

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.017

旋转折射式喷头水量分布与喷灌均匀性试验

朱兴业¹ 万景红¹ ALEXANDER Fordjour^{1,2} 张林国¹ 袁寿其¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 知识技能大学土木工程学院, 东部 999064)

摘要: 为了研究喷头工作压力、喷嘴直径和安装间距对喷灌洒水深和喷灌均匀度的影响规律, 选用喷嘴直径为 2.98、3.37、3.77 mm 的 R3000 型旋转式喷盘的折射式喷头进行了研究。测量了 3 种喷头在 0.1、0.2、0.3 MPa 工作压力下的径向水量分布, 喷灌强度随着喷头工作压力或喷嘴直径的增加而增大。叠加计算了安装间距为 2、3、4、5、6 m 几种情况下的组合均匀性系数, 并通过组合试验与计算结果进行对比, 得出组合均匀性系数试验值与模拟计算值的误差在 0.5% ~ 11.0% 之间, 影响因素的主次顺序为喷头安装间距、工作压力、喷嘴直径。结果表明: 喷嘴流量系数平均值在 0.9 以上, 说明喷头的性能良好。3 种喷嘴的最佳喷灌均匀性系数分别为 75.9%、78.2% 和 85.1%。提出了自制 R3000 型旋转折射式喷头最佳组合间距为 4 m 的计算均匀性系数经验公式, 为其在工程中的应用提供了理论数据。

关键词: 旋转折射式喷头; 工作压力; 喷嘴直径; 安装间距; 喷灌均匀系数; 试验

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0145-08

Experiment of Water Distribution and Uniformity of Rotating Plate Sprinkler

ZHU Xingye¹ WAN Jinghong¹ ALEXANDER Fordjour^{1,2} ZHANG Linguo¹ YUAN Shouqi¹

(1. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

2. *Department of Civil Engineering, Koforidua Technical University, Koforidua, Eastern Region 999064, Ghana*)

Abstract: To study the effect of working pressure, nozzle diameter and installation spacing on the hydraulic performance of spray depth and uniformity coefficient in sprinkler irrigation, a new typed rotating plate sprinkler was put forward. The nozzle diameters of 2.98 mm, 3.37 mm and 3.77 mm were chosen to carry out the research. The radial water distributions were measured at the working pressure of 0.1 MPa, 0.2 MPa and 0.3 MPa. It was found that the irrigation intensity was increased with the increase of nozzle operating pressure or nozzle diameter. The combined uniformity coefficient were calculated with the installation spacing of 2 m, 3 m, 4 m, 5 m and 6 m. The calculation results were compared with the testing experiments. The error value between the tested and simulated results of the combined uniformity coefficient was within 0.5% ~ 11.0%, and the importance order of influencing factors was installation spacing, working pressure and nozzle diameter. The results showed that the average nozzle discharge coefficient was more than 0.9, which indicated that the new typed sprinkler had good performance; the optimum irrigation uniformity coefficients of three kinds of nozzles were 75.9%, 78.2% and 85.1%, respectively. The optimum installation spacing of 4 m for a new typed R3000 rotating plate sprinkler and an empirical formula for the calculation of uniformity coefficient was proposed, which provided important theoretical data for its engineering application.

Key words: rotating plate sprinkler; working pressure; nozzle diameter; installation spacing; uniformity coefficient of sprinkler irrigation; experiment

0 引言

喷灌是一种先进的灌溉技术, 有利于水分利用

效率的提高^[1-3]。喷洒性能是喷灌技术的重要参数, 喷灌均匀性是衡量喷洒区域内水量分布均匀程度的指标, 是评价喷灌系统性能的重要参数^[4-7], 早

收稿日期: 2018-03-20 修回日期: 2018-06-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)、江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2015316)、中国博士后特别项目(2016T90428)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 朱兴业(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及排灌机械研究, E-mail: zhuxy@ujs.edu.cn

在 1942 年,CHRISTIENSEN^[8]就提出了均匀性系数的计算公式。影响均匀度的主要因素分为外部不可控因素和内部可调整因素,其中风速、风向、地形和地貌等对喷灌均匀度的影响,属于外部不可控因素^[9-12]。影响喷灌均匀度的内部可调整因素包括喷头结构、喷头工作压力、喷头组合间距、喷头的数量以及组合方式等^[13-16]。为了实现水资源的优化和提高喷灌技术的水分利用效率,对喷灌用喷头开展结构及工作参数组合等内部可调整因素对喷洒性能影响的研究无论在理论上还是实际应用中都具有十分重要的意义。

喷头工作压力、喷嘴直径和安装间距是影响喷洒性能的重要因素,许多国内外研究学者在相关方面进行了一系列的研究,DUKES^[17]研究了风速和工作压力对平移式喷灌机上 LDN 型喷头或 IWOB 型旋转式喷头喷洒性能的影响,提出 IWOB 型旋转式喷头具有更好的水力性能。EI-WAHED 等^[18]通过改变中心支轴喷灌机上的喷头间距、喷头高度和工作压力,研究它们对均匀性系数、低值分布均匀度和变异系数等参数的影响,给出最佳操作条件方案,以减少运行成本。ZHU 等^[19-20]研究了射流喷头结构参数对喷洒性能的影响,并对不同压力条件下全射流喷头和摇臂式喷头的水力特性进行对比分析,结果表明全射流喷头优于摇臂式喷头,更具先进性。ZHANG 等^[21]开展了 Nelson R33, Nelson R33LP, Nelson R33 流道防护, Nelson R33LP 流道防护和 Rainbird Mini Paw/LG-3 共 5 种喷头分别在 23 个不同工作压力下的田间喷灌均匀度评价,得出在测试范围内喷头间距和平均工作压力对喷洒性能的影响要远远大于压力变化对喷洒性能的影响。韩文霆等^[22]利用喷头在不同压力下的单条辐射线上的试验数据,采用了连续插值函数逼近方法,提出了一种压力-水量分布的计算模型。鲍亚等^[23]研究了喷头压力对水量分布模型的影响,指出低压喷头的喷灌强度随着压力的增大先逐渐增大,达到一定值后基本保持不变,提出了低压范围内喷灌组合均匀系数和组合分布均匀系数二者的函数关系式。严海军等^[24]对圆形喷灌机低压阻尼喷头不同喷嘴和工作压力下的水滴直径分布规律进行了试验,得到了喷头不同位置处的水滴平均直径和喷头距离呈指数关系。朱兴业等^[25]在不同工作压力下对全射流喷头的喷水量分布等参数进行试验,研究了喷洒性能与组合间距之间的关系,为喷灌系统优化配置提供了一定的理论基础。葛茂生等^[26]选取了 Nelson D3000 型和 R3000 型旋转式喷头,对其单独喷洒和以 2.5 m 组合间距进行喷洒时的水量分布进行了测试和比

较,得出喷头之间相互影响的强弱受喷头几何结构的影响。张以升等^[27-28]以 Nelson D3000 型喷头为研究对象,研究了不同压力下的水量,能量分布及其扩散规律,建立了不同工况下喷洒性能与工作压力及喷灌高度的回归关系式,并依据风速分布模型,建立有风条件下折射式单喷头水量分布计算方法。巩兴晖等^[29]以 Nelson R3000 型旋转折射式喷头为研究对象,在不同工作压力下分析了水滴直径与单个水滴动能之间的关系,单位体积水滴动能和动能强度沿射程的变化趋势,提出单个水滴动能与水滴直径的 3.65 次方呈正比关系。张林等^[30]针对坡地喷灌水量分布实测困难问题,构建了喷灌水量分布由平地转换到坡地的计算模型,并通过试验验证模型是准确的。田坤等^[31]研制出一种平移式喷灌机并进行了性能测试,得出在压力为 0.07 MPa,组合间距为 3 m,安装高度 1 m 的情况下,组合均匀性系数达到了 86.5%。李茂娜等^[32]在内蒙古地区研究了圆形喷灌机水肥耦合对苜蓿产量的影响,得出圆形喷灌机尾枪控制面积内的实际灌水量超过设计灌水量的 1/3,但产量未相应增加的结论。

综上所述,上述文献中均采用的是目前常用的喷头开展水力性能的研究,很少有新型结构和新工作原理旋转式喷头的相关研究报道。同时虽然国内外学者开展了单因素(喷嘴类型或工作压力等参数)对喷洒性能影响的试验,但是对于压力、喷嘴直径和安装间距对喷洒性能影响的交互作用,以及它们之间的相互关系方面尚未见到相关的研究报道。因此,本文提出一种旋转式喷盘的折射式喷头,在不同工作压力、喷嘴直径下试验得出其水量分布,仿真计算出同安装间距下的均匀系数并提出它们之间存在的关系,进一步探讨综合影响因素下的喷洒性能,以期对后续的研究提供科学的理论依据,为旋转折射式喷头的工程应用提供理论数据。

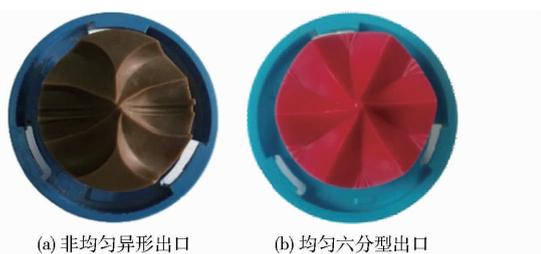
1 材料与方 法

本试验在江苏大学流体机械工程技术研究中心的室内喷灌实验室进行,试验期间室内无风,温度为 2~6℃。

1.1 喷头结构

试验中采用了由江苏大学研制出的旋转式喷盘(图 1b),其与现有的喷头之间的区别在于旋转式喷盘的出口形状,现有的旋转式喷盘是圆周内非均匀异形出口(图 1a),本文使用圆周内均匀六分型出口(图 1b)是为了解决现有非均匀异形出口(图 1a)喷盘内受力不均衡及旋转不稳定的问题。与非均匀异形出口旋转式喷盘相比较,均匀六分型出口喷盘工

作相对更加稳定、便于调节。



(a) 非均匀异形出口 (b) 均匀六分型出口

图 1 旋转式喷盘

Fig. 1 Rotated plates

在工作原理上,均匀六分型出口与现有公开非均匀异形出口控制元件的区别为:现有公开的非均匀异形出口低压(0.10 MPa 以下)工作条件时,在不同旋转角度下喷盘所受作用力不够均衡,无法稳定有效地驱动喷盘的运转而完成折射式喷头的旋转运动。本文中所提出的均匀六分型出口,在低压(0.10 MPa 以下)工作条件下,水射流从喷盘中心沿着 6 个分型面均匀喷射,6 个分型面上形成均匀的射流区,对喷盘产生驱动力,在任意旋转角度上水射流有效可靠地对喷盘形成 6 股驱动合力,自控完成喷盘旋转速度的形成,稳定实现喷盘的驱动并完成折射式喷头的旋转运动。同时,本文将旋转式喷盘的出口设计成常规的圆周内均匀六分型出口,增强了其通用性。

1.2 试验材料

搭配上上述喷头所用的喷嘴为目前广泛应用于灌溉机组 R3000 型的 15[#]、17[#] 和 19[#] 3 种,所对应的喷嘴直径分别为 2.98、3.37、3.77 mm (图 2)。喷头的安装高度设计为目前常用的喷头高度 1.2 m,考虑到工作压力微小变化对水力性能的影响并不会太明显,因此选择 0.1 MPa 为变化间距,设计了喷头工作压力为 0.1、0.2、0.3 MPa 进行试验,以确定喷头能正常工作的最佳范围。由于喷灌实验室内无风,可以近似认为各个方向的喷洒水深基本相同,因此可以用一条射线上的数据代替圆周内的各条射线。图 3 为试验系统布置示意图。试验中喷头工作压力由 0.4 级的精密压力表读出,流量通过 0.5 级精度的电磁流量计测量得出,水量分布测量用的雨量筒(直径为 0.2 m、高度为 0.6 m)按径向线进行布设。试验参照国家标准 GB/T 19795.2—2005、GB/T 19795.2—2005 和 GB/T 22999—2008^[33-35] 等,在喷头稳定运转 10 min 后



图 2 试验用喷头

Fig. 2 Experiment nozzles

开始数据测量。每次测量时间为 20 min,每组试验分别在不同的时间内进行 3 次重复。

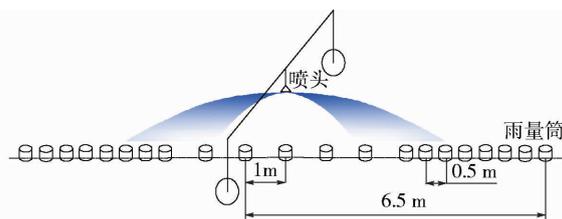


图 3 试验系统布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test arrangement

1.3 试验方法

1.3.1 喷嘴流量系数

试验中采用称重法测量喷嘴在单位时间内流出的水量用以校核所测得的流量数据。首先调节喷嘴至所需的工作压力,喷头稳定运转后在喷嘴喷水处插入容器收取水流,一段时间后取出容器同时记录收取水流所消耗的时间,采用精度为 ±1 g 的电子秤进行称量,按照测得质量除以消耗时间计算得出喷嘴的流量,重复上述过程 3 次取其平均值。喷头流量与喷嘴直径以及工作压力的关系为

$$q = 3\ 600\mu A \sqrt{2gH} \quad (1)$$

式中 q ——喷头流量, m^3/h

μ ——喷嘴流量系数

A ——喷嘴过水断面面积, m^2

H ——工作压力, MPa

整理式(1)得出流量系数为

$$\mu = \frac{79.847q}{d^2 \sqrt{H}} \quad (2)$$

式中 d ——喷嘴直径, mm

1.3.2 组合水量分布计算模型

采用单喷头水量分布叠加的方法获得喷头组合水量分布数据。试验中喷头的径向水量分布数据转换为网格型数据,是均匀度分析的主要步骤。由于旋转折射式喷头可以近似地认为各个方向的喷洒水深基本相同,因此,网格点的降水深只取决于各网格点到喷头的距离,然后用实测降水深数据对该距离进行插值,即可求出各网格点的水深。

本文采用三次样条插值法,数学模型建立如下^[36]:设 $f(x)$ 是区间 $[a, b]$ 上的一个二次连续可微函数,在区间 $[a, b]$ 上给定一组基点: $a = x_1 < x_2 < \dots < x_{n+1} = b$ 。设函数

$$S(x) = \begin{cases} S_1(x) & (x \in [x_1, x_2]) \\ \vdots \\ S_i(x) & (x \in [x_i, x_{i+1}]) \\ \vdots \\ S_n(x) & (x \in [x_n, x_{n+1}]) \end{cases}$$

二次连续可微, $S_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 是一个不高于三次的多项式或零多项式, 且满足条件 $S_i(x) = f(x_j)$ ($j=1, 2, \dots, n+1$), 称 $S(x)$ 为函数 $f(x)$ 的三次样条插值函数。

记 $m_i = S''(x)$, $f(x_i) = f_i$ 。根据三次样条的定义可得: 在每一个子区间 $[x_i, x_{i+1}]$ ($i=1, 2, \dots, n$) 上

$$S''_i(x) = m_i \frac{x_{i+1} - x}{h_i} + m_{i+1} \frac{x - x_i}{h_i}$$

$$(x \in [x_i, x_{i+1}])$$

其中 $h_i = x_{i+1} - x_i$

对 $S''_i(x)$ 连续两次积分得

$$S_i(x) = h_i \left[\frac{m_i}{6} (x_{i+1} - x)^3 + \frac{m_{i+1}}{6} (x - x_i)^3 \right] +$$

$$f_i + f_{i+1} (x - x_i) -$$

$$\frac{h_i^2}{6} \left[(m_{i+1} - m_i) \frac{x - x_i}{h_i} + m_i \right]$$

只要知道 m_i 和 m_{i+1} , 则 $S_i(x)$ 表达式完全确定, 即可计算获取喷头径向任意位置的水量分布信息。

利用 Matlab 语言编制出径向水量分布数据转换为网格型数据的计算程序, 对旋转折射式喷头射程范围内建立网格点, 计算出网格点对应的水量分布数据, 然后根据喷头不同的安装间距得到组合水量分布数据。采用 Christiansen 计算法^[8] 计算均匀系数, 为

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n |h_j - \bar{h}|}{\sum_{j=1}^n h_j} \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{n} \quad (4)$$

其中

n ——计算网格个数

j ——计算网格标识变量

h_j ——第 j 个计算点内水量的高度, mm

\bar{h} ——用于数据分析所有计算点的平均喷洒水深, mm

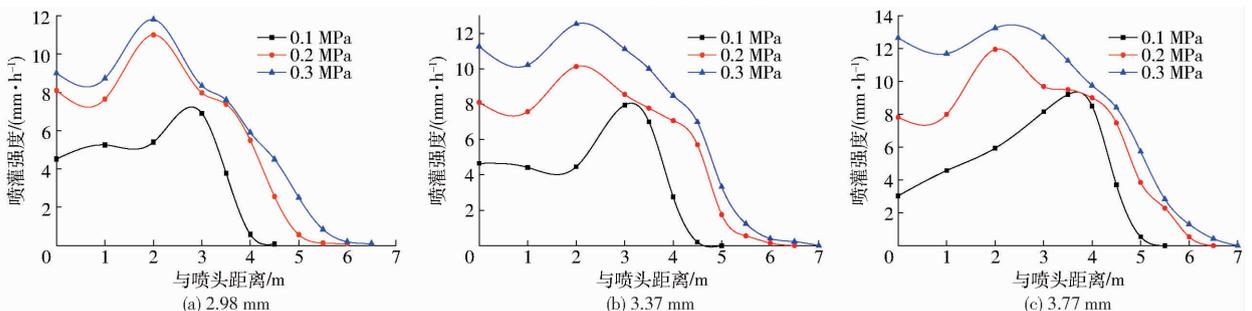


图4 单喷头径向水量分布

Fig. 4 Radial distributions of single nozzle

2 结果与分析

2.1 喷嘴流量系数

使用喷灌喷头的流量测量值及根据式(2)所得到的计算结果如表1所示。

表1 流量-压力测试值

Tab. 1 Flow - pressure testing values

喷嘴直径/ mm	压力/MPa	喷嘴流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	流量系数	流量系数 平均值
2.98	0.1	0.32	0.91	0.93
	0.2	0.46	0.93	
	0.3	0.58	0.95	
3.37	0.1	0.38	0.85	0.90
	0.2	0.57	0.90	
	0.3	0.74	0.95	
3.77	0.1	0.44	0.80	0.90
	0.2	0.74	0.93	
	0.3	0.93	0.95	

从表1可以看出, 在相同喷嘴直径下, 随着喷头工作压力的增加, 3种喷嘴的流量系数呈现出增加的趋势, 流量系数增加的幅度范围为4.2%~15.8%。这是因为随着工作压力的增大, 旋转折射式喷头喷嘴流场处的流速增大, 更加有效克服喷嘴结构、流体粘性等因素所形成的阻力, 水流的流态会更加稳定, 极大地减少了喷嘴结构等因素对流量所产生的影响, 获得了更高的流量系数, 在0.3 MPa工作压力下, 流量系数达到0.95。

在相同工作压力下, 随着喷嘴直径的增加, 喷嘴流量呈线性增加, 3种喷嘴的流量系数在较小的范围内波动, 并没有呈现出明显的变化规律, 波动范围为0~12.1%。这说明喷嘴直径对流量系数并没有很大的影响。

本试验研究所采用的旋转折射式喷头的流量系数平均值不小于0.9, 符合国家标准中所规定的流量系数范围一般数值的选取^[33], 可以满足试验要求。

2.2 单喷头径向水量分布

喷头的径向水量分布是评价喷头喷洒效果的重要特征参数, 通过试验获取了雨量筒采集的数据, 得到了3种喷嘴在不同工作压力下的径向水量分布, 变化曲线如图4所示。

从图 4 可以看出,喷头的水量分布曲线近似为抛物线型,随着与喷头距离的增加,喷灌强度总体呈先上升再下降的趋势。在相同喷嘴直径下,随着喷头工作压力的增加,喷洒射程增大,且每一个测点处的喷灌强度均增大,这说明工作压力是影响喷灌性能的重要因素。在与喷头距离小于 3 m 的测点中,各工作压力下的数值差异较大且没有一定的规律性,而在与喷头距离大于 3 m 后,随着与喷头距离的增大,各测点喷灌强度呈现出随着工作压力的升高保持在一定幅度内增加的规律,相比 0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa 时增加的幅度分别为 18.1% ~ 29.4% 和 31.4% ~ 39.1%。这主要是因为距离喷头较远处,由于喷射水流受到了喷嘴结构、水流破碎、外界环境等多个因素的影响,在不同工作压力下运行时,喷射水流的能量损失存在着很大的不确定性,并没有呈现出随着工作压力的升高喷灌强度保持在一定幅度内增加的规律性。在喷洒末端处喷射水流主要受到外界环境的影响,能量损失趋于稳定,此时呈现出随着工作压力的升高喷灌强度保持在一定幅度内增加的良好规律性。

在相同工作压力下,随着喷嘴直径的增加,喷洒射程在小范围内增大,喷灌强度增大。这主要是因为水流从喷嘴处喷射后,能量损失很大,3 种喷嘴直径的差别不足以有效地克服能量损失而极大地提高其射程,造成了射程增加范围在 8% 以内;同时,随着过流断面的增大,增加了喷嘴处的喷射流量,在喷洒面积相差不大的情况下,必然增加了喷灌强度。相比 2.98 mm 的喷嘴直径,3.37 mm 和 3.77 mm 所产生最高喷灌强度增加的幅度分别为 5.8% ~ 13.2% 和 7.9% ~ 25%。

本文得到的水量分布规律符合了 FACI 等^[37]的研究结果,说明本文喷头与目前应用广泛的中心支轴喷灌机和平移式喷灌机的旋转折射式喷头水量分布规律具有较好的一致性,可以满足应用的要求。

2.3 组合均匀性系数计算

根据单喷头径向水量分布使用 Matlab 软件在喷头射程范围内建立网格,选用了三次样条两次插值法,计算出网格点对应的水量分布数据。喷头的安装间距对于喷洒均匀系数存在着影响,图 5 为喷头组合安装方式及叠加计算的网格示意图,其中喷头个数为 5 个,选取中间 3 个喷头之间的方形区域,每一个方格点之间的间距为 0.5 m,所选取的网格点均在各喷头射程有效叠加范围内。有了插值点总降水深,即可计算出组合均匀性系数。

在 3 m 的组合间距下,对 3 种喷嘴在不同工作压力(0.1、0.2、0.3 MPa)下进行了组合喷灌试验,

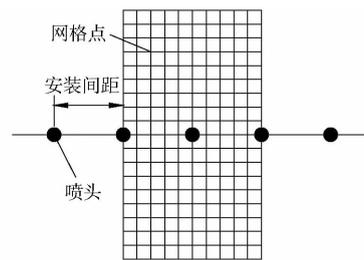


图 5 喷头叠加方法示意图

Fig. 5 Scheme of mathematical procedure used for simulation

根据测试结果计算出组合均匀性系数试验值,图 6 为喷洒均匀性试验值与模拟计算值的对比图。

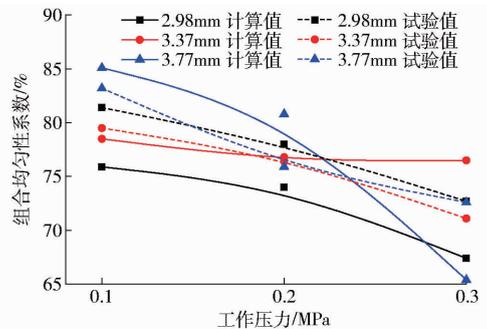


图 6 喷洒均匀性系数试验值与计算值

Fig. 6 Comparison of tested and calculated sprinkling uniformity coefficient

从图 6 可以看出,随着工作压力的增加,试验和模拟计算出的组合均匀性系数普遍呈下降趋势。在工作压力为 0.3 MPa 时,各种喷嘴直径所产生的组合均匀性系数并没有一定的规律性,甚至在喷嘴直径为 3.37 mm 时,出现了组合均匀性系数的计算值高于其他工作压力的情况。在各种喷灌条件下,试验与模拟计算得出的组合均匀性系数的变化范围为 65.4% ~ 85.1%,试验值与计算值的误差在 0.5% ~ 11.0% 之间,具有较好的一致性。因此通过试验验证了计算机模拟计算结果较为准确,说明可以采用模拟计算方法分析旋转折射式喷头安装间距对组合均匀性的影响规律。

本文计算了 3 种喷嘴在安装间距分别为 2、3、4、5、6 m 几种情况下的组合均匀性系数。图 7 为组合均匀性系数随喷头安装间距的变化曲线。

从图 7 可以看出,随着喷头间距的增加,喷头的组合均匀性系数总体上呈现缓慢减小的趋势,在组合间距为 6 m 时,组合均匀性系数会发生上升或急剧下降等不稳定的现象。在相同喷嘴直径和工作压力下,组合均匀性系数随安装间距的变化范围为 3.9% ~ 11.8%。说明喷头的安装间距较大地影响着组合均匀性系数。

在相同喷嘴直径下,在安装间距为 2 ~ 4 m 时,工作压力为 0.1 MPa 和 0.2 MPa 下所产生的组合均匀性系数计算值没有明显的趋势;在安装间距大于

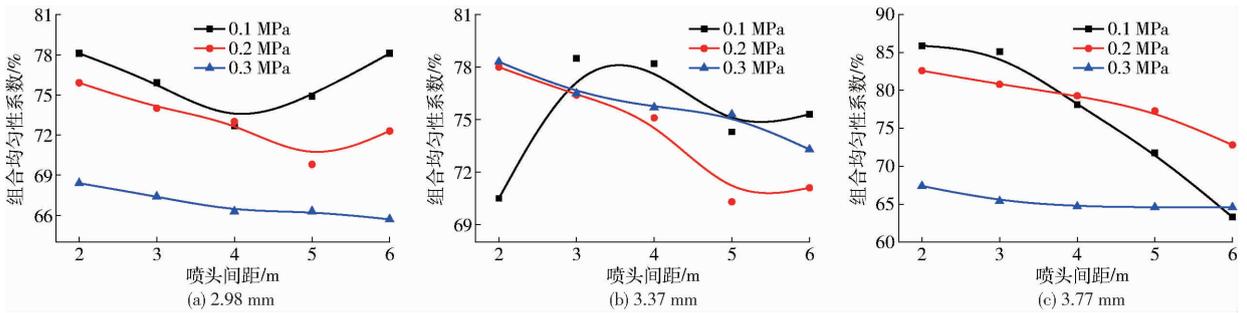


图7 组合均匀性系数

Fig. 7 Uniformity coefficient of combined sprinkling irrigation

4 m 时,喷头在不同工作压力下,组合均匀性系数存在着不稳定的变化规律;在相同组合间距的 3 个工作压力下所计算得出的组合均匀性系数的变化范围为 2.7% ~ 23.1%。说明喷头工作压力对组合均匀性系数有很大影响,是主要影响因素。

在相同的工作压力下,同一喷头安装间距时,随着喷嘴直径的增加,3 种喷嘴直径所产生的组合均匀性系数计算值并没有明显的变化规律,其原因可能是由于试验中测量数据的误差所造成。在相同安装间距下的 3 个喷嘴直径所计算得出的组合均匀性系数的变化范围为 2.3% ~ 18.9%。说明喷嘴直径对组合均匀系数有较大影响,且具有很大的随机性。

由以上分析可以得出,旋转折射式喷头影响组合均匀性系数因素的主次顺序为工作压力、喷嘴直径、喷头安装间距。表 2 中列出了在各工作压力下旋转折射式喷头最适宜的安装间距。通过计算各个工作压力下不同安装间距下的喷灌均匀性系数(图 7),得出不同工况下的最大喷灌均匀系数(表 2),从而得出自制 R3000 型旋转折射式喷头的最佳组合间距为 4 m。

表 2 不同直径和压力下的最优安装间距

Tab. 2 Optimal installation spacing for different diameters and pressures

直径/mm	工作压力/MPa	安装间距/m	均匀系数/%	标准偏差/%
2.98	0.1	3	75.9	3.54
	0.2	4	73.0	12.34
	0.3	4	66.3	12.34
3.37	0.1	4	78.2	1.12
	0.2	4	75.1	10.21
	0.3	4	75.7	10.21
3.77	0.1	3	85.1	0.89
	0.2	4	79.3	4.70
	0.3	4	64.7	9.30

由表 2 可知,直径为 2.98、3.37、3.77 mm 和工作压力为 0.1 MPa 时在最优间距 3 ~ 4 m 下喷灌均匀性系数分别为 75.9%、78.2% 和 85.1%。所得到的最佳组合间距符合严海军等^[38]提出此类喷头安

装间距推荐为 2 ~ 4 m 的研究结果,说明本文喷头具有很好的应用前景,将来可以部分代替目前广泛使用的旋转折射式喷头。

本文中忽略喷嘴直径,研究工作压力、安装间距对喷洒均匀性影响的函数关系,根据数据的趋势规律选择合适的拟合公式,建立喷洒均匀系数的数学模型,拟合的计算公式为

$$C_u = Z_0 - \frac{B}{\left(1 + \exp \frac{C-x}{D}\right) \left(1 + \exp \frac{E-y}{F}\right)} \quad (5)$$

式中 x ——喷头安装间距, m

y ——工作压力, MPa

Z_0 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F ——拟合系数

式(5)可为将来各因素对组合均匀性系数影响的研究提供理论依据。

3 结论

(1)提出了一种旋转式喷盘的折射式喷头,分析了喷嘴直径为 2.98、3.37、3.77 mm 下的喷头水力性能。喷嘴的流量系数随工作压力的升高而增加,流量系数增加的幅度范围为 4.2% ~ 15.8%,流量系数平均值在 0.9 以上,说明喷头性能良好。

(2)喷头的水量分布曲线近似为抛物线型,随着喷头工作压力或喷嘴直径的增加,喷灌强度增大,相比 0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa 时喷灌强度增加的幅度分别为 18.1% ~ 29.4% 和 31.4% ~ 39.1%。相比 2.98 mm 喷嘴直径,3.37 mm 和 3.77 mm 所产生最高喷灌强度增加的幅度分别为 5.8% ~ 13.2% 和 7.9% ~ 25%。此喷头与目前应用广泛的中心支轴喷灌机和平移式喷灌机上的旋转折射式喷头水量分布规律具有较好的一致性,可以满足应用要求。

(3)根据单喷头径向水量分布,计算叠加了安装间距为 2、3、4、5、6 m 几种情况下的组合均匀性系数,试验验证了模拟计算值的误差在 0.5% ~ 11.0% 之间。旋转折射式喷头影响组合均匀性系数因素的主次顺序为工作压力、喷头安装间距、喷嘴直

径, 直径为 2.98、3.37、3.77 mm 和工作压力为 0.1 MPa 时在最优间距 3 ~ 4 m 下喷灌均匀性系数分别为 75.9%、78.2% 和 85.1%, 完全可以满足喷灌要求。提出旋转折射式喷头的最佳组合间距为 4 m, 并提出了根据工作压力和安装间距计算均匀性系数的经验公式。

参 考 文 献

- 1 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1 - 11.
LUO X W, LIAO J, HU L, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1 - 11. (in Chinese)
- 2 LAN Y B, CHEN S D, FRITZ B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 1 - 17.
- 3 ZHU X Y, CHIKANGAISE P, SHI W D, et al. Review of intelligent sprinkler irrigation technologies for remote autonomous system [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 23 - 30.
- 4 WILLIAM H. Sprinkler distribution analysis with a digital computer[J]. Transactions of the ASAE, 1963, 6(3): 206 - 208.
- 5 BRANSCHIED V O, HART W E. Predicting field distribution of sprinkler systems[J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(6): 801 - 803.
- 6 SEGNER I, KOSTRINSKY M W. Wind, sprinkler patterns, and system design[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Division, 1975, 101(4): 251 - 264.
- 7 李久生. 喷灌水量分布均匀性评价指标的试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 78 - 82.
LI Jiusheng. Evaluation methods of sprinkler water uniformity [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(4): 78 - 82. (in Chinese)
- 8 CHRISTIANSEN J E. Irrigation by sprinkler[R]. California Agricultural Experimental Station Research Bulletin, 1942: 123.
- 9 TARJUELO J M, MONTERO J, VALIENTE M, et al. Irrigation uniformity with medium size sprinkler, part I: characterization of water distribution in no-wind conditions[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(3): 665 - 675.
- 10 喻黎明, 牛文全. 风对喷灌质量及工程设计的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 151 - 155.
YU Liming, NIU Wenquan. Study on the design and application of spraying irrigation for the influence of wind[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 151 - 155. (in Chinese)
- 11 EVANS R, HAN G S, KROEGER M W. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 85 - 92.
- 12 吴晨, 汤跃, 汤玲迪, 等. 基于安卓系统的水涡轮特性参数无线监测系统[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(4): 362 - 368.
WU Chen, TANG Yue, TANG Lingdi, et al. Characteristic parameter wireless monitoring system of hydraulic turbine based on Android[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(4): 362 - 368. (in Chinese)
- 13 HEERMANN D F, HEIN P R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system [J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(1): 11 - 15.
- 14 SEGNER I, KANTZ D, NIR D, et al. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(2): 523 - 533.
- 15 段福义, 刘建瑞, 范永申, 等. 轻型卷盘喷灌机运行效果影响因素分析[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(6): 541 - 546.
DUAN Fuyi, LIU Jianrui, FAN Yongshen, et al. Influential factor analysis of spraying effect of light hose-fed traveling sprinkling system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(6): 541 - 546. (in Chinese)
- 16 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 喷头组合间距、工作压力和布置形式对喷灌均匀系数的影响[J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 154 - 157.
YU Liming, WU Pute, NIU Wenquan. Influence of the combination distance, work pressure and layout form of sprinkler head on uniformity coefficient in irrigation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(2): 154 - 157. (in Chinese)
- 17 DUKES M D. Effect of wind speed and pressure on linear move irrigation system uniformity [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(4): 541 - 548.
- 18 EL-WAHED M H A, MEDICI M, LORENZINI G. Harvesting water in a center pivot irrigation system: evaluation of distribution uniformity with varying operating parameters [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 24(2): 143 - 151.
- 19 ZHU X Y, YUAN S Q, LIU J P. Effect of sprinkler head geometrical parameters on hydraulic performance of fluidic sprinkler [J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(11): 1019 - 1026.
- 20 ZHU X Y, YUAN S Q, JIANG J Y, et al. Comparison of fluidic and impact sprinklers based on hydraulic performance[J]. Irrigation Science, 2015, 33(5): 367 - 374.
- 21 ZHANG L, MERKLEY G P, PINTHONG K. Assessing whole-field sprinkler irrigation application uniformity [J]. Irrigation Science, 2013, 31(2): 87 - 105.
- 22 韩文霆, 王玄, 孙瑜. 喷灌水量分布动态模拟与均匀性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 159 - 164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141125&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.025.

- HAN Wenting, WANG Xuan, SUN Yu. Dynamic simulation for sprinkler irrigation water distribution with uniformity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 159–164. (in Chinese)
- 23 鲍亚, 刘俊萍, 刘兴发, 等. 压力对低压喷头水量分布模型影响的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(1): 81–85. BAO Ya, LIU Junping, LIU Xingfa, et al. Experimental study on effects of pressure on water distribution model of low-pressure sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(1): 81–85. (in Chinese)
- 24 严海军, 肖建伟, 李文颖, 等. 圆形喷灌机低压阻尼喷头水滴直径分布规律的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 467–473. YAN Haijun, XIAO Jianwei, LI Wenyong, et al. Droplet size distributions of low-pressure damping sprinklers used in center-pivot irrigation systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 467–473. (in Chinese)
- 25 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)
- 26 葛茂生, 吴普特, 朱德兰, 等. 相邻喷头射流相互作用对喷洒特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 100–106. GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Effect of jets interaction on spray characteristics between adjacent sprinklers[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 100–106. (in Chinese)
- 27 张以升, 朱德兰, 张林, 等. 折射式喷头喷灌强度及能量空间变化规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 85–90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150713&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.013. ZHANG Yisheng, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Spatial variation of application rate and droplet kinetic energy for fixed spray plate sprinkler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 85–90. (in Chinese)
- 28 张以升, 朱德兰, 宋博, 等. 基于弹道理论有风条件下折射式喷头喷灌均匀度研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 91–97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170212&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.012. ZHANG Yisheng, ZHU Delan, SONG Bo, et al. Uniformity of fixed spray-plate sprinkler under windy condition based on ballistic simulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 91–97. (in Chinese)
- 29 巩兴晖, 朱德兰, 张林, 等. 旋转折射式喷头动能分布规律试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 43–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141207&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.007. GONG Xinghui, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Droplet kinetic energy of rotating spray-plate sprinkler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 43–49. (in Chinese)
- 30 张林, 惠鑫, 陈俊英. 平地到坡地转换喷灌水量分布计算模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 252–260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180730&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.030. ZHANG Lin, HUI Xin, CHEN Junying. Calculated model for transforming sprinkler water distribution from flat ground into sloping land[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 252–260. (in Chinese)
- 31 田坤, 朱兴业, 万景红, 等. 平移式喷灌机组的研制及性能试验[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(4): 357–361. TIAN Kun, ZHU Xingye, WAN Jinghong, et al. Development and performance test of lateral move irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(4): 357–361. (in Chinese)
- 32 李茂娜, 王晓玉, 杨小刚, 等. 圆形喷灌机条件下水肥耦合对紫花苜蓿产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 133–140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160118&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.018. LI Maona, WANG Xiaoyu, YANG Xiaogang, et al. Effects of water-fertilizer coupling on alfalfa yield under center pivot irrigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 133–140. (in Chinese)
- 33 GB/T 19795.1—2005 农业灌溉设备 旋转式喷头第1部分: 结构和运行要求[S]. 2005.
- 34 GB/T 19795.2—2005 农业灌溉设备 旋转式喷头第2部分: 水量分布均匀性和试验方法[S]. 2005.
- 35 GB/T 22999—2008 旋转式喷头[S]. 2008.
- 36 朱旦生, 刘佳莉. 用傅里叶变换表示喷灌组合均匀度[J]. 水利学报, 1998, 29(10): 27–31. ZHU Dansheng, LIU Jiali. Using Fourier transforms to express sprinkler overlapping uniformity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(10): 27–31. (in Chinese)
- 37 FACI J M, SALVADOR R, PLAYAN E, et al. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2001, 127(4): 224–233.
- 38 严海军. 基于变量技术的圆形和平移式喷灌机水量分布特性的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004. YAN Haijun. Study on water distribution uniformity of center pivot and lateral move irrigation system based on variable rate technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)