effect of an angle of incidence is larger than that of others. When an angle of incidence is minus, the primary jet is pushed to the other side. When the parameters are beyond the region, the vectored angle of the primary is smaller.

Key words: WTsingle micro - jet; vectoring control; numerical simulation; parameter analysis