

# 滴灌三角形迷宫滴头水力性能稳健性分析\*

刘春景<sup>1,2</sup> 唐敦兵<sup>1</sup> 何华<sup>2</sup> 陈兴强<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 蚌埠学院机械与电子工程系, 蚌埠 233030)

**摘要:** 由于滴灌滴头流道曲折复杂, 各种结构参数都不同程度地影响着滴头水力性能, 滴头水力性能分析时, 很难建立显式的解析模型。为此提出基于移动最小二乘响应曲面法建立滴头水力性能可靠性指标对应结构影响参数的灵敏度分析模型。结果表明, 滴头流道流量系数的可靠度对流道长度和流道宽度的均值灵敏性较强, 对流道转角的均值灵敏性较差; 滴头流道流态指数的可靠度对流道宽度和流道转角的均值灵敏性较强, 对流道长度的均值灵敏性较差; 基本变量标准差的增加会降低滴头流道流量系数和流态指数的可靠度。基于移动最小二乘响应曲面滴头水力性能可靠性灵敏度分析结果与通常的定性分析结果一致, 验证了本方法的有效性。

**关键词:** 滴灌滴头 水力性能 可靠性分析 移动最小二乘法 响应曲面法

**中图分类号:** S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0067-06

## Hydraulic Performance Robustness Analysis for Drip Irrigation Triangle Labyrinth Channel of Emitter

Liu Chunjing<sup>1,2</sup> Tang Dunbing<sup>1</sup> He Hua<sup>2</sup> Chen Xingqiang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, College of Bengbu, Bengbu 233030, China)

**Abstract:** Considering the complicated relation of triangle labyrinth channel parameters to hydraulic performance, the explicit analytical model was not figured out. Moving least squares response surface methodology was introduced to build parameter sensitivity model corresponding to reliability of hydraulic performance. The analysis of parameter sensitivity shows that the length and the width of triangle labyrinth channel parameters have great influence on the reliability of flux coefficient. Meanwhile, the width, and the angle of triangle labyrinth channel parameters have great influence on the reliability of flow index. Standard deviation increasing in the parameters of triangle labyrinth channel will reduce the reliability of flux coefficient and flow index. The reliability sensitivity analysis for hydraulic performance demonstrates that the result of presented method is accord with the qualitative analysis. Thus the proposed method is efficient and accurate.

**Key words:** Drip irrigation emitter Hydraulic performance Reliability analysis Moving least squares method Response surface methodology

### 引言

滴头是滴灌系统的重要部件, 其作用是形成水头损失, 压力水流进入滴头内部的狭长流道结构或

微孔后, 经过滴头消能, 以稳定、均匀地低流量滴入土壤<sup>[1-2]</sup>。滴灌滴头水力性能的优劣对滴灌系统灌水的均匀性、抗堵塞能力和系统寿命影响很大。国内外学者对此做了大量研究<sup>[3-7]</sup>。滴灌滴头是否发

收稿日期: 2012-04-08 修回日期: 2012-09-20

\* 国家自然科学基金资助项目(51175262)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08)和安徽省高等学校优秀青年基金资助项目(2010SQRL117)

作者简介: 刘春景, 博士后, 蚌埠学院副教授, 主要从事现代机械设计理论与方法研究, E-mail: liusun7575@163.com

通讯作者: 唐敦兵, 教授, 博士生导师, 主要从事产品创新设计理论与方法和复杂系统建模与优化研究, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn

生堵塞直接取决于堵塞介质在流道内的水力特性,为了理解和分析滴灌滴头的堵塞性能,国内外学者基于 CFD、微观水力学和激光多普勒测速技术等进行了相关研究<sup>[8-14]</sup>。但由于滴头流道曲折复杂,各种结构参数都不同程度地影响着滴头水力性能,且各因素之间存在复杂的相关性和高度非线性<sup>[15]</sup>,因此定量分析滴头水力性能对各影响参数的敏感性时,很难建立显式的解析模型,也难以建立可靠性指标对应影响参数的灵敏度分析模型。

采用响应曲面法(Response surface methodology, RSM)可以拟合滴头流道结构参数与水力性能的关系,基于移动最小二乘(Moving least squares, MLS)响应曲面法进行曲面拟合时,可得到更光滑和精确的拟合曲面。本文利用 Box-Behnken 设计法安排滴头水力性能试验,基于移动最小二乘响应曲面法构建滴头水力性能的极限状态函数,进而对滴头水力性能进行可靠性灵敏度分析,得到迷宫流道关键设计参数对滴灌滴头水力性能的影响程度,找出对滴头水力性能影响较大的因素,在滴头设计制造过程中加以控制以提高灌水质量。

## 1 移动最小二乘响应曲面法

移动最小二乘构建的拟合函数是由基函数和系数矢量构成的,在拟合区域  $\Theta$  上,存在  $\mathbf{x} \in \Theta \subset \mathbf{R}^{n_x}$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{n_x}) \in \mathbf{R}^{n_x}$  为随机变量,设待求函数为  $G(\mathbf{x}) : \mathbf{R}^{n_x} \rightarrow \mathbf{R}$ , 拟合函数可以表示为

$$\hat{G}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N p_i(\mathbf{x}) a_i(\mathbf{x}) = \mathbf{p}(\mathbf{x})^T \mathbf{a}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

式中  $p_i(\mathbf{x})$ ——基函数,  $p_i(\mathbf{x}) : \mathbf{R}^{n_x} \rightarrow \mathbf{R}$

$a_i(\mathbf{x})$ ——系数函数,  $a_i(\mathbf{x}) : \mathbf{R}$

$N$ ——基函数个数

不同阶数的基函数可使拟合函数取得不同的拟合精度,常用的基函数为二次基,所以拟合函数可以写成

$$\begin{cases} \hat{G}(\mathbf{x}) = a_0(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{n_x} a_j(\mathbf{x}) x_j + \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k \geq j}^{n_x} a_{jk}(\mathbf{x}) x_j x_k \\ \mathbf{p}(\mathbf{x}) = (1, x_1, \dots, x_{n_x}, x_1^2, x_1 x_2, x_1 x_3, \dots, x_{n_x}^2)^T \\ N = \frac{n_x(n_x + 3) + 2}{2} \\ \mathbf{a}(\mathbf{x}) = (a_0(\mathbf{x}), a_1(\mathbf{x}), \dots, a_{n_x}(\mathbf{x}), a_{11}(\mathbf{x}), \\ a_{12}(\mathbf{x}), \dots, a_{n_x n_x}(\mathbf{x}))^T \end{cases} \quad (2)$$

系数函数  $\mathbf{a}(\mathbf{x})$  是根据拟合区域内  $N_1$  个采样点  $(x_l; l=1, \dots, N_1, N_1 > N)$  的函数值加权最小二乘来确定的,它使得近似函数  $\hat{G}(\mathbf{x})$  和原函数  $G(\mathbf{x})$  在各

已知点  $\mathbf{x}$  上取值差别的加权平方范数  $J(\mathbf{x})$  最小。

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}) &= \sum_{l=1}^{N_1} w(\mathbf{x}) (\hat{G}(\mathbf{x}_l) - G(\mathbf{x}_l))^2 = \\ &= \sum_{l=1}^{N_1} w(\mathbf{x}) (\mathbf{p}(\mathbf{x}_l)^T \mathbf{a}(\mathbf{x}) - G(\mathbf{x}_l))^2 = \\ &= (\mathbf{P}\mathbf{a}(\mathbf{x}) - \mathbf{G})^T \mathbf{W}(\mathbf{x}) (\mathbf{P}\mathbf{a}(\mathbf{x}) - \mathbf{G}) \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $\mathbf{P} = (\mathbf{p}(\mathbf{x}_1), \dots, \mathbf{p}(\mathbf{x}_{N_1}))$

$\mathbf{G} = (G(\mathbf{x}_1), \dots, G(\mathbf{x}_{N_1}))$

$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = \text{diag}[w(d(\mathbf{x}; \mathbf{x}_1)) \dots w(d(\mathbf{x}; \mathbf{x}_{N_1}))]^T$   
 $w(d(\mathbf{x}; \mathbf{x}_l))$  为权函数,  $d(\mathbf{x}; \mathbf{x}_l) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_l\| / d_{mi} = r$ ,  $d_{mi}$  为节点  $\mathbf{x}_l$  的影响域半径。权函数的选择对移动最小二乘近似的特性有很大的影响,移动最小二乘近似的精度在很大程度上取决于权函数,本文采用样条权函数,即

$$w(r) = \begin{cases} 1 - 6r^2 + 8r^3 - 3r^4 & (0 \leq r \leq 1) \\ 0 & (r > 1) \end{cases} \quad (4)$$

求  $J(\mathbf{x})$  对系数  $\mathbf{a}(\mathbf{x})$  取极小值,即  $\partial J / \partial \mathbf{a} = 0$ , 进而得到系数

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}) = (\mathbf{P}^T \mathbf{W}(\mathbf{x}) \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{W}(\mathbf{x}) \mathbf{G} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)可得到移动最小二乘构建的拟合函数

$$\hat{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{p}(\mathbf{x})^T (\mathbf{P}^T \mathbf{W}(\mathbf{x}) \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{W}(\mathbf{x}) \mathbf{G} \quad (6)$$

## 2 滴灌滴头水力性能试验设计

影响三角形迷宫流道滴头水力性能的因素很多,其中最重要的结构参数为流道长度、宽度、深度、转角和流道单元数,本文研究的三角形迷宫流道结构如图1所示。流道通常都分布在圆弧面上,因此每个单元流道上下边界的深度不一致,本试验上边界深度设定为 0.6 mm,下边界深度设定为 0.8 mm,流道单元数设定为 20 个。本文基于移动最小二乘响应曲面法,通过试验研究三角形流道的流道长度  $w$ 、流道宽度  $d$ 、流道转角  $\theta$  对滴头水力性能的影响。

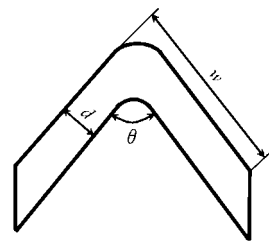


图1 三角形单元流道结构图

Fig. 1 Structure cell of triangle labyrinth channel of emitter

### 2.1 试验方案

试验方案参照国家标准 GB/T 17187—2009《农业灌溉设备 滴头和滴灌管 技术规范 and 试验方法》<sup>[16]</sup> 和文献[15],滴灌滴头压力流量关系试验装置示意图和试验台如图2、3所示。在进口压力为

8 m 压力水头时测量出 5 × 5 个滴头的流量,把滴头按流量由小到大排列,取第 3、12、13、23 号试样进行分析,取 4 个流量的算术平均值作为流量的计算值<sup>[16]</sup>,根据滴头压力-流量关系式  $q = kp^x$  ( $q$  为流量,  $k$  为流量系数,  $p$  为压力,  $x$  为流态指数),按最小二乘法计算  $k$  和  $x$  值。

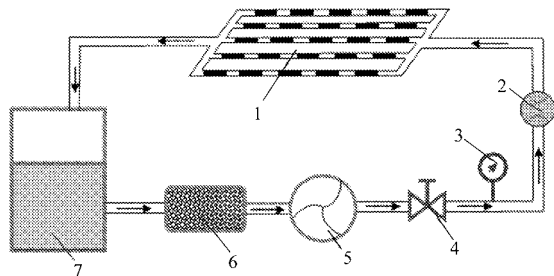


图 2 滴灌滴头压力流量关系试验装置示意图

Fig. 2 Test facility sketch of relation of flow rate and pressure of drip irrigation emitter

- 1. 一体化滴头 2. 流量计 3. 压力表 4. 压力调节阀 5. 泵
- 6. 过滤器 7. 水箱

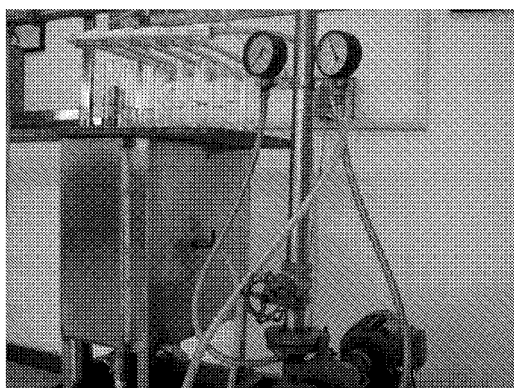


图 3 滴灌滴头压力流量关系试验台

Fig. 3 Test-bed of relation of flow rate and pressure of drip irrigation emitter

选取流道长度  $w$ 、流道宽度  $d$ 、流道转角  $\theta$  等 3 个因素,研究三角形迷宫流道的关键参数对滴灌滴头水力性能的影响,参照文献[15]每个参数选出 3 个水平,采用 Box-Behnken 设计法,以流量系数  $k$ 、流态指数  $x$  为目标值,因素水平见表 1。

表 1 试验因素与水平

Tab. 1 Levels and factors of experiment

水平	因素		
	流道长度 $w/mm$	流道宽度 $d/mm$	流道转角 $\theta/(^\circ)$
-1	0.8	0.4	60
0	1.6	0.9	90
1	2.4	1.4	120

## 2.2 试验结果

按照 Box-Behnken 试验设计的统计学要求,共进行 17 组试验,试验设计和结果如表 2 所示。

表 2 Box-Behnken 试验设计及结果

Tab. 2 Experiment results of Box-Behnken design

序号	试验设计			试验结果	
	$w/mm$	$d/mm$	$\theta/(^\circ)$	$k$	$x$
1	0.8	0.4	90	1.023 5	0.399 3
2	2.4	0.4	90	1.133 2	0.464 8
3	0.8	1.4	90	0.901 6	0.622 2
4	2.4	1.4	90	1.027 1	0.513 5
5	0.8	0.9	60	0.991 2	0.439 3
6	2.4	0.9	60	1.041 3	0.492 3
7	0.8	0.9	120	0.906 1	0.603 8
8	2.4	0.9	120	1.026 7	0.515 6
9	1.6	0.4	60	0.980 7	0.456 2
10	1.6	1.4	60	0.952 3	0.507 7
11	1.6	0.4	120	1.002 2	0.655 1
12	1.6	1.4	120	0.892 3	0.712 1
13	1.6	0.9	90	0.895 3	0.699 6
14	1.6	0.9	90	0.901 1	0.683 6
15	1.6	0.9	90	0.898 6	0.690 5
16	1.6	0.9	90	0.901 4	0.682 9
17	1.6	0.9	90	0.896 2	0.699 2

对表 2 流量系数和流态指数试验结果分别进行方差分析,结果见表 3、4。由表 3 可以看出:流量系数方差模型  $P < 0.000 1$ ,表明流量系数模型差异极显著;复相关系数  $R^2 = 0.999 6$ ,校正决定系数  $Adj R^2 = 0.998 5$ ,表明流量系数模型相关度和可信度较好;模型分辨力精密度 Adeq Precision 为 99.425,模型分辨力大于 4 才可以用于模拟,表明流量系数模型具有足够的信号来响应该设计。由表 4 可以看出:流态指数方差模型  $P < 0.000 1$ ,复相关系数  $R^2 = 0.998 6$ ,校正决定系数  $Adj R^2 = 0.994 5$ ,模型分辨力精密度 Adeq Precision 为 44.224,表明流态指数试验模型是合适有效的。

表 3 流量系数方差分析

Tab. 3 ANOVA for flux coefficient

来源	平方和	自由度	均方差	$F$	$P$
模型	0.082 5	12	0.006 9	895.312 3	<0.000 1
残差	$3.070 0 \times 10^{-5}$	4	$7.680 0 \times 10^{-6}$		
总和	0.082 5	16			

表 4 流态指数方差分析

Tab. 4 ANOVA for flow index

来源	平方和	自由度	均方差	$F$	$P$
模型	0.189 7	12	0.015 8	241.665 6	<0.000 1
残差	0.000 2	4	$6.540 0 \times 10^{-5}$		
总和	0.189 9	16			

利用表 2 试验数据基于移动最小二乘响应曲面法可获得流量系数  $k$  和流态指数  $x$  对流道长度  $w$ 、宽度  $d$ 、转角  $\theta$  的响应面函数

$$k = 0.900 + 0.043w - 0.035d - 9.625 \times 10^{-3}\theta + 3.950 \times 10^{-3}wd + 0.018w\theta - 0.020d\theta + 0.079w^2 + 0.044d^2 + 0.014\theta^2 - 0.022w^2d - 0.015w^2\theta + 0.016wd^2 \quad (7)$$

$$x = 0.690 - 8.800 \times 10^{-3}w + 0.027d + 0.100\theta - 0.044wd - 0.035w\theta + 1.375 \times 10^{-3}d\theta - 0.130w^2 - 0.061d^2 - 0.048\theta^2 + 0.041w^2d - 0.054w^2\theta - 2.000 \times 10^{-3}wd^2 \quad (8)$$

由流量系数和流态指数试验模型绘出的响应曲面图和等高线图如图4~6所示,从图4中可以看出,流道转角是影响流量系数的重要因素,随着流道转角的增加,流量系数有减小的趋势,这是因为流道转角的增大增强了流道内水流的紊流程度;随着流道长度的增加,流量系数先降低后升高。从图5、6可以看出,随着流道宽度的增加,流态指数逐渐上升;随着流道长度的增加,流态指数先是增大,在达到最高值后,随着流道长度的增加而降低;流道转角是影响流态指数的重要因素,流态指数随着流道转角的增加而升高。

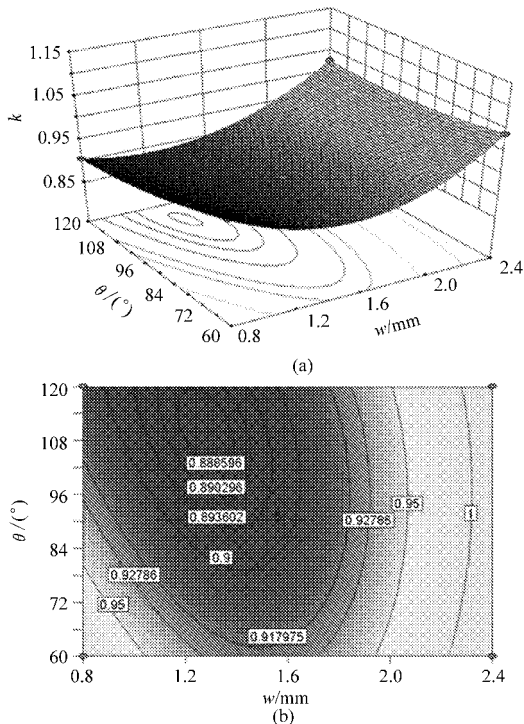


图4 流道长度和流道转角交互影响流量系数图  
Fig.4 Map of flux coefficient considering interaction of channel length and angle  
(a) 响应曲面图 (b) 等高线图

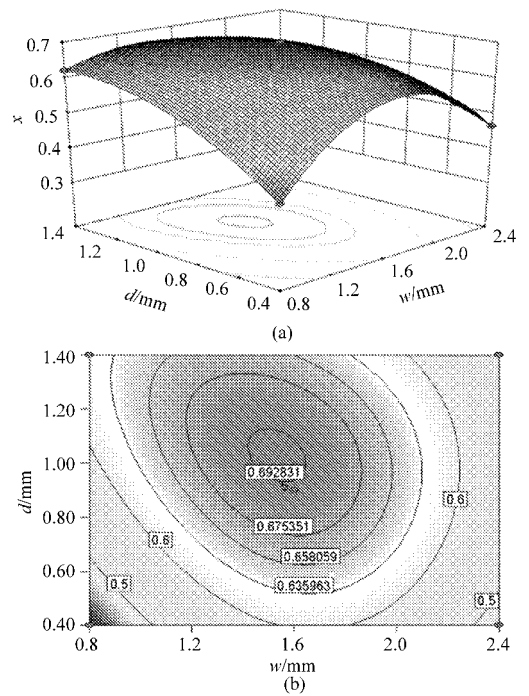


图5 流道长度和流道宽度交互影响流态指数图  
Fig.5 Map of flow index considering interaction of channel length and width

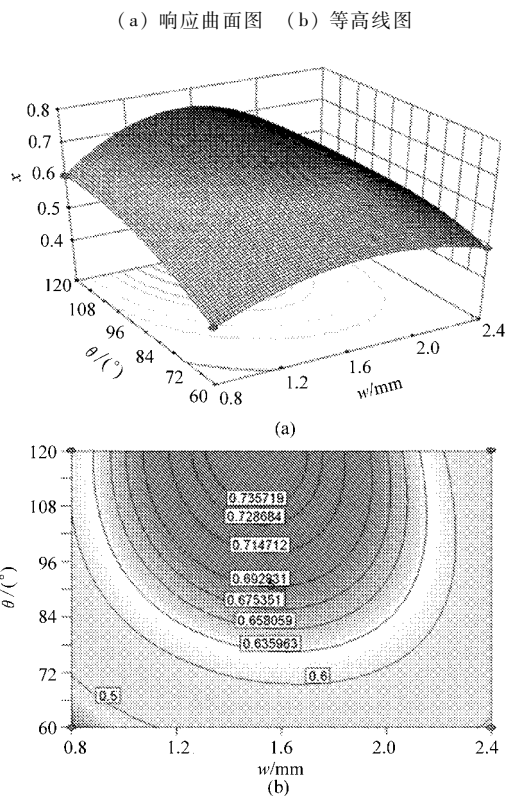


图6 流道长度和流道转角交互影响流态指数图  
Fig.6 Map of flow index considering interaction of channel length and angle  
(a) 响应曲面图 (b) 等高线图

### 3 滴头流道水力性能可靠性灵敏度分析

#### 3.1 可靠性灵敏度

包含正态随机变量  $X_i \sim N(\mu_{X_i}, \sigma_{X_i}) (i = 1, \dots, n)$  的功能函数为  $Z = g_X(\mathbf{X})$ , 其中  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$

为随机变量, 随机变量的均值为  $\boldsymbol{\mu}_X = (\mu_{X_1}, \dots, \mu_{X_n})$ , 标准差为  $\boldsymbol{\sigma}_X = (\sigma_{X_1}, \dots, \sigma_{X_n})$ 。设  $\boldsymbol{\delta}^* = (\delta_1^*, \dots, \delta_n^*)$  为极限状态面上的一点, 满足  $g_X(\boldsymbol{\delta}^*) = 0$ ,

将功能函数在  $\delta^*$  点进行泰勒级数展开, 取线性部分可得

$$Z_L = g_X(\delta^*) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} (X_i - \delta_i^*) \quad (9)$$

在随机变量  $\mathbf{X}$  空间,  $Z_L = 0$  为过点  $\delta^*$  的极限状态面的切平面<sup>[17]</sup>, 所以

$$\mu_{Z_L} = g_X(\delta^*) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} (\mu_{X_i} - \delta_i^*) \quad (10)$$

$$\sigma_{Z_L} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i}^2} \quad (11)$$

根据可靠度定义可得

$$\varepsilon_{\mu_i} = - \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}}{\sqrt{2\pi} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i}^2} \exp \left( - \frac{1}{2} \left( \frac{g_X(\delta^*) - \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} \delta_i^* + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} \mu_{X_i}}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i}^2} \right)^2 \right) \quad (13)$$

标准差灵敏度  $\varepsilon_{\sigma_i}$  为

$$\varepsilon_{\sigma_i} = - \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i} \left[ g_X(\delta^*) - \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} \delta_i^* + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} \mu_{X_i} \right]}{\sqrt{2\pi} \left( \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i}^2 \right)^{3/2}} \exp \left( - \frac{1}{2} \left( \frac{g_X(\delta^*) - \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} \delta_i^* + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} \mu_{X_i}}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i}^2} \right)^2 \right) \quad (14)$$

### 3.2 流量系数和流态指数稳健性分析

把基于移动最小二乘响应曲面法获得的流量系数和流态指数的响应面函数转换为相应的计算可靠性灵敏度的功能函数, 变量的均值和标准差采用表 1 中对应数据, 由式 (13) 求得流道长度、宽度和转角等变量均值灵敏度分别为  $\varepsilon_{\mu_i}^k = (5.684 \times 10^{-2}, -3.588 \times 10^{-2}, -6.453 \times 10^{-5})$ ,  $\varepsilon_{\mu_i}^x = (-3.778 \times 10^{-7}, 5.223 \times 10^{-4}, 2.545 \times 10^{-3})$ ; 由式 (14) 可求得流道长度、宽度和转角等变量标准差的灵敏度为  $\varepsilon_{\sigma_i}^k = (-6.256 \times 10^{-2}, -4.681 \times 10^{-3}, -8.987 \times 10^{-7})$ ,  $\varepsilon_{\sigma_i}^x = (-4.656 \times 10^{-8}, -7.677 \times 10^{-4}, -3.651 \times 10^{-3})$ 。

由分析结果可以看出, 滴头流道流量系数的可靠度对流道长度和流道宽度的均值灵敏性较强, 对流道转角的均值灵敏性较差; 流量系数的可靠性随着流道长度增大而提高, 随着流道宽度和转角增大而降低。从流量系数变量标准差的可靠性灵敏度可以看出, 所有变量标准差的可靠性灵敏度都为负, 流量系数的可靠性将随着变量标准差的增加而降低。滴头流道流态指数的可靠度对流道宽度和流道转角的均值灵敏性较强, 对流道长度的均值灵敏性较差;

$$\beta = \frac{\mu_{Z_L}}{\sigma_{Z_L}} = \frac{g_X(\delta^*) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*} (\mu_{X_i} - \delta_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\delta^*}^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (12)$$

为了确定三角形流道结构参数变异对滴灌滴头系统水力性能可靠性的影响程度, 需要进行可靠性灵敏度分析。可靠性灵敏度为基本随机变量分布参数的变化引起失效概率变化的比率, 可靠性灵敏度分为均值灵敏度和标准差灵敏度, 均值灵敏度揭示了随机变量均值大小对可靠性的影响程度, 标准差灵敏度反映了随机变量波动性对可靠性的影响程度。

均值灵敏度  $\varepsilon_{\mu_i}$  为

流态指数的可靠性随着流道宽度和流道转角的增大而提高, 随着流道长度增大而降低。从流态指数变量标准差的可靠性灵敏度可以看出, 所有变量标准差的可靠性灵敏度都为负, 流态指数的可靠性将随着变量标准差的增加而降低。

由上述对流量系数和流态指数可靠性灵敏度分析可知, 迷宫流道关键设计参数对滴灌滴头水力性能的影响程度, 找出对滴头水力性能影响较大的因素, 在滴头设计制造过程中加以控制可提高灌水质量。滴头水力性能可靠性灵敏度分析以概率论和数理统计为基础<sup>[18]</sup>, 把迷宫流道设计中的关键变量看作随机变量, 考虑了随机因素对滴头水力性能的影响, 与常规的安全系数法相比, 可以对可靠性灵敏度高的流道参数在设计中加以精确控制, 具有一定的工程应用价值。

基于响应曲面法滴头水力性能可靠性灵敏度分析结果与通常的定性分析结果一致<sup>[4]</sup>, 验证了本方法的有效性。

## 4 结论

(1) 滴头流道流量系数的可靠度对流道长度和

流道宽度的均值灵敏性较强,对流道转角的均值灵敏性较差;流量系数的可靠性随着流道长度增大而提高,随着流道宽度和转角增大而降低。

(2) 滴头流道流态指数的可靠度对流道宽度和流道转角的均值灵敏性较强,对流道长度的均值灵敏性较差;流态指数的可靠性随着流道宽度和流道转角的增大而提高,随着流道长度增大而降低。

(3) 滴头流道基本变量标准差的增加会降低滴头流道流量系数和流态指数的可靠度。

(4) 基于移动最小二乘响应曲面法构建滴头水力性能的极限状态函数,进而对滴头水力性能进行可靠性灵敏度分析,可以对可靠性灵敏度高的流道参数在设计中加以精确控制,从而提高滴头水力性能的稳健性。

#### 参 考 文 献

- Li Y K, Yang P L, Xu T W, et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 427 ~ 438.
- 李云开,杨培岭,任树梅,等.滴灌水器迷宫式流道内部流体流动特性分析与试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(7): 886 ~ 890.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Experimental study on flow characteristics in labyrinth path emitters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(7): 886 ~ 890. (in Chinese)
- Palau S G, Arviza V G, Bralts V F. Hydraulic flow behavior through an in-Line emitter labyrinth using CFD techniques [C] // ASAE/CSAE Meeting, Canada, 2004: 1 ~ 8.
- 张俊,洪军,赵万华,等.基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(1): 31 ~ 35.  
Zhang Jun, Hong Jun, Zhao Wanhua, et al. Parameterized design of labyrinth-channel emitters based on orthogonal experiments [J]. *Journal of Xian Jiaotong University*, 2006, 40(1): 31 ~ 35. (in Chinese)
- Wei Q, Shi Y, Dong W, et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1~2): 130 ~ 136.
- Li Y, Yang P, Xu T, et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 427 ~ 438.
- Zhang J, Zhao W, Wei Z, 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.
- Liu H, Huang G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(5): 745 ~ 756.
- 牛文全,吴普特,喻黎明.基于含沙量等值线的迷宫流道结构抗堵塞设计与模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 14 ~ 20.  
Niu Wenquan, Wu Pute, Yu Liming. Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5): 14 ~ 20. (in Chinese)
- Zhang J, Zhao W H, Tang Y P, et al. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channels[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 59 ~ 65.
- 葛令行,魏正英,曹蒙,等.微小迷宫流道中的沙粒沉积规律[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 20 ~ 24.  
Ge Lingxing, Wei Zhengying, Cao Meng, et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 20 ~ 24. (in Chinese)
- Puig-Bargués J, Arbat G, Elbana M, et al. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(6): 883 ~ 891.
- Capra A, Scicolone B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 68(2): 135 ~ 149.
- 牛文全,刘璐.浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 39 ~ 45.  
Niu Wenquan, Liu Lu. Influences of sediment concentration and water temperature of muddy water on emitter clogging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 39 ~ 45. (in Chinese)
- 刘春景,唐敦兵,郑加强,等.滴灌梯形迷宫滴头流道水力性能的响应曲面法优化[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 46 ~ 51.  
Liu Chunjing, Tang Dunbing, Zheng Jiaqiang, et al. Optimization of hydraulic performance for drip irrigation trapezoidal labyrinth channel of emitter using response surface methodology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 46 ~ 51. (in Chinese)
- GB/T 17187—2009 农业灌溉设备 滴头和滴灌管 技术规范 and 试验方法[S].
- 张明.结构可靠度分析——方法与程序[M].北京:科学出版社,2009.
- 赵洁.机械可靠性分析的响应面法研究[D].西安:西北工业大学,2006.