

基于弹道轨迹方程的折射式喷头水量分布计算模型*

张以升¹ 朱德兰^{1,2} 张林^{2,3} 巩兴晖¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业
研究院, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对折射式喷头水量分布模拟研究较少的问题,通过高速摄像技术测得了不同工作压力和喷嘴型号下水滴射流速度和射流弧度,构建了折射式喷头水束射流速度及弧度的指数模型,在此基础上基于弹道轨迹方程和水滴蒸发模型,采用 Eclipse 作为开发工具编写出折射式喷头水量分布的计算程序。该软件能够在已知喷头工作参数及环境条件下,模拟出水滴粒径分布、水量分布、能量分布等指标。采用软件计算出不同工况下 Nelson D3000 型喷头喷洒水力特性,并依据模拟出的单喷头水量分布数据,以 24 m 平移式喷灌机为例进行多喷头组合叠加,与实测值进行对比,结果表明:基于 3 种模型下开发出的单喷头水量分布计算软件模拟出的水滴粒径分布及单喷头水量分布与实测值变化的规律相符,模拟准确度较高。不同间距下多喷头组合叠加时,喷灌均匀度相对误差在 0.04% ~ 14.77%,变化规律的差异性较小。该软件能够为移动式喷灌机优化设计提供技术支持。

关键词: 喷灌 折射式喷头 弹道轨迹方程 水量分布 软件

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0055-07

Water Distribution Model of Fixed Spray Plate Sprinkler
Based on Ballistic Trajectory Equation

Zhang Yisheng¹ Zhu Delan^{1,2} Zhang Lin^{2,3} Gong Xinghui¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The research on simulation of water distribution of fixed spray plate sprinkler was limited. Experiments were conducted to test the droplet velocity and angle of the Nelson D3000 spray plate sprinkler under different working pressures and different nozzle diameters by using droplets photography technology. Empirical relationship was built and jet velocity and angle were related to working pressures and nozzle diameters. Based on this, a three-dimensional numerical model was developed to describe the water-drop trajectories of individual drops after their releases from the nozzle. The model was solved by multistage Runge – Kutta algorithm and output data included droplet size distribution, water distribution, kinetic energy distribution and water evaporation loss of the sprinkler. A custom computer software script was developed by using Eclipse software to implement the method to engineering case study. Hydraulic characteristics of the Nelson D3000 spray plate sprinkler under different working conditions were simulated by using the software. Single sprinkler data were used to calculate the overlapping uniformity of moving sprinkler irrigation system with different spray sprinkler spacings. Results showed that the simulated droplets distribution and water application were correlated well with the experiment data. The relative error between simulated and measured values of Christiansen uniformity was ranged from

收稿日期: 2015-09-20 修回日期: 2015-10-15

* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51409244)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B02)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)

作者简介: 张以升,博士生,主要从事灌溉排水技术研究,E-mail: hnsqzys@163.com

通讯作者: 朱德兰,教授,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: dlzhu@126.com

0.04% ~ 14.77% , and the software can provide technical guidance for optimal design of linear-move sprinkler machines.

Key words: Sprinkler irrigation Fixed spray plate sprinkler Ballistic trajectory equation Water distribution Software

引言

折射式喷头具有低压、抗风性好等优点,被广泛用于平移式和中心支轴式喷灌机^[1-5]。在移动式喷灌设计时,一般通过单喷头水量分布数据,以均匀度最高为目标对喷头间距和安装高度进行优化组合^[6-9]。而单喷头水量分布数据多是通过室内试验获取,试验难度高、工作量较大。

弹道轨迹理论被提出以后,在计算喷头水量分布方面已得到广泛应用。为解决以上问题,国内外学者基于空气阻力学模型及水滴蒸发理论,应用弹道轨迹方程开发了较多的水量分布计算程序^[10-12],近年来又有不少学者加入了风速等条件^[13-17],模拟条件日趋完善。然而此类模拟软件多是用来模拟摇臂式喷头,针对折射式喷头的水量分布模拟软件较少,其主要原因是:折射式喷头工作方式是喷嘴射出的水撞击喷盘后沿流道成股射出,由于撞击改变了水流射出速度和角度,获得速度和角度信息需要借助特定的仪器^[18],为模拟软件的开发增加了难度;折射式喷头地表水量分布形式在周向上没有连续性,而现有的水量分布模拟软件只能模拟出周向上具有连续性的喷头,对折射式喷头不适用。为了解决该问题,Ouazaa 等^[19]采用弹道轨迹方程及射流速度模型模拟了折射式喷头水量分布,但该模型仅适用于 2 种工作压力,且模拟出的水量分布在周向具有连续性,与实际水量分布有较大差别。基于移动式喷灌优化设计需要,亟需一套能够适用于不同工作压力,且模拟精准性较高的折射式喷头水量分布计算模型。

针对以上问题,本文采用高速摄像机测得不同压力及喷嘴直径下折射式喷头水束射出速度和角度,通过多元非线性回归建立折射式喷头射流模型,并结合弹道轨迹方程和水滴蒸发模型,以 Eclipse 作为开发工具编写适用于折射式喷头的喷灌水量分布计算软件。利用该软件模拟无风条件下 Nelson D3000 型喷头水力性能,通过与试验值相比较,对模拟的准确性进行分析,进而以 24 m 平移式喷灌机为例,计算不同喷头间距下的喷灌均匀度。

1 弹道轨迹方程

基于弹道轨迹理论建立水滴三维运动模型,其

运动方程式可以表示为^[15]

$$\begin{cases} m \frac{du_x}{dt} = -\frac{1}{2}C_d\rho_a v_R^2 A e_x \\ m \frac{du_y}{dt} = -\frac{1}{2}C_d\rho_a v_R^2 A e_y \\ m \frac{du_z}{dt} = -\frac{1}{2}C_d\rho_a v_R^2 A e_z + mg - \frac{\rho_a}{\rho_w}mg \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$C_d = \begin{cases} \frac{33.3}{Re} - 0.003\,3Re + 1.2 & (Re \leq 128) \\ \frac{72.7}{Re} - 0.000\,055\,6Re + 0.48 & (128 < Re < 1\,440) \\ 0.45 & (Re \geq 1\,440) \end{cases} \quad (2)$$
$$e_x = \frac{u_x}{v_R} \quad e_y = \frac{u_y - w}{v_R} \quad e_z = \frac{u_z}{v_R}$$
$$v_R = \sqrt{u_x^2 + (u_y - w)^2 + u_z^2}$$
$$m = \frac{\rho_w}{6}\pi D^3$$

雷诺数 Re 的计算公式为

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (3)$$

$$\nu = 1.304\,5 \times 10^{-5} + 1.222 \times 10^{-7}T - 9.647\,1 \times 10^{-7}T^2 + 7.287\,3 \times 10^{-12}T^3$$

式中 T ——空气温度,℃

ν ——空气动力粘滞系数, m^2/s

v ——水滴相对速度, m/s

$u_x、u_y、u_z$ ——有风情况下水滴在 $x、y、z$ 方向上分速度, m/s

$e_x、e_y、e_z$ ——有风情况下速度在 $x、y、z$ 方向上单位矢量, m/s

v_R ——水滴相对于风的运动速度, m/s

w ——风速,文中设定风速沿 y 轴方向, m/s

m ——水滴质量, kg

g ——重力加速度, m/s^2

ρ_a ——空气密度, kg/m^3

ρ_w ——水的密度, kg/m^3

D ——水滴直径, m

t ——水滴在空中飞行时间, s

A ——水滴表面积, m^2

C_d ——空气阻力系数

1.1 出射速度

弹道轨迹方程为多参数数学模型,在求解过程中需要水滴粒径、速度等信息,折射式喷头不同于摇臂式喷头,出射速度的测量需要借助特定的仪器。由于出射速度与工作压力、喷嘴直径等因素有关,且喷头喷嘴直径和压力等工作参数比较容易获取。因此可采用 hotshot512sc 型高速摄像机,通过室内试验获得不同喷嘴直径(2.98、3.97、4.76、7.14、8.73 mm)和不同压力(50、100、150、200、250 kPa 等)下喷头射流速度及角度。建立不同压力及喷嘴直径下 Nelson D3000 型喷头射流速度及角度模型。装置如图 1 所示,设定喷头目标工作压力,待压力稳定后,将摄像机放在喷头出水口位置处,设定摄像机分辨率 1 280 像素×800 像素,采集速度 800 帧/s。通过 MOVIAS Pro 分析软件,对采集的水滴信息进行处理,获得水舌的射流速度和角度等信息。

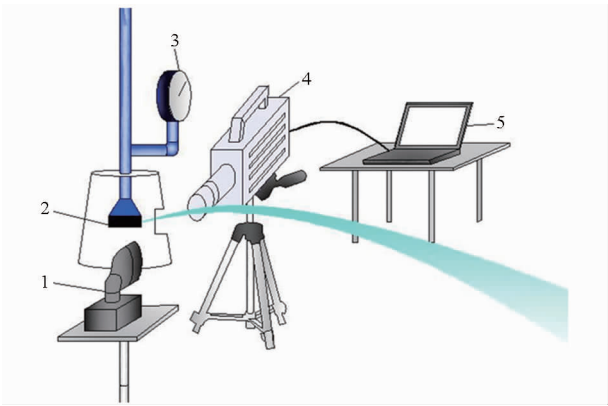


图 1 射出速度和角度测试装置

Fig.1 Testing equipment of velocity and angle of spray water
1. 连续光源 2. 喷头 3. 压力表 4. 高速摄像机 5. 计算机

表 1 为不同工况下喷头射流速度和射流弧度测量结果,通过对工作压力数据及喷嘴直径与射流速

度的关系分析,结果显示射流速度与工作压力、喷嘴直径都存在指数函数关系。利用 SPSS 软件,建立多元非线性指数模型,回归出射流速度与工作压力及喷嘴直径的关系式为

$$v_c=0.751D_n^{0.168}p^{0.505} \quad (R^2=0.989) \tag{4}$$

式中 v_c ——折射式喷头射流速度,m/s
 D_n ——喷嘴直径,m
 p ——喷头工作压力,kPa

采用相同的方法回归出射流弧度 α 与工作压力及喷嘴直径的关系式为

$$\alpha=0.054D_n^{0.405}p^{0.132} \quad (R^2=0.980) \tag{5}$$

式中 α ——射流弧度

Kincaid^[20]的试验已验证了折射式喷头喷洒半径模型具有较高的精度,结合文献[21]中给出的主要参数,得出折射式喷头喷洒半径模型为

$$W=0.67D_n^{0.48}p^{0.41}H^{0.30} \quad (R^2=0.930) \tag{6}$$

式中 H ——喷头安装高度,m
 W ——喷洒半径,m

1.2 水滴蒸发模型

通过运动水滴直径与运动时间的变化关系确定水滴蒸发速率^[11-12],其计算式为

$$\frac{dD}{dt}=-2\frac{M_vK\rho_a\Delta p}{M_mD\rho_wp_f}Nu \tag{7}$$

其中 $\Delta p=p_{sw}-p_v$ $Nu=20+0.6Sc^{1/3}Re^{1/2}$
 $Sc=v_R/K$

式中 M_v ——扩散水气分子量,kg/mol
 M_m ——混合空气的平均分子量,kg/mol
 K ——空气中水气扩散系数
 p_{sw} 、 p_v ——湿球、干球下的饱和水气压,kPa
 p_f ——空气分压,kPa
 Nu ——努塞尔数 Sc ——施密特数

表 1 不同工况下喷头射流速度及射流弧度

工作压力		射流速度 $v_c/(m\cdot s^{-1})$					射流弧度				
p/kPa		15 号喷嘴	20 号喷嘴	24 号喷嘴	36 号喷嘴	44 号喷嘴	15 号喷嘴	20 号喷嘴	24 号喷嘴	36 号喷嘴	44 号喷嘴
250		15.26	15.05	15.85			0.170	0.194	0.212		
238					16.10					0.251	
200		12.88	14.28	14.91	15.56		0.162	0.184	0.204	0.245	
193						15.16					0.258
171						14.44					0.250
150		11.34	11.97	12.97	13.23	13.58	0.157	0.176	0.198	0.235	0.246
124						12.17					0.240
100		8.79	9.55	10.53	10.99	10.97	0.151	0.171	0.190	0.215	0.232
70						9.14					0.217
50		6.27	6.55	7.37	7.50		0.145	0.167	0.159	0.202	
35						6.19					0.210

2 模型求解

2.1 模型求解框架思路

根据折射式喷头射流模型、弹道轨迹方程和水滴蒸发模型,以 Eclipse 作为开发工具编写喷灌水量分布的计算程序,程序结构如图 2 所示。输入信息包括:喷头工作压力、喷嘴直径、喷头安装高度、初始水滴直径、水物理参数、温湿度等环境参数。在已知工作压力、喷嘴直径和喷头

安装高度时,通过折射式喷头喷洒模型,可计算喷头喷洒半径、射流速度和弧度;然后结合初始水滴直径等其他输入参数,用四阶龙格-库塔法求解水滴在空气中的运动,结合水滴粒径分布规律及试验过程中实测水量分布规律,求解喷头单条流道水量分布,再对单喷头进行全圆旋转,计算过程中不考虑水滴在空中的二次碎裂。输出结果包括水滴粒径分布、喷灌水量分布及动能强度分布,输出结果采用 Microsoft Excel 进行记录。

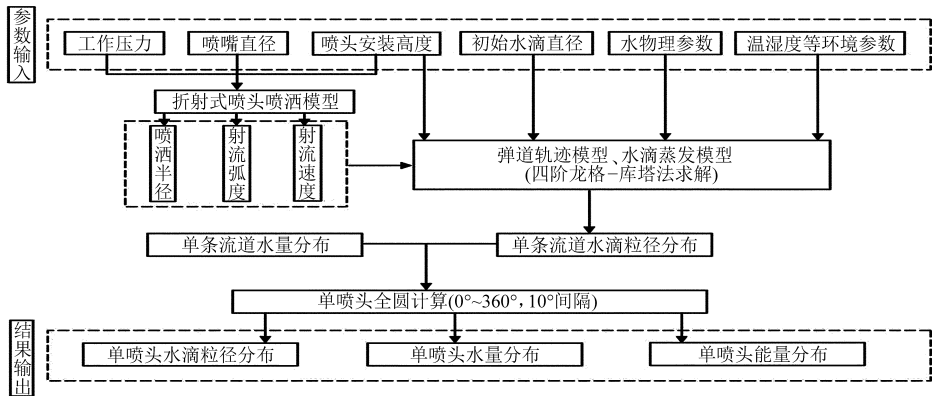


图 2 总体设计图
Fig. 2 Structure diagram of overall design

2.2 求解步骤

(1)输入工作压力、喷嘴直径和安装高度等参数后,根据计算程序中的式(4)和式(5),计算出折射式喷头喷洒半径、射流速度和射流弧度,然后根据射流速度和射流弧度对速度进行分解,计算出 x 、 y 、 z 方向上速度单位矢量。

(2)输入初始水滴直径 $D_0 \sim D_m$ (直径间隔为 ΔD)、水物理参数和环境参数等信息,结合计算 x 、 y 、 z 方向上水滴分速度,代入弹道轨迹方程,采用四阶龙格-库塔法求解考虑蒸发条件下水滴在空气中的运动。

(3)当水滴的喷射距离超出单喷头无风条件下的喷洒半径 W (式(6))时,该水滴直径视为最大水滴直径 D_w 。得出单条流道水滴直径 $D_0 \sim D_w$ 在径向上的分布规律。调入折射式喷头单条流道水量分布数据,根据样条插值的方法计算出不同直径水滴落点处对应的水量。

(4)对单条流道水量进行旋转,计算单喷头的水量。计算过程中考虑到 Nelson D3000 型喷头 36 个流道间水力特征参数差异较小,假定每个流道在射流方向上粒径分布、水量分布一致,则无风条件下单喷头水量分布计算方法为:模拟得出的单流道水量分布数据进行坐标转换,将直角坐标转换为极坐标,再以 10° 的旋转间隔对单流道水量分布数据进行 360° 旋转,得到无风情况下单喷头水量分布数

据。结合水滴落地速度和粒径等参数,计算出单喷头能量分布。

3 应用分析

3.1 单流道粒径及水量分布

为了验证软件模拟单条流道的精准性,试验测量了 200 kPa 工作压力、5 种喷嘴类型下喷头的水量分布及水滴粒径分布。采用 HOB0 RG3-M 型雨量筒收集喷洒水量,雨量筒沿射流方向布设,布设间距为 1 m,在水量扩散区域,对测点进行拓宽及加密布置,测试时间为 1 h。水滴粒径与速度的测量采用 Joanneum Research 公司生产的 2D 视频雨滴谱仪^[22],在沿射流方向上采集数据,采集点与水量分布雨量筒布设点相同,通过对 2DVD 数据实时监控^[23]。

通过软件计算值与试验实测值对比,对软件计算准确度进行分析。图 3 为无风条件下不同粒径水滴喷射距离模拟值与实测值对比,其中实测值的水滴直径为该位置处水滴群的体积中径^[24]。从图中可以看出,当喷嘴直径较小时,模拟值与实测值的差异较小,模拟准确性较好,但模拟值一般稍大于实测值。这是由于射流产生的水滴相互作用下,比单个水滴受到的空气阻力小,使实测值比模拟值稍大。随着喷嘴直径的增大,模拟的误差有所增加,这是由于模拟时,在不同喷嘴直径下射流

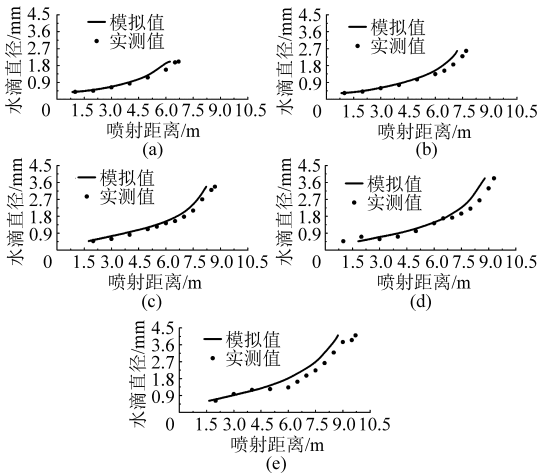


图3 水滴粒径与喷射距离模拟值和实测值对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated values of droplet size and flying distance

(a)15号喷嘴 (b)20号喷嘴 (c)24号喷嘴

(d)36号喷嘴 (e)44号喷嘴

水束在射流出水口已经完全碎裂成小水滴,试验发现,大喷嘴直径下水滴的形成是在距离射流出水口0.7~0.8 m位置处^[18],这样就减小了水滴射流距离,使得水滴喷射距离减小;而在距离喷头末端水滴模拟的误差相对近喷头处较大,也是这种原因造成的。

图4为软件模拟出的单流道水量分布模拟值与实测值的对比。可以看出,单条流道喷灌强度模拟值与实测值变化规律基本一致,而喷头末端位置处误差相对较大。这主要是由于应用该软件在计算水滴喷射距离时,在大粒径水滴产生的误差较大所致(图3)。从图中还可以看出,随着喷嘴直径的增大,模拟的精度有所降低,36号和44号喷嘴模拟出的

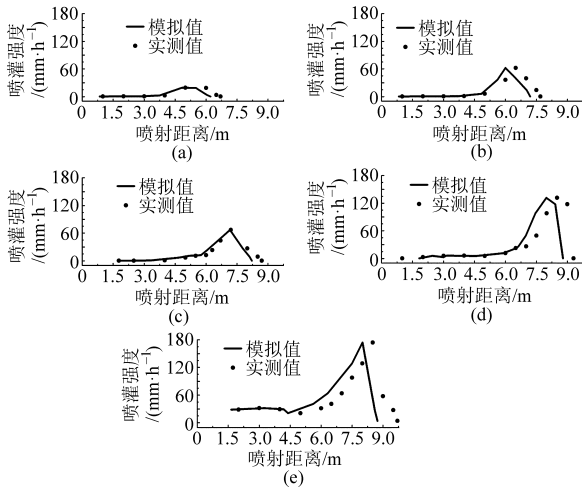


图4 单流道水量分布模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison of measured and simulated values of water application intensity for single jet flow

(a)15号喷嘴 (b)20号喷嘴 (c)24号喷嘴

(d)36号喷嘴 (e)44号喷嘴

水量集中的位置较实测值有所提前,产生这种差别也是上述原因造成的。

3.2 单喷头水量分布

通过 Surfer 软件对全圆旋转得出单喷头水量分布进行网格化处理,输出喷灌水量分布的矩阵格式数据,然后通过移动方向上数据的叠加,计算出移动情况下单喷头水量分布。为了验证全圆旋转方法的准确性,通过试验测得了室内移动情况下该喷头单侧水量分布,由于该喷头在垂直于移动方向上水量分布具有对称性,通过镜像的方法得出两侧水量分布,试验如图5所示。喷头上方安装有 YB-150 型压力表(西安仪表厂),以确保试验过程中 200 kPa 目标工作压力,喷头距地面高 1.5 m,试验过程中喷灌机行走速度为 20.12 m/h。在喷灌机单侧喷灌区域布设雨量筒(直径 9.72 cm),间隔为 0.5 m×0.5 m,喷灌机行走方向上布设 3 排,完成喷洒后,采用称量法测量喷洒水量,取喷灌机行走方向上 3 个测点水量平均值作为该点的喷水量。

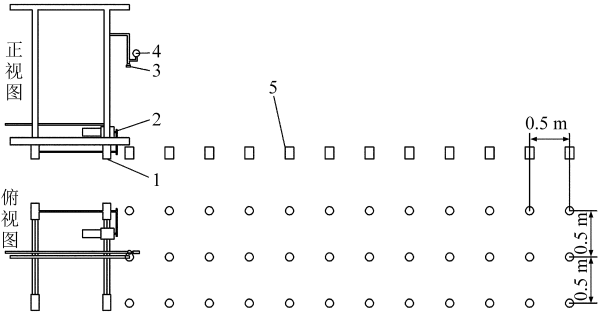


图5 单喷头移动水量分布测试示意图

Fig.5 Experimental setup of water distribution of lateral moving sprinkler

1. 驱动轮 2. 驱动电动机 3. 喷头 4. 压力表 5. 雨量筒

模拟值与实测值对比结果如图6所示,可以看出,通过计算得出的单喷头移动情况下水量分布变化趋势与实测值基本吻合,但是距离喷头具体位置处水量的模拟精度欠佳。这是因为在模拟单喷头水量分布时,假定每一个流道出水形式相同,然后按照等角度旋转得出,实际上喷盘每一个流道出水形式稍有差异,且流道间夹角不完全相同,因此在叠加计算时产生了一定的误差,但是并不影响整体的变化规律,这表明无风条件下该计算方法具有一定的准确性,计算出的单喷头水量分布能够反映实际喷灌效果。

3.3 组合均匀度分析

采用 Nelson D3000 型喷头 7.14 mm 喷嘴,在 200 kPa 工作压力下利用实测值与模拟值数据,以 24 m 平移式喷灌机为例,按照 1.5~6.0 m 喷头间距进行叠加,采用克里斯琴森均匀系数计算公式^[25]对

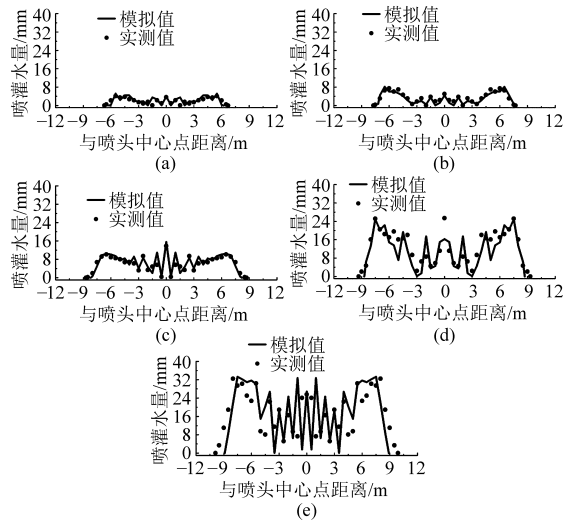


图6 单喷头水量分布模拟值与实测值对比
Fig.6 Comparison of measured and simulated values of water distribution of lateral moving sprinkler
(a)15号喷嘴 (b)20号喷嘴 (c)24号喷嘴
(d)36号喷嘴 (e)44号喷嘴

叠加数据进行计算,得出不同喷头间距下喷灌均匀度,计算结果如图7所示。从图中可以看出,模拟值与实测值的变化规律差异性较小,其中1.5、3.5、5.5、6.0 m 叠加间距下模拟值与实测值相对误差大,分别为4.48%、8.06%、4.49%和14.77%,其他叠加间距下误差相对较小,都在2.10%以内(最小值为0.04%)。叠加结果表明,在喷灌机优化设计时,采用计算软件进行模拟叠加,具有较好的准确性。

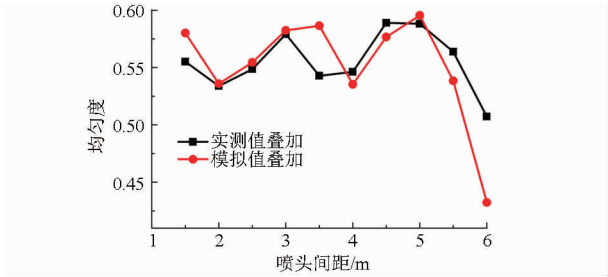


图7 24 m 喷灌机不同喷头安装间距下喷灌均匀度
模拟值与实测值对比

Fig.7 Comparison of measured and simulated values of Christiansen uniformity of 24 m long lateral moving sprinkler system

4 结论

- (1)采用高速摄像机观测射流速度和角度,通过分析试验数据建立多元非线性指数模型,分别回归出射流速度、射流弧度与喷头工作压力及喷嘴直径的关系式。
- (2)基于弹道轨迹方程,以 Eclipse 作为开发工具编写了喷灌水量分布的计算程序;该软件在已知喷头工作压力、喷嘴直径、喷头安装高度及环境参数条件下,可以计算出喷洒粒径分布、单喷头水量、能量分布及蒸发损失。并通过与实测值对比,验证了该计算软件的精准性。
- (3)以 24 m 平移式喷灌机为例,通过多喷头叠加的方法计算出不同喷头间距下组合均匀度,可为平移式喷灌机的设计提供技术指导。

参 考 文 献

1 Kincaid D C, Solomon K H, Oliphant J C. Drop size distributions for irrigation sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(3):839-845.

2 Hills D J, Barragan J. Application uniformity for fixed and rotating spray plate sprinkler[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1998, 14(1):33-36.

3 Faci J M, Salvador R, Playa n E, et al. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2001, 127(4):224-233.

4 Ortiz J N, De Juan J A, Tarjuelo J M. Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(3):367-379.

5 张以升,朱德兰,张林,等. 平移式喷灌机行走速度及喷灌均匀度试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(7):625-630.

Zhang Yisheng, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Study on translocating speed and water distribution uniformity of lightweight lateral move irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7):625-630. (in Chinese)

6 涂琴,李红,蔡彬. 轻小型移动式喷灌机组配套及性能试验[J]. 节水灌溉, 2010(11):59-61.

Tu Qin, Li Hong, Cai Bin. Small size movable sprinkler irrigation set configuration and performance experiment[J]. Water Saving Irrigation, 2010(11):59-61. (in Chinese)

7 Dukes M D, Perry C. Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(3):205-218.

8 Al-Ghobari H M. Effect of center pivot system lateral configuration on water application uniformity in an arid area[J]. Journal of Agricultural Science & Technology, 2014, 16(3):577-589.

9 Briggs B K, Fornstrom K J, Pochop L. Design and maintenance factors affecting application uniformity of low pressure center-pivot irrigation systems[C]//Irrigation and Drainage: Saving a Threatened Resource—in Search of Solutions, ASCE, 2015:257-262.

10 Playa n E, Zapata N, Faci J M, et al. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1):89-100.

11 李永冲,严海军,徐成波,等. 考虑水滴运动蒸发的喷灌水量分布模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7):127-132.

- Li Yongchong, Yan Haijun, Xu Chengbo, et al. Simulation of sprinkler water distribution with droplet dynamics and evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 127 – 132. (in Chinese)
- 12 刘海军, 龚时宏. 喷灌水滴的蒸发研究[J]. 节水灌溉, 2000(2): 16 – 19.
Liu Haijun, Gong Shihong. Study on evaporation of sprinkler droplets[J]. Water Saving Irrigation, 2000(2): 16 – 19. (in Chinese)
- 13 Sadeghi S H, Peters T R, Amini M Z, et al. Novel approach to evaluate the dynamic variation of wind drift and evaporation losses under moving irrigation systems[J]. Biosystems Engineering, 2015, 135: 44 – 53.
- 14 张志宇, 侯晓宇, 侯国恩. 由室内试验资料推求有风条件下的喷灌均匀度[J]. 河北农业大学学报, 2013(4): 136 – 141.
Zhang Zhiyu, Hou Xiaoyu, Hou Guoen. The uniformity calculation of sprinkler irrigation under wind condition using indoor experimental data[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2013(4): 136 – 141. (in Chinese)
- 15 De Lima J, Torfs P, Singh V P. A mathematical model for evaluating the effect of wind on downward-spraying rainfall simulators [J]. Catena, 2002, 46(4): 221 – 241.
- 16 Seginer I, Nir D, Bernuth R D. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(2): 285 – 306.
- 17 Vories E D, Von Bernuth R D, Mickelson R H. Simulating sprinkler performance in wind[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1987, 113(1): 119 – 130.
- 18 Burillo G S, Delirhasannia R, Playón E, et al. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(7): 521 – 531.
- 19 Ouazaa S, Burguete J, Paniagua M P, et al. Simulating water distribution patterns for fixed spray plate sprinkler using the ballistic theory[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 850 – 863.
- 20 Kincaid D C. Application rates from center pivot irrigation with current sprinkler types[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(4): 605 – 610.
- 21 Sayyadi H, Nazemi A H, Sadraddini A A, et al. Characterising droplets and precipitation profiles of a fixed spray-plate sprinkler [J]. Biosystems Engineering, 2014, 119: 13 – 24.
- 22 Kruger A, Witold F Krajewski. Tow-dimensional video disdrometer: a description[J]. Journal of Antmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 602 – 617.
- 23 巩兴晖, 朱德兰, 张林, 等. 基于 2DVD 的非旋转折射式喷头水滴直径分布规律[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 128 – 133.
Gong Xinghui, Zhu Delan, Zhang Lin, et al. Drop size distribution of fixed spray-plate sprinklers with two-dimensional video disdrometer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 128 – 133. (in Chinese)
- 24 李久生. 谈平均水滴直径的计算方法[J]. 节水灌溉, 1987(4): 21 – 23.
- 25 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling [R]. California Agricultural Experiment Station Bulletin No 670, Davis: California University, 1942.

(上接第 46 页)

- 16 郁晓庆, 韩文霆, 吴普特, 等. 土壤不同频率无线地下传感器网络信号传播特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 252 – 260, 218.
Yu Xiaoqing, Han Wenting, Wu Pute, et al. Experiment of propagation characteristics based on different frequency channels of wireless underground sensor network in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 252 – 260, 218. (in Chinese)
- 17 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181 – 185.
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181 – 185. (in Chinese)
- 18 齐江涛, 张书慧, 于英杰, 等. 基于蓝牙技术的变量施肥机速度采集系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 200 – 204.
Qi Jiangtao, Zhang Shuhui, Yu Yingjie, et al. Development of a ground speed collecting system for the variable rate fertilizer machine based on bluetooth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 200 – 204. (in Chinese)
- 19 吉林大学. 一种具有镇压力监测功能的镇压轮. 中国, 201410177715.4[P]. 2014 – 08 – 06.
- 20 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- 21 王万钧, 胡中. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- 22 张艳阳. 基于 ZigBee 的中央空调末端监控系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- 23 Geer D. Users make a beeline for Zigbee technology[J]. IEEE Computer Society Press, 2005, 38(12): 16 – 19.
- 24 瞿雷, 刘盛德, 胡咸斌. ZigBee 技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- 25 贾洪雷, 王刚, 王玉, 等. 2BH – 3 型行间播种机设计与试验[C]//2012 中国农业机械学会国际学术年会论文集. 2012.
- 26 赵佳乐, 贾洪雷, 姜鑫铭, 等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 78 – 83.
Zhao Jiale, Jia Honglei, Jiang Xinming, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 78 – 83. (in Chinese)