

文章编号: 1000-4750(2016)01-0209-08

# 压电风扇非定常流场速度分布的数值研究

孔 岳, 李 敏, 吴蒙蒙

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 压电风扇利用压电材料的压电特性, 将压电材料制成作动器激励薄片振动进而带动周围空气流动, 可作为电子设备的散热装置。使用 Fluent 商用软件, 利用动网格技术模拟压电风扇产生的非定常流场。研究振动薄片的振动频率、压电风扇长度(流场长度)以及振动薄片长度与压电风扇长度的比值等参数对压电风扇出口风速的影响。研究表明: 增大振动薄片的振动频率、增大压电风扇长度以及在一定范围内增大振动薄片长度与压电风扇长度的比值均能提高出口风速。振动频率与出口风速成线性关系。随着压电风扇长度的增大, 出口风速提高得越来越慢。存在一个临界值, 当振动薄片长度与压电风扇长度的比值大于该临界值时, 出口风速随着比值的增大而下降。

**关键词:** 压电风扇; 风速; 数值模拟; 动网格; 参数影响; 漩涡

**中图分类号:** O354      **文献标志码:** A      **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.0442

## NUMERICAL INVESTIGATION ON THE VELOCITY OF UNSTEADY FLOW FIELD INDUCED BY PIEZOELECTRIC FAN

KONG Yue, LI Min, WU Meng-meng

(School of Aeronautical Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Piezoelectric fans make use of the property of the piezoelectric material. The material functions as an actuator to move the plate so as to make the air around it flow. It can be an active cooling technique for electronics. The software Fluent was used with the moving-grid technique to simulate unsteady flow. The frequency of the vibrating plate, length of the piezoelectric fan (flow field's length) and the ratio of vibrating plate's length to the piezoelectric fan's are investigated to study their influence on the wind velocity at the outlet of piezoelectric fans. The results are as follows: increasing the vibrating plate's frequency, the piezoelectric fan's length, or the ratio of vibrating plate's length to piezoelectric fan's in a certain range can improve the wind velocity at the outlet. There is a linear relationship between frequency and wind velocity at the outlet. The wind velocity at the outlet improves more and more slowly with the increase of piezoelectric fan's length. There is a critical value beyond which further increase in the ratio of vibrating plate's length to the piezoelectric fan's decreases the wind velocity at the outlet.

**Key words:** piezoelectric fan; wind velocity; numerical simulation; moving-grid; influence of parameters; vortex

随着微电子技术的发展, 各种电子设备的性能飞速提高。与此同时, 各类电子设备的能耗和发热量也大幅度提高。过多的热量积聚在电子设备上,

轻则影响其正常工作, 重则使其失效。因此, 使用高效的散热装置十分必要。传统的散热装置多为旋转式散热风扇。为满足需求, 旋转式风扇多通过提

收稿日期: 2014-05-27; 修改日期: 2014-07-07

通讯作者: 李 敏(1968—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 从事压电驱动与控制、气动弹性力学、结构动力学等研究(E-mail: limin@buaa.edu.cn).

作者简介: 孔 岳(1992—), 男, 山东人, 硕士生, 从事压电驱动器的结构优化设计、结构动力学等方面研究(E-mail: kongyuefirefly@163.com);

吴蒙蒙(1991—), 女, 河北人, 硕士生, 从事气动弹性力学、结构动力学等方面研究(E-mail: mengmengwu1017@163.com).

高扇叶的转速和增大扇叶面积来达到更好的散热效果。然而,随着转速和扇叶面积的提高,旋转式风扇的噪声也随之增大。当前使用的许多旋转式风扇,当在较高的转速下运行时,其产生的噪声已经能对周围环境产生较为明显的影响。作为可能的替代方案,压电风扇也可以作为散热装置使用。压电风扇主要由振动薄片和压电材料组成。由于压电材料具有逆压电效应,当在其上施加交流电压时,压电材料会产生周期性的伸长和缩短。这种机械运动作为一种激励,引起振动薄片的振动。振动薄片的周期性振动引起周围空气的流动从而产生了散热效果。压电风扇多工作在振动薄片的低阶固有振动频率,因而其工作时所产生的噪声非常小。另外,压电风扇还具有寿命长、功耗低、占用体积小等优点。相对于传统旋转式风扇具有明显的优势。

许多学者就压电风扇流场的流动特性以及对流换热特性开展了许多研究工作。Kim 等<sup>[1]</sup>使用粒子图像测速仪(PIV)研究了长 38 mm,宽 31 mm 的悬臂板,在压电材料激励下以一阶固有频率振动时所产生的流场。同时在理论上推导预测了流场中漩涡的特性,并将其与实验结果进行对比。Kimber 等<sup>[2]</sup>通过实验,使用聚酯和钢两种材料制作振动薄片。对比两种材料制成的振动薄片以不同的振幅振动产生流场的压强和流量,并将测量结果与普通的旋转式风扇对比。又改变实验装置中围壳的尺寸,研究围壳的尺寸对流场的影响。最终得出了压电风扇与普通旋转式风扇的效率对比结果以及压电风扇尺寸参数对流场的影响。对压电风扇的尺寸设计提供了指导。Kimber 等<sup>[3]</sup>还通过实验,使用红外线相机观察受热箔片在振动薄片作用下的成像结果,研究了振动薄片振幅以及薄片尖端与箔片的距离对散热效果的影响。Yoo 等<sup>[4]</sup>通过实验研究振动薄片的材料和尺寸对压电风扇散热效果的影响。实验中,将由不同材料制成的不同尺寸的振动薄片与压电材料结合在一起,固定压电材料上所加电压的频率和幅值,使用风速表测量振动薄片振动所产生的流场的风速。给出了振动薄片的最优制作材料和最优尺寸并得出了振动薄片振幅与风速的关系。Acikalin 等<sup>[5]</sup>将制作的压电风扇原型装入笔记本电脑中,通过测量温度,验证了压电风扇的散热效果。Acikalin 等<sup>[6]</sup>还同时使用理论计算和实验分析了震动薄片引起的二维流场。Ihara 和 Watanabe<sup>[7]</sup>用实验研究了双振动薄片压电风扇产生的流场,并把实验

结果与单振动薄片的实验结果对比,得到了振动薄片数量与体积流量的关系。Schmidt<sup>[8]</sup>研究了双振动薄片构成的压电风扇的质量传导特性。Wait<sup>[9]</sup>研究了以高阶振动模态运行的压电风扇的特性。另外,Lin<sup>[10-11]</sup>、Gilson 等<sup>[12]</sup>、Li 等<sup>[13]</sup>也通过多种形式的实验,从不同的角度对压电风扇的散热效果和流场分布进行了深入的研究。另外,Burmann 等<sup>[14]</sup>、Basak 等<sup>[15]</sup>研究了压电风扇装置的结构动力学特性。与此同时,贾丽杰等<sup>[16]</sup>、朱熹育等<sup>[17]</sup>、吕诗良等<sup>[18]</sup>就压电材料作为驱动器等方面的问题进行了多种形式的研究。

压电风扇产生的流场非常复杂,目前对该种流场的许多问题诸如漩涡发展、速度分布以及散热特性等的研究还很不完善。与此同时,压电风扇的多项尺寸参数对压电风扇换气效果具有很大的影响,然而该方面的研究也很不充分。本文采用 Fluent 商用软件,编写用户自定义函数(UDF),将函数嵌入到 Fluent 软件中,以达到控制流场边界运动变形的目的。使用该项技术并结合振动理论中梁板的振动理论可以模拟压电风扇中振动薄片的运动过程,进而计算并测量出流场中的各种参数分布。通过分析计算结果,探究振动薄片的振动频率、压电风扇长度(流场长度)以及振动薄片长度与压电风扇长度的比值对压电风扇出口风速的影响规律。

## 1 计算模型和振型选择

### 1.1 压电风扇模型

压电风扇主要由振动薄片和压电材料组成。压电材料作为驱动器处于振动薄片的根部并与振动薄片表面贴合。压电风扇简化结构的剖面图如图 1 所示。



图 1 压电风扇结构剖面图

Fig.1 Cross section of a piezoelectric fan

图中黑色部分为压电风扇外壳及支撑结构,深灰色部分为压电材料,中间浅灰色部分为振动薄片,振动薄片插入到风扇支撑结构中,因此计算中为振动薄片固定端选取夹支边界条件。当施加上交电压后,压电材料会产生周期性的伸长和缩短,

进而激励振动薄片振动。振动薄片振动形式如图 2 所示。

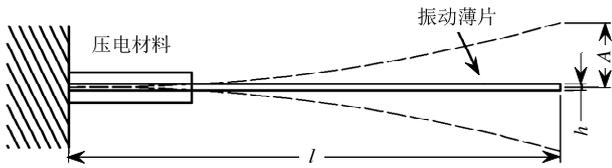


图 2 振动薄片示意图

Fig.2 Schematic of vibrating plate

振动薄片为图示长度为  $l$  的部分，虚线为振动薄片最大振幅位置。 $A$  为振动薄片自由端的振幅， $h$  为振动薄片的厚度。

为探究参数对风速的影响规律并进一步简化计算分析过程，将压电风扇简化为如图 3 所示的二维计算模型。上壁面和下壁面两条边为流场上下边界。 $H$  为流场高度。入口和出口分别为流场气流的入口和出口边界。整个流场的气流流动方向如箭头所示。振动薄片处于流场  $Y$  方向的中间位置。流场长度为  $L$ ，振动薄片长度为  $l$ ，振动薄片的振动频率为  $f$ ，这 3 个参数是本文中要研究的内容，通过改变一个参数而固定其它的参数研究各参数对压电风扇出口风速的影响。

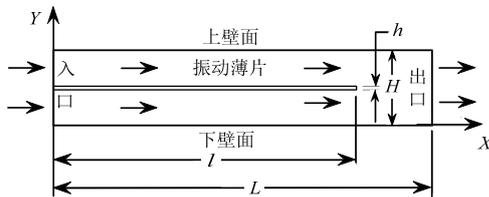


图 3 计算域示意图

Fig.3 Schematic of computational region

在 Fluent 商用软件计算中使用的计算模型以及网格划分情况如图 4 所示。

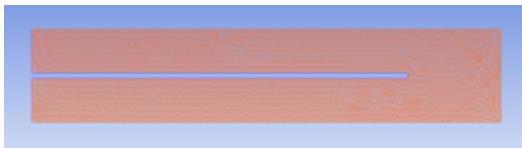


图 4 Fluent 中使用的网格示意图

Fig.4 Schematic of grid used in Fluent

### 1.2 振动薄片振型

实际中，压电材料对振动薄片的激振频率应该等于振动薄片的固有频率。因此，将振动薄片的振型函数设定为其固有振型。考虑到在实际中，可以通过改变振动薄片的尺寸参数来改变其固有频率。因而假定，下面计算中所使用的振动频率即为振动薄片的固有频率。

为振动薄片上下表面和右端面分别定义用户自定义函数(UDF)，使振动薄片按照一定的振型函数振动。设压电风扇入口最下端(模型左下角点)为坐标原点，长度方向为  $X$  方向，高度方向为  $Y$  方向。根据已有的实验结论，可知当施加正弦激励时，压电风扇振动薄片上各点在  $Y$  方向上，以正弦规律运动<sup>[19]</sup>。因此，可以设振动薄片的运动规律为下式的形式<sup>[20]</sup>。

$$y = \frac{A}{2} Y(x) \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

其中： $x$  为振动薄片上各点的横坐标； $y$  为各点的纵坐标； $f$  为振动频率； $Y(x)$  为阵形函数； $A$  为振动薄片右端点的振幅。假定激振频率是振动薄片的固有频率，振动薄片的振型取振动薄片的固有振型。振动薄片简化为二维模型后对应悬臂梁模型。

根据振动理论<sup>[21]</sup>，悬臂梁的固有振型为：

$$Y_n(x) = \cosh(s_n x) - \cos(s_n x) - \frac{\sinh(s_n l) - \sin(s_n l)}{\cosh(s_n l) + \cos(s_n l)} (\sinh(s_n x) - \sin(s_n x)) \quad (2)$$

其中： $s_n$  为频率方程式(3)的解； $l$  为梁的长度。

$$\cos s_n l \cosh s_n l = -1 \quad (1)$$

式(3)的解为：

$$s_n l = 1.8751, 4.6941, 7.8548, 10.9955, 14.1372, \dots$$

高阶振型对应的振动频率较高，在此情况下，压电风扇产生的噪声较大。综合考虑能耗和速度衰减<sup>[20]</sup>，并且考虑到振动频率对噪声的影响，选择一阶固有振型作为计算振型。振型函数为：

$$Y_1(x) = \cosh\left(\frac{1.8751}{l} x\right) - \cos\left(\frac{1.8751}{l} x\right) - 0.7341 \left( \sinh\left(\frac{1.8751}{l} x\right) - \sin\left(\frac{1.8751}{l} x\right) \right) \quad (4)$$

## 2 参数对出口风速的影响

在下面的计算中，取定值  $H=10.0 \text{ mm}$ ， $h=0.5 \text{ mm}$ 。并假定振动薄片在压电材料的激励下，右端振幅达到  $A=4.0 \text{ mm}$ 。改变其他参数，分别计算各个计算模型的出口风速。计算步长取为振动薄片振动周期的  $1/50$ 。

使用 Fluent 软件提供的 Monitor 功能，每隔一段时间，输出该时刻的速度值。输出的速度值是使用质量加权方法(Mass-weighted method)计算出的整个出口边界上的平均速度值。考虑到通风效果主要与  $X$  方向的速度分量有关，因此展示的风速计算

结果均为  $X$  方向的速度分量值。以时间为横坐标, 以该时刻的速度为纵坐标画点, 并将相邻点用直线相连, 如图 5 所示, 图中所示结果为压电风扇长度  $L=50.0\text{ mm}$ , 振动薄片长度  $l=40.0\text{ mm}$  的模型在  $50\text{ Hz}$  的频率下工作时的计算结果。

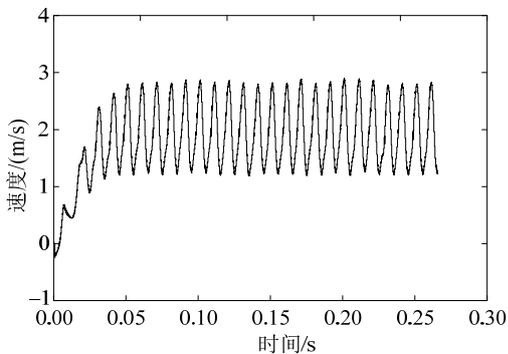


图 5 流动时间与出口风速图

Fig.5 Wind velocity at the outlet versus flow time

为了结果展示的方便, 在上述结果的基础上, 计算一段时间内的时均速度。在时间-速度历程中, 选取一个较长的速度变化趋于稳定的区间, 求出该区间中速度的平均值  $v$  作为后面计算结果展示和分析的基础。

### 2.1 振动频率

本节研究振动薄片的振动频率  $f$  (简记为振动薄片的频率) 对出口风速的影响。计算模型如图 3 所示, 设压电风扇长度(流场长度)  $L=50.0\text{ mm}$ , 振动薄片长度  $l=40.0\text{ mm}$ 。为振动薄片选取不同的振动频率, 计算在各个振动频率  $f$  下, 出口风速的平均值  $v$ , 如图 6 所示。

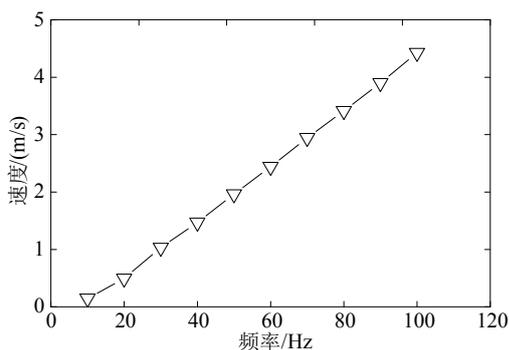


图 6 不同振动频率下的出口风速图

Fig.6 Wind velocity at the outlet versus frequency

图中  $X$  轴为振动薄片的振动频率,  $Y$  轴为出口上的速度平均值。由曲线可以看出, 频率和出口风速具有明显的线性关系, 频率每增大  $20\text{ Hz}$ , 出口风速约提高  $1\text{ m/s}$ 。由于噪声控制的原因, 我们在此主要关注了振动频率小于  $100\text{ Hz}$  时风速随频率

的变化情况。事实上, 进一步的计算表明当振动频率大于  $100\text{ Hz}$  时, 振动频率与出口风速仍具有线性关系。

### 2.2 压电风扇长度

本节研究压电风扇长度  $L$  对出口风速的影响。为了方便对结果进行对比, 假设压电风扇长度(流场长度)  $L=50.0\text{ mm}$ , 振动薄片长度  $l=40.0\text{ mm}$  的模型为标准模型。选取压电风扇长度为标准模型长度的  $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 、 $2$ 、 $3$ 、 $4$  倍的 6 种模型, 分别计算以上六个模型, 当其振动薄片以  $25\text{ Hz}$ 、 $50\text{ Hz}$ 、 $75\text{ Hz}$ 、 $100\text{ Hz}$  四个振动频率振动时的出口风速。将计算结果与标准模型在相同振动频率下的计算结果相对比, 如图 7 所示。需要强调的是, 本小节中使用的所有的计算模型, 其振动薄片长度和压电风扇长度的比值都是  $4/5$ 。

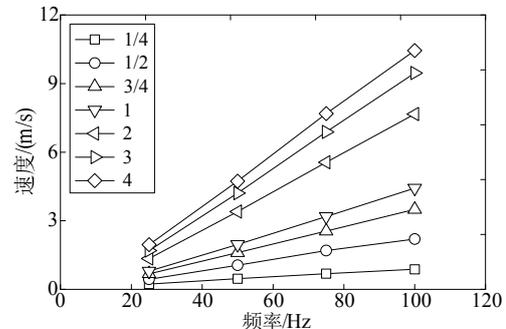


图 7 不同长度的压电风扇频率与出口风速图

Fig.7 Wind velocity at the outlet versus frequency for piezoelectric fans with different lengths

图 7 可以看出, 对于不同长度的压电风扇模型, 频率与出口风速成线性关系, 这与上节中的结论相同。与此同时, 对于不同的模型, 风速随频率的增大而提高的速度亦即频率-速度折线的斜率不同: 模型越长, 风速随频率的增大而提高得越快。进而探究, 振动频率一定时, 出口风速与模型长度的关系, 如图 8 所示。

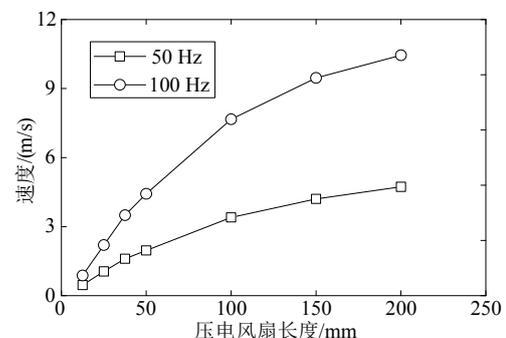


图 8 两种振动频率下压电风扇长度与出口风速图

Fig.8 Wind velocity at the outlet versus piezoelectric fan's length for two frequencies

图 8 中两条折线的变化规律相近：压电风扇模型长度较短时，风速提高较快。随着模型长度的增大，风速随模型长度的增大而提高的速度减慢，亦即折线段的斜率慢慢变小。

### 2.3 振动薄片长度与压电风扇长度的比值

本节研究振动薄片长度与风扇长度的比值对出口风速的影响。研究中，固定压电风扇长度(流场长度) $L=50.0\text{ mm}$ ，通过改变振动薄片  $l$  的长度进而改变振动薄片长度与压电风扇长度的比值，探究该比值对压电风扇出口风速的影响。分别计算振动薄片长度不同的 4 种模型在不同振动频率下工作的出口风速并画图，如图 9 所示。

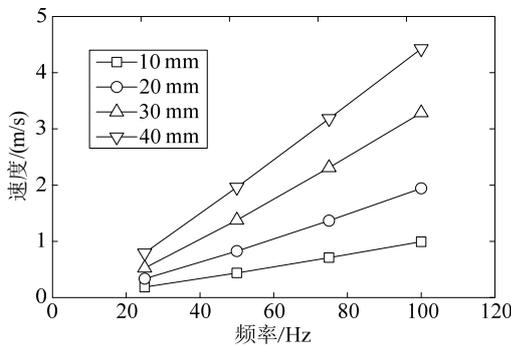


图 9 振动薄片长度不同的压电风扇频率与出口风速图  
Fig.9 Wind velocity at the outlet versus frequency for piezoelectric fans with different vibrating plates

从图 9 可以看出，同一个模型，其频率与出口风速近似成线性规律。随着振动薄片长度的增大，亦即振动薄片长度与压电风扇长度比值的增大，风速随频率的增大而提高的速度加快。进而研究振动薄片在同一频率下振动时，出口风速与振动薄片长度的关系，如图 10 所示。

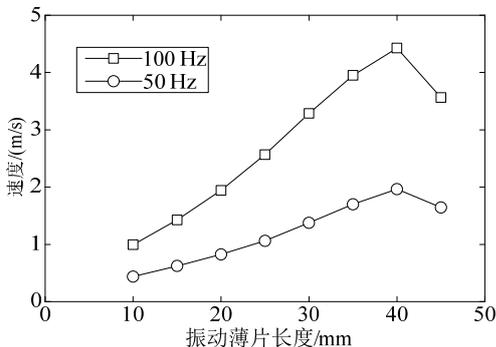


图 10 两种振动频率下振动薄片长度与出口风速图  
Fig.10 Wind velocity at the outlet versus vibrating plate length for two frequencies

在振动频率为 50 Hz 的情况下，当振动薄片长度小于 40.0 mm 时，出口风速随振动薄片长度的增大而提高，当振动薄片长度大于 40.0 mm 时，出口

风速随振动薄片长度的进一步增大而下降。在振动频率为 100 Hz 的情况下，速度走势与振动频率为 50 Hz 的情况相同。

进一步的计算表明，风速提高与下降的分界点对应的振动薄片的长度依次为 40 mm 和 41 mm。由此可以得出结论：当振动薄片长度与压电风扇长度的比值小于 0.8 时，出口风速随着比值的增大而提高，大于 0.8 时出口风速随着比值的进一步增大而下降。

### 3 计算结果分析

流场充分发展后，取一个振动周期  $T$  内  $T/4$ 、 $T/2$ 、 $3T/4$ 、 $T$  的 4 个时刻观察流场速度矢量图。以压电风扇长度  $L=50.0\text{ mm}$ ，振动薄片长度  $l=40.0\text{ mm}$  的模型在 50 Hz 的频率下工作的计算结果为例，如图 11 所示。需要指出的是，本文所有速度矢量图中的速度值均为速度矢量的幅值，速度单位 m/s。

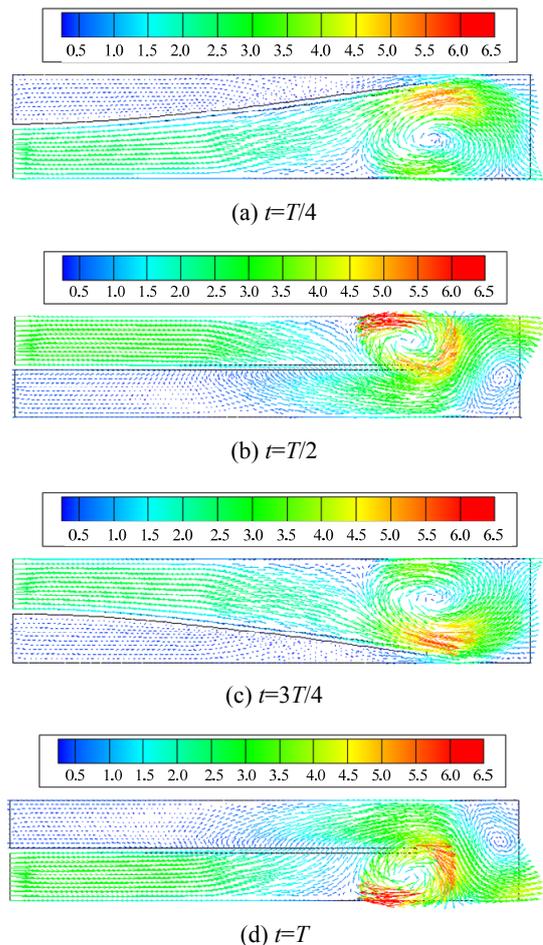


图 11 1 个周期内速度矢量图  
Fig.11 Velocity vectors in one cycle

在一个振动周期内，从 0 时刻到  $T/4$  时刻，随着振动薄片向上运动，在振动薄片自由端下方产生

一个漩涡。从  $T/4$  时刻到  $3T/4$  时刻，振动薄片向下运动，挤压振动薄片下方的漩涡并推动漩涡向  $X$  轴正方向运动。于此同时，在振动薄片自由端的上方产生另一个漩涡。从  $3T/4$  时刻到  $T$  时刻，振动薄片再次向上运动，推动振动薄片上方的漩涡向  $X$  轴正方向运动。振动薄片周期性上下振动，不断产生新的漩涡并迅速将产生的漩涡推向  $X$  轴正方向从而产生了沿  $X$  轴正方向的气流流动。

图 12 展示了一个周期内 4 个时刻流场的压强分布图，压强单位 Pa。将图 11 与图 12 中相应时刻的速度和压强分布图相对照可以看出，漩涡的直接成因是振动薄片向某一方向运动时，在其后方产生了低压区，低压区与周围区域产生了压强差，从而对周围的空气产生了卷吸的效果，低压区卷吸周围气体产生漩涡。

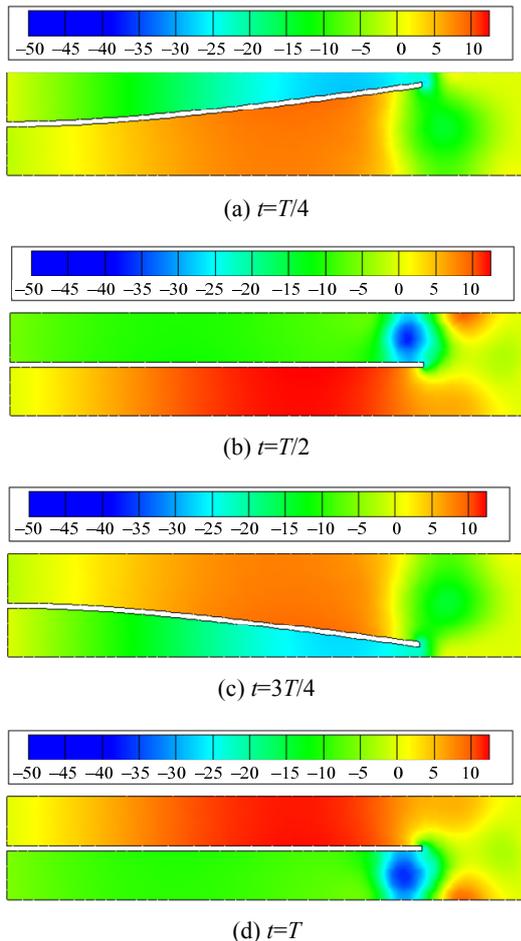


图 12 1 个周期内气压分布图  
Fig.12 Pressure contours in one cycle

对于流场中的气体微团，运动状态的改变表明作用在其上的力使之具有了加速度。根据式(5)所示的不计粘性力的欧拉方程<sup>[22]</sup>，在不考虑重力的情况下，气体微团加速度与压强梯度成正比。相同长度

上，压强变化越剧烈，空气微团所具有加速度越大，相同时间内微团的速度改变量越大。其中  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为流体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度， $p$  为压强， $\rho$  为密度。 $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为单位质量初体力。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z \end{cases} \quad (5)$$

此处需要注意的是，由于漩涡的特殊性，压强梯度与速度分布并不是线性关系。

### 3.1 振动频率

计算结果显示，振动频率与出口风速成正比。

将振动薄片振动方程式(1)对时间  $t$  求导可得式(6)，即振动薄片在  $Y$  方向上的运动速度。

$$v_y = \pi f A Y(x) \cos(2\pi f t) \quad (6)$$

由式(6)看出，振动频率提高  $n$  倍，振动薄片  $Y$  方向的运动速度也提高相同的倍数。运动速度的提高对低压区的形成以及低压区的压强梯度具有非常大的影响，相同的压电风扇模型在不同振动频率下工作， $T/2$  时刻的压强分布图如图 13 所示，压强单位 Pa。

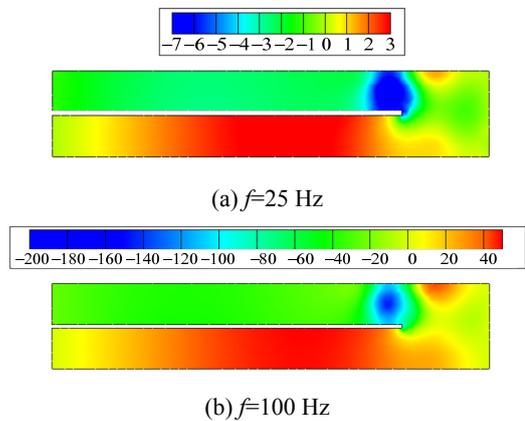


图 13  $T/2$  时刻流场压强分布对比

Fig.13 Comparison of pressure contours at  $T/2$

将图 13(a)、图 13(b)与图 12(b)图对比，可以看出振动薄片  $Y$  方向的运动速度每增加一倍，流场中相同位置在一个周期中相同的时刻，压强的绝对值也成倍提高。相应的，低压区的卷吸能力也随着压强梯度的增大而提高，因而随着振动频率的提高，气流流动速度也相应的提高。

### 3.2 压电风扇长度

计算结果显示，模型长度越长，出口风速越大。

但是,随着模型长度的增大,出口风速提高的越来越慢。

在振动频率为 50 Hz 的情况下,对比压电风扇长度为  $L=25.0\text{ mm}$  和  $L=100.0\text{ mm}$  两种模型在  $T/4$  时刻流场的压强分布,如图 14 所示,压强单位 Pa。

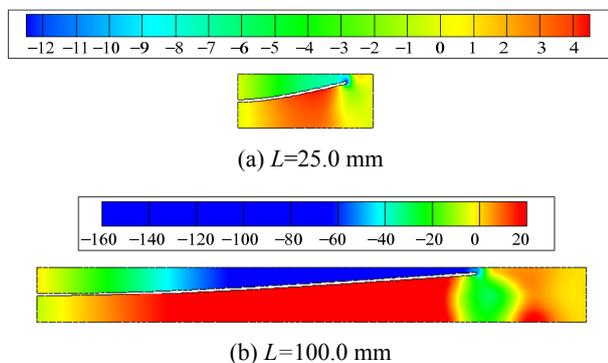


图 14  $T/4$  时刻流场压强分布比较

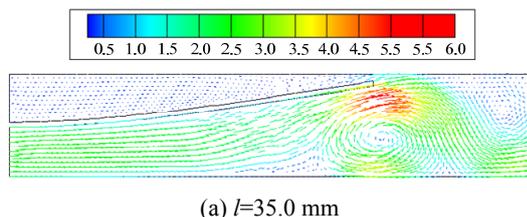
Fig.14 Comparison of pressure contours at  $T/4$

风扇长度越长,振动薄片振动产生的低压区的范围越大。随着振动薄片的运动,当模型长度较长时,空气不能及时流入低压区从而导致低压区的压强进一步下降,对周围空气的卷吸效果更明显,进而产生了更高的风速。然而,随着模型长度进一步增大,虽然低压区的压强进一步降低,但是由于模型过长,在振动薄片反向振动之前,两端的自由空气来不及流入低压区,影响了卷吸效果,因而随着模型长度增大,风速提高的速度减慢。

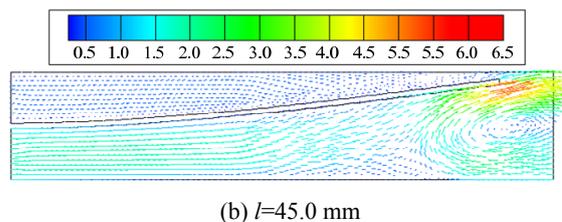
### 3.3 振动薄片长度与压电风扇长度的比值

计算结果显示振动薄片长度与压电风扇长度比值较小时,出口风速随比值的增大而提高,当比值大于一个临界值时,出口风速随比值的进一步的增大而下降。

当比值小于临界值时,风速随比值的增大而提高的原因与 3.2 节中风速随模型长度的增大而提高的原因相同。当比值大于临界值时,风速随比值的增大而下降的原因与流场漩涡的产生有关。画出模型长度同为  $L=50.0\text{ mm}$ , 振动薄片长度分别为  $l=35.0\text{ mm}$  和  $l=45.0\text{ mm}$  的两种模型在振动频率为 50 Hz 的情况下, $T/4$  时刻流场的速度分布矢量图如图 15 所示,速度单位 m/s。



(a)  $l=35.0\text{ mm}$



(b)  $l=45.0\text{ mm}$

图 15  $T/4$  时刻速度分布比较

Fig.15 Comparison of velocity vectors at  $T/4$

将图 15(a)、图 15(b)两图与图 11 中(a)图对比可以看出,当  $l<40\text{ mm}$  时,在流场内可以产生完整的漩涡并随即被振动薄片推向  $X$  轴正方向。当  $l>40\text{ mm}$  时,在流场内无法产生完整的漩涡,漩涡产生位置距离出口边界太近,此种情况下,漩涡在产生过程中会卷吸出口以及出口以外的气体,从而导致出口  $X$  轴正方向的平均速度下降。

## 4 结论

(1) 压电风扇出口风速随振动薄片振动频率的增大而提高,并且两者成线性关系。在一定范围内,压电风扇越长,振动薄片长度与压电风扇长度的比值越大,出口风速随振动频率的增大而提高得越快。

(2) 保持振动薄片长度与压电风扇长度比值不变,且振动薄片在相同的振动频率下振动时,压电风扇长度越长,出口风速越大。但两者并不是线性关系。随着压电风扇长度的增大,风速提高得速度减慢。

(3) 在一定范围内,出口风速随振动薄片长度与压电风扇长度比值的增大而提高,并且存在一个临界值,当比值大于该临界值时,出口风速随比值的增大而下降。

### 参考文献:

- [1] Kim Y H, Wereley S T, Chun C H. Phase-resolved flow field produced by a vibrating cantilever plate between two endplates [J]. Physics of Fluids (1994-present), 2003, 16(1): 145-162.
- [2] Kimber M, Suzuki K, Kitsunai N, et al. Pressure and flow rate performance of piezoelectric fans [J]. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 2009, 32(4): 766-775.
- [3] Kimber M, Garimella S V, Raman A. Local heat transfer coefficients induced by piezoelectrically actuated vibrating cantilevers [J]. Journal of Heat Transfer, 2007, 129(9): 1168-1176.
- [4] Yoo J H, Hong J I, Cao W. Piezoelectric ceramic bimorph coupled to thin metal plate as cooling fan for electronic

- devices [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 79(1): 8—12.
- [5] Acikalin T, Wait S M, Garimella S V, et al. Experimental investigation of the thermal performance of piezoelectric fans [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2004, 25(1): 4—14.
- [6] Açıkalin T, Raman A, Garimella S V. Two-dimensional streaming flows induced by resonating, thin beams [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 114(4): 1785—1795.
- [7] Ihara A, Watanabe H. On the flow around flexible plates, oscillating with large amplitude [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1994, 8(6): 601—619.
- [8] Schmidt R R. Local and average transfer coefficients on a vertical surface due to convection from a piezoelectric fan [C]// *Thermal Phenomena in Electronic Systems*, 1994. I-THERM IV. Concurrent Engineering and Thermal Phenomena, InterSociety Conference on IEEE, 1994: 41—49.
- [9] Wait S M, Basak S, Garimella S V, et al. Piezoelectric fans using higher flexural modes for electronics cooling applications [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2007, 30(1): 119—128.
- [10] Lin C N. Analysis of three-dimensional heat and fluid flow induced by piezoelectric fan [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(11): 3043—3053.
- [11] Lin C N. Heat transfer enhancement analysis of a cylindrical surface by a piezoelectric fan [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 693—703.
- [12] Gilson G M, Pickering S J, Hann D B, et al. Piezoelectric fan cooling: A novel high reliability electric machine thermal management solution [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(11): 4841—4851.
- [13] Li H Y, Chao S M, Chen J W, et al. Thermal performance of plate-fin heat sinks with piezoelectric cooling fan [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 57(2): 722—732.
- [14] Burmann P, Raman A, Garimella S V. Dynamic and topology optimization of piezoelectric fans [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2002, 25(4): 592—600.
- [15] Basak S, Raman A, Garimella S V. Dynamic response optimization of piezoelectrically excited thin resonant beams [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2005, 127(1): 18—27.
- [16] 贾丽杰, 李敏, 陈伟民. 压电驱动器应变传递模型分析 [J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 205—210.
- Jia Lijie, Li Min, Chen Weimin. The model analysis of strain transfer in the application of piezoelectric actuators [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 205—210. (in Chinese)
- [17] 朱熹育, 王社良, 朱军强. 基于 Sugeno 型模糊神经网络的空间杆系结构的压电驱动器主动控制 [J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 272—277.
- Zhu Xiyu, Wang Sheliang, Zhu Junqiang. Sugeno-type fuzzy neural network active control of space frame structure based on piezoelectric actuator [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 272—277. (in Chinese)
- [18] 吕诗良, 郭少华. 结构表面电激厚剪压电驱动器动态特性研究 [J]. *工程力学*, 2011, 28(6): 249—256.
- Lv Shiliang, Guo Shaohua. Dynamic behavior study on electrically excited thickness-shear piezoelectric actuator on the surface of an elastic structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 249—256. (in Chinese)
- [19] Hu H, Clemons L, Igarashi H. An experimental study of the unsteady vortex structures in the wake of a root-fixed flapping wing [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(2): 347—359.
- [20] 谭蕾, 谭晓茗, 张靖周. 压电风扇激励非定常流动和换热特性数值研究 [J]. *航空学报*, 2013, 34(6): 1277—1284.
- Tan Lei, Tan Xiaoming, Zhang Jingzhou. Numerical investigation on unsteady flow and heat transfer characteristics of piezoelectric fan [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(6): 1277—1284. (in Chinese)
- [21] 刑誉峰, 李敏. *工程振动基础* [M]. 第 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 136—144.
- Xing Yufeng, Li Min. *Engineering Vibration* [M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2011: 136—144. (in Chinese)
- [22] 钱翼稷. *空气动力学* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 36—39.
- Qian Yiji. *Aerodynamics* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2004: 36—39. (in Chinese)