

# 旋转式射流喷头设计与性能正交试验<sup>\*</sup>

朱兴业 袁寿其 向清江 刘俊萍

**【摘要】** 提出了一种旋转式射流喷头。选用五因素四水平表,通过正交试验得出影响喷头工作性能的结构参数依次为盖板出口直径、直线段长度、导流段长度、位差、作用区长度、导管长度。分析了各结构参数值对雨量分布、射程和旋转速度的影响,得出10型喷头结构参数最佳组合为:盖板出口直径6.2 mm,直线段长度6 mm,导流段长度31 mm,位差2.6 mm,作用区长度22 mm,导管长度20 mm。利用部分追加法追加盖板出口直径试验点,得出5.2 mm是出口直径的下限,7.2 mm是出口直径的上限,最佳出口直径为6.2 mm。

**关键词:** 旋转式喷头 射流 正交试验

中图分类号: S277.9<sup>+</sup>4

文献标识码: A

## Orthogonal Experiment on Design and Performance of a Rotational Jet Sprinkler

Zhu Xingye Yuan Shouqi Xiang Qingjiang Liu Junping  
(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

A whirling jet fluid sprinkler was put forward. The working principle of the sprinkler was introduced. An orthogonal array of five factors and four levels was selected to carry out the experiment. The graduations of geometrical parameters which affected working conditions were achieved after the orthogonal experiment, which were diameter of cover plate for outlet, length of beeline sect, length of lead-flow, offset length, length of working area, and pipe length in sequence. Their affects on water distribution, jet range and whiling speed were analyzed respectively. The best geographical parameters of sprinkler typed 10 were summarized. Diameter factors of cover plate for outlet were added to review its actions. The minimum diameter is 5.2 mm, the maximum diameter is 7.2 mm and the best geometrical parameter is 6.2 mm.

**Key words** Rotational sprinkler, Jet, Orthogonal experiment

### 引言

射流附壁效应又称科恩达效应<sup>[1]</sup>,它是射流注入宽通道的一个侧壁现象,这种现象是射流元件的工作基础<sup>[2~3]</sup>。附壁射流喷头是基于射流附壁效应开发的节水喷头。在国内,先后开发出各种型式的射流喷头<sup>[4~5]</sup>,国外还未曾有学者利用附壁射流技术研制喷头。

本文基于射流附壁效应研制一种工作原理和结构形式与其他喷头均有所不同的旋转式射流喷头,采用五因素四水平表对其进行正交试验,从而确定新型喷头的最佳结构参数。

### 1 旋转式射流喷头的工作原理

图1为10型旋转式射流喷头结构图,上方为喷头右侧,下方为喷头左侧。喷头左侧有一个与大气

收稿日期: 2007-05-30

<sup>\*</sup> 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2006AA100211)

朱兴业 江苏大学流体机械工程技术研究中心 博士生, 212013 镇江市

袁寿其 江苏大学校长 教授 博士生导师

向清江 江苏大学流体机械工程技术研究中心 博士后

刘俊萍 江苏大学流体机械工程技术研究中心 硕士生

连通的补气孔,另外用一根导管连接信号嘴 1、2,以导通水流,产生水流的附壁效应。工作过程中,水射流从直径为  $N$  的小孔中流出,进入到一个突然扩大的作用区内,射流分子与周围静止的空气发生冲撞,与原来静止的空气一起流动,即水射流的卷吸作用。卷吸过程时间很短,可认为左右两侧被主射流带走的空气分子数目相同,因此左右两侧靠近直径为  $N$  的小孔处都会形成低压旋涡区。

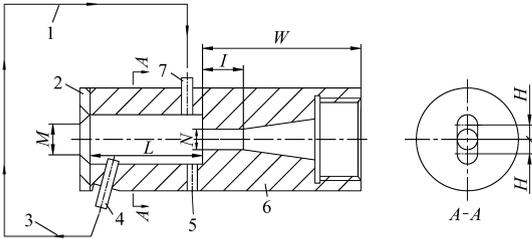


图 1 旋转式射流喷头结构图

Fig.1 Geometrical configuration of jet sprinkler

- 1. 连接导管(导管长度  $T$ )
- 2. 出口盖板
- 3. 信号水
- 4. 信号嘴 1
- 5. 补气孔
- 6. 射流元件体
- 7. 信号嘴 2

由于低压旋涡区的存在,左侧能从补气孔中补入空气,使左侧压强升高。同时左侧信号嘴 1 插入一定的深度使它能取到信号水,利用连接信号嘴 1、2 的导管将信号嘴 1 取到的信号水输入到信号嘴 2 中,保证右侧没有空气的流入。因此,左侧压强大于右侧。当水射流流速足够大,使左右压差达到一定值的时候,主射流向右偏转,形成附壁现象。由于出口盖板水射流出口处尺寸比作用区的尺寸小,根据作用力与反作用力的理论,水射流对喷头始终有一个驱动力。试验证明工作压力足够大时,主射流向右侧附壁能推动喷头运动,并一直存在着左右压差,就形成为旋转式射流喷头。

旋转式射流喷头与目前已研制成功的隙控式全射流喷头工作原理的不同点在于:对于全射流喷头,当主射流向右偏转,形成附壁现象时,信号嘴 1 接不到信号水,导管中的水被主射流抽完之后,左侧与右侧连通,两侧压强相等,主射流恢复直射,如此反复循环,喷头完成间断性步进;旋转式射流喷头使信号嘴 1 一直接到信号水,左右两侧一直存在压差,从而主射流一直附壁,喷头完成旋转运动。相对而言,由于始终有一个推动力的存在,旋转式射流喷头工作更加稳定、可靠<sup>[6]</sup>。

## 2 试验

样机试验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,该大厅为直径 44 m 的圆形大厅。作为室内试验场地,排除了风力的影响,测试时利用基于 RS485 型总线分布自动测量系统测量点

喷灌强度,精度较高的秒表测量喷头旋转的速度,米尺测量喷头的射程,测量的数据准确、可靠。

图 2 为旋转式射流喷头总装图,主要对旋转式射流元件体进行水力分析。试验过程中,工作压力为 0.3 MPa,试验中所改变的结构参数对流量基本无影响,因此流量可近似为  $0.94 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

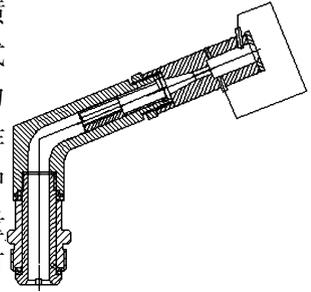


图 2 旋转式射流喷头总装图

Fig.2 Assembled chart of rotational jet sprinkler

### 2.1 试验目的

(1) 验证利用射流附壁效应可以设计出旋转式喷头。

(2) 探索喷头几何参数对雨量分布、射程、旋转速度的影响规律。

(3) 对 10 型旋转式射流喷头提出结构参数的最佳组合。

### 2.2 试验因素和方案

判定喷头性能指标的优劣包括雨量分布、射程、旋转速度。喷灌面积上雨量分布的均匀程度即为喷灌均匀系数,喷灌均匀系数计算式为

$$C_u = 1 - \frac{\Delta h}{h} \quad (1)$$

式中  $\Delta h$ ——喷洒水深的平均离差,mm

$h$ ——喷洒水深的平均值,mm

由于测点所代表的面积不相等,则

$$h = \frac{\sum S_i h_i}{\sum S_i} \quad (2)$$

$$\Delta h = \frac{\sum S_i |h_i - h|}{\sum S_i} \quad (3)$$

式中  $h_i$ ——某测点的喷洒水深,mm

$S_i$ ——某测点所代表的面积, $\text{m}^2$

假设喷头布置为正方形,它们之间的组合间距为  $1.2R$  ( $R$  为喷头射程),测量出  $h_i$  后,联立式(1)~(3)即可计算出喷灌均匀系数  $C_u$ 。

影响雨量分布、射程、旋转速度的因素有位差  $H$ 、作用区长度  $L$ 、盖板出口直径  $M$ 、导管长度  $T$ 、导流段长度  $W$  和直线段长度  $I$ 。根据喷头设计原理及经验,设因素  $A、B、C、D、E$  分别代表  $H \times L$ 、盖板出口直径、导管长度、导流段长度、直线段长度,选择因素水平如表 1 所示。表 2 为试验方案,选用  $L_{16}(4^5)$  正交表<sup>[7]</sup>,通过以下试验可以得出上述几何参数对雨量分布、射程、旋转速度的影响规律。

表1 结构参数因素水平表

Tab.1 Factor standard of geometrical parameters

水平	因素				
	A/mm×mm	B/mm	C/cm	D/mm	E/mm
1	2.2×18	5.2	10	25	2
2	2.4×20	5.8	15	27	4
3	2.6×22	6.4	20	29	6
4	3.0×24	7.0	25	31	8

表2 结构参数试验方案

Tab.2 Test scheme of geometrical parameters

试验序号	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

## 2.3 试验分析

测试结果如表3所示,可以看出共有13次试验喷头运行可靠,9次试验均匀系数达到机械行业标准要求,10次试验达到相关喷头型号的射程要求。10~12号试验较为理想,第11号试验均匀系数最大,射程 $R$ 较远,转10圈的时间为25.2 s。4号试验喷头不工作,是因为 $H \times L$ 小, $M$ 太大;13号试验喷头不工作,是因为 $H \times L$ 大, $M$ 太小。直线段长度 $I$ 与导流段长度 $W$ 相配合, $I$ 一定时, $W$ 对射程 $R$ 影响不大。 $M$ 若和 $H \times L$ 相配合,变化范围较

广, $H \times L$ 为某一定值时, $M$ 有一个相对应的值,在这个值以下,尺寸越小,旋转速度越慢,射程也越远,在这个值以上,尺寸越大,旋转速度越慢,射程也越远。导管长度 $T$ 对雨量分布、射程、旋转速度基本没有影响。

表3 试验结果汇总

Tab.3 Summary of test results

试验序号	均匀系数 $C_u$	射程 $R/m$	转10圈时间 $t/s$	$y_i^*$
1	0.76	7.4	18.6	56.32
2	0.81	7.7	23.3	60.16
3	0.72	8.3	30.3	62.76
4	—	—	—	—
5	0.74	7.1	14.6	56.42
6	0.83	8.0	25.5	62.30
7	—	—	—	—
8	0.76	8.5	40.3	61.86
9	0.73	8.2	52.1	64.22
10	0.86	7.7	18.7	61.24
11	0.88	8.3	25.2	65.74
12	0.81	8.5	38.2	65.14
13	—	—	—	—
14	0.74	7.4	22.2	56.24
15	0.82	7.8	30.5	62.90
16	0.78	8.3	42.1	63.58

此试验为三指标的试验设计,适用综合评分法对试验进行分析,综合评分是先根据各项指标的重要程度分别给予加权,然后将三指标转换成单一综合指标再进行计算分析。根据专业知识,分别给予 $C_u$ 、 $R$ 、 $t$  3个指标权值为 $W_1=4$ 、 $W_2=3$ 、 $W_3=2$ 。由表3中明显看出,各项指标量级不相同,取 $C_1=10$ 、 $C_2=1$ 、 $C_3=0.1$ 。用直接加权法, $\alpha_k=C_k W_k$ ,综合评分为

$$y_i^* = 40y_{i1} + 3y_{i2} + 0.2y_{i3} \quad (4)$$

将计算结果列于表4的 $y_i^*$ 栏内,并以 $y_i^*$ 作为试验结果进行单指标分析,最后可得因素主次顺序为 $B$ 、 $A$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $C$ ,最优组合为 $A_3B_3C_1D_4E_3$ 。

对于最优组合 $A_3B_3C_1D_4E_3$ ,采用部分追加法将盖板出口直径 $M$ 添加3个水平5.0、7.2、

表4 多指标试验结果分析

Tab.4 Analysis on experimental results of multiple indicator

$y_i^*$	A	B	C	D	E	
$\bar{y}_{j1}^*$	59.75	58.99	61.98	59.23	60.58	因素主次顺序
$\bar{y}_{j2}^*$	60.19	59.98	61.16	62.59	62.65	$B, A, E, D, C$
$\bar{y}_{j3}^*$	64.08	63.80	61.27	61.00	63.40	优水平
$\bar{y}_{j4}^*$	60.91	63.53	61.24	63.14	59.47	$B_3, A_3, E_3, D_4, C_1$
$R_j^*$	4.34	4.81	0.83	3.91	3.93	最优组合 $A_3B_3C_1D_4E_3$

7.4 mm,追加3个试验点,以便更全面的考察该因素的作用。试验结果表明,5.2 mm是它的下限,7.2 mm是它的上限。考虑到喷头的射程和在室外工作的稳定可靠性,根据变化趋势,认为对应其他参数,盖板出口直径6.2 mm是最佳值。

### 3 结论

(1) 通过对喷头样机的连续测试,证明元件始终运行可靠,证明了射流元件的稳定性。

(2) 直线段与导流段相配合,盖板出口直径和

位差 $\times$ 作用区长度相配合影响喷头的工作。

(3) 影响喷头工作性能的结构参数依次为盖板出口直径、直线段长度、导流段长度、位差、作用区长度、导管长度。

(4) 10型喷头最佳结构尺寸为:盖板出口直径6.2 mm,直线段长度6 mm,导流段长度31 mm,位差2.6 mm,作用区长度22 mm,导管长度20 mm。

(5) 盖板出口直径允许范围较大,5.2 mm是它的下限,7.2 mm是它的上限。

### 参 考 文 献

- 1 Laumder B E, Rodi W. The turbulent wall jet-measurements and modeling[J]. Ann, Rev. Fluid Mechanics, 1983(15): 429~468.
- 2 Ruochuan Gu. Modeling two-dimensional turbulent offset jets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(11): 617~624.
- 3 Dae S K, Soon H Y. Flow and heat transfer measurements of a wall attaching offset jet[J]. Heat Mass Transfer, 1996, 39(14): 2 907~2 913.
- 4 黄志斌,张世芳. 自反馈式射流喷头的设计[J]. 江苏大学学报:自然科学版,1985,6(2):35~38.  
Huang Zhibin, Zhang Shifang. Designment in fluidic sprinkler feedback by itself[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 1985, 6(2):35~38. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 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)
- 7 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

(上接第59页)

### 参 考 文 献

- 1 赵立新,郑立允,王玉果,等. 振动气吸式穴盘播种机的吸种性能研究[J]. 农业工程学报,2003,19(4):122~125.  
Zhao Lixin, Zheng Liyun, Wang Yuguo, et al. Seed suction performance of vibrational air-suction tray seeder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003,19(4): 122~125. (in Chinese)
- 2 陈进,李耀明. 气吸振动式播种试验台内种子运动规律的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):47~50.  
Chen Jin, Li Yaoming. Study on seeds movement law in sowing test stand with suction and vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(1):47~50. (in Chinese)
- 3 李耀明,邱白晶,陈进,等. 气吸振动式水稻播种试验台的振动分析[J]. 农业机械学报,1998,29(3):43~47.  
Li Yaoming, Qiu Baijing, Chen Jin, et al. Study on vibration analysis of rice sowing test stands with suction and vibration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 43~47. (in Chinese)
- 4 吴国瑞,李耀明,邱白晶,等. 水稻播种机振动试验研究[J]. 江苏理工大学学报,1997,18(6):12~17.  
Wu Guorui, Li Yaoming, Qiu Baijing, et al. Studies on vibration test of the rice seedling machine[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1997,18(6):12~17. (in Chinese)
- 5 刘彩玲. 水稻育苗精量播种装置的理论及试验研究[D]. 镇江:江苏理工大学,1998.  
Liu Cailing. Theoretical and experimental study on rice seedling precision mechanism[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 1998. (in Chinese)
- 6 周祖锴. 农业物科学[M]. 北京:农业出版社,1994.
- 7 赵学笃,陈元生,张守勤. 农业物科学[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- 8 叶常丰,戴心维. 种子学[M]. 北京:中国农业出版社,1994.