

# 全射流喷头转折角喷管运动力学分析与试验<sup>\*</sup>

朱兴业 袁寿其 李红 刘俊萍

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**【摘要】** 为了扩大全射流喷头压力适用范围, 提出在喷管处加转折角增加喷头固有驱动力矩。转折角喷管的重要结构因素包括转折角角度和转折角力臂长度, 理论分析推导出全射流喷头步进旋转时所受总驱动力矩和旋转角方程。对不同转折角角度或转折角力臂组成的7种不同喷管进行了试验, 测量性能指标包括步进角度、步进频率、射程和均匀系数。结果表明: 试验值与理论分析具有较好的一致性; 工作压力影响射程、均匀系数和步进频率, 对步进角度影响不大; 随转折角角度的增大, 步进角度、均匀系数增大, 步进频率减小, 射程变化不大; 随转折角力臂的加长, 步进角度增大, 射程减小, 步进频率和均匀系数变化不大。

**关键词:** 全射流喷头 喷管 转折角 力学分析 试验

中图分类号: S277.9<sup>+4</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)04-0069-06

## Mechanical Analysis and Experiment on Effuser with Turning Angle for Complete Fluidic Sprinkler

Zhu Xingye Yuan Shouqi Li Hong Liu Junping

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

### Abstract

To enlarge the scope of working pressure for complete fluidic sprinkler, turning angle was applied in the effuser, which can increase intrinsic driving moment. The important geometrical parameters for the turning angle effuser included angle and arm of force. The equations of total driving moment and stepping angle were deduced. Experiments were carried out on seven types of effusers with different turning angles or arms of force. The results showed that testing value agrees well with the theoretical analyzing. Working pressure, with a small infection on stepping angle, positively influences wetted diameter, uniformity coefficient and stepping frequency. Turning angle positively influences stepping angle and uniformity coefficient, and negatively influenced stepping frequency. Turning arm of force positively influenced stepping angle, negatively influenced wetted diameter.

**Key words** Complete fluidic sprinkler, Effuser, Turning angle, Mechanical analysis, Experiment

### 引言

国内众多学者对全射流喷头结构设计、工作特性、水力性能等进行了一系列研究<sup>[1-5]</sup>, 但其步进运动时喷头所受驱动力矩的大小以及每种型号喷头适用的压力范围研究得较少。驱动力矩大小是保证喷头能否正常稳定工作的基础, 对于目前已研制成功的隙控式全射流喷头, 附壁力不仅要克服其所受

的水流冲击阻力和旋转摩擦阻力, 还要驱动喷头作旋转运动。在某些特定条件下如压力较小、水流杂质引起摩擦力增大的情况下, 喷头不能稳定工作。本文对全射流喷头进行受力分析, 在全射流喷头喷管处适当位置加上转折角, 使水流通过转折角时对喷头产生固有驱动力矩, 以加强全射流喷头工作的稳定性和扩大喷头压力适用范围, 并通过试验验证转折角对性能参数的影响。

## 1 受力分析

图1为全射流喷头总装图,包括流道、转体连接座、限位环、换向机构、反向塑料管、射流元件体等部分。其中旋转密封机构位于喷体内部,起到防止喷头漏水的效果。换向机构位于喷体中部,经反向塑料管与反向补气嘴相连,限位环位于换向机构两侧,起到控制换向机构旋转角度的效果。全射流喷头步进旋转时,水流产生附壁效应,目前的全射流喷头旋转的驱动力矩为水流附壁产生的推力矩,所受旋转阻力矩包括水流冲击阻力矩和旋转摩擦阻力矩。本文首次提出在喷管处加转折角,在附壁力矩的基础上,增加喷管转折角处所受的固有驱动力矩,利用流体力学原理对它们受力进行理论分析。

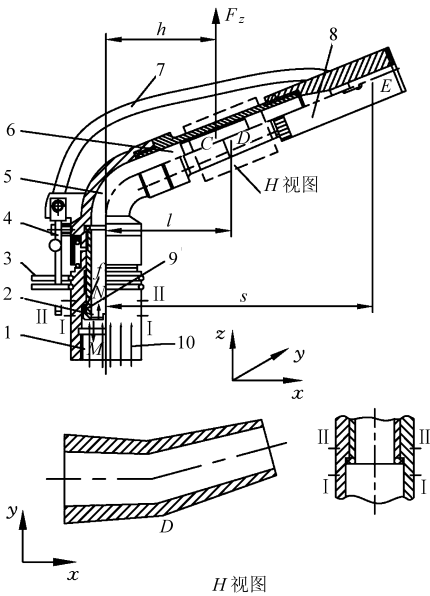


图1 全射流喷头总装图

Fig. 1 Whole assembly of complete fluidic sprinkler

1. 转体连接座 2. 空心轴 3. 限位环 4. 换向机构 5. 喷体
6. 喷管 7. 反向塑料管 8. 射流元件体 9. 旋转密封机构
10. 水流

### 1.1 旋转阻力矩

喷头工作时,水流通过空心轴、喷体、喷管、射流元件体,如图1所示,水流对喷管有往上推的作用力 $F_z$ ,点C为喷管质心,此时根据作用力与反作用力原理,水流对喷管的作用力 $F_z$ 会产生对喷头旋转的阻力矩

$$M_{z1} = F_z f h \quad (1)$$

其中

$$F_z = \rho q v_0 \sin \theta$$

式中  $v_0$ ——质心断面处的流速, m/s

$f$ ——摩擦因数  $\theta$ ——喷头仰角, ( $^\circ$ )

$h$ ——质心离轴心距离, m

$\rho$ ——流体密度, kg/m<sup>3</sup>  $q$ ——流量, m<sup>3</sup>/s

当喷头做旋转运动时,存在一个阻碍喷头旋转

运动的切向约束力,即为静摩擦力 $F_s$ ,方向与喷头旋转方向相反。静摩擦力与一般约束力不同,它并不随主动力的增大而无限度地增大,当主动力达到最大静摩擦力 $F_{\max}$ 时,喷头处于平衡的临界状态,主动力再继续增大,平衡被打破,喷头开始运转。静摩擦力的大小随主动力的情况而改变,介于零与最大值之间,即 $0 \leq F_s \leq F_{\max}$ ,喷头所受旋转摩擦阻力矩可以看成是最大静摩擦力 $F_{\max}$ 所产生的摩擦力矩<sup>[6]</sup>。选图1中I-I, II-II断面,根据伯努利方程,计算公式为

$$\frac{p_I}{\rho g} + \frac{v_I^2}{2g} = \frac{p_{II}}{\rho g} + \frac{v_{II}^2}{2g} + h_j \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad h_j = \left(1 - \frac{A_{II}}{A_I}\right) \frac{v_I^2}{2g}$$

水流对喷体的正压力为

$$N = (p_I - p_{II})(A_I - A_{II}) = \frac{\rho}{2} \left( v_{II}^2 - \frac{A_{II}}{A_I} v_I^2 \right) (A_I - A_{II}) \quad (3)$$

其中最大静摩擦力的大小与两物体间的正压力成正比,即

$$F_{\max} = fN \quad (4)$$

喷头所受旋转摩擦阻力矩为

$$M_{z2} = F_{\max} r = fNr \quad (5)$$

式中  $r$ ——转体连接座半径

喷头旋转运动时所受总阻力矩为

$$M_z = M_{z1} + M_{z2} = F_z f h + fNr \quad (6)$$

### 1.2 驱动力矩

图2为加上转折角的喷管示意图,流体出口速度方向与进口速度方向之间的夹角为 $\alpha$ ,弯管对控制体的作用力以 $F$ 表示,将 $F$ 分解为水平方向的作用力 $F_x$ 和垂直方向的作用力 $F_y$ ,可知 $F_y$ 为水流对喷头旋转的驱动力。

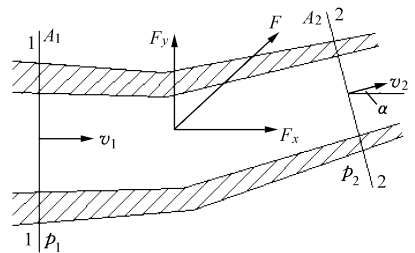


图2 转折角喷管

Fig. 2 Turning angle effuser

根据流体动量方程

$$\rho_2 q_2 \beta_2 v_2 - \rho_1 q_1 \beta_1 v_1 = \sum F \quad (7)$$

密度为 $\rho$ 的不可压缩流体定常流动

$$\begin{cases} \rho_1 q_1 = \rho_2 q_2 = \rho q \\ \rho q (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) = \sum F \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\beta_1, \beta_2$ ——动量修正系数

圆湍流中  $\beta = 1.005 \sim 1.05$ , 为计算方便取  $\beta_1 = \beta_2 = 1$ 。

连续性方程

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = q \quad (9)$$

由动量方程可得

$$\rho q (v_2 \cos \alpha - v_1) = p_1 A_1 + F_x - p_2 A_2 \cos \alpha \quad (10)$$

$$\rho q (v_2 \sin \alpha - 0) = p_1 A_1 + F_y - p_2 A_2 \sin \alpha \quad (11)$$

式(11)中的  $p_1 A_1$  为零, 由连续性方程可得  $v_2 = (A_1/A_2)v_1$ , 代入式(10)、(11)得

$$F_x = p_2 A_2 \cos \alpha - p_1 A_1 + \rho q \left( \frac{A_1}{A_2} v_1 \cos \alpha - v_1 \right) \quad (12)$$

$$F_y = p_2 A_2 \sin \alpha + \rho q \frac{A_1}{A_2} v_1 \sin \alpha \quad (13)$$

流体对管壁的作用力为  $F_{cx}, F_{cy}$ , 其中

$$F_{cx} = -F_x =$$

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 \cos \alpha - \rho q \left( \frac{A_1}{A_2} v_1 \cos \alpha - v_1 \right) \quad (14)$$

$$F_{cy} = -F_y = -p_2 A_2 \sin \alpha - \rho q \frac{A_1}{A_2} v_1 \sin \alpha \quad (15)$$

流体对喷管的驱动力矩

$$M_{Q1} = F_{cy} l = -F_y l =$$

$$\left( -p_2 A_2 \sin \alpha - \rho q \frac{A_1}{A_2} v_1 \sin \alpha \right) l \quad (16)$$

式中  $l$ ——转折角力臂, m

图 1 中点  $E$  为水射流附壁点, 工作过程中, 全射流喷头利用水流附壁效应获得驱动力矩, 由此可以推导出全射流喷头驱动力矩

$$M_{Q2} = \rho q s v \sin \gamma \quad (17)$$

式中  $s$ ——水射流附壁点到转轴的距离

$\gamma$ ——附壁中心线与壁面的夹角

总驱动力矩为式(16)和式(17)之和

$$M_Q = M_{Q1} + M_{Q2} =$$

$$\left( -p_2 A_2 \sin \alpha - \rho q \frac{A_1}{A_2} v_1 \sin \alpha \right) l + \rho q s v \sin \gamma \quad (18)$$

### 1.3 步进角度

通过以上分析, 每次步进所受力矩为

$$M = M_Q - M_z = \left( -p_2 A_2 \sin \alpha - \rho q \frac{A_1}{A_2} v_1 \sin \alpha \right) l + \rho q s v \sin \gamma - F_z f h - f N r \quad (19)$$

设射流附壁点对其转动轴的转动惯量为  $J_B$ , 有

$$J_B \frac{d\omega_1}{dt} = M \quad (20)$$

当  $t=0$  时,  $\omega_1 = 0$ 。式(20)解为

$$\omega_1 = \frac{1}{J_B} M t \quad (21)$$

转角  $\varphi_1 = \int_0^{t_2} \omega_1 dt$ , 故可得旋转角方程为

$$\varphi_1 = \frac{1}{2J_B} M t_2^2 \quad (22)$$

式中  $t_2$ ——全射流喷头的附壁时间<sup>[7]</sup>

## 2 试验测试

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, 排除了风力等因素的影响。参照 JB/T7867—1997<sup>[8]</sup>, 搭建喷灌试验测试装置, 如图 3 所示。试验过程中, 选用 30PXH 型全射流喷头作为试验样机, 管路压力由 0.25 级的精密压力表读出, 喷灌流量通过 0.5 级精度的电磁流量计测量, 精度较高的秒表测量喷头旋转的速度, 米尺测量验证喷头的射程, 利用基于 RS485 总线的分布自动测量系统测量点喷灌强度, 测量的数据准确、可靠。转折角喷管的重要结构因素包括转折角角度  $\alpha$  和力臂长度  $l$ , 表 1 为试验中所采用的因素水平表, 试验共选用了 7 种不同结构的转折角喷管。每次旋转的角度、步进频率、喷头射程和均匀系数都是喷头工作稳定性一个重要的性能指标<sup>[9-12]</sup>。分别测量控制工作压力为 100、200、300、400、500 kPa 时喷洒水角度 90° 内的步进次数、步进时间、射程和点喷管强度。

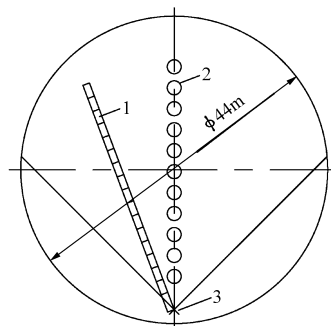


图 3 喷灌试验测试装置

Fig. 3 Test system for sprinkler irrigation

1. 米尺 2. 量雨筒 3. 喷头

试验中, 通过多次测量, 取平均值计算出步进频率。射程按喷头中心至点喷灌强度为 0.25 mm/h 处

表 1 因素水平

Tab. 1 Factor standard

序号	转折角角度 $\alpha / (^\circ)$	力臂长度 $l / m$
1	0	
2	2	0.10
3	2	0.15
4	2	0.20
5	5	0.10
6	5	0.15
7	5	0.20

点的距离确定,用米尺目测法验证所测射程的正确性。均匀系数由自动测量系统测出的点喷灌强度计算而得。通过试验测试发现:对于不同结构的喷管,在不同工作压力下,流量数据仅有少许的偏差,对试验结果不产生影响。

### 3 结果分析及讨论

#### 3.1 步进角度

图4为转折角力臂长度 $l$ 为0.10、0.15、0.20 m时工作压力与步进角度关系的试验值和理论计算

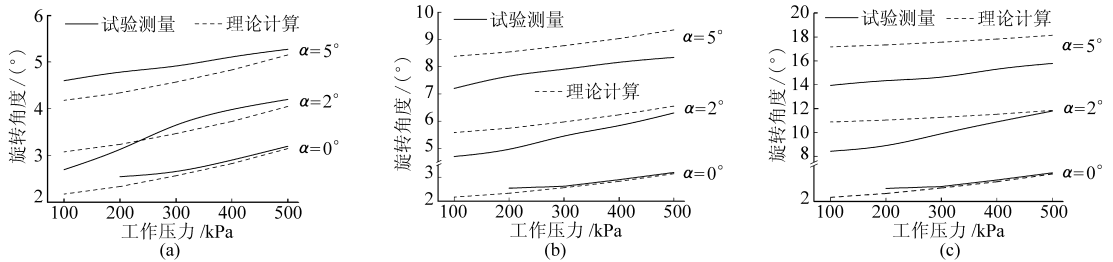


图4 工作压力与步进角度关系曲线

Fig. 4 Relational curve between working pressure and stepping angle

(a)  $l=0.10$  m (b)  $l=0.15$  m (c)  $l=0.20$  m

当转折角力臂长为0.10 m,转折角角度为 $2^\circ$ 时,理论值与试验值的平均误差为6.8%;转折角角度为 $5^\circ$ 时,理论值与试验值的平均误差为7.2%。当转折角力臂长为0.15 m,转折角角度为 $2^\circ$ 时,理论值与试验值的平均误差为9.8%;转折角角度为 $5^\circ$ 时,理论值与试验值的平均误差为10.8%。当转折角力臂长为0.20 m,转折角角度为 $2^\circ$ 时,理论值与试验值的平均误差为12.2%;转折角角度为 $5^\circ$ 时,理论值与试验值的平均误差为16%。这说明随着喷管转折角角度、力臂的增加,理论值与试验值误差加大。这是因为在试验的过程中,一些不确定因素,如喷头旋转时所受额外摩擦力、喷头形成的附壁力达不到理想状态等,造成喷头步进角度的大小受到一些限制,但总体上来说试验值所得的趋势与理论分析的趋势具有很好的一致性。

#### 3.2 步进频率

全射流喷头直射时间与附壁时间之和的倒数即为步进频率。通过试验可知当转折角一定时,转折角力臂长短对步进频率基本没有影响,因此可以近似看成喷管转折角大小决定喷头步进频率。图5为工作压力与步进频率关系曲线,从图中可以看出,步进频率随着工作压力的加大而快速增大,这是因为工作压力增大时,水流流速加大,全射流喷头直射时间缩短,因此步进频率必然加大。

在相同工作压力下,喷管转折角角度越大,其步进频率越小,这是因为在相同工作压力下,由于水流

值。从图中可以看出,当全射流喷头喷管不加转折角时,工作压力小于200 kPa后,喷头不能稳定工作,加上转折角后,在100 kPa下,喷头都能正常工作,因此,喷管加上转折角后扩大了全射流喷头压力适用范围。由图4可以看出,步进角度随着喷管转折角的增大而增大,随着转折角力臂加长而增大。这是因为当喷管转折角角度或转折角力臂增大时,水流通过转折角时增大了对喷头的固有驱动力矩,加大了使喷头步进的总驱动力矩,因此步进角度必然增大。

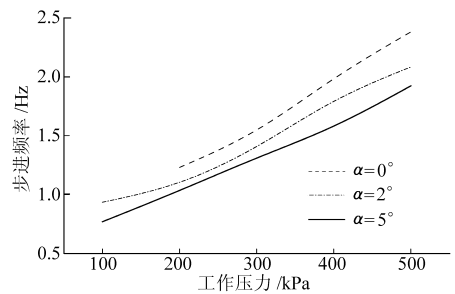


图5 工作压力与步进频率关系曲线

Fig. 5 Relational curve between working pressure and stepping frequency

要克服喷管转折角阻力,流速就会降低,直射时间变长,因此附壁频率会变小。30PXH型全射流喷头在额定工作压力400 kPa下,喷管无转折角的步进频率为2 Hz,喷管转折角 $2^\circ$ 时的步进频率为1.8 Hz,喷管转折角 $5^\circ$ 时的步进频率为1.6 Hz。

#### 3.3 射程

图6为各结构参数下,工作压力与射程之间的关系曲线。由图6可以看出,射程随着压力的加大而增大,开始增长很快,而后较缓,达到一定极限时,无论压力如何增大,射程也不再增加。这是因为压力过大时,水流的运动速度大,所受空气阻力也增大,射流粉碎得更厉害,变成细小雨滴,雨滴飞行距离变近。所以,压力增至一定程度时,进一步增加压力,只会提高雾化程度,而不能增加射程。

通过试验可知,在工作压力小于200 kPa时,结构参数对射程影响不大。随着工作压力的增加,水

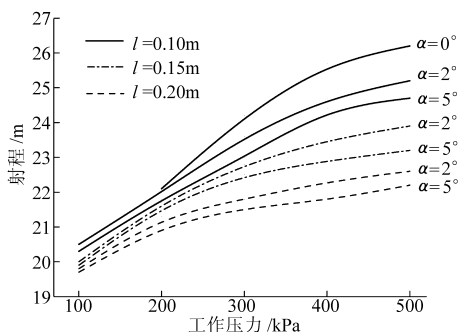


图 6 工作压力与射程关系曲线

Fig.6 Relational curve between working pressure and wetted diameter

流对喷管驱动力矩加大,由于喷头每次步进角度的加大,射程相对较短;当转折角力臂长度一定时,转折角角度大小对射程影响不大,因此可以近似看成喷管转折角力臂长度决定了喷头射程。由图 6 可以看出,与原来无转折角喷管相比,在力臂长为 0.10 m 时射程降低 4%;力臂长为 0.15 m 时射程降低 7.9%;力臂长为 0.20 m 时射程降低 12.7%。

### 3.4 均匀系数

喷灌面积上雨量分布的均匀程度即为喷灌均匀系数,采用 Christiansen 计算法<sup>[13]</sup>得喷灌均匀系数为

$$C_u = 1 - \frac{\Delta h'}{h'} \quad (23)$$

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

$$h' = \frac{\sum S_i h_i}{\sum S_i} \quad (24)$$

$$\Delta h' = \frac{\sum S_i |h_i - h'|}{\sum S_i} \quad (25)$$

式中  $h_i$ ——点喷灌强度,mm

$S_i$ ——某测点所代表的面积,m<sup>2</sup>

测量出点喷灌强度  $h_i$  后,联立式(23)~(25)即可计算出喷灌均匀系数  $C_u$ 。

通过试验发现,当转折角角度一定时,转折角力臂长短对点喷灌强度基本没有影响,因此可以近似看成喷管转折角角度决定喷头喷洒均匀性。图 7 为工作压力与均匀系数关系曲线。试验观察到,当工作压力小于 300 kPa 时,水流从射流元件体喷出形成一股水注,雾化效果很差,均匀系数在 75% 以下,

喷灌效果较差。随着工作压力的增加,雾化效果改善,喷灌均匀性快速增加。

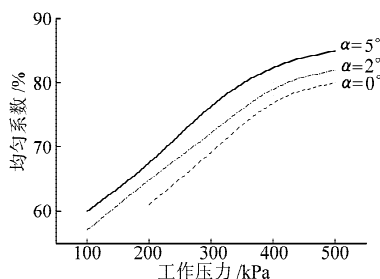


图 7 工作压力与均匀系数关系曲线

Fig.7 Relational curve between working pressure and uniformity coefficient

从图 7 中可以看出,当工作压力较小时,喷管转折角角度越大,其均匀系数越高。这是因为工作压力小时,水流本应形成一股水柱,使远处水多,近处水少,但喷管转折角角度却弥补了喷头近处水量,因此喷管转折角角度越大,其均匀系数越高。工作压力增大后,水流雾化效果较好,均匀系数趋于接近。无转折角喷管,最高均匀系数可达到 80%,喷管转折角为 2°时最高均匀系数可达到 82%,喷管转折角 5°时最高均匀系数可达到 85%。

## 4 结论

(1) 全射流喷头步进旋转所受旋转阻力矩包括水流冲击阻力矩和旋转摩擦阻力矩,驱动力矩包括喷管转折角所受力矩和水流附壁产生的推力矩,理论分析推导出全射流喷头步进旋转时所受总力矩和旋转角方程。

(2) 测量了喷头喷洒角 90° 内的试验数据,对步进角度、喷头射程、均匀系数和步进频率进行了分析。由于试验过程中会产生不确定因素,步进角度的理论值与试验值有一定的误差,最大平均误差达 16%。试验值与理论分析的变化趋势具有很好的一致性,证明了理论推导的正确性。

(3) 喷管转折角力臂长度决定喷头射程,转折角角度决定喷头喷洒均匀性和步进频率。工作压力越大,射程越大,均匀系数越大,步进频率越大。转折角力臂越长,射程越短,转折角力臂长为 0.2 m 时,与原无转折角喷管相比,射程降低 12.7%;转折角角度越大,均匀系数越大,步进频率越小,喷管转折角为 5°时,最高均匀系数可达到 85%,步进频率为 1.6 Hz。

### 参 考 文 献

1 刘俊萍,袁寿其,李红,等. 全射流喷头射程与喷洒均匀性影响因素分析与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(11):51~54.

- complete fluidic sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(11):51~54. (in Chinese)
- 2 Tang F M, Kang Z H. Fluidic sprinkler for irrigation with stepwise rotation[C]//Harade M. Fluid Control and Measurement, Tokyo, Japan: Pergamon Press, 1986: 415~420.
  - 3 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)
  - 4 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)
  - 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 李世英. 喷灌喷头理论与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
  - 7 朱兴业,袁寿其,李红. 全射流喷头与摇臂式喷头的对比实验[J]. 农业机械学报,2008,39(2):70~72,184.  
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong. Compared experiments between complete fluidic sprinkler and impact sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 70~72, 184. (in Chinese)
  - 8 JB/T 7867—1997 旋转式喷头[S].
  - 9 Han W T, Fen H, Wu P T, et al. Evaluation of sprinkler irrigation uniformity by double interpolation using cubic splines[C] //Proceedings of International Conference on Effective Utilization of Agricultural Soil & Water Resources and Protection of Environment, 2007: 250~255.
  - 10 Sourell H, Faci J M, Playán E. Performance of rotating spray plate sprinklers in indoor experiments[J]. J. Irrig. Drain. Eng., 2003, 129(5): 376~380.
  - 11 Hendawi M, Molle B, Folton C, et al. Measurement accuracy analysis of sprinkler irrigation rainfall in relation to collector shape[J]. J. Irrig. Drain. Eng., 2005, 131(5): 477~483.
  - 12 Tarjuelo J M, Montero J, Valiente M, et al. Irrigation uniformity with medium size sprinklers, part I: characterization of water distribution in no-wind conditions[J]. Trans. ASAE, 1999, 42(3): 665~675.
  - 13 Christiansen J E. Irrigation by sprinkling[R]. California Agricultural Experiment Station Bull. 670, California University, Berkeley, October, 124,1942.

(上接第 68 页)

- 12 史春建. 植保机械雾化性能的图像检测方法研究[D]. 镇江:江苏大学,2005.  
Shi Chunjian. Research on measurement for atomization performance of crop protection machinery based on image processing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2005. (in Chinese)
- 13 陆军,李萍萍,贾卫东,等. 温室轴流风送药雾靶标沉积试验[J]. 农业机械学报,2009,40(12):88~92.  
Lu Jun, Li Pingping, Jia Weidong, et al. Experiment of axial-flow air-carried toward-target pesticide deposition in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(12):88~92. (in Chinese)
- 14 陆军,李萍萍,贾卫东,等. 3种喷头雾滴输运沉积参数的试验与分析[J]. 农业机械学报,2009,40(10):53~57.  
Lu Jun, Li Pingping, Jia Weidong, et al. Experiment and analysis on droplets motion and deposition parameters of 3 nozzles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(10):53~57. (in Chinese)
- 15 祁力钧,赵亚青,王俊,等. 基于CFD的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报,2010,41(2):62~67.  
Qi Lijun, Zhao Yaqing, Wang Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(2):62~67. (in Chinese)