

# 迷宫流道结构参数对水力性能影响的模拟研究

王子凯 (新疆农牧区水利规划总站, 新疆乌鲁木齐 830000)

**摘要** 利用 CFD 数值模拟方法代替传统水力性能试验对不同结构参数尺寸的齿形迷宫滴头流道内流场进行模拟计算, 充分发挥其快速、低成本的优势, 选取流量系数、流态指数和水头损失系数 3 个指标来分析齿形迷宫滴头流道结构参数对滴头工作性能影响的规律。结果表明, 齿角度  $\alpha$  对流量系数的影响最大, 其次是偏差量  $J$ , 齿高  $h$  对其影响最小; 齿角度  $\alpha$  对流态指数的影响最大, 其次是偏差量  $J$ , 齿高  $h$  对其影响最小。

**关键词** 结构参数; CFD; 水力性能

中图分类号 S275 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2015)19-368-03

## The Simulation Study of the Structural Parameters in the Flow Labyrinth Channel

WANG Zi-kai (Water Conservancy Planning Terminus of Xinjiang Agricultural and Pastoral Areas, Urumqi, Xinjiang 830000)

**Abstract** The article uses CFD simulation instead of tradition hydraulic experiment to study different parameter structural parameters in the flow labyrinth channel. By fully using its advantage of fast and low-cost, the simulation picks  $k$ ,  $x$  and to analyze the performance of the labyrinth channel, discuss the emitter head loss influenced by its structure parameters. The results indicated that the angle  $\alpha$  affects the flow coefficient most, followed by the  $J$ , the  $h$  is the least. The pressure loss on the length of the entire labyrinth channel meets linear reducing law, the  $\alpha$  and  $J$  affects the head loss coefficient most.

**Key words** Structural parameters; CFD simulation; Hydraulic performance

迷宫流道有很多类型, 包括梯形、齿形、矩形、弧形等其他形状, 其结构参数对灌水器滴头的水力性能影响很大, 影响着流道的流量、流量系数和流态指数, 大量专家学者为了研究出水力性能更好的灌水器, 在灌水器结构参数对水力性能影响方面进行了大量的研究。姚彬等<sup>[1]</sup>初步研究了流道长度对内镶贴片式滴头流量及其他参数的影响。魏正英<sup>[2]</sup>提取流道宽度及单元数作为梯形迷宫流道结构控制参数, 利用 FLUENT 软件对流道内水流流动进行数值模拟。王芳<sup>[3]</sup>借助 FEMLAB 软件, 对迷宫滴头进行三维的流道参数建模, 在迷宫流道流态分析、压力流量关系、结构分析等方面进行了分析。王建东<sup>[4]</sup>对不同结构形式和相同结构形式不同结构尺寸的齿形迷宫流道结构参数对灌水器水力性能、抗堵性能影响进行了试验研究。喻黎明<sup>[5]</sup>提取了齿形、梯形和矩形迷宫流道的 5 个关键参数, 采用正交试验的方法分析了 5 个参数对灌水器水力性能影响的重要程度。刘淑萍等<sup>[6]</sup>研究了流道的水力特性。谢巧丽<sup>[7]</sup>研究了迷宫流道齿转角与齿间距对滴头性能的影响。

上述研究采取了多种方法研究了多种形式的迷宫流道的水力性能受其结构参数的影响, 对灌水器的结构设计和优化提供了理论基础。该文以齿形迷宫流道结构作为研究对象, 提取出控制迷宫流道形式的 3 个要素, 对流道水力性能采用 CFD 数值模拟的方法进行了研究, 研究了齿高、齿角度和偏差量对滴头水力性能的影响。

## 1 数值模拟

**1.1 参数化设计** 选取齿高  $h$ 、齿角度、偏差量  $J$  作为三角形迷宫流道结构控制的 3 个要素, 流道宽度  $w = (h + J) \times \cos\alpha$ , 齿形水平长度  $L = 2N \times h \times \cos\alpha$ ,  $N$  为流道单元数, 滴头流道结构标记为  $D(h, \alpha, J)$ 。在 AutoCAD2010<sup>1</sup> 中完成滴头

几何模型的构建, 该模型如图 1 所示。

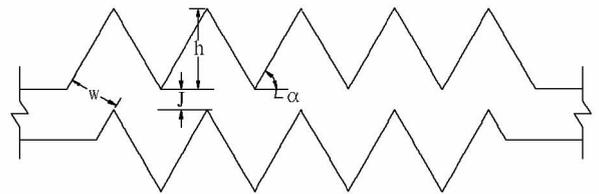


图 1 滴头流道结构

固定流道深度为 1.0 mm, 流道单元数为 8 个, 两端设计有一小段直管段, 使水流能够充分发展。根据常见灌水器的结构尺寸范围, 结构参数见表 1, 各因素水平进行正交试验, 共有 25 种灌水器结构形式。

表 1 灌水器流道结构参数

h 齿高 // mm	$\alpha$ 齿角度 // °	J 偏差量 // mm
0.8	60	-0.2
1.0	65	-0.1
1.2	70	0
1.5	75	0.1
1.8	80	0.2

**1.2 模拟方案** 将三维的 CAD 模型导入到 Gambit2. 2. 30 中, 通过 Gambit 对不同结构形式的灌水器进行流道网格划分。在工程实践中, 粘性底层对紊流沿程阻力规律的研究意义重大, 同时, 由于迷宫流道尺寸很小, 故边界层对迷宫内流速区的影响是不能忽略的, 故本模拟试验对边界层进行了加密, 第 1 层为 0.01 mm, 其他各层按 1.5 比例递增, 共有 6 层。灌水器内部流道的网格划分采用了基本尺寸为 0.1 mm 的非结构化网格, 网格总数在  $(0.6 - 3) \times 10^4$  之间。

应用 CFD 有限体积法进行数值模拟, 将灌水器内部的水流运动视为粘性不可压缩流体运动, 其运动规律符合质量守恒和动量守恒定律, 基本控制方程由连续性方程和 Navier-Stokes 方程等构成。应用 Fluent 软件对流道内水流流动进

作者简介 王子凯(1989 - ), 男, 山东济宁人, 助理工程师, 硕士, 从事节水灌溉理论与技术研究。

收稿日期 2015-05-11

行数值模拟时,对于每种结构的滴头,流道进出口均设为压力条件。进口压力水头在1~5 m时,每间隔1 m选1个压力水平;在6~10 m时,每间隔2 m选1个压力水平。进口有8个压力水平,出口压力均设为大气压。采用有限体积法离散控制方程,对流项为一阶迎风格式,应用SIMPLE算法对控制方程进行求解。试验采用通用的高精度、计量小的标准壁面函数法对灌水器的流道壁面进行处理。数值计算采用了定常的非耦合隐式算法,压力项等采用二阶迎风格式,参差标准设置为 $1 \times 10^{-4}$ 。

## 2 流量系数和流态指数与特征参数关系分析

由数值模拟得到流道出口流量,根据压力和流量的对应关系对8个不同压力下的灌水器流量进行曲线拟合,可得到公式中的流量指数和流态指数。计算8个压力下的平均流量,以平均流量作为参数来衡量迷宫流道结构灌水器的动

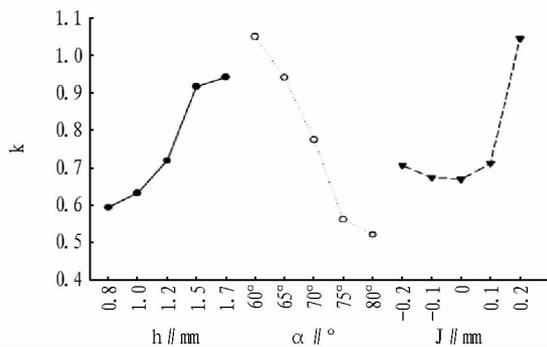


图2 流量系数、流态指数随结构参数的变化

由图2可知,齿角度 $\alpha$ 对流量系数的影响最大,其次是偏差量J,齿高h对其影响最小;齿角度 $\alpha$ 对流态指数的影响最大,其次是偏差量J,齿高h对其影响最小。

流量系数是衡量流道内过水能力的一个重要指标,由图2分析可知,流量系数随着齿高的增大而增大;随着齿角度的增大而减小,在60°至75°的区间内减小明显,由75°至80°变化时趋势变缓;随着偏差量的变化呈现出先减小再增大的趋势,在偏差量为-0.2 mm到0时变小,在0到0.2 mm时变大。通过对流量系数随结构参数变化的分析可知,流道的过水能力受结构参数变化影响较大,之所以会出现这种变化需要和流道模拟出的主航道结合起来进行分析。

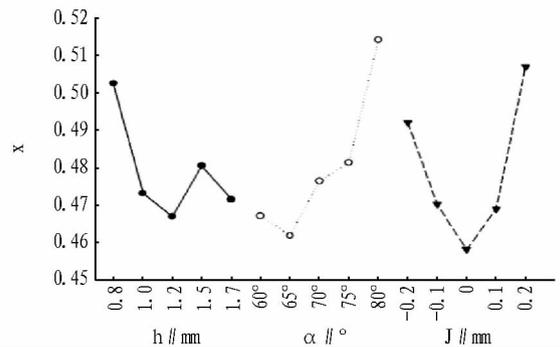
随着齿高的增大,流态指数变化较大,齿高由0.8 mm增大为1.2 mm时,流态指数减小,齿高由1.2 mm增大到1.5 mm时,流态指数增大,齿高由1.5 mm增大到1.7 mm时,流态指数减小,流态指数在齿高为1.2 mm处取得最小值;当齿角度由60°增大到65°时,流态指数减小,当齿角度由65°增大到80°时,流态指数增大,流态指数在 $\alpha$ 为65°时取得最小值;当偏差量由-0.2 mm变化为0 mm时,流态指数减小,当偏差量由0 mm增大到0.2 mm时,流态指数增大,流态指数在偏差量为0 mm时取得最小值。根据以上分析可知,当齿高为1.2 mm,齿角度为65°,偏差量为0 mm时,迷宫流道的水力性能最优。

由于极差分析法本身只提供整个系统的整体情形,不具

量、质量以及流量的大小。使用CFD数值模拟软件对表1所示的25种滴头进行了模拟计算,得到每种滴头对应的 $k$ 、 $x$ 值。

**2.1 极差分析** 极差分析法能够确定同一因素的不同水平对试验指标的影响,具体做法是算出各因素在不同水平下试验结果的最大值和最小值之差,反映此因素对结果的影响程度。按照此方法的原则,某列的极差最大,表明该列的数值在试验范围内变化时,使试验指标数值的变化最大,反之,影响就越小。

流量系数 $k$ 反应灌水器流量的变动情况,流态指数 $x$ 反应灌水器的流量对压力的敏感程度,通过分析不同形式的迷宫流道结构流量系数 $k$ 以及流态指数 $x$ ,可以得到灌水器滴头水力性能受结构参数变化的影响。以 $k$ 和 $x$ 为试验指标,对正交试验进行直观分析,结果见图2。



备异变分解成重复性和再现性,因此不能仅以此来判断各结构因素对 $x$ 、 $k$ 的影响程度是否显著,需要结合方差分析来进行判断。

**2.2 方差分析** 如果按照显著水平 $\alpha=0.05$ 检验,齿高、齿角度、偏差量对流态指数均无显著影响;如按显著水平 $\alpha=0.10$ 检验,齿角度和偏差量对流态指数有显著影响,如表2所示。

表2 流道结构参数对流态指数影响的方差分析

来源	类型Ⅲ的平方和	自由度	均方	F	P
Corrected Model	0.020(a)	12	0.002	2.340	0.078
Intercept	5.756	1	5.756	8 170.355	0.000
齿高 H	0.004	4	0.001	1.316	0.319
齿角度 A	0.009	4	0.002	3.044	0.060
偏差量 J	0.007	4	0.002	2.661	0.085
Error	0.008	12	0.001		
Total	5.784	25			
Corrected Total	0.028	24			

注:a表示 $R^2=0.701$ ;调整后 $R^2=0.401$ 。

按照 $\alpha=0.05$ 的显著水平进行检验,齿高、齿角度和偏差量对流量指数影响显著,如表3所示。

由方差分析结果来看,对流态指数影响关系最大的因素依次是齿角度 $\alpha$ 、偏差量J,齿高h对流态指数影响不显著,这与极差分析的结果是一致的,证明了极差分析的结果。

表3 流道结构参数对流量系数影响的方差分析

来源	类型Ⅲ的平方和	自由度	均方	F	P
Corrected Model	2.024 (a)	12	0.169	16.876	0.000
Intercept	14.486	1	14.486	1449.343	0.000
齿高 H	0.517	4	0.129	12.925	0.000
齿角度 A	0.997	4	0.249	24.933	0.000
偏差量 J	0.511	4	0.128	12.770	0.000
Error	0.120	12	0.010		
Total	16.630	25			
Corrected Total	2.144	24			

注:a表示 $R^2=0.944$ (调整后 $R^2=0.888$ )。

**2.3 回归分析** 从试验结果和进行的极差、方差分析可以看出,不同的结构参数对迷宫灌水器的 $x$ 和 $k$ 影响的差异较大,假设 $k$ 和 $x$ 与3个结构参数呈多元线性关系,其表达式为:

$$k = d_0 + a_0h + b_0\alpha + c_0J \quad (1)$$

$$x = d_1 + a_1h + b_1\alpha + c_1J \quad (2)$$

式中: $a_i, b_i, c_i, d_i (i=0,1)$ 为回归系数,对试验得数据进行多元线性回归分析,得

表4 流量系数回归模型的系数和t检验

模式	原始系数		标准系数		t	P
	$\beta$	标准误差	$\beta$			
1	2.175	0.302			7.201	0.000
齿高 H	0.432	0.087	0.481		4.972	0.000
齿角度 A	-0.028	0.004	-0.673		-6.946	0.000
偏差量 J	0.714	0.201	0.345		3.563	0.002

注:相关系数为0.896。

得到流量系数 $k$ 的回归公式:

$$k = 2.175 + 0.432h - 0.028\alpha + 0.714J \quad (3)$$

对试验数据进行多元线性回归分析,得

得到流态指数 $x$ 的回归公式:

$$x = 0.349 - 0.023h + 0.002\alpha + 0.026J \quad (4)$$

表5 流态指数回归模型的系数和t检验

模式	原始系数		标准系数		F	P
	$\beta$	标准误差	$\beta$			
1	0.349	0.066			5.319	0.000
齿高 H	-0.023	0.019	-0.228		-1.243	0.227
齿角度 A	0.002	0.001	0.481		2.626	0.016
偏差量 J	0.026	0.044	0.109		0.593	0.560

注:相关系数为0.887。

### 3 结论

提取齿高 $h$ 、齿角度 $\alpha$ 、偏差量 $J$ 作为三角形迷宫流道结构控制的3个特征参数,利用CFD数值模拟进行了3因素5水平的正交试验,分析特征参数变化对灌水器水力性能造成的影响,通过极方差分析和回归分析,得到了以下结论:

(1)极差分析结果显示,齿角度 $\alpha$ 对流量系数的影响最大,其次是偏差量 $J$ ,齿高 $h$ 对其影响最小;齿角度 $\alpha$ 对流态指数的影响最大,其次是偏差量 $J$ ,齿高 $h$ 对其影响最小。当 $h$ 为1mm, $\alpha$ 为 $65^\circ$ , $J$ 为0时,灌水器的水力性能最优。

(2)方差分析结果与极差分析结果一致,回归分析出 $k$ 和 $x$ 与3个参数之间的公式,其中 $k = 2.175 + 0.432h - 0.028\alpha + 0.714J$ , $x = 0.349 - 0.023h + 0.002\alpha + 0.026J$ 。

### 参考文献

- [1] 姚彬,刘志烽,张建萍.流道长度对内镶贴片式滴头性能参数影响的初步研究[J].节水灌溉,2003(5):38-39.
- [2] 魏正英,唐一平,赵万华,等.滴灌灌水器迷宫流道结构与水力性能实验研究[J].农业机械学报,2005(12):51-55.
- [3] 王芳.滴灌灌水器迷宫流道结构数值模拟与优化设计[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [4] 王建东.滴头水力性能与抗堵塞性能试验研究[D].北京:中国农业大学,2004.
- [5] 喻黎明.灌水器流道结构参数与水力性能关系[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2011(1):30-35.
- [6] 刘淑萍,吕宏兴,王文娥,等.低压微管圆弧形迷宫流道水力特性研究[J].节水灌溉,2011(2):15-18,23.
- [7] 谢巧丽,牛文全,李连忠.迷宫流道齿转角与齿间距对滴头性能的影响[J].排灌机械工程学报,2013(5):449-455.
- [8] 宋爱国,栗加顺.平板式与真空管式太阳能热水器热性能分析比较[J].太阳能,2000(4):23.
- [9] 李勇,胡明辅.平板型与真空管型太阳能热水器发展状况分析[J].应用能源技术,2007(11):36-39.
- [10] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar engineering of thermal process[M]. New York: John W S, 1980:171-281.
- [11] 何涛,贾铁鹰,徐志斌,等. GB/T 4271-2007, 太阳能集热器热性能试验方法[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [12] 唐干喻.高温型平板太阳能集热器的实验研究[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [13] 肉孜·阿木提,高泽斌,李峰.不同结构平板型太阳能空气集热板集热效率研究[J].新疆农业大学学报,2009,32(3):78-81.

(上接第367页)

生产应用中仍具有重要意义。

### 参考文献