



# 碍航礁石河段最低通航水位和整治效果分析

何洋<sup>1</sup>, 张帅帅<sup>2</sup>

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071; 2. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:** 为解决三峡库尾河段内危害大型船队安全航行的礁石碍航河段, 提高三峡水库的航运效益, 把重庆九龙坡以下的三峡库区河段规划为  $3.5\text{ m} \times 150\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$  的航道尺度。在三峡水库新的蓄水条件下, 对拟实施的长江三峡水库变动回水区碍航礁石炸除工程河段进行设计最低通航水位校核, 采用长河段一维水流数学模型研究整体炸礁方案对最低通航水位的影响, 并对炸礁方案实施后的整体效果进行校核。炸礁方案实施后, 除王家滩因忠水碛碛翅淤积外, 最低通航水位下炸礁河段航道尺度基本能够达到规划的标准; 断面水力指标组合均满足 3 000 吨级船舶自航上滩的临界条件。

**关键词:** 三峡变动回水区; 碍航礁石整治; 最低通航水位; 一维数学模型; 整治效果分析

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0137-06

## Designed lowest navigable level of navigation obstruction reef reach and regulation effect

HE Yang<sup>1</sup>, ZHANG Shuai-shuai<sup>2</sup>

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China;

2. Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of navigation-obstruction mechanism of large ships sailing in the reservoir tail reach and improve the shipping benefit of the three gorges reservoir, we planned the channel dimensions of three Gorges reservoir area downstream Chongqing Jiulongpo as  $3.5\text{ m} \times 150\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ . Under the new impoundment of three Gorges reservoir conditions, we check the designed lowest navigable level of navigation-reef river of the Three Gorges fluctuating backwater area, probe into the influence of regulation scheme on the designed lowest navigable level by a long reach one-dimensional flow model, and check the overall effect of regulation scheme. After implementation of the rock-blasting scheme, the channel under the designed lowest water level meets basically the planned standard except for Wangjiatan section, and the sectional hydraulic indices combination meet the 3 000 ton ships self-propulsion critical condition on the beach.

**Keywords:** fluctuating backwater area of the Three Gorges reservoir; navigation obstruction reef regulation; designed lowest navigable level; one-dimension mathematical model; regulation effect analysis

为解决库尾河段内危害大型船队安全航行的礁石碍航河段, 把重庆九龙坡以下的三峡库区河段规划为  $3.5\text{ m} \times 150\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$  的航道尺度。为提高三峡水库的航运效益, 拟实施长江三峡水库变动回水区碍航礁石炸除工程, 对变动回水区河段内的剪刀梁、青岩子、黄果梁、搬针梁等多处

碍航礁石进行炸除。本次炸礁工程亟待实施, 而设计最低通航水位则是确定本次炸礁工程的基础, 因此需要对即将实施的炸礁工程的碍航礁石河段进行设计最低通航水位校核。炸礁工程实施以后, 涪陵至重庆河段的整体航道尺度是最为关心的问题, 因此有必要对该河段在最低通航水位下的航

收稿日期: 2014-10-10

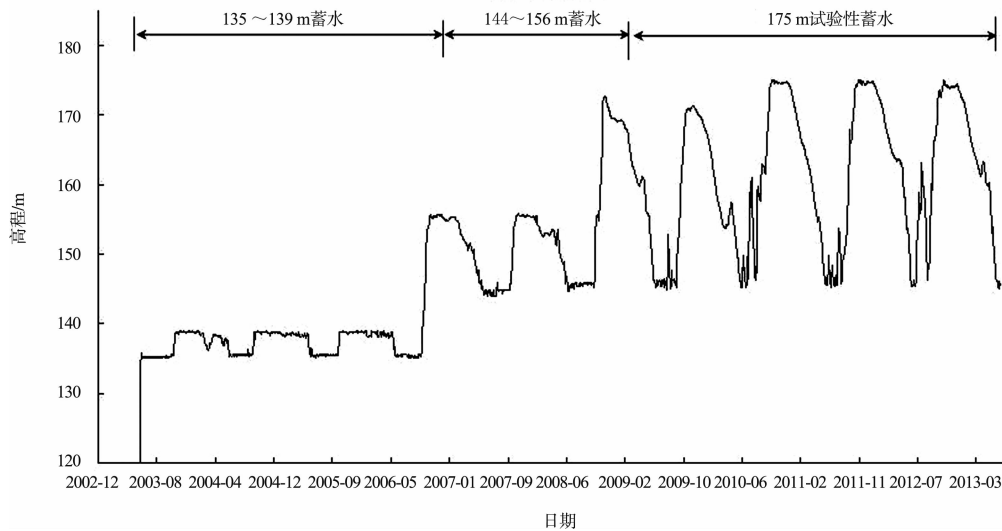
作者简介: 何洋 (1989—), 男, 硕士, 从事港口与航道工程总图、航道设计工作。

道尺度进行校核<sup>[1]</sup>。

采用长河段一维水流数学模型研究整体炸礁方案对最低通航水位的影响。并对滩险的炸礁方案通过一维数学模型进行研究,研究方案实施后河段内断面流速、比降及水深变化,判断方案的合理性,为变动回水区碍航礁石河段的整治提供支持。

## 1 变动回水区碍航礁石河段最低通航水位校核分析

三峡工程自2003年6月开始蓄水以来,经过了135~139 m、144~156 m调度运用阶段,于2008年9月底进入175~145~155 m试验性蓄水阶段,三峡坝前水位过程见图1。



注:吴淞高程,下同。

图1 2003—2013年三峡坝前水位过程

设计最低通航水位是航道规划与整治设计的重要指标,三峡工程建成蓄水后,三峡库区的航道条件发生了改变,原天然设计最低通航水位已经不再适用,需要根据蓄水后的条件重新计算。针对三峡水库蓄水后的情况,长江科学院先后于1995年和2004年分别进行了三峡水库设计最低通航水位的计算分析。三峡水库按照175 m试验性蓄水后,发现设计最低通航水位与实际情况有些差别。

文献[2]用2007和2008年的资料对数学模型进行了率定和验证,采用的水文系列的最近年份是2008年。为了提高最低通航水位计算的准确性,炸礁工程首先增加较新的资料对最低通航水位进行校核,根据GB 50139—2004《内河通航标准》<sup>[3]</sup>规定的包络线法采用数学模型进行计算校核,并增加三峡175 m蓄水后2009和2010年的资料,典型时段、设计流量、水位验证(糙率率定)3个方面资料的选择见表1。

表1 最低通航水位校核资料选择

计算时间	典型时段	设计流量	水位验证
2010年计算	1985—2008年	1985—2008年	2007—2008年
本次校核	1985—2010年	1985—2010年	2007—2010年

### 1.1 数学模型的建立与验证

#### 1.1.1 数学模型基本方程

一维水流运动和连续方程如下:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(UQ)}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式中:  $A$  为过水面积;  $Q$  为流量;  $U$  为断面平均流速;  $Z$  为水位;  $B$  为水面宽度;  $x$  为河段水平方向,沿下游为正;  $t$  为时间;  $\rho$  为水的密度;  $S_f$  为摩阻坡度。

由于研究的问题为长河段、长时段内发生的,可将整个计算时段划分为若干小时段,将长河段划分为若干短河段,在每个河段的时段内均可按恒定非均匀流考虑,则水流运动和连续方程可简化为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_f + h_j \quad (4)$$

式中:  $Z_2$ 、 $Z_1$  为计算段上、下游断面水位;  $v_2$ 、 $v_1$  为计算段上、下游断面平均流速;  $\alpha_2$ 、 $\alpha_1$  为计算段上、下游断面的动能修正系数, 一般取 1.05;  $h_f$  为沿程水头损失;  $h_j$  为局部水头损失。

根据式(3)和(4), 在首段流量、尾段水位和水头损失确定后, 即可算出各河道断面的水力要素。

### 1.1.2 河床地形及断面划分

计算范围从三峡大坝到水库回水末端(即红花碛, 距宜昌里程 720 km) 之上的江津, 航道里

程为 46.5 ~ 734 km。全河段均采用了长委水文局 2008 年 10 月的大断面地形数据, 碍航礁石河段则用 2012 年最新测图地形补充。

计算断面的划分综合考虑了重点计算区域、河道形态、水流条件以及计算工作量等因素。由于重点计算区域是变动回水区需要炸礁的涪陵至娄溪沟河段, 所以断面划分的主要原则就是: 常年回水区断面稀疏, 变动回水区炸礁段断面稍密, 且保证每个礁石处都至少有首部、中部和尾部 3 个断面。经过断面的布置(图 2), 共划分了 537 个计算断面, 常年回水区平均断面间距约 2 km, 变动回水区平均断面间距约 1.3 km, 其中礁石处的断面间距较小, 依赖礁石的大小而定。

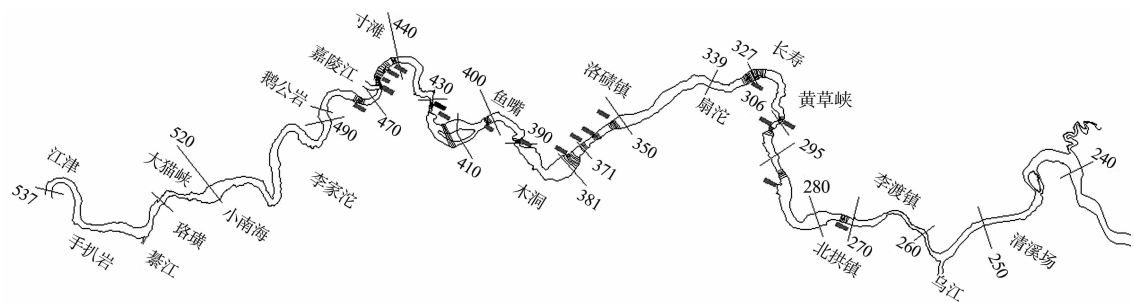


图 2 计算断面布置(涪陵至江津河段)(单位: km)

### 1.1.3 数学模型验证时间选取

本次计算成果主要作为三峡库区 175 m 运用初期阶段的设计最低通航水位的参考, 为碍航礁石整治提供依据, 因此, 为了尽量准确地模拟出 175 ~ 145 ~ 155 m 运行期间可能出现的库区沿程水位情况, 选取与 175 ~ 145 ~ 155 m 运行方式最接近的 2007—2008 年按 144 ~ 156 m 运行和 2008—2010 年按 175 ~ 145 ~ 155 m 运行两个阶段的库区水位流量过程数据, 作为模型验证的基础数据。验证时间选取见表 2。

### 1.1.4 数学模型验证结果

针对表 2 所选取的 12 个验证时间, 进行库区沿程多个水位站水位的验证, 水位验证结果见图 3。对实测水位和计算水位的对比可知, 两者差值较小, 偏差大部分在 10 cm 以内, 可见数学模型计算水位与实际情况吻合较好。计算结果与天

然实测资料较为一致, 说明数学模型的建立和数值计算方法合理, 可进行下一步方案设计最低通航水位的计算。

表 2 验证时间选取

调度阶段	验证时间	坝前 水位/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )		
			万州	寸滩	朱沱
消落期	2010-01-01	169.30	4 330	3 770	3 120
	2010-02-08	164.29	4 780	3 200	2 460
	2009-04-02	160.10	4 450	3 570	2 670
	2008-01-19	155.00	4 210	3 700	2 990
	2008-03-10	152.98	4 500	4 000	3 390
	2008-05-14	148.94	7 720	6 060	4 970
145 m 蓄水期	2008-06-09	144.72	11 600	8 670	6 860
	2010-06-18	145.22	12 400	10 000	7 620
蓄水期	2009-09-21	151.72	13 700	14 100	9 630
	2008-10-25	160.51	9 000	11 400	7 270
175 m 蓄水期	2008-12-25	169.46	4 770	4 410	3 570
	2010-12-08	174.65	5 600	4 590	3 910

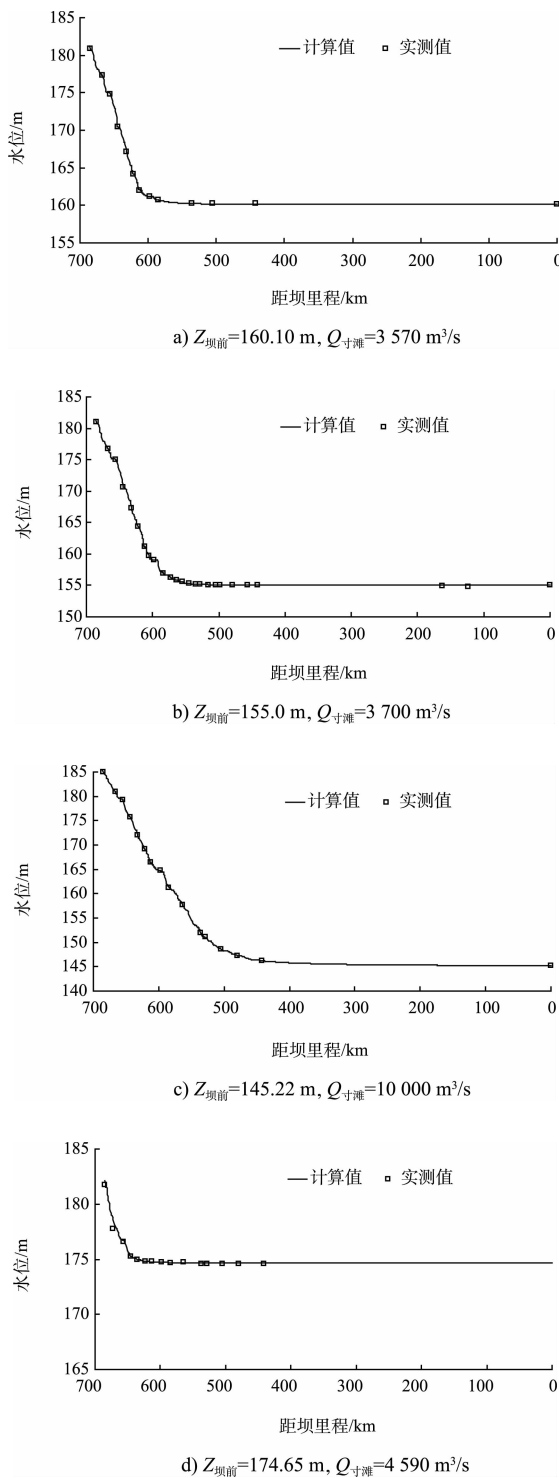


图3 计算与实测水位验证

### 1.2 设计最低通航水位计算成果分析

#### 1.2.1 计算方法

本次计算采用的包络线法，具体见 GB 50139—2004《内河通航标准》6.4.4 规定。

#### 1.2.2 典型水文系列年的选择

按照 GB 50139—2004《内河通航标准》的规

定，通航水位计算时基本站水位或流量资料具有良好的一致性时，应取近期连续资料系列，取用年限不短于 20 a；通航水位计算时工程河段的水文条件受人类活动和自然因素影响发生变化时，应通过分析研究，选取变化后有代表性的资料。2010 年计算成果选择 1985—2008 年系列年(共 24 a)作为计算的典型水文系列年。本文校核增加 2009 和 2010 年的水文数据，包括了大水年、中水年及小水年，满足设计最低通航水位计算的要求。

#### 1.2.3 时段划分及时段保证流量计算

根据三峡水利枢纽初步设计制定的 175 ~ 145 ~ 155 m 水位运行方案和 2008 年 9 月以来的 175 m 试验性蓄水运行方案，确定本次计算采用的坝前水位运行方案为：当年 9 月 21 日开始蓄水，10 月 31 日蓄至 175 m，11 月 1 日至 12 月 31 日按 175 m 运行，次年 1 月 1 日开始消落，2 月 28 日消落至 165 m，5 月 25 日消落至 155 m，6 月 10 日前消落至汛限水位 145 m，至 9 月 20 日按 145 m 运行。据此将全年划分为 27 个时段，消落期间的 3—6 月为本计算的重点时期，时段划分较细，其中 5 月 26 日—6 月 10 日，水位的消落速度最快，16 d 时间水位要降 10 m，平均降速约 0.625 m/d，因此将该时间段划分为每天一个时段。由于 6 月 10 日的坝前最低水位已经降至 145 m，与 6 月 11 日—9 月 20 日相同，因此统一将 6 月 10 日—9 月 20 日划分为一个时段。各时段的坝前水位取这个时段坝前水位调度线上的一个较低水位。坝前水位实际调度过程及时段划分对比见图 4。

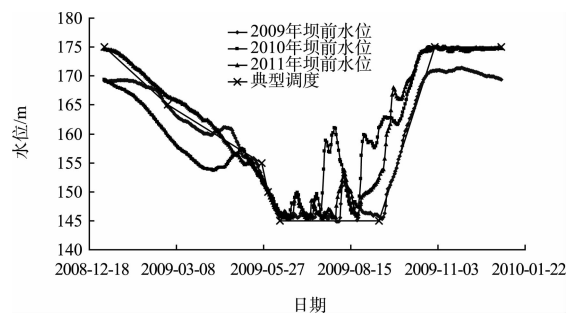


图4 坝前水位实际调度过程及时段划分对比

以 26 a (1985—2010 年) 里对应各时段的全部日平均流量为样本，计算各时段多年历时保证

率为 98% 的流量。因为各时段统计的样本容量为 26 个数据, 时段 9~20 (5 月 26 日—6 月 9 日) 样本容量太小, 计算其 98% 保证率流量不具有统计意义, 因此时段 9 至时段 20 的 98% 保证率流量均直接采用各时段的最小流量。

### 1.2.4 计算结果

根据划分的 1 a 中 27 个时段各自对应的坝前水位和保证率流量, 在率定好的 12 组糙率中选择与各时段水位流量相近的断面综合糙率, 计算出 27 条水面线, 统计出各断面的最低水位可得最终的设计最低通航水位 (图 5)。各滩险处设计最低通航水位对比见表 3。

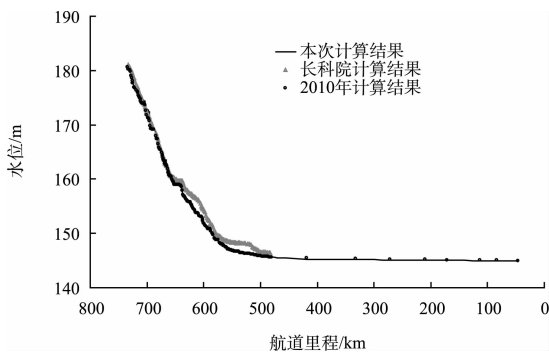


图 5 最低通航水位计算结果对比

表 3 各滩险处设计最低通航水位

地名	航道 里程/km	最低通航水位/m		
		2010 年成果	长科院成果	本文结果
剪刀峡	553.1	146.97	148.37	146.91
青岩子	567.2	148.06	148.91	148.01
黄草峡	574.4	148.77	149.57	148.74
大猪圈	576.8	148.81	149.60	148.76
王家滩	587.0	150.48	151.69	150.46
黄果梁	607.6	153.29	155.96	153.32
炉子梁	612.8	153.81	156.41	153.70
断头梁	614.1	153.94	156.56	153.88
搬针梁	616.2	154.35	156.68	154.36
明月峡	626.3	155.84	157.46	155.80
水葬	633.6	156.79	158.46	156.72
野土地	639.1	158.64	159.61	158.60
铜锣峡	644.8	158.93	159.65	158.94
门门子	655.0	159.70	160.37	159.64
草鞋碛	656.0	159.96	160.42	160.00
外梁	657.5	160.48	160.51	160.50
夫归石	658.2	160.54	160.56	160.60
龙碛子	663.1	161.90	162.00	161.98

从表 3 中可以看出, 计算成果与 2010 年成果相接近, 变化值在  $\pm 10$  cm 以内, 与长科院成果相比, 最大差值为 2.71 m。

## 2 炸礁方案实施后的整体效果校核

考虑到涪陵至重庆河段较长, 因而采用长河段的一维整体数学模型对最低通航水位下的航道尺度进行校核计算。尽管涪陵至重庆河段规划的航道尺度标准为  $3.5\text{ m} \times 150\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ , 但是目前并没有规定全河段整体的航道范围, 仅在各炸礁区域规划航道边界, 因此很难对全河段航道范围内的航道尺度进行校核。在目前的条件下, 主要对方案实施后全河段进行了最低通航水位下  $3.5\text{ m}$  水深河宽的计算比较, 另外对最低通航水位下的通航水流条件进行了研究<sup>[4]</sup>。

### 2.1 满足 3.5 m 水深的河道宽度

图 6 给出了在最低通航水位下涪陵至重庆河段满足  $3.5\text{ m}$  水深的河道宽度统计分析。计算表明, 炸礁方案实施后, 在最低通航水位下, 涪陵至重庆河段满足  $3.5\text{ m}$  水深的河道宽度在  $150 \sim 900\text{ m}$ 。其中最窄处在王家滩、黄草峡、铜锣峡、主城区, 而在王家滩最窄处仅  $150\text{ m}$  宽。

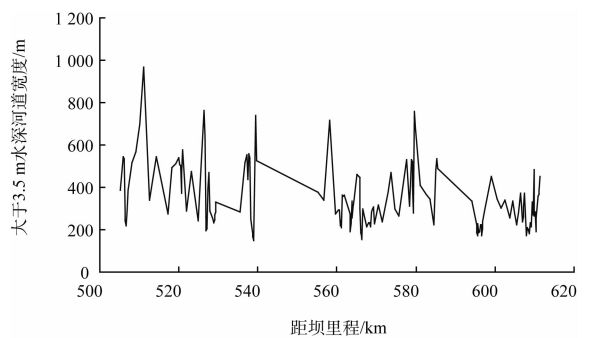


图 6 方案后涪陵至重庆河段满足  $3.5\text{ m}$  水深河宽 (最低通航水位)

尽管从满足  $3.5\text{ m}$  水深的河道宽度来说, 炸礁方案实施后全线均满足  $150\text{ m}$  的要求, 但是, 由于不是在所有满足  $3.5\text{ m}$  水深宽度内均可作为船舶航行的区域, 因而真正的航道尺度在局部河段并不能达到规划的  $3.5\text{ m} \times 150\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ , 尤其是在王家滩忠水碛的碛翅, 满足  $3.5\text{ m}$  水深的航道宽度还不足  $100\text{ m}$ <sup>[5]</sup>。

### 2.2 最低通航水位下的通航水流条件分析

图 7 统计对比了炸礁后涪陵至重庆河段最低通航水位下断面平均的水力指标, 从流速和比降组合来看, 最不利组合为  $2.35 \text{ m/s} + 0.00075$  (流速 + 比降)。而根据原交通部西部项目“三峡水库 135 m 蓄水库尾航道演变规律”中确定的库区船舶自航上滩水力指标 (图 8), 3 000 吨级船舶额定通航水力指标为  $2.95 \text{ m/s} + 0.00075$  或者  $2.35 \text{ m/s} + 0.0015$ , 因而, 断面平均最不利的水力指标组合是满足 3 000 吨级船舶上行的临界条件的。故炸礁方案实施后, 在最低通航水位下, 涪陵至重庆河段通航水流条件满足船舶航行的要求<sup>[6]</sup>。

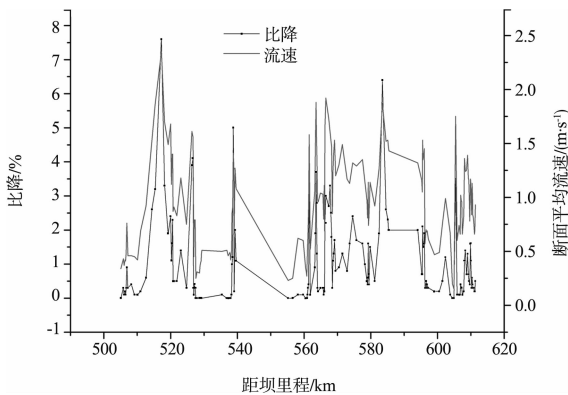


图 7 方案后研究河段断面平均的通航水力指标组合

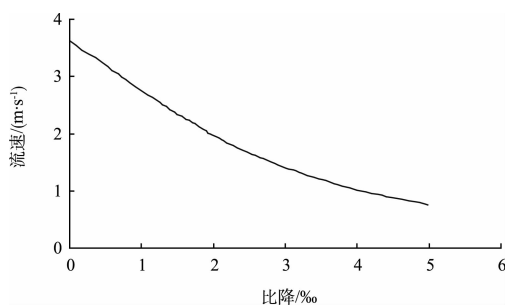


图 8 3 000 吨级船舶自航上滩水力指标

### 3 结论

利用三峡水库新的调度资料对设计水位进行计算分析, 计算结果与 2010 年结果相接近, 变化值在  $\pm 10 \text{ cm}$  以内, 与长科院结果相比最大差值为  $2.71 \text{ m}$ 。

最低通航水位下炸礁河段航道尺度除王家滩因忠水碛碛翘淤积外, 基本能够达到规划的  $3.5 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$  标准; 且断面水力指标组合均满足 3 000 吨级船舶自航上滩的临界条件。

### 参考文献:

- [1] 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学. 长江上游娄溪沟至涪陵河段炸礁工程方案数学模型研究报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2012: 82-90.
- [2] 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学. 三峡库区(175 m 运用初期) 设计最低通航水位计算与分析[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2010: 35-42.
- [3] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [4] 长江泸州航道局, 长江重庆航道局. 长江上游航行参考图[R]. 泸州: 长江泸州航道局, 2008: 1-38.
- [5] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].
- [6] 李艳红, 周华君, 时钟. 山区河流平面二维流场的数值模拟[J]. 水科学进展, 2003(4): 424-427.
- [7] 王秀红, 曹民雄, 马爱兴, 等. 乌江沙陀电站变动回水区航道整治二维水流数学模型研究[J]. 水运工程, 2012(11): 157-159.
- [8] 长江航道局. 三峡工程 175 m 蓄水初期变动回水区碍航河段整治措施的研究[C] //三峡工程泥沙问题研究九五成果汇编(第 5 卷). 武汉: 长江科学院, 1998: 322-330.

(本文编辑 武亚庆)

## 著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。