排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 7 月 July 2015 | 第 33 卷 第 7 期 Vol. 33 No. 7
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0164

滴灌灌水器三角形迷宫流道优化设计

郭霖[1]，白丹[1]，程鹏[2]，周文[2]
（1. 西安理工大学水利水电学院，陕西 西安 710048；2. 华北水利水电大学水利学院，河南 郑州 450011）


郭霖

摘要：为了研究三角形迷宫流道滴灌灌水器的水力特性，将其结构作为研究单元，以流道转角、流道宽度和齿高 3 个结构参数为因素，采用均匀设计方法设计出 10 个结构参数组合方案. 对于每个参数方案，通过 AutoCAD 对灌水器流道进行三维造型设计，采用计算流体动力学软件 Fluent 6.2 对流道内部流体的流动状态进行数值模拟，并且模拟分析灌水器内部流道的水力性能和流场特性，得到流道内部流场可视化图像，同时计算不同压力对应的流量值，通过回归分析建立压力与流量之间的量化关系和回归曲线图，并获得其流态指数. 在此基础上，根据 10 个组合方案数据，通过多元回归计算，建立流态指数与结构参数之间的数学关系. 以流态指数最小为目标，采用遗传算法，获得结构参数优化设计方案，得到一种流道内速度均匀分布、压力变化均匀递减、流量大小控制在滴灌允许范围之内、水力性能优良的三角形迷宫流道灌水器，可为三角形迷宫流道灌水器的参数化结构设计、制造中的精度控制以及最终的研发提供理论依据.

关键词：滴灌灌水器；三角形迷宫流道；结构参数；数值模拟；水力性能；优化
中图分类号：S275.6　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)07-0634-06

郭霖，白丹，程鹏，等. 滴灌灌水器三角形迷宫流道优化设计[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(7)：634-639.

Guo Lin，Bai Dan，Cheng Peng，et al. Optimization design of triangular labyrinth channel in drip irrigation emitter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2015，33(7)：634-639.(in Chinese)

Optimization design of triangular labyrinth channel in drip irrigation emitter

Guo Lin[1]，*Bai Dan*[1]，*Cheng Peng*[2]，*Zhou Wen*[2]
(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering，Xi′an University of Technology，Xi′an，Shaanxi 710048，China；
2. School of Water Conservancy，North China University of Water Resources and Electric Power，Zhengzhou，Henan 450011，China)

Abstract：In order to study the hydraulic properties of triangular labyrinth channels in drip irrigation emitter，a basic structure of the channels is specified and severed as the investigational model which is defined by the three geometrical parameters such as turning angle，width and height of triangular labyrinth channel. Then，10 cases are designed based on these parameters by means of uniform design method. Computational fluid dynamics software Fluent 6.2 is adopted to simulate the flow field in the channel of emitters numerically. The geometrical model is generated for each case by using 3D software AutoCAD. Subsequently，the flow in each model is simulated by making use of CFD software Fluent 6.2 to analyze the hydraulic performance and flow characteristics of the model and to obtain flow visualization pictures. Additionally，the flow rate is extracted and correlated to the pressure drop across

收稿日期：2014-10-09；**网络出版时间**：2015-07-09
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150709.1119.012.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51279156)；高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20116118110010)；陕西省农业科技攻关项目(2010K02-08)
作者简介：郭霖(1985—)，男，甘肃天水人，博士研究生(guolinedu@126.com)，主要从事节水灌溉技术研究.
白丹(1960—)，男，重庆开县人，教授，博士生导师(通信作者，baidan@xaut.edu.cn)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.

the model by employing linear regression method, and an index is established for flow pattern. A mathematical relationship between the index and the geometrical parameters is developed based on the results of 10 cases by using multivariable linear regression approach. The genetic algorithm is adopted to optimize the three parameters by minimizing the flow index. The optimized triangular labyrinth channel is subject to an excellent hydraulic performance, namely uniform velocity profile and steadily reduced pressure distribution, and the flow rate through it is in an allowable range as well. This optimized channel can be a reference case for parameterized design, precision control of geometrical parameters in manufacturing and final research and development of triangular labyrinth channel in drip irrigation emitter.

Key words: drip irrigation emitter; triangular labyrinth channel; geometrical parameters; numerical simulation; hydraulic performance; optimization

滴灌灌水器是滴灌系统中最为关键的元件，其流道结构参数直接影响水力性能，因此它是滴灌灌水器研发的技术核心. 国内很多学者都在研究灌水器流道结构参数对水流状态的影响，以及流道结构参数、水力性能、流态指数三者之间的关系[1]. 而国外对滴灌灌水器流道结构设计方面具有实际指导意义的研究论文较为少见[2].

近年来，国内外学者以流体力学理论、试验分析以及计算流体动力学(CFD)为工具[3-4]，利用试验设计方法，大量开展了对灌水器不同参数组合流体水力特性、水流状态、消能机理、抗堵性能的理论研究，在灌水器结构参数确定、PIV 流场可视化分析、层流紊流的流动机理等方面取得了诸多成果[5-8]，同时研究了在微尺度下，流体自身性质、特征参数以及流道表面粗糙度对其流动特性的影响[9]. 王立朋等[10]、魏正英等[11]提出了一种圆柱形压力补偿灌水器的分步式设计方法，并采用快速成型技术进行水力试验；同时利用 PIV 对迷宫流道灌水器进行抗堵性能测试. 王新坤等[12]基于正交试验研究了三角环流流道灌水器结构参数对流态指数与流量的影响，并建立其三者之间的回归模型. 李云开等[13-14]采用等比例透明平面模型与 DPIV 相结合的研究方法，实现了圆柱形灌水器流道内部流速分布测试，提出了灌水器流道全流场三维测试方法；同时，采用标准 $k-\varepsilon$ 模型和大涡模型分析了迷宫流道灌水器水力性能，并进行结构优化，提高抗堵性能[15]. 刘春景等[16]将基于改进的粒子群优化最小二乘支持向量机的预测模型及计算方法引入到滴头水力性能的预测领域. Palau 等[17]采用试验方法测试分析了灌水器压力与流量之间的关系，并且对其内部的水流流动状态做了无理论依据的单一假设. Yildirim[18]研究了不同形式的流道，分析水头损失对其水力性能和流量的影响. Celik 等[19]利用快速成型技术，采用 CFD 模拟软件对迷宫流道灌水器内部结构进行了水力性能分析，并确定了最佳压力范围.

在国内外相关文献中，采用遗传算法对结构参数进行优化寻找流态指数最优解的方法，报道较少. 遗传算法是一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化的进化算法. 与传统算法相比，具有搜索能力的快速性和准确性；可在多个可行解中精确挑选最优解；改进了传统单点局部搜索机制，采用群体全局搜索方法，易于并行化计算. 其在理论计算与实际应用中具有可行性和优越性.

文中采用 CFD 软件对三角形迷宫流道灌水器的水力性能以及流场分布进行研究，同时分析结构参数与流态指数之间的数学关系；基于遗传算法在优化方面的优越性，采用该方法寻找灌水器结构参数最优解，并通过试验对数值模拟进行验证，以便为流道结构尺寸的最优设计提供一种新的方法.

1　流道结构参数和组合方案

三角形迷宫流道灌水器一般由进水口栅栏、迷宫流道以及出水口蓄水槽等 3 部分构成，其中迷宫流道是最为重要的组成结构，起到调压稳流、保证灌水均匀度等至关重要的作用，因此迷宫流道内部结构的设计和研究也自然成为最受关注的部件.

三角形迷宫流道灌水器流道结构参数一般包括：两壁面夹角，即流道转角 θ；流道截面的横向垂直距离，即流道宽度 w；齿尖到底边的垂直距离，即齿高 h；流道截面的纵向垂直距离，即流道深度 D；流道进口到出口的长度，即流道长度 L；三角形单元流道的个数，即流道单元数 n.

根据文献[16]，选取流道转角 θ、流道宽度 w、齿高 h 作为影响灌水器水力性能的主要结构参数，

如图1所示. 其他结构参数根据现有灌水器的结构形式、结构尺寸范围,将流道深度 D 定为0.8 mm,流道单元数 n 定为10.

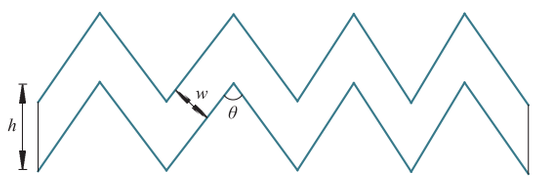


图1 三角形流道的结构参数

Fig. 1 Geometrical parameters of triangular labyrinth channel

应用均匀试验设计将选取的3个参数作为因素,各参数取值作为水平进行方案设计,其中流道转角 θ 取值为40°~130°,流道宽度 w 为0.4~1.3 mm,齿高 h 为0.7~1.6 mm,各取10个水平设计成 $U_{10}(10^3)$ 均匀设计表,见表1,表中 x 为流态指数.

表1 灌水器结构参数及水平值表

Tab. 1 Geometrical parameters and their levels

水平	θ/(°)	w/mm	h/mm	x
1	40	0.8	1.3	0.552
2	50	1.3	0.9	0.599
3	60	0.7	1.6	0.491
4	70	1.2	1.2	0.585
5	80	0.6	0.8	0.516
6	90	1.1	1.5	0.505
7	100	0.5	1.1	0.564
8	110	1.0	0.7	0.511
9	120	0.4	1.4	0.561
10	130	0.9	1.0	0.541

2 流道的数值模拟方法

2.1 物理模型和网格划分

目前,计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟软件已经广泛成为一种被国内外学者应用于灌水器水力性能研究的最有效、最接近实际的模拟方法. 通过前人的试验研究,得到了模拟前提的准确性判定、流态判别、模型适应性分析、参数选取、计算精度的提高、求解方法等结论. 因此,在总结国内外学者对模拟前提准确性论证的基础上,结合灌水器流体的流动状态,选取准确的计算模型、参数、求解方法等,同时为进一步对模拟计算的结果进行验证,采用试验方法对优化后的结构参数制作样机,验证其计算的准确性.

应用CFD有限体积法对灌水器内部流道水力性能进行数值模拟,通常把灌水器内部的水流运动看成黏性不可压缩流体运动,并且其运动规律符合质量守恒和动量守恒定律.

在对模型进行数值模拟之前,将AutoCAD所设计的灌水器流道的三维模型导入Fluent 6.2.16的前处理器Gambit中. 通过Gambit对各结构参数组合而成的不同结构尺寸灌水器进行流道网格划分,模型的进、出口以及内部结构均属于规则体,为保证模拟精度,灌水器内部流道的网格都将0.1 mm六面体网格设为基本尺寸对其流道进行网格划分,划分的网格数为 $(1.0\sim2.5)\times10^5$ 个,如图2所示.

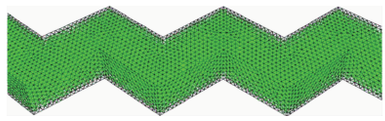


图2 三角形流道单元网格图

Fig. 2 Mesh in basic structure of triangular labyrinth channel

2.2 边界条件设定及数值计算方法

滴灌灌水器通常在一定工作压力条件下,确保水流均匀而稳定地流出,故三角形流道灌水器进水口边界条件通常设置为压力入口,对每种结构形式的灌水器分别按照0.05~0.15 MPa不同的进口工作压力输入,每隔0.01 MPa计算1次. 灌水器出口边界条件同样设置为压力出口条件,压力大小设置为当地大气压,流道内部表面速度矢量设为0. Gambit默认流道上下2个三角形边界条件为边壁Wall.

根据流道内部流体流动特性,选择目前通用的湍流模型中的标准 $k-\varepsilon$ 模型进行计算. 灌水器内部三角形流道的壁面对湍流有明显影响,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三角形流道壁面进行处理. 为了提高数值模拟的计算精度,数值计算采用了定常的非耦合隐式算法,压力项等将默认的一阶迎风格式变为精度更高的二阶迎风格式,采用更高次的插值公式计算,避免出现假扩散、过早收敛等现象,同时残差标准设置为 1.0×10^{-4},比通常的标准值精度提高了一个数量级,速度和压力耦合采用SIMPLE算法处理,增强计算的稳定性.

3 流道结构参数对水力性能的影响

3.1 灌水器的压力与流量关系

灌水器压力-流量关系是灌水器的重要性能指标,在一定的压力范围内,压力与流量的关系一般表示为

$$q = kp^x, \tag{1}$$

式中:q 为给定压力下的流量,L/h;k 为流量系数;p 为入口压力,MPa;x 为流态指数.

采用数值模拟软件计算出不同压力下对应的流量值，根据式(1)将 0.05 ~0.15 MPa 等 11 个不同压力值和对应的流量值进行回归分析，拟合出各参数对应的流态指数，见表 1 所示. 从表 1 中 10 组结构参数组合的模拟结果可以看出，不同结构参数组合对应的流态指数相差较大，最大的流态指数为 0.599，最小的流态指数为 0.491.

3.2　灌水器结构参数与流态指数关系

由模拟结果可以明显看出，3 个结构参数对灌水器流态指数的影响程度不同，现假设 x 均与 3 个结构参数存在某种数学关系，对表 1 中的各个结构参数和对应的流态指数进行多元回归分析，得到流态指数 x 与各参数之间的计算表达式为

$$x = -8.1 + 3.86\theta + 13.38w + 0.9h - 0.43\theta^2 - 5.13w^2 - 0.35h^2 - 3.03\theta w - 0.14wh, \quad (2)$$

式中：θ 为流道转角，(°)；w 为流道宽度，mm；h 为齿高，mm.

式(2)相关系数 $R = 0.999$，判定系数 $R^2 = 0.999$，显示出多元回归方程具有很高的拟合度；此外，若按显著水平 $a = 0.1$ 检验，在该多元回归模型中，流道转角和流道宽度对该模型影响最为显著，即对滴头流态指数的影响具有统计学意义.

4　流道结构参数的优化

4.1　流道结构参数优化的数学模型

4.1.1　目标函数

模拟试验并不一定能计算出最优的参数组合，因此需要通过上述多元回归拟合流态指数与各参数之间的关系式，在所规定的各参数取值范围内，设定上下限约束，利用遗传算法寻找最优解.

一般在遗传算法中，种群中个体在选择、交叉、变异等算子的控制下，模拟自然遗传过程中发生的繁殖、交配和变异现象，逐代产生种群，最终寻找到最优个体.

灌水器结构参数与流态指数之间的关系式是一组非线性方程，由 3 个结构参数的取值范围作为上下限约束，利用遗传算法将这一非线性方程的求解问题转化为以下的目标函数优化问题.

$$\min f(\theta,w,h) = \min x = \min(-8.1 + 3.86\theta + 13.38w + 0.9h - 0.43\theta^2 - 5.13w^2 - 0.35h^2 - 3.03\theta w - 0.14wh), \quad (3)$$

4.1.2　约束条件

对于利用遗传算法求解目标函数必须是在一定的约束条件下进行的，其中

$$\begin{cases} 0.699 \leqslant \theta \leqslant 2.269, \\ 0.4 \leqslant w \leqslant 1.3, \\ 0.7 \leqslant h \leqslant 1.6. \end{cases} \quad (4)$$

程序的主要变量：个体数量 *NIND* 为 40，最大遗传代数 *MAXGEN* 为 100，变量维数 *NVAR* 为 20，代沟 *GGAP* 为 0.9.

4.2　模型求解

在非线性方程求解的优化问题中，式(3)目标函数是一个非线性函数，约束条件式(4)是一组只有上下限的线性约束. 这一优化问题可采用遗传算法求解；针对这一问题的特点，采用浮点数编码，适应度函数为

$$Fit(\theta,w,h) = \frac{1}{f(\theta,w,h)}. \quad (5)$$

经过计算分析得到，当优化后的结构参数 θ 取 100°、w 取 1.079 mm、h 取 1.035 mm 时，可以得到最优的流态指数，根据此种结构参数采用模拟软件得到的流态指数与计算值接近，验证其利用遗传算法优化的正确性，其最优流态指数为 0.487.

为了验证模拟模型选取与计算精度的可靠性，利用激光精雕技术(加工精度 0.01 mm)，选用有机玻璃材料，按照优化模型 1∶1 比例加工流道样机，并利用高倍显微镜校核流道尺寸. 试验样机加工 5 组，每组测试 3 次，每次测试时间 5 min，取其试验平均值与模拟结果相互对照. 结果显示，流量的试验值与模拟值误差为 3% ~4.5%，相关系数为 0.998，符合误差要求. 试验对模拟计算的验证，充分证明了模拟软件的模型选取、参数设置以及模拟计算精度的准确性，同时也验证了利用遗传算法优化结构参数的可行性和正确性.

取以上优化后的结构参数得到最优结构参数的压力 - 流量关系特征曲线，如图 3 所示.

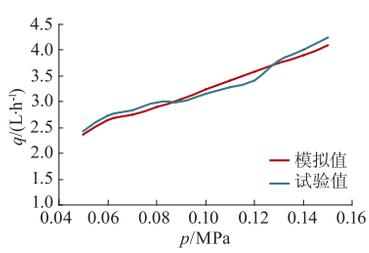


图 3　最优方案的压力 - 流量曲线

Fig. 3　Pressure - flow rate curves of optimized case

4.3　优化后的迷宫流道水力性能分析

对其优化后所得到的最优结构参数的流场图

如图4,5所示,是在0.06 MPa工作压力下灌水器流道的速度矢量分布图和速度局部放大图,形象地表示出了水流在迷宫流道内通过消能作用、各部分水流的速度大小.图4不同的颜色分布和图5流线的疏密反映了流道内流体速度的大小,颜色由蓝变为红色表示流速逐渐增大,其中颜色越接近红色的部位表示此处水流速度大;相反,颜色越接近蓝色的区域表示流速小.从图5中可以看出,根据流速的不同可以把迷宫滴头流道内部分为3个区:沿着滴头近壁面流动的高速主流区,水流速度可以达到4.7 m/s;主流区两侧附近的低速区,水流速度为1.2 m/s;旋涡区,在漩涡的外侧,涡体转动方向与水流方向一致,流速增大,加快水流运动,速度大约为4 m/s,而在旋涡的中心,由于与水流方向相反,使得流速减小为0.9 m/s.在主流区和低速区之间明显地存在速度的差异,会使低速区的外侧顶点以及中心区产生旋涡,对于涡体流速大的一边压强小,流速小的一边压强大,涡体上下两边产生压差,形成作用于涡体的升力或下沉力,使涡体脱离原来的流层而掺入邻近的流层,从而扰动邻层进一步产生新的涡体,涡体的传递、产生与消散伴随着机械能的耗损.随着流动过程的进行,主流区的水流和低速区的水流不断地混掺,产生能量的交换与分配,最终使流速在各个部位不断变化.

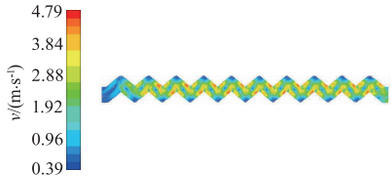


图4 最优方案的速度矢量图

Fig. 4 Velocity vector in optimized case

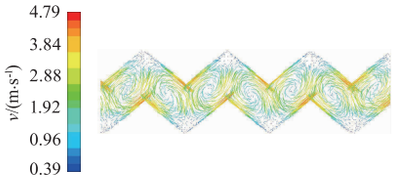


图5 最优方案的速度局部放大图

Fig. 5 Enlarged velocity vector in optimized case

最优方案的三角形迷宫流道灌水器压力分布如图6所示,图中压力值均为表压.在整个灌水器流道内部流体流动过程中,由于整个流道为全封闭状态,没有与外界的能量交换,因此压力的变化只考虑由内部水流之间的机械运动所产生的沿程损失和局部损失.从图中可以明显地看到压力由进口到出口逐级减小,从0.06 MPa下降为0.01 MPa左右,并且每个单元段水头损失大约为0.005 MPa,压降基本相同.



图6 最优方案的压力分布图

Fig. 6 Pressure distribution in optimized case

5 结 论

1)采用均匀设计试验方法,设计了10组方案,并且采用三维CFD模拟软件中的标准 $k-\varepsilon$ 模型,模型参数设置以提高模拟精度和计算效率为前提,计算得到流量与流态指数,为建立流态指数和结构参数的数学关系提供了依据.

2)利用多元回归方法拟合出了灌水器流态指数与3个参数之间的数学表达式,且其显著性具有统计学意义,建立了两者之间的数学关系,可以准确地用数学方法定量计算流态指数.

3)以流态指数与结构参数关系式为目标函数,通过遗传算法对其结构参数进行优化,当转角取100°、流道宽度取1.079 mm、齿高取1.035 mm时,可以得到最优的流态指数,并对其优化后的结构制作样机,进行试验对比.结果证明,试验与模拟值误差为3% ~4.5%,相关系数为0.998,证明模拟的精确性和运用遗传算法优化结构的优越性.

4)利用CFD软件对流道内部的流场分布进行可视化研究,其中速度矢量图基本呈现3个区:主流区、低速区以及旋涡区,由于同一截面上速度不均衡,加剧了各液层之间的相对运动,使得有压水流相互混掺,能量的交换、分配以及消耗更加频繁,摩擦阻力与局部水头损失增大,同时伴随着旋涡的产生和机械能的消耗;压力由0.06 MPa下降为0.01 MPa左右,表明压力分布由进口到出口依次递减.

参考文献(References)

[1] 王新坤,李俊红,单彬,等.三角绕流滴灌灌水器结构设计和优化[J].农业机械学报,2010,41(S1):43-46.

Wang Xinkun, Li Junhong, Shan Bin, et al. Structural design and optimization of triangle circulation drip irriga-

tion emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(S1):43 - 46. (in Chinese)

[2] Yildirim G, Agiralioglu N. Linear solution for hydraulic analysis of tapered microirrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004,130(1): 78 - 87.

[3] Yan Haijun, Ou Yangjun, Nakano K, et al. Numerical and experimental investigations on internal flow characteristic in the impact sprinkler[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2009, 23(1): 11 - 23.

[4] Paxson G, Savage B. Labyrinth spillways: Comparison of two popular U. S. A. design methods and consideration of non-standard approach conditions and geometries [C]//Proceedings of the International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures. Brisbane. Australia: The University of Queensland, 2006:37 - 46.

[5] Al - Muhammad J, Tomas S, Ait - Mouheb N, et al. μ-PIV characterization of the flow in a milli-labyrinth-channel used in micro-irrigation [C]//Proceeding of 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal:[s. n.], 2014: 1 - 15.

[6] Vekariya P B, Subbaiah R, Mashru H H. Hydraulics of microtube emitters: A dimensional analysis approach [J]. Irrigation Science, 2011, 29(4): 341 - 350.

[7] Aydin M C, Emiroglu M E. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013,29:1 - 8.

[8] Ali A A M. Anti-clogging drip irrigation emitter design innovation[J]. European International Journal of Science and Technology, 2013,2(8):154 - 160.

[9] Agostini B, Watel B, Bontemps A, et al. Liquid flow friction factor and heat transfer coefficient in small channels: An experimental investigation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004,28(2):97 - 103.

[10] 王立朋,魏正英,邓涛,等. 压力补偿灌水器分步式计算流体动力学设计方法[J]. 农业工程学报,2012,28(11):86 - 92.
Wang Lipeng, Wei Zhengying, Deng Tao, et al. Step-by-step CFD design method of pressure compensating emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(11): 86 - 92. (in Chinese)

[11] Wei Zhengying, Cao Meng, Liu Xia, et al. Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012,25(4):729 - 737.

[12] 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.
Wang Xinkun, Li Junhong, Li Yafei, et al. Numerical calculation of triangle circulation drip irrigation emitters based on orthogonal experiment[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(5):444 - 448. (in Chinese)

[13] 李云开,冯吉. 滴灌灌水器内部水动力学特性测试研究进展[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(1):86 - 92.
Li Yunkai, Feng Ji. Progress in measurement of hydrodynamic characteristics in drip irrigation emitters[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014,32(1):86 - 92. (in Chinese)

[14] 李云开,杨培岭,任树梅,等. 分形流道设计及几何参数对滴头水力性能的影响[J]. 机械工程学报,2007,43(7):109 - 114.
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Effects of fractal flow path designing and its parameters on emitter hydraulic performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(7):109 - 114. (in Chinese)

[15] Wu Dan, Li Yunkai, Liu Haisheng, et al. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 497 - 506.

[16] 刘春景,郑加强,周宏平,等. 滴灌滴头水力性能预测模型[J]. 水利学报,2010,41(11):1353 - 1359.
Liu Chunjing, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping, et al. Prediction model for hydraulic performance of trickle irrigation emitters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(11):1353 - 1359. (in Chinese)

[17] Palau Salvador G, Arviza Valverde J, Bralts V F. Hydraulic flow behaviour through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques[C]//Proceeding of 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting. Ottawa, Canada: ASAE/CSAE, 2004:3127 - 3135.

[18] Yildirim G. Hydraulic analysis and direct design of multiple outlets pipelines laid on flat and sloping lands[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6):537 - 552.

[19] Celik H K, Karayel D, Caglayan N, et al. Rapid prototyping and flow simulation applications in design of agricultural irrigation equipment: Case study for a sample in-line drip emitter[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2011,6(1):47 - 56.

(责任编辑　张文涛)