

三峡船闸底扩与顶扩体型水力特性综合研究^{*}

胡 亚 安 张瑞凯^{* *}

(南京水利科学研究院 南京 210029)

摘 要 三峡船闸阀门段廊道体型一直是船闸单项技术设计的焦点。针对底扩与顶扩两种廊道体型,通过多项模型试验,从水力特性、空化及振动特性等方面论证了三峡船闸采用底扩廊道体型的优越性。

关键词 三峡 船闸 底扩 顶扩 水力特性 廊道体型 空化 振动

分类号 TV 663.9

输水阀门是船闸输水系统的咽喉,其正常运转与否直接决定着船闸的安全运行。国内外已建船闸运行经验表明,对于高水头船闸,最关键的技术难题是如何防止阀门在动水开启或事故关闭过程中的空化和空蚀问题。三峡双线连续五级船闸,是世界上规模最大、技术最为复杂的通航建筑物,总水头 113.0m,中间级船闸作用水头达 45.2m,居世界之冠,其输水阀门空化空蚀问题尤为突出,并一直是船闸单项技术设计审查的主要问题。为此,国内学者进行了大量研究,提出了快速开启阀门、廊道体型优化及门楣通气等措施^[1]。鉴于三峡船闸已确定采用开启时间 $t_v = 1 \sim 2\text{min}$ 的快速开启方式,因此,门后廊道体型成为影响阀门段空化的主要因素。本文针对两种阀门段廊道体型——底扩与顶扩进行了综合研究,论证了三峡船闸采用底扩体型的优越性。

1 底扩体型研究进展

高水头船闸阀门段廊道体型可分为顶扩、平顶、突扩三类,国内外大多数船闸采用了平顶或顶扩体型。三峡船闸前期研究成果表明,在阀门处廊道初始淹没水深为 26.0m 的控制条件下,以 $t_v = 1\text{min}$ 双边开启时,平顶及顶扩体型仍不足以抑制阀门底缘空化,尤其单边阀门运行时空化更为严重。

70 年代,前苏联通过试验研究,提出了可实现阀门底缘超空化的突扩廊道体型,但未付诸于实践。针对三峡船闸,对多种突扩体型,包括顶部突扩、侧向突扩、底部突扩以及它们之间的组合进行了大量试验研究,提了了结构简单、受力明确的单纯底部扩大体型(两侧不扩大),通过对阀门段流场的数值计算,优化了升坎线型,避免了升坎处较易发生的分离型空

* 收稿日期: 1997-4-7; 修改稿日期: 1997-9-1。

* 国家自然科学基金与中国长江三峡工程开发总公司联合资助项目(No. 59493600-II)。

* * 参加人员还有须清华、李云、陈泰春、凌国增、阎诗武、严根华、黄岳等。

化。两种廊道体型布置见图 1。

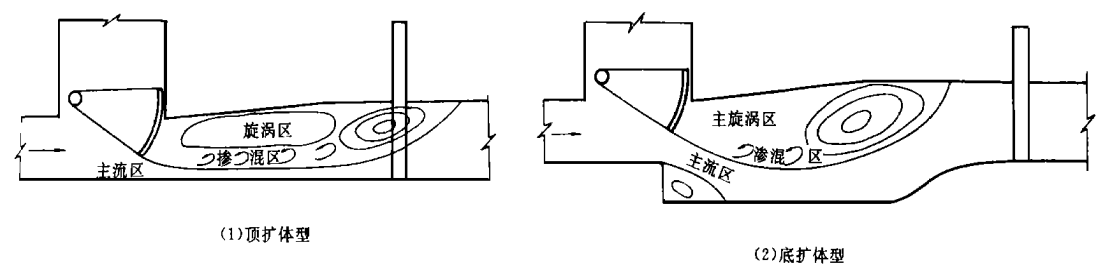


图 1 阀门段廊道布置及阀门段流态
Fig. 1. Flow pattern in valve section

2 模型设备简介

为全面比较阀门后两种廊道体型水力特性，作了以下模型试验：

- (1) 比尺为 1：30 的中间级船闸水工整体模型试验。
- (2) 比尺为 1：25 的反弧形输水阀门非恒定流常压及减压模型试验。

船闸的输水过程具有非恒定流特性，特别是在阀门快速开启或动水关闭过程中，阀门动边界的作用以及阀门井水流的参与、输水系统惯性水头的消长，使得这一非恒定流特征尤为显著，传统的恒定流减压试验方法不能准确模拟阀门连续开启过程中水流空化特性，为此研制了非恒定流减压试验设备^[2]，采用了非恒定流空化试验方法，以便较真实地模拟实际运行条件下的阀门空化状态。

- (3) 比尺为 1：25 的输水阀门流激振动试验。

3 顶扩、底扩体型水力特性综合比较

3.1 顶扩及底扩体型流态

通过流场显示及应用图像采集技术获得了两种体型比较清晰的水流流动图谱（见图 1）。对于顶扩体型，在阀门局部开启时，门后流态一般分为孔口主流、掺混区及漩滚区，在掺混区与漩滚区界面上，由于强剪切作用，形成不同尺度的涡街。

与顶扩相比，底扩体型使阀门后流态发生了明显的变化。一方面，底缘主流流向改变，主流对底缘的攻角发生较大的变化，使底缘对主流的挑流作用减弱，削弱了梢涡强度；另一方面，底扩体型中底缘主流不受顶扩体型廊道底板边界的约束，水流收缩程度小（相对于跌坎射流迹线）；剪切层紊动能降低，也导致门后漩涡能量减弱，频率降低。底扩体型的特有流态，对改善阀门工作条件将极为有利。

3.2 两种体型输水特性

阀门段体型的改变对整个输水系统阻力系数影响较小，模型测定的顶扩及底扩两种廊道体型输水特征值接近。阀门全开后，系统流量系数分别为 0.516 和 0.509，原型与模型输水时间均满足不大于 12min 的设计要求。

3.3 顶扩及底扩体型阀门段水流压力脉动特性

在两种体型阀门段分别布置了多台压力传感器，详细测量了非恒定流压力脉动特性。测点布置见图 2

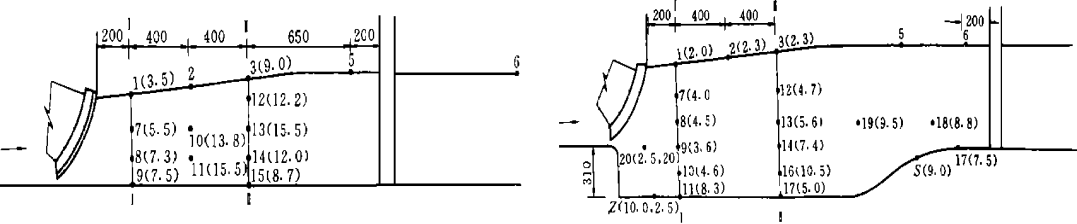


图 2 阀门段测点布置及相应点压力脉动 $2A_{\max}$ 值

Fig. 2. Pressure distribution ($2A_{\max}$) in valve section

两种体型廊道顶部相对应测点压力过程线见图 3 (图中, n 为阀门相对开度)。可见, 底扩体型门后廊道水流压力升高约 3.0~6.0m, 同时压力脉动显著降低。

在 $t_v = 1\text{min}$ 双边开启时两种体型各测点压力脉动峰值 ($2A_{\max}$, 单位: m) 亦标注于图 2 中。分析比较可知, 廊道侧壁各测点压力脉动直接地反应了孔口主流、掺混与漩滚区之间的相互影响, 掺混区内因小尺度漩涡紊动剧烈, 压力脉动亦较大。而廊道顶部及底部压力脉动主要分别受漩滚区及孔口主流控制。

在相同侧壁断面, 底扩腔体压力脉动远小于顶扩, 说明由于底扩腔体的存在, 阀门段水流流态的改变, 导致掺混区及漩滚区紊动能相对降低。底扩体型紧靠阀门的 I - I 断面各测点压力脉动较小, 而顶扩体型门后压力脉动较为强烈, 即底扩体型的存在使阀门附近水流压力脉动得到较大程度的抑制, 有利于改善阀门工作条件 (如振动等)。

经优化的底扩体型并未出现因孔口主流流向改变而冲击廊道底板、产生很大压力脉动的现象, 亦说明采用的底扩深度是适宜的。

3.4 顶扩及底扩体型空化特性

3.4.1 正常运行方式下阀门空化特性

(1) 临界淹没水深试验 不同开启速率下两种廊道体型阀门底缘临界空化所对应的初始淹没水深 H_{di} 见图 4, 当实际淹没水深 $H_d > H_{di}$ 时, 整个开启过程阀门底缘无空化, 该值可直接用以确定输水廊道埋设深度。可见, 无论是快速开启还是慢速开启, 底扩体型底缘临界空化所对应的初始淹没水深 H_{di} 值均大大减小, 约为顶扩体型的 50%, 说明底扩体型抗空化性能显著, 且对不同开启方式适应性更强。对于两种体型, 快速开启抑制阀门底缘空化的作用均十分明显, 最不利的阀门开启时间为 $t_v = 5\text{min}$ 。快速开启方式可充分利用水流惯性水头, 降低了工作水头, 大大提高了门后压力, 从而改善了阀门空化条件。

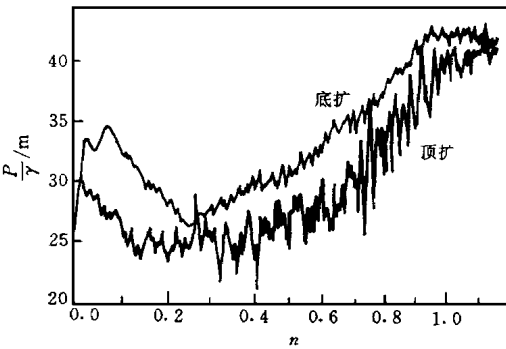


图 3 底扩与顶扩体型相应测点压力过程线

Fig. 3. Comparison of culvert pressure behind valve between top expansion and bottom sudden expansion culvert

(2)原型预测 与水工水力学试验有较大差异的是,在船闸水力学试验中,因原模糙率和 Re 数的差异,原型输水效率提高,相应流量增大,门后压力降低,导致原型空化条件恶化,即原型工作空化数存在明显缩效应。利用经统一校正法^[3]校正后的水力特征值对原型设计条件下阀门工作空化数进行了计算,通过由试验确定的阀门临界空化条件预测了原型设计条件下阀门空化状态。

经校正后,以 $t_V=1\text{ min}$ 双侧阀门同步开启时顶扩和底扩体型原型不发生空化所要求的最小淹没水深分别为 28.0m 和 17.0m,而单侧阀门开启时其值分别为 45.0m 和 28.0m。

可见,在原型设计条件(初始淹没水深 26.0m)下,顶扩体型双边开启时阀门处于临界空化状态,底扩体型能满足底缘无空化要求,且有 9.0m 的富裕度;单边开启时,顶扩体型将发生较强空化,而底扩体型处于临界状态,基本能满足无空化要求。

3.4.2 非正常运行方式下阀门空化特性

在船闸输水过程中,阀门中途事故停机情况偶有发生,从增加高水头船闸运行的安全、可靠性出发,设计要求阀门能进行动水关闭。由于这类工况水流的惯性水头作用消失及门后流态发生骤变,阀门空化条件大为恶化。两种体型事故运行方式下阀门空化特性见表 1。

表 1 非正常运行工况阀门空化特性(作用水头 45.2m、初始淹没水深 26.0m)

Table 1. Cavitation characteristics while valves stopped suddenly or valves are dosing under flowing water

组次	工 况	空 化 特 性	
		顶 扩	底 扩
1	$t_V=1\text{ min}$ 开启至 $n=0.4$ 开度停机	停机 40s 后底缘及其下游剪切层出现较强的片状空化,持续时间较长。	停机 30s 后阀门底缘下游出现间歇性空化,强度较弱。
2	$t_V=1\text{ min}$ 开启至 $n=0.6$ 开度停机	停机 35s 后底缘及其下游剪切层出现较强空化。	无空化
3	$t_V=1\text{ min}$ 开启至全开,停 20s,再以 $t_V=1\text{ min}$ 关闭。	关闭过程中在 $n=0.8\sim 0$ 开度范围发生极为强烈的片状空化,噪声声压级增加约 50dB	关闭过程中在 $n=0.4\sim 0$ 开度范围发生较强空化。
4	$t_V=1\text{ min}$ 开启至全开,停 2min,再以 $t_V=1\text{ min}$ 关闭。	关闭中在 $n=0.8\sim 0.2$ 开度范围发生较强空化。	关闭基本无空化
5	$t_V=1\text{ min}$ 开启至全开,停 2min,再以 $t_V=2\text{ min}$ 关闭。	关闭中在 $n=0.7\sim 0.2$ 开度范围发生空化。	无 空 化
6	$t_V=1\text{ min}$ 开启至全开,停 1min,再以 $t_V=2\text{ min}$ 关闭。	空 化 变 强	无 空 化

由表 1 可知,对于非常运行工况,底扩体型抗空化性能明显优于顶扩。

3.5 顶扩及底扩体型输水阀门流激振动特性

船闸阀门的振动系典型的水弹性振动问题,依水弹性相似准则,设计研制了 1:25 水弹性阀门结构模型及相应的启闭吊杆系统。阀门上装有微型脉动压力及振动加速度等传感器。在

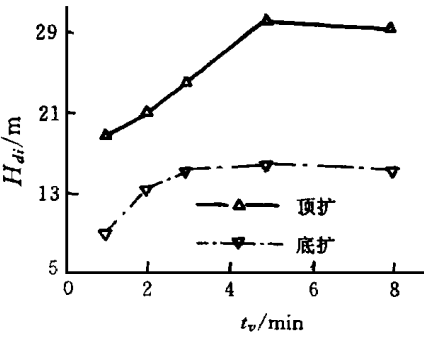


图 4 阀门底缘临界空化对应的初始淹没水深

Fig. 4. Corresponding initial submergence under critical cavitation condition at valve bottom leaf

非恒定流减压试验设备中,对顶扩及底扩两种廊道体型进行了常压情况下以及考虑空化荷载作用下的输水阀门流激振动试验。

由于船闸输水具有极明显的非恒定流特征,压力及振动等物理量为非平稳随机过程,为此采用了自适应最小二乘格型算法处理阀门开启过程非平稳压力脉动信号。

3.5.1 常压条件下的阀门流激振动试验

两种廊道体型 $t_V=1\text{min}$ 开启时阀门面板上测点各开度脉动压力均方值见图 5。比较可知,底扩体型值明显小于顶扩,说明底扩体型中门体所受水动力荷载小于顶扩体型。同前述门后压力特性及流态分析得出的结论一致。

作为水动力荷载在门体上反映,两种廊道体型以 $t_V=1\text{min}$ 开启时各开度阀门振动均方根值见图 6。

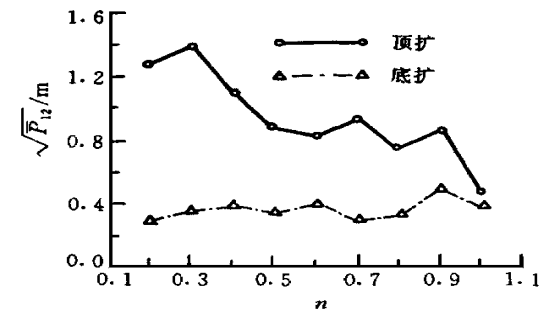


图 5 阀门面板典型测点压力脉动均方根值
Fig. 5. Relationship between the mean square deviation of pressure at typical point of valve skin plate and the valve opening

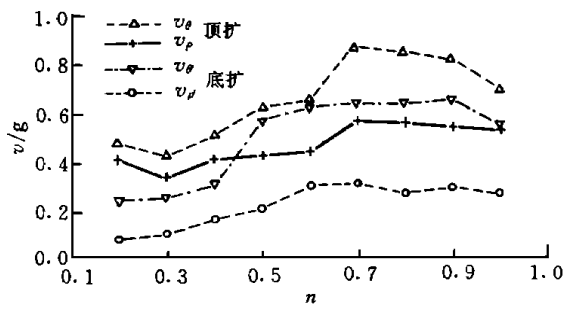


图 6 阀门振动均方根值
Fig. 6. Curves of the mean square deviation of the valve vibration versus the valve opening

由图 6 可见底扩体型各开度阀门径向(V_ρ)、切向(V_θ) 振动量均小于顶扩相应值,尤以反映门后漩滚力作用的径向振动量相差较大。因而,底扩体的存在不仅未加剧阀门振动,反而削弱了门体水动力荷载,抑制了阀门振动。

3.5.2 减压条件下阀门流激振动试验

利用非恒定流减压试验设备首次进行了在空化荷载激励下的阀门流激振动试验。

图 7 给出了空化荷载作用下各开度阀门振动值,可见在 $n=0.2\sim 0.4$ 开度范围,底缘发生了空化,在这一特殊荷载作用下阀门振动量显著加大。

原型观测成果也指出,空化是阀门振动一个重要 的激振源,葛洲坝一号船闸在采取措施减弱了阀门空化的同时^[4],原存在的严重声振基本消失。显然,底扩体型在较大程度上抑制了阀门空化,同时也可防止阀门出现危害振动。

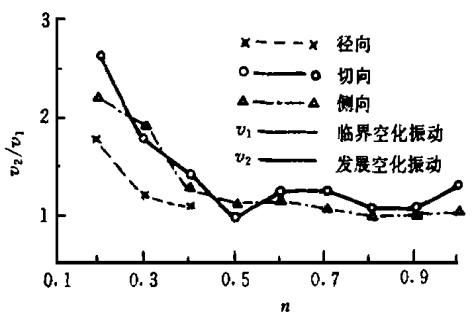


图 7 空化荷载作用下阀门振动值
Fig. 7. Vibration loads under cavitation condition

5 结 语

(1) 底扩体型的特有流态削弱了底缘水流梢涡强度及门后漩滚强度，在一定程度上提高了门后压力并降低了底扩腔体压力脉动。

(2) 底扩廊道体型大大提高了阀门抗空化性能，不仅在双边阀门 $t_v=1\text{min}$ 正常运行时确保阀门段不发生空化且存在9.0m的富裕淹没深度，而且基本解决了长期未能解决的三峡船闸单边开启阀门空化问题。另外，底扩体型能适应阀门快速开启过程中可能出现的事故停机及动水关闭工况。

(3) 底扩廊道体型输水阀门水动力荷载减少，阀门振动值亦小于顶扩体型相应值。空化是阀门的一个最重要的激振源，与顶扩相比，底扩在较大程度上抑制了阀门空化，因而也为避免阀门出现有害振动提供了强有力的保证。

参 考 文 献

- 1 胡亚安等. 反弧形输水阀门底缘空化减免措施研究. 水利水运科学研究. 1994, 6: 1~2
- 2 凌国增等. 船闸输水阀门非恒定流减压模型试验研究. 泄水工程与高速水流论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 303~307
- 3 张瑞凯等. 船闸水力学模型缩尺影响及校正方法的研究. 水力发电. 1991, (8)
- 4 胡亚安等. 葛洲坝一号船闸输水阀门空化特性原型监测. 水科学进展. 1994, 5 (3): 235~241

Synthetic Research on Hydraulic Characteristics of Culvert Shapes behind Valve for Three Gorges Ship Lock

Hu Yaan and Zhang Ruikai

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029)

Abstract: The selection about culvert shape behind valve is one of the key problems in hydraulic design for Three Gorges ship lock. Comparisons of hydraulic natures such as flow pattern, pressure fluctuation, cavitation, and vibration between two kinds of culvert shape behind valve, top expansion and bottom sudden expansion, are carried out in this paper. Due to the obvious difference, bottom sudden expansion culvert is used in Three Gorges ship lock, which can fulfill the operating conditions of filling valve.

Key words: Three Gorges; ship lock; top expansion; bottom expansion; hydroaualic characteristics; culvert shape behind valve; cavitation; vibration.