

变量喷洒喷头性能指标建立及模糊评价

刘俊萍, 袁寿其*, 李红, 朱兴业

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 针对全圆喷洒喷头性能评价指标不能充分反映变量喷洒喷头各参数连续变化特点的问题, 该文加入了时间变量参数, 初步建立了变量喷洒喷头的评价指标, 主要包括: 喷头射程降低系数、喷头喷洒形状系数、喷洒均匀性系数、喷洒打击强度变化系数及喷灌强度变化系数。采用模糊数学的方法, 以上述 5 个性能评价指标, 分别对 BPXH20 变量喷洒全射流喷头, BPY₁20 变量喷洒摇臂式喷头和 BPY₂20 变量喷洒摇臂式喷头进行综合评价, 并根据不同应用场合, 探索性能指标权重值变化±20%对评价结果的影响。结果表明: 喷洒均匀性系数、喷洒强度变化系数及打击强度变化系数对权重变化较为敏感, 但不影响评价喷头的性能。说明权重值选取合理, 可为今后其它变量喷洒喷头评价提供参考。

关键词: 模糊集, 算法, 评估, 喷头, 变量喷洒, 评价指标

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.018

中图分类号: S277.9⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0094-06

刘俊萍, 袁寿其, 李红, 等. 变量喷洒喷头性能指标建立及模糊评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 94-99.

Liu Junping, Yuan Shouqi, Li Hong, et al. Fuzzy evaluation and performance index of variable-rate sprinklers[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 94-99. (in Chinese with English abstract)

0 引言

喷灌喷头以全圆喷洒为主得到广泛应用, 其性能指标有射程、喷洒均匀性等, 为喷头的性能评价提供了依据。随着喷头向多功能方向发展, 变量喷洒喷头是新型喷头, 其结构及性能与普通全圆喷洒喷头不同^[1-2]。在喷洒过程中, 变量喷洒喷头的射程、喷灌强度等均随着喷头旋转角度发生变化, 现有全圆喷洒喷头的性能指标不能反映该种特性的喷头性能的好坏, 如射程降低了多少、喷洒形状怎么样、喷灌强度变化了多少等问题无法定量表达。因此建立变量喷洒喷头的性能指标具有重要的意义^[3-4]。

国内外对喷头的性能已进行了大量的研究。Raquel^[5]等对喷头的径向水量分布及喷洒雨滴直径等喷洒性能进行了试验研究。J.Burguete^[6]等对喷头喷洒雨滴直径及喷洒运动轨迹进行了研究。C.F.Bautista-Capetillo^[7]等对喷头喷洒水量分布及喷洒轨迹等在不同工况下进行了研究。国内对喷灌喷头喷洒性能的研究也较多, 较为典型的有严海军^[8]等对喷头组合喷洒性能进行了模拟试验研究, 韩文霆^[9]等对变量喷头的评价指标进行了初步的建立。

现有研究中, 喷头的性能指标尚不能反映变量喷洒性能参数连续变化的特点, 变量喷头的每一个技术指标和运

行参数均包含着有关变量运行时的不同信息, 同时单一的指标评价体系往往难以全面反映变量喷洒的状态。

因此本文根据变量喷洒喷头喷洒特点, 旨在建立完善变量喷洒喷头的水力性能指标, 并将各评价指标进行模糊综合分析^[10-12], 评价变量喷头的优劣, 为以后评价变量喷洒喷头的优劣提供一种有效的方法。

1 性能指标建立

1.1 喷头射程降低系数

射程降低系数^[9]是指变量喷洒喷头的射程比圆形喷洒喷头的射程降低的百分比。图 1 为喷洒域示意图。由于喷头在旋转过程中射程不断变化, 因此射程为时间的变化函数, 射程的降低系数 ε 应为

$$\varepsilon = \frac{R_0 - R(t)}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_0 为全圆喷洒喷头的射程, m; $R(t)$ 为加装压力流量调节装置后射程随时间的变化函数, m; t 为喷头旋转的时间, s。

其中 $R(t) = \sum_{i=0}^{t_0} w_{Ri} R(t_i)$, w_{Ri} 为不同时间射程的权重值, 若试验测量射程的数据点有 n 个, 且均匀选取测量点, 则 $w_{Ri} = 1/n$, n 越大, 越具有连续性; t_0 为喷头旋转一周所需的时间, s; t_i 为喷头旋转到第 i 个测点的时间, s。由此得到

$$\varepsilon = \frac{R_0 - \sum_{i=0}^{t_0} w_{Ri} R(t_i)}{R_0} \times 100\% \quad (2)$$

将式 (2) 进行化简, 得到变量喷洒喷头射程的降低系数为

收稿日期: 2011-05-21 修订日期: 2011-11-18

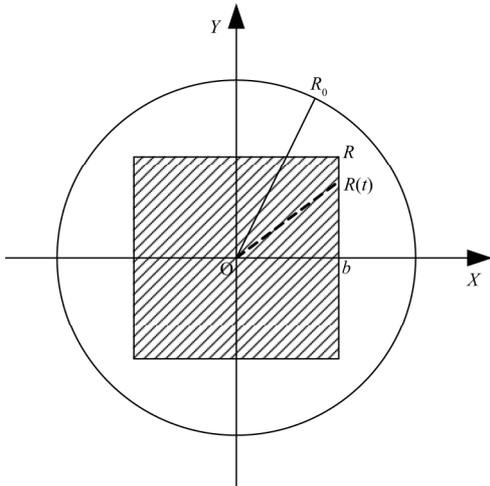
基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划 (2011AA100506); 国家自然科学基金资助项目 (51109098); 国家农业科技成果转化项目 (2011GB2C100015); 江苏省农业科技支撑计划 (BE2010393)

作者简介: 刘俊萍 (1982-), 女, 辽宁海城人, 博士生, 主要从事流体机械及排灌机械研究。镇江 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013。Email: liujunping401@hotmail.com

*通信作者: 袁寿其 (1963-), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及排灌机械研究。镇江 江苏大学, 212013。

Email: shouqiy@ujs.edu.cn

$$\varepsilon = (1 - \sum_{i=0}^{t_0} w_{Ri} \frac{R(t_i)}{R_0}) \times 100\% \quad (3)$$



注：\$R_0\$ 为全圆喷洒喷头的射程，\$m\$；\$R(t)\$ 为加装压力流量调节装置后射程随时间的变化函数，\$m\$；\$t\$ 为喷头旋转的时间，\$s\$；\$R\$ 为加装了压力流量调节装置后的最大射程，\$m\$；\$b\$ 为加装了压力流量调节装置后的最小射程，\$m\$；阴影部分为喷洒域。

图 1 喷洒域示意图

Fig.1 Schematic diagram of spraying shape

1.2 喷头喷洒形状系数

喷头喷洒形状系数^[9]是描述喷头喷洒域形状接近非圆形喷洒域形状的程度。形状系数越大，说明越接近非圆形喷洒域，效果越明显。

$$\eta = (1 - \frac{|R \cos(\pi/k) - b|}{R \cos(\pi/k)}) \times 100\% \quad (4)$$

式中，\$R\$ 为加装了压力流量调节装置后的最大射程，\$m\$；\$b\$ 为加装了压力流量调节装置后的最小射程，\$m\$；\$k\$ 为多边形数。

喷头喷洒的形状系数对规则形状较有意义，对于不规则形状，形状系数的计算方法复杂，在此不做详细分析^[9]。

1.3 喷洒均匀性系数

喷洒的均匀性^[13]是喷头水力性能的一个重要指标，变量喷洒喷头旋转过程中随着时间的改变水力性能产生变化，如果采用径向测量水量分布计算均匀性系数，除了代表面积不同外，根据喷头旋转的连续性，应加入时间函数，与喷头射程降低系数同理得

$$C_u = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_{ai} S_i |h_i - \bar{h}|}{\sum_{i=1}^n w_{ai} S_i h_i}) \times 100\% \quad (5)$$

式中，\$C_u\$ 为克里斯琴森均匀系数，%；\$n\$ 为测点数；\$\bar{h}\$ 为平均喷灌强度，\$mm\$；\$h_i\$ 为第 \$i\$ 个测点的喷灌强度，\$mm\$；\$S_i\$ 为第 \$i\$ 个测点的代表的喷洒面积，\$m^2\$；\$w_{ai}\$ 为不同旋转角度下喷洒均匀性的权重值。

但测量工作量与采用网格型方法同样较大，采用网格型量雨筒布置方法计算较径向测量相对简单，如下式所示

$$C_u = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n |h_i - \bar{h}|}{\sum_{i=1}^n h_i}) \times 100\% \quad (6)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (7)$$

全圆喷洒喷头均匀性系数主要体现在组合喷灌上^[14-15]，而对于变量喷洒喷头而言，由于其应用的多样性，单喷头的均匀性同样重要，因此上述公式用以衡量变量喷洒喷头均匀性。

1.4 喷洒打击强度变化系数

喷洒打击强度^[16-18]主要是指水流喷洒出后对作物的打击力，可由雨滴的大小来反映，测量雨滴直径的方法有很多种，本文采用色斑法进行测量。喷洒打击强度变化系数可表示为变量喷头喷洒的雨滴直径比圆形喷洒域喷头的雨滴直径增加的百分比。由于喷头旋转过程中射程在不断变化，因此雨滴直径同样为时间的变化函数，因此雨滴直径的增加系数应为

$$\delta = \frac{r_0 - r(t)}{r_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中，\$r_0\$ 为全射流喷头的雨滴直径，\$mm\$；\$r(t)\$ 为加装压力流量调节装置后雨滴直径随时间的变化函数，\$mm\$。其中

\$r(t) = \sum_{i=0}^{t_0} w_{ri} r(t_i)\$，\$w_{ri}\$ 为不同时间雨滴直径的权重值。由此得到

$$\delta = \frac{r_0 - \sum_{i=0}^{t_0} w_{ri} r(t_i)}{r_0} \times 100\% \quad (9)$$

将式(9)进行化简，得到喷洒打击强度变化系数为

$$\delta = (1 - \sum_{i=0}^{t_0} w_{ri} \frac{r(t_i)}{r_0}) \times 100\% \quad (10)$$

1.5 喷灌强度变化系数

喷灌强度主要是指单位面积上的降水深度，本文采用自动测量系统进行测量。测量喷洒的水量分布时，每个测量点得到的降水深度为点喷灌强度，在 1h 内每个量雨筒的降水深度即为点喷灌强度。在喷洒面上点喷灌强度的平均值为平均喷灌强度。喷头在变量喷洒时，不同旋转角度上的点喷灌强度具有一定的差别。因此本文采用喷灌强度变化系数来描述喷灌强度的变化程度。

$$\gamma_q = \frac{q_{\max} - \bar{q}}{\bar{q}} \times 100\% \quad (11)$$

式中，\$q_{\max}\$ 为最大点喷灌强度，\$mm/h\$；\$\bar{q}\$ 为平均喷灌强度，\$mm/h\$。其中，对于网格型测量来说，\$\bar{q} = \sum_{i=0}^n q_i / n\$，\$q_i\$ 为每个测点的点喷灌强度，\$mm/h\$。

2 模糊评价模型

评价变量喷洒喷头的指标有以上多个因素，其水力性能由这些因素综合而定，根据综合评价结果确定喷头

性能。本文采用模糊评价的数学方法对变量喷洒喷头各评价指标进行综合评价。

2.1 评价对象集

对象集是不同类型变量喷洒喷头的集合,一般用 U 表示。用 m 表示变量喷洒喷头类型的种数,即可表示为

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\} \quad (12)$$

各元素为 $U_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 。

2.2 评价因素集

根据变量喷洒喷头的性能参数,建立评价的因素集为

$$X = \{\varepsilon, \eta, c_u, \delta, \gamma_q\} \quad (13)$$

式中, ε 为射程降低系数; η 喷头喷洒形状系数; c_u 为喷灌强度变化系数; δ 为喷洒均匀性系数; γ_q 喷洒打击强度变化系数。

以上 5 个因素即为针对变量喷洒喷头的评价指标。

2.3 评语集

变量喷洒喷头水力性能的评语分为: 优, 良, 中, 差, 很差共 5 项, 得到评语集如下

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5\} \quad (14)$$

式中, y_1 为优, y_2 为良, y_3 为中, y_4 为差, y_5 为很差。

由于变量喷洒喷头为新研制的具有特殊功能的喷头, 目前还没有关于变量喷洒喷头的相关标准。因此本文根据试验经验, 设定 5 个因素的不同评语下的取值范围。如表 1 所示为变量喷洒喷头各参数的评价。

表 1 变量喷洒喷头各参数的评价

Table 1 Parameter evaluations of variable-rate sprinklers

因素集	评语集 y_i				
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
ε	≤ 0.2	$> 0.2 \sim 0.3$	$> 0.3 \sim 0.45$	$> 0.45 \sim 0.5$	> 0.5
η	> 0.8	$> 0.7 \sim 0.8$	$> 0.6 \sim 0.7$	$> 0.5 \sim 0.6$	≤ 0.5
c_u	≤ 0.5	$> 0.5 \sim 1$	$> 1 \sim 1.5$	$> 1.5 \sim 2$	> 2
δ	> 0.8	$> 0.7 \sim 0.8$	$> 0.6 \sim 0.7$	$> 0.5 \sim 0.6$	≤ 0.5
γ_q	≤ 0.2	$> 0.2 \sim 0.3$	$> 0.3 \sim 0.45$	$> 0.45 \sim 0.5$	> 0.5

注: ε 为射程降低系数; η 为喷头喷洒形状系数; c_u 为喷灌强度变化系数; δ 为喷洒均匀性系数; γ_q 为喷洒打击强度变化系数; y_1 为优; y_2 为良; y_3 为中; y_4 为差; y_5 为很差。

由表 1 可知, 在一定范围内, 可以构造出隶属函数。根据模糊分布模型函数, 得到 5 个指标的隶属函数如下

$M(\varepsilon)$ 为射程的降低系数集合, 越小越好, 模糊分布中采用偏小型, 得到

$$M(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & \varepsilon \leq 0.2 \\ \left(\frac{0.5 - \varepsilon}{0.5 - 0.2}\right)^2, & 0.2 < \varepsilon \leq 0.5 \\ 0, & \varepsilon > 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

$M(\eta)$ 为喷洒形状系数的集合, 越大越好, 模糊分布中采用偏大型, 得到

$$M(\eta) = \begin{cases} 0, & \eta \leq 0.5 \\ \left(\frac{\eta - 0.5}{0.8 - 0.5}\right)^2, & 0.5 < \eta \leq 0.8 \\ 1, & \eta > 0.8 \end{cases} \quad (16)$$

$M(c_u)$ 为喷灌强度变化系数的集合, 越小越好, 模糊

分布中采用偏小型, 得到

$$M(c_u) = \begin{cases} 1, & c_u \leq 0.5 \\ \left(\frac{2 - c_u}{2 - 0.5}\right)^2, & 0.5 < c_u \leq 2 \\ 0, & c_u > 2 \end{cases} \quad (17)$$

$M(\delta)$ 为喷洒均匀性系数的集合, 越大越好, 模糊分布中采用偏大型, 得到

$$M(\delta) = \begin{cases} 0, & \delta \leq 0.5 \\ \left(\frac{\delta - 0.5}{0.8 - 0.5}\right)^2, & 0.5 < \delta \leq 0.8 \\ 1, & \delta > 0.8 \end{cases} \quad (18)$$

$M(\gamma_q)$ 为喷洒打击强度变化系数集合, 即雨滴直径越小越好, 模糊分布中采用偏小型, 得到

$$M(\gamma_q) = \begin{cases} 1, & \gamma_q \leq 0.2 \\ \left(\frac{0.5 - \gamma_q}{0.5 - 0.2}\right)^2, & 0.2 < \gamma_q \leq 0.5 \\ 0, & \gamma_q > 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

2.4 评价指标权重值

权重值表示集合中不同元素所占的比重。为了反映各元素的不同重要性程度, 对各元素赋予不同的权重值, 设权重集为

$$A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) \quad (20)$$

其中 $0 < a_i < 1, a_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$, 代表各元素的权重值。

2.5 评价结果

变量喷洒全射流喷头水力性能评价属于综合评价的正问题, 如果把单因素评价矩阵 E 看作一个转换器, 当输入一个矩阵 C , 则可以输出一个矩阵 $B^{[19]}$ 。

E 的计算方法为将表 1 中的每个数据代入隶属函数中。则 $B = CoE$, 即 B 是 C 对 E 的合成。采用最大-最小合成运算评价的结果为

$$B = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5) \quad (21)$$

同时, 根据文献[10]及[11]对评价结果的描述, 当评价结果数值相近时, 为了尽量不损失评价指标信息, 通常采用矩阵相乘线性加权变化得到评价结果。

3 应用实例

本文选取 3 种变量喷洒喷头为对象, 模糊评价步骤如下
步骤 1: 确定评价对象。

选取 BPXH20 变量喷洒全射流喷头、BPY₁20 变量喷洒摇臂式喷头及 BPY₂20 变量喷洒喷头为代表进行比较, 并分别用 U_1, U_2, U_3 表示。

步骤 2: 确定评价因素。

在相同的系统供给压力下, 通过试验测量喷头的射程、点喷灌强度等参数, 代入各指标中进行计算, 得到各水力性能指标参数如表 2 所示。

步骤 3: 确定评语集及模糊矩阵。

变量喷洒喷头的评语集如表 1 所示。对表 2 中的每

一个数据利用公式 (15) ~ (19) 进行计算, 因此得到模糊矩阵 E

$$E = \begin{bmatrix} 0.930 & 1.000 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.270 & 0.008 & 0.350 \\ 0.220 & 0.040 & 0.400 \\ 1.000 & 0.110 & 1.000 \end{bmatrix}$$

步骤 4: 确定指标权重值。

对于变量喷洒喷头的特点及应用情况, 赋予各因素的权重值如表 3 所示^[12]。

表 2 各种变量喷洒喷头水力性能指标参数
Table 2 Hydraulic performance indexes of variable-rate sprinklers

喷头	参数				
	ε	η	c_u	δ	γ_q
U1	0.21	0.89	1.22	0.64	0.11
U2	0.10	0.95	1.87	0.56	0.40
U3	0.16	0.90	1.11	0.69	0.17

注: U1 为 BPXH20 变量喷洒全射流喷头; U2 为 BPY120 变量喷洒摇臂式喷头; U3 为 BPY220 变量喷洒喷头。下同。

表 3 各因素权重值
Table 3 Weight values of factors

因素	ε	η	c_u	δ	γ_q	Σ
权重 a_i	0.19	0.19	0.14	0.24	0.24	1

得到权重集为: $A = (0.19, 0.19, 0.14, 0.24, 0.24)$, 步骤 5: 结果计算。

本文中权重集 A 做为输入矩阵 C , 评判结果为

$$B = CoE = (0.24, 0.19, 0.24),$$

采用矩阵直接相乘得到评价结果为

$$B = C \cdot E = (0.697, 0.417, 0.765).$$

因此, U_3 最好, U_1 次之, U_2 最差。

采用模糊数学模型进行综合评价, 影响评价结果的主要因素在于指标权重值的分配。因此本文分别对不同应用场合下设计不同权重值分配方案, 得到权重值变化对评价结果的影响。

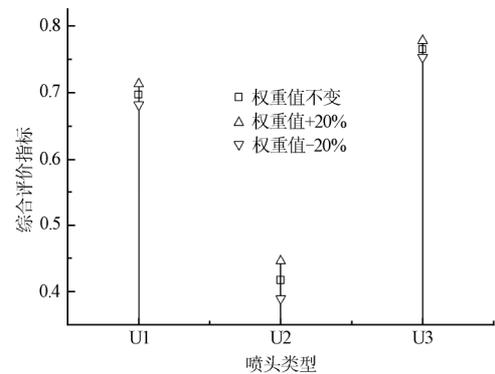
参照文献[10]中对权重的分配方案, 本文设方案 1 为当变量喷洒喷头应用在园林景观中, 避免喷洒边界超出规定范围时, 喷洒的形状系数较为重要, 因此, 将喷洒形状系数权重变化 $\pm 20\%$ 。方案 2 为当组合喷洒时, 工程规划投资中, 为了降低能耗, 喷洒射程降低系数较为重要, 因此, 将射程降低系数权重变化 $\pm 20\%$ 。方案 3 为当单喷头喷灌时, 喷灌强度变化系数、喷洒均匀性及喷洒打击强度变化系数较为重要, 因此, 将上述 3 个参数权重变化 $\pm 20\%$, 得到各指标的权重值 (表 4)。得到各方案下评价结果, 与权重不发生变化时进行对比, 如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 方案 1 和方案 2 对综合评价结果数值改变较小, 方案 3 对综合评价结果数值改变较大, 当降低喷洒均匀性系数、喷洒强度变化系数及打击强度变化系数权重值时, 综合评价结果数值反而增大。这意

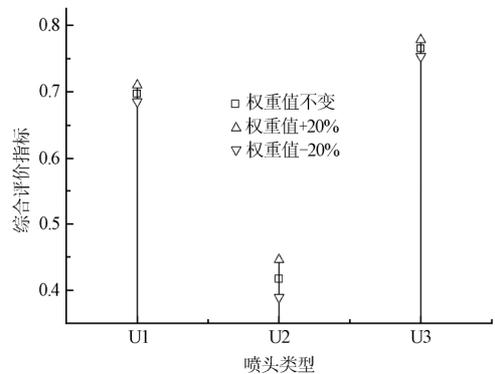
味着喷洒均匀性系数、喷洒强度变化系数及打击强度变化系数的相对重要性较为敏感, 但不影响评价喷头的的评价结果。说明权重值选取的合理性, 可为对今后其它变量喷洒喷头评价提供参考。

表 4 各指标的权重值变化方案
Table 4 Schemes of the index weight value

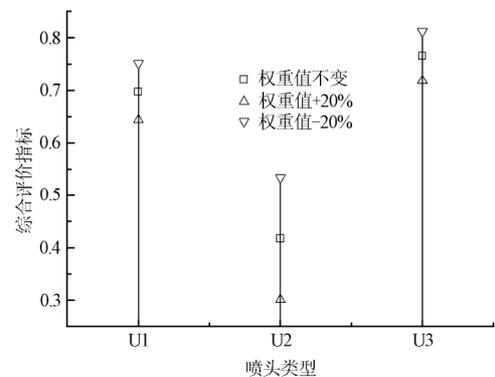
	因素				
	ε	η	c_u	δ	γ_q
方案 1(+20%)	0.180	0.230	0.130	0.230	0.230
方案 1(-20%)	0.200	0.150	0.150	0.250	0.250
方案 2(+20%)	0.230	0.180	0.130	0.230	0.230
方案 2(-20%)	0.150	0.200	0.150	0.250	0.250
方案 3(+20%)	0.128	0.128	0.168	0.288	0.288
方案 3(-20%)	0.252	0.252	0.112	0.192	0.192



a. 方案 1



b. 方案 2



c. 方案 3

图 2 不同权重变化方案对综合评价结果的影响

Fig.2 Evaluation results by different schemes of weight value

4 结 论

1) 根据变量喷洒喷头各参数连续变化的特点, 首次初步建立了变量喷洒喷头的评价指标。主要包括: 喷头射程降低系数、喷头喷洒形状系数、喷洒均匀性系数、喷洒打击强度变化系数及喷灌强度变化系数。

2) 对 BPXH20 变量喷洒全射流喷头、BPY₁20 变量喷洒摇臂式喷头和 BPY₂20 变量喷洒摇臂式喷头进行模糊评价, 并针对变量喷洒喷头的不同应用场合, 设计了不同权重分配方案, 喷洒均匀性系数、喷洒强度变化系数及打击强度变化系数的相对重要性较为敏感, 但不影响评价喷头的优劣。说明权重值选取的合理性, 可为今后其它变量喷洒喷头评价提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 李世英. 喷灌喷头理论与设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [2] 严海军, 刘竹青, 王福星, 等. 我国摇臂式喷头的研究与发展[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(1): 77—80.
Yan Haijun, Liu Zhuqing, Wang Fuxing, et al. Research and development of impact sprinklers in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(1): 77—80. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李久生, 饶敏杰. 喷灌水量分布均匀性评价指标的试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 78—82.
Li Jiusheng, Rao Minjie. Evaluation Methods of Sprinkler Water Nonuniformity[J]. Transactions of the chinese society of agricultural engineering, 1999, 15(4): 78—82. (in Chinese with English abstract)
- [4] 韩文霆, 吴普特, 杨青, 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.
Han Wenting, Wu Pute, Yang Qing, et al. Advances and comparisons of uniformity evaluation index of sprinkle irrigation[J]. Transactions of the chinese society of agricultural engineering, 2005, 21(9): 172—177. (in Chinese with English abstract)
- [5] Salvador R, Bautista-Capetillo C, Burguete J, et al. A photographic method for drop characterization in agricultural sprinklers[J]. Irrigation Science, 2009(27): 307—317.
- [6] Burguete J, Playan E, Montero J, et al. Improving drop size and velocity estimates of an optical disdrometer: implications for sprinkler irrigation simulation[J]. Transaction of the ASABE, 2003, 50(6): 2103—2116.
- [7] Bautista-Capetillo C F, Salvador R, Burguete J, et al. Comparing methodologies for the characterization of water drops emitted by an irrigation sprinkler[J]. Thransection of the ASABE, 2009, 52(5): 1493—1504.
- [8] 严海军, 郑耀泉. 两种园林地埋式喷头组合喷洒性能的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 84—86.
Yan Haijun, Zheng Yaoquan. Simulating sprinkler performance of two combined pop-up sprinklers[J]. Transactions of the chinese society of agricultural engineering, 2004, 20(1): 84—86. (in Chinese with English abstract)
- [9] 韩文霆. 变量喷洒可控域精确灌溉喷头及喷灌技术研究[D]. 博士学位论文, 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
Han Wenting. Varibale rate watering and contour controlled precision sprinkler and sprinkler irrigation[D]. PhD dissertation, Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵华, 许迪, 龚时宏. 旋转式喷头质量模糊综合评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 78—82.
Zhao Hua, Xu Di, Gong Shihong. Fuzzy synthetic evaluation of rotating sprinkler quality[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 78—82. (in Chinese with English abstract)
- [11] 喻黎明, 吴普特, 范兴科. 模糊综合评价在评价喷头水力性能中的应用[J]. 节水灌溉, 2001(3): 7—8, 21.
YuLiming, WuPute, FanXinke. Application of fuzzy comprehensive evaluation in sprinkler performance[J]. Water Saving Irrigation, 2001(3): 7—8, 21. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴普特, 牛文全, 郝宏科. 现代高效节水灌溉设施[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [13] Christiansen J.E. Irrigation by sprinkling[R]. Bulletin 670, California Agricultural Experiment Station, University of California, Berkeley, California, 1942.
- [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 with English abstract)
- [15] Li Jiusheng. Study on relationship between irrigation uniformity and deep-seated leakage[J]. Rural Water and Hydropower, 1993(1): 1—4.
- [16] Li J S, Kawano H. Sprinkler performances as function of nozzle geometrical parameters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1996, 122(4): 244—247.
- [17] Li J S, Kawano H. Sprinkler performance as affected by nozzle inner contraction Angle[J]. Irrigation Science, 1998(18): 63—66.
- [18] King B A, Wall R W, Kincaid D C, et al. Field testing of a variable rate sprinkler and control system for site-specific water and nutrient application[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 21(5): 847—853.
- [19] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

Fuzzy evaluation and performance index of variable-rate sprinklers

Liu Junping, Yuan Shouqi^{*}, Li Hong, Zhu Xingye

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

Abstract: The parameters of variable-rate sprinkler changed continuously when it is rotating, and the evaluation index of commonly sprinklers can not reflect the characteristics adequately. To overcome this problem, indexes of rotating time and the sprinkler evaluation index for variable spraying were proposed. The indexes mainly included the wetted radius reduced coefficient, the spraying shape coefficient, the uniformity coefficient, the variations of intensity coefficient and the variations of hit intensity coefficient. The fuzzy mathematics method was adopted, and the fluidic sprinkler typed BPXH20, BPY₁20 and BPY₂20 were evaluated with the five evaluation index factors. According to different applications of the sprinklers, the results of evaluation weights value changed by $\pm 20\%$ show that the evaluation weight values of the uniformity coefficient, the variations of intensity coefficient and the variations of hit intensity coefficient were very sensitive but would not impact results of the quality evaluation. It can be concluded that weight values were suitable for evaluating the variable-rate sprinklers in this paper, and the methods may be provided references for other variable-rate sprinklers.

Key words: fuzzy sets, algorithm, estimation, sprinkler, variable spraying, evaluation index