

悬栅消能工均匀正交设计及投影寻踪回归试验研究

朱玲玲, 牧振伟, 杨力行

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为探讨消力池内悬栅消能工试验设计和研究方法, 在设计流量 $Q = 8.0 \text{ L/s}$ 条件下, 对悬栅消能工最大水深的3个影响因子栅高 h_s 、栅距 b_s 、数量 n_s 运用均匀正交试验设计, 并用投影寻踪回归方法对试验数据结果进行PPR建模分析及计算机仿真优化, 得到池内最大水深影响因子的排序是悬栅数量 n_s 、栅距 b_s 和栅高 h_s ; 当池内最大水深达优值 18.233 cm 时, 影响因子的优化组合为栅高 $h_s = 9 \text{ cm}$ 、栅距 $b_s = 5 \text{ cm}$ 和 $n_s = 16$ 。

关键词: 悬栅消能工; 消能率; 均匀正交; 投影寻踪回归

中图分类号: TV653.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0210-05

Experiment on uniform orthogonal design and projection pursuit regression of energy dissipator of suspension gird in stilling pool

ZHU Lingling, MU Zhenwei, YANG Lixing

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to elementarily discuss the experimental design and research method of energy dissipator of suspension gird in stilling pool, the paper used uniform orthogonal experiment to design 3 influence factors such as suspension gird high h_s , suspended grid spacing b_s and number n_s of the maximum water depth in the condition of design flow of Q being 8.0 L/s , and took projection pursuit regression method to carry out analysis of setting up model and computer simulation optimization. The results are that the first influence factor of the maximum water depth in suspended gird stilling pool is number n_s , and followed by suspended grid spacing b_s , the last is suspension gird high h_s . When the maximum water depth reaches the value of 18.233cm in stilling pool, the optimum combination of influence factors is suspension gird high $h_s = 9\text{cm}$, uspended grid spacing $b_s = 5\text{cm}$ and number $n_s = 16$.

Key words: energy dissipator of suspension gird; energy dissipation rate; uniform orthogonal; projection pursuit regression

1 研究背景

新疆河流多属山溪性河流, 含沙量大且泥沙颗粒粗细不均匀, 对底孔泄流建筑物兼顾排沙的出口消力池来说, 不宜采用趾墩等辅助消能工消能; 对单宽流量较大且不具备挑流消能的表孔溢洪道出口消力池(水跃跃前断面流速在 25 m/s 以上), 采用梯形墩或 T 形墩等辅助消能工消能效果也不理想, 但通过在消力池内设置悬栅可解决上述问题。水流受到悬栅阻挡、撞击, 在旋滚区产生紊动、剪切、环流, 消耗大量能量, 从而起到平稳水流、改善水流流态、

降低池内最大水深的作用, 因此悬栅消能工逐渐成为特殊条件下消力池内新型辅助消能工的选择, 具有一定实用性和优越性。

悬栅消力池是新疆农业大学水工实验室在新疆吉林台一级水电站引水隧洞水力学模型试验中提出的新型消能工型式^[1], 李凤兰等^[2-3]在此基础上研究了悬栅消力池消能特性; 侯杰等^[3,5]、邱秀云等^[4]利用投影寻踪回归分析陡槽悬栅消能率影响因子并确定栅高、栅距最优组合。新疆迪那河五一水库模型试验中, 吴战营等^[6-7]研究了导流洞出口消力池内悬栅最佳位置、体型等, 应用数值模拟得到溢洪洞

收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-08-02

基金项目: 新疆优秀青年科技创新人才培养项目(2013721027); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金项目(sklhse-2013-B-01)

作者简介: 朱玲玲(1988-), 女, 河南淮阳人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通讯作者: 牧振伟(1973-), 男, 河南南阳人, 硕士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学。

悬栅-梯形墩联合运用的消力池内详细流场并合理验证了悬栅高度;李园园等^[8]对导流洞出口悬栅消力池水流特性进行了数值模拟,计算值与实测值吻合较好。为进一步探讨消力池内悬栅消能工试验设计研究方法,优先选用9组均匀正交设计对悬栅消能工进行试验,并用投影寻踪 PPR 对试验数据进行回归分析,定量研究栅高 h_s 、栅距 b_s 和悬栅数量 n_s 对悬栅消力池内最大水深的影响,从而为今后更深入研究悬栅消能工奠定良好理论基础。

2 试验装置

根据实验室供水和场地等条件设计制作消力池内悬栅消能工模型,模型由高约90 cm的水箱、圆形压力管道、池前矩形水槽、消力池、池后矩形水槽和量水设备组成,消力池和矩形水槽采用有机透明玻璃制作。消力池池长85 cm,池宽16 cm,池深7.5 cm;矩形悬栅均采用有机玻璃制作,悬挂在消力池壁两侧,长度与消力池同宽即16 cm,宽度1 cm,厚度1.6 cm。经率定,模型满足试验要求。消力池结构尺寸见图1,矩形悬栅尺寸见图2。

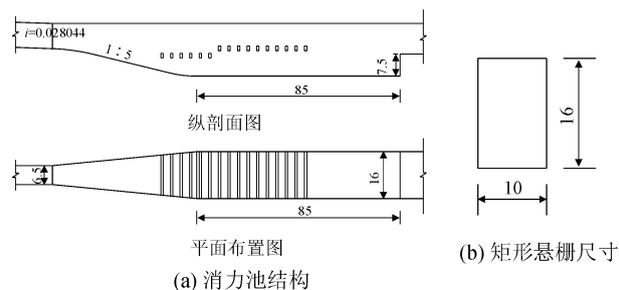


图1 消力池结构尺寸及矩形悬栅尺寸图(单位:cm)

3 试验设计和研究方法

3.1 均匀正交试验

为避免大量重复试验,减少试验次数,提高试验效率,节省试验经费,迅速找出悬栅消能工的主次影响因子,本文采用方开泰等^[9]提出的均匀正交试验设计方法,此种方法兼备均匀和正交优点,为试验数据整理分析的准确性和变化规律的正确性奠定良好基础,因此广泛应用于工农业生产和科学试验中。

目前悬栅消能工研究多是在物理模型基础上,进行大量试验研究和工作,而本文中悬栅消力池模型仅用3水平3因子9组均匀正交试验就达到了试验预期效果,大大减少试验次数和重复性。悬栅消力池试验在设计流量 $Q = 8 \text{ L/s}$ 工作条件下进行;选取悬栅安装高度即栅高 h_s 、安装间距即栅距 b_s 、悬

栅数量 n_s 作为悬栅消力池内最大水深的影响因子;选用均匀正交表 $U_L(3^4)$ 对栅高 h_s 、栅距 b_s 、数量 n_s 进行试验设计。由于矩形悬栅阻水面积大于楔形悬栅阻水面积,对消减入池水流能量有更好作用,因此试验选取矩形悬栅作为研究对象,其余影响因子都作为试验固定条件。在消力池内设置数量不等的矩形悬栅,前6根矩形悬栅布置在同一水平高度上且均距离消力池底7 cm,悬栅间距3 cm;后置的其余矩形悬栅布置在距离消力池底同一水平高度上,通过改变栅高 h_s 和栅距 b_s 对比稳流消能效果。从第6根悬栅起,将栅高 h_s 、栅距 b_s 、数量 n_s 的变幅分为3级,栅高 h_s 从7.5 cm到11.5 cm,取2 cm间隔为一个水平;间距 b_s 从3 cm到5 cm,取1 cm间隔为一个水平;数量 n_s 选取从8根到16根,取4根悬栅数量间隔为一个水平。悬栅消力池内最大水深影响因子水平见表1,均匀正交试验设计见表2。

表1 试验影响因子水平

水平	栅高 h_s /cm	栅距 b_s /cm	数量 n_s /根
1	7.5	3	8
2	9.5	4	12
3	11.5	5	16

表2 均匀正交试验设计

试验序号	第1~6根 h_s /cm	第1~6根 b_s /cm	悬栅体型	悬栅数量 n_s /根	
1	7	7.5	3	矩形	12
2	7	7.5	3	矩形	8
3	7	7.5	3	矩形	16
4	7	9.5	3	矩形	16
5	7	9.5	3	矩形	12
6	7	9.5	3	矩形	8
7	7	11.5	3	矩形	8
8	7	11.5	3	矩形	16
9	7	11.5	3	矩形	12

3.2 投影寻踪回归分析(PPR)

PP是处理和分析高维空间数据的一种统计新方法,将高维空间数据投影到低维子空间上,寻找出反映原高维空间数据的结构或特征投影,充分挖掘高维数据中非正态信息和规律并加以利用,准确找出高维空间试验数据内在结构,对各影响因子贡献大小进行评价,常规统计方法难以做到^[10]。PPR则是在PP基础上进行数据回归分析,其优点是无需假定数据分布类型,消除人为确定回归模型不合理限制,行之有效的解决现行回归分析法自身局限性,

从而有效提高回归方程精度^[11]。

设 y 是因变量, x 是 p 维自变量, 则 PPR 模型为:

$$\hat{y} = E(y | x) = y + \sum_{i=1}^{MU} \beta f_i(a_i^T x)$$

式中: MU 为最优数值函数个数; β 为数值函数的贡献权重系数; f_i 为数值函数; $a_i^T x$ 为 i 方向的投影值, 其中 $\|a_i\| = 1, i = 1, 2, \dots, MU; a_i^T x = (a_{i1} + a_{i2}, \dots, a_{ip})$ 。

4 均匀正交试验成果 PPR 分析

4.1 池内最大水深 PPR 建模

在设计流量 $Q = 8.0 \text{ L/s}$ 条件下, 试验采用高精度水位测针量测池内各断面水深及池内最大水深。通过对大量试验数据分析, 得出悬栅对消力池消能率的提高不明显, 但在消减池内最大水深方面有显著作用, 因此试验中着重研究栅高、栅距和数量的改变对悬栅消力池内最大水深的影 响, 从而明确最大水深主要影响因子, 为悬栅消能工下一步研究工作奠定良好试验基础。

通过对试验现象观察可知, 消力池未加悬栅时水流翻滚剧烈, 不时有水花溅出池外, 流态紊乱且无规律可循; 加入悬栅后池内水流流态趋于平稳, 最大水深下降明显, 因此悬栅的置入对稳定池内水流流态和降低池内最大水深有显著作用。对 9 组悬栅消力池最大水深试验数据进行 PPR 建模, 反映投影灵敏度指标的光滑系数 $\text{SPAN} = 0.6$, 投影方向初始值 $M = 5$, 最终投影方向 $MU = 4$, 模型参数为 $N = 9, P = 3, Q = 1, M = 5, MU = 4$ 。数值函数权重及投影方向值为 $\beta = (0.7971, 0.2059, 0.3194, 0.1658), \alpha_1 = (0.2387, -0.9065, -0.3488), \alpha_2 = (-0.4882, 0.8468, 0.2108), \alpha_3 = (-0.0478, -0.9963, 0.0713), \alpha_4 = (0.0974, -0.9965, 0.2376)$ 。

悬栅消力池最大水深实测值和 PP 回归值误差见表 3, 从表 3 均匀正交 9 组试验数据可知, 池内最大水深实测值和预报值两者拟合较好, 绝对误差在 ± 0.2 之内, 相对误差在 $\pm 1.0\%$ 范围之内, 合格率达 100%, 满足试验误差要求, 因此利用 PPR 模型进行数据分析是可行的, 对试验数据拟合精度较高, 能客观反映试验数据规律。

4.2 最大水深的 PPR 单因子分析

新疆迪那河五一水库导流洞出口消力池模型试验中, 悬栅的设置对平稳消力池内水流有显著作用, 随着消力池内悬栅数量增加, 池内最大水深呈下降趋势, 试验最终选取池内设置 17 根悬栅的优化方案; 在

校核流量 $773.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 下, 悬栅栅距改变后池内最大水深降幅大于改变栅高, 但没有对池内最大水深影响因子进行深入研究。本次试验运用 PPR 对悬栅消力池内最大水深进行单因子分析, 将 h_s, b_s, n_s 各影响因子变幅分为 5 等水平, 规定每次只变动一个影响因子, 并保持其他影响因子处于中水平, 悬栅消力池内最大水深 PPR 单因子分析结果见表 4。

表 3 悬栅消力池最大水深 PP 回归结果

试验序号	实测值/cm	预报值/cm	绝对误差/cm	相对误差/%
1	19.198	19.245	0.048	0.20
2	19.295	19.169	-0.126	-0.70
3	18.065	18.067	0.002	0.00
4	19.168	19.031	-0.136	-0.70
5	18.702	18.894	0.192	1.00
6	19.365	19.448	0.083	0.40
7	19.462	19.468	0.006	0.00
8	18.485	18.561	0.076	0.40
9	19.205	19.060	-0.145	-0.80
合格项:	9		合格率:	100

表 4 悬栅消力池内最大水深 PPR 单因子分析

流量 $Q /$ 最大水深 ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$) $h_{\max} /$ cm	栅高 $h_s /$ cm	栅距 $b_s /$ cm	数量 $n_s /$ 根	变动因子	极差
8	18.764	7.5	4	12	
8	18.804	8.5	4	12	
8	18.845	9.5	4	12	h_s 0.167
8	18.889	10.5	4	12	
8	18.934	11.5	4	12	
8	19.094	9.5	3	12	
8	18.924	9.5	3.5	12	
8	18.845	9.5	4	12	b_s 0.315
8	18.789	9.5	4.5	12	
8	18.779	9.5	5	12	
8	19.417	9.5	4	8	
8	19.079	9.5	4	10	
8	18.845	9.5	4	12	n_s 0.825
8	18.661	9.5	4	14	
8	18.592	9.5	4	16	

当变动 h_s 因子时, 极差为 0.167; 变动 b_s 因子时, 极差为 0.315; 变动 n_s 因子时, 极差为 0.825。从极差分析可知, 变动 n_s 因子时, 极差最大, 对最大水深影响效果最显著; 变动 h_s 因子时, 极差最小, 对最大水深影响最小。由此可以判断出, 影响池内最大水

深最显著的因子是悬栅数量 n_s , 其次为栅距 b_s , 最后是栅高 h_s , 从图 2 同样可以看出各因子对悬栅消力

池内最大水深的影响大小。

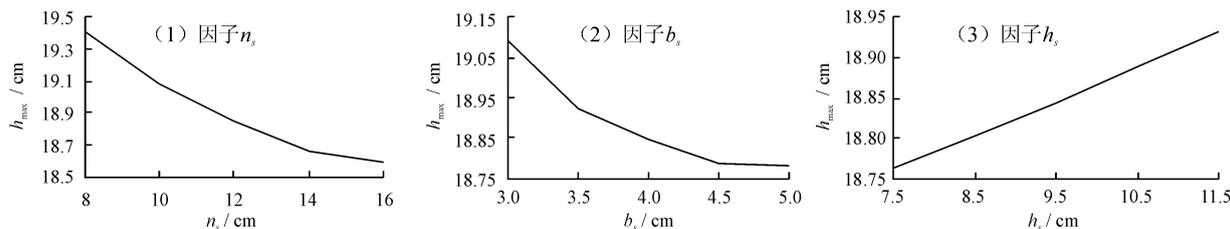


图 2 各因子影响效应

4.3 池内最大水深的相对权重

试验中某一影响因子的相对权重值越大,说明该因子对试验结果影响越大。表 5 为悬栅消力池内最大水深各影响因子相对权重,其中悬栅数量 n_s 的相对权重值为 1.000, 栅距 b_s 的相对权重值为 0.820, 栅高 h_s 的相对权重值为 0.248, 因此悬栅数量 n_s 对影响悬栅消力池内最大水深起决定性作用, 其次是栅距 b_s , 栅高 h_s 影响最小, 这也与 PPR 单因子分析悬栅消力池内最大水深结果保持一致。

表 5 悬栅消力池内最大水深各影响因子的相对权重

权序	影响因子	相对权重值
1	n_s	1
2	b_s	0.820
3	h_s	0.248

4.4 最大水深的等值线图

在设计流量 $Q = 8 \text{ L/s}$ 条件下,对均匀正交数据进行 PPR 仿真优化,通过整理矩形悬栅消力池最大水深 PPR 仿真数据,调用 Surfer8.0 软件分别绘制

直观形象的等值线图。悬栅数量 $n_s = 16$ 、栅高 $h_s = 9 \text{ cm}$ 、栅距 $b_s = 5 \text{ cm}$ 时池内最大水深等值线图见图 3。由图 3 等值线图综合可以看出,当栅距 b_s 从 3 cm 变化到 7 cm, 栅高 h_s 从 7 cm 变化到 11 cm, 悬栅数量 n_s 从 10 根变化到 18 根, 池内最大水深随栅高 h_s 变化不大,但随着悬栅数量 n_s 增多、栅距 b_s 增大而呈明显降低趋势,池内悬栅稳流效果显著。综合考虑悬栅消力池内最大水深影响因子,当栅高 $h_s = 9 \text{ cm}$, 栅距 $b_s = 5 \text{ cm}$, $n_s = 16$ 时,池内最大水深可达优值 18.233 cm, 相比未设置悬栅消力池内最大水深降幅为 9.14%, 因此在设计流量 $Q = 8 \text{ L/s}$ 条件下,可将栅高 $h_s = 9 \text{ cm}$, 栅距 $b_s = 5 \text{ cm}$, $n_s = 16$ 作为消减池内最大水深的优化组合。

5 结 语

(1)在水工模型试验中对悬栅消力池最大水深影响因子进行研究,应用 9 均匀正交试验就已得到全面试验的预期成果,显著减少试验次数和重复性,充分显示均匀正交试验设计的优越性;而运用投影

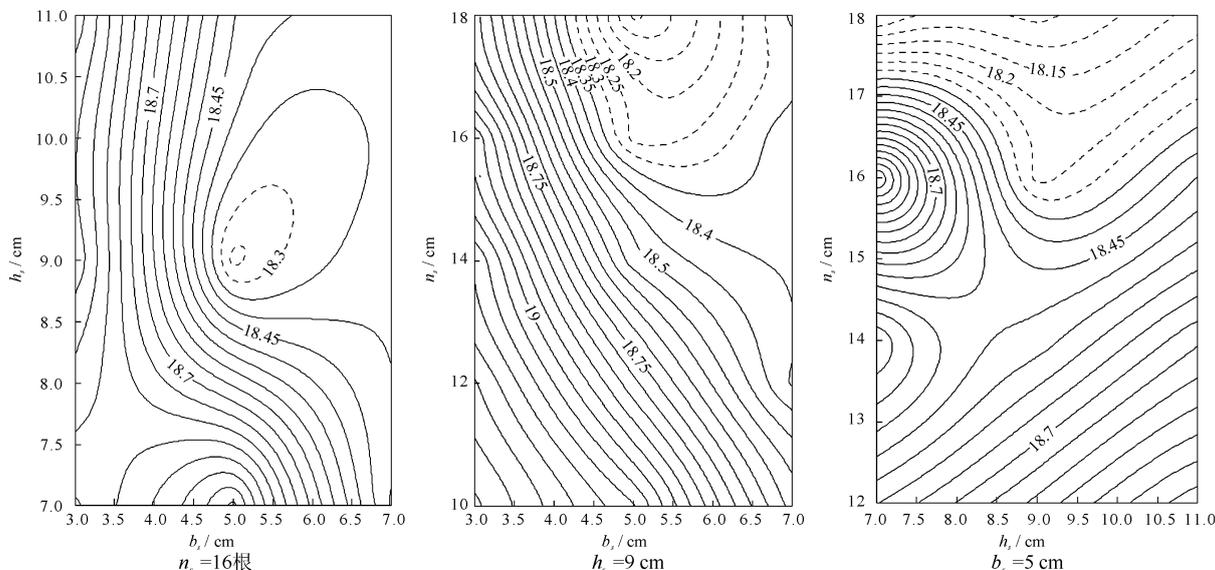


图 3 消力池内最大水深影响因子等值线图

寻踪回归(PPR)能定量分析各因子对悬栅消能工的影响,并能迅速找出影响因子优化区间。悬栅消力池内最大水深影响因子排序为悬栅数量 n_s > 栅距 b_s > 栅高 h_s ;在设计流量 $Q=8\text{ L/s}$ 条件下,栅高 $h_s=9\text{ cm}$ 、栅距 $b_s=5\text{ cm}$ 和 $n_s=16$ 的优化组合可将未设置悬栅的消力池内最大水深由 20.068 cm 消减到优值 18.233 cm ,降幅可达 9.14% 。

(2)新疆多沙河流水利枢纽工程中消力池的均匀正交试验设计及投影寻踪回归试验,对系统而深入地研究悬栅消能工有重要意义,为后续深入研究悬栅消力池提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 邱秀云,侯杰,王 锐. 无压隧洞洞内消能试验研究[J]. 新疆农业大学学报,2004,27(3):62-65.
- [2] 李凤兰,侯杰,邱秀云,等. 悬栅消力池消能特性的试验研究[J]. 新疆农业大学学报,2006,29(1):63-66.
- [3] 侯杰,赵涛,牧振伟,等. 悬栅消能率的PPR因子贡献率分析及优化仿真[J]. 水力发电,2005,31(2):38-40+64.

- [4] 邱秀云,赵涛,牧振伟,等. 悬栅消能率的投影寻踪回归因子贡献率分析及多因子优化组合仿真[J]. 新疆农业大学学报,2003,26(3):8-12.
- [5] 李虹瑾,魏敏,侯杰. 隧洞洞内新型消能试验研究[J]. 东北水利水电,2007,25(11):56-58.
- [6] 吴战营,牧振伟,潘光磊. 导流洞出口消力池内设置悬栅消能工试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(4):39-41+104.
- [7] 吴战营,牧振伟. 辅助消能工联合运用试验研究及数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2013(7):111-117.
- [8] 李园园,牧振伟,吴战营,等. 新疆五一水库消力池悬栅消能水流水力特性数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(6):61-63+101.
- [9] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003:481-505.
- [11] 郭鹏飞,何建新,刘亮,等. 浇筑式沥青混凝土配合比设计优选方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(4):42-46.

(上接第209页)

沙进入弯道中段后,河床凹岸呈现蓝色,其变化为0,凸岸呈浅蓝色大致淤积了 0.014 m 厚的泥沙,整体呈现出凹岸冲刷,凸岸淤积的规律。

4 结 语

(1)利用 $k-\varepsilon$ 闭合紊流模型对大西沟石门子渠首人工弯道段进行水沙数值模拟,提取数据并分析,得到水位横比降、典型断面处的泥沙冲淤高程、泥沙的横向输移现象及泥沙冲淤后的河床形态,将断面处的泥沙冲淤形态与实测结果进行对比,吻合较好且符合弯道冲淤规律。

(2)弯道水沙本身具有三维特性,采用CCHE 2D模拟弯道,可通过读取河床变形及软件自带的历史记录文件等得到环流作用下的特殊现象及结果,并且与基本规律一致,大大缩短了数值模拟时间。但对于弯道横断面环流作用下的流速矢量分布图及其水沙变化过程,仍需借助三维软件来模拟。

参考文献:

- [1] 李山,卫树藩,严孝达,等. 新疆弯道式渠首引水防沙技术研究[J]. 中国水利,2003,(8):54-56.

- [2] 王庆,郭德发. 新疆人工弯道式引水枢纽的设计与运行[J]. 人民长江,2004,35(1):13-14.
- [3] 易雨君,王兆印,张尚弘. 考虑弯道环流影响的平面二维水沙数学模型(1)——模型的建立[J]. 水力发电学报,2010,29(1):127-132.
- [4] 钱宁. 河床演变学[M]. 科学出版社,1987.
- [5] 张瑞瑾. 水利工程. 河流泥沙动力学[M]. 水利电力出版社,1989.
- [6] 杜丽霞. 典型弯道水流中的水沙二相流三维数值模拟研究[D]. 新疆:新疆农业大学,2013.
- [7] 陆永军,张华庆. 推移质运动的二维数学模型[J]. 水动力学研究与进展:A辑,1994(003):284-294.
- [8] 叶克家,陈弘由,王书益,等. 美国国家计算水科学及工程中心河道变迁模式之引进及应用研究[A]. 第十三届海峡两岸水利科技交流研讨会,2009.
- [9] 刘玉玲,刘哲. 弯道水流数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2007,24(2):310-312.
- [10] Chao Xiaobo, Jia Yafei, A. K. M. Azad Hossain. Numerical Modeling of Salinity, Sediment and Algal Biomass in Lake Pontchartrain, Louisiana [C]. International Conference on Environmental Pollution and Public Health, China, Shanghai.
- [11] 李爱香,孙一,赵小娥,等. U形弯道水流试验及其数值模拟[J]. 长江科学院院报,2009,26(9):29-31.