

# 乌江银盘船闸输水系统选型研究\*

陈明栋, 杨忠超, 杨斌

(重庆交通大学, 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:**银盘船闸设计最大工作水头 36.5 m, 是目前国内单级水头最高的船闸。为简化过大水头带来的阀门水力学问题, 提出了带调节水池和带省水池的船闸方案。通过对三种输水系统型式进行分析比较, 结果表明, 推荐的省水船闸方案不仅能满足设计和相关使用要求, 还可将阀门工作水头减少一半, 且船舶过一次闸可节省水量 48.6%。

**关键词:**高水头船闸; 输水系统; 选型

**中图分类号:**TV67 **文献标识码:**A **文章编号:**1006 - 7329(2006)05 - 0030 - 05

## Studies on the Type Selection of the Filling and Emptying System of Yingpan Lock on Wujiang River

CHEN Ming - dong, YANG Zhong - chao, YANG - Bin

(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Yingpan lock is the highest single level lock at present in China with a working head of 36.5m. This paper presents a regulation tank lock scheme and the water saving lock scheme to settle the valve hydraulics problem caused by high water head. By analyzing and comparing of the general single level lock, the regulation tank lock and the water saving lock, it is concluded that not only the recommended water saving lock can satisfy the design and the correlated operation requirements, reduce the valve work head by a half to simplify value hydraulics problem, but the water saving is possible at least by 48.6% in one ship passage through the lock.

**Keywords:** high - head lock; filling and emptying system; type selection

### 1 国内外高水头船闸现状

船闸是通航建筑物的主要型式之一, 经过长期设计技术的发展, 船闸以它技术上成熟, 运行稳定可靠, 营运成本低廉等优点得到广泛应用。但是, 受输水系

统工作条件的制约, 船闸对高水头的适用性较低。通常, 船闸较适用于 30 m 以下水头, 而升船机可应用于 35 ~ 70 m 水头。但是近年来, 随着船闸技术的发展, 高水头船闸越建越多。据不完全统计, 目前国内外已建单级水头在 30 m 以上的船闸共有近 20 余座, 表 1。

表 1 国内外部分中、高水头船闸

序号	船闸名称	型式	闸室尺寸 (长×宽)/m	最大水头 /m	输水时间 /min	阀门尺寸 /m	阀门型式	输水系统型式	门后体型
1	和平电站	带中间渠道	110 × 15	111(55.5)	15.5	2 × 2 × 3	反弧门	等惯性	突扩
2	乌斯基卡米 诺柯尔斯基	单级	100 × 18	42.0	45.0	-	平面	设中间消能室, 闸底长廊道	-
3	巴甫洛夫	单级	120 × 15	32.0	15.3	2 × 2 × 3	平面	闸底长廊道	-
4	第聂伯水 电站 2 线	单级	290 × 18	38.7	12.3	2 × 4 × 5	反弧门	等惯性	-
5	互莱伊拉	单级	86 × 12.1	33.0	11.0	-	-	等惯性	-
6	特朗巴特洛	单级	85 × 12	34.5	13.0	-	-	等惯性	-
7	索伯雷丁莎	单级	200 × 17	33.0(55.5)	-	-	-	立体分流, 闸底 8 纵支廊道, 4 区段等惯性	-

\* 收稿日期: 2006 - 05 - 15

西部项目: 交通部西部交通建设资助项目(200532800030)

作者简介: 陈明栋(1954 -), 男, 浙江奉化人, 副研究员, 主要从事船闸水力学和港航工程研究。

续表

8	图库鲁伊	带中间渠道	210×33	70.0	11.8	2×4×4	反弧门	立体分流,闸底8纵支廊道,4区段等惯性	—
9	普鲁米	单级	142×12	30.3	15.0	2×3×3	反弧门	水位分流,闸底4纵支廊道,2区段等惯性	—
10	约翰德	单级	206×26.2	34.5	—	3.66×4.27	反弧门	闸底前后横支廊道	顶扩
11	冰港	单级	206×26.2	31.4	11.4	3.66×4.27	反弧门	闸底前后横支廊道	顶扩
12	下纪念碑	单级	206×26.2	31.4	11.4	3.66×4.27	反弧门	闸底前后横支廊道顶扩	—
13	小鹅	单级	206×26.2	30.8	11.3	3.66×4.27	反弧门	闸底前后横支廊道	顶扩
14	下花岗岩	单级	206×26.2	31.6	8.10	3.66×4.27	反弧门	立体分流,闸底8纵支廊道,4区段等惯性	先平顶后顶扩
15	互尔特布汀	单级	192×25.6	39.6	15.5	2×3.7×3.7	反弧门	立体分流,闸底4纵支廊道	—
16	新威尔逊	单级	183×33.6	30.5	13.5	4.57×4.57	反弧门	闸底中部横支廊道	—
17	长江三峡	双线5级	280×34	113.0(45.2)	12.0	4.2×4.5	反弧门	立体分流,闸底8纵支廊道,4区段等惯性	底扩
18	万安	单级	160×14	32.5	10.0	3.0×3.0	反弧门	闸底长廊道	顶扩
19	水口	3级	130×12	57.5(41.7)	11.0	2.6×2.6	反弧门	立体分流,闸底4纵支廊道,2区段等惯性	顶侧突扩
20	五强溪	3级	130×12	60.9(42.5)	11.0	2.5×2.5	反弧门	立体分流,闸底4纵支廊道,2区段等惯性	顶侧突扩
21	铁门	双线2级	310×34	34.5	10.0	6×6	反弧门	闸底长廊道	顶侧突扩

注:表中列出的资料,主要由本文的参考文献中整理得出。

根据对国内外高水头船闸现状分析可知,目前世界船闸发展趋势是向高水头发展,水头为40 m左右的单级船闸已成为现实,更高水头的单级船闸也正在研究之中,我国对高水头船闸水力学的研究总体上已达到国际先进水平,具有丰富的研究经验<sup>[1-5]</sup>。

## 2 输水系统型式

### 2.1 普通单级分散输水方案

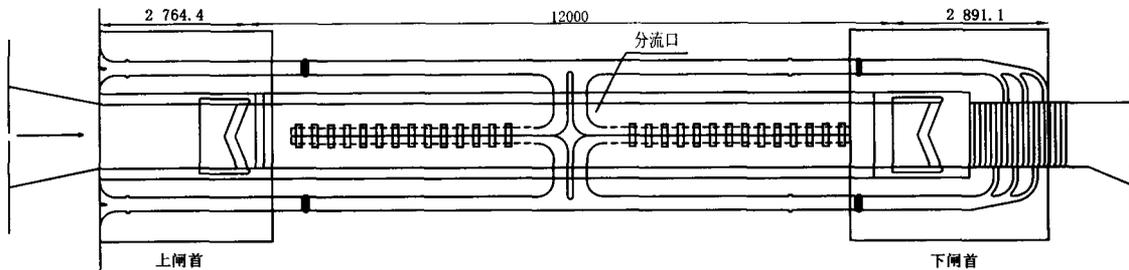


图1 普通单级分散输水方案平面布置图

### 2.2 带调节水池分散输水方案

图2是调节水池船闸方案原理示意图。灌水过程:上游向调节池灌水,同时调节池向闸室灌水(I过程),当闸室水位达到一定水位后关闭调节池阀门,由上游直接向闸室灌水,直到闸室水位与上游平齐(II过程);泄水过程:闸室向调节池泄水同时调节池将水泄向下游(I过程),当闸室水位下降到一定水位后,闸室直接向下游泄水(II过程)。调节水池方案基本目的是有效降低了工作阀门的作用水头,从而避免或减轻阀门水力学问题。

在三峡工程多级船闸的前期研究中,曾提出采用调节水池降低阀门工作水头的设想,推出了三峡带调节水池连续三级船闸方案<sup>[6,7]</sup>。20世纪90年代初期,

$$\text{银盘船闸的 } m = \frac{T}{\sqrt{H}} = \frac{10 \sim 12}{\sqrt{36.5}} = 1.66 \sim 1.99, \text{ 根据}$$

船闸设计规范,该船闸的最小  $m$  值小于1.8,必须采用第三类分散输水系统。考虑银盘船闸的具体情况,设计选择闸墙长廊道、闸底纵支廊道(二区段出水)、顶支孔加消能盖板的布置作为该船闸的输水系统布置型式。见图1。

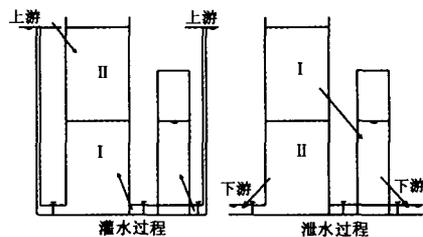


图2 调节水池船闸方案原理示意图

该船闸方案完成了水工整体模型试验和数学模型试验,主要参数比较如表2。

由表2比较可见,三级船闸增加两个调节水池,与五级船闸比较减少两级,闸室减少4个,阀门工作水头降低了7.53 m,技术指标优于连续五级船闸。水工模型研究表明<sup>[6]</sup>,当调节水池面积为0.3~0.756倍闸室

面积时,调节水池与闸室水力特性与普通单级船闸基本相同,说明带调节水池船闸方案技术上是可行的。

表 2 三峡带调节水池连续三级船闸方案设计与已建连续五级方案比较

	总水头	闸室有效尺度	级数	最大工作水头	双线闸室数	输水时间	备注
连续三级	113.0	280.0×34.0	3	37.67	10 个	11.53、12.92、14.72	增加 2 个调节水池
连续五级	113.0	280.0×34.0	5	45.20	6 个	12.7	

注:1.表中单位:m;2.输水时间分别为 2 min、5 min 和 8 min 开门。

带调节水池船闸方案的提出在国内外尚属于新事物,虽然技术先进,总体上可大大节省工程投资,由于各种原因未能应用于我国最大规模的三峡船闸上。但前期进行的多项研究已为该技术的应用打下基础,

基本具备在了在中小河流上实施的条件。

图 3 是银盘船闸调节水池方案平面布置图。本方案在上游水库与闸室之间增加了一座调节水池,水池面积仅为闸室面积的 0.4 倍。

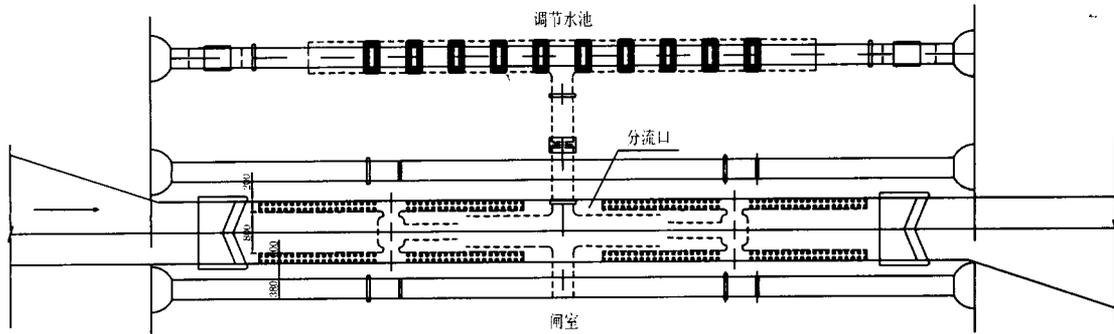


图 3 银盘船闸调节水池方案平面布置图

### 2.3 带省水池分散输水方案

在水资源日益匮乏的今天,水牵动着地方经济发展和人民的生活。船闸属耗水工程,在河流枯季水量不足情况下,发电与航运以及农业灌溉等方面矛盾突出。由此,在船闸设计中如能在解决过船问题的同时兼顾节约用水,由此产生的经济和社会效益将是巨大的。

图 4 是银盘省水船闸方案的原理示意图。省水船闸方案在上游水库与闸室之间增加了两座省水池,水池面积与闸室相等,但形状不限。将闸室总水头的水体均分为 4 份,省水池高度仅为总水头的 1/4 左右。灌水过程:省水 B 池向闸室灌水,将闸室 4 区灌满;接着省水 A 池向闸室灌水,将闸室 3 区灌满;闸室 1 区和 2 区由上游直接灌水直到水位平齐;泄水过程:闸室先向省水 A 池泄水,闸室 1 区水体将 A 池灌满,接着向 B 池泄水,闸室 2 区水体向 B 池灌满。闸室 3 区和 4 区水体直接泄向下游。由于船闸在灌泄水期间分别通过省水池储水,不仅可节省一半水量(理论上),阀门工作水头亦减少一半。

国外首次在船闸上采用省水池的是法国人卡莱利,其后德国在 19 世纪 80 年代就开始兴建省水船闸<sup>[8-10]</sup>,是研究和实践省水船闸最多的国家。在莱茵河~多瑙河上,即班贝格~凯尔海姆全长 171 km 河道上,共建造了 16 座船闸,其中 13 座为省水船闸。

省水船闸在我国应用较少,但相关研究一直在进行。如在 1959~1960 年间,在长江三峡船闸研究中就

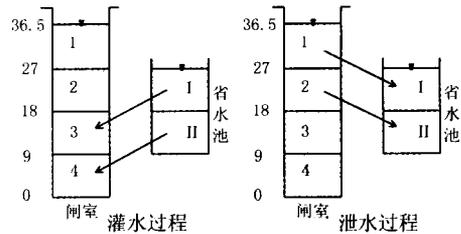


图 4 省水船闸方案原理示意图

提出过省水船闸方案及三峡船闸省水问题的分析<sup>[11]</sup>; 1977~1979 年间进行过郑家岗省水船闸模型试验<sup>[12]</sup>; 1981 结合南水北调中穿越黄河的平交方案,作了国内省水船闸有关问题的总结。以上研究为我国省水船闸的应用打下了基础。

图 5 是银盘船闸省水方案平面布置图。本方案在上游水库与闸室之间增加了两座省水池,水池面积与闸室相等,但形状不限。

## 3 银盘船闸方案比选

### 3.1 输水系统方案比较

研究比选的银盘船闸由普通单级方案、带调节水池方案和带省水池方案组成,三种方案输水系统布置特性见表 3。

3.1.1 普通单级分散输水方案 普通单级分散式输水方案具有布置简单,运行方式明晰的优点。但由于银盘船闸运行水头高达 36.5 m,存在下列问题<sup>[13-15]</sup>:

(1) 在灌、泄水初期巨大势能转化而来的高速水流易诱发的空蚀、空化,导致阀门段廊道产生破坏,导致频

繁检修;(2) 为满足输水系统的工作条件,如避免阀门段廊道出现过大大负压,减小高势能转化的水流动能对船只停泊的影响,将放慢阀门开启时间,将导致船闸输

水时间延长,从而降低船闸通过能力;(3) 输水系统布置困难、特别是闸室出流段将采用复杂消能工,不光增加了设计和施工难度,还将使造价攀升。

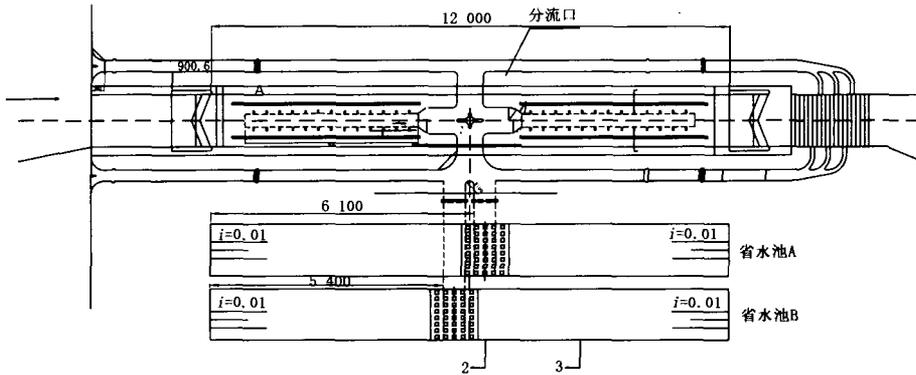


图5 银盘船闸省水方案平面布置图

表3 输水系统主要特性

参数	普通单级方案	调节水池方案	省水池方案
总水头/m	36.5	36.5	36.5
最大工作水头/m	36.5	22.0	18.25
闸室/m	120 × 12	120 × 12	120 × 12
调节水池/m	/	96 × 6	/
省水池/m	/	/	120 × 12 × 9.125 (2个)
阀门/个	4(反弧门)	6(反弧门) 1(平板门)	6(平板门)
省水率/%	/	/	48.6

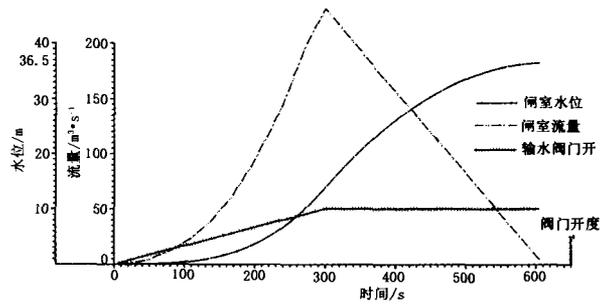
3.1.2 带调节水池分散输水方案 本方案的优点是有效降低了阀门工作水头,最大工作水头降为22m,可以避免或减轻工作阀门水力学问题,同时闸室消能工可以简化。缺点是:(1)工作阀门增多,运行方式比较复杂;(2)增加调节池,工程造价可能增加。(3)没有省水效果,甚至会增加航运耗水。

3.1.3 带省水池分散输水方案 本方案的优点最为突出:(1)降低阀门工作水头,采用2个省水池,工作水头降为普通单级方案的一半,显著改善阀门水力学问题。(2)有效减小航运耗水,采用2个省水池,理论上可以省水50%,最大限度发挥电航综合效益。(3)工作水头降低后,简化了闸室消能工布置。(4)本方案虽然采用6个阀门,但运行方式简单明晰,易操作。存在不足是增加了两个省水池和2个阀门,工程造价初期投资会增加,但这个缺点可以由后期产生的省水效益得以弥补。

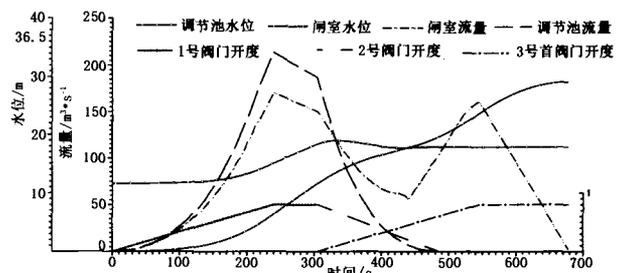
3.2 水力计算成果

在相同船闸尺度和工作水头条件下,计算的三种输水系统方案的水力特性成果见表4和图6。结果表明,通过选取适当的阀门开启时间,各方案水力特性指标都基本能满足相关要求。从闸室流量线来看,普通单级分散输水方案是单峰,峰值较大达230 m<sup>3</sup>/s,闸室

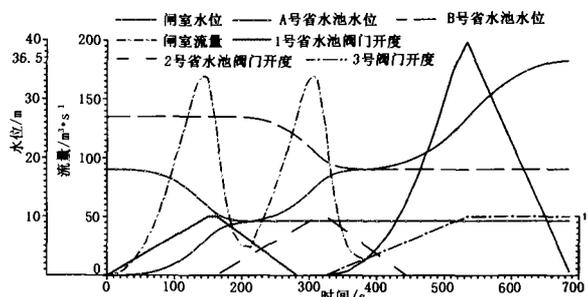
水位线也较陡;调节水池分散输水方案是两个峰,峰值较小,为169 m<sup>3</sup>/s,闸室水位线呈两台阶形,上升坡度较缓;省水池分散输水方案是三个峰,峰值170 m<sup>3</sup>/s,闸室水位线呈三台阶形,上升坡度最缓。



a) 普通单级分散输水方案灌水曲线



b) 带调节水池分散输水方案灌水曲线



c) 带省水池分散输水方案灌水曲线

图6 比选方案灌水水力曲线

表4 水力特性综合比较

参 数	方案1 普通单级船闸	方案2 调节水池			方案3 省水船闸		
阀门开启时间 $t_v/s$	灌水	300	240	240	150	150	180
	泄水	300	240	240	240	240	240
闸室输水时间 $T/s$	灌水	610	688			696	
	泄水	620	716			697	
最大流量 $Q/m^3 \cdot s^{-1}$	灌水	230	169	158	170	170	198
	泄水	223	188	184	166	166	194
水面上升、下降速率/ $m \cdot min^{-1}$	灌水	3.59	3.18			3.15	
	泄水	3.53	3.06			3.14	
流量系数 $\mu$	灌水	0.73	0.78	0.71	0.68	0.77	0.75
	泄水	0.71	0.75	0.68	0.65	0.73	0.69

#### 4 分析和结论

1) 在输水阀门不同开启情况下,三种方案闸室输水时间均小于12 min(720 s),均满足通过能力要求。其中,普通单级方案输水时间最短,灌、泄水分别为610 s和620 s;调节水池和省水船闸方案输水时间相当,均在700 s左右。

2) 灌、泄水最大流量比较可知,尽管单级方案开门速度较慢,但最大流量分别达到230和223  $m^3/s$ ;其它两个方案因流量为双峰和三峰曲线,数字较小,分布亦较均匀。

3) 闸室水面上升(或下降)速度比较说明,由于省水船闸采用二个省水池,每个省水池灌(泄)水时间较短,故闸室水位短时上升较快,但平均上升速度最小。

4) 从闸室水流条件比较,由于省水船闸前两个流量峰值较小,避免了灌泄水初期出现较大的波浪力和局部力,对船只停泊较为有利。单级方案相对较差。

5) 从运行方式比较,普通单级方案运行最为简洁;调节水池方案虽可削减一半水头,但因水池两端输水不平衡,导致调节池水位有一定变幅,不仅是将产生较多的补溢水,而且分水头效果稍差;省水船闸方案较普通船闸运行复杂,灌、泄水中均需开三次门,但运行线路清晰,可控性强。

6) 枢纽布置和工程量方面比较,省水船闸占用面积较大,投资相对较高。但由于单个水池高度仅约10 m,且呈阶梯构筑,因此布置上不会有大的困难,也不会过多增加山体开挖。反之,因水头减小后,廊道阀门段抬高可减少大量基础开挖和下水下混凝土工程量。

7) 综合比较认为:普通单级方案布置较简单,但最大水头36.5 m,阀门工作条件差,且对闸室消能工布置要求较高;调节水池方案,布置亦较简单,采用调

节水池分水头后,阀门最大工作水头22 m。但由于水池水位较难控制,将会给使用带来麻烦;根据银盘枢纽地形和地址条件分析认为,省水船闸布置上可行,阀门最大工作水头18.25 m,每次过闸能省水48.6%,技术和经济上都具有较大优势。因此,作为银盘船闸输水系统推荐方案。

本输水系统方案比选是通过枢纽中船闸平面布置和输水系统水力计算成果推出,输水系统的深入研究将在下阶段船闸水工整体模型中进行。

#### 参考文献:

- [1] 张瑞凯. 三峡多级船闸输水系统水力学研究综合报告[R]. 南京水利科学研究院, 1990.
- [2] 宣科祥. 高水头船闸输水阀门的空穴问题研究及其改善措施[J]. 南京水利科学研究院, 水利水运科学研究, 1990, (2): 213-221.
- [3] 张桂秀. 高水头船闸平面阀门底缘空穴流的试验研究[J]. 南京水利科学研究院, 水利水运科学研究, 1990, (3): 257-265.
- [4] 周华兴. 高水船闸阀门空化问题的研究[J]. 南京水利科学研究院, 水利水运科学研究, 1990, (4): 218-235.
- [5] 李云, 张瑞凯. 突扩廊道体型减免高水头船闸输水阀门空化研究[J]. 水动力学研究与进展, 1997, 12(2): 243-249.
- [6] 郑银功, 陈尔杰, 陈明栋, 等. 三峡带调节水池连续三级船闸方案研究报告[R]. 1993.
- [7] 陈明栋. 带调节水池船闸水力学问题初探[J]. 重庆交通学院学报, 1994, 13(4): 61-67.
- [8] 专题情报资料. 国外过船建筑物(第三辑)[Z]. 交通部水运规划设计院, 交通部科学技术情报所, 1973.
- [9] 西德运河交通工程考察报告[R]. 交通部赴西德运河交流工程考察小组, 1978.
- [10] 胡苏萍. 省水船闸输水系统的水力学问题[A]. 泄水工程与高速水流论文集[C]. 116-122.
- [11] 周华兴, 王永成. 省水船闸输水系统设计若干问题综述[J]. 河海科技进展, 1994, 14(1): 56-63.
- [12] 杨裔轩. 郑家岗省水船闸输水系统水力学实验[J]. 水利水运科学研究, 1980, (1): 37-45.
- [13] 须清华, 张瑞凯. 船闸水力学研究新进展[J]. 水利水运科学研究, 1995, (3): 234-245.
- [14] 李云, 胡亚安, 宣科祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 1999, 14(2): 232-239.
- [15] 邓廷哲. 船闸输水廊道阀门段水力学问题的分析研究[J]. 长江科学院院报, 1989, (2): 97-43.