

# 基于CFD的V型滤池进水分配渠配水均匀度优化

林慧萍<sup>1</sup>, 许仕荣<sup>1</sup>, 黄茂林<sup>2</sup>, 杨学伟<sup>2</sup>, 陈 蕃<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

**摘 要:** 利用 FLUENT 中的流体体积 (VOF) 模型和  $k-\varepsilon$  湍流模型, 对某自来水厂 V 型滤池的进水分配渠内部的带自由液面的流体进行计算流体动力学 (CFD) 模拟, 并通过调整进水管位置以及配水堰的堰高和堰宽等, 对其配水均匀度进行优化。模拟结果表明, 调整进水管的位置对配水均匀度的改善效果不大; 而调整配水堰的堰高和堰宽均能将进水分配渠的配水均匀度提升 10% 以上。VOF 带复杂表面的多相流模型可作为水厂水处理构筑物结构设计及优化的理论工具。

**关键词:** 计算流体动力学; V 型滤池; 进水分配渠; 配水均匀度; 水力优化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0059-05

## Optimization of Water Distribution Uniformity of Inlet Distribution Channel in V-type Filter Based on CFD

LIN Hui-ping<sup>1</sup>, XU Shi-rong<sup>1</sup>, HUANG Mao-lin<sup>2</sup>, YANG Xue-wei<sup>2</sup>, CHEN Fan<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. China Machinery International Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** The fluid with free surface in the inlet distribution channel of a V-type filter in a water treatment plant was simulated by computational fluid dynamics (CFD) through using volume of fluid (VOF) model and turbulence model in FLUENT. The uniformity of water distribution was optimized by adjusting the inlet pipe position of the channel, the weir height & width of the distribution weir and so on. The simulation results showed that adjusting the position of the inlet pipe had little effect on the improvement of water distribution uniformity of the inlet distribution channel, while adjusting the weir height and width could increase the water distribution uniformity by more than 10%. VOF multi-phase flow model with complex surface provides a theoretical tool for the design and optimization of water treatment structures in waterworks.

**Key words:** computational fluid dynamics; V-type filter; inlet distribution channel; uniformity of water distribution; hydraulic optimization

V 型滤池是快速滤池的一种, 由于其采用气水反冲洗加横向表面扫洗技术, 反冲洗效果良好, 不仅提高了滤池的过滤周期, 同时还大幅度减少了冲洗

水量, 因此近年来被国内水厂广泛采用。其设计、施工安装和运行管理技术已十分成熟, 但有些设计还存在一定的问题, 导致滤池调试麻烦、运行不正常、

基金项目: 中国机械设备工程股份有限公司科技研发基金资助项目 (CMEC-KJYF-2015-04); 中机国际工程设计研究院有限责任公司科技研发基金资助项目

投资偏高<sup>[1]</sup>。例如,此种滤池多采用前端进水分配渠和溢流堰对多格滤池进行配水,以达到均匀配水的目的。但在水厂实际运行中,由于渠道水流的水头损失,导致进水渠首尾两端的水位不同,常出现各格滤池间配水不均匀的现象<sup>[2-3]</sup>。配水均匀度随着滤池的运行负荷增加而不断下降,有时甚至低至50%,导致尾端滤池的滤速大大超出设计值,存在过滤杂质穿透滤层的风险,出水水质下降;而前端滤池负荷较低,制水能力富余造成浪费<sup>[3]</sup>。

为了提高V型滤池进水分配渠的配水均匀度,目前主流的设计中多采用双向配水的方式(即从进水渠中部进水),并在各滤池的进水堰顶部设置溢流水位调节板<sup>[2]</sup>,在现场试运行,人工进行调节堰高,在实际运行中确实收到了较为不错的效果,但由于缺乏推荐调节参数,导致人工调试时较为盲目,颇为耗费时间和精力。为此,笔者利用计算流体力学(CFD)技术建立流体体积(VOF)气水两相流模型,对V型滤池进水分配渠的配水过程进行数值模拟,深入探讨进水分配渠水面升高对配水均匀度的影响,并对比以不同方式优化分配渠构造后滤池配水均匀度的变化,以期为V型滤池配水结构的设计及优化提供参考。

## 1 数学模型

### 1.1 V型滤池进水分配渠的几何模型

某自来水厂一期工程的设计供水量为 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水厂自用水系数 $k=1.05$ 。水厂设置V型滤池1座,处理水量为 $4\,375 \text{ m}^3/\text{h}$ 。共8格滤池,分成对称两组,每组4格滤池共用一个单侧进水管导流,通过配水闸孔和侧堰溢流的方式对4格滤池配水,每格滤池的设计流量为 $151.9 \text{ L/s}$ 。进水分配渠的结构如图1所示。

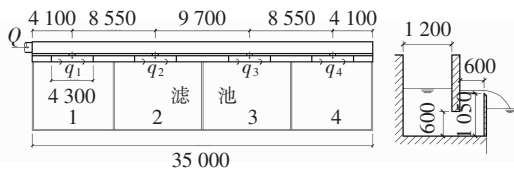


图1 进水分配渠结构示意图

Fig. 1 Structure of water inlet distribution channel

进水渠横断面为宽度 $B=1.20 \text{ m}$ 的矩形,前端采用圆管进水,管径 $d=1.0 \text{ m}$ ,配水孔的尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ ,配水孔间距分别为 $l_1=8.55 \text{ m}$ 、 $l_2=9.70 \text{ m}$ 。侧堰采用统一的堰宽 $b=4.30 \text{ m}$ ,以渠底为基

准,堰顶高度 $h=1.05 \text{ m}$ 。

进水分配渠几何模型采用实际尺寸并通过适当简化后得到,如图2所示。

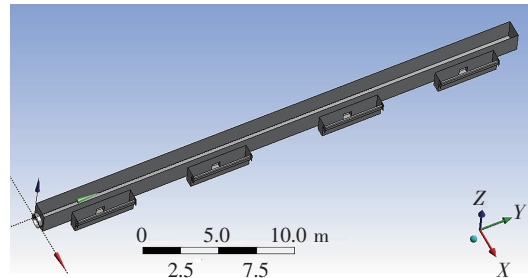


图2 进水分配渠几何模型示意

Fig. 2 Geometric model for water inlet distribution channel

### 1.2 湍流模型

20℃时计算得到进水分配渠内平均雷诺数大于2 300,为湍流。对于带有复杂自由表面的气水两相流(包括明渠流和堰流等),许多国内外学者通过对CFD模拟结果和试验结果的对比,证明了利用VOF气水两相流及 $k-\varepsilon$ 湍流模型可以较高精度地模拟出自由表面及流场特征<sup>[3-7]</sup>。同时,陈义春等<sup>[8]</sup>也通过此模型的模拟,成功解决了金西水厂改造后,由于渡槽后阶的快滤池进水渠道水毁导致的首端滤池不进水的问题。故在前人研究的基础上,本研究采用VOF气水两相流模型,并选用带旋流修正的 $k-\varepsilon$ 模型来计算湍流。

### 1.3 边界条件和控制方程

入口设在圆管处,选用速度入口,经计算得: $v=0.774 \text{ m/s}$ ,湍流强度为2.898%,水力直径为 $1.0 \text{ m}$ 。渠内的壁面,统一采用无滑移壁面边界条件并选用标准壁面函数。除入口和壁面外,所有敞口因与大气相通,均选用压力出口,出口压强设为1个标准大气压即 $101.325 \text{ kPa}$ 。

选用非稳态基于压力的PISO求解算法,对流插值采用二阶迎风格式,梯度插值采用基于单元体的最小二乘法,压力插值采用PRESTO!算法,收敛残差均为 $10^{-4}$ 。

## 2 原进水分配渠模拟结果分析

根据模拟结果,各滤池的分配渠水位分别为1.121、1.124、1.128、1.131 m,配水流量分别为135.9、144.1、158.9、169.1 L/s。分配渠水位沿程不断升高,在堰高相同的情况下,相应各进水堰的堰上水头也不断升高,这与曾扬<sup>[2]</sup>、陈金锥<sup>[9]</sup>等人的

水厂实测数据及推测结论(趋势)相符。根据堰流基本公式  $Q = mb\sqrt{2gH_0^{3/2}}$  可知,当堰的流量系数  $m$  和堰宽  $b$  不变时,堰上水头增加必将导致过堰的流量增加。因此推断:由于进水渠水面沿程不断升高造成各配水堰的堰上水头不断增加,最终导致了配水不均匀现象的发生,且越靠后的滤池进水流量就越大。最前端滤池的进水流量为 135.9 L/s,最后一格滤池的进水流量为 169.1 L/s,配水均匀度  $\eta = q_{\min}/q_{\max} = 80.4\%$ 。

### 3 优化方案

为提高各格滤池间的配水均匀度,拟通过调整进水管的位置、各滤池配水堰的堰高和堰宽等方法,对V型滤池进水分配渠的结构进行优化。

#### 3.1 调整进水管的位置

将原来的进水管从进水渠的一端改到进水渠中部,由中间向两侧双向对称配水(如图3所示),使流经进水渠及单边配水的滤池格数减半,以期减少分配渠水位的变化。其余部分的结构尺寸及模拟条件均保持不变。

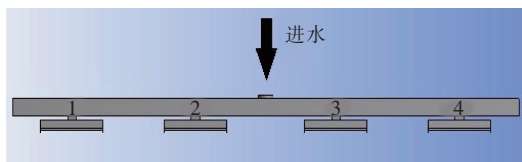


图3 进水管位置示意

Fig.3 Schematics of inlet pipe position

#### 3.2 调整各格滤池的配水堰堰高

根据原进水分配渠的模拟结果,对各格滤池前端的配水堰堰高进行调整,以期改善分配渠因水面升高而导致的堰上水头变化。以1号配水堰的高程为基准,之后各格滤池配水堰的堰顶高度按照表1中的数据进行调整。其余结构尺寸及模拟条件均保持不变。

表1 分配渠水位及配水堰堰高调整

Tab.1 Water level of distribution channel and height adjustment of water distribution weir

| 配水堰编号      | 1     | 2     | 3     | 4     |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 调整前分配渠水位/m | 1.121 | 1.124 | 1.128 | 1.131 |
| 水位沿程变化量/mm | 0     | +3    | +7    | +10   |
| 堰高调整量/mm   | 0     | +3    | +7    | +10   |
| 调整后堰高/m    | 1.050 | 1.053 | 1.057 | 1.060 |

注:表中水位变化和堰高调整量均为以1号配水堰为基准的相对量值。

#### 3.3 调整各格滤池的配水堰堰宽

根据堰流基本公式  $Q = mb\sqrt{2gH_0^{3/2}}$ ,若保持堰的流量系数  $m$  和堰上总水头不变,过堰流量  $Q$  和堰宽  $b$  成正比。为提高配水均匀度,根据原进水分配渠的模拟结果,采用公式  $b_i = \frac{\bar{q}}{q_i} b$ ,以原堰宽( $b = 4.30$  m)为基准,对各格滤池前端的配水堰堰宽进行调整(如表2所示)。其余结构尺寸以及模拟条件均保持不变。

表2 配水堰过堰流量及堰宽调整

Tab.2 Flow rate through weir and width adjustment of water distribution weir

| 配水堰编号                             | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 原过堰流量 $q_i/(L \cdot s^{-1})$      | 135.9 | 144.1 | 158.9 | 169.1 |
| 原堰宽 $b/m$                         | 4.30  | 4.30  | 4.30  | 4.30  |
| 设计过堰流量 $\bar{q}/(L \cdot s^{-1})$ | 151.9 | 151.9 | 151.9 | 151.9 |
| 调整后堰宽 $b_i/m$                     | 4.81  | 4.54  | 4.11  | 3.87  |
| 堰宽调整量 $\Delta b/m$                | +0.51 | +0.24 | -0.19 | -0.43 |

### 4 优化效果分析

#### 4.1 调整进水管位置的优化效果

调整进水管位置前后,各格滤池前端分配渠水位、配水堰的堰上水头、滤池进水流量的对比结果如表3所示。

表3 进水管位置调整前后的配水效果对比

Tab.3 Water distribution effects before and after adjusting inlet pipe position

| 滤池编号                    |     | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 分配渠水位/m                 | 调整前 | 1.121 | 1.124 | 1.128 | 1.131 |
|                         | 调整后 | 1.128 | 1.123 | 1.123 | 1.128 |
| 堰上水头/mm                 | 调整前 | 71    | 74    | 78    | 81    |
|                         | 调整后 | 78    | 73    | 73    | 78    |
| 流量/(L·s <sup>-1</sup> ) | 调整前 | 135.9 | 144.1 | 158.9 | 169.1 |
|                         | 调整后 | 162.3 | 141.7 | 141.7 | 162.3 |

优化后由于从进水渠中间向两端进水,各格滤池进水流量及配水堰高度呈对称分布。其中,中间两格滤池进水流量较小,为 141.7 L/s,两侧滤池进水流量较大,为 162.3 L/s,则配水均匀度  $\eta = q_{\min}/q_{\max} = 87.3\%$ 。虽然流经进水渠及单边配水的滤池数量减半,水面沿水流方向升高的总高度略有下降,但配水均匀度的改善效果并不明显。

#### 4.2 调整各格滤池配水堰堰高的优化效果

调整各格滤池的配水堰堰高前后,各格滤池前端分配渠水位、配水堰的堰上水头、滤池进水流量的对比结果如表4所示。

表4 配水堰堰高调整前后的配水效果对比

Tab.4 Water distribution effects before and after adjusting the height of water distribution weir

| 滤池编号                    |     | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 分配渠水位/m                 | 调整前 | 1.121 | 1.124 | 1.128 | 1.131 |
|                         | 调整后 | 1.125 | 1.130 | 1.136 | 1.139 |
| 堰上水头/mm                 | 调整前 | 71    | 74    | 78    | 81    |
|                         | 调整后 | 75    | 77    | 78    | 78    |
| 流量/(L·s <sup>-1</sup> ) | 调整前 | 135.9 | 144.1 | 158.9 | 169.1 |
|                         | 调整后 | 147.8 | 149.4 | 155.0 | 155.8 |

由表4可知,优化后虽然水位沿水流方向升高的趋势几乎没有改变,但由于沿水流方向各格滤池的配水堰堰高逐渐增加,导致堰上水头变化较小,进而使各滤池的进水流量分配更加均匀。优化后1号滤池的进水流量最小,为147.8 L/s,4号滤池的进水流量最大,为155.8 L/s,配水均匀度  $\eta = q_{\min}/q_{\max} = 94.9\%$ 。由此说明,此种优化方案相比原设计,配水均匀度提高了14.5%。

#### 4.3 调整各格滤池配水堰堰宽的优化效果

调整各格滤池的配水堰堰宽前后,各格滤池前端分配渠水位、配水堰的堰上水头、滤池进水流量的对比结果如表5所示。

表5 配水堰堰宽调整前后的配水效果

Tab.5 Water distribution effects before and after adjusting the width of water distribution weir

| 滤池编号                    |     | 1     | 2     | 3     | 4     |
|-------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 分配渠水位/m                 | 调整前 | 1.121 | 1.124 | 1.128 | 1.131 |
|                         | 调整后 | 1.122 | 1.126 | 1.132 | 1.136 |
| 堰上水头/mm                 | 调整前 | 71    | 74    | 78    | 81    |
|                         | 调整后 | 72    | 76    | 82    | 86    |
| 流量/(L·s <sup>-1</sup> ) | 调整前 | 135.9 | 144.1 | 158.9 | 169.1 |
|                         | 调整后 | 147.7 | 148.3 | 155.0 | 157.0 |

由表5可知,优化后虽然水位沿水流方向升高的趋势几乎没有改变,但由于沿水流方向各格滤池配水堰堰宽逐渐减小,根据堰流基本公式,适当地减小堰宽可以减弱堰上水头增加引起的过堰流量增大,进而使各滤池的进水流量分配更加均匀。优化后1号滤池的进水流量最小,为147.7 L/s,4号滤池的进水流量最大,为157.0 L/s,配水均匀度  $\eta = q_{\min}/q_{\max} = 94.1\%$ 。由此说明,此种优化方案相比原设计,配水均匀度提高了13.7%。

## 5 结论

① 在各格滤池前端的配水堰构造完全相同的

情况下,进水分配渠水面沿程升高引起的配水堰堰上水头变化,是导致V型滤池进水分配渠配水不均匀的主要原因。

② 从中间进水与从一端进水相比,单侧进水渠长度和配水滤池数均减半,可以减少一侧水流的末端滤池和首端滤池的分配渠水位及进水流量差,但对于配水均匀度的改善效果并不明显。

③ 沿水面升高方向依次提高配水堰的堰高或者减小配水堰的堰宽,都能较为明显地改善进水分配渠的配水均匀度。

④ CFD的VOF模型,可以模拟出V型滤池进水分配渠配水的水位及流量等水力特性,可作为V型滤池配水及其他水处理构筑物结构的设计及优化辅助工具。

## 参考文献:

- [1] 周文明,胡亮亮,徐世伟,等. 气水冲洗滤池工艺设计有关问题探讨[J]. 中国给水排水,2013,29(10):28-30.  
Zhou Wenming, Hu Liangliang, Xu Shiwei, et al. Discussion on design problems of air-water washing filter [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(10): 28-30 (in Chinese).
- [2] 曾扬,魏瑜冰. 水厂V型滤池配水均匀度优化[J]. 城镇供水,2017(6):12-15.  
Zeng Yang, Wei Yubing. Optimization of water distribution uniformity of V type filter in waterworks [J]. City and Town Water Supply, 2017(6): 12-15 (in Chinese).
- [3] 李亚林,袁寿其,陈义春,等. 快滤池进水渠道内堰板的正交试验与优化设计[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2015,43(1):96-100.  
Li Yalin, Yuan Shouqi, Chen Yichun, et al. Orthogonal test and optimization design of weir plate in the water channel of rapid filter [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015, 43(1): 96-100 (in Chinese).
- [4] Mohammadpour R, Ghani A, Azamathulla H M. Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(22): 9324-9337.
- [5] Vatankhah A R. Water surface profile along a side weir in a parabolic channel [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 32: 90-95.

(下转第67页)