

· 船 闸 ·



# 等惯性两区段分散输水系统 在40 m级单级巨型船闸中的应用\*

李 君<sup>1</sup>, 宣国祥<sup>1</sup>, 黄 岳<sup>1</sup>, 金 英<sup>1</sup>, 洪 娟<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 中国人民解放军理工大学野战工程学院, 江苏南京 210007)

**摘要:** 输水系统是船闸实现其功能的关键设施, 其设计直接影响船闸工程的安全与效率。等惯性四区段出水分散输水系统是目前国内外高水头大型船闸常用的输水系统形式, 但其结构复杂、建设难度大, 且由于设置第二分流口而带来自身空化等问题。为解决上述问题, 结合我国内河船闸特点, 通过国内外工程资料分析、理论与计算分析、物理模型试验等手段, 提出并验证了“闸墙长廊道+闸室中心立体分流+闸底两区段四纵支廊道出水+侧支孔+明沟消能”的等惯性两区段输水系统形式在40 m级单级巨型船闸中的适用性, 为高水头大型船闸建设提供参考和依据。

**关键词:** 船闸; 等惯性; 分散输水系统; 模型试验; 船舶停泊条件

中图分类号: U 641.3<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0020-06

## Application of two-section four-manifold total-balanced filling and emptying system in 40 m-grade single-step giant ship lock

LI Jun<sup>1</sup>, XUAN Guo-xiang<sup>1</sup>, HUANG Yue<sup>1</sup>, JIN Ying<sup>1</sup>, HONG Juan<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;  
2. PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** As the critical facility of the navigation lock's function achievement, filling and emptying system design directly influences on the safety and efficiency of lock engineering. Four-section total-balanced filling and emptying system is commonly applied in high-head large locks domestic and foreign. However, the system has the disadvantages of complicated structure and high construction difficulty, also the cavitation problem of its secondary divider. There are the characteristics of inland locks in China, the analysis of domestic and international engineering data, theoretical and mathematical research, physical model experiment to avoid these disadvantages. The feasibility and applicability of the two-section four-manifold total-balanced filling and emptying system with "long culvert in lock wall + vertical divider at lock center + two-section four-manifold at lock chamber bottom + side ports + open ditches for energy dissipation" has been proved and verified in 40 m-grade single-step giant lock, which provides the reference and basis for high-head large lock designment.

**Keywords:** ship lock; total balanced; dispersed filling and emptying system; model experiment; ship berthing condition

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402001), 交通运输部科技项目 (2013328746550)

作者简介: 李君 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事通航建筑物水力学研究。

输水系统是船闸完成充泄水过程从而实现船舶过坝的关键设施, 其设计优劣直接影响船闸工程的安全与效率。确保过闸船舶安全及船闸自身安全是输水系统设计关注的重点, 为实现上述目标需要做到以下 3 点: 1) 控制船闸输水流量, 一方面可以使输水系统各断面流速能够满足规范要求以确保船闸自身安全, 另一方面可以控制进入闸室内的水流能量以满足过闸船舶安全; 2) 提高进入闸室内水流的均匀程度, 以减少由于纵、横向水面比降引起的船舶受力增加; 3) 增强闸室内局部水流的能量耗散, 以减少由于局部水流紊动作用力引起的船舶受力增加。控制输水流量可通过调整输水阀门运行方式, 提高闸室水流均匀性和能量耗散则需要通过选择不同的输水系统布置

与消能方式加以解决。

对于高水头大型船闸, 其一次输水过程输水体积与水流能量巨大, 大面积闸室水流均匀性与消能问题突出, 其输水系统需采用分散输水系统形式。根据现行船闸输水系统设计规范<sup>[1]</sup>, 分散输水系统可分为第一类分散输水系统(即简单式分散输水系统)、第二类分散输水系统(即较复杂式分散输水系统)和第三类分散输水系统(即复杂式分散输水系统), 其中第三类分散输水系统是国内外高水头船闸通常采用的输水系统形式(表 1), 包括闸墙长廊道闸室中心进口垂直分流闸底支廊道两区段出水(简称两区段形式)和四区段出水形式(简称四区段形式), 其原理均源于法国工程师提出的等惯性输水方式<sup>[2]</sup>。

表 1 国内外高水头大型船闸

船闸名称	国别	形式	闸室尺寸(长×宽)/(m×m)	最大水头/m	输水系统形式
Walter Bouldin	美国	单级	192.0×25.6	39.6	第三类/两区段
Zaporojie	俄罗斯	单级	290.0×18.0	39.2	第三类/四区段
Lajeado	巴西	单级	210.0×25.0	37.3	第三类/四区段
Tucurui (upstream)	巴西	单级	210.0×33.0	36.5	第三类/四区段
Tucurui (downstream)	巴西	单级	210.0×33.0	35.0	第三类/四区段
John Day	美国	单级	205.7×26.2	34.5	第二类/闸底前后横支廊道
Lower Granite	美国	单级	205.7×26.2	32.0	第三类/四区段
Ice Harbor	美国	单级	205.7×26.2	31.4	第二类/闸底前后横支廊道
Lower Monumental	美国	单级	205.7×26.2	31.4	第二类/闸底前后横支廊道
Little Goose	美国	单级	205.7×26.2	30.8	第二类/闸底前后横支廊道
New Wilson	美国	单级	183.0×33.6	30.5	第二类/闸底中部横支廊道
三峡	中国	双线五级	280.0×34.0	113.0(45.2)	第三类/四区段
葛洲坝 1#	中国	单级	280.0×34.0	27.0	第三类/四区段
葛洲坝 2#	中国	单级	280.0×34.0	27.0	第二类/闸底纵横支廊道

由表 1 可知, 为确保船闸输水过程船舶安全及船闸自身安全, 国内外高水头大型船闸尤其是水头超过 35 m 的船闸大多采用了结构最为复杂的第三类分散输水系统中的四区段出水形式, 表中水头最高的美国 Walter Bouldin 船闸尽管采用了两区段出水形式, 但其闸室规模较其他船闸相对较小, 且为研究方案并未付诸实际。此外, 表 1 中三峡船闸为多级船闸, 尽管其中间级船闸水头达到 45.2 m, 但由于其输水过程中上下闸室水位均

在变化, 实际水流能量及输水难度远低于同水头下的单级船闸。

相较两区段出水形式, 四区段出水形式可获得更为均匀和平稳的闸室水流条件, 但其结构形式更为复杂, 同时还面临第二分流口分流均匀性及自身空化难题, 其建设难度与维护成本亦相对较高。本文拟针对我国内河船闸工程特点, 研究等惯性两区段分散输水系统在 40 m 级单级巨型船闸(闸室规模与三峡船闸一致)中的适用性。

## 1 40 m 级单级巨型船闸输水水力特点

为定量描述 40 m 级单级巨型船闸输水过程的水力特点,分别引入一次输水过程中的输水体积  $V$ 、单位时间内的输水体积  $V_t$ 、进入闸室的平均能量  $E$ 、单位闸室面积平均能量  $E_c$  以及平均比能

表 2 国内外部分船闸一次输水过程相关水力指标

船闸名称	$V/m^3$	$V_t/(m^3/s)$	$E/(10^4 kW)$	$E_c/(kW/m^2)$	$E_p/(kW/m^3)$
Walter Bouldin	194 642	270	4.7	9.50	1.98
Zaporojie	204 624	289	5.5	10.65	1.94
三峡	234 362	391	9.4	9.28	1.86
拟研究船闸( $T=12$ min)	421 600	586	11.5	10.90	1.88
拟研究船闸( $T=15$ min)	421 600	468	9.1	8.72	1.50

由表 2 可以得出 40 m 级单级巨型船闸输水过程水力特点包括:1) 一次输水过程输水体积及单位时间输水体积大,均居世界船闸首位,输水体积为目前世界最高水头单级船闸 Zaporojie 船闸的 2.2 倍,为三峡船闸的 1.8 倍,相当于充满 170 个标准游泳池,1 min 则需分别充满 14.0 个和 11.2 个标准游泳池(分别对应 12 min 输水时间和 15 min 输水时间);2) 充水能量巨大,一次输水过程进入闸室的水流平均能量分别是 Zaporojie 船闸的 2.4 倍和 1.6 倍,分别为三峡船闸的 1.2 倍和 0.97 倍;3) 从更能反映对输水系统消能要求的单位闸室面积平均能量和平均比能指标来看,待研究船闸对输水系统的消能要求要接近甚至低于已建高水头船闸。由此可知,尽管 40 m 级单级巨型船闸水头高、规模大、一次输水过程输水体积和单位时间输水体积巨大,但其对输水系统消能要求与国内外已建高水头船闸相当,因此,现有输水系统消能方案可以满足其要求,如进一步放宽其输水时间要求,解决其消能问题难度将进一步降低。

从目前国内已建船闸工程运行数据来看,过闸船舶以单船为主,船舶尺度与巨型船闸闸室规模相比较小,即使设计时通常考虑的大型顶推船队尺度,也基本上仅占闸室的 1/4 左右(图 1)。无论船舶(队)停靠在闸室何位置,其仅受船舶(队)

$E_p$ <sup>[3]</sup> 5 个水力指标。分别计算几座接近 40 m 级高水头船闸的上述指标并进行对比分析。在此,拟研究船闸基本参数设定如下:船闸水头为 40 m,闸室有效尺度为 280 m×34 m×5.8 m(长×宽×槛上水深),输水时间 15 min。计算结果见表 2。

尺度范围内局部水流作用力,而对整闸室水流流态包容性较好,水流整体均匀度要求可适当放宽,从而可简化输水系统布置。

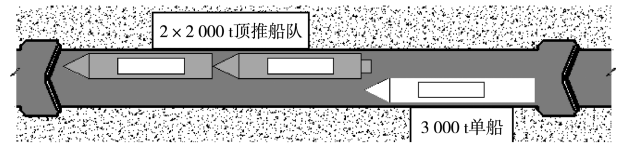


图 1 巨型船闸与常见设计船舶(队)尺度对比

综上所述,若在放宽船闸输水时间并考虑现有过闸船舶特点的基础上,等惯性两区段出水输水系统在 40 m 级单级巨型船闸中应用是具有可能性的。

## 2 40 m 级单级巨型船闸等惯性两区段输水系统布置

40 m 级单级巨型船闸等惯性两区段输水系统布置时需重点考虑闸室水流消能问题。解决闸室水流消能问题途径有三类:1) 设计高效的消能设施;2) 降低单位输水强度;3) 增加闸室消能空间。

国内外中高水头船闸闸室消能设施主要有两种:“顶支孔+盖板”消能设施和“侧支孔+明沟”消能设施。前一种消能设施是由南京水利科学研究院于 1958 年在富春江七里泷船闸首先提出并应用,随后在五强溪、水口、葛洲坝 1<sup>#</sup>、三峡、银盘、乐滩、大化等国内高水头船闸内广泛应用;

后一种消能设施则被国外高水头船闸通常所采用, 2000 年后在国内逐步推广应用, 目前已应用于长洲三线 and 四线、桂平二线、西津二线、红花二线、桥巩、峡江等中高水头大型与巨型船闸(图 2)。

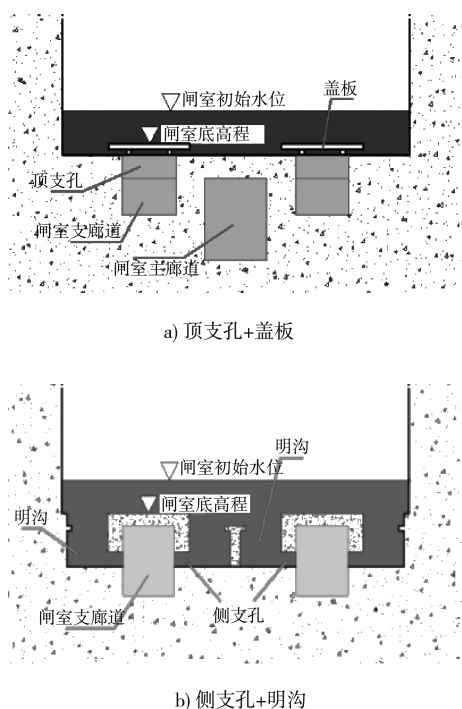


图 2 中高水头船闸常用消能设施

关于两种消能设施的消能效果, 从图 2 直观上看, 明沟消能的消能空间远大于盖板消能, 其消能效果将优于盖板消能。从定量上分析, 国内南京水利科学研究院<sup>[4]</sup>和重庆交通大学分别开展过相应研究<sup>[5]</sup>, 结果表明: 在相同条件下明沟形式的消能效果要优于盖板形式。美国陆军工程兵团船闸水力设计手册<sup>[6]</sup>“高水头船闸设计”一章中明确规定: “由闸室内出水支孔进入闸室的大部分能量需由沿闸室内出水廊道通长布置的明沟内进行耗散”。除消能效果较好之外, 纵向明沟对闸室纵向水流还有较好的二次分配调整作用, 采用一区段出水(出水均匀程度较两区段出水低)纵向明沟消能的长洲三线四线巨型船闸 2×2 000 t 船队模型, 实测最大纵向系缆力仅为规范允许系缆力的 50%<sup>[7]</sup>, 同样采用该布置形式的桂平二线巨型船闸现场实测 1 500 t 单船系缆力不足 1 000 t 船舶允许系缆力的 1/6<sup>[8]</sup>。采用综上分析, 40 m

级单级巨型船闸等惯性两区段输水系统闸室内消能设施应选用消能效果更佳的“侧支孔+明沟”形式。

船闸在流量过程一定后, 降低输水强度的措施就是尽可能增加闸室内出水段长度, 最好是全闸室出水。例如德国最新设计的闸底压力室输水系统<sup>[9]</sup>中, 闸底压力室通过主廊道与进水口相连, 在压力室顶部分区段布置多达 350 个喷嘴, 从而大大降低单个喷嘴的输水强度, 以使水流均匀进入闸室。与四区段出水形式需设置两个分流口(分流口区域不设出水孔)不同, 两区段出水形式仅需设置一个分流口, 从而增加了闸室内的出水区域面积, 从而达到降低输水强度的目的。因此, 40 m 级单级巨型船闸输水系统采用两区段布置是合适的。

船闸输水是一个非恒定过程, 充水过程中进入闸室能量由零逐渐达到最大值并最终变为零, 同时闸室水深、水垫层也不断增加, 也即消能水体空间不断增大。不断增加的消能水体空间对出水孔的水流起到很好的缓冲作用。对于阀门快速开启方式, 进入闸室能量达到峰值时闸室水位上升较慢, 闸室内消能水体空间较小, 不利于水流消能; 反之, 对于阀门慢速开启方式, 进入闸室能量达到峰值时闸室水位已上升较多, 闸室内消能水体空间较大, 有利于水流消能。为此, 40 m 级单级巨型船闸输水宜采用阀门慢速开启方式, 但为同时满足输水时间要求, 输水廊道尺寸也需加大, 这点给利用闸室空间布置四区段出水明沟消能形式带来困难。

综上分析, 针对 40 m 级单级巨型船闸输水水力特点, 采用“等惯性两区段出水+明沟消能”既可全部满足三类降低水流能量和强度的方法和工程措施, 又可满足输水阀门慢速开启要求。因此, 40 m 级单级巨型船闸输水系统推荐采用“闸墙长廊道+闸室中心立体分流+闸底等惯性两区段出水(四纵支廊道)+侧支孔+明沟消能”形式(图 3)。

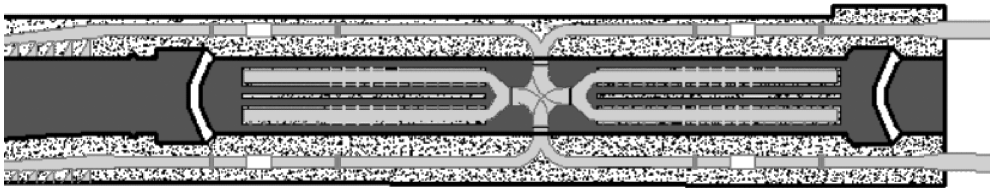


图3 40 m级单级巨型船闸等惯性两区段输水系统布置

### 3 物理模型试验验证

#### 3.1 输水系统布置与物理模型设计

为检验等惯性两区段输水系统在40 m级单级

巨型船闸中的适用性，建立1:30的整体物理模型开展水力学模型试验，研究与分析该输水系统的输水水力特性与船舶停泊条件(表3)。

表3 输水系统特征尺寸

部位	描述	面积/m <sup>2</sup>	与输水阀门面积比
进水口	导墙侧向垂直多支孔进水	560.0	10.2
输水阀门段廊道	阀门后采用突扩廊道体型	55.0	1.00
闸墙长廊道	通过斜坡分别与充泄水阀门段廊道连接	70.0	1.27
分流口	垂直分流舌布置于闸墙主廊道内，距闸室中心12 m	84.0	1.53
闸室出水段廊道	两区段、每区段两根出水支廊道	120.0	2.18
闸室出水支孔	每根支廊道每侧各18个出水孔，顺水流方向分为3组，每组6孔，孔口宽度分别为0.50 m、0.45 m及0.40 m，高度均为1.20 m，出水支孔间隔6.0 m	77.76	1.41
消能明沟	每根出水支廊道两侧各设一道消能明沟，明沟宽4.0，深4.5 m，挡槛距明沟底部3.0 m		
下闸首出水口	采用全部旁侧泄水的形式	112.5	2.04

#### 3.2 闸室输水水力特性

在40 m水头下开展了阀门慢速开启方式下的闸室输水水力特性试验，主要水力特征值见表4，

其与已建葛洲坝1#船闸和三峡船闸实测输水水力特性对比见表5。

表4 闸室输水水力特征值 (40 m水头)

输水方式	$t_v$ /min	$T$ /min	$Q_{max}$ /(m <sup>3</sup> /s)	$v_{max}$ /(m/s)	$W_{max}$ /(m/s)	$U_{max}$ /(m/min)	$d$ /m
充水	7	14.73	844	12.06	10.05	4.92	0.98
	8	15.12	801	11.44	9.54	4.67	1.00
泄水	7	14.42	815	11.64	9.70	4.75	-1.18
	8	14.84	788	11.26	9.38	4.59	-1.19

注： $t_v$ 为阀门开启时间， $T$ 为闸室输水时间， $Q_{max}$ 为最大流量， $v_{max}$ 为输水主廊道平均最大流速， $W_{max}$ 为分流口平均最大流速， $U_{max}$ 为闸室水面最大上升(下降)速度， $d$ 为惯性超高(降)。

表5 拟研究船闸与已建船闸输水水力特性对比

船闸	来源	最大充水流量/(m <sup>3</sup> /s)	输水时间/min	主廊道平均最大流速/(m/s)	分流口平均最大平均流速/(m/s)	闸室水面最大上升速度/(m/min)	惯性超高、超降/m
拟研究船闸	模型试验值	844~801	14.7~15.1	12.1~11.4	10.1~9.4	4.9~4.7	1.0、1.2
	原型估计值	909~865	12.9~13.3	13.0~12.4	10.9~10.2	5.3~5.1	
葛洲坝1#船闸	原型观测值	868	9.2	12.4	10.8	4.94	
三峡船闸	原型观测值	712	10.1	14.4	15.9	3.98	2.15

由表4和表5可知，40 m级单级巨型船闸等惯性两区段输水系统采用阀门慢速开启方式时，其模型平均输水时间不超过15 min，经缩尺效应

校正的原型输水时间则不超过13.5 min，输水流量、分流口流速等输水水力指标基本与三峡、葛洲坝1#船闸处于同一量级，同时满足规范相关要

求。若在满足原型输水时间不超过 15 min 要求的基础上进一步放慢阀门开启速度,则各项水力指标还将进一步降低。因此,从输水水力特性而言,等惯性两区段输水系统可以满足 40 m 级单级巨型船闸的设计要求。

### 3.3 闸室船舶停泊条件

在 40 m 水头充水阀门 7 min 双边开启工况下,对 3 000 t 单船和 2×2 000 t 顶推船队在闸室内不同位置停靠时的系缆力进行测量,实测船舶最大纵

向力和横向力见表 6,与规范允许值对比见表 7。

表 6 双边开启方式闸室内船舶(队)最大系缆力(40 m 水头)

船舶(队)类型	$t_v$ /min	船舶(队)停泊位置	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
3 000 t 单船	7	闸室前段	19.6	8.8	17.1
		闸室中间	16.9	12.1	13.9
		闸室后段	18.9	12.7	11.9
2×2 000 t 船队	7	闸室前段	24.1	9.3	14.3
		闸室后段	22.1	12.5	13.2

表 7 双边开启方式( $t_v=7$  min)闸室内船舶(队)最大系缆力与规范允许值对比(40 m 水头)

船舶(队)类型	最大纵向力/kN	纵向力规范允许值/kN	最大纵向力/规范允许值/%	最大横向力/kN	横向力规范允许值/kN	最大横向力/规范允许值/%
3 000 t 单船	19.6	46.0	42.6	17.1	23.0	74.3
2×2 000 t 船队	24.1	40.0	60.2	14.3	20.0	71.5

由表 6 可知,40 m 级单级巨型船闸等惯性两区段输水系统采用阀门慢速开启方式时,大型单船和船队的系缆力均满足规范要求,并有较大富裕,同时也论证了本文第 2 节的分析结果。若进一步放慢阀门开启速度,或对消能明沟进一步挖深或在明沟内布置消力梁,则可继续改善闸室水流条件和船舶停泊条件,优化空间较大。因此,从闸室船舶停泊条件而言,等惯性两区段输水系统亦能满足 40 m 级单级巨型船闸的设计要求。

## 4 结语

1) “闸墙长廊道+闸室中心立体分流+闸底两区段四纵支廊道出水+侧支孔+明沟消能”的等惯性两区段输水系统形式在 40 m 级单级巨型船闸中应用是可行的。

2) 闸室输水水力特性模型试验表明,40 m 级单级巨型船闸采用等惯性两区段输水系统采用阀门慢速开启方式时,其原型输水时间不超过 15 min,各项水力指标与三峡、葛洲坝 1# 船闸处于同一量级,同时满足规范相关要求。

3) 闸室船舶停泊条件模型试验表明:40 m 级单级巨型船闸采用等惯性两区段输水系统采用阀门慢速开启方式时,大型单船及船队系缆力满足规范要求,且有一定富裕。

4) 与等惯性四区段输水系统相比,等惯性两区段输水系统具有结构简单、建设与维护成本低、水流条件优化空间大等优点,同时避免了设置第二分流口带来的一系列问题,可在今后高水头巨型船闸建设中加以推广应用。

## 参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [2] 涂启明.高水头船闸形式选择探讨[J].水运工程,1991(5):26-33.
- [3] 覃业传,宣国祥,麦建清,等.大藤峡水利枢纽单级船闸输水系统初步分析[J].水利水运工程学报,2012(4):71-76.
- [4] 南京水利科学研究院.西部超高水头枢纽通航建筑物关键技术研究[R].南京:南京水利科学研究院,2007.
- [5] 杨忠超,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸闸室明沟消能效果及机理分析[J].水运工程,2009(12):168-173.
- [6] US Army Corps of Engineers.Hydraulic Design of Navigation Locks[S].Vicksburg:US Army Corps of Engineers,2001.
- [7] 宣国祥,李君,黄岳.长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计阶段输水系统水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2012.
- [8] 陈勇,李君,宣国祥.西江桂平二线船闸水力特性原型观测与实船试验[J].水运工程,2014(9):109-114.
- [9] PIANC WG 106.Innovations in navigation lock design[R].Brussels:PIANC,2009. (本文编辑 王璁)