

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.031

双喷嘴负压反馈射流喷头水力性能研究

王新坤 薛子龙 徐胜荣 樊二东 王 轩 张晨曦

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为简化摇臂式喷头结构、提高其水力性能,通过负压反馈技术设计了一种双喷嘴射流喷头,包括射流元件、主副喷管、旋转密封机构等,其主副喷管长度分别为 5.6 mm 和 4.8 mm、喷头仰角为 30°,左右喷管里产生的间歇脉冲水流能够驱使喷头步进式全圆旋转。在 0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 进口压力下,以射程、平均喷灌强度和喷灌均匀度为评价指标,通过加权评分法,对比了 4 种不同主副喷嘴直径组合(4 mm×3 mm、4 mm×4 mm、5 mm×4 mm 和 5 mm×5 mm)射流喷头与摇臂式喷头的水力性能。结果表明:在上述 4 种进口压力下,主副喷嘴直径分别为 5 mm 和 4 mm 时的射流喷头综合性能最好,其水量分布呈“三角形”,射程在 13.2~13.7 m 之间,平均喷灌强度在 3.81~4.38 mm/h 之间,喷灌均匀性系数在 82.5%~86.0% 之间。

关键词: 负压反馈; 双喷嘴; 喷嘴直径; 水力性能

中图分类号: S277.9⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0278-07

Hydraulic Performance of Negative Pressure Feedback Jet Sprinkler with Double Nozzles

WANG Xinkun XUE Zilong XU Shengrong FAN Erdong WANG Xuan ZHANG Chenxi

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

Abstract: In order to simplify the structure of rocker-arm sprinkler and improve its hydraulic performance, a jet sprinkler with double nozzles was designed by using negative pressure feedback technology, including jet elements, main and auxiliary nozzles and rotary sealing mechanism. The length of the main and auxiliary nozzles were 5.6 mm and 4.8 mm, respectively, and the elevation angle of the nozzle was 30°. The sprinkler was innovative in its mechanism and spraying method. The pulsed oscillating water flow can be formed between the main sprinkler and the auxiliary sprinkler by using the wall-attaching effect of the jet. The step-by-step rotating sprinkler can be realized by intermittent striking of the driving plate by the pulsed jet. The main nozzle of negative pressure feedback jet nozzle provided a long range jet, while the secondary nozzle jet struck the driving plate connected with it, breaking the whole continuous jet into small droplets, providing a jet with a relatively short range, and providing a rotating driving force for the nozzle, thus realizing full circle rotation. Under the inlet pressure of 0.20 MPa, 0.25 MPa, 0.30 MPa and 0.35 MPa, taking range, average sprinkler irrigation intensity and sprinkler irrigation uniformity as evaluation indexes, the hydraulic performances of six different diameter combinations of main and auxiliary nozzles (3 mm×3 mm, 4 mm×3 mm, 4 mm×4 mm, 5 mm×3 mm, 5 mm×4 mm and 5 mm×5 mm) were compared by weighted scoring method. The results showed that under the above four inlet pressures, the jet nozzles with diameters of 5 mm and 4 mm had the best comprehensive performance. The water distribution was “triangular”, the range was 13.2~13.7 m, the average intensity of sprinkler irrigation was 3.81~4.38 mm/h, and the uniformity of sprinkler irrigation was 82.5%~86.0%. The results provided certain theoretical value for studying the hydraulic characteristics of negative pressure feedback nozzle and optimizing the nozzle structure, and brought ideas and applications for the nozzle technical field.

Key words: negative pressure feedback; double nozzles; nozzle diameter; hydraulic performance

收稿日期: 2019-05-09 修回日期: 2019-06-12

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

我国农业生产耗水量较大,需要大力发展节水灌溉农业装备,以提高水资源的利用率。喷灌是指利用压力装置和喷灌喷头对农田作物进行喷洒的灌溉方式,是一项先进的节水灌溉技术^[1-3]。喷头是喷灌系统的核心设备,其性能直接影响喷灌系统整体的喷灌效果。摇臂式喷头广泛应用于大田喷灌、露天苗圃、菜园和园艺场等场所,是使用最广泛、性能最稳定的喷头之一^[4-5]。喷灌均匀度是喷头设计的一项重要技术指标,涉及到灌水质量与项目资金投入^[6],通过改变喷头结构与组合方式能够有效提高喷灌均匀度^[7-9]。针对摇臂式喷头工作不稳定的问题,研究人员对喷头的驱动机制与工作参数进行了相关研究^[10-12]。目前,对摇臂式喷头结构设计、布置方式和喷灌的研究已较为成熟,但其仍存在结构复杂、使用寿命短的问题,且尚未见负压反馈式射流喷头的研究报道。

为了简化喷头结构,本文通过射流反馈技术^[13-14]设计一款负压反馈射流喷灌喷头(简称射流喷头)。该喷头利用射流附壁效应^[15]在主副喷管间形成脉冲振荡水流,通过脉冲射流间歇性击打驱动板来实现喷头步进式旋转喷洒。射流喷头的主喷嘴提供射程较远的射流,副喷嘴射流击打与之相连的驱动板,将完整连续射流破碎成小水滴,提供射程较近的射流,同时为喷头提供了旋转驱动力,从而实现全圆旋转。通过研究不同主副喷嘴直径组合下射流喷头的水力性能,优选出综合性能较好的射流喷头。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置包括负压反馈射流喷头、PY₂10 摇臂式喷头(简称摇臂喷头)、离心泵、高速摄影仪、输水管、阀门、0.25 级精度压力表、秒表、喷头、雨量筒和皮卷尺等。负压反馈射流喷头由射流元件、喷管、喷嘴、旋转密封机构组成,如图 1 所示。射流元件为喷头的核心部分,其进口部分与旋转机构连接,左右流道分别与主副喷管连接,其中副喷管上设有矩形驱动板。射流元件整体由上盖板和下盖板组成,上盖板设有 2 个反馈口,并通过硅胶控制管相连。射流喷头工作时,由卷吸作用^[16]产生的负压通过硅胶管在左右控制道之间传递,从而实现射流在左右流道内的规律切换。为了能更好观察射流在喷头内的工作方式,喷头加工材料选择为有机透明玻璃。

本文对主喷嘴直径分别为 3、4、5 mm 的射流喷头进行水力性能试验,并与摇臂喷头进行对比。对

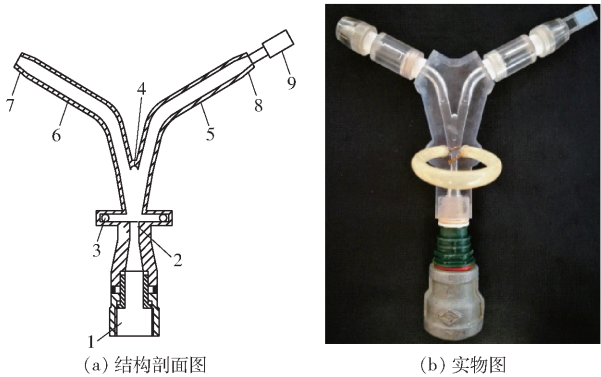


图 1 负压反馈射流喷头

Fig. 1 Negative pressure feedback jet sprinkler

1. 旋转密封机构 2. 射流元件进口 3. 反馈口 4. 分流劈 5. 副喷管 6. 主喷管 7. 主喷嘴 8. 副喷嘴 9. 驱动板

双喷嘴喷头而言,由于副喷嘴主要是对中近射程的喷洒水量进行补偿,因此主喷嘴直径一般大于或等于副喷嘴直径,本文研究对象为主副喷嘴直径组合 3 mm × 3 mm、4 mm × 3 mm、4 mm × 4 mm、5 mm × 3 mm、5 mm × 4 mm 和 5 mm × 5 mm 的喷头。除喷嘴外,试验所用射流喷头结构尺寸均相同,主要结构参数:主喷管长度 5.6 mm,副喷管长度 4.8 mm,喷射仰角 30°。

1.2 试验方法

射流喷头水力性能试验在江苏大学喷灌实验室内进行,该实验室直径为 44 m,试验场地平整,最大坡度小于 1%,室内为无风环境。试验样机选取主副喷嘴直径为 3 mm × 3 mm、4 mm × 3 mm、4 mm × 4 mm、5 mm × 3 mm、5 mm × 4 mm 和 5 mm × 5 mm 的 6 组射流喷头,喷头安装高度 1.2 m,在进口压力分别为 0.20、0.25、0.30、0.35 MPa 时做全圆喷洒。喷头进口压力由安放在低于喷头 0.5 m 处的 0.25 级精度压力表测量,脉冲性能与步进方式由高速摄影仪拍摄记录。射程由皮卷尺测出,喷灌强度与喷灌均匀度由开口直径为 22 cm、高度 0.6 m 的雨量筒以 0.5 m 间距按径向布置测得。在喷头稳定转动 5 min 后开始试验,每次试验时间为 20 min,具体操作参照 GB/T 22999—2008^[17]。为降低试验误差,每组试验重复 3 次取平均值,图 2 为试验示意图。

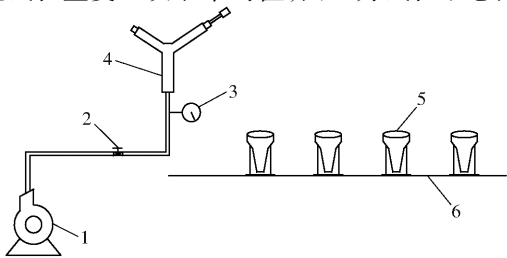


图 2 试验示意图

Fig. 2 Test schematic

1. 水泵 2. 阀门 3. 压力表 4. 喷头 5. 雨量筒 6. 皮尺

1.3 水力性能评价方法

射程、喷灌强度和喷灌均匀度是评价喷头水力性能的几个重要参数指标。

1.3.1 射程

射程是喷灌设备的重要性能参数,它决定了喷头的喷洒湿润圆半径,直接影响了喷头组合间距、支管数量、管道间距等,其计算公式^[18-19]有以喷嘴出口流速和喷嘴出口流量两种表示形式

$$R = \frac{v^2}{g} \sin(2\alpha) = 2\varphi^2 H \sin(2\alpha) \tag{1}$$

$$R = \frac{0.39}{u} \frac{Q}{\sqrt{d^3}} \tag{2}$$

$$v = \varphi \sqrt{2gH} \tag{3}$$

式中 R ——喷头射程,m
 α ——喷头的喷射仰角
 v ——喷嘴出口流速,m/s
 φ ——速度系数
 g ——重力加速度,m/s²
 H ——喷头的进口压力,kPa
 u ——孔口系数
 Q ——喷嘴出流量,m³/s
 d ——孔口直径,m

1.3.2 喷灌均匀度

喷灌均匀度指喷洒域内水量分布的均匀程度,它与喷头的水量分布、喷头结构和转速有关。我国制定的《喷灌工程技术规范》^[20]中通过Christiansen^[21-23]计算法,用喷灌均匀性系数来表示喷灌均匀度,计算公式为

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{\sum_{i=1}^n h_i} \right) \times 100\% \tag{4}$$

式中 C_u ——喷灌均匀性系数,%
 h_i ——第*i*个测点的降水深,mm
 $\bar{h}$ ——各测点的平均降水深,mm
 n ——测点数目

1.3.3 平均喷灌强度

假设喷灌区域内每点代表的面积相等,平均喷灌强度反映了控制面积内所有点单位时间内喷灌强度的平均值。本文试验时雨量筒大小相同且分布距离相等,可以看成面积相同的点,平均喷灌强度计算公式^[24]为

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n'} p_i}{n'} \tag{5}$$

式中 $\bar{p}$ ——平均喷灌强度,mm/h

p_i ——第*i*个雨量筒喷灌强度,mm/h
 n' ——雨量筒数量

2 结果与分析

当进口压力为0.20、0.25、0.30、0.35 MPa时,由于5 mm×3 mm射流喷头主副喷嘴直径差较大,3 mm×3 mm射流喷头主副喷嘴直径过小,两组射流喷头的副喷嘴流量和旋转驱动力过小,因此均不能正常工作。当进口压力为0.20 MPa时,4 mm×3 mm射流喷头因为副喷嘴流量和旋转驱动力过小,喷头亦不能正常工作。本文主要研究4 mm×3 mm、4 mm×4 mm、5 mm×4 mm、5 mm×5 mm和摇臂喷头在上述4种进口压力下的水力性能。

2.1 脉冲性能

射流喷头的脉冲频率较大,本文利用i-Speed3型摄像机(帧率10 000 f/s,焦距50 mm)观察射流喷头的脉冲性能,试验光源采用120 W LED白光灯,观测结果如图3所示。

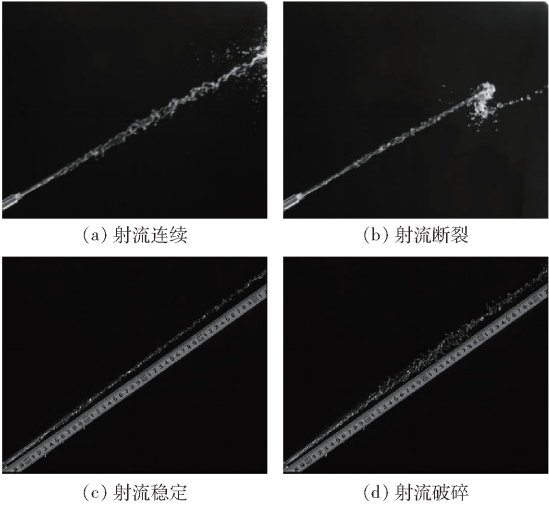


图3 不同射流状态

Fig.3 Different jet states

图3a和图3b是射流喷头不安装喷嘴时的出流状态,可以看出喷嘴出流主要有连续与断裂两种状态,射流连续时以较均匀水柱射出,射流断裂时以“Z”字形状态射出,射流断裂时为水流在射流喷头主副喷管内切换时刻。图3c与图3d是射流喷头安装喷嘴后的出流状态,发现喷嘴射流为稳定出流和破碎加剧两种状态,此时射流并没有出现明显的断裂状态,主要是因为安装喷嘴使出流更加稳定,并且喷嘴对射流元件的反馈压力会加快射流的脉冲频率,因此观察不到明显断裂过程。射流喷嘴的出流为间歇、振荡式的,通过击打驱动板提供的旋转驱动力亦是间断、不连续的,因此射流的脉冲频率就是喷头的旋转步进频率。

2.2 水量分布

当进口压力分别为0.20、0.25、0.30、0.35 MPa

时,各组喷头水量分布曲线如图 4 所示。由图可以看出,4 mm×3 mm、4 mm×4 mm 和 5 mm×4 mm 射流喷头在上述 4 种进口压力下,雨量筒水深在 0.1~2.9 mm 之间,水量分布曲线整体上呈“三角形”,在雨量筒距喷头约 2 m 和 12 m 处有两个水量峰值。副喷嘴射流击打驱动板后破碎成小水滴,射程主要在 1~8 m 之间,水量分布较广且较均匀;由于喷头喷洒路径为抛物线,0~1 m 范围内喷头存在喷洒死角,因此基本无水量;1~2 m 范围内,副喷嘴提供的水量逐渐增多,呈较快上升趋势,2~8 m 范围内

水量逐渐减少,呈较慢下降趋势,在约 2 m 处有一水量峰值。主喷嘴的射流较为集中,射程主要在 9~13 m 之间,在雨量筒距喷头约 12 m 处有另一水量峰值。

5 mm×5 mm 射流喷头降水深范围为 0.1~2.8 mm,其水量分布呈“梯形”,此喷头主副喷嘴直径较大,主喷嘴前水头与其他喷头相比较小,因此射程较短,喷头中近处降水量较多,远处降水量较少,因此没有明显水量峰值。摇臂喷头降水在 0.1~2.7 mm 之间,在不同进口压力下,水量分布曲线形状变化不大,基本呈梯形分布。

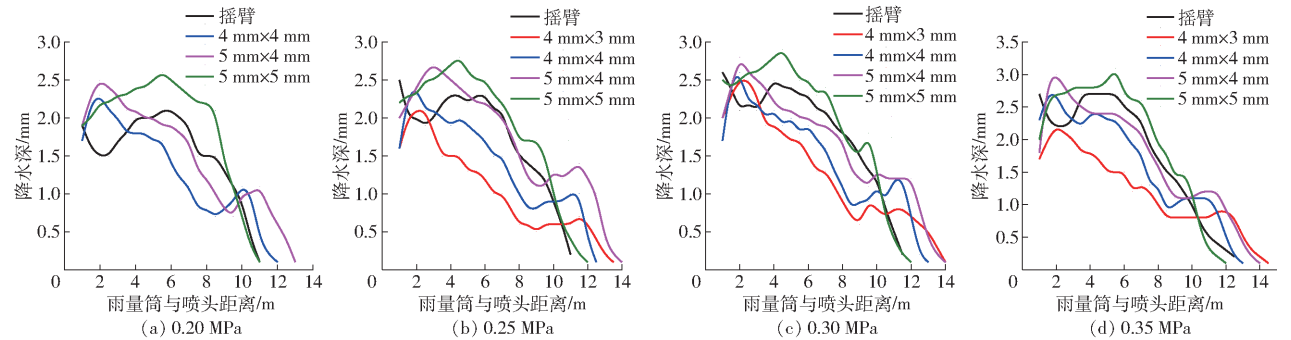


图 4 不同喷嘴直径射流喷头的水量分布

Fig. 4 Water distribution diagrams of jet sprinkler with different nozzle diameters

2.3 射程、喷灌均匀性系数和喷灌强度

在不同进口压力下,将各组喷头的射程、喷灌均匀性系数和喷灌强度试验结果绘制成曲线,如图 5 所示。从图 5a 可以看出,在同组喷头试验中,喷头射程随进口压力增加而递增,其中 5 mm×4 mm 与 4 mm×3 mm 射流喷头射程较远,分别为 13.2~13.7 m 和 13.8~15.0 m,摇臂喷头射程最短,在 10.7~12.5 m 之间。依据式(1)~(3)分析可知,喷

头的射程不仅与射流速度有关,而且与喷头流量有关。当喷嘴直径过大时,喷嘴前水头会变小,则射流速度减慢,导致射程变短;当喷嘴直径过小时,虽然喷嘴前水流会变大,但喷嘴流量减小幅度过大,同样也会导致射程变短;5 mm×4 mm、4 mm×3 mm 喷头的喷嘴直径大小适中,射流速度和流量较大,因此射程也较远。由于射流喷头的喷嘴内能够产生脉冲水流,水流具有较大动能,因此射程均比摇臂喷头远。

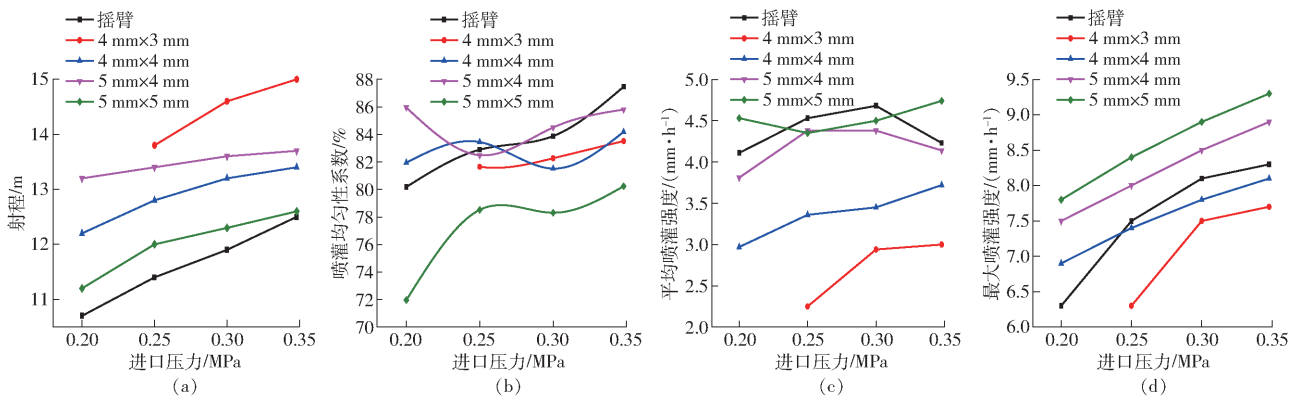


图 5 各组喷头的其他水力性能

Fig. 5 Other hydraulic performance of each group of nozzles

由图 5b 看出,在 4 种进口压力下各喷头喷灌均匀性系数在 72.0%~87.5% 之间,其中 4 mm×3 mm、4 mm×4 mm、5 mm×4 mm 射流喷头与摇臂喷头的喷灌均匀性系数相差不大,分别为 81.7%~83.5%、81.5%~84.1%、82.5%~86.0% 和 80.2%~87.5%。射流喷头喷灌均匀性系数随进口压力增加无明显变

化规律,摇臂式喷头喷灌均匀性系数随进口压力增加而递增。5 mm×5 mm 射流喷头在进口压力为 0.20 MPa 时的喷灌均匀性系数为 72.0%,当进口压力为 0.25、0.30、0.35 MPa 时,其喷灌均匀性系数变化较小,保持在 78.3%~80.2% 之间。喷头进口压力过低时,喷嘴直径为 5 mm×5 mm 喷头的射流速

度较缓,副喷嘴击打驱动板形成小水滴的直径过大,水量分布较集中,因此喷灌均匀性系数较低。

依据式(5)算出各组喷头的平均喷灌强度如图 5c 所示,所有喷头的平均喷灌强度变化范围在 2.2~4.6 mm/h 之间,摇臂喷头、5 mm×5 mm 和 5 mm×4 mm 射流喷头平均喷灌强度较大,分别在 4.11~4.68 mm/h、4.35~4.74 mm/h 和 3.81~4.38 mm/h 之间。图 5d 为各组喷头的最大喷灌强度,其中摇臂喷头、5 mm×4 mm 和 5 mm×5 mm 射流喷头最大喷灌强度较大,分别在 6.3~8.3 mm/h、7.5~8.9 mm/h 和 7.8~9.3 mm/h 之间。整体来讲,射流喷头与摇臂喷头的平均喷灌强度随喷嘴直径增加而递增,与进口压力无明显联系;而喷头喷嘴直径与进口压力变大时,各喷头的最大喷灌强度均随之递增。

2.4 评价分析

喷头的综合性能评价标准包括射程 R 、喷灌均匀性系数 C_u 、平均喷灌强度 $\bar{p}$ 和最大喷灌强度 $P_{\max}$,为多指标的试验设计,可以采用多指标综合评分法^[25]分析试验结果,并最终转换成单一指标进行分析。指标转换的方法较多,本文采用极值标准化法,将各指标进行无量纲化处理,其公式为^[26]

$$Z = \frac{X_j - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \tag{6}$$

式中 Z ——无量纲化处理后数值
 X_j ——各指标的实际值

$\min(X_j)$ ——指标集中的最小值
 $\max(X_j)$ ——指标集中的最大值

在多指标综合评价中,权重具有较重要的作用,其中客观赋权法是直接根据指标的原始信息,通过数学或统计方法处理后获权重的一种方法。本文采取标准差权数法,将各标准化指标均方差归一化,其结果为各指标的权数,计算方法为^[27]

$$W_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \tag{7}$$

其中
$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ji} - \bar{X}_j)^2} \tag{8}$$

式中 W_j ——各指标权数 σ_j —— X_j 的标准差
 $\bar{X}_j$ —— X_j 的均值

根据式(7)与式(8)计算得出喷灌均匀性系数 C_u 、射程 R 、平均喷灌强度 $\bar{p}$ 和最大喷灌强度 $P_{\max}$ 的权重分别为 0.013、0.419、0.267、0.301,用直接加权法,综合评分为

$$y^* = 0.013y_{i1} + 0.419y_{i2} + 0.267y_{i3} + 0.301y_{i4} \tag{9}$$

式中 y_{i1} ——喷灌均匀性系数标准化数值
 y_{i2} ——射程标准化数值
 y_{i3} ——平均喷灌强度标准化数值
 y_{i4} ——最大喷灌强度标准化数值
计算结果如表 1 所示,将 4 种进口水头下综合

表 1 多指标试验结果分析
Tab.1 Analysis on experimental results of multiple indicator

喷头类型	压力/ MPa	C_u		R		$\bar{p}$		$P_{\max}$		y^*	$\bar{y}^*$
		真实值/%	标准化值	真实值/m	标准化值	真实值/ (mm·h ⁻¹)	标准化值	真实值/ (mm·h ⁻¹)	标准化值		
摇臂	0.20	80.2	0.529	10.7	0	4.11	0.747	6.3	0	0.206	0.455
	0.25	83.0	0.710	11.4	0.163	4.53	0.916	7.5	0.400	0.442	
	0.30	83.9	0.768	11.9	0.279	4.68	0.976	8.1	0.600	0.568	
	0.35	87.5	1.000	12.5	0.419	4.23	0.759	8.3	0.667	0.602	
4 mm×3 mm	0.20										0.514
	0.25	81.7	0.626	13.8	0.721	2.25	0	6.3	0	0.310	
	0.30	82.3	0.665	14.6	0.907	2.94	0.277	7.5	0.400	0.583	
	0.35	83.5	0.742	15.0	1.000	3.00	0.301	7.7	0.467	0.650	
4 mm×4 mm	0.20	81.9	0.639	12.2	0.349	2.97	0.289	6.9	0.200	0.292	0.470
	0.25	83.4	0.735	12.8	0.488	3.36	0.446	7.4	0.367	0.444	
	0.30	81.5	0.613	13.2	0.581	3.45	0.482	7.8	0.500	0.531	
	0.35	84.2	0.787	13.4	0.628	3.72	0.590	8.1	0.600	0.611	
5 mm×4 mm	0.20	86.0	0.903	13.2	0.581	3.81	0.627	7.5	0.400	0.543	0.681
	0.25	82.5	0.677	13.4	0.628	4.38	0.855	8.0	0.567	0.671	
	0.30	84.5	0.806	13.6	0.674	4.38	0.855	8.5	0.733	0.742	
	0.35	85.8	0.890	13.7	0.698	4.14	0.759	8.9	0.867	0.768	
5 mm×5 mm	0.20	72.0	0	11.2	0.116	4.53	0.916	7.8	0.500	0.444	0.609
	0.25	78.5	0.419	12.0	0.302	4.35	0.843	8.4	0.700	0.568	
	0.30	78.3	0.406	12.3	0.372	4.50	0.904	8.9	0.867	0.663	
	0.35	80.2	0.529	12.6	0.442	4.74	1.000	9.3	1.000	0.760	

评分平均值 $\bar{y}^*$ 作为单一指标进行分析,并找出综合性能最优的喷头。通过表中数据对比发现,5 mm × 4 mm 射流喷头加权后平均分最高,说明其综合性能最好。

3 结论

(1)负载反馈射流喷头内部能产生脉冲水流,不安装喷嘴时有连续和断裂两种出流状态,其中断裂时呈“Z”字形;安装喷嘴时有稳定和破碎两种出流状态,破碎时射流无明显断裂。

(2)负载反馈射流喷头副喷嘴的喷洒射程主要

在 1 ~ 8 m 之间,主喷嘴的喷洒射程主要在 9 ~ 13 m 之间。由于射流喷头射流具有较大的脉冲动能,4 种射流喷头的射程均优于摇臂式喷头,其中 5 mm × 4 mm 与 4 mm × 3 mm 射程较远,分别在 13.2 ~ 13.7 m 和 13.8 ~ 15.0 m 之间。

(3)以射程 R 、喷灌均匀性系数 C_u 、平均喷灌强度 $\bar{p}$ 和最大喷灌强度 $P_{\max}$ 为评价标准,通过多指标综合评价法将多指标转换成单指标,结果表明,5 mm × 4 mm 射流喷头综合性能最好,其射程在 13.2 ~ 13.7 m 之间,平均喷灌强度在 3.81 ~ 4.38 mm/h 之间,喷灌均匀性系数在 82.5% ~ 86.0% 之间。

参 考 文 献

[1] 朱忠锐,范永申,段福义,等. 喷灌灌水与施肥对春小麦水分动态及产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(2): 174 - 178.
ZHU Zhongrui, FAN Yongshen, DUAN Fuyi, et al. Effects of sprinkler irrigation and fertilization on water dynamic and yield of spring wheat [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(2): 174 - 178. (in Chinese)

[2] 袁寿其,李红,王新坤,等. 喷微灌技术与设备[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

[3] 王科. 低压喷灌对冬小麦节水省肥及增产效应研究[D]. 郑州:河南农业大学,2013.
WANG Ke. The effect of low pressure sprinkler irrigation on water-fertilizer saving and yield increasing mechanism of winter wheat [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[4] 王正中,翟超,王文娥,等. 方形喷洒域摇臂式喷头流道优化及内部流场数值仿真研究[J]. 农业工程学报,2019,35(2): 71 - 79.
WANG Zhengzhong, ZHAI Chao, WANG Wene, et al. Optimization and flow numerical simulation of flow passage of square spray field impact sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 71 - 79. (in Chinese)

[5] 王子君,惠鑫,黎耀军. 摇臂式喷头喷嘴结构改进及水力性能试验研究[J]. 水利学报,2019,50(4):1 - 9.
WANG Zijun, HUI Xin, LI Yaojun. Optimization of nozzle structure and investigation on hydraulic performance of impact sprinkler[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(4): 1 - 9. (in Chinese)

[6] 毕庆生,李波,顿文涛,等. Surfer 软件在三角形组合喷灌均匀度计算中的应用[J]. 节水灌溉,2018(2):113 - 116.
BI Qingsheng, LI Bo, DUN Wentao, et al. Application of Surfer software for calculation and analysis of triangle sprinkling irrigation unit uniformity[J]. Water Saving Irrigation, 2018(2): 113 - 116. (in Chinese)

[7] 许正典,向清江,AHMED Q W,等. 摇臂喷头低压掺气情况下田间组合喷灌试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018, 36(9):841 - 845.
XU Zhengdian, XIANG Qingjiang, AHMED Q W, et al. Field combination experiment on impact sprinklers with aerating jet at low working pressure[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 841 - 845. (in Chinese)

[8] 朱兴业,刘兴发,刘俊萍,等. 全射流喷头喷洒水滴动能分布规律[J]. 农业工程学报,2015,31(15):26 - 31.
ZHU Xingye, LIU Xingfa, LIU Junping, et al. Droplet kinetic energy distribution regulation of complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 26 - 31. (in Chinese)

[9] 刘俊萍,刘兴发,朱兴业,等. 摇臂式喷头与全射流喷头水滴分布对比试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):85 - 91.
LIU Junping, LIU Xingfa, ZHU Xingye, et al. Comparison of droplet size distribution experiments between complete fluidic sprinkler and sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 85 - 91. (in Chinese)

[10] 惠鑫,朱能杰,檀海斌,等. 滚球内驱动喷头水力性能试验与工作参数确定[J]. 节水灌溉,2019(4):7 - 11.
HUI Xin, ZHU Nengjie, TAN Haibin, et al. Hydraulic performance test and working parameters determination of ball driven sprinkler[J]. Water Saving Irrigation, 2019(4): 7 - 11. (in Chinese)

[11] 祝效华,陈伟. 自进式喷头自进力影响因素分析及参数优化[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2018,33(1):89 - 97.
ZHU Xiaohua, CHEN Wei. Analysis on influencing factors of self-propelled force and parameters optimization of the jet nozzle [J]. Journal of Hydrodynamic, 2018, 33(1): 89 - 97. (in Chinese)

[12] 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 - 107.
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 - 107. (in Chinese)

[13] 邹久朋,刘学武,程蛟,等. 射流附壁振荡器能效分析与提升[J]. 大连理工大学学报,2017,57(3):233 - 240.
ZOU Jiupeng, LIU Xuewu, CHENG Jiao, et al. Analysis and improvement of energy efficiency of jet wall-attached oscillator

[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2017, 57(3): 233 – 240. (in Chinese)

[14] 汪志明,薛亮. 射流元件附壁与切换流动规律研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2007,22(3):352 – 357.
WANG Zhiming, XUE Liang. Study on the attached flow and alteration flow character in fluidic element of down hole pressure intensifier[J]. Journal of Hydrodynamic, 2007, 22(3): 352 – 357. (in Chinese)

[15] 于洪仕,张涛. 漩涡的卷吸作用对多孔孔板流量计精度的影响[J]. 天津大学学报,2016,49(5):465 – 471.
YU Hongshi, ZHANG Tao. Influence of the entrainment of vortex on the accuracy of multi-hole orifice flow meter[J]. Journal of Tianjin University, 2016, 49(5): 465 – 471. (in Chinese)

[16] 王金枝,肖明,吴晓武. 射流卷吸作用影响射流偏转的理论分析[J]. 山东电力技术,2000(3):4 – 6.
WANG Jinzhi, XIAO Ming, WU Xiaowu. Theoretical analysis of the jet deflection influenced by entrainment[J]. Shandong Electric Power Technology, 2000(3): 4 – 6. (in Chinese)

[17] GB/T 22999—2008 旋转式喷头[S]. 2008.

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

[19] 范兴科,吴普特,冯浩,等. 全圆旋转摇臂式喷头的非圆形域喷洒[J]. 灌溉排水学报,2006,25(1):58 – 61.
FAN Xingke, WU Pute, FENG Hao, et al. Non circular spray region of the round rotatory rocker aim sprinkler[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(1): 58 – 61. (in Chinese)

[20] GB/T 50085—2007 喷灌工程技术规范[S]. 2007.

[21] 张林,吴普特,朱德兰,等. 基于制造偏差的滴灌系统综合流量偏差率[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):135 – 139.
ZHANG Lin, WU Pute, ZHU Delan, et al. Integrated flow deviation rate of drip irrigation system based on manufacturing deviation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12):135 – 139. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131222&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.022. (in Chinese)

[22] 鞠学良,吴普特,朱德兰,等. 基于样本流量偏差率的微灌灌水均匀度评价方法[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(2):173 – 178.
JU Xueliang, WU Pute, ZHU Delan, et al. Estimation of micro-irrigation water application uniformity based on sample emitter flow variation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(2): 173 – 178. (in Chinese)

[23] ZHANG Lin, MERKLER G P, WU Pute, et al. Effect of catch-can spacing on calculation of sprinkler irrigation application uniformity[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2018, 46(7): 1800130.

[24] 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 Xingshu, ZHANG Jianbin, HAN Wenting. Experiments on hydraulic performance of impact sprinkler with adjustable elevation angle[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?file_no=20150206&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.006. (in Chinese)

[25] 朱兴业,袁寿其,向清江,等. 旋转式射流喷头设计与性能正交试验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):76 – 79.
ZHU Xingye, YUAN Shouqi, XIANG Qingjiang, et al. Orthogonal experimental on design and performance of a rotational jet sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 76 – 79. (in Chinese)

[26] 张慧颖,王桂花. 多指标评价方法的改进[J]. 大学数学,2009,25(4):199 – 202.
ZHANG Huiying, WANG Guihua. Improve the method of multi-criteria comprehensive evaluation[J]. College Mathematics, 2009, 25(4): 199 – 202. (in Chinese)

[27] 钟霞,钟怀军. 多指标综合评价方法及应用[J]. 内蒙古大学学报,2004,36(4):107 – 111.
ZHONG Xia, ZHONG Huaijun. Multi-criteria estimation: its application as a method [J]. Journal of Inner Mongolia University, 2004, 36(4): 107 – 111. (in Chinese)