



# 水力式升船机组合阀流量比优化研究\*

王 蛟<sup>1</sup>, 胡亚安<sup>2</sup>, 马希钦<sup>1</sup>, 蔡新永<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400016;

2. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室,

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 景洪水力式升船机阀门段采用“并列三阀+矩形突扩体”的布置形式, 目前组合阀流量分配暂无科学的指导依据。以景洪水力式升船机为依托, 建立阀门段三维数值模型, 研究组合阀不同流量比下的阀门段流场特性。结果表明, 三阀联合运行时, 突扩体内流场均匀度最佳; 三阀联合运行时, 主辅阀流量比为 3:1 时, 流场内最低压力最高、最大流速最小、紊动较弱, 最有利于抑制空化; 组合阀合理流量比与流量系数比正相关, 景洪工程组合阀较优的主辅阀流量比约为 3:1。

**关键词:** 水力式升船机; 组合阀; 数值模拟; 流量比

中图分类号: U 642.1; TV 672

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0091-05

## Flow ratio optimization of combined valves in hydro-driven ship lift

WANG Jiao<sup>1</sup>, HU Ya'an<sup>2</sup>, MA Xiqin<sup>1</sup>, CAI Xinyong<sup>1</sup>

(1. Chongqing Jiaotong University, Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering,

Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering, Chongqing 400016, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structures State, Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The layout of “parallel three valves+rectangular sudden expansion” is adopted in the valve section of Jinghong hydro-driven ship lift. At present, there is no scientific guiding basis for the flow distribution of the combined valves. In this paper, based on Jinghong hydro-driven ship lift, a three-dimensional numerical model of valve segment is built to study the flow field characteristics under different flow ratios of combined valves. The results show that the flow field uniformity of joint operation of three valves is the best. When the flow ratio of valves is equal to 3:1, the lowest pressure in the flow field is the highest, the maximum velocity is the lowest, the turbulence is weak, and the cavitation is best inhibited. The reasonable flow ratio of combined valves is positively correlated with the flow coefficient ratio. The optimal flow ratio of the main and auxiliary valves is approximately equal to 3:1 for combined valves in Jinghong project.

**Keywords:** hydro-driven ship lift; combined valves; numerical simulation; flow ratio

水力式升船机是一种全新的升船机形式, 通过输水系统向竖井充泄水, 改变平衡重的入水深度, 平衡重在浮力、自身重力以及承船厢侧拉力的综合作用下不断自动调整淹没深度以适应竖井

水位的变化。由于承船厢通过钢丝绳及卷筒与平衡重相连接, 当平衡重与竖井水位同步升降时, 承船厢也同步升降, 从而实现水力式升船机的动态运行。从水力式升船机的运行原理可知, 在应

收稿日期: 2022-07-28

\*基金项目: 重庆市教委科技研究项目 (KJQN202000722)

作者简介: 王蛟 (1989—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为通航建筑物水力学。

对极端事故工况、下水式升船机船厢重力大幅变化等方面具有传统电机驱动式升船机不可比拟的技术优势,比较适合我国通航发展需求,具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。景洪升船机是世界上第 1 座水力式升船机,由于没有工程经验可供借鉴,景洪工程从设计论证、施工建设到运行调试,无不充满挑战与创新。景洪工程的成功通航,标志着水力式升船机的实践成果,但作为最新型的一种升船机形式,还有许多值得优化和深入研究的地方。

输水系统是水力式升船机所特有的控制系统,类似于传统电力驱动式升船机的控制电机,是升船机安全、高效运行的关键。升船机在运行时,一方面要提高运行效率,要求输水系统在空中运行阶段供流量大;另一方面要求船厢对接时误差小,尽量减小对接难度,此时输水系统供流必须精确。基于以上要求,景洪工程采用了“一主两辅”的组合阀布置形式(图 1),主阀居中,流量系数较强;两侧为辅阀,过流能力较弱。多阀门向同一有限腔体内排放水体,在满足升船机运行特性的基础上,为了尽量降低多股水流对突扩体及汇合管段的冲击影响,如何合理地运行组合阀、分配三阀流量是一个亟待解决的问题。目前,景洪工程输水系统组合阀的运行方式可以满足工程需要,但尚缺乏科学的指导依据<sup>[2]</sup>。

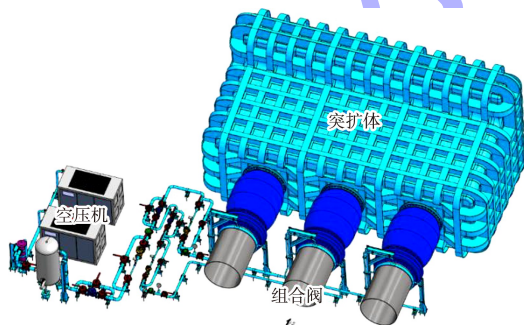


图 1 组合阀

景洪工程控制阀门类型为活塞式调流阀,该类阀门通过调节套筒实现流量的精确控制,可将空化控制在阀口及以外区域,确保阀门安全,已作为控流调压元件成功应用于水库<sup>[3]</sup>、水利工程<sup>[4]</sup>、输水工程<sup>[5]</sup>中。活塞阀作为控流调压阀门,其研究重点为阀门性能参数(流量系数、汽蚀系数

等)<sup>[6]</sup>、阀门开度<sup>[7]</sup>、结构形式以及流动特性<sup>[8]</sup>等。这些研究多基于应用工程实际情况,通过理论分析及数值模拟等方法获取活塞阀内的流场特性,优化阀门结构。研究对象侧重于单阀特性,对于组合阀流场特性的相关研究较少。

组合阀流量比优化问题的实质是多孔紊动射流的流量比(流速比)问题,由于多孔紊动射流流量比主要对流场结构等内流特性产生影响,因此一般采用数值模拟方法进行研究。考虑到该类模型中存在回流、漩流及分离流等复杂流动现象,因此需要对标准模型进行改进<sup>[9]</sup>,在近壁层湍流应力中引入各向异性假设,其计算结果与试验资料吻合度有所提高。但多孔射流目前的研究边界条件依然以无限或半无限空间为主<sup>[10-14]</sup>,三维受限空间内的流动更为复杂,相关研究还有待深入。

本文依托景洪工程,建立三维受限空间多孔紊动射流模型,研究充水阀门段组合阀的运行优化问题,以流场均匀度为主要判别指标,探求组合阀的合理流量比,可供类似工程参考。

## 1 数学模型建立

### 1.1 湍流模型

考虑到组合阀出流对突扩体边壁的冲击会形成明显的回流、涡旋等复杂流动,因此采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型作为计算模型<sup>[15]</sup>。RNG  $k-\varepsilon$  模型是在标准  $k-\varepsilon$  模型的基础上,对  $\varepsilon$  方程进行了改进,增加了  $R_\varepsilon$  项。

$k$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$\varepsilon$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (2)$$

其中:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta_1^3 (1 - \eta_1 / \eta_0)}{1 + \psi \eta_1^3} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

$$\eta_1 = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{(2J_{ij} \cdot J_{ij})} \quad (4)$$

$$J_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $k$  为湍流动能;  $\varepsilon$  为湍流动能的耗散率;  $u_i$ 、 $u_j$  为水流速度分量;  $x_i$ 、 $x_j$  为坐标方向的分量;  $t$  为时间;  $G_k$  为平均流速梯度引起的湍流动能;  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏性系数;  $\alpha_k$ 、 $\alpha_\varepsilon$  分别为  $k$ 、 $\varepsilon$  有效普朗特数的倒数;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为常数, 分别取 1.42、1.68;  $\eta_0$ 、 $\Psi$ 、 $C_\mu$  为常数, 分别取 4.377、0.012、0.084 5。

将式(3)代入式(2)可得:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\text{其中: } C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta_1^3 (1 - \eta_1 / \eta_0)}{1 + \Psi \eta_1^3} \quad (7)$$

## 1.2 三维模型及网格划分

数模计算范围为水力式升船机的充水阀门段, 主要包括阀前整流段、组合阀、突扩体和汇合管 4 个部分。阀前整流段和汇合管段均取 10 倍管径长度, 以便稳定进出口边界条件。组合阀考虑主辅阀的流阻差异, 与阀门原型一致, 中间主阀流量系数较大, 两侧辅阀流量系数较小(流量系数比约为 3:1), 三阀通径相等。三维模型的组合阀采用并列三阀的布置形式, 阀前整流段半径为 8.0 m、长 8 m, 三阀通径  $a$  均为 1.6 m, 突扩体长 5.7 m、宽 10.2 m、高 3.2 m, 汇合管段半径 1.2 m、长 12 m。计算模型范围及边界条件见图 2。

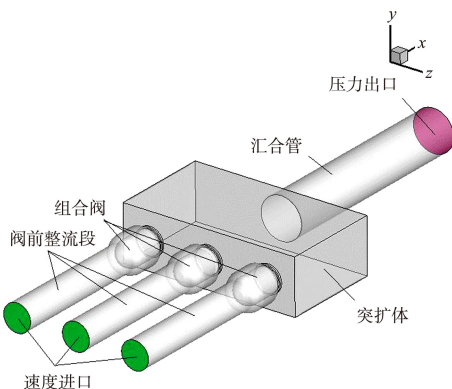


图2 计算模型范围及边界条件

正式计算分析前, 对模型网格有效性进行验证, 采用混合网格划分方法, 尝试多种网格尺度(表 1), 进行网格有效性分析。随阀口区域网格的不断加密, 阀门流量系数不断增大, 当划分尺度为 0.05 m 及以下时, 流量系数不再改变, 表明模型在该划分尺度下, 网格对计算结果不再造成明显影响, 即划分尺度合理。验算结果表明, 模型整体使用 0.1 m、局部加密采用 0.05 m 的网格尺度时的计算效率较佳, 精度合适, 基本模型的网格单元总数约 150 万个。模型网格及局部细节见图 3。

表1 网格有效性验证

加密 尺度/ m	网格 数量/ 万个	进口平均 流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	出口 压力/ kPa	进口平 均压力/ kPa	阀门 流量 系数
0.200	12	5.8	100	245	0.341
0.150	27			223	0.370
0.100	88			211	0.389
0.075	130			204	0.402
0.050	210			198	0.414
0.025	390			198	0.414

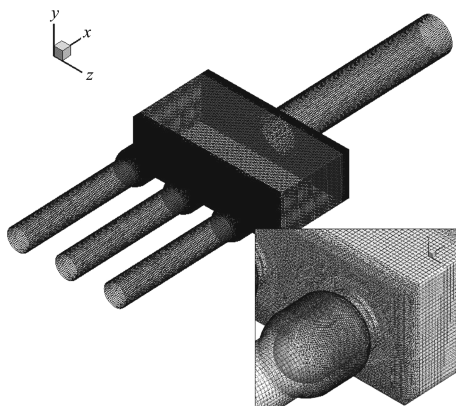


图3 模型网格划分

## 1.3 模型验证

模型验证通过与物模试验相同工况进行对比计算。物理模型同样基于景洪充水阀门段, 适当概化, 突扩体采用有机玻璃制作, 采用 1:10 的模型比尺。验证对比区域选取主阀后突扩体廊道顶沿程测点, 见图 4。验证结果见图 5, 可以看出, 计算值与试验值偏差不大, 验证工况下最大偏差不超过 5%, 满足模拟精度要求, 说明模型概化合理, 可以基于该模型开展组合阀流量比的相关研究。

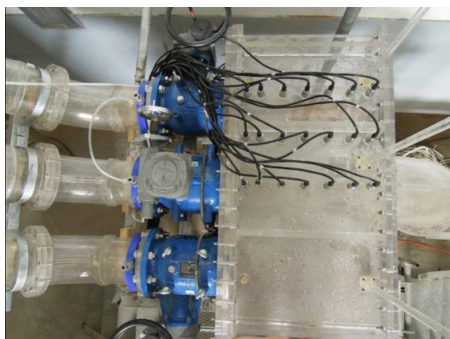


图4 模型实物

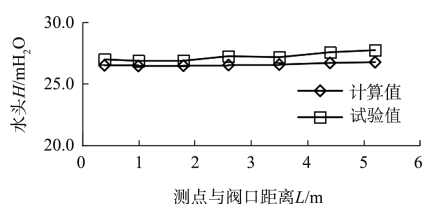


图5 验证计算结果对比

## 2 计算结果分析

前期研究成果表明<sup>[16]</sup>, 无论是主辅阀单独工作, 还是一主一辅联动, 阀门段流场分布及水力特性均不太理想, 存在明显的偏流, 局部压力较高, 紊动较强, 存在低压区甚至负压区, 在实际操作中应尽量避免。基于流场典型轴线流速无量纲分析和均匀度计算, 确定了三阀联动是实际操作中最可取的方式。其中, 在一主一辅工况下, 流场计算结果表明, 主辅阀流量比约为 3:1 时, 流场结构将发生改变。基于此, 本文就三阀联动时的组合阀合理流量比问题进行研究。以总流量  $30.0 \text{ m}^3/\text{s}$  为基准, 进行不同流量比方案选择见表 2。

表2 组合阀合理流量比方案

工况	辅阀 流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	主阀 流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	总流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	出口 压力/ kPa	研究 思路
1	2.5	7.5	12.5	100.0	三阀联动
2	5.0	15.0	25.0		
3	7.5	22.5	37.5		
4	10.0	30.0	50.0		
5	3.0	24.0	30.0	100.0	总流量固定, 改变流量比
6	6.0	18.0			
7	9.0	12.0			
8	10.0	10.0			

### 2.1 流场均匀度分析

为定量分析组合阀不同运行方式下, 阀门段流场均匀性的具体差异, 用阀门段横向剖面的 3 条横轴线( $x$  为  $0.5a$ 、 $2.0a$  和  $3.5a$ )代表阀门段内部流场, 以流场内最大流速  $v_{\max}$  和阀门通径  $a$  为比尺, 对各运行方式下的流速分布进行无量纲分析, 计算其均匀度(离散系数), 讨论组合阀运行方式与流场均匀性的关系, 确定组合阀的最优流量比。其中, 流场均匀度由离散系数  $C_v$  表征, 其公式为:

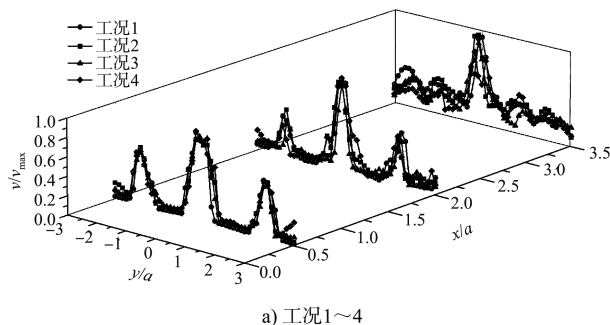
$$C_v = \frac{\delta v}{\bar{v}} \quad (8)$$

$$\delta v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (9)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (10)$$

式中:  $v_i$  为流场样本  $i$  点的流速;  $n$  为样本总数;  $\delta v$  为流速标准差;  $\bar{v}$  为平均流速。离散系数可用于对比均值不同的数据列的离散程度, 适用于分析流场的均匀性。离散系数越小, 代表均匀度越好。

不同工况下的流场特征断面均匀度对比见图 6。可以看出, 三阀联动、主辅阀流量比为 3:1 时, 不同流量下组合阀阀后突扩体内流场均匀度均高度一致, 说明三阀联动时阀门段流场结构较为稳定。不同流量比工况下, 随主辅阀流量比的不断减小, 主阀阀后沿程均匀度越来越高, 辅阀阀后沿程均匀度越来越低, 考虑到辅阀位于突扩体两侧, 对突扩体边壁影响更为明显, 因此整体而言, 当主辅阀流量比约为 3:1 时, 流场整体均匀度最优。



a) 工况1~4



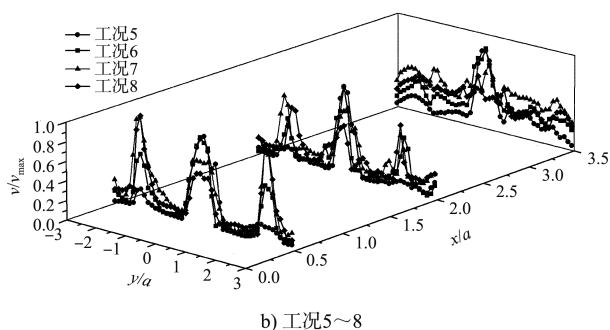
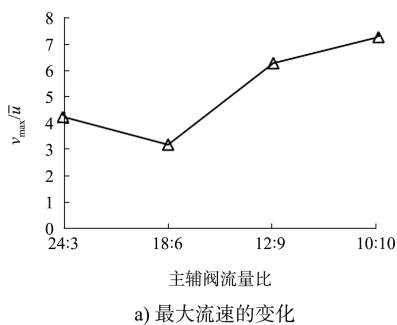


图6 流场特征断面均匀度对比

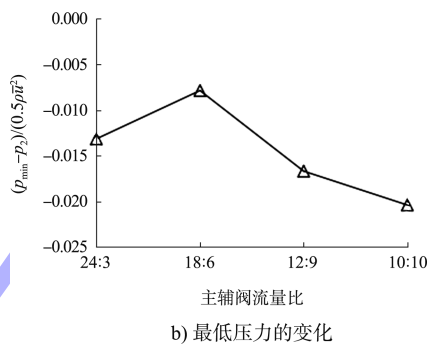
## 2.2 流场水力特征值分析

为进一步综合评价组合阀阀门段的流场特性,对流场主要水力特征值随流量比的变化规律进行研究,将特征值以汇合管稳定断面平均流速  $\bar{u}$  进行无量纲化可得图7,其中  $p_{\min}$  为流场内最低压力,  $p_2$  为下游稳定压力,  $k_{\max}$  为流场内最大紊动能。可以看出,不同主辅阀流量比下,流场最高流速随主阀流量  $Q_z$  的减小(辅阀流量  $Q_f$  增大)而先减小后增大。 $Q_z:Q_f=3:1$  时,流场最高流速最小。对于本文研究模型,高流速区位于阀口附近,流速越高越容易诱生空化。因此在总流量相等的前提下,流场内最大流速越小越有利于抑制空化初生。流场内最低压力随主阀流量的减小(辅阀流量的增大)而先升高后降低。 $Q_z:Q_f=3:1$  时,流场内最低压力最高。局部流场压力越低越容易产生空化,因此在总流量相等的前提下,流场内最低压力越高越有利于抑制空化初生。流场内最大紊动能随主阀流量的减小(辅阀流量的增大)而降低。 $Q_z:Q_f<3:1$  时,紊动能的降幅明显减小。

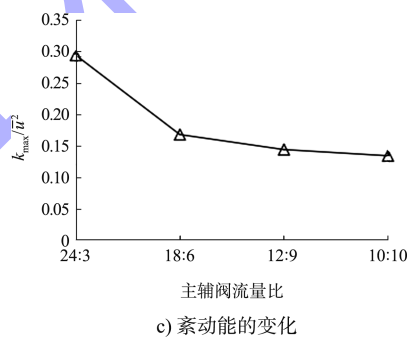
综上可知,采用三阀联合运行,固定总流量、改变主辅阀流量比时:若主阀流量较大,主阀射流卷吸作用过强,会导致突扩体内整体压力偏低;此时适当减小主阀流量,增加辅阀流量,可以提高突扩体的整体压力,降低流场内的最高流速,提升最低压力,有利于抑制空化,增强阀门段的抗空化能力。基于以上研究结果可知,景洪工程组合阀较合理的流量比  $Q_z:Q_f$  约为 3:1,与阀门流量系数成正比。



a) 最大流速的变化



b) 最低压力的变化



c) 紊动能的变化

图7 流场主要水力特征值随主辅阀流量比的变化

## 3 结语

1) 三阀联动是组合阀实际操作中最为可取的方式。

2) 基于三阀联动,固定总流量、改变流量比,发现主辅阀流量比约为 3:1 时,阀门段整体压力最高,流场内的最高流速最小,最低压力最高,有利于抑制空化。

3) 主辅阀流量比约为 3:1 与组合阀流量系数吻合,说明组合阀的合理流量比与流量系数成正比。

4) 本文基于现有突扩体进行组合阀流场特性研究,由于现场布置条件有限,该突扩体体形并非最优,对于组合阀阀后突扩体的最优体形及组合阀的空间布置形式均有待进一步深入研究。

(下转第 195 页)