

低压条件下 PY₁₅ 型摇臂式喷头水力性能试验^{*}

朱兴业 袁寿其 刘俊萍

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 针对喷头在低压条件下工作时水力性能较差的问题,提出采用异形喷嘴降低水滴打击强度并改善喷洒均匀性的方法。选取 PY₁₅ 型摇臂式喷头为研究对象,设计了 3 套改进喷嘴的方案,在出口喷嘴上增加了 1、2、3 个凹槽,凹槽的尺寸均为宽 0.5 mm,高 0.3 mm,位置分别在出口喷嘴下方和左右两侧。在工作压力为 200 kPa 下进行了试验测量,同时在正方形组合间距为 13 ~ 18 m 时,采用 Matlab 语言编制程序对其进行了仿真计算。试验和计算结果表明:在低压条件工作时,随着凹槽数量的增多,流量增大,射程缩短 8.1% ~ 9.4%,末端水滴直径降低系数为 2.9% ~ 6.8%,平均喷灌强度增大并均符合规范要求。增加凹槽有利于提高组合均匀系数,出口喷嘴增加 3 个凹槽时效果最佳,组合均匀系数最高超过 90%,证明了所设计异形喷嘴方案的可行性。

关键词: 摇臂式喷头 低压 水力性能 异形喷嘴 均匀系数

中图分类号: S277.9⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0076-05

Hydraulic Performance of Impact Sprinkler Type PY₁₅ at Low Pressure

Zhu Xingye Yuan Shouqi Liu Junping

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

Abstract

To overcome the poor hydraulic performance problem of impact sprinkler when operating at low pressure, a program of modifying the shape of outlet nozzle was put forward. It was used to reduce the droplet impact strength and improve the uniformity coefficient. Impact sprinkler typed PY₁₅ was chosen and three improved nozzles were designed. One, two or three notches were to be added in the outlet nozzle, respectively. All the notches were 0.5 mm in width and 0.3 mm in height and they were set at bottom, left or right side of the outlet nozzle. Experiments were carried out under the low operating pressure of 200 kPa. When the rectangular spaces were 13 m to 18 m, Matlab was used to establish a program to simulate the hydraulic performances. The results showed that with the increase in the number of notches, the flow-rate increased, the wetted radius were shortened by 8.1% to 9.4%, the reduced coefficient of droplet diameter was 2.9% to 6.8%, the average irrigated intensity increased and complied with national requirement. The combined uniformity coefficient was improved for all the improved nozzles. The effect was more obvious when three notches were added in the outlet nozzle and the maximal uniformity coefficient can be more than 90%. Modifying nozzle shape was proved to be an available program as a result.

Key words Impact sprinkler, Low pressure, Hydraulic performance, Sprinkler shaped nozzle, Uniformity coefficient

引言

世界主要发达国家一直致力于喷头的改进及研

究开发,其发展趋势是向多功能、节能、低压等综合方向发展^[1~2]。较低的喷灌强度、较小的水滴打击强度和较高的喷灌均匀度,是喷头喷灌的主要技术

收稿日期: 2011-01-24 修回日期: 2011-07-27

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)、国家自然科学基金资助项目(51109098)、中国博士后科学基金资助项目(20110491357)和江苏大学校基金资助项目(09JDG046)

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

要求。喷灌强度与水滴打击强度都是相对土壤及作物而言,喷灌均匀度是保证作物均匀生长的前提,也是合理利用喷灌水的必要条件,用均匀系数表示,其值宜高不宜低。李久生^[3]在正常的额定工作压力下研究了摇臂式喷头结构参数对喷洒水力性能的影响。Ravindra V K^[4]等提出一套线性规划模型,评价喷灌均匀度等性能对加压灌溉进行了优化设计; Singh A K^[5]等研制出低压用水喷嘴,提供了一种简单、适用于小型农场的喷灌设备,并对其进行了水力性能的试验。针对喷头在低压条件下工作,通过改进出口喷嘴以改善其水力性能尚未见到相关的研究报道。

本文选取 PY₁₅ 型摇臂式喷头为研究对象,在其最低额定工作压力下工作时,通过改进喷头的喷嘴,对其水力性能进行系统的试验,并通过仿真计算出组合喷洒均匀系数,拟提出低压下提高喷洒均匀系数的改进方案,为摇臂式喷头在工程应用中提供重要的理论数据。

1 异形喷嘴改进设计

摇臂式喷头在低压下工作时,由于喷头喷嘴为圆形,使水流集中喷射而出,水滴打击强度较大,组合后均匀系数较低。因此选择 PY₁₅ 型摇臂式喷

头为研究对象,对原喷嘴进行结构改进设计,改善其水力性能。图 1 为 PY₁₅ 型摇臂式喷头结构图,喷嘴出口直径为 4 mm,外壁直径为 6 mm,即喷嘴的壁厚仅为 1 mm,为保证摇臂式喷头的耐久可靠性,同时考虑到喷头长时间应用时的磨损问题,增加凹槽厚度取为 0.3 mm。根据喷头射流的出口特性,设计凹槽宽度应为凹槽厚度的 1~2 倍,因此设计凹槽宽度为 0.5 mm。图 2 为喷嘴改进前和改进方案的结构图,改进的 3 种方案中,凹槽尺寸均为宽 0.5 mm,高 0.3 mm。改进方案 1 设置在出口喷嘴下方共 1 个凹槽,改进方案 2 设置在出口喷嘴下方的左、右两侧共 2 个凹槽,改进方案 3 设置在出口喷嘴下方和左右两侧共 3 个凹槽。

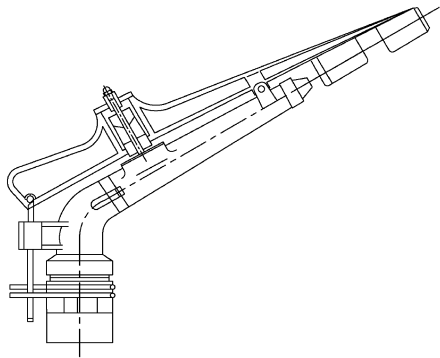


图 1 PY₁₅ 型摇臂式喷头结构图
Fig. 1 Structure of PY₁₅ impact sprinkler

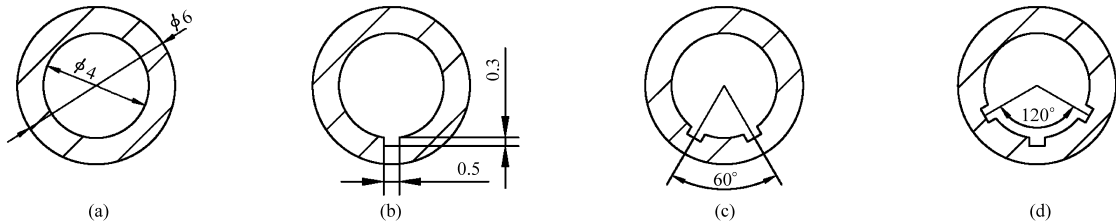


图 2 喷嘴改进前后结构图
Fig. 2 Structure of original and improved nozzles
(a) 原喷嘴 (b) 改进方案 1 (c) 改进方案 2 (d) 改进方案 3

2 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》^[6]和 GB/T 22999—2008《旋转式喷头》^[7]等,试验选用 PY₁₅ 型摇臂式喷头作为试验样机,在江苏大学流体机械工程技术研究中心喷灌大厅内进行试验。按国家标准, PY₁₅ 型喷头额定工作压力范围为 200~400 kPa,试验中选取其最低的额定工作压力 200 kPa,在稳定运转 10 min 后开始数据测量,管路压力由 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,测量时间为 1 h,测量出距喷头径向线上的点喷灌强度。采用滤纸色斑法对距离喷头最远处射流的末端

水滴色斑直径进行测量,滤纸表面的混合粉末包括白色固定剂滑石粉与胭脂红,这两种材料的质量比为 100。

试验中,改进前后的所有喷嘴均与同一个摇臂式喷头喷体采用螺纹连接,同时将平均末端水滴色斑直径作为每种出口形状喷嘴的试验值。对各喷嘴采用混有相同比例粉末的滤纸测量 10 次,每次测量取 5 个色斑点,以 50 个测量点数据计算出的平均值作为最终试验数据。

3 结果及讨论

3.1 流量、射程特性

表 1 为各喷嘴水力参数对照表。从表 1 中可以

看出,原喷嘴基础上增加了凹槽后,在工作压力相等的情况下,凹槽数量越多,流量越大。这是因为喷嘴改进后,增加了当量出口直径,工作压力相等时,流量必然增大。同时可看出改进后的射程比原喷嘴小,通过计算得增设凹槽使射程缩短了 8.1% ~ 9.4%。这是因为增设凹槽破坏了喷射水流的核心区,从而减小水流的动能,使喷头喷洒的近处水量增多,远部水量下降,因此相同工作压力下,射程比原喷嘴小。对比改进后的 3 个喷嘴,凹槽数量对它们射程的影响并不明显。因为改进后的 3 个喷嘴水流中心流速相同,凹槽的数量仅影响到近、中部的水量分布,喷射速度基本保持一致,因此改进后喷嘴的射程接近。

表 1 各喷嘴水力参数对照表
Tab.1 Comparison of hydraulic parameters
for different nozzles

方案	工作压力 /kPa	流量/ m ³ ·h ⁻¹	射程 /m	色斑直径 /mm
原喷嘴	200	1.04	14.9	34.2
改进方案 1	200	1.12	13.7	32.6
改进方案 2	200	1.15	13.6	31.8
改进方案 3	200	1.18	13.5	30.4

3.2 末端水滴直径

根据国家标准《喷灌工程技术规范》^[8],喷灌水
滴直径可在一定程度上反映喷洒水的打击强度。本文
推导末端水滴直径时采用了廖炜等^[9]于 2008 年
提出的水滴直径与色斑直径间关系的经验公式

$$d=0.478D^{0.610} \tag{1}$$

式中 d ——水滴直径,mm
 D ——色斑直径,mm

通过试验,根据式(1)计算出末端水滴直径,水
滴直径降低系数为异形喷嘴改进后水滴直径减少量
与原喷嘴水滴直径的比值,计算结果如表 2 所示。
从表 2 中可以看出,原喷嘴上增设了凹槽后,末端水
滴直径的降低系数为 2.9% ~ 6.8%。这是由于改
进后的出口喷嘴形状为异形出口,改变了原来水流

的喷洒方向,使摇臂式喷头低压工作条件下的出射
水流扩散喷射,形成更小的末端水滴。凹槽增设越
多,末端水滴直径降低系数就会越大。通过试验测
量,发现增设凹槽可以降低水滴打击强度,这对改善
喷头水力性能具有明显效果。

表 2 各喷嘴末端水滴直径降低系数
Tab.2 End droplet diameter of different nozzles

方案	水滴直径/mm	水滴直径降低系数/%
原喷嘴	4.12	
改进方案 1	4.00	2.9
改进方案 2	3.94	4.4
改进方案 3	3.84	6.8

3.3 平均喷灌强度

较低的喷灌强度是相对于土壤入渗速度而言,
喷灌强度必须低于土壤入渗速度,否则喷灌的降水
会来不及渗入土内,地面将积水或产生径流。在不
同质地土壤上对不同作物喷灌时,喷灌强度应小于
其允许喷灌强度值。

当测点所代表的面积相等时,平均喷灌强度 $\bar{h}$
表示为

$$\bar{h}=\sum_{i=1}^nh_i/n \tag{2}$$

式中 h_i ——某测点的喷洒水深,mm
 n ——测点数

当测点所代表的面积不相等时,平均喷灌强度
为

$$\bar{h}=\sum_{i=1}^nS_ih_i/\sum_{i=1}^nS_i \tag{3}$$

式中 S_i —— i 测点所代表的面积,m²

图 3 为各喷嘴的径向水量分布曲线。按式(3)
计算出各喷嘴下单喷头的平均喷灌强度,当单喷头
水量分布确定后,影响组合喷灌强度和组合均匀度
的主要因素为喷头组合方式和组合间距。在组合喷
灌中,喷头布置方式有很多种,其中应用较多的为
正方形组合布置,本文以喷头正方形组合布置形式
为例,对 PY₁₅ 型喷头在低压工作条件下加以讨论,

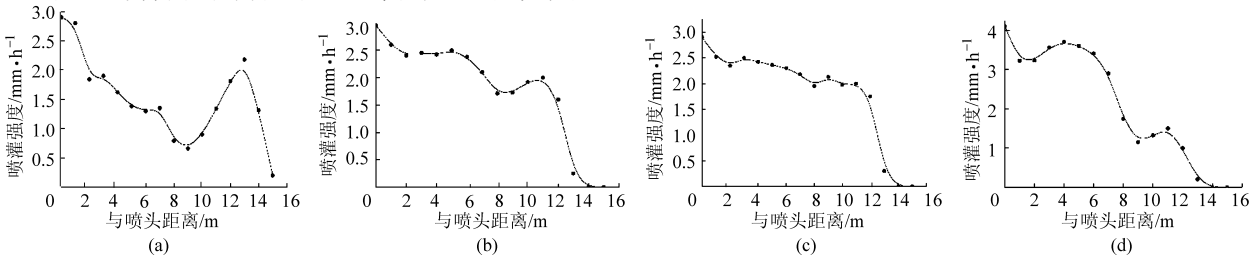


图 3 各喷嘴的径向水量分布曲线

Fig.3 Radial water distribution for different nozzles
(a) 原喷嘴 (b) 改进方案 1 (c) 改进方案 2 (d) 改进方案 3

根据它的射程,选取正方形组合间距分别为 13、14、15、16、17、18 m,采用 Matlab 语言编制程序对其进行仿真计算。

表 3 为单喷头和正方形组合间距下各喷嘴平均喷灌强度,从表 3 中可以看出,喷嘴增设凹槽后,单喷头和相同正方形组合间距下的平均喷灌强度增加,凹槽增加越多,平均喷灌强度增加得越大。这是因为增设凹槽后,使射程缩短的同时,喷头近处水量有较明显的增加,远处水量下降,从而增大了平均喷灌强度。喷嘴改进前后,平均喷灌强度均低于国家标准^[8]中的最低允许喷灌强度 8 mm/h,证明了试验喷嘴符合规范要求。

表 3 单喷头及正方形组合间距下的平均喷灌强度

Tab.3 Average irrigated intensity for different nozzles under rectangular combined spaces mm/h

方案	单喷头	正方形组合间距/m					
		13	14	15	16	17	18
原喷嘴	1.42	4.10	4.31	4.04	3.58	3.21	2.88
改进方案 1	1.61	5.65	4.84	4.26	3.73	3.30	2.93
改进方案 2	1.77	5.68	4.91	4.36	3.85	3.43	3.08
改进方案 3	1.83	5.88	5.13	4.52	4.00	3.57	3.21

3.4 组合均匀度

采用 Christiansen 算法^[10],喷灌均匀系数计算式为

$$C_u = \left(1 - \frac{\Delta h}{h}\right) \times 100\%$$
 (4)

式中 Δh——喷洒水深的平均离差,mm
每个网格点代表的面积相等时

$$\Delta h = \sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}| / n$$
 (5)

目前国内外有众多学者采用电算法对喷头组合喷灌进行研究。陈学敏^[11]最早于 1981 年提出了一种组合喷灌强度和均匀度的计算机解析算法;同年,张新华等^[12]详细给出了将喷头径向数据转换为网格数据的解析算法原理和计算过程。Melissa C^[13]等对农田灌溉喷头均匀性进行了分析研究;袁寿

其^[14]等采用 Matlab 对全射流喷头组合喷灌进行了计算,求出不同组合间距系数下的全射流喷头组合均匀系数;韩文霆^[15]提出一种三次样条 2 次插值的方法,通过径向和周向的三次样条插值计算出未知点的降水深,从而计算出喷灌均匀系数。本文在三次样条插值进行单喷头水量分布数据分析的基础上,采用叠加法进行喷头组合喷灌强度和组合均匀度的计算,并对组合均匀度随组合间距变化进行仿真,为 PY₁₅ 型喷头低压工作条件下提供充实的研究数据。

由图 3a 可以看出,喷头喷嘴改进前,在低压条件下,水量集中分布在离喷头远处,近、中部水量较少,组合喷灌时会造成叠加区域水量多,分布不均匀。改进后的喷嘴(图 3b、3c、3d)由于喷嘴结构上增加了凹槽,减少了喷射射程,水流通过喷嘴后主要分散在近处,使近、中部水量增多,有利于提高组合喷洒的均匀性。

在 PY₁₅ 型喷头低压工作条件下,按以上提到的各正方形组合间距,对组合均匀度进行仿真计算。图 4 为正方形组合间距 15 m 时组合喷洒水量分布的等值线图。从图中可以看出,摇臂式喷头原喷嘴组合喷灌时,中部水量多,最大值与最小值之间相差较大,喷洒最不均匀。改进方案后,随着近部水量的增多,逐渐趋于均匀。改进方案 1 和改进方案 2 两者水量分布相似,改进方案 3 最为均匀。

图 5 为组合均匀系数与正方形组合间距的仿真曲线,从图中可以看出,原喷嘴的组合均匀系数较低,喷嘴增加凹槽后,组合均匀系数均有所提高,其中改进方案 3 最佳,在正方形组合间距为 14 m 时,组合均匀系数超过了 90%。改进方案 2 与改进方案 1 的组合均匀系数相近,凹槽设置在喷嘴下方可能效果更为明显。因此,为改善摇臂式喷头在低压工作条件下的喷洒均匀性,在出口喷嘴上增加凹槽(改进方案 3),位置为 1 个凹槽位于喷嘴的下方,另 2 个凹槽处于它的左右两侧,均匀系数最佳。

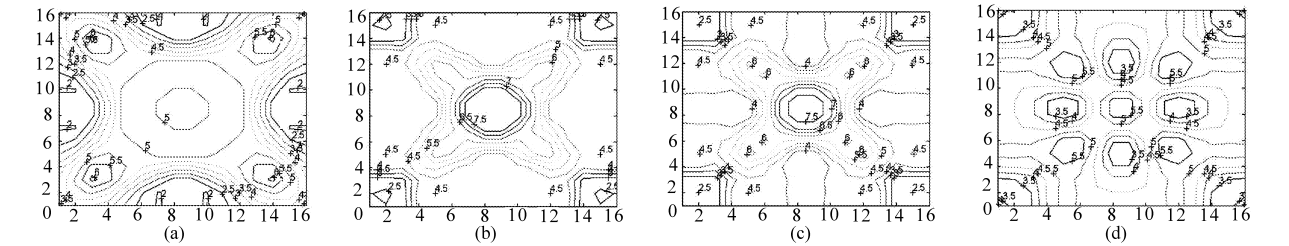


图 4 PY₁₅ 型喷头组合喷洒水量分布等值线图

Fig. 4 Water distribution contour of impact sprinkler type PY₁₅ in combined irrigation

(a) 原喷嘴 (b) 改进方案 1 (c) 改进方案 2 (d) 改进方案 3

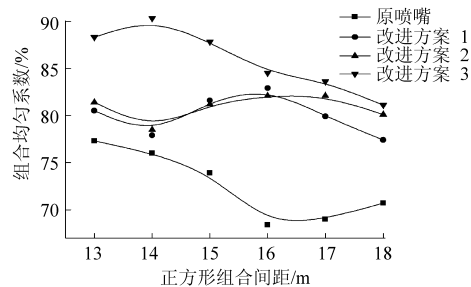


图 5 组合均匀系数仿真曲线

Fig. 5 Simulated curves of combined irrigation coefficient

4 结 论

(1) 在工作压力为 200 kPa 的低压工作条件

下,随着 PY₁₅ 型摇臂式喷头喷嘴凹槽数量增多,流量增大,射程缩短 8.1% ~ 9.4%,末端水滴直径的降低系数为 2.9% ~ 6.8%,平均喷灌强度增加得越大,在正方形组合间距为 13 ~ 18 m 范围内,均小于最低允许喷灌强度 8 mm/h,证明了低压下试验喷嘴符合规范要求。

(2) 在原喷嘴的基础上增加凹槽可以提高组合均匀系数,增加 3 个凹槽,分别设置于喷嘴的下方和左右两侧时,效果最佳,组合均匀系数最高可超过 90%。喷头低压条件下工作时,在允许流量范围内,增加凹槽具有较大的优点。

参 考 文 献

1 Tso T C. Agriculture of the future[J]. Nature Publishing Group, 2004,428(11):215 ~ 217.

2 汪永斌,施己平,胡家芬. 特殊的多功能喷头设计研究[J]. 浙江大学学报,2002,28(3):335 ~ 339.
WangYongbin, Shi Yiping, Hu Jiafen. A study devoted to the design of a special nozzle with multiple functions [J]. Journal of Zhejiang University, 2002, 28(3):335 ~ 339. (in Chinese)

3 Li J S. Sprinkler performances as function of nozzle geometrical parameters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996,122(4): 244 ~ 247.

4 Ravindra V K,Rajesh P S,Pooran S M. Optimal design of pressurized irrigation subunit[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(2):137 ~ 146.

5 Singh A K, Sharma S P, Upadhyaya A, et al. Performance of low energy water application device[J]. Water Resource Management, 2010, 24(7):1 353 ~ 1 362.

6 GB/T 19795.2—2005. 水量分布均匀性和试验方法[S]. 2005.

7 GB/T 22999—2008. 旋转式喷头[S]. 2008.

8 GB/T 50085—2007. 喷灌工程技术规范[S]. 2007.

9 廖炜,卫苗苗,黄煜煜. 采用滤纸色斑法对雨滴直径的研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版,2008, 32(6):1 165 ~ 1 168.
Liao Wei, Wei Miaomiao, Huang Yuyu. Research on raindrop diameter based on filter paper splash procedur[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008,32(6):1 165 ~ 1 168. (in Chinese)

10 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling [R]. California Agricultural Experiment Station Bull. 670 California University, Berkeley, October, 124. 1942.

11 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.

12 张新华,刘亭林,薛克宗,等. 有风条件下多喷头组合喷洒均匀度的解析计算方法[J]. 喷灌技术,1981(2):8 ~ 12.

13 Melissa C B, Michael D, Dukes P E, et al. Analysis of residential irrigation distribution uniformity[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(4): 336 ~ 341.

14 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)

15 韩文霆. 喷灌均匀系数的三次样条两次插值计算方法[J]. 农业机械学报,2008,39(10):134 ~ 139.
Han Wenting. Calculation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines and linear lines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 134 ~ 139. (in Chinese)