文章编号:1672-3317(2019)04-0071-06

齿型迷宫流道灌水器水力性能数值模拟研究

杨彬1,3,张赓2,王建东3*,龚时宏1,王海涛1,莫彦1

(1.中国水利水电科学研究院水利研究所,北京100048;2.全国农业技术推广服务中心,北京100125;3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京100081)

摘 要:【目的】定量探究流道结构参数与灌水器水力性能之间的互馈关系。【方法】研究齿角度(a)、齿底距(b)、齿高 度(c)和流道深度(d)4个关键因素,选用L₁₈(3⁷)正交试验设计方案,通过室内测试与数值模拟,定量分析了流道结 构参数对其水力性能的影响。【结果】采用四面体含边界层网格或混合多面体网格的模拟精度最高,采用标准k-ε计 算模型,流量偏差率可控制在6.00%的误差范围内,可推荐作为齿型流道结构灌水器数值模拟时的参考设置模式; 按显著性水平α=0.1检验,流道深度和齿高度对流态指数存在显著影响;此外,研究构建了流态指数与齿型灌水器 关键结构参数之间的定量多元线性回归方程为;X=4.67×10⁴α-0.005 4b-0.016 1c+0.041 7d+0.442 2,流量系数的回归 方程为:K=0.211 1a+2.822 4b+1.796 5c+8.247 8d-11.584 9。【结论】齿型流道结构滴头的网格划分宜采用四面体含边 界层网格或混合多面体网格型式,且流态指数和流量系数与齿型灌水器关键结构参数之间的关系可以通过多元线 性回归方程表示。

关键词:齿型灌水器;结构参数;数值模拟;水力性能
中图分类号:S275.6
文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180497

杨彬,张赓,王建东,等.齿型迷宫流道灌水器水力性能数值模拟研究[J].灌溉排水学报,2018,38(4):71-76.

0 引 言

灌水器作为滴灌系统的关键部件之一,其工作性能的好坏直接影响整个滴灌系统灌水质量的高低。针对齿型灌水器设计机理的研究,国内外学者已经做了大量工作,主要以试验、理论分析与数值模拟等手段研究其内部结构尺寸对消能机理、抗堵塞性能和水力性能的影响^[1-2],相关研究对灌水器的优化设计具有一定的参考价值。金龙等^[3]在对双内齿矩形迷宫流道灌水器水力特性分析中提出,采用Hex/Submap六面体网格单元所得计算结果误差较小;喻黎明^[4]在对迷宫流道结构参数与水力性能关系的研究中,采用混合多面体进行网格划分;Zhang等^[5]运用数值模拟技术对迷宫流道水力特性的研究中,在近壁区采用非均匀的结构网格,而主流区域采用结构化的六面体网格进行划分。潘雅阁等^[6]研究发现,流道宽度、流道单元数、流道深度及齿高对灌水器流量达到显著影响,齿尖角和流道单元数对流态指数达到了显著影响;Ahmed等^[7]在对迷宫流道水力特性的回归分析中得出,流道单元数N和流道高度H对灌水器的水力特性达到显著影响水平;张丽娟等^[8]采用正交试验,借助CFD数值模拟技术,发现在流道长度、流道深度一定的情况下,对流态指数影响显著程度从大到小依次为齿底距、齿高、齿宽。

综上所述,国内外学者在齿型迷宫流道灌水器的水力性能方面做了大量的试验研究,并以灌水器流量、 流量系数、流态指数作为评价其性能优劣的重要指标^[9-10]。然而各学者在迷宫流道灌水器关键尺寸的确定中 存在一定分歧,试验因素也各不相同,因素显著性分析结果也不尽相同;且在运用CFD数值模拟技术中,网 格划分方式、最大尺寸的确定以及计算求解模型的设定也存在差异^[11-12]。基于试验实测值与数值模拟值的 对比,优化确定数值模拟过程中高精度网格的划分形式与数值计算模型;同时基于正交试验方案,模拟分析 齿型流道结构参数对灌水器水力性能的影响,并建立数学回归模型,相关研究结论对齿型灌水器的研发和 生产具有一定的借鉴意义。

收稿日期:2018-09-13

基金项目:国家科技支撑计划课题(2014BAD12B06);国家重点研发计划课题(2016YFC0400105);中国农业科学院科技创新工程(2018-2020) 作者简介:杨彬(1993-),男。硕士研究生,主要从事节水灌溉装备研发。E-mail: yang_bin13@163.com

通信作者:王建东(1978-),男。研究员,主要从事农业节水灌溉原理与技术研究及节水灌溉装备研发。E-mail: wangjiandong@caas.cn

1 材料与方法

1.1 物理模型及其参数

迷宫式流道灌水器结构如图1所示,其结构参数包括齿角度a、流道宽度w、齿间距e、齿高度c、齿底距 b、齿宽f、流道深度d、流道长度L、齿间参差量g;在齿间参差量为0的情况下,齿间距可由齿底距、齿高度、齿 角度确定;齿宽可由齿高度、齿角度确定;流道宽度可由齿高度、齿角度、齿底距确定;通过分析可知,在流道 结构参数中,当流道长度、齿间参差量一定的情况下,齿底距、齿高度、齿角度、流道深度成为影响灌水器结 构的关键因素,灌水器的物理模型通过此参数可唯一确定。



图1迷宫式流道灌水器结构图

1.2 试验设计

本研究固定流道长度 $L=20.2 \text{ mm}^{[13]}$,齿间参差量 $g=0^{[14]}$ 。通过正交试验设计,设置齿-底距、齿高度、齿角度、流道深度的4因素3水一 平的数值模拟试验,在不考虑4因素之间交 互作用的前提下,选取 $L_{18}(3^7)$ 正交试验设计一

表1试验因素水平表								
因素水平	齿角度a/(°)	齿底距 b/mm	齿高度 c/mm	流道深度 d/mm				
1	34	0.7	0.9	0.6				
2	38	0.9	1.1	0.7				
3	42	1.1	1.3	0.9				
					ľ			

表,试验因素水平设计及正交试验方案如表1与表2所示。

表2正交试验方案及模拟结果

计孤士安		流道结	法大比粉	法具比粉		
试验力杀 —	a/(°)	<i>b</i> /mm	c/mm	<i>d</i> /mm	- 沉念指奴	沉里指奴
1	34	0.7	0.9	0.6	0.463 3	3.790 3
2	34	0.9	1.1	0.7	0.465 1	5.891 3
3	34	1.1	1.3	0.9	0.470 8	9.768 5
4	38	0.7	0.9	0.7	0.468 1	4.994 4
5	38	0.9	1.1	0.9	0.472 8	8.345 8
6	38	1.1	1.3	0.6	0.454 4	6.325 2
7	42	0.7	1.1	0.6	0.470 8	9.768 2
8	42	0.9	1.3	0.7	0.461 0	7.227 6
9	42	1.1	0.9	0.9	0.483 4	9.949 9
10	34	0.7	1.3	0.9	0.472 9	7.427 9
11	34	0.9	0.9	0.6	0.464 2	4.566 8
12	34	1.1	1.1	0.7	0.463 1	6.727 4
13	38	0.7	1.1	0.9	0.471 9	7.094 5
14	38	0.9	1.3	0.6	0.461 6	5.730 8
15	38	1.1	0.9	0.7	0.473 3	7.054 3
16	42	0.7	1.3	0.7	0.470 2	6.507 5
17	42	0.9	0.9	0.9	0.477 2	8.320 2
18	42	1.1	1.1	0.6	0.459 2	6.531 2

1.3 数值模拟方法

1.3.1 网格划分

在数值模拟中,网格划分质量的好坏直接影响计算结果的准确性。为了探索高精度的网格类型,分别 采用四面体且无边界层网格、四面体且含边界层网格、六面体网格与混合多面体网格对一种常见的迷宫流 道灌水器(北京艾特富节水科技有限公司,流量规格为1.05 L/h,灌水器的结构参数如表3所示)进行划分,统 一设置全局网格尺寸为0.1 mm;由于灌水器结构尺寸较小,采用非结构网格进行划分并与实测结果对比。 其中边界层设置第1层为0.01 mm,其他各层按1.5等比递增,共有6层,边界层总厚度约0.2078 mm,占流 道的15%~67%在合理的取值范围内。

1.3.2 Fluent设置

数值模拟的基本控制方程包括连续方程和Navier-Stokes方程,Fluent数值计算采用有限体积法离散控制方程,速度与压力的耦合采用Simple算法,对流项采用二阶迎风格式进行求解,计算精度设置为0.001。 Fluent操作环境设置为一个标准大气压,温度为20℃。模型进口设置为压力进口,范围是0.04~0.12 MPa, 梯度为0.01 MPa,与试验测试压力相对应;出口为压力出口,设置为自由出流。其中湍流模型分别选取标准 *k*-ε模型、RNG *k*-ε模型、Realizable *k*-ε模型,研究将基于模拟值与实测值对比,筛选精度较高的计算模型。

表 3	灌	水	罢	结	构	参	影
125	112	14 °	00	~		· //	- 90

因素水平	齿角度a/(°)	宽度 w/mm	齿间距 e/mm	齿高度 c/mm	深度 d/mm	齿底距 b/mm	长度L/mm	齿间参差量g/mm
1	30	0.55	1.15	0.9	0.6	0.788	20.2	0
注 流道长度指迷宫流道入口至出口的水平直线距离。								

2 结果与分析

2.1 网格划分与湍流模型的确定

本研究首先对迷宫流道灌水器室内实测结果的水力性能曲线(Q-H曲线)与不同网格划分型式获得的 模拟值进行对比,筛选出模拟精度较高的网格划分方式,如图2(a)所示。从图2可看出,对于不同的网格划 分型式,模拟结果表现出一定的差异性。在4种网格划分中,六面体网格的模拟精度最低,与实测结果的差 异较大;而四面体含边界层、混合多面体网格的模拟精度较高,在0.04~0.12 MPa的模拟压力范围内,模拟值 与实测值的流量偏差率可控制在6%的误差范围内。

采用四面体含边界层网格对锯齿型迷宫流道进行网格划分,并使用标准k-ε模型、RNG k-ε模型与Realizable k-ε模型分别对计算域进行求解,结果如图2(b)所示。从模拟值和实测值的吻合情况对比来看,在测 试压力0.04~0.12 MPa的范围内,采用标准k-ε计算模型的模拟结果与实测值的流量偏差率在2.05%~ 6.00%之间、RNG k-ε模型的偏差率范围是4.44%~8.21%,而Realizable k-ε计算模型为4.55%~8.43%;采用 标准k-ε模型的模拟值具有很高的精度,计算结果更接近实际工况,而且选取的数值计算方法也较为合理。 因此,在对齿型迷宫流道灌水器的数值模拟中推荐采用标准k-ε计算模型。





直观分析法可对试验各因素及不同水平进行综合比较,确定同一因素下不同水平以及不同因素对试验 指标的影响,并可获得最佳配比和因素影响程度^[15]。

正交试验因素极差分析见表4,其中X₁、X₂、X₃和K₁、K₂、K₃分别为因素取1、2、3水平所对应的试验流态指数和流量系数的平均值,R₁与R₂分别为对应因素的极差。极差越大表明该列因素在试验范围内的变化将导致试验指标在数值上有更大的变化,则该因素对试验指标的影响程度也越大;相反则越小。

从表4可以看出,每因素3个水平的各列极差值不相等,这表明各因素的水平改变对试验结果的影响不相同。对于流态指数而言,极差值的大小顺序为:R_d > R_e>R_a>R_b,因此迷宫流道各参数对流态指数影响的 主次顺序为流道深度、齿高度、齿角度与齿底距,根据试验因素对流态指数的影响程度,应首先选取因素流 道深度中使流态指数最小的水平,为d₁;以此类推可确定最优方案为d₁c₃a₁b₂,该方案不包含在正交试验设计 中,这正体现了正交试验的预见性;对于流量系数而言,极差值的大小顺序为:R_d>R_a>R_b>R_e,所以迷宫流道 各参数对流量系数影响的主次顺序为流道深度、齿角度、齿底距与齿高度。

试验因素		齿角度 a	齿底距b	齿高度 c	流道深度d	齿间距 e
	X_1	0.466 6	0.469 5	0.471 6	0.462 3	0.469 1
达大比米	$X_2 = 0.4670$ 0.4670	0.467 0	0.467 2	0.466 8	0.469 0	
沉心指奴	X_3	0.470 3	0.467 4	0.465 2	0.474 8	0.465 9
	R_1	0.003 7	0.002 6	0.006 4	0.012 6	0.003 2
	K_1	6.362 0	6.597 1	6.446 0	6.118 8	6.842 0
法具至粉	K_2	6.590 8	6.680 4	7.393 1	6.400 4	7.464 5
加里尔奴	K_3	8.050 8	7.726 1	7.164 6	8.484 5	6.697 2
	R_2	1.688 7	1.129 0	0.947 1	2.365 7	0.767 4

表4 试验因素极差分析

为了避免由于试验水平的限定导致最优方案丢失,将因素水平作为横坐标、试验指标为纵坐标,做出因素与试验指标的趋势图如图3所示。从图3可以看出,在试验流道深度的取值范围内,深度与流态系数和流量指数都呈正相关关系;流态指数随着齿高度的增加而减小,流量系数与齿高度呈正相关关系;流态指数随齿角度的增加呈现先增加后减小的趋势。



图3 因素与指标趋势图

2.3 方差分析

由5可知,按显著性水平α=0.01检验,只有流道深度对流态指数有显著影响;按显著性水平α=0.1检验, 流道深度、齿高度对流态指数存在显著影响。方差分析结果可知,对流态指数影响大小的顺序依次为:流道 深度、齿高度、齿角度和齿底距。

方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	统计量F	显著性P
因素a	4.984×10 ⁻⁵	2	2.492×10 ⁻⁵	1.366	0.303
因素 <i>b</i>	2.269×10 ⁻⁵	2	1.134×10 ⁻⁵	0.622	0.359
因素c	1.300×10^{-4}	2	6.504×10 ⁻⁵	3.565	0.072
因素d	4.871×10 ⁻⁴	2	2.435×10^{-4}	13.352	0.002
误差	1.642×10^{-4}	9	1.824×10 ⁻⁵		
合计	7.253×10 ⁻⁵	18			

表5 结构参数对流态指数影响的方差分析

注 R²=0.808(调整后R²=0.637)。

2.4 多元线性回归分析

基于数值模拟结果,从直观分析和方差分析结果可知,齿型灌水器迷宫流道不同的结构参数对迷宫灌水器的流态指数*X*和流量系数*K*影响的差异较大,对应不同流道结构参数下的模拟结果,分别对流态指数*X*和流量系数*K*进行多元线性回归分析,得到相应回归公式为:

 $X=4.67\times10^{-4}a-0.005\ 4b-0.016\ 1c+0.041\ 7d+0.442\ 2,$

 $K=0.211\ 1a+2.822\ 4b+1.796\ 5c+8.247\ 8d-11.584\ 9.$

流态指数X是评价灌水器水力性能优劣的重要指标,X值的大小反映了灌水器出流量对工作压力变化的敏感程度。该值越小,表示灌水器流量受压力变化的影响程度也越小,敏感性越低,同等条件下灌水也就相对越均匀。通过对齿型流道灌水器关键因素与流态指数之间的多元回归模型的建立,可以实现结构参数与目标变量之间的定量预测关系;而流量系数K是衡量一个灌水器流道过水能力的重要指标,该值越大,灌水器的过流能力也越强,流量也越大。通过对流量系数K多元线性回归模型的建立,实现对灌水器流量大小的预先定量估算。将式(1)和式(2)联立,在最终确定齿型灌水器关键参数之前,可以借助本研究提出的

回归公式对灌水器的水力性能关键参数指标做预算测算,通过测算结果来确定是否需要进一步调整灌水器 流道结构设计参数,这对研发高性能的灌水器具有重要指导意义。

从回归模型系数与t检验中可以看出(表6和表7),对于流量系数齿角度、流道深度的P值远小于0.05, 说明此参数与流量系数相关性较好且回归系数显著;对于流态指数有流道深度、齿高度的P值远小于0.05, 说明流道深度、齿高度与流态指数的线性相关性较好且回归系数较显著。

+# - 1	原始	系数	,	D			
侠 式	β	标准误	- I	P			
常数项	-11.584 9	4.467 563	-2.593 12	0.022 295			
齿角度 a	0.211 092	0.087 091	2.423 797	0.030 686			
齿底距b	2.822 375	1.741 827	1.620 354	0.129 149			
齿高度 c	1.796 5	1.741 827	1.031 389	0.321 166			
流道深度 <i>1</i>	8 247 708	2 280 586	3 616 525	0.002.121			

表6 沪	充量;	系数口	ヨ归模型	的系	数和	t检验	结果
------	-----	-----	------	----	----	-----	----

表7 流态指数回归模型的系数和t检验结果

档志	原始	系数	*	D
快人	β	标准误	l	Γ
常数项	0.442 2	0.014 050	31.475 43	1.17×10^{-13}
齿角度 a	4.67×10 ⁻⁴	0.000 274	1.703 862	0.112 176
齿底距b	-0.005 4	0.005 478	-0.988 85	0.340 786
齿高度 c	-0.016 1	0.005 478	-2.936 12	0.011 576
流道深度d	0.041 7	0.007 172	5.812 901	6.04×10 ⁻⁵

注 复相关系数为0.8836。

从流量系数*K*与流态指数*X*的线性回归方差分析结果(表8)可以看出,对于流量系数而言,显著性统计量*P*值为0.007 292,流态指数的显著性*P*值为0.000 316,小于0.05,因此,构建的流态指数及流量系数多元线性回归方程具有显著的回归效应。

- X	数	Df	SS	MS	F	Р
	回归分析	4	32.975 53	8.243 882	5.660 838	0.007 292
流量系数	残差	13	18.931 91	1.456 301		
	总计	17	51.907 44			
	回归分析	4	0.000 667	0.000 167	11.572 9	0.000 316 018
流态指数	残差	13	0.000 187	1.44×10 ⁻⁵		
	总计	17	0.000 854			

表8 线性回归方差分析结果

3 讨论

研究得出,对于锯齿型流道,流道边界的曲率较大,使用四面体含边界层网格或混合多面体网格进行划分的精度较高,这与喻黎明等⁽⁴⁾在对迷宫流道的数值模拟中运用混合多面体网格划分相一致;而金龙等⁽³⁾在对双内齿矩形迷宫流道灌水器进行数值模拟中,采用了六面体网格。主要原因是六面体网格适用于流道边界曲率相对较小,直角边较多的情况。研究中,考虑到流道结构尺寸较小,网格划分统一采用非结构网格,那么在相同的工况下,运用结构网格对流道进行划分的计算精度是否会有所提高还有待进一步研究。

从方差分析结果可知,在流道深度、齿高度、齿角度和齿底距4因素中,对流态指数影响大小次序与张丽 娟等^[8]在对锯齿型流道灌水器的研究结果有所差异。主要原因是文中各因素的水平设置与张丽娟等^[8]学者 的因素水平不一致导致的,这也是在众多学者相关研究中,各因素对流态指数的影响大小结论出现不一致 的主要原因之一。并且所得结论与其他学者的结论都是在不考虑因素之间交互作用的前提下得出的,因 此,各因素之间的交互作用还需要做进一步的研究。

4 结 论

1)采用四面体含边界层网格或混合多面体网格对锯齿型流道的网格划分精度较高,并用标准 k- ε 模型 对计算域求解,流量偏差率可控制在6.00%的误差范围内,可推荐作为锯齿型流道结构灌水器数值模拟时的 参考设置模式。

2)基于本研究试验方案下,按显著性水平α=0.1检验,流道深度、齿高度对流态指数存在显著影响;齿型 迷宫流道各因素对流态指数影响的主次顺序为流道深度d、齿高度c、齿角度a、齿底距b。

3)在试验流道深度的取值范围内,流道深度与流态系数和流量指数都呈正相关关系;流态指数随着齿 高度的增加而减小,流量系数随齿角度的增加呈现先增加后减小的趋势。

4)基于正交试验方案的数值模拟结果,分别构建的流态指数和流量系数与齿型灌水器关键结构参数之间的多元线性回归方程,可为高性能灌水器的研发提供及时预测指导。

参考文献:

[1] 任改萍, 吴普特, 朱德兰, 等. 泥沙粒径对大流道迷宫灌水器堵塞影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(3):1-6.

- [2] 国攀,张毅杰,宋时雨,等.地下滴灌灌水器负压吸泥影响因素试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(1):63-68.
- [3] 金龙,李治勤,马炎超,等.双内齿矩形迷宫流道灌水器水力特性分析[J].太原理工大学学报,2016,47(6):774-778.
- [4] 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, 8(1):30-35.
- [5] ZHANG J, ZHAO W, WEI Z, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 56(2):120-129.
- [6] 潘雅阁.齿形流道结构对滴头水力性能影响的试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [7] ALAMOUD A I, MATTAR M A, ATEIA M I. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 580-593.
- [8] 张丽娟, 李双营. 滴灌齿型迷宫流道灌水器水力性能数值试验研究[J]. 水电能源科学, 2017, 10(8):103-106.
- [9] 王新坤,李俊红,李亚飞,等.基于正交试验的三角环流流道灌水器数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5):444-448.
- [10] 郭霖, 白丹, 程鹏, 等. 三角形迷宫流道滴灌灌水器结构参数及水力特性研究[J]. 中国水能及电气化, 2011(10):23-27.
- [11] 王芳, 吴普特, 范兴科. 滴灌灌水器迷宫流道数值模拟与结构优化设计[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(3):35-37
- [12] 陈雪, 吴普特, 范兴科, 等. 灌水器迷宫流道结构参数数值模拟与抗堵塞分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2):35-38.
- [13] 王建东,李光永, 邱象玉,等. 流道结构形式对灌水器水力性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(z1): 100-103.
- [14] 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 迷宫流道偏差量对灌水器水力性能及抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9):64-68.
- [15] 王建东,龚时宏,李光永,等.低压下流道结构参数对锯齿型滴头水力性能影响的试验研究[J].水利学报,2014,45(1):72-78.

Numerical Simulation of Hydraulic Performance of Tooth-form Channel of Labyrinth Emitter

YANG Bin^{1,3}, ZHANG Geng², WANG Jiandong^{3*}, GONG Shihong¹, WANG Haitao¹, MO Yan¹

China Institute of Water Resource and Hydraulic Research, Department of Irrigation and Drainage, Beijing 100048, China;
National Agricultural Technology extension Service Center, Beijing 100125, China;
Institute of Environment and

Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] The aim of the paper is to quantify the relationship between channel structure parameters and hydraulic performance of labyrinth emitter. [Method] Four factors, including dentation angle, bottom space between the dentations, dentation height and depth of flow passage were selected for the orthogonal experiment arrangement. Based on laboratory test and numerical simulation, we elucidated the influence of structure parameters on the hydraulic performance. [Result] Tetrahedral mesh with boundary layer mesh and mixing polyhedral mesh was most accurate. The error of simulated flow rate could be controlled around 6.00% using the standard k- ε model. Both depth of flow passage and the dentation height had significant influence on emitter discharge exponent (α =0.1). We derived regression models to describe the relationship between emitter discharge exponent and structural parameters of the flow passage, as well as the relationship between the discharge coefficient and structural parameters of flow passage. [Conclusion] This study determined the meshing pattern of the emitter and established the relationship between the structural parameters of the flow channel and its hydraulic performance. Key words:dental emitter; structural parameters; numerical simulation; hydraulic performance