

# 仰角可调摇臂式喷头水力性能试验\*

李星恕<sup>1</sup> 张建宾<sup>1</sup> 韩文霆<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 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)

**摘要:** 在不改变喷头原有结构的基础上,设计了一种由上支撑杆、下支撑杆、限位杆、柔性波纹管组件、内螺纹空心轴、定位螺钉、调节螺钉等组成的喷头仰角调节机构,实现喷头仰角在 $13^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $23^\circ$ 、 $30^\circ$  4个角度的调节,并对安装了该机构的喷头进行了水力性能试验。结果表明,喷头仰角为 $23^\circ$ 时,不同工作压力下喷头的射程均最大;在 $23^\circ$ 与 $30^\circ$ 时组合均匀度系数相对较大,最利于组合喷灌。不同工作压力下,平均喷灌强度随着喷头仰角的减小而增大。喷头仰角由 $23^\circ$ 减小到 $13^\circ$ 时,喷头喷洒水滴的飘移损失减小,平均喷灌强度增加,因此喷头仰角减小可以增强其抗风、抗坡能力。仰角越小,喷头射程末端降水量变化越剧烈,导致喷头喷洒降水量分布不均,所以仰角调节不宜过小。安装了仰角调节机构的喷头在各象限的转动误差均小于 $\pm 10\%$ ,其转动均匀性符合要求。

**关键词:** 喷头 仰角 调节机构 水力特性 组合均匀度系数 转动均匀性

**中图分类号:** S277.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0034-06

## Experiments on Hydraulic Performance of Impact Sprinkler with Adjustable Elevation Angle

Li Xingshu<sup>1</sup> Zhang Jianbin<sup>1</sup> Han Wenting<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To adjust the elevation angle of sprinkler and reduce the effect of wind on water distribution, a set of adjustment device which fixed on the original structure of the sprinkler was developed. The adjustment device consisted of support bar, limited rod, flexible metallic hose, internal thread hollow shaft sleeve, set screw and adjusting screw. Four elevation angles of sprinkler nozzle ( $13^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $23^\circ$  and  $30^\circ$ ) could be adjusted and fixed respectively. To evaluate the hydraulic performance of the sprinkler with adjustment device, a series of indoor experiments were conducted. The results showed that the characteristics of single sprinkler with adjustment device changed evidently at different elevation angles. When elevation angles of the sprinkler were  $23^\circ$  and  $30^\circ$ , the combinatorial uniformity coefficients were larger than that at  $13^\circ$  and  $18^\circ$ , so it was more practicable in combinatorial sprinkler irrigation. Under different working pressures of 0.20, 0.25 and 0.30 MPa, the average sprinkler irrigation intensity increased with decrease of sprinkler elevation angle. Distribution of sprinkler water in the spraying end was more uniform at elevation angle of  $23^\circ$  than that at other angles in which the distribution of sprinkler water changed greatly and average sprinkler irrigation intensity increased accordingly. So decrease of elevation angle could reduce the effect of wind on water distribution effectively. On the other hand, because of the drastic variation of distribution of sprinkler water, the elevation angle of the sprinkler could not be too small. The rotation deviation of the adjustment device of sprinkler was less than  $\pm 10\%$ . The test results indicated that it reached the indexes of JB/T 7867—1997.

**Key words:** Sprinkler Elevation Adjustment device Hydraulic performance Combinatorial uniformity coefficient Deviation of rotation

收稿日期: 2014-04-03 修回日期: 2014-05-29

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)

作者简介: 李星恕,副教授,主要从事智能化检测技术与装备研究, E-mail: xingshu-li@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 韩文霆,研究员,博士生导师,主要从事精确灌溉技术与装备研究, E-mail: Hanwt2000@126.com

## 引言

喷灌以其节水、增产、适应性强、易于机械化作业等优点成为目前世界上广泛采用的节水灌溉技术之一<sup>[1]</sup>,而摇臂式喷头是我国生产批量最大、应用最广的喷灌设备<sup>[2]</sup>。世界上农业发达国家一直致力于喷头的改进与研究开发。实际应用中,有一定风力或者是坡地灌溉时,喷头射程会大大减小,飘移损失大为增加,严重影响喷头的水力性能<sup>[3-4]</sup>。为了适用于不同应用场合,美国开发出了不同仰角的(7°、11°、15°、23°、27°)系列喷头,但这些喷头生产成本高,喷头仰角不能调节,不同的应用场合需要频繁更换不同仰角的喷头,非常不便; Toro 公司生产的 V-1550 系列喷头虽然可以实现喷洒仰角的调节,但是该系列喷头主要用于园林,不适用于大田灌溉<sup>[4]</sup>。我国喷灌中使用的喷头主要有 ZY-1 型和 ZY-2 型,喷头主喷嘴仰角分别为 23° 和 27°。为了实现喷头喷嘴仰角的连续可调,黄修桥等采用变截面平面铰接法,用可在垂直平面上自由旋转的纹状接头代替喷体螺纹,实现了旋转式喷头主喷嘴仰角在 0°~30° 之间的调节<sup>[4]</sup>; 李金山等设计了一种由阳接头、阴接头、密封圈和仰角调节杆等组成的半球状仰角调节装置,其中阳、阴接头通过定位齿咬合,实现了喷头仰角在 8°~27° 范围内连续可调<sup>[5-7]</sup>。安装了上述调节机构的喷头性能测试表明,随着喷头仰角的减小,喷头的抗风性能有所提高,飘移损失减小。这些仰角调节机构虽然都能实现仰角可调,但是结构都比较复杂,操作不便,成本较高。因此开发出成本低廉,性能可靠的喷头仰角调节装置非常必要。

本文拟在原 ZY-1 型喷头本体的基础上采用柔性连接方式设计一种仰角调节机构,通过柔性波纹管组件连接喷头喷体和空心轴,实现仰角可调;并对安装了仰角调节机构的喷头水力性能进行测试以验证其是否符合要求。

## 1 仰角调节机构设计

在不改变 ZY-1 型喷头本体结构的基础上设计了一种仰角调节机构,ZY-1 型喷头仰角为 23°。仰角调节机构由上支撑杆、下支撑杆、限位杆、柔性波纹管组件、内螺纹空心轴、定位螺钉、调节螺钉组成,如图 1 所示。波纹管的上下两端焊接带有外螺纹的金属管。上端的外螺纹和喷头喷体连接,下端外螺纹与内螺纹空心轴连接,喷头的空心轴连接在内螺纹空心轴另一端的内螺纹上。上支撑杆和下支撑杆焊接在波纹管两端的金属管上,用定位螺钉和

调节螺钉把限位杆固定在支撑杆上。为了减少压力水在喷头内部的压力损失,波纹管组件内径和空心轴的内径相同。

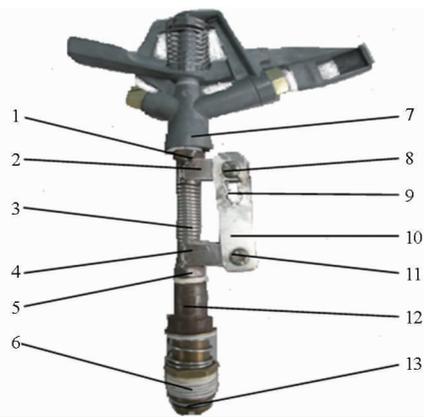


图 1 安装了仰角可调机构的摇臂式喷头

Fig. 1 Elevation adjustable sprinkler

- 1、5. 外螺纹金属管 2. 上支撑杆 3. 柔性波纹管 4. 下支撑杆  
6. 空心轴套 7. 喷体 8. 调节螺钉 9. 调节孔 10. 限位杆  
11. 定位螺栓 12. 内螺纹空心轴 13. 空心轴

限位杆结构如图 2 所示。限位杆上端设有 4 个调节孔,分别对应喷头仰角 13°、18°、23° 和 30°。工作时调节上支撑杆和限位杆上的调节孔,再通过调节螺钉将支撑杆与限位杆固定,实现仰角的调节。为了减轻加装了仰角调节机构的喷头质量,波纹管选用经淬火处理的不锈钢耐压材料,这样既可以使波纹管变薄,同时又可以获得较好的柔韧性能;支撑杆采用不锈钢板材,限位杆为轻质铝合金材料。

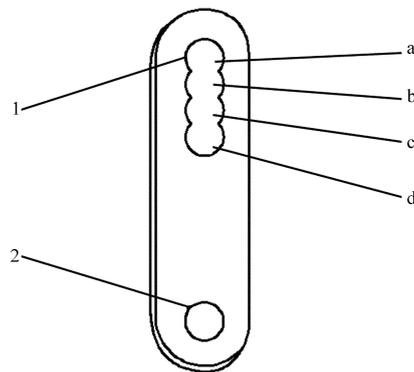


图 2 限位杆

Fig. 2 Limited rod

1. 调节孔 2. 定位孔 a. 30° b. 23° c. 18° d. 13°

## 2 仰角可调摇臂式喷头喷洒试验

为验证安装了仰角调节机构的喷头能否满足水力性能的要求,必须对其进行试验,测量不同条件下喷头的射程、转动均匀性、喷灌均匀性等性能指标<sup>[8]</sup>。喷头试验在国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心的试验场地进行,试验场地开阔平整,最大坡度小于 1%,符合喷头试验要求<sup>[9-11]</sup>。

## 2.1 喷头试验系统

喷头试验系统包括储水槽、离心泵、输水管、阀门、压力表、喷头和雨量筒等<sup>[9-11]</sup>,如图3所示。试验程序和方法参照《美国农业工程师学会喷灌分布测试标准》和GB/T 27612.3《农业灌溉设备 喷头 第3部分:水量分布特性和试验方法》<sup>[12]</sup>。雨量筒开口直径为19.5 cm,高度为23 cm,分别沿0°、60°方向径向布置,间隔1 m,每个方向布置18个雨量筒。为了更为准确地确定喷头的射程,末端5个雨量筒每隔0.25 m布置,一直延伸到喷头射程之外。

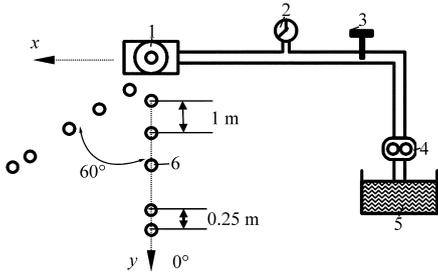


图3 试验系统

Fig.3 Experimental system

1. 喷头 2. 压力表 3. 阀门 4. 离心泵 5. 储水槽 6. 雨量筒

将具有仰角调节机构的喷头安装在图3所示的试验系统中,调节阀门开度,同时观察压力表读数,调定喷头压力分别为0.20、0.25和0.30 MPa;将上支撑杆与限位杆上不同的调节孔用调节螺钉固定,可以调节的喷头仰角分别为13°、18°、23°和30°。在不同压力和仰角条件下均进行喷洒试验1 h,记录喷头转过每个象限的时间及每个雨量筒的最终降水量。试验场地如图4所示,室外环境参数如表1所示。



图4 室外试验场地

Fig.4 Outdoor test site

表1 喷头测试条件

Tab.1 Nozzle test conditions

喷头类型	工作压力/ MPa	最大风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	平均风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	风向
	0.20	2.5	0.8	无持续风向
ZY-1	0.25	1.2	0.9	无持续风向
	0.30	2.3	1.3	无持续风向

## 2.2 喷头的性能评价指标

为了检验安装了仰角调节机构的喷头是否满足

生产实际的要求,按照喷头的设计标准,需要测试单喷头的水力性能。

### 2.2.1 点喷灌强度与平均喷灌强度

喷洒域内某一处的点喷灌强度与平均喷灌强度为

$$P = \frac{10W}{tA} \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (2)$$

式中  $P$ ——点喷灌强度,mm/h

$W$ ——某处雨量筒内水的体积,cm<sup>3</sup>

$t$ ——喷水时间,h

$A$ ——雨量筒开口面积,cm<sup>2</sup>

$\bar{P}$ ——平均喷灌强度,mm/h

$P_i$ ——第*i*个雨量筒的喷灌强度,mm/h

$n$ ——雨量筒的个数

### 2.2.2 射程

根据GB/T 27612.3,喷头的射程指的是正常旋转情况下,喷头中心线距测出的灌水强度为某一数值的最远点的距离,对流量大于75 L/h的喷头,该点的灌水强度为0.26 mm/h<sup>[12]</sup>。但是试验时经常会出现这样的情况:A点雨量筒点喷灌强度大于0.26 mm/h,但距离喷头更远的B点雨量筒点喷灌强度小于0.26 mm/h,这时喷头的射程位于A点和B点之间的C点,就可以采用插值算法计算喷头射程。

### 2.2.3 转动均匀性

喷头的转动均匀性是评价喷头灌水质量的主要指标,用喷头转过每个象限所需时间的偏差率为

$$\delta = \frac{\overline{|t - t_i|}}{t} \times 100\% \quad (3)$$

其中

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$$

式中  $\delta$ ——喷头转过每个象限所需时间的偏差率

$\bar{t}$ ——喷头转过每个象限所需时间的平均值,s

$t_i$ ——喷头转过某一象限所用时间,s

$N$ ——喷头转过的圈数

时间采用PC396型电子秒表计时,偏差率 $\delta$ 越小,表示喷头的转动均匀性越好, $\delta \leq 12\%$ 时,喷头的转动均匀性符合要求。

### 2.2.4 组合喷洒均匀度

克里斯琴森均匀系数是评价喷灌水量分布均匀度的主要参数,但是计算公式中将各测点看作是孤立点,因此误差较大。所以本文选用修正的克里斯琴森均匀系数(CU)评价均匀度,它把喷头的

水量分布看作是连续变化的系统,并不是一些离散点的集合,因此更能真实反映实际均匀度情况<sup>[12,14-18]</sup>。

因为实际灌溉中多为组合喷头灌溉,组合均匀度又是喷灌系统设计中的主要参数,是评价灌溉质量的重要指标。本文选用组合修正克里斯琴森均匀系数来表示喷灌组合均匀度,通过单喷头水量分布数据叠加是计算组合均匀度的主要途径。本文采用 3 次样条多次插值法计算出矩形组合,喷头组合间距系数  $k_a = k_b = 1.2$  时每个喷头在插值点处的降水深,然后叠加求出插值点的总降水深。根据上述插值点降水深计算步骤,用 Matlab 编制组合均匀度计算程序,计算圆形喷洒域喷头无风矩形组合修正的克里斯琴森喷洒均匀度,并绘制三维组合水量分布

图<sup>[19]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 喷头的喷灌强度、射程和喷洒均匀度

表 2 为安装了仰角调节机构的喷头在 3 种工作压力下不同仰角时的平均喷灌强度、射程、1 min 转过的圈数和组合修正克里斯琴森均匀系数。由表 2 可知,喷头仰角为 23°时,不同工作压力下喷头的射程均最大,仰角由 23°减小至 13°时,喷头射程减小了 2.75 m,增大到 30°时,射程减小了 1.50 m。仰角不同时,不同工作压力下组合修正克里斯琴森均匀系数的变化较大,但喷头仰角为 23°与 30°时,转速最快,组合均匀度最大,最利于组合喷灌。不同工作压力下,平均喷灌强度随着喷头仰角的减小而增大。

表 2 喷头在 3 种压力、4 种仰角情况下的平均喷灌强度、射程与组合均匀度

Tab. 2 Average sprinkler irrigation intensity, range and combinatorial uniformity coefficient with four different elevation angles and three different inlet pressures

仰角 / (°)	0.20 MPa				0.25 MPa				0.30 MPa			
	平均喷灌强度 / (mm·h <sup>-1</sup> )	射程 / m	1 min 转过的圈数	组合均匀度 / %	平均喷灌强度 / (mm·h <sup>-1</sup> )	射程 / m	1 min 转过的圈数	组合均匀度 / %	平均喷灌强度 / (mm·h <sup>-1</sup> )	射程 / m	1 min 转过的圈数	组合均匀度 / %
30	2.56	11.50	0.35	74.5	2.43	11.75	0.33	80.3	2.40	13.00	0.35	86.6
23	2.52	13.00	0.38	75.9	2.89	14.25	0.36	90.6	2.53	15.00	0.31	80.6
18	3.11	10.75	0.23	73.2	3.15	11.75	0.25	70.4	2.81	13.00	0.26	81.7
13	3.17	10.25	0.27	56.6	3.21	10.75	0.28	62.4	3.04	12.25	0.29	68.4

喷头仰角由 23°减小到 13°时,水滴喷洒高度减小,水滴在水平方向运动时间减小,因此喷头射程减小;水滴在空气中运动时间短,高度低,受风的影响较小,喷头喷洒水滴的飘移损失减小,平均喷灌强度增加,因此喷头仰角减小可以增强其抗风抗坡能力。而喷头仰角由 23°增加到 30°时,由于喷洒高度升高,水滴受风的影响大,喷头喷洒水滴的飘移损失大为增加,所以喷头平均喷灌强度减小。

各种条件下喷头的平均喷灌强度均小于允许喷灌强度(6 mm/h),因此可以满足不同土壤的喷灌要求。

#### 3.2 喷头水量分布曲线

图 5 是喷头在 3 种工作压力 4 种仰角情况下喷头的喷洒水量分布情况。由图 5 可知,其降水量分布相似。

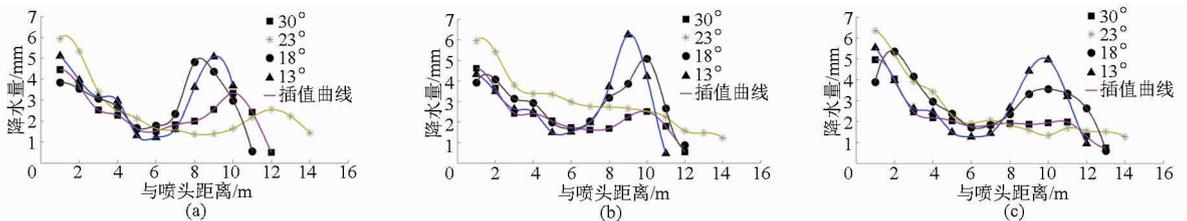


图 5 喷头喷洒降水量分布

Fig. 5 Distribution of sprinkler water

(a) 0.20 MPa (b) 0.25 MPa (c) 0.30 MPa

如图 5 所示喷头仰角为 23°时,不同工作压力下降水量随着射程的增加而呈现减小的趋势;喷头仰角不管是增加或者减小,降水量随着射程的增加均呈现出先减小后增加的趋势;而且仰角越小,喷头射程末端降水量变化越剧烈,会导致喷头喷洒降水

量分布不均,所以仰角调节不宜过小。

喷头仰角减小表示主喷嘴仰角减小,而副喷嘴仰角却增大,副喷嘴主要影响射程前端的水量分布。由图 4 中降水量分布情况可知,安装了仰角调节机构喷头的副喷嘴对降水量的分布影响较小。

### 3.3 喷头转动均匀性

喷头转过 1/4 圈记为一个象限,图 6 为不同工作压力和仰角时喷头转过一周 4 个象限所用的平均时间;表 3 为不同工作压力和仰角时喷头转过一周 4 个象限所用时间的最大偏差率。由图 5 和表 3 可知,在不同工作压力下,喷头仰角的改变对喷头转动均匀性产生了影响,喷头仰角由 30°减小到 13°,其转动周期先减小后增大再减小;可能原因是柔性波纹管在改变喷头仰角时导致喷体重心偏移以及喷头仰角的改变致使喷头转动动力矩发生改变。所以在压

力一定时,仰角由 23°增大到 30°喷体重心偏移以及转动动力矩减小导致喷头转动变慢;而仰角由 23°减小到 13°虽然转动动力矩增大但是喷体重心偏移的影响开始大于转动动力矩的影响之后转动动力矩的影响略大于重心偏移的影响,使得喷头转动周期先变大后变小,对于出现这种情况的具体原因还需更深入研究。但是试验证明安装了仰角调节机构的喷头在各象限的转动误差都小于 10%,符合喷头的转动误差小于 12% 的要求,所以认为安装了仰角调节机构的喷头的转动均匀性是符合要求的。

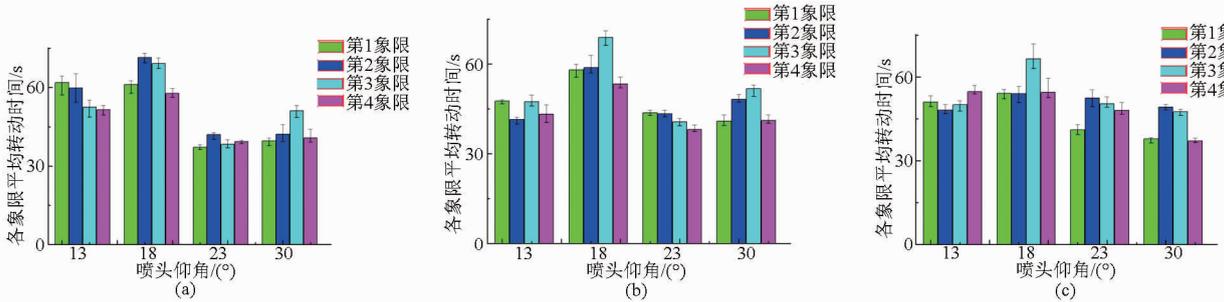


图 6 喷头转动时间

Fig. 6 Rotation time of sprinkler

(a) 0.20 MPa (b) 0.25 MPa (c) 0.30 MPa

表 3 仰角可调式喷头转动性能测试

Tab. 3 Rotating performance of sprinkler with adjustable elevation angle

压力/ MPa	仰角/ (°)	各象限转动时间最大偏差率/%			
		第 1 象限	第 2 象限	第 3 象限	第 4 象限
0.20	13	7.5	9.3	7.3	3.9
	18	6.3	2.8	3.2	3.3
	23	2.8	4.3	4.5	1.8
	30	4.4	8.7	4.1	8.1
0.25	13	1.9	3.9	4.7	7.1
	18	4.3	7.2	3.8	4.5
	23	2.0	2.8	3.3	4.1
	30	5.1	3.6	5.0	4.6
0.30	13	4.6	4.0	4.4	4.2
	18	3.7	5.8	8.2	9.4
	23	4.8	5.9	4.9	5.9
	30	3.6	2.2	2.6	3.1

### 3.4 组合喷头三维水量分布

图 7 为工作压力 0.25 MPa,喷头矩形组合,组合间距系数  $k_a = k_b = 1.2$  时的三维水量分布图。由图 7 可知,喷头在 4 种不同的仰角组合灌溉时,23°与 30°组合灌溉均匀性比较好,而在另外 2 种仰角组合灌溉时中部水量明显增加,这是单喷头末端降水明显增加的结果。

由图 7 仿真水量分布与表 2 中组合均匀度数据

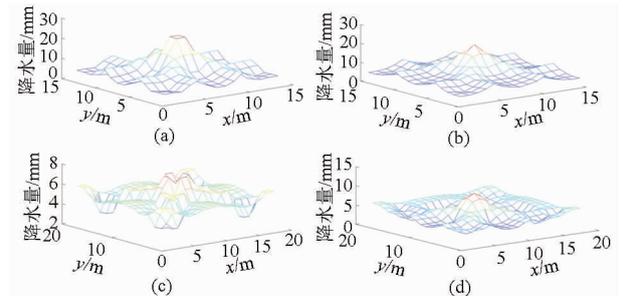


图 7 矩形组合三维水量分布

Fig. 7 Water distribution of rectangular combination

(a) 13° (b) 18° (c) 23° (d) 30°

可知,各种仰角可调式喷头的组合喷灌均未出现漏喷现象,但是仰角过小时不利于组合灌溉。

## 4 结论

(1) 在不改变喷头原有结构的基础上,采用柔性连接方式设计了一种喷头仰角调节机构,能够实现喷头 4 种仰角的调节,并经试验验证该机构可行。

(2) 喷头仰角为 23°时,不同工作压力下喷头的射程均最大,而在 23°与 30°时组合修正克里斯琴森均匀系数最大,组合喷洒均匀性较好;不同工作压力下,平均喷灌强度随着喷头仰角的减小而增大。

(3) 喷头仰角由 23°减小到 13°时,喷头射程减小,喷头喷洒水滴的飘移损失减小,平均喷灌强度增加,因此喷头仰角减小可以增强其抗风能力。

(4) 仰角越小,喷头射程末端降水量变化越剧

烈,导致喷头喷洒降水量分布不均,所以仰角调节不宜过小。

(5) 安装了仰角调节机构的喷头在各象限的转动误差均小于10%,喷头的转动均匀性符合要求。

### 参 考 文 献

- 1 兰才有,仪修堂,薛桂宁,等.我国喷灌设备的研发现状及发展方向[J].排灌机械,2005,23(1):1-6.  
Lan Caiyou, Yi Xiutang, Xue Guining, et al. Research state and development of sprinkler irrigation equipments in China[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(1): 1-6. (in Chinese)
- 2 李英能.浅论我国喷灌设备技术创新[J].排灌机械,2001,19(2):3-7.  
Li Yingneng. Discussion about the technological innovations of sprinkler irrigation equipment in China[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(2): 3-7. (in Chinese)
- 3 Cisneros Espinosa F E, Torres P, Feyen J. Experimental assessment of the sprinkler application rate for steep sloping fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(3): 276-278.
- 4 黄修桥,仵峰,范永申.喷头仰角调节机构的研制及其对喷头性能的影响[J].排灌机械,2006,24(5):29-32.  
Huang Xiuqiao, Wu Feng, Fan Yongshen. Adjustment of elevation angle of nozzle and its effect on hydraulics of whirl sprinkler [J]. Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2006, 24(5): 29-32. (in Chinese)
- 5 李金山,郭志新,杨跃辉,等.不同仰角状况下喷头性能试验研究[J].中国农村水利水电,2011(7):24-26.  
Li Jinshan, Guo Zhixin, Yang Yuehui, et al. A tentative study of the performance of sprinklers under different elevations[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(7):24-26. (in Chinese)
- 6 李金山,郭志新,黄修桥,等.一种喷头仰角调节机构:中国,ZL2009100641758[P].2009-12-02
- 7 仵峰,范永申,李金山,等.多功能喷头:中国,ZL200320113269.8[P].2005-01-26.
- 8 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.
- 9 韩文霆,周龙,吴普特,等.精确灌溉喷头变量调节器结构参数设计[J].排灌机械工程学报,2013,31(6):534-539.  
Han Wenting, Zhou Long, Wu Pute, et al. Structural parameter design for variable regulators inprecision irrigation sprinklers[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(6): 534-539. (in Chinese)
- 10 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhengying, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels[J], Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 120-129.
- 11 Alfre J B. Adjustable pattern irrigation system; US, 6834814[P].2004-12-28.
- 12 GB/T 27612.3—2011 农业灌溉设备 喷头 第3部分:水量分布特性和试验方法[S].2011.
- 13 Yan Haijun, Ouyang Jun, Kazuhiro Nakano, et al. Numerical and experimental investigations on internal flow characteristic in the impact sprinkler[J]. Irrigation and Drainage systems, 2009, 23(1):11-23.
- 14 韩文霆,吴普特,冯浩,等.变量喷头实现均匀喷灌的研究[J].农业工程学报,2005,21(10):13-16.  
Han Wenting, Wu Pute, Feng Hao, et al. Theoretical study on variable-rate sprinklers for high uniformity precision irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 13-16. (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)
- 16 韩文霆,吴普特,冯浩,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.
- 17 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 sprinkler irrigation systems [J]. Water Saving Irrigation, 2008(7): 4-8. (in Chinese)
- 18 Litvin F L. Local synthesis and tooth contact analysis of face milled spiral bevel gear, NASA, CR, 4342[R]. Chicago: NASA Lewis Research Center, 1991.
- 19 韩文霆,姚小敏,朱冰钦,等.变量喷洒喷头组合喷灌试验[J].农业机械学报,2013,44(7):121-126.  
Han Wenting, Yao Xiaomin, Zhu Bingqin, et al. Test and evaluation on variable-rate irrigation sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 121-126. (in Chinese)