

微射流流场原理性实验研究

高峰, 何高让, 汪亮

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要:用蜂鸣器代替微作动器在水中微射流的形成及发展进行了定性实验。高速摄像系统显示了微射流的形成及发展。实验结果表明对于结构确定的蜂鸣器,存在唯一的最佳工作频率,使得射流能量水平最高。蜂鸣器驱动信号波形对射流效果也有影响。速度变化因子越大的波形,生成的旋涡能量越高,射流速度越大。

关键词:微射流;蜂鸣器;旋涡

中图分类号:V245.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)03-0008-04

近十多年来,微机电系统 MEMS(Microfabricated Electro-Mechanical System)的研究方兴未艾^[1],潜在的应用价值难以估量。基于 MEMS、混沌论及非线性复杂大系统不稳定性理论,诞生了一种流场主动控制的全新技术——微射流技术。该技术例如可用于流动方向控制。由于工作时喷射的工质全部来源于环境流体,控制系统简单、轻便,且消耗极少的电能,其优越性是传统的控制方法所无法比拟的。此外,微射流技术还可用于增强混合、控制换热、减小阻力、飞行控制和内部流动匹配等。目前,国外对微射流的理论分析及实验研究工作进展很快,仍以流动方向控制为例,Ari Glezer 等人实验的研究表明,用 0.5 mm 宽的微射流可使 12 mm 宽的主流产生 30° 偏转;而且使用阵列微射流作动器,主流偏转角度会更大^[2]。而在国内微射流技术的理论及实验研究才起步^[3]。微射流技术的关键在于微作动器。国外采用微电子机械制造技术,在硅基材料上已开发成功单微射流、阵列微射流作动器。本文的实验工作受加工条件的制约,由蜂鸣器来替代微作动器,且工作环境为水。

1 实验设备

产生微射流的蜂鸣器由压电陶瓷发声元件、圆形声谐振腔和驱动电路组成。之所以选用蜂鸣器代替微作动器进行微射流原理性实验,主要是因为两者的结构组成及工作原理大体相同。本实验采用外加频率信号(矩形波或余弦波)来激励蜂鸣器工作,属电压驱动型。

实验用蜂鸣器属标准化产品,其型号为 KPR-4411。振动薄膜为黄铜,薄膜中心贴有 PZT 压电陶瓷。为模拟微射流作动器的效果,对原蜂鸣器进行了结构改动。即将其开孔壁面取掉,重新用一带有小孔的薄金属膜片封闭腔体。考虑到蜂鸣器在水环境中工作,小孔直径适当加大,而腔体开孔壁面的厚度大于腔体振动薄膜的厚度,以免在振动薄膜工作时,开孔壁面产生不可忽略的变形。

实验在水环境中进行,玻璃水箱尺寸为 90 cm(长)×20 cm(宽)×30 cm(高)。为便于实验现象的观察,实验前在蜂鸣器腔体中滴入少量墨水,并整个潜入水中,蜂鸣器水平放置,可从水箱四周及上方观察实验现象。实验中,蜂鸣器工作所需的交流电压信号由计算机产生,该软件可产生正弦波和矩形波等多种电压波形。信号频率可在 1~10kHz 范围内变化,电压幅值可在 1~10V 范围内调节。为使实验现象更清晰,计算机输出的信号经由 CA-60C 功率放大器进行功率放大。放大后的信号输入蜂鸣器的压电陶瓷片上。用 CF-355 快速付里叶变换(FFT)分析仪监控经过功率放大的信号是否失真及信号放大后的实际电压值。实验现象用高速摄像系统在蜂鸣器出口的正上方进行拍摄记录。当实验准备工作就绪后,输入电压信号,蜂鸣器

收稿日期:2001-10-15

基金项目:西北工业大学博士创新基金(5211102-0800-6114101)

作者简介:高峰(1965-),男,安徽凤阳人,讲师,博士生,主要从事流场计算与测量研究。

潜入水中,高速摄像开拍。实验测试系统如图1所示。

2 实验结果及分析

2.1 射流进入“准稳定”状态时的流动特征

和微作动器相仿,蜂鸣器薄膜在交流电压驱动下周期性地产生振动。若薄膜振动压缩腔体内的流体,水会经由腔体开孔排向环境,形成射流。而当薄膜振动方向相反时,环境水又会经由开孔被吸入腔体。吸入过程并不影响已经离开出口壁面一段距离的射流。这样射流在蜂鸣器开口处就具有零净质量流率的特点。它排出的流体全部来源于对环境流体的卷吸。由于形成的宏观射流流动具有一定的速度大小,因而动量不为零。

以某次实验为例,蜂鸣器工作频率 36 Hz、高速摄像采样频率 500 Hz,当高速摄像系统启动后蜂鸣器开始工作,随即就有射流经由腔体开孔排出。实验发现,随着时间的推移射流长度逐渐伸长。经过一短暂的时间间隔后,形成图2所示的“准稳定”流场结构。这里“准稳定”是指射流轴向距离不再增长,影响区域相对稳定。在“准稳定”状态下,从作动器出口至射流前端的轴向长度为射流喷射距离。射流流场的发展始终是非定常过程,从蜂鸣器出口壁面开始,射流先是层流,最后发展成紊流,每种流动的长度保持不变。层流长度范围取决于腔体出口峰值速度的大小(最终决定于蜂鸣器工作频率、信号电压及信号波形)。峰值速度越大,射流喷射距离越远,层流范围越长;反之亦然。在此实验中,层流段约为 34 mm,紊流区域约为 20 mm。在层流段,射流宽度随距出口壁面的距离增加而增加,全程具有自相似特征(即不管出口速度如何变化,射流的长度和宽度之比为一定值)。进入紊流段后,射流速度很快降低,且不再保持向前运动,而是在各个方向上脉动,从而迅速与环境水流融合,直至射流特征完全消失。

2.2 射流的发展过程及旋涡流动特点

对于圆形腔体开孔,蜂鸣器工作时在出口锐缘产生涡环。本实验由于在水环境中进行,染色液浓度不易掌握,高速摄像系统的分辨率还不足以捕获旋涡运动。加之单个旋涡的涡核直径很小,因而宏观上表现为一团流动工质。还有,虽然实验中腔体出口附近,尤其是吸入过程的流动形态的细节不甚清楚,但从染色液扩散情况看,排出过程,流体是沿流场中心线运动。吸入时流体则主要沿蜂鸣器腔体出口附近的壁面运动。

蜂鸣器工作后,水流周期性地经由出口锐缘进入与排出腔体。由于流体受到锐缘周期性的剪切作用,因而产生涡量并卷起形成旋涡,旋涡一经形成,就以一定的速度向下游迁移,产生射流。换言之,和微作动器相仿,这种射流是由蜂鸣器工作过程中周期性产生的离散旋涡对的运动形成的。图3为某次实验中射流流场在16个不同时刻下的演化过程。蜂鸣器的工作频率为 36 Hz,高速摄像采样频率为 1 000 帧/s。由于腔体的有限尺寸及流体的惯性,蜂鸣器工作到 327 ms,初始旋涡对产生,并很快从出口锐缘分离而排出(图3a)。随着旋涡的迁移,涡核直径逐渐增大。图3c中,前一旋涡对运动的同时,后一个旋涡对接着产生。直到图3e,流场中可清楚地观察到两列前后分离的旋涡。从图3f开始一直到图3i,又有旋涡从腔体出口锐缘脱落进入流场。这个进入过程很短暂,从图像颜色的深浅就可看出。运动快,颜色淡;运动慢则颜色深。旋涡产生后在迁移运动过程中很不稳定,对扰动很敏感,其相干性仅保持很短距离。随着旋涡能量发生耗散,相干性消失。从图3j到图3n,在新旋涡周期性进入流场的同时,射流的长度及宽度都在增加,基本表现出常规持续射流的流动特征。射流最前端颜色区域变得更深。不过此时,此区域已不再具有由蜂鸣器薄膜振动所产生的流动速度。从图3o到图3p,射流长度不再增长。但因射流前端的流体布朗运动更加明显,流动不但向

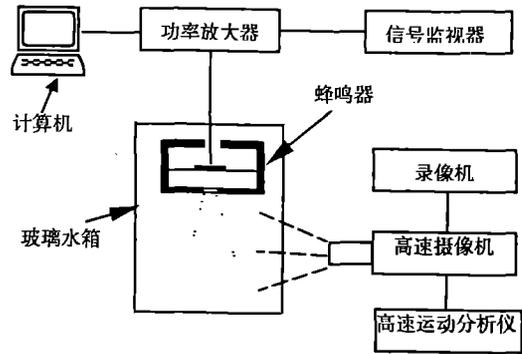


图1 实验测试系统简图

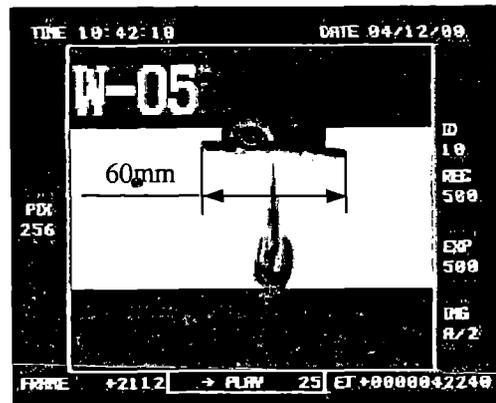


图2 射流流场染色显示图

两边扩散,而且还折转方向,向后扩散。此后射流就逐渐进入准稳定状态。总之,周期性的旋涡对运动产生周期性的层流到紊流的转换,形成微射流。事实上,这里各幅图像的拍摄间隔很短,肉眼观察不出射流的间断性。

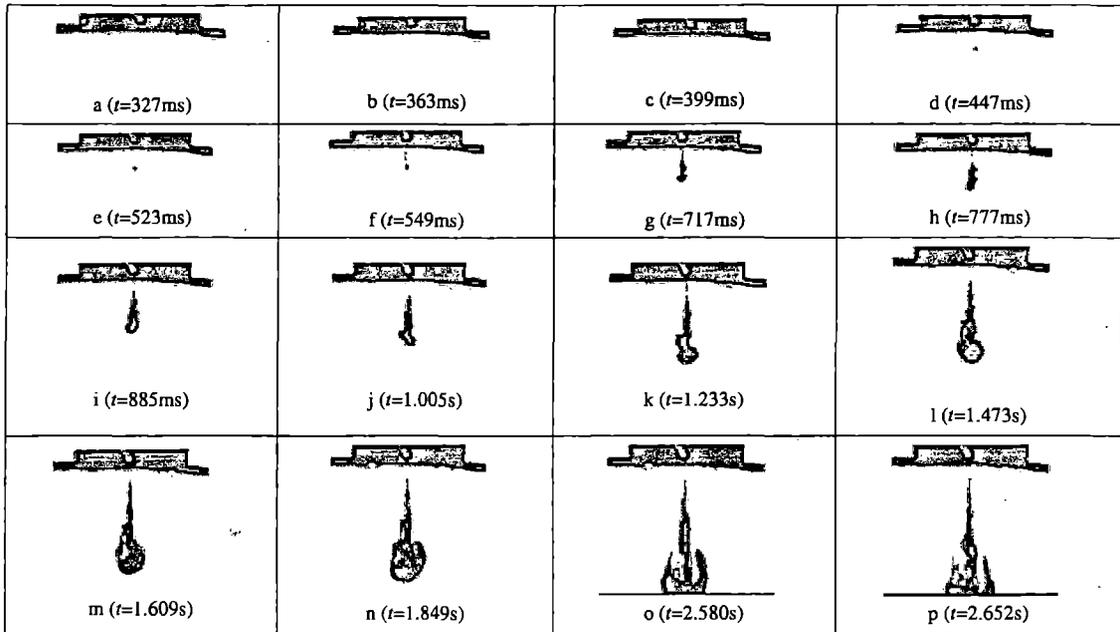


图3 射流流场随时间的发展过程

2.3 蜂鸣器工作频率对射流的影响

鉴于射流峰值速度越大,喷射距离越远。因而在速度不便测量的情况下,可通过射流喷射距离的测量来研究频率对射流强度的影响。实验中信号波形为正弦波,电压为10V。为使测量结果具有可比性,统一以蜂鸣器工作10s后的流场为准。结果见表1。

表1 不同频率f下,射流作用距离S

f/Hz	10	13	15	18	20	23	25	27
S/mm	5	10	18	25	19	12	5	3

可以看出,在蜂鸣器工作频率从10Hz到27Hz的变化范围内,当频率为18Hz时,喷射距离最远。此外,至少对水(不可压)工作环境而言,蜂鸣器腔体对谐振频率影响很大。腔体空间越小,其谐振频率越高。同时,对于小空间腔体,蜂鸣器可工作的频率范围很窄。超出此范围,不管是减小还是增加频率,经由腔体出口圆孔均不会产生射流。

于是,射流产生的一个最关键参数是微作动器或蜂鸣器的工作频率。对于特定的结构设计,存在唯一的谐振频率。在此频率下,谐振腔产生的射流速度最大,喷射距离最远。

2.4 电压信号波形对射流的影响

前述实验中,蜂鸣器输入交流电压的波形为正弦波。为研究不同波形对射流的影响,还分别采用了方波、三角波和锯齿波三种波形。根据测量结果,方波交流电压信号作用于蜂鸣器产生的射流喷射距离最远,其它三种波形依次为正弦波、锯齿波和三角波形信号。对于相同的蜂鸣器结构尺寸、工作频率、电压幅值和工作时间,在不同的信号波形作用下,振幅——时间积分不同,供入能量不同,其形成的射流喷射距离不等。速度变化因子 λ 反映作动器出口速度在工作周期内随时间的变化程度^[4]。这里, $\lambda = \overline{U_0^2} / U_0^2$,其中, $\overline{U_0^2} = \int_0^T u^2(t) dt / T$, $U_0^2 = (\int_0^T u(t) dt)^2 / T$ 。在其它条件相同的情况下, λ 值越大,微射流的初始环量越大,射流旋涡对的迁移速度就越大。因方波产生的速度变化因子最大(速度有突变),旋涡对形成及脱落的频率高,由此形成的射流喷射距离就最远。需要说明的是,上述结果是在信号功率未经放大的情况下得到的。如果对这几种电压波形的输出功率进行放大,则彼此的差别不明显。

对于合成微射流流场的实验研究,也在水中进行了原理性探索。为此对蜂鸣器的结构再次进行了改进。在蜂鸣器腔体开孔旁添置了主流孔(主流孔径较大,两倍于射流孔径)。主流工质也为水,其速度远高于腔体射流速度,也即动量水平远高于微射流。实验中仅有一次明显看到主流因微射流的存在而偏转的趋势,但

重复性很差。究其原因可能在于实验环境的差别。有关微射流合成实验国外均以空气为介质。而本原理性实验中,水介质密度比起空气介质要大千倍,故空气中的合成效果难于在水中再现。

3 结论

1) 实验结果表明,用蜂鸣器代替微作动器在水中微射流的形成及发展进行原理性实验是可行的。和数值模拟的趋势是一致的。

2) 高速摄像显示了旋涡对在蜂鸣器出口锐缘的产生、脱落、迁移及耗散过程,在出口附近,旋涡运动速度很快。离开出口,旋涡相干性很快消失,射流运动速度锐减,并转化为紊流脉动。

3) 对于结构确定的蜂鸣器,存在唯一的最佳工作频率,使得射流能量水平最高。蜂鸣器驱动信号波形对射流效果也有影响。速度变化因子越大的波形,生成的旋涡能量越高,射流速度越大。与空气介质相比,水环境中微作动器的最佳工作频率要小,而且工作频率范围很窄。

4) 如采用微作动器并在气体环境中进行合成微射流流场的实验研究,则可再现主流因微射流的存在而偏转的现象。

参考文献:

- [1] McMichael J M. Progress and prospects for active flow control using Microfabricated Electro - Mechanical Systems (MEMS) [R]. AIAA 96 - 0306.
- [2] Smith B L, Glezer A. Jet vectoring using synthetic jet actuators[R]. AIAA 97 - 0213.
- [3] Smith B L, Trautman M A, Glezer A. Controlled interaction of adjacent synthetic jets[R]. AIAA 99 - 0669.
- [4] 何高让. 用于流动矢量控制的微射流研究[D]. 西安:西北工业大学博士论文,2000.

(编辑:田新华)

Principle Experiments on Microjet Flowfield

GAO Feng, HE Gao - rang, WANG Liang

(Coll. Of Astronautics, Northwestern Polytechnic Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: As a substitute for microjet actuator, a buzzer is used to form microjet under water environment. The result is visualized by a high - speed camera which demonstrates the form and development of microjet. And its energy level is analyzed under a series of working conditions of the buzzer. The result shows that corresponding to the optimum working frequency, the energy of microjet can attain the highest level. The effect of microjet is also affected by the buzzer's driving signal waveform. The larger the factor of waveform's velocity change is, the higher the vortex energy is, and the faster the microjet velocity is.

Key Words: microjet; buzzer; vortex