

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.08.013

微灌用网式过滤器数值模拟与结构优化

王新坤, 高世凯, 夏立平, 许鹏

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)



王新坤

摘要: 针对微灌用网式过滤器研究主要集中在水力性能试验研究方面,以进口直径为 50 mm 的阿速德(AZUD)普通微灌网式过滤器为研究对象,利用 Pro/E 软件完成过滤器的三维造型,基于计算流体动力学软件 Fluent 6.3,采用多孔介质模型对过滤器内部流场进行数值模拟,得到了过滤器内部的速度分布和水力特性.为了增强数值模拟的可靠性,将模拟计算结果与试验结果对比,最大偏差和平均偏差分别为 7.4% 和 4.1%,具有较好的吻合性,证实了数值模拟的可行性,可用于微灌网式过滤器的结构优化.在保证滤网面积与进口直径不变的前提下,优化过滤器筒体形状、进出口位置和进出口角度,改善过滤器内部流场分布,提高速度分布的均衡性和均匀性,延长滤网使用寿命.优化模拟结果表明水头损失降低 69%,滤网过滤面上上下两侧最大平均速度差由 1.0 m/s 减小为 0.1 m/s.

关键词: 网式过滤器;多孔介质;水头损失;数值模拟;结构优化

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)08-0719-05

王新坤,高世凯,夏立平,等.微灌用网式过滤器数值模拟与结构优化[J].排灌机械工程学报,2013,31(8):719-723.

Numerical simulation and structural optimization of screen filter in micro-irrigation

Wang Xinkun, Gao Shikai, Xia Liping, Xu Peng

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The research of micro-irrigation screen filter was mainly concentrated in hydraulic performance test. Computational fluid dynamics software Fluent 6.3 was adopted to simulate the flow and analyze the hydraulic performance of a 2 inches AZUD micro-irrigation screen filter. The screen was predigested as a porous media, and the models were built by 3D software Pro/E. Results show that the simulated results and experiment results agree well with each other. The maximum relative deviation was 8%, and averaged relative deviation was 4.4%. The filter internal flow distribution, the balance of screen velocity distribution and the filter life have been improved by optimizing inlet and outlet location, inlet and outlet angle and filter shapes under the same filter area and inlet diameter. Optimization results show that the head loss is reduced by 69% and the maximum speed difference between both sides on screen filter surface is decreased from 1.0 m/s to 0.1 m/s.

Key words: screen filter;porous media;head loss;numerical simulation;structural optimization

微灌系统中灌水器出水孔一般都比较小,要求微灌用水中污物和杂质不能造成灌水器堵塞,而过滤器

是保证灌水器不被堵塞的关键技术设备.网式过滤器结构简单,小巧轻便,过滤效率高,价格低

收稿日期:2012-08-15;网络出版时间:2013-07-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130720.0935.009.html>

基金项目:国家863计划项目(2011AA100506);农业科技成果转化资金资助项目(2011GB2C100015)

作者简介:王新坤(1966—),男,陕西临潼人,研究员,博士生导师(xjwxk@126.com),主要从事节水灌溉理论与技术研究.

高世凯(1988—),男,河南上蔡人,硕士研究生(igaoshikai@163.com),主要从事过滤器设计和研究.

廉,是微灌工程应用最为广泛的一种过滤装置^[1].结构和尺寸等因素决定了网式过滤器的出流稳定性、水头损失等水力性能,水力性能的优劣对微灌系统的造价、能耗、灌水质量及使用寿命等具有重要作用.国外关于过滤器水力性能研究的论文极为少见^[2-3].国内许多学者利用试验对微灌过滤器水力性能进行了研究^[4-6],并在过滤结构、设计理论、过滤自动化等方面取得了诸多成果^[7-8],但是采用计算流体力学(CFD)软件模拟研究内部流场分布和优化的论文极少.文中利用数值模拟方法分析普通网式过滤器的内部流场和水力性能,优化过滤器结构,为过滤器的优化设计提供理论依据.

1 数值计算

1.1 结构模型

选取进口直径 50 mm 的阿速德(AZUD)普通网式过滤器为研究对象,图 1 为过滤器二维结构图,进口直径 $D_1 = 50$ mm,滤网直径 $D_2 = 80$ mm,滤筒内径 $D_3 = 140$ mm,滤网长度 $L = 195$ mm,进口夹角 $\alpha = 45^\circ$.滤网目数为 100, X 和 Z 为坐标轴.

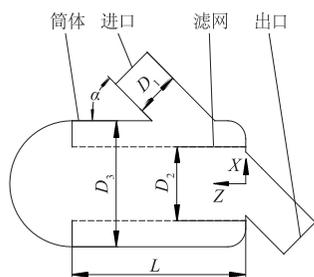


图 1 过滤器二维结构图

Fig. 1 2D structure of filter model

1.2 边界条件及多孔介质模型参数设置

建立过滤器的几何模型,利用 Gambit 2.3 进行网格划分.将网格导入 Fluent 6.3 软件中,采用标准壁面函数法筒体壁面进行处理,紊流模型选择目前通用的标准 $k-\varepsilon$ 模型,数值计算采用定常的非耦合隐式算法,速度耦合采用 SIMPLE 算法^[9-10],压力项等采用一阶迎风差分格式.过滤器进口采用质量流量条件,出口压力设为压力出口,残差标准设置为 1.0×10^{-4} .

由于滤网直接进行三维造型较复杂,把滤网筒化为多孔介质,李娟等^[11]对于多孔介质模型做了大量理论研究.多孔介质模型参数^[12]为

$$a = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2}, C_1 = 1/a, \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3}, \quad (2)$$

式中: a 为渗透率; D_p 为粒子的平均直径; ε 为空腔比例; C_1 为内部阻力系数; C_2 为惯性损失系数.

根据式(1),(2),结合 100 目滤网相关参数,计算出内部阻力系数为 3.6×10^9 ,惯性阻力系数为 1.1×10^4 .

2 计算结果及分析

过滤器水头损失是指清洁水流通过时,过滤器两端口之间的水头降,它包括过滤器元件、过滤器进口、出口等引起的沿程水头损失和局部水头损失.由于水流状态在过滤器中比较复杂,因此,规定在设计流量情况下,过滤器进出口之间的总水头差即为设计水头损失.

一般情况下,水头损失与过滤流量之间关系式为

$$\Delta h = kQ^x, \quad (3)$$

式中: Δh 为过滤器的进口至出口处的总水头损失, m; k 为水头损失系数,与过滤器的形状、滤网的有效面积系数有关; Q 为过滤器流量, m^3/h ; x 为水头损失指数,反映了水头损失对流量变化的敏感程度.

2.1 模拟结果

取进口流量为 5, 10, 15, 20, 25 m^3/h , 得到水头损失分别为 0.07, 0.03, 0.55, 0.97, 1.49 m.

根据所得结果求出过滤器流量—水头损失特征曲线,据此拟合出网式过滤器流量与水头损失的关系式为

$$\Delta h = 0.0039Q^{1.8518}. \quad (4)$$

2.2 内部流场分析

图 2 是设计流量 25 m^3/h 下过滤器的速度 v 分布图,进口两侧产生旋涡,水流中携带的杂质容易在该区域沉积,导致过滤效率降低.在过滤器出口处,由于管道面积的突然缩小,产生旋涡.

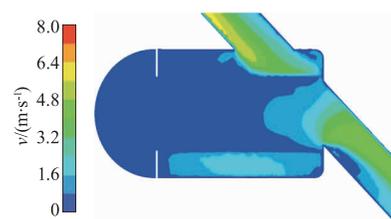


图 2 速度分布图

Fig. 2 Velocity distribution

对滤网靠近进水口的一面,即滤网进水面平均

速度分布进行分析,计算过滤进水面 X 正向和负向两侧沿过滤器轴向不同位置的平均速度,如图3所示,滤网过滤进水面两侧速度差很大,最大速度差达 1.0 m/s ,且过滤面两侧速度沿滤网 Z 轴分布不均匀,易造成过滤面局部渗透率增大,整个过滤面过滤不均匀,导致过滤效率降低。

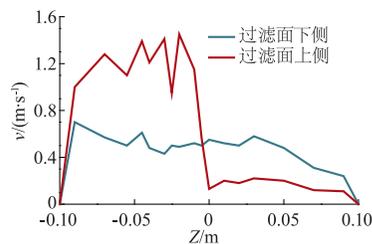


图3 滤网过滤进水面两侧速度分布对比
Fig. 3 Comparison of velocities of both sides on filtering surface

3 试验结果与验证分析

3.1 试验概况

为了验证数值模拟的可行性,将进口直径为 50 mm 的阿速德(AZUD)微灌网式过滤器进行了水力性能试验.试验在江苏大学流体中心喷灌大厅进行,试验系统由水泵、管道、阀门、过滤器、精密压力表和电磁流量计组成,试验装置如图4所示。

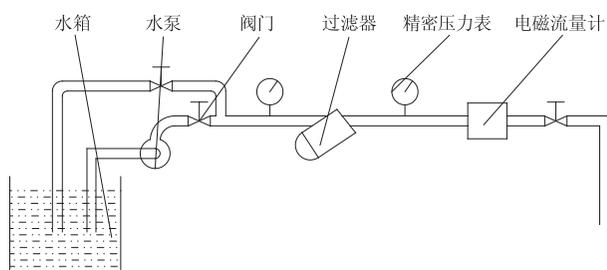


图4 试验系统示意图
Fig. 4 Schematic drawing of experiment system

3.2 试验方法

过滤器滤网采用 100 目,按照图4装置进行试验,试验中需保证水箱中无污物存在.试验开始后,阀门调节过滤器过流量.当过滤器工作正常后,即压力表示数达到稳定值后,记录其示数,取该流量下多组数据的水头损失平均值,流量设定值分别为 $5, 10, 15, 20, 25 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3 试验结果验证分析

$5, 10, 15, 20, 25 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量下的水头损失试验结果分别为 $0.07, 0.27, 0.57, 1.00, 1.60 \text{ m}$.对比模拟结果中的水头损失可以得出,试验的水头损失值

都要比数值模拟值大一些,最大偏差和平均偏差分别为 7.4% 和 4.1% .

这是由于实际模型中滤网存在很多小孔,流体流过小孔时,孔与孔之间会出现一些回流、绕流现象,在整个流道中同一截面上的速度、压强并不均匀.而多孔介质模型则不存在这个问题,它在同一截面上的速度和压强完全一致。

为便于进一步比较分析模拟结果与试验结果,将试验与模拟水头损失曲线进行对比,如图5所示,根据试验曲线拟合出流量水头损失关系式为

$$\Delta h = 0.0032Q^{1.9036} \quad (5)$$

试验结果与模拟结果的指数相差不大,水头损失系数相差 0.0007 .过滤器水头损失数值模拟曲线与实际曲线变化趋势基本相吻合。

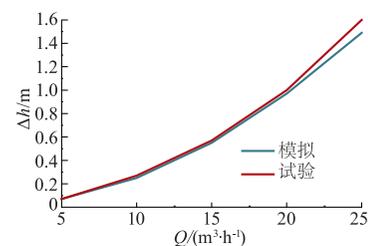


图5 数值模拟结果与试验结果对比
Fig. 5 Comparison between numerical results and test results

由以上的分析可知,模拟结果与试验结果相差不大,具有较好的吻合性.因此,可以采用数值模拟对过滤器内部流场分析和结构优化。

4 结构优化

4.1 方案1

根据上述分析结果,针对进口左右两侧的旋涡区和最大速度差较大,提出优化方案1.改变进出口方向,夹角 α 为 60° .采用相同的数值模拟设置,得出 $5, 10, 15, 20, 25 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量下的水头损失值分别为 $0.06, 0.23, 0.50, 0.88, 1.36 \text{ m}$.水头损失与流量拟合的关系式为

$$\Delta h = 0.0027Q^{1.9376} \quad (6)$$

与模拟结果进行对比,改变进出口方向后,水头损失减小,指数变化不大.因此方案1可行.图6为 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量下方案1速度分布图。

对比图6和图2可知,改变进出口方向后,旋涡区没有明显变化.滤网过滤进水面两侧速度分布见图7.与图3相比,过滤面两侧速度分布没有明显改善.因此,考虑其他优化方案改善水流状态。

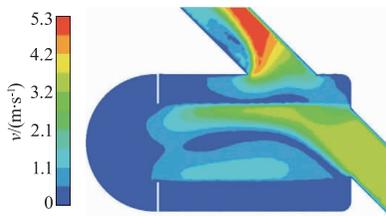


图6 方案1速度分布云图
Fig.6 Velocity distribution of first program

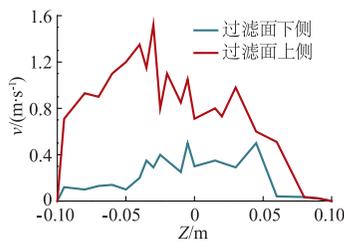


图7 方案1过滤面两侧速度分布对比
Fig.7 Comparison of velocities of both sides on filtering surface of first program

4.2 方案2

根据上述分析结果,针对边角、出口和进口两侧旋涡,提出优化方案2.采用方案1的进出口方向,过滤器整体高度不变,将右端改为球形结构,进出口与筒体相交处倒圆角,夹角 α 为 30° .

采用相同的模拟设置,得出设定流量下的水头损失值分别为0.04,0.13,0.28,0.46,0.74 m.水头损失与流量拟合的关系式为

$$\Delta h = 0.0021Q^{1.8029}. \quad (7)$$

4.3 结果对比

由以上模拟结果,对比前2种结构,水头损失明显降低,指数减小. $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量下方案2速度分布图如图8所示,与图6相比可以看出,边角和出口处旋涡区域减小.滤网过滤进水面两侧速度分布曲线如图9所示.

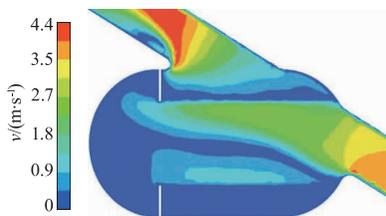


图8 方案2速度分布云图
Fig.8 Velocity distribution of second program

过滤面上下两侧最大速度差约 0.6 m/s ,滤网两侧速度沿滤网长度方向速度分布均匀性得到提高.因此,可以对网式过滤器采取方案2的优化方

案.同时发现,优化后滤网内部存在明显的旋涡区,可以考虑进一步改变进出口角度来优化内部流场.

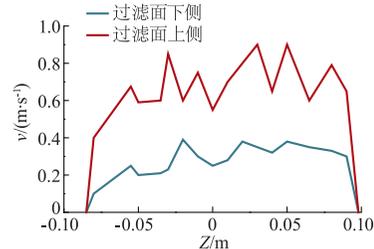


图9 方案2过滤面两侧速度分布对比
Fig.9 Comparison of velocities of both sides on filtering surface of second program

4.4 最终优化结构

根据方案2分析结果,保证滤网面积和进出口尺寸不变,维持过滤器设计流量不变,改变进出口角度及进出口位置,以获得较好的水力性能和速度分布.得出设定流量下的水头损失值分别为0.03,0.09,0.18,0.30,0.45 m.水头损失与流量拟合的关系式为

$$\Delta h = 0.0019Q^{1.6808}. \quad (8)$$

上述结果显示,最终优化结构在相同流量下的水头损失显著减小,指数也有所减小.图10是 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量下最终方案速度分布图,此过滤器内部,不存在明显的旋涡区,水流状态明显改善.速度分布曲线如图11所示.

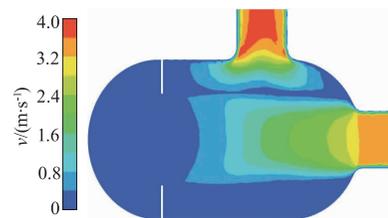


图10 最终方案速度分布图
Fig.10 Velocity distribution of final program

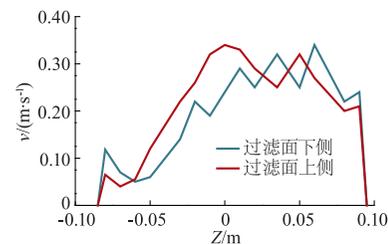


图11 最终方案过滤面两侧速度分布对比
Fig.11 Comparison of velocities of both sides on filtering surface of final program

滤网过滤面上下两侧最大速度差为 0.1 m/s ,表明滤网两侧速度分布较均衡;速度沿滤网轴向分

布更加均匀,滤网的有效过滤面积增加,过滤效率提高.

5 结 论

1) 将滤网简化为多孔介质模型,采用 CFD 方法对过滤器内部流场和水力性能进行模拟计算,得出设计流量下的速度分布云图、滤网靠近进水口一面的上下两侧的速度曲线图和水头损失.反映了过滤器内部的旋涡区和速度沿滤网分布的均衡性和均匀性.结果表明模拟结果与试验结果吻合较好,证实了数值模拟方法预测过滤器性能的可行性.

2) 优化过滤器进出口位置、筒体形状和进出口角度,改善了过滤器内部流场分布,滤网靠近进水口一面的上下两侧平均速度得到均衡,流速降低,过滤面积利用效率增加,可以延长滤网的使用寿命.模拟结果表明水头损失降低 69%,滤网过滤面上下两侧最大平均速度差减小为 0.1 m/s.

3) 缩短了过滤器的设计周期,减少过滤器的试验次数,为过滤器的优化设计提供了参考依据.

参考文献 (References)

- [1] 姚振宪,何松林.滴灌设备与滴灌系统规划设计[M].北京:中国农业出版社,1999:39-45.
- [2] Puig-Bargues J, Barragan J, de Cartagena F R. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in micro-irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92 (3): 383-390.
- [3] Capra A, Scicolone B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004(68):135-149.
- [4] 刘焕芳,郑铁钢,刘飞,等.自吸网式过滤器过滤时间与自清洗时间变化规律分析[J].农业机械学报,2010,41(7):80-83.
Liu Huanfang, Zhen tiegang, Liu Fei, et al. Analysis of filtering time and sewage time for automatic suction screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):80-83. (in Chinese)
- [5] 徐茂云.微灌用筛网过滤器水力性能的试验研究[J].水利学报,1992,23(3):54-56.
Xu Maoyun. The experimental study on hydraulic performance of screen filter in micro irrigation[J]. China Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 23(3):54-56. (in Chinese)
- [6] 肖新棉,董文楚,杨金忠,等.微灌用叠片式砂过滤器性能试验研究[J].农业工程学报,2005,21(5):81-84.
Xiao Xinmian, Dong Wenchu, Yang Jinzhong, et al. Experimental study on characteristics of laminated sand filter for micro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5):81-84. (in Chinese)
- [7] 孙新忠.离心筛网一体式微灌式过滤器的试验研究[J].排灌机械,2006,24(3):20-23.
Sun Xinzhong. Experiments on integral centrifugal screen panel and micro-irrigation filter[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(3):20-23. (in Chinese)
- [8] 刘焕芳,刘飞,谷趁趁,等.自清洗网式过滤器水力性能试验[J].排灌机械工程学报,2012,30(2):203-208.
Liu Huanfang, Liu Fei, Gu Chenchen, et al. Experiment on hydraulic performance of self cleaning screen filter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2):203-208. (in Chinese)
- [9] 向清江,袁寿其,何培杰,等.液气射流泵内部流场的数值计算[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(3):231-235.
Xiang Qingjiang, Yuan Shouqi, He Peijie, et al. Numerical simulation of liquid jet gas pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(3):231-235. (in Chinese)
- [10] 杨敏官,孙鑫恺,高波,等.离心泵内部非定常空化流动特征的数值分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(4):407-413.
Yang Minguan, Sun Xinkai, Gao Bo, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating flow characteristic in centrifugal pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(4):407-413. (in Chinese)
- [11] 李娟,石玉美,汪荣顺.不同温度下丝网过滤器的渗透性试验研究[J].工程热物理学报,2009,30(10):1059-1661.
Li Juan, Shi Yumei, Wang Rongshun. Experimental investigation of the permeability of stainless steel wire mesh filter at different temperatures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(10):1059-1661. (in Chinese)
- [12] 姬宝强.壁流式陶瓷颗粒过滤器结构特性分析[D].大连:大连理工大学能源与动力学院,2008.