

清污机栅体结构优化模型试验

常 青¹ 杜培文² 李永顺³

(1. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 山东 济南 250013; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013;
3. 山东省南水北调工程建设管理局, 山东 济南 250013)

摘要 运用 CFD 三维数值模拟分析了 8 种渠道清污机栅体结构断面的水力特性, 以及矩形栅条、工字钢主梁、工字钢边梁和流线型栅条、圆头流线型主梁水平布置、边梁为矩形箱梁的不同跨度下的水力特性, 并用水工模型试验来验证其设计效果, 所得试验值与计算值基本吻合。得出流线型栅条、圆头流线型主梁水平布置、边梁为矩形箱梁为最优方案的结论。

关键词 大型渠道 清污机 拦污栅体结构 水力特性 数值模拟 水工模型试验

中图分类号 TV732.2 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)S1-0005-04

南水北调工程是一项跨流域的大型调水工程, 清污设备是南水北调等长距离调水工程的关键设备, 既要满足各种不同工况的控制要求, 又要适应各自的工作和自然环境, 对工程和清污设备的安全运行提出了更高的要求。清污机拦污栅设置的目的就是拦截水流中所挟带的水草、农作物秸秆、塑料物品、编织袋、树枝、杂草植物等污物, 拦污栅的布置、结构形式和过栅水流流速是影响拦污栅水头损失的主要因素。文献 [1-13] 曾对泵站拦污栅及其清污技术进行了研究分析, 但都没有系统地分析不同结构形式和不同跨度的拦污栅对水头损失的影响。本文将从有效降低清污机的固有水头损失方面, 对栅体结构的栅条及主梁等结构进行不同方案的优化研究, 并通过三维数值模拟计算以及水工模型试验验证其优化效果。

1 栅体结构断面优化设计方案

清污机栅体结构的栅条设计为矩形和流线形 2 种方案, 主梁分为 3 种不同形状的流线形箱梁和工字钢梁, 边梁分为矩形箱梁和工字钢梁, 分别与水平面呈 75° 布置, 栅条间距 120 mm, 组合成如图 1 所示的 8 个设计方案。方案 1: 矩形栅条、工字钢主梁、工字钢边梁; 方案 2: 流线型栅条、工字钢主梁、工字钢边梁; 方案 3: 矩形栅条、尖头流线型主梁垂直栅条布置, 边梁为矩形箱梁; 方案 4: 流线型栅条,

尖头流线型主梁垂直栅条布置, 边梁为矩形箱梁; 方案 5: 矩形栅条、尖头流线型主梁水平布置, 边梁为矩形箱梁; 方案 6: 流线型栅条、尖头流线型主梁水平布置, 边梁为矩形箱梁; 方案 7: 矩形栅条、圆头流线型主梁水平布置, 边梁为矩形箱梁; 方案 8: 流线型栅条、圆头流线型主梁水平布置, 边梁为矩形箱梁。

2 栅体的数值模拟分析

2.1 构建的物理模型

在分析过程中为了降低计算的工作量, 仅对各拦污栅设计方案的局部进行计算分析, 并仅考虑栅条和横梁的结构作用, 忽略边梁的结构。

计算区域选取 $0.26\text{ m} \times 1\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的矩形有压管道, 将部分拦污栅置于密闭的有压管道中, 建立计算的物理模型, 如图 2 所示。

三维实体造型采用 Fluent 的前处理软件 Gambit 和 AutoCAD, 网格剖分的 Cell 为结构化和非结构化单元。在靠近拦污栅处采用四节点四面体单元非结构化网格, 以增强对拦污栅复杂边界的适应性, 而在远离拦污栅的规则过流区域则采用结构化的六面体单元, 以减少计算网格的数量。

2.2 采用的数学模型和边界条件

对于定常不可压缩牛顿流体, 基于 Boussinesq 涡团黏性假设, 在笛卡儿坐标系下的控制方程如下:

a. 三维不可压湍流的连续方程和动量方程分

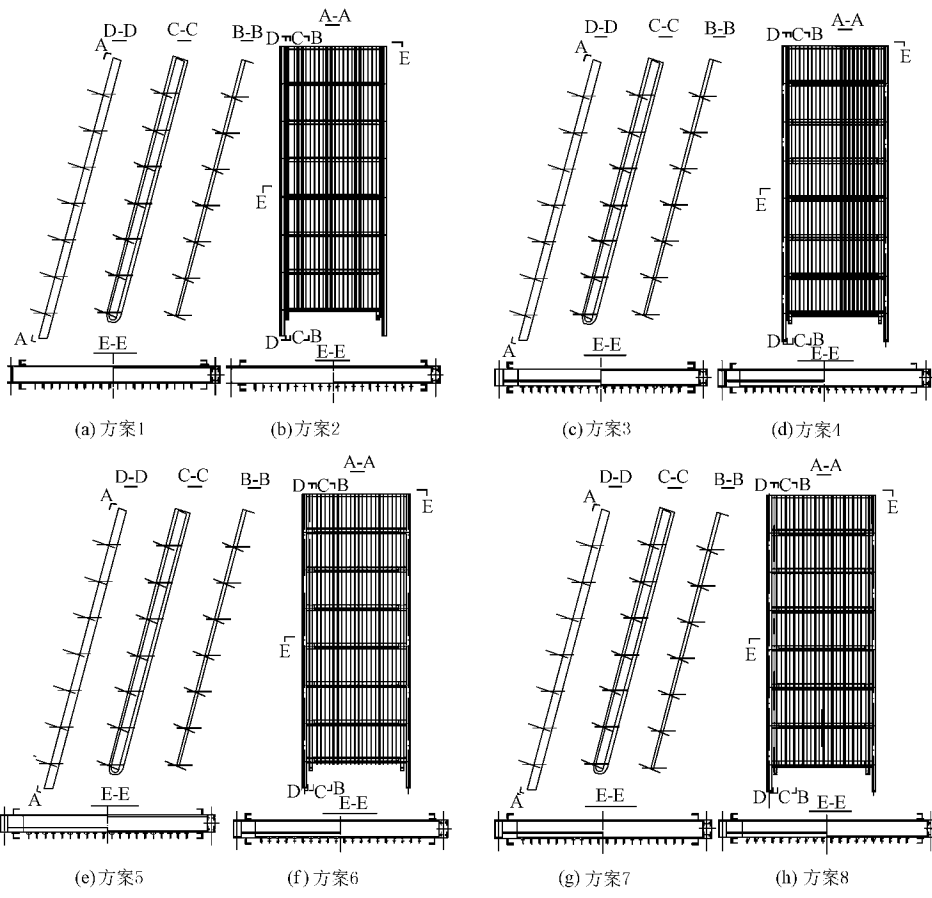


图 1 设计方案

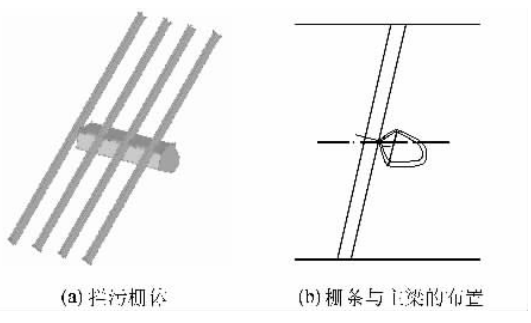


图 2 数值计算物理模型

别为

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中： ρ 为流体密度； x_i ($i = 1, 2, 3$) 为坐标系坐标轴； u_i 为雷诺时均速度； p^* 为包括湍动能 k 的静压力， $p^* = p + \frac{2}{3} \rho k$ ； μ_{eff} 为有效黏性系数，等于分子黏性系数 μ 与 Boussinesq 涡团黏性系数 μ_t 之和，即 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 。

b. 湍动能 k 和耗散率 ϵ 输运方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho (P_k - \epsilon) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = \rho \left(C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon \right) \quad (4)$$

其中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$P_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

式中： P_k 为湍动能生成项； C_μ ， $C_{\epsilon 1}$ ， $C_{\epsilon 2}$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， σ_ϵ 为经验系数， $C_\mu = 0.09$ ， $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ， $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

进口边界条件：进口设置在计算区域的流道进口，给定垂直于进口的平均流速 ($v = 1.0 \text{ m/s}$)，而进口湍动能和紊动耗散率由 $k_{in} = 0.005 u_{in}^2$ 和 $\epsilon_{in} = C_\mu k_{in}^{3/2} / L_{in}$ 确定，其中 L_{in} 为进口混合长度，设进口当量直径为 D ，则 $L_{in} = 0.5D$ 。

出口边界条件：出口边界取在计算区域的出口断面，速度、湍动能和耗散率采用第二类边界条件。

固壁条件：壁面速度无滑移，近壁区采用壁面函数。

2.3 水力特性分析

对拦污栅的前后断面分别采用微元面积加权平均法计算断面的总能量水头，拦污栅水力损失 Δh 和阻力系数 ξ 计算公式为

$$\Delta h = \frac{\sum \left(z_{i_2} + \frac{p_{i_2}}{\rho g} + \frac{v_{i_2}^2}{2g} \right) \Delta A_{i_2}}{\sum \Delta A_{i_2}} - \frac{\sum \left(z_{i_1} + \frac{p_{i_1}}{\rho g} + \frac{v_{i_1}^2}{2g} \right) \Delta A_{i_1}}{\sum \Delta A_{i_1}} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{\Delta h}{\frac{v^2}{2g}} \quad (6)$$

式中： z 、 p 、 v 分别为位置水头、压力和速度；下标 i_1 、 i_2 分别为栅前、栅后断面单元； ΔA 为单元面积。

通过 CFD 数值模拟，在进口平均流速为 1 m/s 的情况下对方案 1~8 进行跨度为 3 m 的拦污栅水力损失和阻力系数分析，如表 1 所示。对方案 1 和 8 进行了不同跨度下的水头损失系数计算，在 1 m/s 流速情况下的计算结果如表 2 所示。2 种方案的水头损失系数随跨度的变化趋势如图 3 所示。

表 1 拦污栅水力特性计算值

方案	$\Delta h/m$	ξ	方案	$\Delta h/m$	ξ
1	0.045	0.878	5	0.031	0.601
2	0.040	0.792	6	0.024	0.472
3	0.032	0.628	7	0.025	0.486
4	0.026	0.511	8	0.017	0.341

表 2 方案 1 和方案 8 不同跨度拦污栅水力特性计算值

跨度 L/m	方案 1		方案 8	
	$\Delta h/m$	ξ	$\Delta h/m$	ξ
3	0.045	0.878	0.017	0.341
7	0.070	1.371	0.016	0.319
10	0.105	2.065	0.019	0.370
16	0.217	4.252	0.022	0.429

由图 3 可以看出，方案 1 随着跨度和主梁断面尺寸的不断加大，阻水特性越来越显著，使水头损失系数迅速增加；方案 8 随着跨度和主梁断面尺寸的不断加大，其水力特性变化不明显，水头损失系数变化不大。

由表 2 可知，方案 8 在跨度为 7 m 时比跨度为 3 m 时的水头损失系数有所降低，之后随着跨度的增

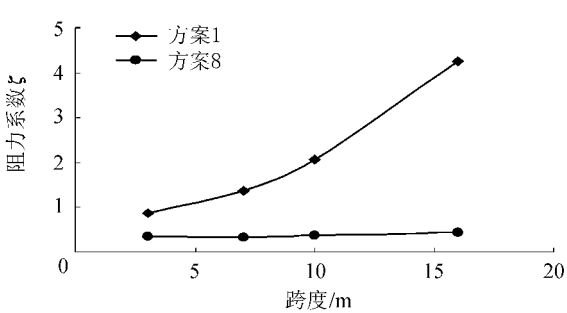


图 3 水头损失系数随跨度的变化趋势

加损失系数又逐渐上升。主要是由于跨度 7 m 与跨度 3 m 的主梁迎水面的头部断面形状相同，而仅尾部形状不同，跨度 7 m 的比跨度 3 m 的尾部略长，这样有助于减少水流绕流后的尾部脱流，降低水力损失。因此可适当加大主梁在水流方向的尾部长度，不仅可增加主梁的刚度和强度，而且可适当降低其水力损失。而随着跨度的增大，主梁的头部断面尺寸也在不断增大，使其阻水效果显现，因此其水头损失系数在跨度为 10 m 以后又缓慢上升。

3 模型试验

3.1 模型设计

建立了水工模型研究拦污栅的水力特性，再按一定的相似律换算至原型。原型栅体置于明渠中，按重力相似准则设计模型。虽然模型雷诺数不能与原型相应部位的雷诺数一致，但当雷诺数达到一定数值时因雷诺数不相似而引起的误差可忽略不计。

由于进行整体水工模型试验受试验场地的限制，且拦污栅的局部水头损失系数主要取决于栅条断面形状、断面尺寸、栅条净距、主梁框架形式等，与拦污栅的整体高度和宽度无关，因此可取拦污栅的局部进行部分水工模型试验。根据试验要求并结合试验材料条件，选模型比 $L_r = 3$ ，按重力相似准则得到相应比尺关系，即：流量比尺 $Q_r = L_r^{2.5} = 15.588$ ，流速比尺 $V_r = L_r^{0.5} = 1.732$ ，损失系数比尺 $\xi_r = 1$ 。

模型系统由供水系统、拦污栅模型、河道模型、稳流设施及回水系统等部分组成，如图 4 所示。其中河道模型为由塑料板制作的 $0.4\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 2.5\text{ m}$

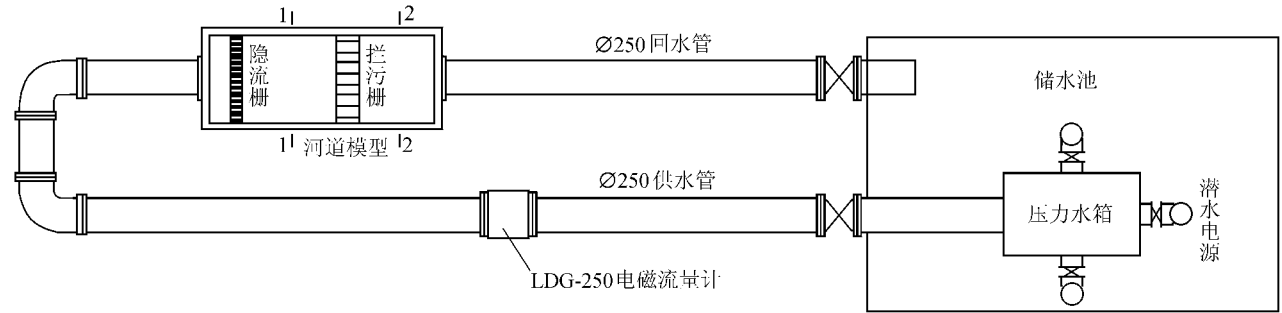


图 4 模型系统示意图

矩形池,拦污栅模型用有机玻璃制作。测量工具主要有 LDG-500 电磁流量计(其误差为 $\pm 0.24\%$),钢尺(其相对误差为 $\pm 0.1\%$)。

3.2 试验结果及分析

清污机栅体局部水头损失系数计算式为

$$\xi = \frac{E_1 - E_2}{\frac{v_1^2}{2g}} \tag{7}$$

其中

$$E_1 = H_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g}$$

$$E_2 = H_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g}$$

式中: E_1 为栅前断面总水头 m ; E_2 为栅后断面总水头 m ; H_i , P_i , v_i 分别为断面 1、2 的位置水头、压强和平均流速。

清污机栅体局部水头损失系数实测值取为在一定的流量点附近连续读取 3 次重复测读试验数据导算的平均值。方案 1~8 的实测值与计算值的对比见图 5 所示,可见试验值与计算值吻合较好,试验值略小于计算值。

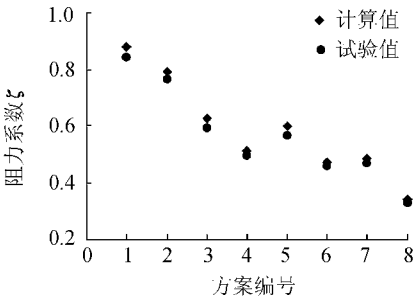


图 5 实测值与计算值对比

4 结 论

- a. 方案 1 的局部水头损失系数最大,方案 8 的局部水头损失系数最小。
- b. 流线形栅条的局部水头损失系数比矩形栅条的小。
- c. 圆头流线型主梁比尖头流线型主梁的局部水头损失系数小,尖头流线型主梁又比工字钢主梁的局部水头损失系数小。
- d. 水平布置的流线型主梁比垂直栅条布置的流线型主梁损失系数小。
- e. 方案 1 的局部水头损失系数随着跨度的增加而急剧上升,实际工程中不宜采用大跨度方案;方案 8 的局部水头损失系数随着跨度的增加其变化不大,在大跨度方案中主梁在顺水流方向适当延长尾翼可有效降低水力损失。

参考文献:

[1]高朝辉,仇宝云,问泽杭.泵站拦污栅及其清污研究进展[J].排灌机械,2006(2):10-15.

[2]任玉珊,高金花,杨敏.水电站进水口拦污栅水头损失试验研究[J].大坝与安全,2003(4):51-54.

[3]张多锋,张多岭,时丕生,等.泵站人工清污拦污栅的改进[J].排灌机械,2001(4):21-22.

[4]郑源,刘益民,钱均,等.泵站拦污栅阻水研究[J].水泵技术,2003(6):38-41.

[5]铁汉.水电站拦污栅水头损失的计算问题[J].西北水电,1998(3):22-24.

[6]SCHLEISS A, FUST A, 胡苏萍.莱茵河劳芬堡水电站进水口拦污栅振动研究[J].水电站设计,2003(1):107-112.

[7]阎诗武.水电站拦污栅的振动[J].水利水运工程学报,2001(2):74-77.

[8]王光纶,张文翠,李未显.抽水蓄能电站拦污栅结构振动特性模型试验研究[J].清华大学学报:自然科学版,2001(2):114-118.

[9]袁乃华,林震,李蕙,等.大型泵站拦污清污方案选择[J].排灌机械,2005(3):20-22.

[10]慈红卫,尚联合.拦污栅在泵站工程中的应用[J].水利科技与经济,2008(3):247.

[11]韩向远.排灌泵站清污机械化的新途径[J].中国农村水利水电,2003(6):51.

[12]王斐,黄海田.大型泵站清污设备的应用状况及其改进[J].水利电力机械,2007(12):130-133.

[13]杜培文,许志刚,刘天政,等.一种拦污栅或清污机用栅体:中国,ZL200920281490.1[P].2010-09-22.

(收稿日期:2010-11-09 编辑:高建群)

· 简讯 ·

第三届全国土工合成材料加筋土学术研讨会将在河海大学举办

为了不断完善和提高土工合成材料加筋技术,促进科学技术的发展,由中国土工合成材料工程协会、国际土工合成材料学会中国委员会等主办,河海大学、南京水利科学研究院等承办的第三届全国土工合成材料加筋土学术研讨会将于 2011 年 10 月 28—31 日在南京市河海大学举办。会议主题包括:①加筋土材料特性与设计参数选择;②加筋土结构设计理论、准则与计算方法;③加筋土新工法、新工艺与新材料;④加筋土结构工程实录。会后,优秀论文在全国中文核心期刊、中国科技核心期刊《水利水电科技进展》正刊专栏或增刊专辑发表。

(本刊编辑部供稿)