

# 西直湖港南枢纽水流特性 数值模拟与优化

孙登峰, 张 静, 于建忠, 李 昱, 宋丽花

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215103)

**摘要:**通过数值模拟方法,研究了新沟河延伸拓浚工程西直湖港南枢纽船闸引航道与立交地涵引河交汇口在不同工况下的水流流场结构,对斜向入流边界条件进行了优化。数值模拟结果表明,调整船闸和地涵引河之间连接墩头的型式与尺寸、增大入流断面角度,有利于改善引航道内水流结构,保证船舶通航安全,同时避免了另行设置工程措施、节省工程投资。

**关键词:**水流流态; 数值模拟; 船闸引航道; 布置优化

中图分类号:TV691 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2020)S2-0064-05

## Numerical simulation and optimization of water flow characteristics of Gangnan junction of Xizhi Lake

SUN Dengfeng, ZHANG Jing, YU Jianzhong, LI Yu, SONG Lihua

(Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215103, China)

**Abstract:** By means of numerical simulation, the structure of the flow field in different working conditions between the shiplock approach channel and the inverted siphon culvert of Gangnan junction of Xizhi Lake in the Xingou River extension dredging project was studied, and the boundary conditions of the oblique inflow were optimized. Numerical simulation results showed that adjusting the type and size of the connecting pier head between the ship lock and the ground culvert approach river and increasing the angle of the inflow cross-section were conducive to improving the water flow structure in the approach channel, ensuring the safety of navigation, and avoiding additional engineering measures and saving engineering investment.

**Key words:** flow pattern; numerical simulation; shiplock approach channel; layout optimization

在现状河道上兴建水利枢纽工程后,为了满足航运需求,常常需要修建一些通航建筑物,其中以船闸为主。水工建筑物引河常与船闸引航道形成交汇,船闸引航道口门区受斜向流的作用,会产生回流和分离型漩涡,影响船舶的航行和停驻<sup>[1-3]</sup>。其中回流的横向流速大小是决定口门区水流条件的重要指标<sup>[4]</sup>。它主要涉及工程地形及总体布置等具体因素<sup>[5-8]</sup>。为了保证船舶的通航安全,规范按工程等级不同,对引航道内允许的水流流速做出

了相应限定。V级船闸相差限值如表1所示<sup>[9]</sup>。

表1 水面最大流速限值

区域	纵向/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	横向/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	回流/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
停泊段	0.50	0.15	0.40
口门区	1.50	0.25	

因此,对于船闸引航道口门区的水流条件改善

收稿日期:2020-07-06

作者简介:孙登峰(1983—),男,工程师,主要从事水利工程设计方面的工作。

措施的研究具有重要的意义和价值<sup>[3]</sup>。通常减小表面横向流速的方式主要有:控制引(排)水的流量;采取一定的工程措施。为改善交汇区水流流态,国内外研究者提出了多种整流工程措施,包括修建导流墩(导航墙)及调整其长度、改变形式等<sup>[10-15]</sup>。

本文采用数值模拟的方式,研究西直湖港南枢纽涵(闸)引、排水各工况下引航道内的水流结构。通过优化调整船闸和地涵引河之间连接段墩头的型式尺寸,从而改善了引航道内的水流条件,同时避免了设置整流工程措施、节省了工程投资。

## 1 工程概况

西直湖港南枢纽是新沟河拓浚延伸工程主要控制工程之一,具有引(排)水、防洪以及通航等功能。工程位于新沟河与锡漂漕河交汇处,主要包括地涵、节制闸和船闸 3 个部分。工程总体布置详见图 1。

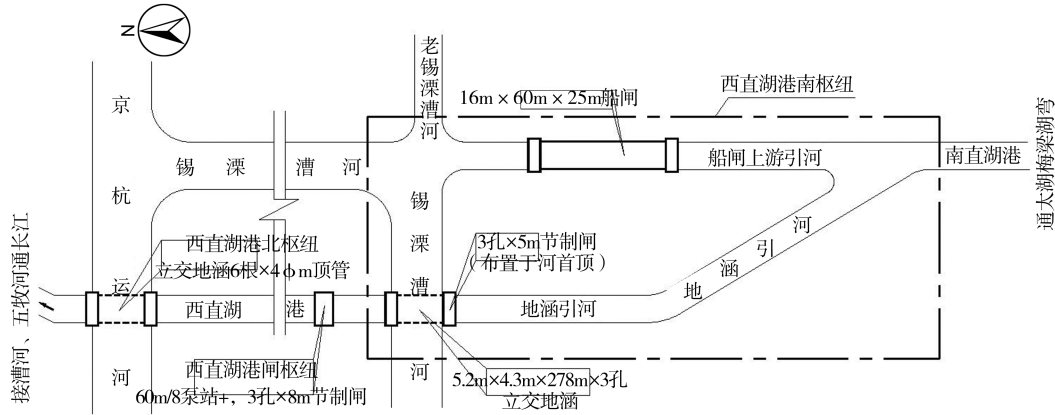


图 1 工程总体布置示意图

## 2 数学模型的建立

### 2.1 计算软件的选择

本文数值模拟计算采用 FLUENT 流体分析软件。该软件系具有计算精度高、操作简单、与其他同类软件兼容性较好等特点,在国内外流体领域研究中应用较为广泛。

计算分析流程:首先利用 Gambit 软件进行流动区域几何形状的构建、定义边界类型和生成网格,然后在 FLUENT 中读取生成的该网格文件,并设置条件对流动区域进行求解计算,最后对计算的结果进行后处理。

### 2.2 基本控制方程

根据质量守恒定律可得连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

对于不可压缩流体: $\rho$  为常数。

则方程简化为: $\nabla \cdot (\vec{u}) = 0$  即:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

根据牛顿第二定律或动量定律,导得微分形式的动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

由牛顿流体应力与应变率的关系 - 本构方程:

$$\sigma_{ji} = -p\delta_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (4)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)~(6)带入式(3)得:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -p\delta_{ji} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (7)$$

由  $\gamma = \frac{u}{\rho}$ , 于是动量方程简化为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \gamma \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (8)$$

式中: $u_i$  为  $(x, y, z)$  方向上的速度分量; $\rho$  为流体密度; $P$  为动态压强; $f_i$  为单位质量的质量力; $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$  为单位质量的压强梯度力; $\gamma \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$  为单位质量的黏性力。

对于恒定流,沿主流方向的动量方程简化为(假定分子粘性项远小于雷诺应力项,故可以忽略):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g \sin \theta + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (9)$$

二次流  $v$  和  $w$  的动量方程如下:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (10)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (11)$$

式中:  $\mu, \nu, w$  为  $x, y, z$  方向的速度;  $\theta$  为水面线与水平线的夹角;  $g$  为重力加速度;  $p$  为压强;  $\rho$  为水的密度;  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力;  $\mu'$  为  $x_i$  方向上的脉动流速。

双方程模型通过建立紊动能  $k$  方程和紊动耗散率  $\varepsilon$  方程, 把紊流黏性系数与紊流脉动动能及脉动特征尺度联系起来, 是目前工程上应用最为广泛的紊流模型之一。

标准  $\kappa-\varepsilon$  模型:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\gamma_i}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \gamma_i \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\gamma_i}{\sigma_i} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\gamma_i}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \left[ \gamma_i \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\gamma_i}{\sigma_i} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right] - C_{2\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

$$\gamma_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

式中:  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  为黏性常数, 计算中取 1.0 和 1.3;  $R_f$  为理查森数, 和  $C_{3\varepsilon}$  共同衡量浮力的影响;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$  一般取 1.44, 1.92 和 0.09。

所建立的数学模型采用控制体积法进行离散, 利用 SIMPLEC 算法对速度压力耦合进行修正, 动量方程采用二阶迎风离散格式, 所有参量的残差控制标准取  $1.0 \times 10^{-5}$ 。

### 2.3 模型计算区域边界和网格划分

为全面分析涵、闸过水对船闸上游引航道内船舶航行的影响, 建立包含上游引航道、部分地涵上游引河及南直湖港为边界的数学模型, 模型体型结构如图 2。

根据不同计算工况的参数条件(见表 2), 分别给定入口过水断面的流速或流量及出口的压力边界条件。

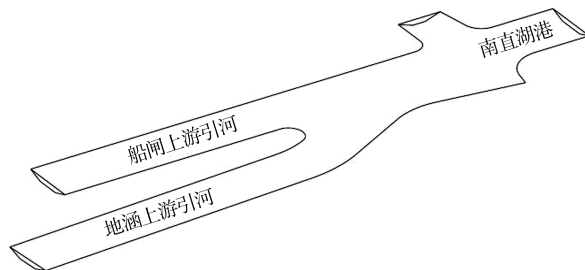


图 2 模型体型结构图

## 3 计算结果分析

### 3.1 排水工况

数值模拟的水流表面流速矢量图显示, 两种排水工况下计算区域内水流流态基本相似。即: 太湖侧水流经引航道上游段进入地涵引河, 在交汇处及南直湖港两侧扩大区域形成小范围回流。图 3 为“排水工况 1”对应计算区域内水流表面流速分布情况。

表 2 引、排水工况参数汇总表

计算工况	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	水位/m	
		太湖侧	运河侧
设计工况	排水 1	90	3.57
	引水 1	60	3.41
校核工况	排水 2	50	2.10
	引水 2	60	3.71

注: 1. 表中“排水 1”、“排水 2”分别对应排直武地区涝水、排梅梁湖涝水的工况; 2. “引水 1”、“引水 2”分别对应太湖为低水位、高水位时应急引水工况。

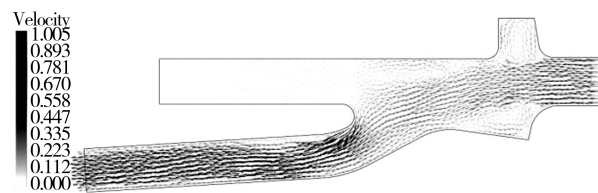


图 3 “排水工况 1”水流表面流速矢量

### 3.2 引水工况

2 种引水工况下计算区域内水流流态也基本相似: 水流经地涵引河进入交汇区, 受船闸侧水体挤压, 主流略有偏移, 在近交汇处形成回流区。图 4 为“引水工况 1”对应计算区域内水流表面流速分布情况。

### 3.3 引航道流速分布

从图 3~4 可看出, 各工况下, 引航道内计算点

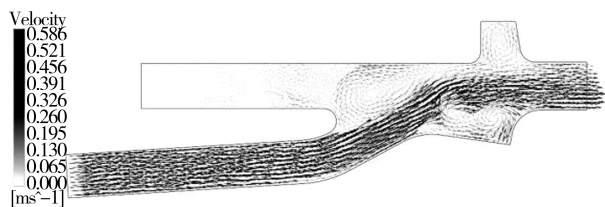


图4 “引水工况1”水流表面流速矢量图

纵向流速均在  $0.5\text{m/s}$  以下;少量点的横向流速大于  $0.15\text{m/s}$  限值,其点位分布如图 5~8 中菱形点所示,对应流速值如表 3 所示。

表3 超标点横向流速统计表 单位:  $\text{m/s}$ 

点位号	排水 1	排水 2	引水 1	引水 2
x020	0.0704	0.1013	-0.1444	-0.1518
x025	0.0597	0.0980	-0.1186	-0.1512
x060	-0.0070	-0.1641	0.0285	0.0325
x065	0.0098	-0.1774	0.0405	0.0476
x070	0.0074	-0.1803	0.0469	0.0562
x075	-0.0282	-0.1918	0.0485	0.0592
x080	-0.0727	-0.1834	0.0493	0.0582
x105	-0.0980	-0.0035	0.1552	0.0923
x115	-0.1583	-0.0510	0.1350	0.1024
x160	-0.0724	-0.0714	0.0447	0.1761
x165	-0.0680	-0.0702	0.0433	0.1818

注:1. 表中点位零点为船闸引航道中心线与隔水墩头切点法线交汇点(图 5~8 中十字光标处);2. 点位号即计算点距零点的水平距离(m)。

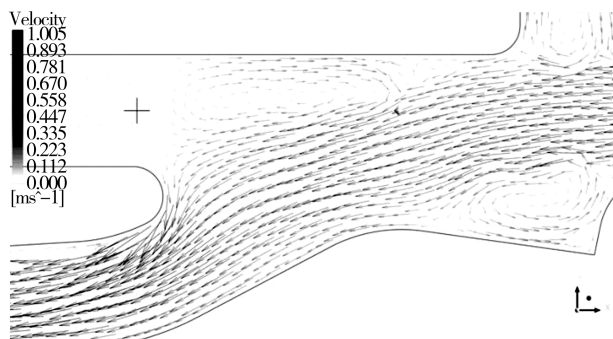


图5 排水工况1 流速矢量局部放大图

## 4 优化方案研究成果及分析

### 4.1 优化方案

由图 5~8 及表 3 可知,引航道内存在少量流速超限点,说明原工程布置方案基本可行,但需进一

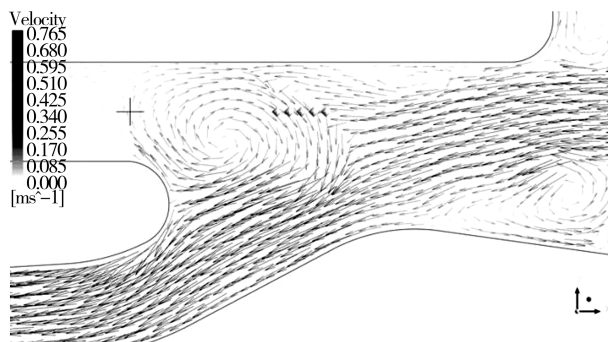


图6 排水工况2 流速矢量局部放大图

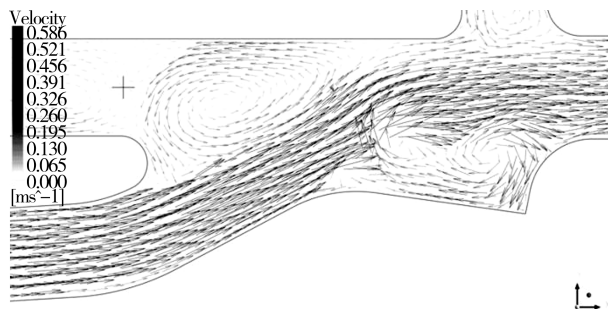


图7 引水工况1 流速矢量局部放大图

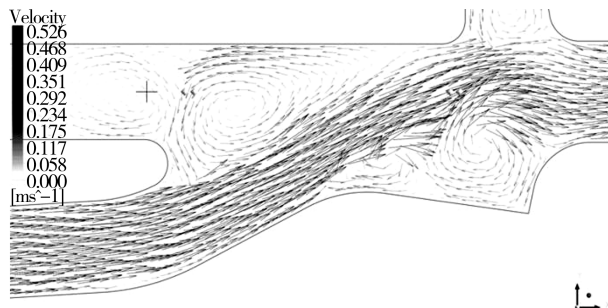


图8 引水工况2 流速矢量局部放大图

步优化。从超限点的分布范围看,主要为引、排水时,水流受引航道水体挤压产生不同程度的回流,引起较大的横向流速。为此,可考虑改善地涵引河斜向入(出)流的扩散条件入手。拟对连接墩头形状及尺寸进行适当调整。

经多次试调,墩头形状及尺寸由“半径  $26.5\text{m}$  的半圆形”调整为由半径分别为  $150\text{m}$  及  $15.0\text{m}$  且相切的组合曲线,如图 9 所示。一方面扩大了斜向水流的过水断面,另一方面,扩散角亦有改善,线型较好。

### 4.2 优化结果分析

由于仅微调了船闸和地涵上游引河之间连接墩头形状及尺寸,没有设置整流措施。优化后,引、排水工况下计算区域内水流流态与优化前基本相似,但流速分布有所改善。图 10 为“排水工况 1”对应的计算区域内水流表面流速矢量分布情况。

优化后数值模拟计算结果显示,引、排水各工

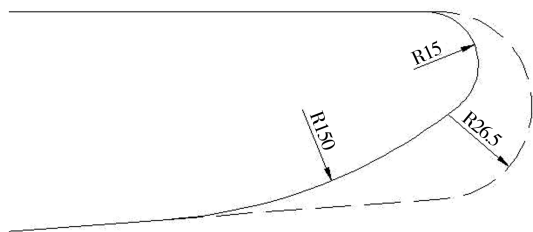


图9 优化方案结构示意图

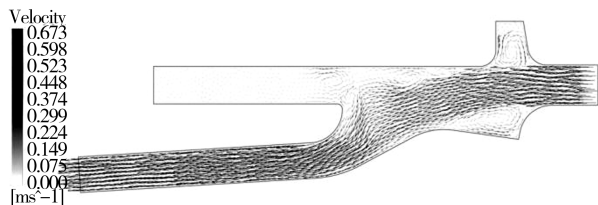


图10 优化后水流表面流速矢量图——“排水工况1”  
况,引航道与地涵引河交汇区流速均满足规范要求,不需另行设置整流设施。原“超标点”各工况下横向流速如表4所示。

表4 超标点优化后横向流速统计结果 单位:m/s

位置	排水1	排水2	引水1	引水2
x020	0.0106	0.0110	-0.0892	-0.0823
x025	-0.0991	-0.0029	-0.0660	-0.0646
x060	-0.0241	0.0046	0.0450	0.0490
x065	-0.0183	0.0021	0.0520	0.0733
x070	-0.0182	-0.0145	0.0617	0.0910
x075	-0.0181	-0.0283	0.0884	0.0973
x080	-0.0182	-0.0387	0.1154	0.0949
x105	-0.0635	-0.0803	0.0956	0.1294
x115	-0.0784	-0.0779	0.1357	0.1304
x160	-0.0625	-0.0619	0.0889	0.0809
x165	-0.0601	-0.0597	0.0585	0.0704

## 5 结 论

(1)斜向入(出)流边界条件的优化有利于改善船闸引航道口门区水流;

(2)西直湖港南枢纽工程于2016年10月通过完工验收,工程运行情况良好;

(3)存在斜向水流交汇的枢纽工程,设计时对

水流进行数值模拟分析研究,可以较为方便、快捷地对工程布置进行合理的优化,研究成本小、方案调整方便、分析结果直观,精度满足要求。

## 参考文献:

- [1] 张波,李保.双向过流节制闸与船闸整体布置研究[J].治淮,2014(11):14-16.
- [2] 曹民雄,马爱兴,王秀红,等.内河航道横流对船舶航行的影响研究[J].交通运输工程学报,2008,8(1):61-67.
- [3] 李一兵,江诗群,李富萍.船闸引航道口门外连接段通航水流条件标准[J].水道港口,2004(4):179-184.
- [4] 孙国栋,王善伟.口门区几种典型流态的相关分析及研究进展[J].建筑工程技术与设计,2015(16):2190.
- [5] 李焱,郑宝友,卢文蕾,等.引航道与河流主航道的夹角对通航条件影响试验[J].水道港口,2009,30(1):42-48.
- [6] 赵志舟,徐红,彭凯.乌江银盘电站下游引航道布置及口门区通航条件研究[J].水运工程,2008(3):82-86.
- [7] 李君涛,张公略,冯小香.导流墩改善口门区水流条件机理研究[J].中国港湾建设,2011(2):1-3.
- [8] 吴雪茹.水利枢纽通航水流条件研究[J].水运工程,2006(9):52-55.
- [9] JTJ305-2001,船闸总体设计规范[S].北京:人民交通出版社,2001(15).
- [10] 王法猛,傅宗甫,吕家才,等.闸站合建枢纽对河口通航影响的模型试验[J].水利水电科技进展,2012,32(5):29-31.
- [11] 李金合,李君涛,郝媛媛.湘江长沙综合枢纽通航水流条件及改善措施研究[J].水道港口,2008,29(6):414-418.
- [12] FROTHINGHAM K M, RHOADS B L. Three - dimensional flow structure and channel change in an asymmetrical compound meander loop, Embarras River, Illinois [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 28(6):625-644.
- [13] 周代鑫.水利枢纽船闸引航道口门区流态改善措施[J].人民珠江,1997(5):29-31.
- [14] 周华兴,郑宝友.船闸引航道口门区通航水流条件改善措施[J].水道港口,2002(2):81-86.
- [15] 朱红.导流墩改善船闸引航道口门区水流条件的试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2006.