

喷头旋转式散水盘散水齿结构优化设计*

李红 徐敏 李一鸣 陈超

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 通过喷头散水机构对水流的粉碎, 可以提高喷头近处水量, 改善喷头水量分布。旋转式散水盘在水流的冲击下做间歇式旋转运动, 能够在不减少射程的基础上提高喷灌均匀度。散水齿结构尺寸直接影响散水盘对喷头水力性能的影响。以散水齿影响区域的最短射程 R 和影响区域角度范围 α 为散水齿的优化指标, 利用正交试验法, 研究散水齿结构尺寸(散水齿宽度 a , 散水齿插入射流深度 h 和水射流出口至散水齿的距离 c) 对水力性能的影响, 并获得各因素对水力性能的影响规律, 提出散水齿的 2 种最佳结构尺寸, 即 $a = 1.6 \text{ mm}$ 、 $h = 1 \text{ mm}$ 、 $c = 4 \text{ mm}$ 以及 $a = 1.6 \text{ mm}$ 、 $h = 0$ 、 $c = 9 \text{ mm}$ 。根据旋转喷头的径向水量分布由散水齿影响的水量分布与无散水齿的水量分布按照一定喷洒次数比率叠加而成的规律, 依据最终喷头径向水量分布呈较为理想的“三角形”, 建立了散水齿影响区域最短射程的计算方法。

关键词: 喷头 旋转式散水盘 散水齿 正交试验 优化设计

中图分类号: S224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0069-06

引言

喷头是实施喷灌的关键设备, 喷头的水力性能和运转性能在很大程度上决定喷灌系统的灌溉质量。单喷头射程与喷洒均匀性是考核喷头性能的重要指标^[1-5]。目前从结构设计方面提高喷头水力性能的措施有: 合理的副喷嘴、异形喷嘴、新型流道结构和添加散水机构^[6-13]。

通过喷头散水机构对水流的粉碎, 可以提高喷头近处水量, 改善喷头水量分布。散水机构可分为固定式和间歇式。固定式散水机构通常是在喷嘴的出口前方安装上下可调节的小螺钉, 利用螺钉对水流的粉碎作用, 改善喷头水量分布。这类固定式散水机构结构简单, 易加工, 但是以牺牲射程来改善水量分布。

间歇式散水机构指散水机构入水深度按照一定规律变化。美国 Hunter 公司对升降式喷头进行结构改进, 在喷嘴出口增加入水深度按周期性变化的散水针, 该散水针沿凸轮机构的外表面上下移动从而调节入水深度, 这样能在保证射程不变的同时获得较好的均匀度^[14]。意大利 Semi 公司推出的涡轮蜗杆喷枪系列产品也通过增加凸轮机构, 来提高喷洒均匀度^[15]。另外, 美国 Nelson 公司采用一种环形散水盘的散水结构^[16], 该散水盘在圆周方向均匀分

布多个散水齿, 当喷头水流冲击散水齿时, 散水盘作间歇性步进旋转。这种结构巧妙地解决了射程与喷洒均匀度之间的矛盾关系, 克服了传统喷头以牺牲射程来满足均匀度的困难, 实现了喷头对射程和喷洒均匀度的兼顾。

因此, 相对于固定式散水机构, 间歇式散水机构能够在不减少射程的基础上提高喷灌均匀度。但是目前只是看到相关产品, 尚未见关于散水机构入水深度与水量分布、射程、均匀度等之间关系的文献报道。

旋转式散水盘在水流的冲击下做间歇式旋转运动, 因此散水齿尺寸关系到整个旋转式散水盘对水力性能的影响。本文以不减小喷头射程, 同时提高喷灌均匀度为设计宗旨, 采用正交试验法^[17]研究散水齿结构尺寸对水力性能的影响, 并获得各因素对水力性能的影响规律, 提出散水齿的最佳结构尺寸。

1 旋转式散水盘结构

美国 Nelson 公司生产的 R2000、R33 等系列旋转喷头采用一种环形散水盘的散水结构^[16], 如图 1 所示。

图 2 为散水盘的结构示意图, 散水齿主要结构尺寸包括散水齿宽度 a 、散水齿插入射流深度 h 和

收稿日期: 2014-01-02 修回日期: 2014-01-07

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100506)、江苏省水利科技资助项目(2013094)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 李红, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉装备与技术研究, E-mail: hli@ujs.edu.cn

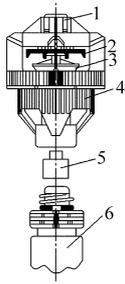


图1 R33型喷头结构示意图

Fig.1 Structure scheme of sprinkler typed R33

1. 阻尼结构 2. 旋转式散水盘 3. 喷盘 4. 喷体 5. 喷嘴
6. 接头

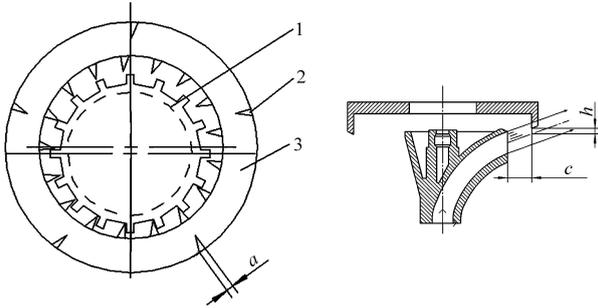


图2 旋转式散水盘结构示意图

Fig.2 Structure scheme of rotating stream interrupter

1. 固定在中心轴上的齿轮 2. 散水齿 3. 散水盘

水射流出口至散水齿的距离 c 。

2 试验优化指标

根据旋转式散水盘的运行特点,采用每个散水齿喷洒影响区域的最短射程 R 和范围 α 来衡量散水齿对水量分布的影响,如图3所示。

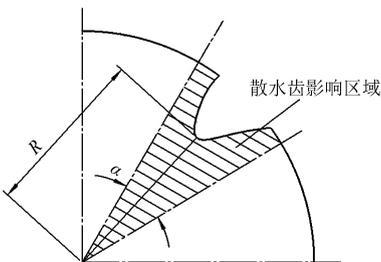


图3 散水齿影响区域示意图

Fig.3 Area affected by diffuser

2.1 最短射程 R 的定义

旋转喷头的径向水量分布由散水齿影响的水量分布与无散水齿的水量分布按照一定喷洒次数比率叠加而成。设无散水齿影响的水量分布曲线为 $\rho = L_1(x)$, 有散水齿影响的水量分布曲线为 $\rho = L_2(x)$, k 为单位时间内散水齿在同一径向方向上出现的喷洒次数比率, $(1-k)$ 即为单位时间内无散水齿出现的喷洒次数比率。则该旋转喷头最终的水量分布曲线可表示为

$$L(x) = (1-k)L_1(x) + kL_2(x) \quad (1)$$

$$\text{则} \quad L_2(x) = \frac{L(x) - (1-k)L_1(x)}{k} \quad (2)$$

令 $L_2(x) = 0$, 则 x 值为曲线 $\rho = L(x)$ 与曲线 $\rho = (1-k)L_1(x)$ 的交点, 即散水齿影响区域的最短射程 R 。

当喷头径向水量分布呈较为理想的“三角形”和“梯形”时将利于组合喷洒^[18], 此时喷灌均匀度较高。由图4可知, 为获得“三角形”水量分布, 最短射程 $R \geq R_1$; 为获得“梯形”水量分布, 最短射程 $R \geq R_2$, 又因为 $R_2 \geq R_1$, 因此所需的受散水齿影响的最短射程 R 至少为 R_1 , 否则近处水量得不到补充, 因此正交试验结果衡量的指标之一为 $R \geq R_1$ 。

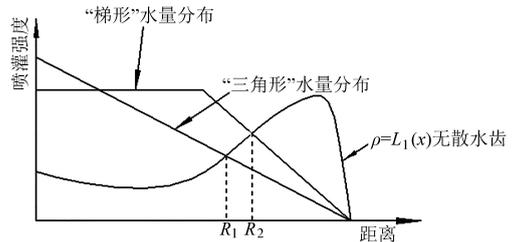


图4 喷头径向水量分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of radial water distribution

当喷头工作压力为 230 kPa 时, 流量 Q 为 $1.10 \text{ m}^3/\text{h}$, 射程为 12.5 m。设“三角形”水量分布曲线 $L(x) = a(12.5 - x)$, 则由

$$Q = \int_0^{12.5} 2\pi x L(x) dx = 1100$$

计算得 $a = 0.538$, 则 $L(x) = 6.725 - 0.538x$ 。

当喷头工作压力为 230 kPa 时, 无散水齿旋转喷头拟合后水量分布函数为

$$L_1(x) = 4 \times 10^{-5} x^6 - 0.0022 x^5 + 0.036 x^4 - 0.2462 x^3 + 0.7245 x^2 - 0.6631 x + 0.9646$$

$$(R^2 = 0.9518)$$

2.2 最短射程 R 的求解

喷洒次数比率 k 与散水齿的齿数 n 有关, 本文研究的齿数 n 为 6、8、9、10 和 11。喷头固定在中心轴上的齿轮有 16 个齿, 因此喷头旋转一个周期需要旋转 16 圈。

当散水齿齿数 $n = 6$ 时, 喷头旋转一个周期 (16 圈), 散水齿在同一方向上出现的次数为 2 次, 则 $k = \frac{1}{8}$, 代入式(2)得

$$L_2(x) = 8L(x) - 7L_1(x)$$

令 $L_2(x) = 0$, 计算得到 $x = 7.8$ 。

当散水齿齿数 $n = 8$ 时, 散水齿在同一方向上出现的次数为 8 次, 则 $k = 1/2$, 代入式(2)得

$$L_2(x) = 2L(x) - L_1(x)$$

令 $L_2(x) = 0$, 计算得到 $x = 8.8$ 。

当散水齿齿数 $n=9、10、11$ 时,散水齿在同一方向上出现的次数为 1 次,则 $k=1/16$,代入式(2),令 $L_2(x)=0$,计算得到 $x=7.5$ 。

因此,理论上散水齿影响区域的最短射程 R 应不小于 7.5 m。

2.3 影响区域角度范围 α 的求解

本文研究的散水齿齿数为 6、8、9、10 和 11,为保证有未受散水齿影响的区域,则受散水齿影响的区域 $\alpha \leq 360/11 = 32.73^\circ$ 。

3 喷洒水力性能试验

3.1 试验方法

为测量散水齿对水量分布的影响,采用方格形式布置雨量筒,如图 5 所示。由于喷头为匀速转动,因此测量区域为正方形喷洒范围,如图 6 所示,雨量筒布置间距为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。试验喷头为修改结构后均匀转速的 R33 型旋转喷头。工作压力为 230 kPa,流量为 $1.10\text{ m}^3/\text{h}$ 。测量时间为 1 h,重复测量 3 次,取 3 次平均值为点喷灌强度。

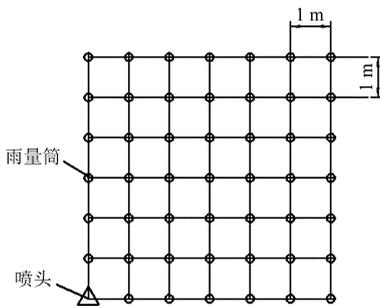


图 5 雨量筒方格布置示意图

Fig. 5 Layout of catch-cans



图 6 试验现场图

Fig. 6 Testing field

3.2 试验方案

选取散水齿宽度 a ,散水齿插入射流深度 h 和水射流出口至散水齿的距离 c 为试验因素(图 2)。选用 $L_9(3^3)$ 三因素三水平正交设计,如表 1 所示。其中 A 代表散水齿插入射流深度 h , $h=0$ 表示散水齿位于水流中心线上, $h=-1$ 表示散水齿位于水流

中心线上方 1 mm , $h=1$ 表示散水齿位于水流中心线下方 1 mm ; B 代表散水齿宽度 a ; C 代表水射流出口至散水齿的距离 c 。表 2 为试验方案,图 7 为不同试验方案的散水齿实物图。

表 1 结构参数因素水平

Tab. 1 Factor standard of geometrical parameters

水平	因素		
	插入射流深度 h/mm	散水齿宽度 a/mm	水流至散水齿距离 c/mm
1	-1	1.6	4
2	0	2.5	9
3	1	3.4	14

表 2 试验方案

Tab. 2 Test scheme

试验序号	A	B	C	空列
1	A_1	B_1	C_1	D_1
2	A_1	B_2	C_2	D_2
3	A_1	B_3	C_3	D_3
4	A_2	B_1	C_2	D_3
5	A_2	B_2	C_3	D_1
6	A_2	B_3	C_1	D_2
7	A_3	B_1	C_3	D_2
8	A_3	B_2	C_1	D_3
9	A_3	B_3	C_2	D_1

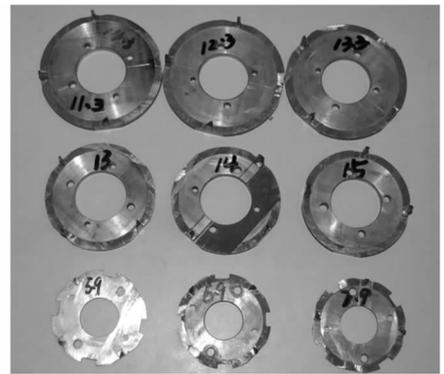


图 7 不同试验方案的散水齿实物图

Fig. 7 Prototype of different diffusers

3.3 试验结果分析

图 8 为 9 种试验方案下不同散水齿的水量分布图。试验结果如表 3 所示,可以看出 1 号和 4 号试验结果射程为 7.5 m 左右,影响区域在 32.73° 以内;3 号试验结果射程最远,但影响区域超过 32.73° ;6、7、8、9 号试验影响区域较大,尤其是 8 号和 9 号试验,影响区域达到 49.5° 和 63° 。因此,1 号试验和 4 号试验的散水齿是较为理想的散水齿结构。

由极差与方差分析可得到因素与指标间的趋势,如图 9 和图 10 所示。可以发现:

(1) A 因素:插入射流深度在 $-1 \sim 1\text{ mm}$ 范围

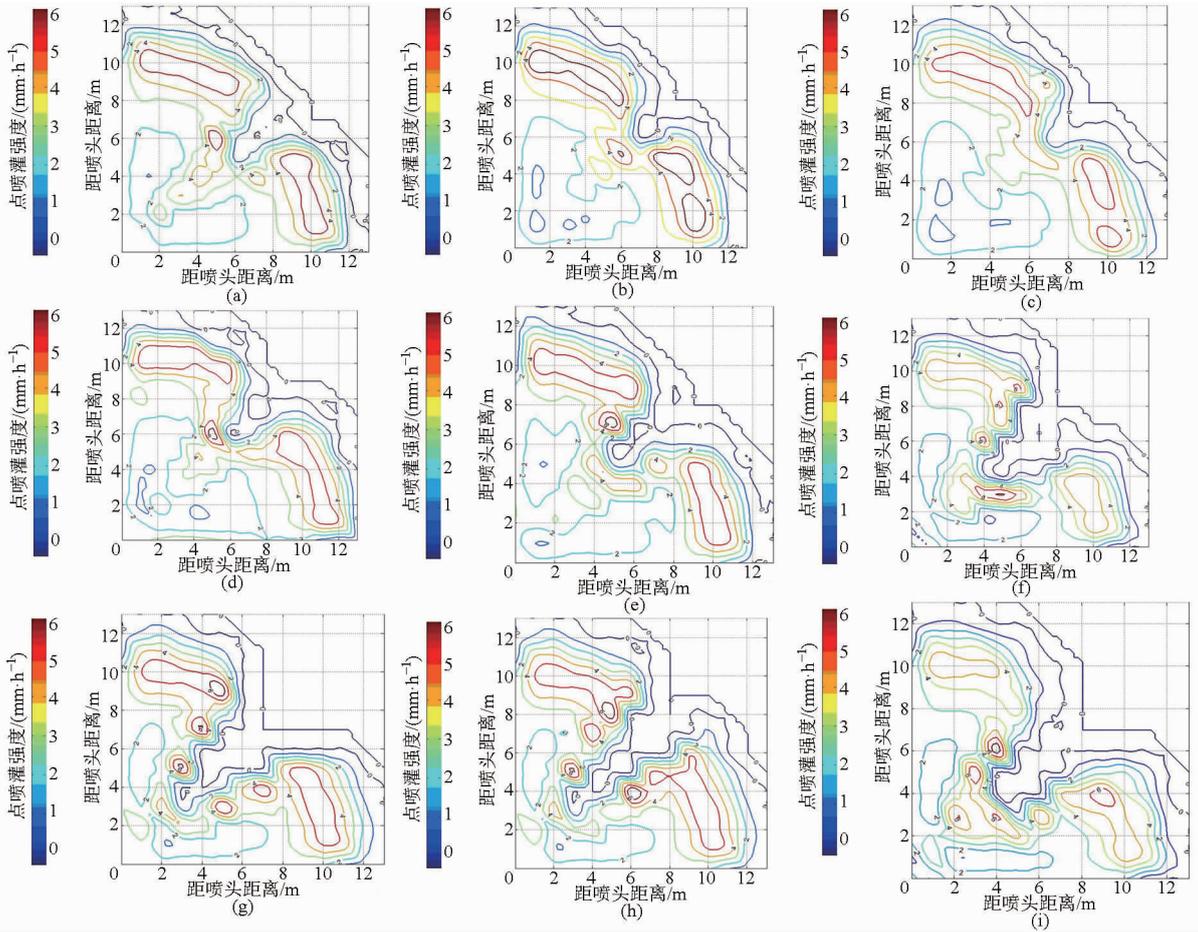


图8 不同散水齿的水量分布

Fig. 8 Water distribution affected by different diffusers

(a) ~ (i) 1~9号试验散水齿

表3 试验结果
Tab.3 Test results

试验序号	最短射程 R/m	影响区域 $\alpha/(^\circ)$
1	7.7	22.5
2	8.4	33.0
3	9.2	35.0
4	7.5	27.0
5	7.9	35.0
6	6.3	47.5
7	6.7	30.5
8	5.2	49.5
9	6.0	63.0

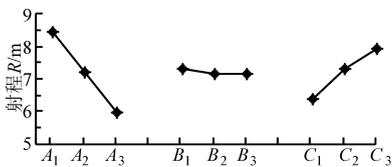


图9 射程与各因素趋势图

Fig. 9 Relationships between factors and radius

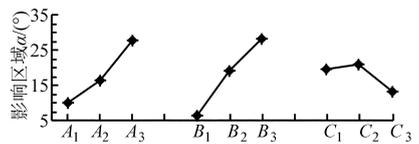


图10 影响区域与各因素趋势图

Fig. 10 Relationships between factors and affected ranges

(2) B 因素:散水齿宽度在 1.6 ~ 3.4 mm 范围内变化时,射程减小 1.7%,变化较小;而影响区域陡然增大,增加了 3.27 倍; B 因素对最短射程几乎没有影响,对影响区域范围有非常显著的影响。

(3) C 因素:水流至散水齿距离在 4 ~ 14 mm 范围内变化时,射程增加 23.9%,影响区域减小 15.7%。 C 因素对最短射程有显著影响,对影响区域范围有影响。

因此可以看出,对射程这一评价指标,具有重要影响的因素为散水齿插入射流深度;对影响区域角度范围这一评价指标,具有重要影响的因素为散水齿宽度。

4 结论

(1) 建立了散水齿影响区域最短射程的计算方

内变化时,射程逐渐下降,减少 29.2%;影响区域陡然增大,增加了 1.72 倍。 A 因素对最短射程有非常显著的影响,对影响区域范围有显著影响。

法。

(2) 通过正交试验, 得出较为理想的散水齿结构为 $a = 1.6 \text{ mm}$ 、 $h = -1 \text{ mm}$ 、 $c = 4 \text{ mm}$ 或 $a = 1.6 \text{ mm}$ 、 $h = 0$ 、 $c = 9 \text{ mm}$ 。

(3) 利用极差法分析得出, 影响最短射程 R 的主次顺序为: 散水齿插入水流深度、水流至散水齿距离、散水齿宽度; 影响区域角度范围 α 的主次顺序

为: 散水齿宽度、散水齿插入水流深度、水流至散水齿距离。利用方差分析得出, 插入水流深度对最短射程有非常显著的影响, 对影响区域角度范围有显著影响; 散水齿宽度对最短射程几乎没有影响, 对影响区域角度范围有非常显著的影响; 水流至散水齿距离对最短射程有显著影响, 对影响区域角度范围有影响。

参 考 文 献

- 1 GB/T 22999—2008 旋转式喷头[S]. 2008.
- 2 Gregory C T, Alarecon J J. Rotary sprinkler nozzle for enhancing close-in water distribution; US, 5240182[P]. 2008.
- 3 Dukes M D, Perry C. Uniformity testing of variable-rate center-pivot control systems[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(3): 205 - 218.
- 4 Clark G A, Srinivas K, Rogers D H, et al. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinklers[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 321 - 330.
- 5 Seginer I, Kantz D, Nir D. The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinklers[J]. Agricultural Water Management, 1991, 19(4): 341 - 359.
- 6 徐敏, 李红, 陈超, 等. 提高喷灌均匀性的喷头结构改进措施[J]. 节水灌溉, 2013(2): 44 - 47.
Xu Min, Li Hong, Chen Chao, et al. A review on sprinkler structures optimization for increasing water distribution uniformity[J]. Water Saving Irrigation, 2013(2): 44 - 47. (in Chinese)
- 7 朱兴业, 袁寿其, 刘俊萍. 低压条件下 PY115 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 PY115 at low pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 76 - 80. (in Chinese)
- 8 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)
- 9 刘俊萍, 袁寿其, 李红, 等. 摇臂式喷头组合喷洒均匀度的改进[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)
- 10 韩文霆, 崔利华, 吴普特, 等. 正三角形布置喷灌均匀度计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 99 - 107.
Han Wenting, Cui Lihua, Wu Pute, et al. Calculation methods for irrigation uniformity with sprinklers spaced in regular triangle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 99 - 107. (in Chinese)
- 11 李红, 王超, 蔡彬, 等. 压力补偿变截面异型喷头: 中国, 101530833A[P]. 2009 - 09 - 16.
- 12 陈超, 李红, 袁寿其, 等. 出口可调式变量喷头喷灌均匀度[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)
- 13 范兴科, 吴普特, 朱琳, 等. 雾化度可调节的低仰角喷头: 中国, 2649185Y[P]. 2004 - 10 - 20.
- 14 Hunter E J. Sprinkler unit with alternating stream interrupter; US, 4836450[P]. 1989 - 06 - 06.
- 15 Sime Coporation. <http://www.sime.net.cn>.
- 16 Nelson Corporation. <http://www.nelsonirrigation.com>.
- 17 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 11 - 109.
- 18 陈大雕. 最优喷头组合形式选择方法的探讨(下)[J]. 喷灌技术, 1984(3): 4 - 13.

Optimal Design of Rotating Stream Interrupter Diffuser for Sprinklers

Li Hong Xu Min Li Yiming Chen Chao

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

Abstract: Through stream breaking by stream interrupter installed in the rotary sprinkler, close-in water will be increased and the water distribution will be enhanced. The rotary stream interrupter rotates intermittently under the stream impact, which leads to improve the water uniformity, and at the same

time, almost does not reduce the throw distance. The structural size of the diffuser fixed in the stream interrupter plays an important role to the hydraulic performance of the sprinkler. The shortest performance radius R and the affected area angle α produced by the diffuser are put forward as the optimizing indexes in the orthogonal experiment. The key sizes, such as the diffuser width a , the diffuser length interrupting in the stream h and the distance from the outlet nozzle to the diffuser c , are presented as factors. By testing the hydraulic performance influenced by the factors, the relationships among the factors and the performance radius and the affected area angle are obtained, and the optimum structural sizes of the diffuser are also brought forward. The radical water distribution of a rotaty sprinkler is composed of the distributions without the diffuser and with the diffuser by the definite spraying frequency. According to above meationed law and the concept that the ideal shape of the final water distribution is triangle, the method to calculate the shortest performance radius in the affected area is first built up.

Key words: Sprinklers Rotating stream interrupter Diffuser Orthogonal experiment Optimal design

(上接第 87 页)

Design and Performance Analysis of Fourier Non-circular Gear-driven Differential Pump

Xu Gaohuan^{1,2} Chen Jianneng^{1,3} Zhang Guofeng^{1,3}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018, China

2. School of Mechanical & Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

3. Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A differential velocity vane pump driven by Fourier noncircular gear was designed and the blades of pump were equipped the check valves in the same direction of rotation. Through the establishment of non-circular gears Fourier model and instantaneous flow models and design of the simulation software, we analyzed the influence of the three typical parameters on the shape of the section curve, the flow rate, displacement, pump structure and single or double pump, check valve on the blades to the pulsation rate. Dual pumps in parallel driven by the Fourier non-circular gear were compared with that driven by the eccentric gear to reduce pulsation rate 10.3%. And the installation of the check valve can solve the problem that the liquid trapped in closed chamber.

Key words: Fourier noncircular gear Differential velocity vane pump Design Transient flow Trapped liquid