

滴灌灌水器低成本快速开发理论与方法研究

魏青松¹, 史玉升¹, 鲁俊¹, 董文楚², 黄树槐¹

(1. 华中科技大学塑性成形模拟及模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 灌水器尺寸微小, 形状复杂, 导致其开发周期过长(8~12个月), 费用过高(5~8万元人民币)。该文引入计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算流体动力学(Computer Fluid Dynamics, CFD)以及快速成形(Rapid Prototyping, RP)等先进技术, 提出了一种新型滴灌灌水器低成本快速开发途径。利用三维参数化CAD技术设计流道的结构模型; 基于CFD模型的数值模拟实现了灌水器水力特性的可视化分析功能, 大大减少了实物试验的迭代次数; 同时, 应用RP技术可以在不开钢模的情况下低成本快速地制取试验用灌水器, 并直接利用RP原型完成灌水器性能试验, 从而进一步降低其开发周期和成本。以自主开发的新型灌水器为例, 其开发周期与成本均降低50%以上。

关键词: 滴灌; 灌水器; 快速开发; 计算流体动力学; 快速成形

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)02-0017-05

魏青松, 史玉升, 鲁俊, 等. 滴灌灌水器低成本快速开发理论与方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 17-21.

Wei Qingsong, Shi Yusheng, Lu Jun, et al. Method and theory for rapid development of drip emitters for drip irrigation with low cost[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 17-21. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在节水灌溉中滴灌技术具有节水、增产、高效等优势^[1]。灌水器(如滴头等)作为滴灌系统中的核心部件, 占整个系统总成本的25%~35%, 其性能好坏和价格高低直接影响整个滴灌系统的推广应用和使用效果。Oron研究指出, 检测灌水器堵塞非常困难, 它将大大地增加滴灌系统的运行成本^[2]; Baman研究指出, 灌水器的损坏和堵塞将严重地影响滴灌系统的均匀度和工作效率^[3]; Sietan和Ali对滴灌系统的均匀度进行了系统的试验研究, 结果发现被堵塞灌水器的数量以及位置是影响滴灌系统均匀度的最主要因素^[4]。

灌水器在整个滴灌系统中十分重要, 所以研究如何低成本、快速地开发出高性能的灌水器显得尤为重要。为了避免灌水器批量生产过程中模具的多次修模、返工甚至失败所造成的损失, 可以在定型阶段利用快速成型(RP)技术低成本、快速地制取试验用灌水器, 这将有效减少灌水器的开发周期和成本, 同时也使灌水器的水力性能得到了及时的试验验证^[5-7]。

灌水器主要依靠其流道实现对水流的流量调节功能, 其流场特性直接影响和决定了灌水器的水力性能, 如流量均匀度以及抗堵塞能力等。但是, 滴灌灌水器所采用的流道尺寸都十分微小(1.0mm以下), 形状复杂, 利用现有的试验手段很难直接测量和观测其流场特

性。所以无论是由模具生产的注塑件还是RP原型件都只能进行一些宏观参量的测量, 如最常见的流量、压力特性, 而直接决定灌水器水力性能的流场特征在灌水器的整个开发过程中, 特别是前期水力计算阶段得不到有效的检测。针对这些问题, 本文在前人研究基础上引入CFD技术, 提出更为有效的灌水器低成本、快速开发途径, 并成功地开发出全新流道结构的高性能灌水器。

1 材料与方法

1.1 试验方法

计算机辅助设计(CAD)技术, 特别是参数化的三维设计实现了产品的可视化结构设计, 提高了产品模型的可塑性与直观性, 同时也使设计人员之间以及设计人员同加工、制造人员间的交流更为容易; 另外, 基于计算流体动力学(CFD)模型的数值模拟, 为难以用传统方法观测的流场特性提供了一个崭新的研究手段; 最后, 快速成型技术(RP)快速准确地将设计思想自动地转化为产品模型, 利用该技术可以实现功能件的无模制造, 从而大大降低新产品的开发周期和成本。本文在充分利用这些技术并在前人研究的基础上, 提出灌水器低成本快速开发途径如图1所示。

收稿日期: 2004-08-26 修订日期: 2004-12-08

基金项目: 863 重大专项 - 节水产品激光快速制造技术(2002AA 6Z3083); 华中科技大学研究生基金 - 滴灌灌水器微内流场数值模拟研究

作者简介: 魏青松(1975-), 男, 汉族, 湖北红安人, 博士生, 主要研究方向: 流体流动模拟, 节水产品快速开发理论与方法。武汉 华中科技大学材料学院快速成形中心, 430074。Email: wqs_xn@163.com

图 1 灌水器低成本快速开发途径

Fig 1 Economical and rapid process for emitter development

首先,应用 CAD 技术完成灌水器的结构设计,以三维参数化模型取代传统的二维图纸,使结构设计过程更为直观,修改和完善变得更为容易。基于 CFD 模型的数值模拟可视化了灌水器内流场中流体的复杂流动,以数字化的试验模型实现了灌水器水力性能的可视化验证,从而及时地纠正设计上存在的缺陷,达到灌水器结构优化的目的。其次,利用 RP 法低成本快速地生产出能供模具用户和制造商进行沟通 and 确认的灌水器 RP 原型,避免了对图纸信息理解的不一致性。同时,利用 RP 原型替代塑料件进行灌水器的实验室性能试验,完成产品结构的初步定型。最后,利用最优结构进行模具设计,进行灌水器的大批量生产。

1.2 灌水器内流场数值模拟

1) 理论分析

雷诺数常作为工程管路计算中判断流动状态的依据,其计算公式表示为

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3 ; V ——流体平均速度, m/s ; L ——流道截面尺寸, m ; μ ——流体粘度系数, m^2/s

充分考虑滴灌灌水器工作的实际情况,其内流场视为不可压缩稳态流,流体介质为水,密度 ρ 取 $1.0 \times 10^3 kg/m^3$,出水流量 Q 一般为 $1 \sim 10 L/h$,流道截面积 A 一般为 $10^{-6} m^2$ 数量级, L 取为 $10^{-4} \sim 10^{-3} m$,水流速度由 Q/A 计算得出 $V = 0.3 \sim 3.0 m/s$,水的粘度系数设为 $\mu = 10^{-6} m^2/s$,由式(1)可以计算得出灌水器内流场中流体流动雷诺数 $Re = 3.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^6$ 。

紊流状态时,流体各层间互相渗透,除沿流向的速度外,沿垂直于流动方向上还存在一个脉动速度。同层流相比,由于这种脉动现象的存在,使流阻显著增加,从而消耗了更多的能量,即内流场处于紊流状态时灌水器的消能效果更好一些。另外,由以上计算发现,灌水器内流体流速较慢,但雷诺数较高,加之灌水器的流道结构弯曲多变,所有这些因素都有利于水流从层流向紊流的转变。因此,无论是理论分析还是实际需要,采用紊流模型描述灌水器内流场都是科学和合理的。

2) 数学模型

本文采用紊流模型来建立灌水器内流场的数学模型,其各项参数设置如表 1 所示。

表 1 灌水器内流场数学模型各项参数

Table 1 Parameters of mathematics model of flow field inner the emitters

流体密度 $/kg \cdot m^{-3}$	流体粘度 $/m^2 \cdot s^{-1}$	流动状态	可压缩性	紊流模型
10^3	10^{-6}	稳态	不可压缩	$k - \epsilon$

3) 流道三维模型

本文设计的灌水器采用全新的连续涡体流道,这里只取一个单元流道作为研究对象,其三维结构模型如图 2 所示。主体部分由两种结构形式的流道组成,直槽和锥腔结构。每 2 个锥腔由直槽相连,且轴向相反。灌水器工作时,水由进水口进入流道,经直槽流入锥腔,而后再经直槽进入下一个锥腔,如此反复直至出水口。

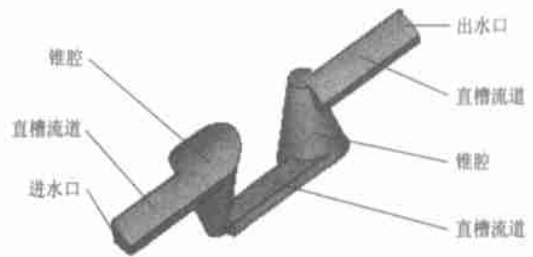


图 2 灌水器流道单元结构示意图

Fig 2 Cell structure of the emitter channel

4) 数值求解

以图 2 所示的结构模型作为求解域,首先对其进行网格化处理。由于流道结构复杂,为了提高流场数值模拟的精度,这里取空间四面体作为离散单元。经网格化处理后得到的流道网格模型如图 3 所示。数值模拟的边界以及初始条件,以灌水器的实际工作情形为依据,其具体设置为,在图 2 所示的进水口处施加 $10 m$ 的工作水头 ($P_1 = 10 m H_2O$),出水口设为大气压 (P_0),流道其他表面上将速度矢量设为零。最后,利用 SIMPLE 算法对流场 $k - \epsilon$ 紊流模型进行数值求解。

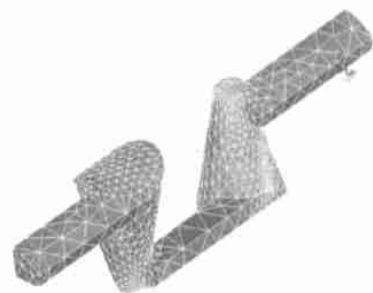


图 3 灌水器流道网格模型

Fig 3 Gridding model for the emitter channel

1.3 基于 RP 原型的灌水器性能试验

在灌水器内流场数值模拟的基础上,采用快速成形 (RP) 技术低成本快速地制造出试验用灌水器,如图 4 所示。灌水器流道采用图 2 所示的单元结构,镶于 1 个圆柱形的基体之上,套上塑料管后形成最终的连续涡体流道。这里只考虑流道中锥腔锥度对灌水器水力性能的影响,以 3 种结构形式的流道作为研究对象,其结构尺寸如表 2 所示。

表 2 灌水器流道尺寸

Table 2 Dimensions of the emitter channels

序号	圆柱基体直径/mm	锥腔大圆端面直径 D_1 /mm	锥腔小圆端面直径 D_2 /mm	锥腔锥度 $/D_1/D_2$	锥腔个数	直槽流道宽/mm	直槽流道深/mm
A	5	2	1	2	5	0.8	0.8
B	5	3	1	3	5	0.8	0.8
C	5	4	1	4	5	0.8	0.8

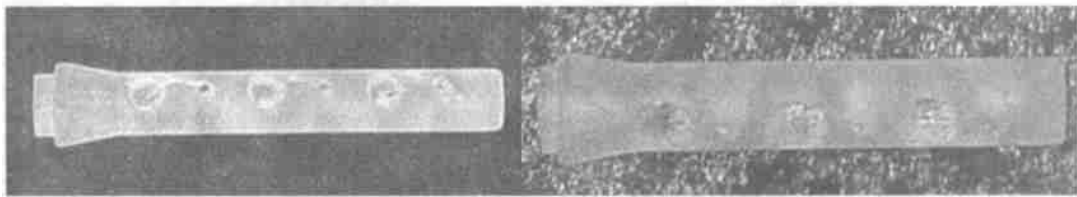


图 4 灌水器 RP 原型

Fig 4 Prototypes of the emitter

参照 ISO 9260 农业灌溉设备- 滴头- 试验方法^[8], 对 RP 法制作的 3 种型号灌水器进行流量- 压力关系特性试验, 采用 9 种工作水头, 共得到 27 组试验数据如表 3 所示。

表 3 流量- 压力关系特性试验数据

Table 3 Experimentation results of the relationship between discharge and pressure $L \cdot h^{-1}$

灌水器 序号	工作水头/mH ₂ O								
	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
A	4.3	5.47	6.13	6.8	7.55	8.17	8.78	9.39	9.85
B	4.16	5.04	5.93	6.63	7.3	7.9	8.43	8.8	9.08
C	3.84	4.41	5.02	5.66	6.21	6.69	7.13	7.56	7.95

0.4~0.5。该立体旋涡使水流具有较大的局部水头损失, 从而提高了流道的消能效果, 保证灌水器具有更高的出水均匀度。另外, 旋涡水流对流道的壁面具有直接的冲刷作用, 起到了流道的自冲洗功能, 从而提高了流道的抗堵塞性能。



图 6 灌水器内流场压力分布图

Fig 6 Pressure distribution of the flow inner the emitter

2 结果与分析

2.1 数值模拟结果与分析

完成数值求解后得到了灌水器流场的压力、速度分布如图 5、6 所示。从速度矢量分布情况可以清晰地看出灌水器的流场特征: 在锥腔部分中, 水流形成了复杂的立体旋涡, 表现出涡流的水力特征。同现在灌水器一般采用的迷宫流道(矩形、梯形、三角形流道)相比, 水流在流道中不再是一种单纯的紊流(流态指数为 0.5 以上)。复杂的立体涡流主宰了水流的流态特征, 其流态指数为

从图 6 中流场压力的分布情况可以看出, 沿水流方向流场压力呈现整体下降的趋势, 实现了灌水器的压力调节功能。在锥腔部分中存在着复杂的压力梯度, 垂直于轴线的端面上, 压力呈环状分布, 而轴向则为阶梯状。正是由于这种复杂流场压差的存在, 最终导致了图 5 所示的立体旋涡水流。而在连接锥腔的直槽部分中, 水流没有明显的压降。这一现象说明, 该种结构流道主要依靠锥腔部分实现灌水器的消能功能, 即锥腔结构直接决定着灌水器的消能效果。

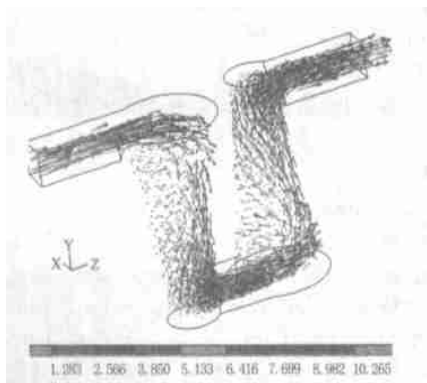


图 5 灌水器内流场速度矢量图

Fig 5 Velocity vector of the flow inner the emitter

从以上的分析可以看出, 流场模拟结果有助于理解灌水器的工作原理, 分析灌水器的水力特性。在流场模拟结果的基础上, 适当地调整和优化流道结构以获得更为合理的水流流态, 从而提高灌水器的水力性能。以本文讨论的涡体流道为例, 由于水流在锥腔部分中的局部水头损失决定了灌水器的消能效果, 所以要提高灌水器的水力特性, 就必须适当地调整锥腔的结构, 使水流产生更大的水头损失。

2.2 RP 原型性能试验结果与分析

灌水器流量- 压力关系特性是评价灌水器的重要指标之一, 其表达式为

$$q = kH^x \quad (2)$$

式中 k ——流量系数; q ——流量, L/h; H ——工作水头, mH₂O; x ——流态指数。对表 3 中记录的流量-压力关系试验数据作统计处理, 计算得出 3 种规格灌水器的流量关系式如表 4 所示, 其流量-压力关系曲线如图 7 所示。从试验结果可以看出, B、C 2 种型号灌水器的流态指数小于 0.5, 与前文流场模拟结果完全一致。

表 4 灌水器流量关系式

Table 4 Discharge equations of the emitter

灌水器序号	额定流量/L · h ⁻¹	流量关系式
A	6.13	$q = 1.91H^{0.507}$
B	5.93	$q = 1.88H^{0.498}$
C	5.02	$q = 1.74H^{0.460}$

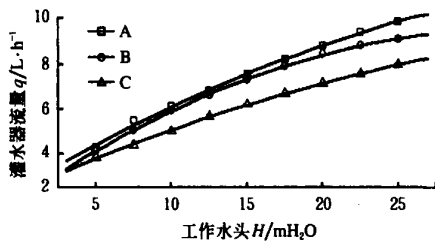


图 7 灌水器流量-压力关系特性曲线

Fig. 7 Relationship between discharge and pressure of the emitters

在相同工作水头的情形下, 随着流道锥腔部分锥度的增大, 灌水器的出水流量与流态指数反而减小。从数值模拟结果可以发现, 该种流道主要是依靠锥腔中的立体旋涡实现其消能功能。当锥腔锥度越大时, 其中水流形成的旋涡越激烈, 所造成的水头损失 (ΔH_i) 也就越大, 3 种型号灌水器的能量损失表示为:

$$\Delta H_C > \Delta H_B > \Delta H_A \quad (3)$$

在流道的进水口处施加一个工作水头, 这相当于赋予水流一定的初始能量 (H_0), 出水口水流的能量设为 H , 其关系式表示为

$$H = H_0 - \Delta H_i \quad (4)$$

从上式可以得出: 当工作水头一定时, 即 H_0 固定不变, ΔH 越大, H 就越小。出水口水流的能量主要表现为动能 (即 $H = \frac{1}{2}mv^2$), 所以, H 越小说明水流的流速越小。灌水器的出水流量 q 同流速成正比, 将式 (3) 代入 (4) 可以得出结论: $q_A > q_B > q_C$ 。另外, 流道中锥腔锥度的增大将增强水流的漩涡特征, 从而减小了水流的流态指数 x , 所以, A、B、C 3 种流道灌水器的流态指数 $x_A < x_B < x_C$ 。

依据数值模拟以及 RP 原型试验结果与分析, 适当地增大锥腔的锥度将有利于改善灌水器的水力性能。在以上分析的基础上, 取 C 型结构作为最终灌水器的流道形式, 进行灌水器注塑模具设计与制造, 其产品如图 8 所示。在实验室中进行灌水器性能试验, 得到最终产品的流量-压力曲线如图 9 所示, 其结果与上文的相关结果和分析完全吻合。

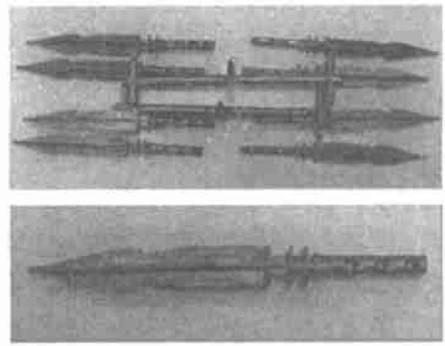


图 8 连续涡体流道灌水器注塑件

Fig. 8 Plastic emitters with the eddy channel

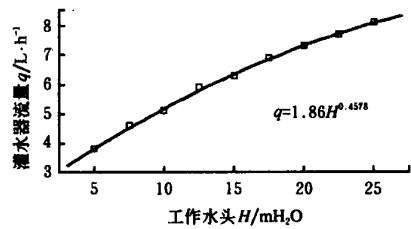


图 9 C 型流道灌水器产品的流量-压力关系

Fig. 9 Relationship between discharge and pressure of the plastic emitters

3 结 论

利用计算机辅助设计 (CAD)、计算流体动力学 (CFD) 以及快速成形 (RP) 等先进技术来辅助新型高性能灌水器的低成本快速开发, 使其开发周期以及成本降低达 50% 以上。

基于 CFD 模型的数值模拟实现了灌水器微小流道中流体的复杂流动, 为灌水器的水力特性提供了一个科学的研究手段。数值模拟得到了灌水器流场的速度、压力分布等可视化结果, 这有助于理解灌水器的工作原理, 分析灌水器的消能效果, 进而辅助灌水器的结构定型。

利用 RP 法可以低成本快速地制造试验用灌水器原型。直接利用 RP 原型代替灌水器的实物产品进行性能试验, 在无需制造钢模的情况下实现了灌水器的结构选型与性能验证, 从而极大地提高了模具制造的成功率, 增强了新型流道高性能灌水器的研发能力。

[参 考 文 献]

[1] Localized irrigation-design, installation, operation, evaluation [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1980: 203

[2] Oron G, DeMalach J, Hoffman Z, et al. Subsurface micro irrigation with effluent [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1991, 117(1): 25-36

[3] Boman B J. Ant impairment of Florida micro irrigation systems [J]. Applied Engineering in Agriculture, ASAE, 2001, 17(6): 797-802

[4] Sietan C, Ali G. Uniformity in a micro irrigation with partially clogged emitters [J]. ASAE Paper No. 032097. St. Joseph, Mich: ASAE, 2003: 1-11.

- [5] 史玉升, 魏青松, 鲁俊, 等. 农业节水产品(灌水器)低成本快速开发方法研究[J]. 节水灌溉, 2004, (5): 31- 32
- [6] Wei Zhengying, Wang Xinkun, Tang Yiping, et al. Rapid finalization for drip irrigation emitters based on rapid prototyping and manufacturing[J]. Transactions of the CSAE, 2002, (9): 102- 105
- [7] 王瑞环, 魏正英, 赵万华. 基于 RP 技术的滴灌用灌水器滴头的快速定型[J]. 机械设计, 2003, (2): 9- 10
- [8] Agricultural irrigation equipment-emitters-specification and test methods[M]. ISO. 1991.

Method and theory for rapid development of drip emitters for drip irrigation with low cost

Wei Qingsong¹, Shi Yusheng¹, Lu Jun¹, Dong Wenchu², Huang Shuhua¹

(1. State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to decrease the period and cost of emitter development, some advanced technologies, such as computer aided design (CAD), computational fluid dynamics (CFD) and rapid prototyping (RP), were used to establish a process of drip emitters with low cost. The three-dimensional parameterized channel model for drip emitters was designed using the method of CAD. The function used for visually analyzing the hydraulic performance of emitters, was realized by numerical simulation based on CFD, which greatly reduced the times of the iterative experimentation using practical emitter products. Additionally, using the technology of rapid prototyping, the emitter prototypes for experimentation can be rapidly manufactured without steel moulds, and the experimentation can be directly performed with these prototypes. Then, the period and the cost of the emitter development could be reduced. Taking the emitter developed by the authors for an example, the results indicated that the development period and cost were decreased more than fifty percent.

Key words: drip irrigation; emitter; rapid development; computer fluid dynamics; rapid prototyping