

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.Supp.009

三角绕流滴灌水器结构设计和优化*

王新坤¹ 李俊红¹ 单彬² 王国相³

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 淮委沂沭水利工程有限公司, 徐州 221000;

3. 镇赉县灌溉排涝区管理局, 白城 137300)

【摘要】 以三角绕流滴灌水器结构的流道单元为研究对象,利用 Pro/E 软件完成灌水器造型设计,结合计算流体动力学软件 Fluent 6.3 模拟分析流道的水力性能,研究此类灌水器的湍流特性,揭示其内部湍流流动机理,并对流道结构进行优化。根据分析结果,通过改变外部大三角的形状与内部小三角的形状和位置,对流道单元进行结构优化,得出一种流态指数小于 0.5,流道内速度分布均匀,流量在滴灌允许范围内,抗堵性能优良的三角绕流灌水器结构。

关键词: 灌水器 三角绕流 水力性能 数值模拟 结构优化

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)S0-0043-04

Structural Design and Optimization of Triangle Circulation Drip Irrigation Emitters

Wang Xinkun¹ Li Junhong¹ Shan Bin² Wang Guoxiang³

(1. *Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

2. *Yishu HRC Water Conservancy Engineering Limited Company, Xuzhou 221000, China*

3. *Zhenlai Irrigation Drainage District Administration, Baicheng 137300, China*)

Abstract

Computational fluid dynamics software Fluent 6.3 was adopted to simulate the flow of triangle circulation drip irrigation emitters, the models were built by 3-D software Pro/E. By analyzing the flow hydraulic performance and the turbulence characteristics of emitters, the mechanism of internal turbulent flow was revealed, the flow structure was optimized. Based on the simulation results, by changing the shape and position of the external and the small internal triangular, a new type of triangle circulation drip irrigation emitter with flow index of less than 0.5 was got, velocity distribution was uniform, within the allowable flow range and excellent anti-clogging performance. A theoretical basis for the triangle circulation emitters structure design and quantitative analysis was provided.

Key words Emitter, Triangle circulation, Hydraulic performance, Numerical simulation, Structure optimization

引言

滴灌灌水器作为滴灌系统的核心部件,其工作性能是滴灌系统研究重点之一。灌水器结构对其水力性能影响很大,是灌水器产品开发过程的技术瓶颈,目前迫切需要了解灌水器流道结构对水流状态

的影响和流道结构、水流状态、抗堵能力三者的关系。国外关于滴灌灌水器流道设计方面具有实际指导意义的研究论文极为少见^[1-2],国内灌水器流道结构形式研究发展缓慢,制约了滴灌灌水器产品的多元化开发和应用,难以适应滴灌技术的发展和推广应用。

收稿日期: 2010-07-01 修回日期: 2010-07-19

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100211)和江苏省自然科学基金资助项目(BK2008246)

作者简介: 王新坤,研究员,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: xjwxk@126.com

国内外学者应用计算流体动力学(CFD)数值模拟、微流体粒子图像测速(Micro-PIV)及激光多普勒测速(LDV)技术,开展迷宫主流道内部流动机理、消能机理的理论分析及微观可视化研究,在灌水器流道构建、内部流场分析、设计理论等方面取得了诸多成果^[3-9]。本文采用CFD软件对三角绕流滴灌灌水器的水力性能进行研究,对灌水器结流道单元进行结构优化设计。

1 流道结构设计

流体在边界扩大和缩小的通道中流动是一常见的现象。由于流体惯性和突然扩大或突然缩小的边界条件,在管壁拐角与主流束之间形成分离。基于水力学中三角绕流、突扩管及突缩管的流动机理提出一种三角绕流滴灌灌水器流道,由突扩、突缩的三角形扁柱体与内置其中的

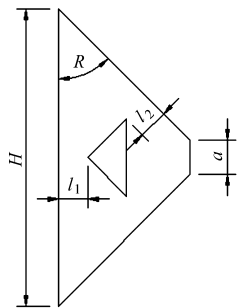


图1 灌水器单元结构图
Fig.1 Structure of emitter unit

绕流三角扁柱体构成流道单元,若干个流道单元依次连接成为整体,构成三角绕流滴灌灌水器的流道。在本文中,三角绕流流道灌水器结构参数定义如图1所示。

灌水器单元由两个进口不同的三角绕流结构采用首尾相连的方式构成,上一个流道单元的出水口尺寸等于下一个流道单元的进水口尺寸。其中, H 为灌水器单元高度, a 为单元进口尺寸, R 为单元角度, D 为流道深度, l_1 为内三角到单元进口的距离, l_2 为流道中最小尺寸。

2 数值计算

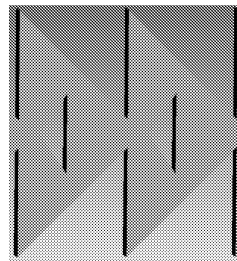
以目前市场上广泛应用的迷宫式滴灌灌水器和灌水器敏感尺寸为参考,选取三角绕流灌水器各结构参数,如表1所示。

表1 结构参数选取
Tab.1 Structural parameters

H/mm	a/mm	l_1/mm	l_2/mm	$R/(\text{°})$	D/mm
7	1.0	0.6	0.7	45	0.8

在对模型进行数值模拟之前,需要通过Pro/E软件对灌水器进行造型设计。灌水器单元由两个进口不同的三角环流结构采用首尾相连的方式构成,上一个流道单元的出水口尺寸等于下一个流道单元的进水口尺寸。本文着重研究灌水器单元结构对其

水力性能的影响,不考虑进口对流道的作用,因此进口部分采用简单的单进口方式。按照选定参数,完成灌水器三维造型。图2为部分流道的三维造型。



将其导入Fluent 6.3图2 灌水器部分结构图的前处理器GAMBIT中, Fig.2 3-D modeling of unit通过GAMBIT对灌水器进行流道网格划分,灌水器内部流道的网格划分采用基本尺寸为0.1 mm的六面体网格,网格数约为 25×10^4 个。其次,根据流道内部流体特性,选择模拟模型。CFD数值模拟的紊流模型选择目前通用的标准 $k-\epsilon$ 模型。

灌水器流道进口设为压力入口条件,分别按照工作水头1、3、5、6、8、10 m等6个因素水平输入。流道出口压力设为大气压,流道内部表面速度设为零。灌水器内部流道的壁面对紊流有明显影响,采用通用的高精度、计量小的标准壁面函数法对流道壁面进行处理。数值计算采用定常的非耦合隐式算法,压力项等采用二阶迎风格式,残差标准设置为 1×10^{-4} ,速度耦合采用SIMPLE算法。

3 结果分析与讨论

3.1 模拟结果

灌水器在自由出流条件下,其流量和流态指数取决于流道的几何尺寸,流量与工作压力之间的关系为

$$q = kh^x$$

式中 q ——灌水器流量, L/h k ——流量系数
 h ——工作水头, m x ——流态指数

图3为灌水器的流量-压力关系特征曲线。据此拟合出三角环流灌水器的流量压力关系式为

$$q = 1.2536h^{0.4939} \quad (1)$$

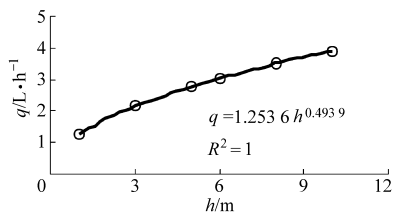


图3 流量-压力曲线

Fig.3 Flow rate - pressure curve

流态指数 x 反映了灌水器的流态特征即流量对压力水头变化的敏感程度。在实际的理论分析和工程应用中,常将 x 作为评价灌水器水力性能优劣的指标。从表2的结果中可以看出,在5 m工作水头

下,三角环流灌水器的流量为 2.779 L/h,流态指数 $x=0.4939$,如果对流道结构进一步优化,其水力性能将进一步改善。

表 2 不同压力下的流量

Tab.2 Flow value for various pressure

压力 h/m	1	3	5	6	8	10
流量 $q/L \cdot h^{-1}$	1.252	2.160	2.779	3.040	3.499	3.902

3.2 流道水力性能分析

灌水器主要依靠其流道实现对水流流量的调节功能,其流场特性直接影响和决定了灌水器的水力性能。

图 4 是 5 m 水头下灌水器部分流道的速度矢量分布图。图中流线疏密度表明了流场速度大小,流线密的地方流速大,流线疏的地方流速小。由于在模拟过程中,将液体视为不可压介质,在流道结构相同的前提下,流量不变,流速也不变。由图中流道

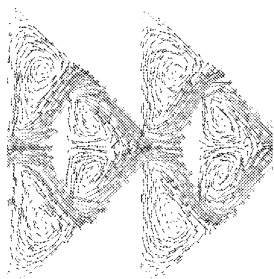


图 4 速度矢量图
Fig.4 Velocity vector

内单元段速度矢量图可以看出,各个单元处流速分布状态相似,即在流道尖角处,流动速度方向和大小变化都较为剧烈,流道中均存在漩涡。漩涡区的存在对灌水器的抗堵性非常不利,水流中携带的杂质容易在该区域沉积。因此考虑采用结构优化的方式,减小漩涡区面积,提高灌水器的抗堵性。

4 结构优化

4.1 方案 1

根据上述析结果,针对单元两侧的漩涡区,提出灌水器的结构优化方案,将两侧的尖角倒为圆角,减小漩涡区面积,改善水流情况,提高灌水器的抗堵性能。采用相同的进出口形式,优化结构如 5 所示。

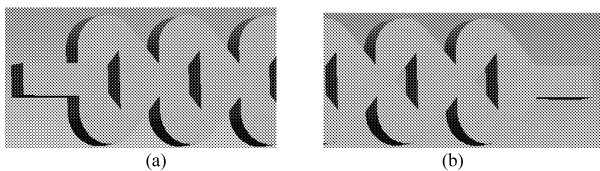


图 5 优化方案 1
Fig.5 Optimization program 1
(a) 进口段 (b) 出口段

采用相同的数值模拟设置,得出流量压力关系式为

$$q = 1.0107h^{0.4914} \quad (2)$$

对比表 2 和表 3 的模拟结果,优化后的流道流

量减小,流态指数变化不大。对比图 6 和图 4 的速度矢量图,优化结构两侧的漩涡区得到了明显改善,因此方案 1 可行。同时,绕流三角的一侧也存在明显的漩涡区,考虑采用其他的优化方案改善这一区的水流情况。

表 3 方案 1 模拟结果

Tab.3 Simulation result of the first program

压力 h/m	1	3	5	6	8	10
流量 $q/L \cdot h^{-1}$	1.009	1.736	2.232	2.439	2.807	3.128

4.2 方案 2

根据上述分析结果,针对绕流三角一侧的漩涡区,提出优化方案 2,将绕流三角的一条边改为弧形,减小漩涡区的面积,减小漩涡区面积,改善水流情况,提高灌水器的抗堵性能。采用相同的进出口形式,优化结构模型如图 7 所示,方案 2 模拟结果如表 4 所示。

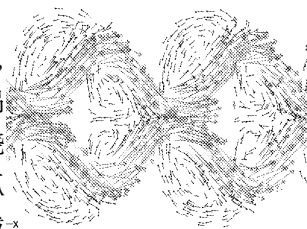


图 6 方案 1 速度矢量图
Fig.6 Velocity vector of the first program

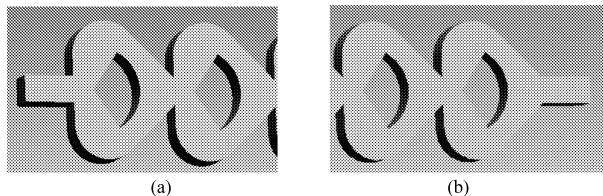


图 7 优化方案 2

Fig.7 Optimization of the second program
(a) 进口段 (b) 出口段

表 4 方案 2 模拟结果

Tab.4 Simulation result of the second program

压力 h/m	1	3	5	6	8	10
流量 $q/L \cdot h^{-1}$	1.314	2.267	2.916	3.189	3.674	4.100

采用相同的数值模拟设置,得出流量压力关系式为

$$q = 1.3154h^{0.4942} \quad (3)$$

4.3 结果对比

由以上模拟结果,对比前两种结构,方案 2 的流量明显增大,而流态指数相差不大。图 8 的速度矢量图显示,采用此种优化方案,绕流三角一侧的漩涡区面积明显减小,而流道其他处则没有受到显

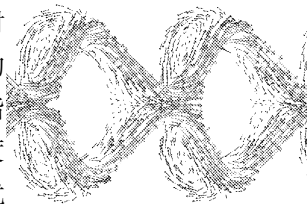


图 8 方案 2 速度矢量图
Fig.8 Velocity vector of the second program

著影响。因此,得出结论,此种优化方案对于改善绕流三角一侧的低速区效果非常明显,因此,可以对三角绕流灌水器采取方案2的优化方案。同时可发现,优化后的灌水器较之方案1,流量明显增大,但灌水器的水力性能有所降低,因此应该考虑改变灌水器的结构参数来控制灌水器的流量。

4.4 最终优化结构

改变方案2灌水器的结构单元尺寸,以减小灌水器的流量,获得较好的水力性能。结构单元的尺寸如图9所示。

利用 Fluent 6.3 对流道的流动进行数值模拟,分析流道的流动特性。最优方案结构参数和模拟结果分别如表5、表6所示。采用相同的模拟设置,得出流量压力关系式为

$$q = 0.621 3h^{0.4844} \quad (4)$$

表5 最优方案结构参数

Tab.5 Structural parameters of the optimal program

H/mm	a/mm	r_1/mm	r_2/mm	$R/(\circ)$	D/mm
2.84	1.0	0.5	1.3	35	0.7

表6 最优方案模拟结果

Tab.6 Simulation result of the best program

压力/m	1	3	5	6	8	10
流量 $q/L \cdot h^{-1}$	0.621	1.059	1.355	1.480	1.701	1.894

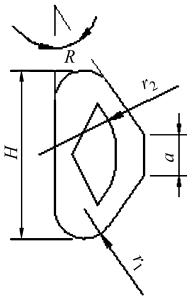


图9 灌水器单元结构图

Fig.9 Structure of emitter unit

上述结果显示,尺寸修改后的优化结构,相同压力下的流量显著减小,流态指数也有所减小,因此水力性能有所改善。由图10的速度矢量图,此流道内的速度分布,不存在明显的漩涡区,水流状态明显改善,提高了灌水器的抗堵性。

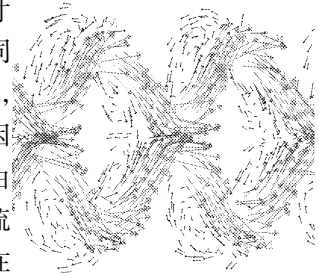


图10 最优方案速度矢量图

Fig.10 Velocity vector of the best program

5 结束语

利用数值分析的方法,对一种三角绕流灌水器流道结构进行了研究,并得出了最终的优化结构。结果表明,三角绕流流道纵向断面具有周期性的突然扩大及突然缩小的特性;在流道单元进出口及紧靠三角柱体的两侧形成主流区,在流道扩大端的两翼及三角柱体的尾端形成涡流区,使主流区的水流形成强烈紊动,有益于冲刷流道,增加灌水器的抗堵塞能力;水流的紊动及纵横排列的齿形结构,保证了灌水器具有高效的消能效果,有利于降低灌水器的流态指数,使滴水更加均匀。

由于灌水器两侧和绕流三角的一侧存在明显的漩涡区,长期使用,杂质会在此区域沉积,造成灌水器流道堵塞。因此要不断探索,通过结构优化,改变流道形式,消除流道中的漩涡区。灌水器结构抗堵性能,其实际应用情况如何,有待实验进一步改进。

参 考 文 献

- Madramootoo C A, Khatri K C, Rigby M. Hydraulic performances of five different trickle irrigation emitters[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1988, 30(1): 1~4.
- Yildirim G, Agiralioglu N. Linear solution for hydraulic analysis of tapered micro-irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 130(1): 78~87.
- 王建东,李光永. 齿形迷宫流道结构参数对滴头水力性能影响的试验研究[C]//第六次全国微灌大会论文汇编, 2005: 246~252.
- Nilsson H, Davidson L. Validations of CFD against detailed velocity and pressure measurements in water turbine runner flow[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2003, 41(8): 863~879.
- Palau S G, Arviza V J, Bralts V F. Hydraulic flow behaviour through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques[C]// ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, 2004.
- 文高峰,牛文全. 流道结构参数对滴头水力性能影响的模拟研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 84~86.
- 闫大壮,杨培岭,任树梅. 滴头流道中颗粒物质运移动态分析与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 71~74. Yan Dazhuang, Yang Peiling, Ren Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 71~74. (in Chinese)
- 石祥钟,于佐东,肖英奎. 水力机械 CAD-CFD 系统设计方法[J]. 农业与技术, 2005, 25(3): 142~144. Shi Xiangzhong, Yu Zuodong, Xiao Yingkui. The CAD-CFD system design method for hydro-machine[J]. Agriculture & Technology, 2005, 25(3): 142~144. (in Chinese)
- 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 Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1): 31~35. (in Chinese)