

# 全圆旋转射流喷头设计与水力性能试验

王新坤 徐胜荣 樊二东 姚吉成 靳彬彬

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘要:** 为了提高农业节水灌溉效率,提出了一种全圆旋转射流喷头。确定了喷头的 CFD 数值模拟方法,选取深宽比、位差比、劈距比、侧壁倾角作为试验因素,以射流附壁切换频率和流量振幅为指标,通过正交试验得到了喷头内流道的优化结构。通过高速摄影技术对喷头的射流附壁切换频率进行测定,同时监测喷头的进口流量,结果表明,模拟所得的流量压力关系与试验结果基本一致,相对误差范围为 2.1% ~ 4.0%,射流附壁切换频率随进口压力的变化趋势基本相同,相对误差范围为 7.7% ~ 22.2%。当进口压力为 0.15、0.20、0.25 MPa 时,分别研究了 PY<sub>2</sub>10A 型摇臂式喷头和射流喷头的水力性能,其中射流喷头的流量较小(1.19 ~ 1.53 m<sup>3</sup>/h)、射程较远(13.0 ~ 15.7 m)、平均喷灌强度较小(2.85 ~ 3.63 mm/h),转动周期较短(81 ~ 105 s),摇臂式喷头的喷洒水量呈“马鞍形”分布,射程近处和远处的喷洒水量相对较大,射流喷头的喷洒水量呈“三角形”分布,喷洒水量随射程增加而减小。

**关键词:** 射流喷头; 正交试验; 高速摄影; 水力性能试验; 水量分布

中图分类号: S277.9<sup>+</sup>4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)02-0132-06

## Structure Design and Hydraulic Performance Test of Round Rotatory Jet Sprinkler

WANG Xinkun XU Shengrong FAN Erdong YAO Jicheng JIN Binbin

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of water-saving irrigation in agriculture, the round rotatory jet sprinkler was proposed. The CFD numerical simulation method of the sprinkler was determined. Depth-to-width ratio ( $k/w$ ), potential difference ratio, split distance ratio and side wall angel were selected as the experimental factors, and frequency of wall-attached switching and flow amplitude were taken as the indexes. The optimum structure of internal channel of sprinkler was obtained by orthogonal test. By means of high-speed photography technology, the frequency of wall-attached switching of jet was measured, and the inlet flow rate of sprinkler was monitored. The results showed that the simulated flow-pressure relation was basically consistent with the experimental results. The relative error range was from 2.1% to 4.0%, and the variation trend of the frequency of wall-attached switching of jet with the inlet pressure was basically the same, and the relative error range was from 7.7% to 22.2%. When the inlet pressure was 0.15 MPa, 0.20 MPa and 0.25 MPa, the hydraulic properties of PY<sub>2</sub>10A impact sprinkler and jet sprinkler were studied, respectively. The flow rate of jet sprinkler was small (1.19 ~ 1.53 m<sup>3</sup>/h), and the range was long (13.0 ~ 15.7 m), the sprinkler irrigation intensity was small (2.85 ~ 3.63 mm/h), and the rotation period was short (81 ~ 105 s). The precipitation of impact sprinkler was “saddle”, the precipitation near and far away was relatively large, the precipitation of jet sprinkler was “triangle”, and the precipitation was decreased with the increase of range. The research provided a reference for the structure design and hydraulic performance optimization of the round rotatory jet sprinkler.

**Key words:** jet sprinkler; orthogonal test; high-speed photography; hydraulic performance test; water distribution

收稿日期: 2018-07-26 修回日期: 2018-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579116)和江苏省科技计划项目(BE2018373)

作者简介: 王新坤(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: xjwxk@126.com

## 0 引言

中国淡水资源短缺,有效利用率较低,为进一步缓解水资源供求压力,提高农田灌溉水利利用系数,研制新型节水灌溉装备和推广高效节水灌溉技术是现代农业发展的新趋势<sup>[1-3]</sup>。喷灌技术是应用最为广泛的节水灌溉技术之一,喷头是喷灌系统中的核心设备,其水力性能很大程度上决定了整体的喷灌效果<sup>[4-5]</sup>。旋转式喷头边喷洒边旋转,水从喷嘴喷出时形成射流状,因此射程较远,是中远射程喷头的基本形式。由驱动机构的特点,旋转式喷头可分为摇臂式喷头、反作用式喷头和叶轮式喷头。目前,国内外应用最普遍的中低压喷头几乎都是摇臂式喷头,就摇臂运动方向来说主要有水平摇臂式喷头和垂直摇臂式喷头两种基本形式<sup>[6]</sup>。水平摇臂式喷头基本结构由喷管、旋转密封装置、驱动装置、换向装置等组成,驱动机构由摇臂、旋转轴、弹簧等组成,由于敲击和撞击的作用,对喷管、摇臂材料的刚性和弹簧稳定性要求较高。李星恕等<sup>[7]</sup>在水平摇臂式喷头原有结构基础上,设计了一种由撑杆、限位杆等组成的仰角可调节机构,研究了4种仰角的喷头水力性能,其中喷头在各象限的转动误差均小于10%,喷头的转动比较均匀。垂直摇臂式喷头靠改变水流运动方向产生的反作用力推动其间歇转动,其驱动机构由摇臂、导流器、平衡配重、摇臂轴等组成。汤跃等<sup>[8]</sup>基于ADAMS虚拟样机技术对垂直摇臂式喷头的旋转和碰撞过程进行了动力学仿真研究,并分析了喷头的结构强度和疲劳寿命。汤攀等<sup>[9]</sup>通过改变垂直摇臂式喷头配重与旋转中心的距离、工作压力和喷嘴直径,通过多目标优化得到了喷头的最优水力性能参数。反作用式喷头是依靠水射流偏离转轴平面对喷管产生反作用力矩驱动喷头旋转,反作用力矩可以连续施加,例如利用挡片、斜孔出流、单稳射流元件等方式,也可以间歇施加,例如利用互控射流元件、流控射流元件等方式。全射流喷头是一种反作用式喷头,利用射流附壁效应完成喷头的直射、步进和反向功能,具有结构简单、水力性能好等优点<sup>[10]</sup>,由于导管的插拔深度对全射流喷头的正常工作有较大影响,并且射流附壁力较小,该喷头也存在工作不稳定的情况。朱兴业等<sup>[11]</sup>对PY<sub>1</sub>30型摇臂式喷头和30PXH型全射流喷头进行水力性能试验对比,发现全射流喷头可以通过改变导管长度来改变步进角度,可调节性较好。刘俊萍<sup>[12]</sup>对全射流喷头进行内部流场计算,重点研究了动静片下游及上游压差和速度在不同喷头转动角度时的变化规律。

正交试验设计是利用正交表科学合理安排试验,通过部分试验得到影响试验指标的最优因素水平组合<sup>[14]</sup>,正交试验法在结构优化设计中有广泛应用<sup>[15]</sup>,能够得到很好的效果,具有科学性、合理性。本文设计一种反作用式喷头——全圆旋转射流喷头<sup>[13]</sup>,该喷头通过射流的附壁切换特性实现喷头的步进和直射过程,在副喷嘴出口安装驱动板为喷头旋转提供驱动力,并采用正交试验对喷头内流道进行结构优化,以实现喷头旋转稳定、水力性能较好的目的。

## 1 全圆旋转射流喷头结构与原理

### 1.1 喷头结构

全圆旋转射流喷头是指利用射流的附壁切换效应实现喷头旋转喷洒过程的射流喷头。图1为喷头结构剖面图,喷头中间部分为射流元件,为了能让水流和射流元件壁面充分接触,流道壁面设计为方形结构,进口段包括一定长度的导流段,由圆形进口过渡到方形进口,然后通过喷体部分过渡到喷管的圆形结构,图1中 $w$ 、 $s$ 、 $\beta$ 、 $H$ 是射流元件的主要结构尺寸,分别为进口宽度、位差、侧壁倾角、分流劈距,不同结构尺寸的射流元件工作效果不同, $k$ 为喷头进口深度, $d$ 为喷头进口直径, $\alpha$ 为喷头进口收缩角<sup>[16]</sup>。与射流元件连接的为喷头的旋转密封机构,该机构主要包括轴套、空心轴、密封圈等,射流元件

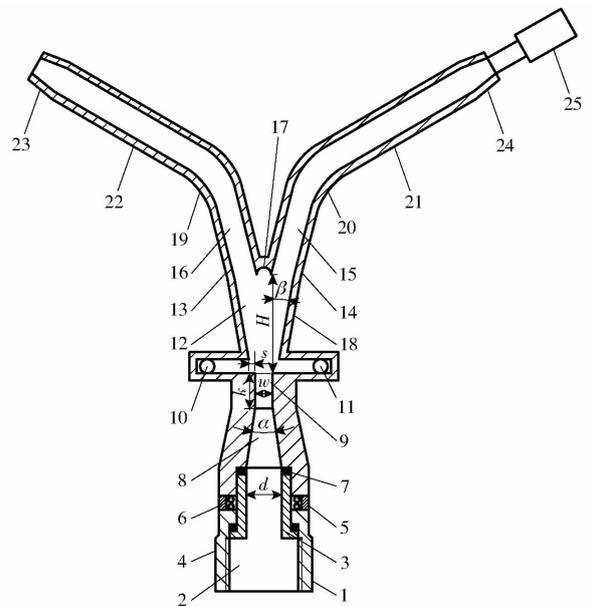


图1 全圆旋转射流喷头剖面图

Fig.1 Structure diagram of round rotary jet sprinkler

1. 旋转密封机构 2. 喷头进口 3. 空心轴 4. 轴套 5. 弹簧罩
6. 弹簧 7. 橡胶垫片 8. 导流段 9. 射流元件进口 10. 反馈口I
11. 反馈口II 12. 射流空间 13. 左侧壁面 14. 右侧壁面
15. 右侧流道 16. 左侧流道 17. 分流劈 18. 射流元件 19. 主喷体
20. 副喷体 21. 副喷管 22. 主喷管 23. 主喷嘴 24. 副喷嘴
25. 驱动板

进口两侧为控制道,通过控制管连接,射流元件一端出口通过主喷体与主喷管连接,主喷管连接主喷嘴,另一端出口通过副喷体与副喷管连接,副喷管连接副喷嘴,副喷嘴出口安装固定驱动板。

## 1.2 喷头工作原理

压力水流进入喷头射流元件时,高速射流在 Coanda 效应<sup>[17]</sup>的作用下会附着于一侧壁面,此时射流和左侧壁面的封闭空间为低压旋涡空间,当主射流附着于左侧壁时,水流主要从主喷嘴中射出,此时,喷头处于直射状态,在射流附壁一段时间后,负压通过反馈控制管传递到另一侧空间,切换射流附壁方向,水流转而从副喷嘴中射出,并击打驱动板,使喷头获得旋转力矩,喷头开始旋转,此时喷头处于步进状态。主喷嘴和副喷嘴交替喷洒,实现射流喷头的直射和步进动作,在不增加喷洒强度的情况下,解决了喷头近处喷洒均匀度问题。全圆旋转射流喷头是用射流元件取代了摇臂式驱动的一套复杂机构,射流元件结构简单,省去了现有摇臂式喷头的弹簧与摇臂,简化了驱动与换向结构,通过驱动板分散喷洒水流,与直射流的喷洒水量相互互补。

## 1.3 喷头的射流附壁切换特性

射流喷头正常工作时,其流道内的射流需要进行附壁切换,反映其工作性能的参数主要有附壁切换频率和流量振幅等。附壁切换频率为单位时间内射流附壁切换的次数,频率越高说明射流附壁特性越稳定,流量振幅为射流喷头出口流量的差值,流量振幅越大,单边的出口流量越大,射流的附壁偏转效果越好。

## 2 关键结构正交试验

### 2.1 CFD 数学建模和参数设置

在 Pro/E 软件中画出喷头的三维水体模型,如图 2a 所示,导入 CFD 软件 ICEM 中进行网格划分,如图 2b 所示,由于喷头过渡段等结构不规则,因此采用四边形非结构网格对三维模型进行网格划分,消除结构网格中节点的结构限制,节点和单元的可控性较好,能更好地处理边界问题<sup>[18]</sup>,在喷头过渡段对网格进行局部加密,以提高网格整体质量,网格数量为 77 047,网格质量在 0.37 以上。

应用 CFD 软件 Fluent 对射流喷头水体模型进行模拟,射流喷头内部流型包括湍射流、涡流,采用三维不可压缩 N-S 方程来描述射流喷头内部的流动。RNG  $k-\varepsilon$  模型可以很好地计算强旋流和带有弯曲壁面的流动,由于射流喷头中存在此类流动,因此选用 RNG  $k-\varepsilon$  模型进行计算。采用压力进口,喷头进口压力设置为 0.1 ~ 0.3 MPa,主喷嘴和副喷

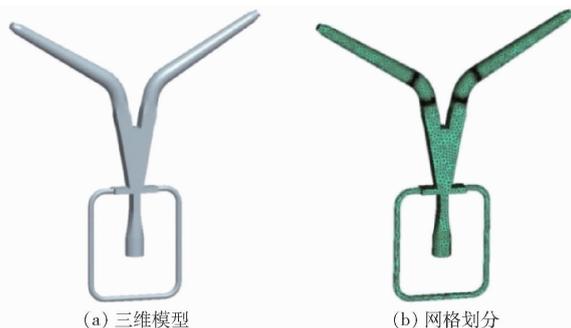


图 2 全圆旋转射流喷头三维模型和网格划分

Fig. 2 Three-dimensional model and mesh generation of round rotatory jet sprinkler

嘴出口压力为一个大气压,均采用瞬态模拟,时间步长为 0.001 s,流体介质为水,收敛精度为  $10^{-4}$ 。

## 2.2 喷头的正交试验设计

### 2.2.1 试验因素

全圆旋转射流喷头中,选取深宽比  $k/w$ 、位差比  $s/w$ 、劈距比  $H/w$ 、侧壁倾角  $\beta$  作为试验因素,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别代表  $k/w$ 、 $s/w$ 、 $H/w$ 、 $\beta$ ,喷头进口直径为 10 mm,工作压力 0.25 MPa,因素水平选择如表 1 所示,选用  $L_9(3^4)$  正交表,通过 9 组试验得到上述结构参数对附壁切换频率  $f$  和流量振幅  $\Delta Q$  的影响规律,  $A$  取 2 ~ 3,  $B$  取 0.375 ~ 0.525,  $C$  取 7 ~ 9,  $D$  取  $10^\circ \sim 12^\circ$ 。

表 1 因素水平

Tab. 1 Level of factors in orthogonal experiments

水平	因素			
	A	B	C	D/(°)
1	2.0	0.375	7	10
2	2.5	0.450	8	11
3	3.0	0.525	9	12

### 2.2.2 试验结果

试验结果见表 2 ( $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  水平值),可以看出 7 组喷头具有较好的射流附壁切换特性,其中喷头 6、8 的射流不能附壁切换,主要是因为劈距太小而位差太大。

表 2 试验方案和试验结果

Tab. 2 Test scheme and results in orthogonal experiments

试验号	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$f/$ (次·s <sup>-1</sup> )	$\Delta Q/$ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	1	1	1	1	12.5	0.147
2	1	2	2	2	12.0	0.144
3	1	3	3	3	9.0	0.133
4	2	1	2	3	12.5	0.054
5	2	2	3	1	13.0	0.061
6	2	3	1	2		
7	3	1	3	2	11.0	0.061
8	3	2	1	3		
9	3	3	2	1	12.0	0.104

采用直接分析法对正交结果进行分析,表3中 $K_i$ 为每个因素 $i$ 个水平的数值之和, $k_i$ 为每个因素 $i$ 个水平的平均值,反映各因素的优水平与优组合, $R$ 为极差,反映各因素的主次水平。

表3 正交试验结果分析

Tab.3 Results analysis of orthogonal experiments

性能指标		A	B	C	D
附壁切换频率	$K_1$	33.5	36.0	12.5	37.5
	$K_2$	25.5	25.0	36.5	23.0
	$K_3$	23.0	21.0	33.0	21.5
	$k_1$	11.2	12.0	12.5	12.5
	$k_2$	12.8	12.5	12.2	11.5
	$k_3$	11.5	10.5	11.0	10.8
	$R$	1.3	2.0	1.5	1.7
	流量振幅	$K_1$	0.424	0.262	0.147
$K_2$		0.115	0.205	0.302	0.205
$K_3$		0.165	0.237	0.255	0.187
$k_1$		0.141	0.087	0.147	0.104
$k_2$		0.058	0.103	0.101	0.103
$k_3$		0.083	0.079	0.085	0.094
$R$		0.083	0.024	0.062	0.010

由表3可知,影响附壁切换频率的因素主次顺序为 $B、D、C、A$ ,影响流量振幅的因素主次顺序为 $A、C、B、D$ ,说明位差比对射流附壁切换频率的影响最大,深宽比对射流附壁切换频率的影响最小,但是深宽比对流量振幅影响最大,侧壁倾角对流量振幅影响最小。

根据各几何参数对射流附壁特性的影响可知,附壁切换频率的最佳组合为 $A_2B_2C_1D_1$ ,流量振幅的最佳组合为 $A_1B_2C_1D_1$ ,为了分析各因素对喷头附壁特性的影响程度,定义了相对影响指数<sup>[19]</sup>

$$E = R / (k_1 + k_2 + k_3) \times 100\% \quad (1)$$

$E$ 越大,说明因素对喷头的附壁特性影响越大,因素 $A$ 对附壁切换频率和流量振幅的影响指数分别为3.7%和29.4%,说明因素 $A$ 对流量振幅的影响较大,因此最优结构组合为 $A_1B_2C_1D_1$ ,由正交试验得到的喷头射流元件最优结构为:深宽比2,位差比0.45,劈距比7,侧壁倾角 $10^\circ$ 。

喷头的喷管、喷体、喷嘴等结构参数参考摇臂式喷头的设计原理<sup>[20]</sup>,喷头的主要结构参数见表4。

表4 射流喷头主要结构参数

Tab.4 Main structural parameters of jet sprinkler

参数	$w/mm$	$k/w$	$s/w$	$\beta/(^\circ)$	$H/w$	$D_1/mm$	$\alpha/(^\circ)$
数值	5	2	0.45	10	7	10	16
参数	$D_2/mm$	$D_{cm}/mm$	$r_{cp}/D_{cm}$	$L_{cm}/D_{cm}$	$\theta/(^\circ)$	$D_c/mm$	$\theta_1/(^\circ)$
数值	5	7	1	8	30	4	15

注: $D_1$ 为进水口公称直径, $D_2$ 为控制管直径, $D_{cm}$ 为喷管直径, $r_{cp}/D_{cm}$ 为相对弯曲半径, $L_{cm}/D_{cm}$ 为喷管相对长度, $\theta$ 为喷射仰角, $D_c$ 为喷嘴直径, $\theta_1$ 为喷嘴内锥角。

### 3 喷头水力性能试验

对喷头的射流附壁特性和喷洒特性进行试验研究,射流喷头的射流附壁特性试验方法采用高速摄影法,通过高速摄影仪捕捉射流的附壁切换频率,通过喷洒试验对喷头的喷洒特性进行试验测试。

#### 3.1 试验材料与试验方法

试验于2018年7月在江苏大学喷灌大厅进行,参照文献[21],搭建喷灌试验测试系统,试验测试系统包括高速摄影仪、离心泵、输水管、阀门、0.25级精度压力表、0.2级精度流量计、精度为0.01s的秒表、米尺、喷头和雨量筒等,雨量筒的开口直径为22cm,雨量筒沿径向布置,间距1m,一直延伸到射程之外,喷头安装高度1.2m。图3为高速摄影试验的示意图,试验现场采用黑色幕布作为拍摄背景以保证图像的清晰度,采用i-Speed3型摄像机,帧率10000f/s,选用焦距为50mm的定焦镜头,压力表安放在低于喷头0.5m处,在喷灌系统泵出口安装流量计测量喷头的进口流量,射流喷头为有机玻璃材质。试验中,将副喷嘴的驱动板方向调为向下,使喷头保持静止,由于射流击打驱动板会分散水流,用套筒将副喷嘴套上,使水流朝着固定方向射出。进行喷洒试验时,对进水口公称直径10mm、主副喷嘴直径均为4mm的喷头模型进行试验研究,并且用PY<sub>2</sub>10A型(4.5mm×2.5mm)摇臂式喷头进行水力性能对比试验,图4为试验模型,图5为试验场地,调节压力表压力为0.15、0.20、0.25MPa,通过流量计记录喷头进口流量,米尺记录喷头射程,秒表记录喷头转过一周所用时间,雨量筒测量水深,喷头每次喷洒时间为20min。

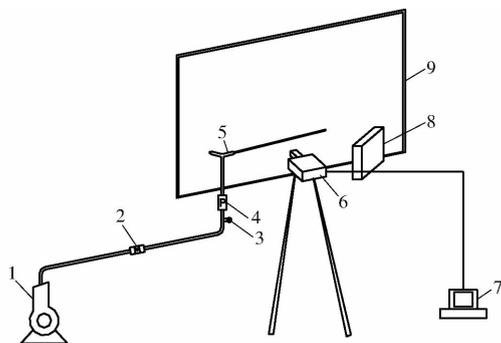


图3 高速摄影试验装置示意图

Fig.3 Schematic of high-speed photography test device

1.水泵 2.流量计 3.阀门 4.压力表 5.喷头 6.高速摄影仪 7.计算机 8.光源 9.黑幕

#### 3.2 高速摄影试验结果

##### 3.2.1 射流喷头流量-压力特性

进口流量和进口压力的关系是喷头的主要外特性曲线,通过对比试验和模拟所得到的关系曲线可



(a) 射流喷头 (b) 摇臂式喷头

图4 摇臂式喷头和射流喷头试验样机

Fig. 4 Experimental prototypes of impact sprinkler and jet sprinkler



图5 试验场地

Fig. 5 Test site

以验证数值模拟的准确性,设置进口压力为0.1~0.3 MPa,图6为喷头的流量压力特性曲线。由图可知,在进口压力较小时,模拟误差较小,随着进口压力增大,模拟误差也相应增大,且模拟值大于试验值,主要是因为进口压力增大,流量损失增大,模拟值与试验值的相对误差为2.1%~4.0%,说明本研究建模合理,模拟方法准确,能够有效地对喷头的内部流动情况进行数值模拟。

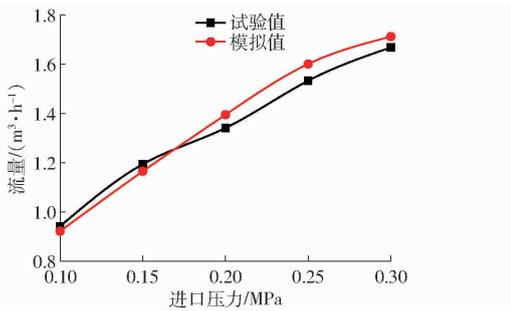


图6 流量随压力的变化曲线

Fig. 6 Variation of flow rate with different pressures

表5 摇臂式喷头与射流喷头在3种压力下的流量、射程、平均喷灌强度和转动周期

Tab. 5 Mass flow, range, irrigation intensity and rotation period of impact sprinkler and jet sprinkler at three working pressures

喷头类型	工作压力 0.15 MPa				工作压力 0.20 MPa				工作压力 0.25 MPa			
	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	射程/ m	平均喷灌 强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	转动 周期/s	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	射程/ m	平均喷灌 强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	转动 周期/s	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	射程/ m	平均喷灌 强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	转动 周期/s
摇臂	1.36	13.2	3.00	112	1.43	13.9	3.51	121	1.62	14.2	3.90	125
射流	1.19	13.0	2.85	105	1.34	14.3	3.18	96	1.53	15.7	3.63	81

### 3.2.2 射流喷头的射流附壁特性

图7为射流喷头的射流附壁切换频率和进口压力的关系。可以看出,随着喷头进口压力的增大,模拟误差也相对增大,且模拟值大于试验值。模拟值与试验值的相对误差为7.7%~22.2%,喷头内流道结构和外部干扰会一定程度影响射流的附壁切换频率,试验结果表明模拟值和试验值的变化趋势基本相同且偏差较小,因此模拟值能较好地反映试验值。

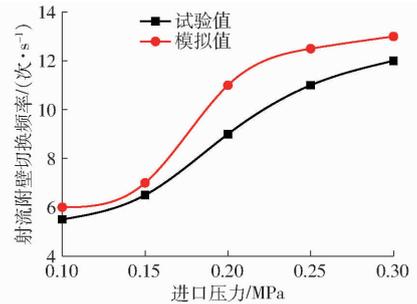


图7 射流附壁切换频率随压力的变化曲线

Fig. 7 Variation of jet frequency of wall-attached switching with different pressures

### 3.3 喷洒试验结果

#### 3.3.1 喷头流量、射程、喷灌强度和转动周期

表5为摇臂式喷头和射流喷头在3个工作压力下的流量、射程、平均喷灌强度和转动周期,随着工作压力增加,喷头进口流量不断增加,摇臂式喷头流量为1.36~1.62  $\text{m}^3/\text{h}$ ,射流喷头流量为1.19~1.53  $\text{m}^3/\text{h}$ ,在两种的喷头进口压力和喷嘴直径相同时,喷头进口流量基本相同。随着工作压力增大,喷头射程逐渐增大,摇臂式喷头射程为13.2~14.2 m,射流喷头射程为13.0~15.7 m,射流喷头的射程较远,基本可以满足特定压力下的喷灌要求,因此具有较好的应用价值。当喷头进口流量基本相同时,摇臂式喷头平均喷灌强度为3.00~3.90  $\text{mm}/\text{h}$ ,射流喷头平均喷灌强度为2.85~3.63  $\text{mm}/\text{h}$ ,摇臂式喷头的平均喷灌强度较大。进口压力对摇臂式喷头的转动周期影响较小,摇臂式喷头转动周期为112~125 s,进口压力对射流喷头的转动周期影响较大,射流喷头转动周期相对较短,为81~105 s,由于射流喷头的旋转驱动力主要是副喷嘴水流间断性击

打驱动板的结果,可以通过改变驱动板的倾角和喷管长度来改变喷头所受力矩,从而调整喷头的转动效果。

### 3.3.2 喷头水量分布特性

图8为摇臂式喷头和射流喷头在0.15、0.20、0.25 MPa工作压力下的喷头喷洒水量分布图,由图可知,摇臂式喷头和射流喷头的喷洒水量分布有较大不同,相比之下,摇臂式喷头喷洒水量分布呈“马鞍形”,降水深为0.5~2.2 mm,其中喷头近处和远处的喷洒水量较多,中间喷洒水量较少,整体来说,

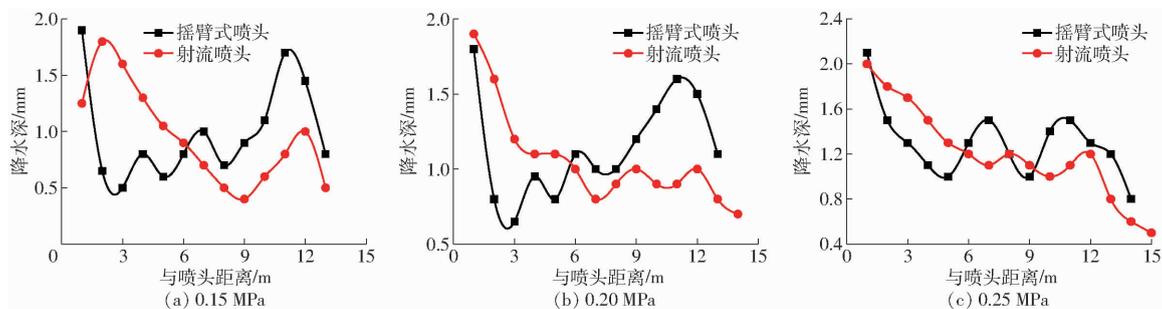


图8 不同压力下摇臂式喷头与射流喷头的喷洒水量分布

Fig. 8 Water distributions of impact sprinkler and jet sprinkler at different pressures

## 4 结论

(1)通过四因素三水平正交试验模拟得到了射流喷头的射流附壁特性最优结构,结合摇臂式喷头的设计要求初步设计了射流喷头的结构。

(2)通过高速摄影试验验证了射流喷头的流量

压力特性和射流附壁切换特性,流量偏差不大于4.0%,频率偏差不大于22.2%。

(3)对摇臂式喷头和射流喷头进行喷洒试验,得到了喷头的射程、喷灌强度、转动周期和水量分布等特性,试验结果表明,射流喷头水力性能较优,具有较好的发展前景。

## 参 考 文 献

- [1] 徐文静,王翔翔,施六林,等. 中国节水灌溉技术现状与发展趋势研究[J]. 中国农学通报,2016,32(11):184-187.  
XU Wenjing, WANG Xiangxiang, SHI Liulin, et al. Current condition and developing tendency of water-saving irrigation technology in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(11):184-187. (in Chinese)
- [2] 方子云,包放. 世界水资源的进展与展望[J]. 水资源研究,2008,29(3):21-23.  
FANG Ziyun, BAO Fang. Technology status and future development focus of spray and micro irrigation [J]. Journal of Water Resources Research, 2008,29(3):21-23. (in Chinese)
- [3] 国家发展和改革委员会、水利部、建设部. 水利改革发展“十三五”规划[R]. 光明日报,2016-12-24(2).
- [4] 李英能. 对我国喷灌技术发展若干问题的探讨[J]. 节水灌溉,2000(1):1-3.  
LI Yingneng. A discussion on several problems of sprinkler irrigation technique development in China [J]. Water Saving Irrigation, 2000(1):1-3. (in Chinese)
- [5] 施少培,谢崇宝,高虹,等. 喷灌技术发展历程及设备存在问题的探讨[J]. 节水灌溉,2013(11):78-81.  
SHI Shaopei, XIE Chongbao, GAO Hong, et al. Sprinkler irrigation technology development and existing equipment problems [J]. Water Saving Irrigation, 2013(11):78-81. (in Chinese)
- [6] 徐胜荣,王新坤,肖思强,等. 双喷嘴射流喷头数值模拟和射程试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):981-985.  
XU Shengrong, WANG Xinkun, XIAO Siqiang, et al. Numerical simulation and experimental study on double-nozzle jet sprinkler [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(10): 981-985. (in Chinese)
- [7] 李星恕,张建宾,韩文霆. 仰角可调摇臂式喷头水力性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):34-39.  
LI Xingsu, ZHANG Jianbin, HAN Wenting. Experiments on hydraulic performance of impact sprinkler with adjustable elevation angel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 34-39. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150206&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150206&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.006. (in Chinese)

- [15] 张瑶, 罗先武, 许洪元, 等. 热力学空化模型的改进及数值应用[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1671-1674.  
ZHANG Yao, LUO Xianwu, XU Hongyuan, et al. The improvement and numerically applications of a thermodynamic cavitation model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(10): 1671-1674. (in Chinese)
- [16] 时素果, 王国玉. 一种修正的低温流体空化流动计算模型[J]. 力学学报, 2012, 44(2): 269-277.  
SHI Suguo, WANG Guoyu. A modified Kubota cavitation model for computations of cryogenic cavitation flows[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(2): 269-277. (in Chinese)
- [17] MENTER F R. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows[R]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1992: NASA TM-103975.
- [18] STRELETS M. Detached eddy simulation of massively separated flows[J]. AIAA Journal, 2001: AIAA 2001-0879.
- [19] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]//ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow, 2004: Paper No. 152.
- [20] MARKLE C L, FENG J, BUELOW P E O. Computational modeling of dynamics of sheet cavitation[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation, 1998: 307-313.
- [21] SINGHAL A K, LI H Y, ATHAVALE M M. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[C]//ASME FEDSM.01, 2001.
- [22] MOORE R D, RUGGERI R S. Method for prediction of pump cavitation performance for various liquids, liquid temperatures, and rotative speeds[R]. NASA Technical Note, 1969: NASA TN D-5292.
- [23] 姚允斌. 物理化学手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [24] SINGHAL A, ATHAVALE M. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- [25] ANDERSON B H, BENSON T J. Numerical solution to the glancing sidewall oblique shock wave/turbulent boundary layer interaction in three-dimension[C]//21st Aerospace Sciences Meeting, 1983.

(上接第 137 页)

- [8] 汤跃, 赵进, 陈超. 基于 ADAMS 的垂直摇臂式喷头多体动力学建模与优化[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 28-32.  
TANG Yue, ZHAO Jin, CHEN Chao. Dynamic simulation and optimization of vertical impact drive sprinkler by considering friction coefficient [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 28-32. (in Chinese)
- [9] 汤攀, 李红, 陈超, 等. 考虑工作压力的垂直摇臂式喷头可调结构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 99-105.  
TANG Pan, LI Hong, CHEN Chao, et al. Optimization and experiment of adjustable structural parameters for vertical impact sprinkler with working pressure [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 99-105. (in Chinese)
- [10] 李扬帆. 多因素下全射流喷头射程计算模型及试验[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(8): 685-689.  
LI Yangfan. Theoretical model and experiment on fluidic sprinkler wet radius under multi-factor [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(8): 685-689. (in Chinese)
- [11] 朱兴业, 袁寿其, 李红. 全射流喷头与摇臂式喷头的对比试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 70-73.  
ZHU Xingye, YUAN Shouqi, LI Hong. Compared experiments between complete fluidic and impact sprinkler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 70-73. (in Chinese)
- [12] 刘俊萍. 喷灌系统变量喷洒理论与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.  
LIU Junping. Theoretical and experimental study on variable spraying in sprinkler irrigation system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- [13] 王新坤. 一种双喷嘴射流喷头及喷洒方法: CN105944856A [P]. 2016-09-21.
- [14] 沈艳宁, 袁寿其. 复合叶轮离心泵数值模拟正交试验设计方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 22-26.  
SHEN Yanning, YUAN Shouqi. Orthogonal test design method based on numerical simulation for non-overload centrifugal pump with complex impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 22-26. (in Chinese)
- [15] 陈达亮, 王东. 基于正交试验法的离合器动力学模型优化[J]. 机械工程与自动化, 2018(4): 160-162.  
CHEN Daliang, WANG Dong. Clutch dynamic model optimization based on orthogonal experiment method [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(4): 160-162. (in Chinese)
- [16] 高世凯. 射流振荡三通与滴灌毛管脉冲特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.  
GAO Shikai. Study on jet-oscillation tee and pulsed performance of drip irrigation laterals [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- [17] HENRI C. Device for deflecting a stream of elastic fluid projected into an elastic fluid; US 2052869A [P]. 1936-09-01.
- [18] 汤攀, 李红. 比例施肥泵驱动活塞受力分析及内部流动模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 93-98.  
TANG Pan, LI Hong. Force analysis of drive piston and simulation and experiment of internal flow for proportional fertilizer pump [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 93-98. (in Chinese)
- [19] 曹卫东, 刘光辉, 刘冰. 两级离心泵径向导叶水力优化[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(32): 663-668.  
CAO Weidong, LIU Guanghui, LIU Bing. Hydraulic optimization of radical guide vanes in two-stage centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(32): 663-668. (in Chinese)
- [20] 蒋定生. 摇臂式喷头设计原理[M]. 北京: 水利出版社, 1981: 39-76.
- [21] GB/T 7867-1997 旋转式喷头[S]. 1997.