

叶片式脉动发生器的设计与实验^{*}

李 华 张雪梅 徐 璋 钟英杰 邓 凯 任建莉

【摘要】 设计了一种叶片式脉动发生器,并进行了实验。实验结果表明:通过周期性开、闭管路的方法,叶片式脉动发生器可以实现对流体的脉动作用,获得脉动流。该脉动发生器具有沿程脉动效果损失低,所产生脉动作用具有传递性的特点。形成脉动流的脉动振幅随脉动频率的变化而有所改变。引入叶片式脉动发生器会对管路流速产生一定的影响,脉动频率与流速间呈现非线性关系。

关键词: 脉动气流发生器 脉动流 压力特性 设计 实验

中图分类号: S226.6; TQ051.21 **文献标识码:** A

Design and Experimental Study on Vane-type Pulsating Flow Generator

Li Hua Zhang Xuemei Xu Zhang Zhong Yingjie Deng Kai Ren Jianli
(Zhejiang University of Technology)

Abstract

A device for producing pulsating flow named vane-type pulsation generator was designed and experimentally studied. The experimental results demonstrated that pulsation generator, which produced pulsation effects on steady flow could obtain pulsating flow by means of on-and-off periodical flow interrupter. The pulsation effects for this type of pulsating flow generator had little reduction and could transfer along the channel. Pulsation amplitude changing with pulsation frequency was observed. It could impact on the flow velocity to induce pulsation generator to the experimental system. The relationship between pulsation frequency and flow velocity was non-linear.

Key words Pulsation generator, Pulsating flow, Pressure characteristic, Design, Experiment

引言

当流体受到脉动激励后,其流动特性参数,如流量、流速、压力等会发生周期性变化,所形成的流体称为脉动流,这种特殊的流体具有较高的工程应用价值。

脉动流一般需要通过脉动发生器获得。已有的发生器包括:活塞式脉动发生器^[1]、自激励振荡腔(亦称为 Helmholtz 腔)^[2]、脉动燃烧器^[3]、凸轮激励的液体脉动发生器^[4]和声波激励的气体脉动发生器^[5]等。这些方法和设备在实现脉动作用的过程

中,有的需要增设回路,如活塞式脉动发生器;有的实现脉动频率的调节相对困难,如自激励振荡腔、脉动燃烧器和声激励发生器等。本文在吸收各种脉动发生器优点的基础上,设计一种叶片式脉动发生器,并对其脉动流特性的实验研究。

1 叶片式脉动发生器设计

机械驱动脉动阀是一种典型的脉动发生器,通过通道的周期性开、闭完成对经过流道流体的脉动激励,使其流动特征参数发生周期性变化,该阀体结构如图 1 所示^[6-7]。

收稿日期: 2006-10-11

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50576087)和浙江省自然科学基金重点项目(项目编号:Z503122)

李 华 浙江工业大学脉动技术工程研究中心 博士生, 310014 杭州市

张雪梅 浙江工业大学能源与动力工程研究所 讲师

徐 璋 浙江工业大学能源与动力工程研究所 副教授

钟英杰 浙江工业大学脉动技术工程研究中心 教授 通讯作者

邓 凯 浙江工业大学脉动技术工程研究中心 博士生

任建莉 浙江工业大学能源与动力工程研究所 副教授

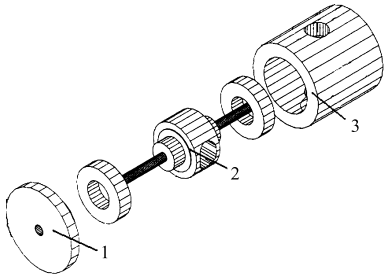


图1 机械驱动脉动阀结构图

Fig. 1 Structure drawing of mechanically-driven pulsating flow valve
1. 阀盖 2. 阀芯 3. 阀壳

该阀由阀盖、阀芯和阀壳组成。通过阀芯周期性开、闭而获得脉动流,通过阀芯与阀壳之间间隙的大小来调节脉动流平均流量。

根据开、闭通道方法,设计了以叶片组代替机械驱动脉动阀阀芯的叶片式脉动发生器,结构如图2、图3所示。主要由圆锥齿轮组、静叶片、转轴、动叶片、齿轮转轴和外壳组成。静叶片与壳体固定,动叶片围绕静叶片中心转轴转动,两叶片均开有通孔,且几何形状相同。两叶片的相对运动实现流道的周期性开启与关闭,进而实现对经过此通道流体的脉动激励。转轴与调速电动机相连,采用圆锥齿轮实现动叶片与电动机转轴之间转动为正交传动,不影响流动。齿轮组的传动比与叶片上通孔数乘积为60,实现调速电动机对应转速读数即为流体脉动频率值,无需任何换算。

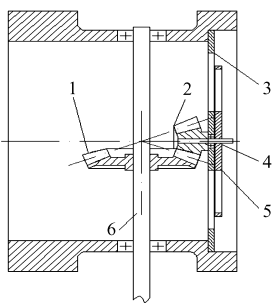


图2 叶片式脉动发生器结构简图

Fig. 2 Structure drawing of vane-type pulsating flow generator

1. 主轴圆锥齿轮 2. 阀芯圆锥齿轮 3. 静叶片 4. 转轴
5. 动叶片 6. 齿轮转轴

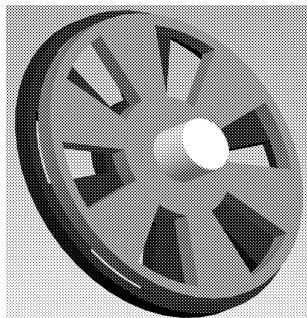


图3 叶片组三维造型图

Fig. 3 3-D formation of valve core

与活塞式脉动发生器相比,叶片式脉动发生器无需设置闭合回路,只需在流体管路某处接入即可,结构简单,使用方便;与自激励振荡腔比较,叶片式脉动发生器的脉动频率与脉动振幅计算方便,脉动频率与脉动振幅的改变与调节也更为容易实现,无

需对内部几何结构与形状进行改动;与机械驱动脉动阀相比,在结构、形状上进行了简化,通用性更强。

2 实验

脉动频率和脉动振幅为脉动流的关键特征,因此脉动发生器能否有效提供脉动流的关键是判断其脉动频率、脉动振幅及其相关流动参数的特性能否满足要求。

2.1 实验设备

实验台总体布局如图4所示,主要由叶片式脉动发生器、离心通风机、调速电动机、流量积算仪、高速数据采集系统(YE6600和YE6230)、气体涡轮流量计、PC计算机、调速电动机控制箱、TSI热线风速仪等组成。涡轮流量计前端管路 $x=2\ 000\text{ mm}$ 为稳流段,而其后管路 $y=3\ 000\text{ mm}$ 为脉动流测试实验段。研究介质为常温空气,其脉动特性通过脉动流压力变化特征实现。图中,A、B、C3处分别设置CL-YD-200T型微压气体压力传感器,传感器以抗噪声接口线经数据采集系统与PC计算机连接,实验管路采用公称直径为50 mm的钢管。

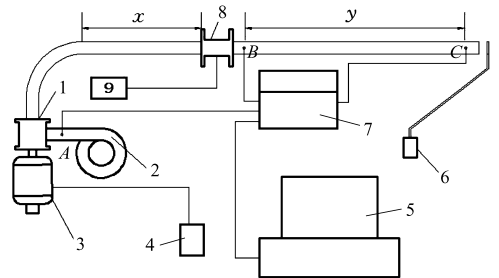


图4 脉动流实验台示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus of pulsating flow

1. 叶片式脉动发生器 2. 离心通风机 3. 调速电动机 4. 调速电动机控制箱 5. PC计算机 6. TSI热线风速仪 7. 高速数据采集系统 8. 气体涡轮流量计 9. 流量积算仪

为减少实验过程中齿轮传动带来系统误差,调速电动机直接连接动叶片转轴,风机从脉动发生器侧面接入,发生器中没有设置锥形齿轮。

2.2 结果与分析

以脉动气流压力为研究对象,分别对A、B、C的3处(图4)脉动频率 f 在0~100 Hz范围内进行测试,得叶片式脉动发生器的特性曲线,如图5~9所示。

图5为脉动频率50 Hz下,A、B两处压力变化曲线。从图中可以看出:A处压力脉动特征并不明显,由于A点为风机出口处测压点,尚未经过叶片式脉动发生器作用,因此其压力周期性变化并不规律。经过脉动发生器激励后的B处,压力变化明显

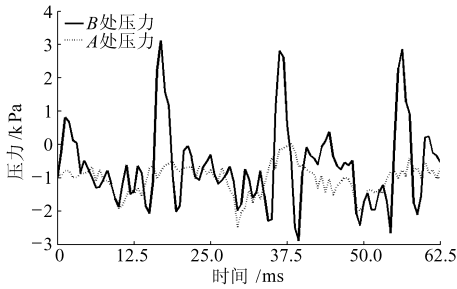


图5 脉动频率 50 Hz 下 A、B 处压力特性曲线
Fig.5 Pressure characteristics of position A and B for $f = 50 \text{ Hz}$

呈周期性,每隔一段时间后就会出现一个压力最大值(峰值),且各个峰值基本相等,可以认为该流体已经为脉动流。尽管 B 处脉动流的压力特征呈现周期性变化,但并非为规则变化的曲线,在各个峰值之间仍然存在小的脉动,其原因应是风机所提供气流本身就具备一定的波动性所致,这一问题可以通过在风机与脉动阀之间设置缓冲装置,以消除风机自身振动对脉动激励的影响。此外,B 处的压力变化更为剧烈,压力平均值比 A 处大。

图 6 为脉动频率在 0 Hz 和 50 Hz 下 A 处的压力变化曲线。从图中不难看出,二者的压力随时间变化均无规律,但 50 Hz 时所产生的压力变化较 0 Hz(脉动发生器没有工作,且两叶片完全重合)条件下的压力变化更为剧烈,周期性地出现压力突变的情况。造成这一现象的原因是由于在叶片式脉动发生器周期性开、闭流道对气流进行脉动激励过程中,某些时刻没有通过的气体受到动叶片的阻力被反冲回风机出口,因此造成压力突变,这说明叶片式脉动发生器对供气源有一定程度的影响。

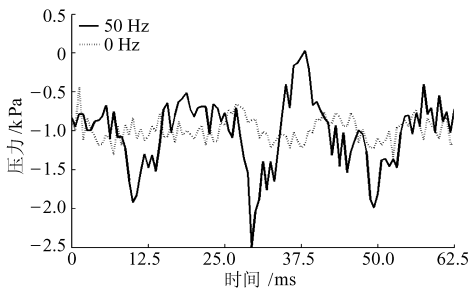


图6 不同脉动频率下 A 处压力特性曲线
Fig.6 Pressure characteristics of position A of different frequencies

图 7 为脉动频率 50 Hz 时 B、C 处压力特性曲线。由图可知,B、C 两点均处于周期性的变化过程中,而且二者的峰值基本相同,甚至 C 点较 B 点略高些。由此可知,在 B、C 两点相距 3 000 mm 的长度内,叶片式脉动发生器所产生脉动的脉动特性基本无沿程损失,两处压力脉动程度相似。此外,B 点与 C 点的脉动曲线并不重合,即二者压力峰值之

间存在一定距离,其脉动特征并非同时出现,具有一定的延时性。这一情况说明叶片式脉动发生器产生的脉动作用具有传递性,而传统的活塞式脉动发生器则产生脉动作用同步的脉动流,二者有明显区别。

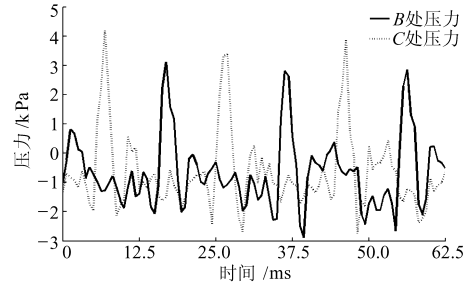


图7 脉动频率 50 Hz 下 B、C 处压力特性曲线
Fig.7 Pressure characteristics of position B and C for $f = 50 \text{ Hz}$

图 8 为脉动频率 50 Hz 与 100 Hz 下 B 处的压力变化。排除测量误差,通过二者压力峰值的比较可以看出,50 Hz 下压力峰值低于 100 Hz 下的压力峰值。由此可知,在某一特定条件下,随着脉动频率的变化,叶片式脉动发生器所产生的压力峰值有所改变,对应脉动振幅略有不同。

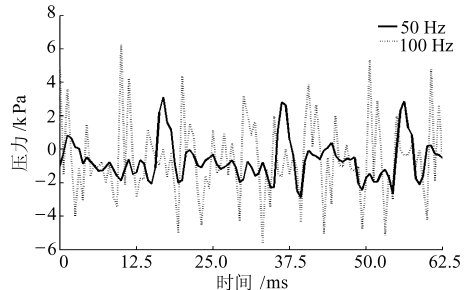


图8 不同脉动频率下 B 处压力特性曲线
Fig.8 Pressure characteristics of position B of different frequencies

图 9 为管路中的平均速度及最大速度(管路中心线处)与脉动频率关系曲线。其中,平均速度由气体涡轮流量计测得,最大速度由热线风速仪测得。从此图可以看出,脉动频率为零处对应速度明显高于其他各点。这说明叶片式脉动发生器引入管路在

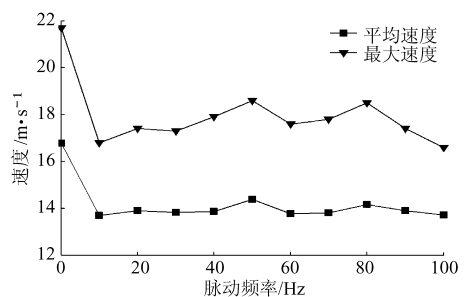


图9 气流速度与脉动频率关系曲线
Fig.9 Relationship between flow velocity and pulsation frequency

一定程度上会造成管路中流体流速的减少,但减小幅度并不大。此外,不同频率下最大速度和平均速度的变化趋势基本相同,然而速度的大小随频率之间并非为单调关系,在脉动频率为 50 Hz 和 80 Hz 附近存在极大值。

图 10 为叶片式脉动发生器与脉动燃烧所产生脉动流的波形比较^[8]。脉动燃烧所形成的脉动流具有明显的正弦特性,而叶片式脉动发生器产生的脉动流接近正弦特性,且波峰值绝对值高于波谷,两

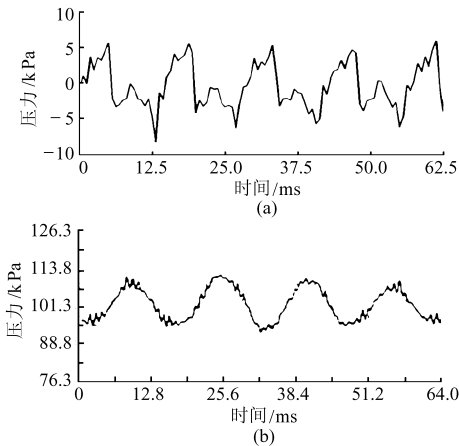


图 10 脉动流波形比较

Fig. 10 Comparison of wave patterns of pulsating flow
(a) 叶片式脉动发生器, 70 Hz (b) 脉动燃烧器尾管, 68 Hz

者过渡区并不明显。这是由于脉动发生器作用过程始终为开、闭管路,不主动产生负压力作用,因此叶片式脉动发生器脉动流具有波峰突出波谷不明显的特征。这种特征的脉动流应用于喷射冷却与干燥过程可使传热效果提高 65%^[6],实现各种冷却、干燥过程的工程强化。

3 结论

(1) 通过周期性开、闭管路的方法,叶片式脉动发生器可以实现对所通过流体的脉动作用,提供脉动流,但其压力特征图呈非正弦曲线。

(2) 提供脉动流的同时,叶片式脉动发生器对于流体源也有一定的影响,但并不影响其正常使用。

(3) 脉动流在一定的沿程范围内不会发生脉动效果衰减,叶片式脉动发生器的脉动作用具有传递性。

(4) 叶片式脉动发生器所生成脉动流的脉动振幅随脉动频率的变化略有改变。

(5) 发生器对流体脉动激励的过程中,会造成一定程度的流速减小,但幅度并不大;随着脉动频率的改变,对应流速呈非线性变化,并且在某些脉动频率处存在极值点。

参 考 文 献

- 1 Leong K C, Jin L W. An experimental study of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminum foam [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(2): 243~253.
- 2 Zheng J, Zeng D L, Wang P, et al. An experimental study of heat transfer enhancement with a pulsating flow [J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2004, 33(5): 279~286.
- 3 李保国,刘相东,曹崇文. 脉动燃烧干燥及传热特性研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(6): 11~14.
- 4 Zhang Y L, Reese J M, Gorman D G. An experimental study of the effects of pulsating and steady internal fluid flow on an elastic tube subjected to external vibration [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 266(2): 355~367.
- 5 Hwang K S, Sung Y J, Hyun J M. Flow and mass transfer measurements for a flat plate of finite thickness in pulsating flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(18): 2 827~2 836.
- 6 Sailor D J, Rohli D J, Fu Q L. Effect of variable duty cycle flow pulsations on heat transfer enhancement for an impinging air jet [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1999, 20(6): 574~580.
- 7 Sailor D J, Rohli D J. Mechanically-driven pulsating flow valve for heat and mass transfer enhancement: US, 6053203[P]. 2000-04-25.
- 8 李保国. 脉动燃烧器及其尾管传热分析[J]. *上海理工大学学报*, 2001, 23(3): 263~266.