全射流喷头射流元件附壁频率

向清江，袁寿其，李 红，刘俊萍
（江苏省流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘 要：基于全射流喷头射流元件的工作原理和内部流动状况，分析射流元件附壁频率的影响因素.利用元件两侧压差大小，建立附壁频率计算式，通过射流元件壁面脉动压力测量获得的附壁频率试验数据，频率计算值与试验值符合较好.计算与试验结果表明，附壁频率随元件腔室容积增大，信号水导管长度的变长而减小，随喷头工作压力增大，信号水流量的增大而增大，对于PXH30全射流喷头射流元件，获得信号水流量与附壁频率的线性关系式.在无因次数计算与分析中，喷嘴雷诺数对斯特劳哈数影响较小，斯特劳哈数随欧拉数的增大而减小.附壁频率的研究能指导射流元件的设计和全射流喷头工作状态的调节.

关键词：全射流喷头；射流元件；附壁频率；附壁效应；脉动压力
中图分类号：S277 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2009)04-0232-05

Wall attachment frequency of complete fluidic sprinkler's fluidic element

Xiang Qingjiang, *Yuan Shouqi*, *Li Hong*, *Liu Junping*
(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering of Jiangsu, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Based on the working principle of complete fluidic sprinkler's fluidic element and its inner flow state, factors that affect the frequency of wall attachment offset jet are analyzed. A calculating formula of frequency is established by the differential pressures on both sides of fluidic element. The wall fluctuating pressures of fluidic element are measured and converted to the experimental data of wall attachment frequency. The calculating results of frequency agree well with the experimental data. Both the experimental data and the calculating results show that the frequency decreases with the signal pipe length and increases with the fluidic element's cavity volume. The frequency increases with the sprinkler's working pressure and the flow rate of signal water. As far as the type of PXH30 sprinkler is concerned, the wall attachment frequencies are linear with the flow rate of signal water. The Reynolds number has little influence on the Strouhal number, and the Strouhal number reduces with the Euler number increasing. The study provides the guide for the design of fluidic element and the adjustment of sprinkler's working state.

Key words: complete fluidic sprinkler; fluidic element; wall attachment frequency; coanda effect; fluctuating pressure

隙控式全射流喷头是一种新结构形式的喷灌喷头，具有喷洒效果好，结构简单等优点.其主要核心为利用射流附壁效应(Coanda Effect)设计出一个能控制喷头转动的射流元件[1]，结构简图如图1所示.

收稿日期：2009-05-22
基金项目：国家863计划项目(2006AA100211)；江苏省自然基金资助项目(BK2007089)
作者简介：向清江(1974—)，男，湖北宜都人，博士生(xiang_qj@163.com)，主要从事流体机械射流技术研究.
袁寿其(1963—)，男，上海金山人，研究员，博导(shouqiy@ujs.edu.cn)，主要从事流体机械及工程研究.

万方数据

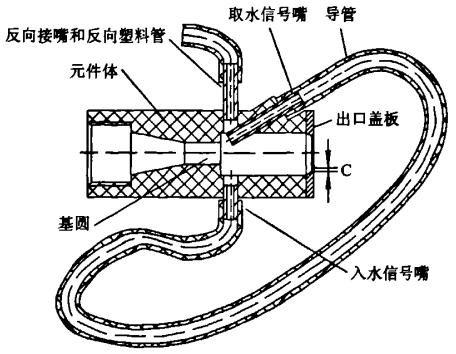


图 1　射流元件结构示意图

Fig. 1　Sketch of complet fluidic sprinkler's fluidic element

全射流喷头射流元件的基本工作原理：射流元件在主射流由基圆喷射出时分为上下两个腔体，喷头的直射、步进、限位反向 3 个工作状态都是由这两个腔体的压差变化引起的. 改变下腔压力的办法是通过从主射流取得信号水，使下腔压力降低，发生主射流向下侧附壁，推动喷头转动，主射流弯曲时取水接嘴与大气相通，下腔进气，恢复压力平衡，主射流直射，喷头完成一次步进. 该类型射流元件属于负压切换.

当喷头步进工作时，适当的附壁频率能使喷头更好地工作，利于提高该类型喷头的喷洒均匀系数. 步进频率的影响因素很多，朱兴业[2]等在全射流喷头与摇臂喷头对比研究中指出，频率主要影响因素为图 1 所示导管的长度，取水信号嘴的插入深度，但该文献中缺少对全射流喷头的附壁频率进行理论计算. 李世英[3]根据上述射流元件工作原理，分析附壁频率时将附壁过程分为两个主要时间段：水射流直射时间和附壁后稳定附壁时间，分别计算得出附壁频率，该方法在推导时很多参数不便于确定，例如流速系数，假定的面积系数等等. 廖振方[4]等理论分析与计算了涡腔式自激振荡射流喷洒装置的振荡频率，根据主射流的动量平衡关系，通过空气孔流入涡腔的空气质量和流出的空气质量，运用改进欧拉公式，计算了交替切换达到临界压力差所需要的时间，从而计算振荡频率. 旁路振荡式气体流量计[5]工作原理部分类似于全射流喷头射流元件工作原理，但射流流量计的特点是振荡频率与流量成线性关系，傅新[6,7]等以流场仿真为基础，研究射流流量计内部流场，研究射流附壁诱发流体交替振荡的机理，以压电晶体作为传感器的敏感元件对反馈道进行压力测量试验，间接验证射流附壁交替振荡现象. 喷灌喷头实际应用时认为步进频率在 1 Hz 时比较适宜，笔者在详细分析全射流喷头射流元件内部流动的基础上，建立附壁射流振荡频率的计算方法，并通过射流元件壁面脉动压力测量来获得附壁频率的试验数据，计算与试验值进行对比，分析附壁频率的各种影响因素，指导全射流喷头更好地实际应用，同时为该类型射流元件在其它控制应用中做基础，例如研究附壁振荡形式的射流曝气装置、液气射流泵装置等，需要了解附壁频率对装置性能的影响.

1　频率的影响因素与计算

1.1　影响因素分析

由量纲分析，在全射流喷头射流元件内流体流动的一般函数关系式

$$F(\Delta p, b, D, l_1, l, d, v, \rho, \mu, \sigma, K, g, \Delta, f) = 0 \tag{1}$$

式中 Δp 为压力差，Pa；D 为射流元件基圆直径，m；b 为射流元件位差，m；l_1 为射流元件长度，m；l 为信号水导管长度，m；d 为信号水导管直径，m；v 为喷嘴射流速度，m/s；ρ 为流体密度，kg/m^3；μ 为动力粘性系数，N·s/m^2；σ 为表面张力系数，N/m；K 为体积模量，N/m^2；g 为重力加速度，m/s^2；Δ 为射流元件内平均粗糙度，m；f 为流体振荡频率，Hz.

对于射流元件具体尺寸参考见文献[8]. 选取特征变量 D, v, ρ，对式(1) 进行无因次化，同时考虑实际流动中，重力影响很小可以不考虑，流体为不可压缩，表面张力和马赫数的影响很小，因此忽略这些小量后式(1) 简化为

$$F\left(\frac{\Delta p}{\rho v^2}, \frac{b}{D}, \frac{x}{D}, \frac{l}{D}, \frac{d}{D}, \frac{\mu}{\rho D v}, \frac{fD}{v}\right) = 0 \tag{2}$$

上式转化为

$$St = \varphi\left(Eu, \frac{b}{D}, \frac{x}{D}, \frac{l}{D}, \frac{d}{D}, \frac{1}{Re}\right) \tag{3}$$

式中 Eu 为欧拉数；Re 为喷嘴雷诺数；b/D 为射流元件偏移率；St 为斯特劳哈准则数，定义为

$$St = \left(\frac{D}{v}\right) f \tag{4}$$

Strouhal 数反映了流动的非定常性影响，表示流动参数的局部变化率与迁移变化率的比值. 由式(3) 可知，射流元件中的振荡频率相关因素除了与元件结构参数(偏移率，作用区长度，信号水导管长度等) 外，还与喷嘴雷诺数相关，与压差有关，这里的压差影响主要考虑推动主射流附壁的压差，而相对于基圆出口到全射流喷头出口的流动方向，压差变

万方数据

化为次要因素,基于附壁射流中线简化为圆弧的假设,主射流弯曲半径 R 近似计算式为

$$R = \frac{\rho v^2 D}{\Delta p} \tag{5}$$

因此欧拉数可表示为

$$Eu = \frac{D}{R} \tag{6}$$

由式(6)可知,欧拉数仅与主射流弯曲半径相关,也即与附壁射流的附壁点距离是相关的.

1.2 附壁频率计算

由上述全射流喷头工作形式的特点,基于信号水流量大小,建立射流元件附壁时间和主射流直射时间计算式,从而获得附壁频率. 取水信号嘴从主射流获得的信号水流量难以用理论计算得出,因此只能通过试验数据获得,测量主射流在直射工作下信号水流量. 图1中元件体下腔吸入信号水流,一部分被主射流带走,一部分滞留腔体内从而封闭下腔产生压差,主射流附壁时间 t_1 为一定量的信号水被卷吸走的时间,计算如下:

$$t_1 = \frac{Dbl_1}{Q_x} = \frac{128\mu l Dbl_1}{\pi d^4 \Delta p} \tag{7}$$

式中 Q_x 为主射流卷吸信号水流量,由导管内泊萧叶定律获得卷吸流量计算为

$$Q_x = \frac{\pi d^4}{128\mu l}\Delta p \tag{8}$$

射流稳定附壁时,射流元件上下腔体产生压差 Δp,式(5)中附壁半径 R 及式(5),(7)中的压差计算见文献[8]中对附壁点距离计算的方法. Dbl_1 为腔体体积,分别为基圆直径,位差,元件长度之积. 式(7)计算所做的假设为:当充满元件下腔大小的信号水量被卷吸走时,主射流将恢复直射,发生附壁切换.

主射流直射时间

$$t_2 = \frac{k\pi d^2 l}{4Q_c} \tag{9}$$

式中 d,l 分别为信号管直径和长度; Q_c 为试验获得的信号水流量; k 为信号水流量修正系数,因为在、喷头实际工作中,取水接嘴是间歇性获得信号水的,而在试验测量 Q_c 时,取水接嘴一直保持获得信号水.

计算全射流喷头射流元件工作时的附壁频率

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \tag{10}$$

2 附壁频率测量试验

选取全射流喷头 PXH10,PXH15,PXH30 3种不同喷头的射流元件进行附壁频率测量试验,其偏移率分别为:0.70,0.50,0.35. 在图1所示射流元件的下腔靠近出口处开测压孔,压力变送器型号 CY61505,精度等级0.5级,测量范围 ±100 kPa. 试验中选取不同喷头工作压力,不同信号水导管长度,分别对附壁频率进行测量,同时测量喷头直射时平均信号水流量,试验在江苏大学喷灌试验大厅喷灌试验台上进行.

数据采集与分析由虚拟仪器测试系统完成,采集卡型号 PXI-6253. 图2为 PXH30 喷头在额定工作压力 0.4 MPa 下,每秒采样1 000次的试验数据.



图2 射流元件壁面压力脉动

Fig. 2 Wall pressure fluctuation of fluidic element

图2中的脉动压力值与试验壁面静压测量值对比,数量级一致. 可看到,压力值在靠近零(环境大气压)的水平时间段即为主射流处于直射状态时间,式(9)进行了预测,压力值突变后脉动的时间段为射流附壁状态时间,式(7)进行了预测. 由图2可知两个状态的切换时间很短.

3 试验结果

对 PXH30 型全射流喷头射流元件,在固定信号接嘴插入深度情况下,改变喷头工作压力和导管长度得到的频率试验值如图3所示.

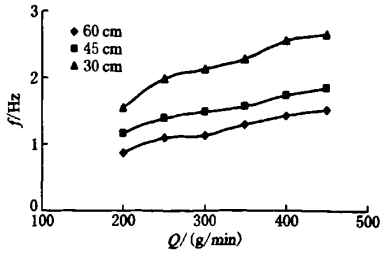


图3 信号水流量与信号管长度对频率的影响

Fig. 3 Influence of signal flow rate and length of signal pipe on frequency

由图3可知,随信号水导管长度的增大,附壁频率降低,在同一导管长度下,频率随信号水流量增大而增大,由于试验中固定了信号接嘴的插入深度,信号水流量随喷头工作压力增大而增大. 由试验结果

万方数据

看出，信号水导管长度对频率的影响最为明显，频率变化范围在 0.4 ~ 3.1 Hz 之间，低频振荡射流元件适合于全射流喷灌喷头，信号水导管偏短频率增高时，附壁不充分，影响喷头转动，甚至于不转动，但在振荡射流混合应用时，需要较高的附壁频率使混合充分. 固定信号导管长度为 45 cm，对 PXH30 型全射流喷头射流元件从工作压力为 0.20 ~ 0.45 MPa 情况下，各信号水流量与附壁频率关系如图 4 所示.

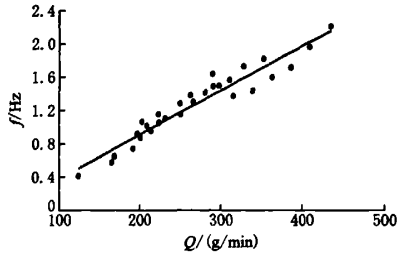


图 4　PXH30 全射流喷头信号水流量与附壁频率关系

Fig. 4　Relationship between wall attachment frequency and signal flow rate

由图 4 可知，信号水流量对频率的影响近似为线性关系，通过数据回归分析，PXH30 全射流喷头信号水流量与频率的线性经验式为

$$f = 5.314 \times 10^{-3} Q - 0.152 \qquad (11)$$

回归分析中相关指数为 0.962.

式(10)频率计算与试验数据对比及式(4)，(6)无因次数的影响见表 1.

表 1 中 f_j 为计算频率，f 为试验值，由表 1 可知频率计算值与试验值接近，在小信号水流量情况下误差偏大，计算误差分析为：①与信号水流量修正系数 k 选取相关，该系数是当射流元件直射，信号接嘴取得信号水的时间与一个附壁周期时间的比值，因此本身是与要计算的附壁频率相关的. ②本文建立的计算式中，采用下腔体积大小的流量代替主射流发生偏转时的临界流量，使计算结果带有一定误差. ③稳定附壁时两侧压差计算时，采用附壁射流中线为圆弧的假设适合于大偏移率计算，而全射流喷头射流元件的偏移率设计比较小，因而存在计算误差.

表 1 中计算的射流元件基本参数的取值分别为位差 $b = 3.5$ mm，射流元件基圆直径 $D = 10$ mm，射流元件长度 $l_1 = 30$ mm，信号水导管直径 $d = 4$ mm，信号水导管长 $l = 450$ mm，信号水流量修正系数 $k = 0.5$.

表 1　PXH30 射流元件附壁频率计算值与试验值

Tab. 1　Calculating results of wall attachment frequency compared with experimental data

Q_c/(kg/h)	R/m	Δp/kPa	$Re \times 10^5$	$Eu \times 10^3$	f_j/Hz	f/Hz	$St \times 10^3$
12.099	5.954	0.800	2.182	1.680	1.069	0.867	0.397
15.080	6.046	0.788	2.182	1.654	1.298	1.147	0.526
17.470	6.121	0.778	2.182	1.630	1.472	1.485	0.681
21.819	6.261	0.761	2.182	1.597	1.769	1.595	0.731
7.449	5.826	0.954	2.357	1.716	0.692	0.416	0.176
9.934	5.896	0.943	2.357	1.696	0.905	0.573	0.243
13.417	5.996	0.927	2.357	1.667	1.191	1.148	0.487
16.026	6.072	0.915	2.357	1.647	1.394	1.304	0.553
18.654	6.149	0.904	2.357	1.626	1.590	1.559	0.661
23.191	6.285	0.884	2.357	1.591	1.908	1.715	0.728
13.928	6.009	1.056	2.519	1.664	1.247	1.101	0.437
16.860	6.089	1.043	2.519	1.642	1.480	1.416	0.562
19.699	6.168	1.029	2.519	1.621	1.696	1.724	0.684
24.590	6.307	1.007	2.519	1.586	2.047	1.961	0.778
15.024	6.035	1.186	2.675	1.657	1.350	1.284	0.480
17.877	6.109	1.172	2.675	1.637	1.578	1.493	0.558
21.166	6.196	1.155	2.675	1.614	1.831	1.820	0.680
26.102	6.328	1.131	2.675	1.580	2.191	2.212	0.827

表 1 中无因次关系式如图 5 所示，由此可知，随欧拉数的增大，无因次 St 数减小，原因在于，计算的欧拉数以射流附壁时两侧的压差为参考，压差越大时，从两侧压力平衡到形成稳定附壁需要的时间越长，因此频率越低. 试验过程中喷嘴雷诺数变化范围较小，喷嘴雷诺数与喷头工作压力相关，图 3 中工作压力增大，附壁频率是增大的，因此，随雷诺数的增大，St 数增大.

万方数据

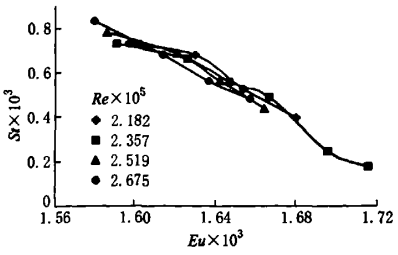


图5 不同喷嘴 *Re* 数下 *St* 数与 *Eu* 数的关系

Fig. 5 Relationship of Strouhal number, Euler number and Reynolds number

式(3)的频率无因次分析式中,元件尺寸长度的影响因素可转换为两个容积大小的影响,分别为射流元件腔体容积和信号水导管容积.由建立的频率计算式可知,元件腔体容积变小时,射流元件频率增大,通过对比3种型号射流元件的试验数据,具有较小腔体容积的PXH10型射流元件在相同情况下,具有较大的附壁频率.

4 结 论

分析了全射流喷头射流元件工作原理和内部流动情况,找出附壁频率的影响因素.由射流元件两边腔体压差变化,首次建立基于信号水流量的附壁频率计算式,与元件壁面压力测量获得的频率试验数据对比,结果符合较好,因此可以应用建立的计算式预测附壁式射流元件的附壁频率.

附壁频率的主要影响因素有①信号水流量大小,针对PXH30射流元件试验数据,得到信号水流量变化与频率变化的线性关系式.②信号水导管长度的改变对频率影响明显,各尺寸参数对频率的影响可转换为元件腔室容积和导管容积的影响,对同一型号的射流元件,偏移率的改变对频率影响分析是进一步研究的内容.③喷嘴雷诺数的影响较小,它与喷头工作压力的影响相同.④随欧拉数的增大,*St* 数减小.

附壁频率的计算和附壁频率的影响因素分析,能指导全射流喷头射流元件的设计和喷头工作状态的调整,同时为附壁振荡射流在工业中其他应用提供理论基础.

参考文献(References)

[1] 袁寿其,朱兴业,李 红,等. 全射流喷头重要结构参数对水力性能的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(10):113-116.
Yuan Shouqi, Zhu Xingye, Li Hong, et al. Effects of complete fluidic sprinkler on hydraulic characteristics based on some important geometrical parameters[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 113-116. (in Chinese)

[2] 朱兴业,袁寿其,李 红. 全射流喷头与摇臂式喷头的对比实验[J]. 农业机械学报,2008,39(2):70-72,184.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong. Compared experiments between complete fluidic sprinkler and impact sprinkler[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(2):70-72,184. (in Chinese)

[3] 李世英. 喷灌喷头理论与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.

[4] 廖振方,邓晓刚,李 军. 涡腔式自激振荡射流喷洒装置[J]. 重庆大学学报,2002,25(12):1-3.
Liao Zhenfang, Deng Xiaogang, Li Jun. Self-exited oscillation vortex chamber watering device[J]. *Journal of Chongqing University*, 2002, 25(12):1-3. (in Chinese)

[5] 周瑞章. 旁路振荡式气体流量计[J]. 液压气动与密封, 1994(4):15-17.
Zhou Ruizhang. Bypass vibration type gas flowmeter [J]. *Hydraumatic Pneumatic and Sealing*, 1994(4):15-17. (in Chinese)

[6] 傅 新,王驰宇,谢海波,等. 射流流量计的仿真与试验研究[J]. 机械工程学报,2006,42(7):24-28.
Fu Xin, Wang Chiyu, Xie Haibo, et al. Numerical simulation and experimental study on fluidec flowmeter[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(7): 24-28. (in Chinese)

[7] Lua A C, Zheng Z. Numerical simulations and experimental studies on a target fluidic flowmeter[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, 14(2):43-49.

[8] 向清江,朱兴业. 全射流喷头内部附壁点距离的计算[J]. 排灌机械, 2008,26(3):55-58.
Xiang Qingjiang, Zhu Xingye. Calculation on distance of wall-attachment point in complete fluidic sprinkler [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(3):55-58. (in Chinese)

(责任编辑 贾国方)

万方数据