

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.015

圆形出口全射流喷头盖板结构优化与喷洒均匀性试验*

朱兴业 刘俊萍 袁寿其 蒋建园

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了探索全射流喷头均匀系数(CU)与分布系数(DU)之间的关系,选择圆形出口盖板的全射流喷头作为研究对象,设计了5个盖板出口直径,得出直径小于5.0 mm或大于7.0 mm时喷头不能工作。在工作压力为200、250和300 kPa下测量出喷头盖板直径为5.5、6.0和6.5 mm时的径向水量分布。布置方式选取为正方形,组合间距选取为7~15 m,采用三次样条插值法对组合CU和DU进行了仿真计算。结果表明:圆形出口盖板随着工作压力的增大,距喷头近处的水量增加,盖板出口的最优直径为6.0 mm。工作压力对组合CU和DU的影响并不明显;CU随组合间距的增加变化趋势是先相对平稳后急剧下降;DU随组合间距的增加经历了下降、增加和再下降的3个过程。通过对上述结果进行回归分析,初步提出了全射流喷头CU与DU之间的近似计算公式,为其在工程应用中提供理论基础。

关键词: 射流喷头 均匀系数 分布系数 圆形出口 盖板结构

中图分类号: S277.9^{*4} **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0079-05

Spraying Uniformity and Cover Plate Structural Parameters of Circular Outlet Fluidic Sprinkler

Zhu Xingye Liu Junping Yuan Shouqi Jiang Jianyuan

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To explore relationships between uniformity coefficient and distribution coefficient, the fluidic sprinkler with circular outlet cover plate (OCP) was chosen as the object. Five different OCP diameters were designed. The sprinkler cannot rotate when the diameter was less than 5.0 mm or more than 7.0 mm. Experiments were carried out under the operating pressure of 200 kPa, 250 kPa and 300 kPa and the radial water distribution of 5.5 mm, 6.0 mm and 6.5 mm, respectively. Square layout and combination spacing with 7~15 m were chosen. CU and DU were calculated by using the method of interpolation. The results showed that for the circular OCP, more water was distributed near the sprinkler with the increasing operating pressure. The optimal OCP diameter was 6.0 mm. Combination of CU and DU was slightly influenced by the operating pressure. As well as the increasing of the combination spacing, CU variation was stable firstly but sharply decreased later, and DU variation experienced three processes of becoming lower, becoming higher to attach the maximum value and becoming lower again for the reason of leakage spraying. The formula between CU and DU was put forward which was hoped to be a theoretical foundation for the project.

Key words: Fluidic sprinkler Uniformity coefficient Distribution coefficient Circular outlet Cover plate structure

收稿日期: 2012-06-01 修回日期: 2012-07-08

* 国家自然科学基金资助项目(51109098)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100506)、江苏大学江苏省现代农业装备与技术重点实验室开放基金资助项目(NZ201008)和江苏大学青年骨干教师培养工程资助项目

作者简介: 朱兴业, 副研究员, 主要从事流体机械及排灌机械研究, E-mail: zhuxy@ujs.edu.cn

引言

全射流喷头是国内学者自主研发的一种喷灌设备。喷灌系数是衡量喷头水力性能的重要指标,目前喷灌系数评价包括均匀系数和分布系数,最常用的有克里斯琴森均匀系数和分布系数^[1-3]。

国内外学者对喷灌系数进行了大量的研究,Christiansen 首次提出均匀系数的计算公式,在世界各国得到广泛应用^[2]。Fukui 等提出了喷灌均匀系数的计算机评价方法^[4]。陈学敏提出了一种组合喷灌强度和均匀度的计算机解析算法^[5]。韩文霆等对喷灌分布均匀系数进行了研究,并指出应根据评价和研究目的的不同选用相应的喷灌系数对均匀性进行综合评价^[6-7]。袁寿其等采用 Matlab 对全射流喷头组合喷灌进行了计算,提出了正方形和三角形布置时的最佳组合间距^[8]。劳东青等开发出喷头水量分布仿真及组合优化软件系统,可快速得出基于给定组合方式下的多种喷灌均匀系数^[9]。Hart 等通过研究认为当均匀系数大于 70% 时,喷灌分布系数服从正态分布,可以推导出近似表示这两种均匀系数的关系^[10]。李久生等对均匀系数与分布系数的关系进行了试验研究,通过 25 次试验数据的回归分析,给出了相应的回归方程^[11]。Zhang 等通过数学计算,推导了均匀系数与分布系数之间存在的相互关系^[12]。

袁寿其等对全射流喷头不同的信号嘴插拔深度、导管长度和间隙对水力性能的影响进行了试验,得出了它们的影响规律^[13]。朱兴业等对全射流喷头结构参数中的位差、作用区、收缩角、取水孔角度等进行了正交试验,得出了它们对步进频率和步进角度影响的主次顺序^[14-15]。李红等对不同结构的隙控式全射流喷头与摇臂式喷头进行了水力性能方面的对比研究^[16-17]。朱兴业等在 PY₁15 型摇臂式喷头出口喷嘴增加凹槽,从而提高了组合均匀系数^[18]。刘俊萍等对 PY 喷头设计了一种副喷嘴,使径向水量分布呈三角形,组合均匀系数提高至 85% 以上^[19]。陈超等以 PY₂30 型喷头为样机,依据面积相同原则设计了 4 种异形喷嘴,对比了变量喷头星形喷嘴和圆形喷嘴的水力性能,得出了星形喷嘴水量分布较优的结论^[20-21]。

上述研究中,全射流喷头的盖板均采用腰圆形的异形出口,限制了对盖板结构的优化。另外在全射流喷头均匀系数与分布系数的试验,以及它们之间的相互关系方面尚未见到相关的研究报告。因此,本文将出口盖板设计成圆形出口,对盖板直径的结构参数进行优化,在不同工作压力下试验得出其

水量分布,仿真计算出其均匀系数和分布系数并提出它们之间存在的关系,为全射流喷头的工程应用提供重要的理论数据。

1 材料与方法

1.1 技术指标

喷灌均匀系数(CU)和分布系数(DU)为控制喷灌质量的重要指标,采用 Christiansen 计算法^[2]计算均匀系数

$$C_u = \left(1 - \frac{\Delta h}{\bar{h}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其中 } \bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad \Delta h = \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{n}$$

式中 C_u ——均匀系数, %

Δh ——喷洒水深的平均离差, mm

\bar{h} ——喷洒水深的平均值, mm

n ——总测点个数

h_i ——第 i 个降水深值, mm

美国农业部(USDA) Criddle 等首先提出了分布系数的概念,并将其定义为 1/4 低值的测点水深平均值与所有测点水深平均值的比值^[3],分布系数计算公式为

$$D_u = \frac{4 \sum_{i=1}^{n_{lq}} h_{lq_i}}{\sum_{i=1}^n h_i} \times 100\% \quad (2)$$

其中 $n_{lq} = n/4$

式中 D_u ——分布系数, %

h_{lq_i} ——第 i 个大小排列的 $n/4$ 个降水深低值, mm

1.2 喷头模型

本文使用的喷头与已有文献中提到的全射流喷头之间的区别在于出口盖板的形状,已有文献中使用的出口盖板是腰圆异形出口(图 1a)。腰圆异形出口盖板可使射流元件一侧出口处与水束之间形成间隙,通过间断性的封堵间隙使此端的压强在高、低压间切换,两端形成压差从而完成全射流喷头直射、步进和反向工作。本文使用的出口盖板为圆形出口(图 1b)。圆形出口盖板可任意位置安装,与射流元件作用区之间形成倒角,在喷头工作时主射流附壁通过倒角产生一个驱动力推动喷头旋转,完成全射流喷头的全圆喷洒功能。另外,将全射流喷头的出口设计成常规的圆形出口,可增强其通用性。

圆形出口盖板全射流喷头的基圆直径为 4 mm,射流元件的位差和作用区长度为 3.2 mm 和 34 mm。

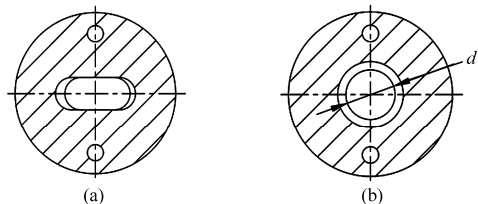


图1 出口盖板

Fig. 1 Outlet cover plate

(a) 腰圆异形出口 (b) 圆形出口

水流从基圆孔通过作用区后从圆形出口盖板喷射而出,由于水流在作用区内会形成扩散,因此盖板出口直径需大于基圆直径。考虑到盖板出口直径 d 微小的尺寸变化对水力性能的影响并不会太明显,因此选择 0.5 mm 为变化间距,设计了盖板出口直径为 5.0 、 5.5 、 6.0 、 6.5 和 7.0 mm 进行试验,以确定喷头能正常工作的尺寸范围。

1.3 试验方法

在江苏大学流体机械工程技术研究中心的喷灌大厅内进行测试,该大厅为直径 44 m 的室内圆形实验厅。图2为试验系统示意图和现场照片。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《水量分布均匀性和试验方法》和国家标准 GB/T 22999—2008《旋转式喷头》等^[22-23],在喷头稳定运转 10 min 之后开始数据测量,试验 60 min 之后对雨量筒所采集的数据进行读取。

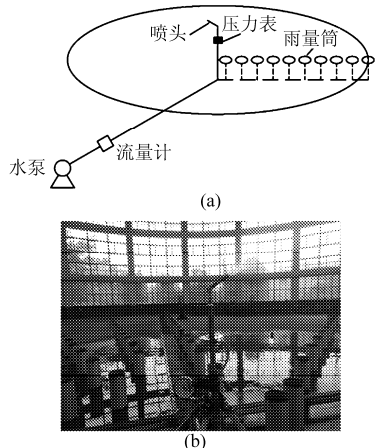


图2 试验系统

Fig. 2 Test system

(a) 示意图 (b) 现场照片

1.4 布置形式

利用单喷头水量分布求组合 CU 和 DU 的一般计算方法为:先通过试验得到单喷头的水量分布,根据喷头布置形式和组合间距,选择一个典型区域,确定有贡献的喷头在该区域内的水量分布并对其进行

叠加,得到典型区域的水量分布,代入计算公式即可求出。喷头的布置形式一般用相邻4个喷头组成的平面图形表示。图3为喷头矩形布置形式,喷头沿支管布置的间距为 a 、相邻两支管的布置间距为 b 。有稳定主风向时,喷头宜采用矩形组合,且使支管尽可能与主风向垂直;风向多变时,宜采用矩形的特例正方形组合形式^[24-25]。本文就喷头正方形组合布置形式($a=b$)对全射流喷头的 CU 与 DU 加以讨论。

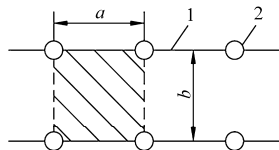


图3 矩形布置形式

Fig. 3 Rectangular layout

1. 支管 2. 喷头

2 结果与讨论

当 $d=5.0\text{ mm}$ 时,水流从盖板喷射后不能形成附壁,喷头不能完成旋转工作。这是因为水流在作用区内充分扩散,盖板出口直径过小而不能使水流附壁,因此盖板出口直径小于 5.0 mm 时喷头不能工作。当 $d=7.0\text{ mm}$ 时,水流形成附壁,但不能推动喷头完成旋转工作。这是因为盖板出口直径过大,与作用区之间形成的倒角太小,水流通过倒角的推动力不能完全克服所受到的摩擦阻力使喷头稳定工作,因此盖板出口直径大于 7.0 mm 时,喷头不能工作。

对圆形盖板出口直径为 5.5 、 6.0 和 6.5 mm 进行试验,工作压力分别设定为 200 、 250 和 300 kPa ,喷头径向水量分布曲线如图4所示。

由图4可以看出,对于所有的圆形出口盖板,随着工作压力的增大,射程并没有明显地增加,而喷头近处的水量分布增多。这是因为对于圆形的出口盖板,水流从盖板出口喷射而出时就形成了散射,在工作压力增加时散乱的每股水流仅能喷射到距喷头的近处,增加不了它的射程,因此随着流量的增多,距喷头近处的水量分布增多,射程变化不大。

采用三次样条插值法^[26],利用 Matlab 语言编制程序,根据图4的喷头水量分布曲线,设计正方形组合间距($a=b$)为 $7\sim 15\text{ m}$,每间隔 1 m 对组合 CU 与 DU 进行计算,所得组合 CU 与 DU 变化曲线如图5所示。

从图5中可以看出:组合 CU 与 DU 的影响因素为盖板出口直径、工作压力和组合间距。

当盖板出口直径相同时,各种工作压力下 CU 和 DU 的数值以及它们随着组合间距的变化趋势都

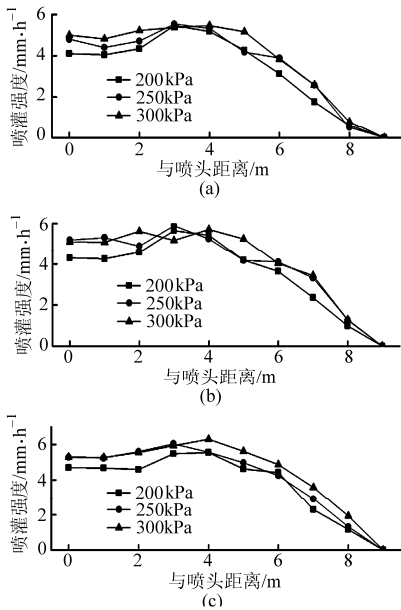


图4 喷头径向水量分布曲线

Fig.4 Water distribution of sprinkler

(a) $d = 5.5 \text{ mm}$ (b) $d = 6.0 \text{ mm}$ (c) $d = 6.5 \text{ mm}$

近似相同,工作压力对CU和DU的影响并不明显。在组合间距为7~13 m时CU的变化趋势相对平稳,但当组合间距大于13 m时CU随组合间距的增

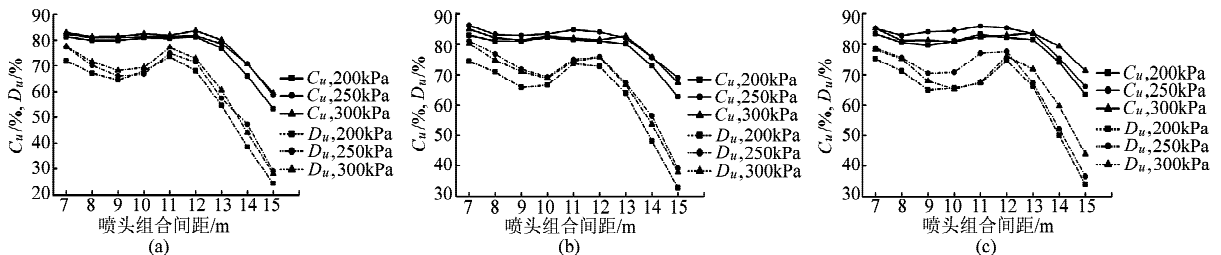


图5 组合均匀系数与分布系数曲线

Fig.5 Combined CU and DU curves

(a) $d = 5.5 \text{ mm}$ (b) $d = 6.0 \text{ mm}$ (c) $d = 6.5 \text{ mm}$

当组合间距相同,盖板出口直径为6.0 mm或6.5 mm时,CU与DU的数值略大于盖板出口直径为5.5 mm的情况。盖板出口直径为6.0 mm与6.5 mm进行对比时,CU与DU在不同的工作压力时互有大小,不能明确地区分出其大小的对比关系,这说明盖板出口直径6.0 mm为喷头的最优结构尺寸。从计算结果的数值情况认为CU与DU之间存在着定量关系,对图5中的共81组数据用函数进行回归分析,推导出2种系数之间的关系为

$$D_u = 1.97C_u - 91 \quad (4)$$

Hart等提出均匀系数与分布系数的经验公式为 $D_u = 100 - 1.59(100 - C_u)$,李久生等提出的经验公式为 $D_u = 1.21C_u - 24^{[10-11]}$ 。由式(4)可知,与规范规定值 $C_u = 75\%$ 对应的 D_u 值约为57%,比Hart等的公式计算结果小3%,比李久生等的公式计算结

果小9%。根据上述计算均匀系数与分布系数的变化规律,认为这种圆形出口全射流喷头在工程应用中最优的组合间距系数为1.1~1.3。

加急剧下降。在组合间距为7~10 m时DU随组合间距的增加而下降,这是因为随着组合间距的增加,在典型区域的局部地区内叠加出了较高的喷灌强度,扩大了喷灌强度高低值之间的差距;在组合间距为10~12 m时DU增加达到了最高值,这说明在这种组合间距下水量在典型区域内达到了最均匀分布状况;当组合间距大于12 m时,DU随组合间距的增加急剧下降,这是因为随着组合间距的增加,典型区域的局部地区内出现了漏喷的现象,从而DU快速降低。

当工作压力相同时,盖板不同出口直径的CU与DU随组合间距变化的趋势基本一致。在工作压力为250 kPa或300 kPa时,CU与DU的数值略大于工作压力为200 kPa时。对工作压力为250 kPa与300 kPa进行对比时,CU与DU在不同的组合间距时互有大小,不能明确地区分出其大小的对比关系,这可能是由于各盖板出口直径在250 kPa与300 kPa时的水量分布相互接近,并且在试验中不可避免地会产生部分的试验误差,从而无法详细地分析出它们之间特定的大小规律。

果小9%。根据上述计算均匀系数与分布系数的变化规律,认为这种圆形出口全射流喷头在工程应用中最优的组合间距系数为1.1~1.3。

3 结论

(1)全射流喷头出口盖板形状由腰圆形出口修改成常规的圆形出口,盖板可任意位置安装,增强其通用性。

(2)对于圆形出口盖板,水流从出口喷射而出时形成了散射,随着工作压力的增大,散乱的更多水流仅能喷射到距喷头的近处,并不能明显地增加其射程,盖板出口的最优直径为6.0 mm。

(3)设计正方形组合间距为7~15 m时对组合CU与DU分别进行了计算,得出工作压力对CU和DU的影响并不明显;在组合间距小于13 m时CU

随组合间距的增加变化趋势相对平稳,在大于 13 m 后 CU 急剧下降。DU 随组合间距的增加经历了下降、增加和再下降 3 个过程。

(4) CU 与 DU 之间存在着定量关系,初步提出了 CU 与 DU 之间的近似计算公式并建议在工程应用中最优的组合间距系数为 1.1 ~ 1.3。

参 考 文 献

- 1 朱兴业,袁寿其,李红,等. 全射流喷头的原理及实验研究[J]. 排灌机械,2005,23(2):23~26.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Theory and experimental research of fluidic sprinkler[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005,23(2):23~26. (in Chinese)
- 2 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling [R]. California Agricultural Experiment Station Bull. 670 California University, Berkeley, October, 124. 1942.
- 3 Criddle W D. Methods for evaluating irrigation system [M]. Soil Conservation Service Handbook, USDA, 1956.
- 4 Fukui Y, Nakanishi K, Okamura S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity[J]. Irrigation Science, 1980,1(2):23~32.
- 5 陈学敏. 用电子计算机计算组合喷灌强度和均匀度[J]. 喷灌技术,1981(1):6~12.
- 6 韩文霆. 喷灌分布均匀系数研究[J]. 节水灌溉,2008(7):4~8.
Han Wenting. Research on distribution uniformity coefficient for sprinkling irrigation systems [J]. Water Saving Irrigation, 2008(7):4~8. (in Chinese)
- 7 韩文霆,吴普特,杨青,等. 喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(9):172~177.
Han Wenting, Wu Pute, Yang Qing, et al. Advances and comparisons of uniformity evaluation index of sprinkle irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(9):172~177. (in Chinese)
- 8 袁寿其,朱兴业,李红,等. 基于 MATLAB 全射流喷头组合喷灌计算模拟[J]. 排灌机械,2008,26(1):47~52.
Yuan Shouqi, Zhu Xingye, Li Hong, et al. Simulation of combined irrigation for complete fluidic sprinkler based on MATLAB[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008,26(1):47~52. (in Chinese)
- 9 劳东青,韩文霆. 喷头水量分布仿真及组合优化软件系统研究[J]. 节水灌溉,2010(1):42~46.
Lao Dongqing, Han Wenting. Research on software for sprinkler water distribution dynamic simulation and spacing optimization [J]. Water Saving Irrigation, 2010(1):42~46. (in Chinese)
- 10 Hart W E, Reynolds W N. Analytical design of sprinkler systems [J]. Transactions of the ASAE, 1965,8(1):83~85,89.
- 11 李久生,饶敏杰. 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, Rao Minjie. Evaluation methods of sprinkler water nonuniformity[J]. Transactions of the CSAE, 1999,15(4):78~82. (in Chinese)
- 12 Zhang L, Merkley G P. Relationships between common irrigation application uniformity indicators[J]. Irrigation Science, 2012,30(2):83~88.
- 13 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)
- 14 朱兴业,袁寿其,李红. 全射流喷头结构参数正交试验[J]. 农业工程学报,2009,25(4):103~107.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong. Orthogonal test for the structure parameters of complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(4):103~107. (in Chinese)
- 15 朱兴业,蔡彬,涂琴. 轻小型喷灌机组逐级阻力损失水力计算[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):180~184.
Zhu Xingye, Cai Bin, Tu Qin. Head loss hydraulic calculation step by step for light and small sprinkler irrigation system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2011,29(2):180~184. (in Chinese)
- 16 李红,袁寿其,谢福祺,等. 隙控式全射流喷头性能特点及与摇臂式喷头的比较研究[J]. 农业工程学报,2006,22(5):82~85.
Li Hong, Yuan Shouqi, Xie Fuqi, et al. Performance characteristics of fluidic sprinkler controlled by clearance and comparison with impact sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(5):82~85. (in Chinese)
- 17 王超,李红,杨炎财,等. 双向步进式全射流喷头工作稳定性[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(3):368~372.
Wang Chao, Li Hong, Yang Yancai, et al. Working stability of two way stepping fluidic sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012,30(3):368~372. (in Chinese)
- 18 朱兴业,袁寿其,刘俊萍. 低压条件下 PY₁₅ 型摇臂式喷头水力性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(11):76~80.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Liu Junping. Hydraulic performance of impact sprinkler type PY₁₅ at low pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):76~80. (in Chinese)
- 19 刘俊萍,袁寿其,李红,等. 摇臂式喷头组合喷洒均匀性的改进[J]. 农业工程学报,2011,27(7):107~111.
Liu Junping, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Combination uniformity improvement of impact sprinkler[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(7):107~111. (in Chinese)
- 20 陈超,袁寿其,李红,等. 异形喷嘴对变量喷头水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(12):111~115.
Chen Chao, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Effect of non-circle nozzle on hydraulic performance of impact variable-rate sprinkler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):111~115. (in Chinese)

度下,由于碰撞角度的不同,导致传感器输出电压峰值和上升时间分别在 2.0 ~ 4.0 V 和 15 ~ 35 μ s,这与理论分析结论基本吻合。

参 考 文 献

- 1 Craessaerts G, Baerdemaeker J D, Missotten B, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. *Biosystems Engineering*, 2010,106(2): 97 ~ 102.
- 2 Omid M, Lashgari M, Mobli H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010,37(10): 7 080 ~ 7 085.
- 3 Maertens K, Ramon H, Baerdemaeker J D. An on-the-go monitoring algorithm for separation processes in combine harvesters[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004,43(3): 197 ~ 207.
- 4 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. *农业工程学报*, 2005,21(5): 1 ~ 6.
Yu Jianqun, Fu Hong, Li Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005,21(5): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 5 Wojtkowski M, Pecan J, Horabik J, et al. Rapeseed impact against a flat surface: physical testing and DEM simulation with two contact models[J]. *Powder Technology*, 2010,198(1): 61 ~ 68.
- 6 Sakaguchi E, Suzuki M, Favier J F, et al. Numerical simulation of the shaking separation of paddy and brown rice using the discrete element method[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001,79(3): 307 ~ 315.
- 7 李耀明,赵湛,陈进,等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析[J]. *农业机械学报*, 2009,40(3): 56 ~ 59.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(3): 56 ~ 59. (in Chinese)
- 8 孙裕晶,马成林,牛序堂,等. 基于离散元的大豆精密排种过程分析与动态模拟[J]. *农业机械学报*, 2006,37(11): 45 ~ 48.
Sun Yujing, Ma Chenglin, Niu Xutang, et al. Discrete element analysis and animation of soybean precision seeding process based on CAD boundary model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006,37(11): 45 ~ 48. (in Chinese)
- 9 徐立章,李耀明. 水稻谷粒冲击损伤临界速度分析[J]. *农业机械学报*, 2009,40(8):54 ~ 57.
Xu Lizhang, Li Yaoming. Critical speed of impact damage on a rice kernel[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(8): 54 ~ 57. (in Chinese)
- 10 Tijskens E, Ramon H, Baerdemaeker J D. Discrete element modelling for process simulation in agriculture[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003,266(3): 493 ~ 514.
- 11 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. *农业工程学报*, 2011,27(5): 117 ~ 121.
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011,27(5): 117 ~ 121. (in Chinese)
- 12 周利明,张小超,刘阳春,等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2010,41(6): 167 ~ 171.
Zhou Liming, Zhang Xiaochao, Liu Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(6): 167 ~ 171. (in Chinese)
- 13 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009.
- 14 唐忠,李耀明,赵湛,等. 夹带损失传感器不同安装位置对籽粒检测精度的影响[J]. *农业工程学报*, 2012,28(10): 46 ~ 52.
Tang Zhong, Li Yaoming, Zhao Zhan, et al. Effect of different installed location of entrainment loss sensor on grain testing accuracy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(10): 46 ~ 52. (in Chinese)
- 15 Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011,76(2): 183 ~ 188.

(上接第 83 页)

- 21 陈超,李红,袁寿其,等. 出口可调式变量喷头喷灌均匀性[J]. *排灌机械工程学报*,2011,29(6):536 ~ 541.
Chen Chao, Li Hong, Yuan Shouqi, et al. Irrigation uniformity of nozzle-changeable variable-rate sprinkler[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011,29(6): 536 ~ 541. (in Chinese)
- 22 GB/T 19795. 2—2005 水量分布均匀性和试验方法[S]. 2005.
- 23 GB/T 22999—2008 旋转式喷头[S]. 2008.
- 24 周世峰. 喷灌工程学[M]. 北京:北京工业大学出版社,2004.
- 25 李小平. 喷灌系统水量分布均匀度研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
Li Xiaoping. Study on distribution uniformity of sprinkler system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- 26 Han Wenting, Fen Hao, Wu Pute, et al. Evaluation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines [C]//2007 ASABE Annual International Meeting, 2007.